



**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА**

Мр Милан В. Мутавцић

**МОДЕЛИРАЊЕ РЕПАРАТУРНОГ И ПРОИЗВОДНОГ
НАВАРИВАЊА РАДНИХ ДЕЛОВА
ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ**

Докторска дисертација

Крагујевац, 2015. године

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА

I Аутор
Име и презиме: Милан Мутавцић
Датум и место рођења: 04. 08. 1957., Дрен, З. Поток, Р. Србија
Садашње запослење: ВТШСС, Лепосавић, Р. Србија.
II Докторска дисертација
Наслов: Моделирање репаратурног и производног наваривања радних делова грађевинске механизације.
Број страница: 340
Број слика: 257
Број библиографских података: 200 (двеста).
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Крагујевац.
Научна област (УДК): Производно машинство и индустријски инжењеринг (621.791.92.669.018.25/621.86.061)
Ментор: Др Вукић Лазих, ред. проф.
III Оцена и одбрана докторске дисертације
Датум пријаве теме: 10. 02. 2009.
Број одлуке и датум прихватања теме: 01-1/1721-7 од 21. 05. 2009.
Комисија за оцену подобности теме и кандидата: <ol style="list-style-type: none">1. Др Александар Седмак, ред. проф., Машински факултет, Београд2. Др Мирослав Бабић, ред. проф., Машински факултет, Крагујевац3. Др Ружица Николић, ред. проф., Машински факултет, Крагујевац4. Др Радица Прокић-Цветковић, ванр. проф., Машински факултет, Београд5. Др Вукић Лазих, ванр. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац.
Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације: <ol style="list-style-type: none">1. Др Александар Седмак, ред. проф., Машински факултет, Београд2. Др Мирослав Бабић, ред. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац3. Др Ружица Николић, ред. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац4. Др Радица Прокић-Цветковић, ред. проф., Машински факултет, Београд5. Др Вукић Лазих, ред. проф., Факултет инжењерских наука, Крагујевац, ментор.
Датум одбране докторске дисертације: 2015.

ПРЕДГОВОР

Иако се у привредно развијеним земљама све више придаје значај истраживању, развоју и примени савремених технологија наношења металних превлака, код нас још то није случај и оне нису нашле ширу примену. Разлога за то има више, а основни разлог је недовољан обим истраживања из ове области, и непознавање техно-економских предности које се могу остварити њиховом применом. Наваривање и метализација се сврставају у савремене технологије наношења металних превлака. Извођење ових технологија скоро увек прате неке негативне појаве, али и поред тога њихова примена доноси низ предности у односу на неке друге технологије, било да је реч о изради нових или обнављању оштећених делова различитих техничких система.

Формирање општег модела процеса наваривања заснива се на комплексним и дуготрајним теоријским и експерименталним истраживањима, на моделима и реалним радним деловима, при различитим условима експлоатације. Ова истраживања подразумевају мултидисциплинарни приступ и трансфер специјализованих знања из више научних области. Највеће признање за уложен труд при изради овог рада јесте, ако добијени резултати ових истраживања могу корисно послужити као основа и другим истраживањима, при решавању проблема моделирања репаратурног или производног наваривања различитих делова техничких система. Извођење овако обимних и различитих експерименталних истраживања и добијање оволиког броја резултата, није било могуће без несебичне помоћи већег броја установа, организација и појединаца. Осећам људску и моралну обавезу да поменем неке установе, организације и појединце, због несебичне помоћи при изради овог рада.

Посебно су ми помогле следеће установе и организације: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Рударско-геолошки факултет у Београду, Институт за путеве у Београду, Институт за материјале Србије у Београду, Централна лабораторија-Застава у Крагујевцу, Електроде Јесенице из Словеније, Предузеће за путеве у Крагујевцу и др. Ове установе и организације су ми и поред својих обавеза ставиле на располагање своју опрему и стручно особље, обезбедиле потребан материјал, и пружиле различите услуге при извођењу сложених експерименталних истраживања.

Посебну захвалност дугујем проф. др Милораду Јовановићу, ред. проф. Факултета инжењерских наука у Крагујевцу и ментору проф. др Вукићу Лазићу, ред. проф. Факултета инжењерских наука у Крагујевцу на свестраној помоћи при изради овог рада. Такође, Ненаду Петровићу, дипл. маш. инж. захваљујем се на професионалном приступу и несебичном труду ради што бољег изгледа овог рада.

За помоћ при извођењу експерименталних истраживања захваљујем се следећим појединцима: проф. др Богдану Недићу, ред. проф. Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, за помоћ при извођењу триболошких испитивања и сређивању добијених резултата; др Рајку Чукићу, доценту Факултета инжењерских наука у Крагујевцу, за помоћ при извођењу техно-економске анализе добијених резултата истраживања; др Браниславу Недељковићу и његовим сарадницима, на помоћи око припреме бројних металографских узорака, мерења тврдоће, читавања макро и микроструктуре, израде фотографија и електронских записа, припрема блокова и дискова за триболошка испитивања и др.; Слободану Тимотијевићу и Драгану Ивановићу за изведена бројна наваривања на моделима и реалним деловима, који су били неопходни за ова обимна експериментална истраживања.

Најсрдачније се захваљујем колегама и сарадницима из Предузећа за путеве у Крагујевцу, али и многим другима, који су дали значајан допринос при изради овог рада, а нису споменути, иако су то заслужили. Такође, велику захвалност дугујем и својој породици на помоћи, стрпљењу и разумевању при изради овог рада.

У Крагујевцу, мај 2014. године

Милан Мутавазић

ИЗВОД АУТОРА

У овом раду (дисертацији) разматрају се савремене методе обнављања оштећених радних делова грађевинске механизације, насталих под дејством различитих процеса хабања и корозије. Реч је углавном о наваривању које налази све ширу примену при наношењу металних превлака, отпорних на хабање и корозију. Избор одговарајућег поступка и прописивање оптималне технологије наваривања, било да је реч о репаратурном или производном наваривању, од изузетног је значаја, због продужења радног века и смањења трошкова одржавања грађевинске механизације. Да би се одредила оптимална технологија наваривања, односно моделирање процеса наваривања радних делова грађевинске механизације, неопходно је било извести истраживања на већем броју наварених физичких модела и реалних радних делова, израђених од различитих врста челика. Такође, неопходно је било одредити нека петрографска, физичка, механичка и технолошка својства грађевинског материјала, односно камена.

Избор поступка наваривања и одређивање најповољније технологије наваривања у великој мери зависи од својстава основних материјала. Својства основног материјала и захтевана својства навара су улазни параметри процеса наваривања, а излазни параметри су својства чистог метала навара. Да би се добио захтеван квалитет навара, најчешће није довољно само правилно изабрати поступак наваривања и додатни материјал, већ правилно прописати параметре наваривања и одговарајућу технику наношења навара. Избором различитих поступака наваривања, више врста додатних материјала, варијацијом параметара наваривања и применом различитих техника, створени су услови за оптимизацију процеса наваривања и добијање захтеваних излазних својстава навара.

Код основних материјала углавном је одређиван хемијски састав, најважнија механичка својства, оцењивана њихова заварљивост и отпорност на хабање. Провера квалитета навара може се извести према различитим критеријумима, мерењем тврдоће, испитивањем микроструктуре и провером отпорности на хабање. Бројна експериментална истраживања на моделима довела су до успостављања везе између улазних и излазних параметара процеса наваривања. Полазна технологија наваривања одабрана је на основу резултата моделских испитивања. За проверу, односно верификацију примењене технологије, послужили су резултати испитивања на реалним радним деловима и при реалним условима експлоатације. Иако је извођење сваког процеса наваривања готово уникатан посао, јер захтева технологију прилагођену сваком радном делу, установљена је општа процедура, односно модел наваривања за групе сличних делова грађевинске механизације.

Основни циљ ових истраживања је, да се на конкретним примерима репаратурног или производног наваривања, одреди процедура и оптимална технологија, која ће обезбедити добијање наварених радних делова захтеваног квалитета уз минималне трошкове. Како се то може остварити показују резултати теоријских и експерименталних истраживања приказаних у овом раду (дисертацији). Добијени резултати указују на оправданост примене репаратурног или производног наваривања код великог броја радних делова грађевинске механизације, при чему се остварују значајне уштеде на њеном одржавању, јер се знатно продужава радни век и смањују губици услед застоја за време експлоатације.

Обимна теоријска и експериментална истраживања, и сложена процедура провере квалитета нанетих металних превлака, указују да се репаратурни радови могу изводити само у погонима који располажу адекватном опремом и одговарајућим стручним кадром, и да на овим пословима могу успешно радити само они којима је одржавање техничких система професија, а не успутно занимање.

Кључне речи: грађевинска механизација, трење, хабање, репаратурно наваривање, производно наваривање, испитивање са разарањем, техно-економска анализа.

AUTHOR'S ABSTRACT

In this paper (dissertation) are considered contemporary methods of reparation of the damaged working parts of the civil engineering mechanization, where the damaged was caused due to action of various wear and corrosion processes. The subject is mainly hard-facing, which is all the more widely applied in metals coatings deposition, resistant to wear and corrosion. The selection of the appropriate procedure and prescribing the optimal hard-facing technology, whether one speaks about reparatory or manufacturing hard-facing, are of the utmost importance, due to extended working life and reduced maintenance costs of civil engineering mechanization. In order to determine the optimal hard-facing technology, namely to model the hard-facing process, it was necessary to perform hard-facing and research on a larger number of physical models as well as of the real machine parts, made of different types of steels. It was also necessary to determine certain petrographic, physical and technological properties of the building materials, namely stones and rocks.

The hard-facing selection procedure and determination of the optimal hard-facing technology depend, to the great extent, on the properties of the base metals. The base metals properties and the required properties of the hard-faced layers are the input parameters of the welding process, while the output parameters are properties of the pure weld metal. In order to obtain the hard-faced layer of the required quality, it is not sufficient, most frequently, just to adequately select the hard-facing procedure and the filler metals, but it is also necessary to prescribe parameters of the hard-facing process and the appropriate technology of hard-faced layers deposition. Through selection of different hard-facing processes, several filler metals, variation of hard-facing parameters and application of various welding techniques, the conditions were created for optimization of the hard-facing process and obtaining of the required output properties of the hard-faced layers.

For the base metals, mainly the chemical compositions were determined, as well as the most important mechanical properties, their weldability and wear resistance were evaluated. The hard-faced layer quality checking can be performed according to various criteria, by measuring hardness, investigating the microstructure and by testing the wear resistance. Numerous experimental investigations led to establishing the relationship between the input and the output hard-facing process parameters. Determination of the initial technology of hard-facing was done based on results of the model investigations. For checking, namely verification of the applied technology, served results of investigation on the real working parts and in the real operating conditions. Though the conducting of each hard-facing process is a unique task, since the technology adjusting to each working part is required, the general procedure was established, namely the model of hard-facing for groups of similar part of the civil engineering mechanization.

The fundamental goals of these investigations is to determine, on concrete examples of reparatory or manufacturing hard-facing, the procedure and optimal technology, which would guarantee obtaining of the hard-faced working parts with required quality and with minimal costs. How that is possible to achieve is shown by results of theoretical and experimental research performed within this paper (dissertation). Results obtained thus far point to validity of application of the reparatory or manufacturing hard-facing for numerous parts of the civil engineering mechanizations, where the significant savings were realized in maintenance costs, since the working life of components was extended and losses due to down-times during exploitation were reduced .

Voluminous theoretical and experimental research, and the complex verification procedure of deposited metal coatings quality, suggest that the reparatory tasks can be performed only in plants that are have at their disposal the adequate equipment as well as the expert staff, and that on these tasks can work only personnel to whom maintenance of the technical systems is a profession and not just casual interest.

Keywords: civil engineering mechanization, friction, wear, reparatory hard-facing, production hard-facing, destructive testing, techno-economic analysis.

ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА И СКРАЋЕНИЦА

A,		- Аустенит
A,		- Коефицијент који се односи на отпор клизању
A ₀ ,	°C	- Температура (T=210°C) при којој магнетични цементит пролази у немагнетични
A _{5,65} ,	%	- Јединично прекидно издужење кратке епрувете (I ₀ =5%)
A _{11,30} ,	%	- Јединично прекидно издужење дуге епрувете (I ₀ =10%)
A _{C1} ,	°C	- Температура почетка еутектоидне трансформације ферита и цементита у аустенит при загревању
A _{C3} ,	°C	- Температура завршетка трансформације ферита у аустенит при загревању подеутектоидних челика
A _{Cm} ,	°C	- Температура завршетка растварања секундарног цементита у аустениту при загревању надеутектоидних челика
A _r ,	m ²	- Реална контактна површина
A _s ,	m ²	- Површина смицања (A _s =A _r)
A _{r1} ,	°C	- Температура завршетка еутектоидне трансформације аустенита у ферит и цементит при хлађењу
A _{r3} ,	°C	- Температура почетка трансформације аустенита у ферит при хлађењу подеутектоидних челика
ARA,		- Дијаграми анизотермичког преображаја аустенита
A _{rCm} ,	°C	- Температура почетка издвајања секундарног цементита из аустенита при хлађењу надеутектоидних челика
A _T ,	m ²	- Реална елементарна контактна површина
AV,		- Анализа вредности
A _z ,	m ²	- Површина попречног пресека једнопролазног навара (навара)
a,	m ² /s	- Коефицијент температурске проводности (температурска дифузија)
a,	m	- Дужина прслине
a,	mm	- Дужина блока за триболошка испитивања
a,	nm	- Параметар кристалне решетке
a _{cr} ,	m	- Критична дужина прслине
a _g ,		- Коефицијент хистерезиса за случај идеално пластичне деформације
a ₀ ,	nm	- Међуатомско растојање
B,		- Бејнит
B,		- Коефицијент који се односи на стање површине клизања услед привлачних сила
B _s , B _f ,	°C	- Температура почетка, односно завршетка бејнитне трансформације
B _{sr} ,	m	- Средња вредност укупне ширине навара
B.T.S.,		- Фактор облика споја (<i>Broj Termičke Strogosti</i>)
BWRA,		- Рачунске и практичне методе за оцену заварљивости (<i>British Welding Research Association</i>)
b,		- Константа
b,	1/s	- Коефицијент одавања топлоте у околну средину (b=2α/c·ρ·s)
b,	mm	- Ширина блока за триболошка испитивања
b,	nm	- Параметар кристалне решетке
b _{sr} ,	m	- Средња ширина једнопролазног навара
b _{sr} ,	m	- Средња ширина трага хабања

C,	<i>MPa</i>	- Кохезиона чврстоћа стена
C ₁ ,		- Константа зависности релативног кретања у односу на правац кристалографске осе
C _{jon} ,	<i>g/mol</i>	- Стварна концентрација металних јона
CE,	%	- Хемијски еквивалентни угљеник
CE _m ,		- Хемијски еквивалентни угљеник (модификован) за оцену склоности челика на појаву врућих прелина
COD,		- Поступак одређивања отпорности материјала према појави кртог лома на основу померања крајева отвора прелине
CTS,		- Практична проба са регулисаним напоном за оцену појаве хладних прелина
c,		- Константа
c,	<i>mm</i>	- Дебљина блока за триболошка испитивања
c,	<i>din</i>	- Трошкови набавке новог дела
c,	<i>J/kgK</i>	- Специфична топлота (специфични топлотни капацитет)
c,	<i>nm</i>	- Параметар кристалне решетке
c·ρ,	<i>J/Km³</i>	- Запреминска специфична топлота
ČRN,		- Термомеханички ваљани челици за рад на сниженим температурама
ČRO,		- Основна група термомеханичких ваљаних челика
ČRV,		- Термомеханички ваљани челици за рад на повишеним температурама
D,	<i>m</i>	- Пречник диска за триболошка испитивања
D,	<i>m</i>	- Пречник куглице уређаја за испитивање тврдоће материјала
D,		- Коефицијент при одређивању отпорности на хабање стенских материјала по Деваловом поступку
D.M.,		- Додатни материјал
d,	<i>m</i>	- Добит (профит)
d _e ,	<i>din</i>	- Пречник језгра електроде
d _{e,pl} ,	<i>m</i>	- Средњи пречник контакта при пластичној деформацији
d _z ,	<i>m</i>	- Пречник електродне жице
E,	<i>MPa</i>	- Модул еластичности
E,	<i>mV</i>	- Термоелектромоторна сила
E,	<i>V</i>	- Електродни потенцијал
E ⁰ ,	<i>V</i>	- Стандардни електродни потенцијал
EPP,		- Електролучно заваривање (наваривање) под прахом
EPT,		- Електролучно заваривање (наваривање) под троском
e,	<i>m</i>	- Промена елементарне запремине чврстог тела услед релативног померања
e,	%	- Коефицијент порозности стена у природном стању
e _T ,	<i>J</i>	- Рачунска системска компонента енергије
e _{el} ,	<i>J/m³</i>	- Густина енергије при еластичној деформацији
e _{pl} ,	<i>J/m³</i>	- Густина енергије при пластичној деформацији
e _{tr} ,	<i>N</i>	- Сила резања
e _{ij} ,	<i>J/m³</i>	- Густина енергије
e _{wl} ,	%	- Коефицијент порозности стена на доњој граници пластичног течења
e _{wp} ,	%	- Коефицијент порозности стена на горњој граници пластичног течења
F,		- Ферит

F,	N	- Сила спољашњег оптерећења
F _c ,	N	- Сила притиска
F _i ,	N	- Сила по јединици запремине
F _s ,	N	- Сила савијања
F _m , F _M ,	N	- Максимална сила
F _N ,	N	- Нормална сила
F _o ,	N	- Вучна сила
F _T ,	N	- Сила трења
F _{Tdef} ,	N	- Деформацијска компонента силе трења
F _{Ti} ,	N	- Јединична сила трења
F _{Tmol} ,	N	- Молекуларна компонента силе трења
F _t ,	N	- Тангенцијална сила
F _z ,	N	- Сила затезања
FIN,		- Поступак одређивања отпорности материјала према појави кртог лома на основу фактора интензитета напона
f,		- Функционална зависност
f ₂ , f ₃ ,		- Коефицијенти за одређивање времена загревања изнад одређене температуре
G,	MPa	- Модул клизања
G,	%	- Губитак масе при испитивању отпорности на хабање стенских материјала
GMA,		- Електролучно заваривање (наваривање) у заштити гаса са топљивом електродном жицом (<i>Gas Metal Arc Welding</i>)
GPZ,		- Гасно пламено заваривање (наваривање)
H _a ,		- Тврдоћа абразива
HB,		- Тврдоћа по Бринелу
H _B ,	cm ³ /50cm ²	- Величина хабања по методи Бомеа
HK,		- Тврдоћа по Кнупу
H _{OM} ,		- Тврдоћа основног материјала
H.C.S.,		- Метода јапанских аутора за оцену склоности челика према појави врућих прелина (<i>Hot Crack Sensitivity</i>)
H _{LA} ,	%	- Величина хабања стена по Лос Анжелес методи
HRA,		- Тврдоћа по Роквелу (скала А)
HRC,		- Тврдоћа по Роквелу (скала С)
HSh,		- Тврдоћа по Шору (склероскопска метода)
H _{sr} ,	m	- Средња висина вишеслојног навара
HV,		- Тврдоћа по Викерсу
h,	m	- Дубина утиснуте неравнине
h,	m	- Висина епрувете за испитивање јачине на савијање
h _r ,	W/m ² K ⁴	- Коефицијент зрачења
h _{k,pl} ,	m	- Дубина напрегнутог материјала при контакту неравнина
h _{sr} ,	m	- Средња висина једнопролазног навара
I,	A	- Јачина струје
I ₁ , I ₂ ,	din	- Инвестиција (улагање) у алтернативне технологије
IRA,		- Дијаграми изотермичког преображаја аустенита
I _{hnd} ,	m ³ /h	- Гранично хабање новог дела

I_{hrd} ,	m^3/h	- Гранично хабање репарираниог дела
I_{sr} ,	A	- Средња вредност јачине струје
i ,	$\%$	- Каматна стопа
i ,		- Преносни однос
i ,		- Коефицијент запреминске масе стена
i_{hnd} ,	m^3/h	- Брзина хабања новог дела
i_{hrd} ,	m^3/h	- Брзина хабања репарираниог дела
J_c ,		- Поступак одређивања отпорности материјала на појаву кртог лома помоћу Рајсовог интеграла
K ,	MPa	- Запремински модул
K ,	$MPa \cdot m^{1/2}$	- Коефицијент интензитета напона
K ,	din	- Капитал
K_{IC} ,	$MPa \cdot m^{1/2}$	- Критична вредност интензитета напона (жилавог лома)
KCU ,	J/m^2	- Ударна жилавост по јединици попречног пресека епрувете са U , односно
KCV ,		V зарезом
K_{OM} ,		- Коефицијент омекшавања стена под дејством воде
KH ,		- Дијаграми континуалног хлађења
KHZ ,		- Дијаграми континуалног хлађења у условима заваривања (наваривања)
k ,		- Константа која зависи од својстава материјала спрегнутих елемената
k ,		- Број остварених међумолекуларних веза
K_{abr} ,		- Коефицијент абразивног хабања
K_{adh} ,		- Коефицијент адхезионог хабања
K_e ,		- Коефицијент економске оправданости
K_{ep} ,		- Коефицијент експлоатационе поузданости
K_{er} ,		- Коефицијент економске рационалности
k_s ,	N	- Специфична сила резања
k_o ,		- Коефицијент обрта (релативни однос прихода и капитала)
L ,		- Ледебурит
L ,	m	- Растојање између ослонца при испитивању епрувете на савијање
L ,	m	- Дужина завара, односно навара
LCC ,		- Анализа трошкова животног циклуса (<i>Life cycle cost analysis</i>)
l ,	m	- Растојање између молекула
l ,	m	- Дужина простирања ултразвучних таласа при мерењу њихове брзине
l ,	m	- Дужина електроде
M ,		- Мартензит
M ,	kg	- Маса материјала
M ,	Nm	- Вучни момент
MAG ,		- Електролучно заваривање (наваривање) у заштити активног гаса топливом електродном жицом (<i>Metal Active Gas</i>)
$MARI$,		- Економска метода названа по институцији „ <i>The Machinery and Allied Products Institute</i> “
MEB ,		- Метода елементарних биланса
MEK ,		- Метода економичности
MGE ,		- Метода граничних елемената
MIG ,		- Електролучно заваривање (наваривање) у заштити инертног гаса топливом електродном жицом (<i>Metal Inert Gas</i>)

MKE,		- Метода коначних елемената
MKR,		- Метода коначних разлика
MNSV,		- Метода нето садашње вредности
M _s , M _f ,	°C	- Температура почетка, односно завршетка мартензитне трансформације аустенита
m,	g	- Маса узорка стенског материјала
m ₁ , m ₅ ,	g	- Маса узорка стенског материјала пре и после испитивања по методи Бомеа
m ₁ , m ₂ ,	g	- Маса узорка стенског материјала пре и после испитивања по Лос Ангелес методи
m ² ,	1/m ²	- Константа (m ² =2α/λ·s)
m _i ,	g/s	- Количина депонованог додатног материјала у јединици времена
m _s ,	g	- Маса сувих узорака стенских материјала
N,		- Број циклуса нашошења оптерећења
N ₂ , N ₃ , N ₄ ,		- Фактори облика завареног споја (N ₂ =N ₃ =1 за наваривање и сучеоно заваривање)
N.Č.,	din/h	- Норма час (цена норма часа)
NSV,		- Нето садашња вредност
n,	min ⁻¹	- Број обртаја
n,		- Број парова молекула
n,		- Валенца металних јона
n,		- Параметар заваривања (наваривања)
n,	h	- Процењен радни век новог радног дела
n _{ij} ,		- Број истих компоненти енергије
n _r ,		- Број остварених додира у зони контакта површина
O. M.,		- Основни материјал
O.T.N.,		- Оптимална технологија наваривања
P,		- Перлит
P,	N	- Величина спољашњег оптерећења код стенских материјала
P,	W	- Погонска снага
P _i ,	N	- Спољашња сила оптерећења по јединици површине
PIA,		- Анализа повећања продуктивности (<i>Profitability improvement analysis method</i>)
P _n ,	N	- Одбојне силе у зони контакта
P _p ,	N	- Привлачне силе у зони контакта
PRN,		- Производно наваривање
P _r ,	din	- Приход
P _s , P _f ,	°C	- Температура почетка, односно завршетка перлитне трансформације аустенита
P _{xi} ,	N	- Силе по јединици површине
p,	%	- Порозност стена
p _c ,	MPa	- Деформацијска компонента силе смицања
p _m ,	MPa	- Притисак на контактної површини који одговара тврдоћи материјала мање тврдоће
p _m ,		- Профитна маргина
p ₀ ,	MPa	- Притисак на граници пластичног течења материјала

p_r ,	MPa	- Реални контактни притисак ($p_r=HB$ материјала мање тврдоће када је остварен пластични контакт)
Q ,	J	- Количина топлоте
Q, Q_i ,	W	- Утрошак, односно утрошци електричне енергије
$Q+T$,		- Нисколегирани побољшани челици
Q_{uk} ,	W	- Укупна количина утрошене електричне енергије
q ,	W	- Снага електричног лука ($q=U \cdot I$)
q_0 ,	W	- Топлотни проток
q_{ef} ,	W	- Ефективна топлотна моћ електричног лука ($q_{ef}=U \cdot I \cdot \eta_i$)
q_l ,	J/m	- Линијска погонска енергија заваривања или наваривања - унос топлоте ($q_l=q_{ef}/v_z$)
R ,	m	- Радијус вектор у простору
R ,	m	- Полупречник тела која се котрља
R ,	m	- Полупречник неравнине при контакту
R_a ,	μm	- Средње аритметичко одступање неравнина
R_{eH} ,	MPa	- Горња граница течења материјала (напон течења)
REL ,		- Ручно електролучно заваривање (наваривање)
R_m ,	MPa	- Затезна чврстоћа (јачина на кидање)
$R_{p0,2}$,	MPa	- Конвенционални напон течења материјала (технички напон течења)
RPN ,		- Репаратурно наваривање
RPC ,		- Практична проба са регулисаним напоном за оцену појаве хладних прелина (<i>Rigid Restraint Cracking</i>)
r ,	m	- Радијус вектор у равни
r ,	m	- Полупречник изотерме који одговара температури топљења основног материјала
Γ_k ,	din	- Профитабилност (рентабилност)
Γ_{vd} ,	m	- Полупречник пластичне зоне испред врха прелине при раванском стању деформације
Γ_{vn} ,	m	- Полупречник пластичне зоне испред врха прелине при раванском стању напона
S, S_i ,	din	- Годишњи приход
S_{mnd} ,	din	- Супротни минимум новог дела (МАРІ метода)
S_{mrd} ,	din	- Супротни минимум репарираниог дела (МАРІ метода)
S_0 ,	m^2	- Површина попречног пресека епрувете
s ,	m	- Дебљина основног материјала
s ,	m	- Пређени пут при релативном кретењу
s_{gr} ,	m	- Гранична дебљина основног материјала
s_0 ,	m	- Параметер граничне дебљине материјала при заваривању (наваривању)
T ,	$^{\circ}C$	- Температура
T_k ,	$^{\circ}C$	- Температура најмање стабилности аустенита
T_{ok} ,	$^{\circ}C$	- Температура околине (почетна температура)
T_A ,	din	- Трошкови алтернативних технологија
T_T ,	din	- Трошкови примењене технологије
T_d ,	din	- Додатни трошкови
T_{dr} ,	din	- Трошкови директног рада (трошкови радне снаге)
T_e ,	din	- Трошкови енергије

TEA,		- Техно-економска анализа
TIG,		- Електролучно заваривање (наваривање) у заштити инертног гаса нетопљивом електродом (<i>Tungsten Inert Gas</i>)
TRC,		- Практична проба са регулисаним напоном за оцену појаве хладних прелина
T.S.N.,		- Број термичке спрегности, на енглеском <i>Thermal Severity Number</i>
T_{io} ,	<i>din</i>	- Трошкови идентификације оштећења радних делова
T_{lo} ,	<i>din</i>	- Ликвидациони трошкови (трошкови отписа)
T_{dm} ,	<i>din</i>	- Трошкови набавке додатног материјала
T_{max} ,	°C	- Максимална температура посматране тачке материјала
T_i ,	<i>din</i>	- Трошкови моделских испитивања
T_{nd} ,	<i>din</i>	- Трошкови набавке новог дела
T_{mo} ,	<i>din</i>	- Трошкови механичке обраде
T_p ,	°C	- Температура предгревања
T_{pg} ,	<i>din</i>	- Просечни годишњи трошкови
T_{pom} ,	<i>din</i>	- Трошкови помоћног материјала
T_{pn} ,	<i>din</i>	- Трошкови производног наваривања
T_{rn} ,	<i>din</i>	- Трошкови репаратурног наваривања
T_{otp} ,	°C	- Температура отпуштања
T_{om} ,	<i>din</i>	- Трошкови набавке основног материјала
T_{pm} ,	<i>din</i>	- Трошкови производних услуга
T_{pz} ,	<i>din</i>	- Трошкови припремно-завршних радова (послова)
T_{to} ,	<i>din</i>	- Трошкови термичке обраде
T_r ,	°C	- Температура извора зрачења
T_s ,	°C	- Температура површине тела, солидус температура
T_{sr} ,	°C	- Средња температура површине тела
T_{pt} ,	<i>din</i>	- Трошкови пројектовања технологије репаратуре
T_z ,	°C	- Температура жарења
t ,	<i>s</i>	- Време
t_e ,	<i>h</i>	- Време експлоатације радног дела (радни век)
t_{end} ,	<i>h</i>	- Време експлоатације новог дела
t_{erd} ,	<i>h</i>	- Време експлоатације репарированог дела
$t_{g/5}$,	<i>s</i>	- Време хлађења између 800 и 500°C
t_L ,	μs	- Време простирања лонгитудиналних ултразвучних таласа
t_{max} ,	<i>s</i>	- Време потребно за постизање максималне температуре
t_T ,	μs	- Време простирања трансверзалних ултразвучних таласа
t_z ,	<i>s</i>	- Време задржавања изнад одређене (A_{C3}) температуре
U ,	<i>V</i>	- Напон електричног лука (радни напон)
U_{sr} ,	<i>V</i>	- Средња вредност радног напона
u, v, w ,	<i>m</i>	- Компоненте померања
V ,	m^3	- Запремина продуката хабања, запремина стенског материјала у природном стању
V_f ,		- Фактор геометријског облика
V_s ,	m^3	- Запремина стенског материјала у сувом стању
V_T ,	m^3	- Укупна запремина материјала која учествује у процесу трења
V_{ij} ,	m^3	- Елементарне запремине материјала које учествују у процесу трења

v ,	m/s	- Брзина кретања извора топлоте
v_L ,	m/s	- Брзина кретања лонгитудиналних ултразвучних таласа
v_T ,	m/s	- Брзина кретања трансверзалних ултразвучних таласа
v_1, v_2, v_3 ,	$^{\circ}C/s$	- Брзине хлађења
v_h ,	$^{\circ}C/s$	- Брзина хлађења
v_{kl} ,	m/s	- Брзина клизања
v_{kr} ,	$^{\circ}C/s$	- Критична брзина хлађења
v_z ,	m/s	- Брзина заваривања (наваривања)
W ,	$J/m^3 s$	- Издашност (снага) топлотног извора
W ,	Nm	- Рад утрошен на савладавању отпора на пређеном путу
W ,	Nm	- Енергија потребна за кидање везе једног пара молекула
WIG ,		- Поступак електролучног заваривања (наваривања) нетопљивом волфрамском електродом у заштити инертног гаса
W_T, W_R ,	Nm	- Рад утрошен на савладавање силе трења
W_u ,	Nm	- Укупан рад утрошен за остваривање релативног кретања
W_i ,	Nm	- Укупна енергија процеса трења ($W_i = \sum W_{ij}$)
w ,	%	- Упијање воде стена
w_{opt} ,	%	- Оптимална влажност стена
Z ,	%	- Јединично прекидно сужење (контракција)
ZA ,		- Заостали аустенит
ZUT ,		- Зона утицаја топлоте
α ,	m/mK	- Коефицијент линеарног ширења
α ,	$W/m^2 K$	- Коефицијент прелаза топлоте (топлотна прелазност)
α ,		- Константа која зависи од својстава материјала контактних површина
α_i ,		- Коефицијент расподеле енергије ($\alpha_i = \sum \alpha_{ij}$)
β ,		- Константа (параметар)
β ,		- Параметар заваривања (наваривања) зависан од облика споја и примењеног поступка
β ,		- Коефицијент удела похабане контактне површине у процесу трења
γ ,	kg/m^3	- Запреминска маса стена (специфична маса)
δ ,	m	- Дубина трага хабања
δ_{ij} ,		- Кронекеров симбол
∇ ,		- Лапласов оператор у случају Декартовог правоугаоног координатног система
ε ,	m	- Деформација (дилатација)
ε ,		- Карбид гвожђа (Fe_2C)
$\varepsilon_{v,ij}$,	m	- Релативна деформација запремине која учествује у процесу трења
ε_{ij} ,		- Тензор деформације другог реда
ε_r ,	$W/m^2 K^4$	- Емисивност извора зрачења
ε_s ,	$W/m^2 K^4$	- Емисивност површине тела
η_i ,		- Степен искоришћења топлоте применом различитих поступака при заваривању (наваривању)
θ ,	$^{\circ}C$	- Температура
ϑ ,		- Коефицијент за одређивање времена задржавања на одређеној температури
Λ ,		- Ламеова константа

λ ,	W/mK	- Термичка проводност
λ ,		- Коефицијент отпора при котрљању
λ_n ,	W/mK	- Термичка проводност у правцу нормале
μ , μ_T ,		- Коефицијент трења
μ_w ,		- Коефицијент утрошеног рада (коефицијент трења изражен преко утрошеног рада)
μ_v ,		- Поасонов коефицијент код металних материјала
μ_{ad} ,		- Адхезиона компонента коефицијента трења
μ_{def} ,		- Деформацијска компонента коефицијента трења
N ,		- Ламеова константа
ν ,		- Поасонов коефицијент код стенских материјала
ξ , η , ζ ,	m	- Растојање од топлотног извора у покретном координатном правоуглом систему
π ,		- Лудолфов број који представља однос између обима и пречника круга ($\pi=3,14\dots$)
ρ ,	kg/m^3	- Специфична запреминска маса (густина)
σ ,	W/m^2K^4	- Штефан-Болцманова константа
σ ,		- Једињење хрома и гвожђа (CrFe) које се одликује високом кртошћу
σ ,	MPa	- Нормални напон
σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} ,	MPa	- Компоненте нормалног напона у Декартовом правоуглом координатном систему
σ_{ij} ,	MPa	- Тензор напона другог реда
τ ,	MPa	- Тангенцијални напон
τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} ,	MPa	- Компоненте тангенцијалног напона у Декартовом правоугаоном координатном систему
τ_m ,	MPa	- Максимални напон смицања (јачина на смицање)
τ_0 ,	MPa	- Напон смицања (тангенцијални напон)
φ ,	$^\circ$	- Угао унутрашњег трења
x , y , z ,	m	- Растојање од топлотног извора у непокретном координатном систему
ψ ,		- Релативна отпорност материјала на хабање
ω ,	rad/s	- Угаона брзина

САДРЖАЈ

УВОДНЕ НАПОМЕНЕ	1
1. ОСНОВНИ УЗРОЧНИЦИ ОШТЕЋЕЊА ЕЛЕМЕНАТА ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА	7
УВОД	7
1.1 ТРИБОЛОШКИ ПРОЦЕСИ У ТЕХНИЧКИМ СИСТЕМАМА	7
1.2 ОШТЕЋЕЊА ЕЛЕМЕНАТА ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА УСЛЕД ТРИБОЛОШКИХ ПРОЦЕСА	9
1.2.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ ПРОЦЕСА ТРЕЊА	9
1.2.2 ОСНОВНЕ ТЕОРИЈЕ ТРЕЊА	11
1.2.2.а Адхезиона теорија трења	12
1.2.2.б Модификована адхезиона теорија трења	13
1.2.2.в Молекуларна теорија трења	14
1.2.2.г Молекуларно - механичка теорија трења	15
1.2.2.д Енергетска теорија трења	17
1.2.3 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ ПРОЦЕСА ХАБАЊА	19
1.2.4 ОСНОВНЕ ВРСТЕ ПРОЦЕСА ХАБАЊА	21
1.2.4.а Адхезионо хабање	22
1.2.4.б Абразивно хабање	22
1.2.4.в Заморно хабање	23
1.2.4.г Вибрационо хабање	23
1.2.4.д Ерозионо хабање	24
1.2.4.е Кавитационо хабање	24
1.2.4.ж Корозионо хабање	24
1.2.4.з Комбиновано хабање	25
1.3 ОШТЕЋЕЊА ЕЛЕМЕНАТА ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА УСЛЕД ПРОЦЕСА КОРОЗИЈЕ	25
1.3.1 РАЗЛИЧИТЕ КЛАСИФИКАЦИЈЕ ПРОЦЕСА КОРОЗИЈЕ	26
1.3.2 ХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА - ОКСИДАЦИЈА	28
1.3.3 ЕЛЕКТРОХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА	30
1.3.4 НЕКИ НАЧИНИ ЗАШТИТЕ МЕТАЛА ОД КОРОЗИЈЕ	34
2. САВРЕМЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ НАНОШЕЊА МЕТАЛНИХ ПРЕВЛАКА	37
УВОД	37
2.1 ПРИМЕНА РАЗЛИЧИТИХ МЕТОДА ТЕРМИЧКЕ МЕТАЛИЗАЦИЈЕ	38
2.1.1 ГАСНА МЕТАЛИЗАЦИЈА	38
2.1.1.а Гасна метализација жицом	38
2.1.1.б Гасна метализација прахом	39
2.1.1.в Гасна метализација керамичким штапом	39
2.1.2 ЕЛЕКТРОЛУЧНА МЕТАЛИЗАЦИЈА	40
2.1.2.а Електролучна метализација топљивом електродом	40
2.1.2.б Електролучна метализација нетопљивом волфрамском електродом	40
2.1.3 МЕТАЛИЗАЦИЈА ПЛАЗМОМ	41
2.2 ПРИМЕНА РАЗЛИЧИТИХ МЕТОДА НАВАРИВАЊА	41
2.2.1 ГАСНО НАВАРИВАЊЕ	43
2.2.1.а Гасно наваривање жицом и шипком	43
2.2.1.б Гасно наваривање прахом	44
2.2.2 РУЧНО ЕЛЕКТРОЛУЧНО (REL) НАВАРИВАЊЕ	44
2.2.3 ЕЛЕКТРОЛУЧНО (GMA) НАВАРИВАЊЕ	46
2.2.4 НАВАРИВАЊЕ ОТВОРЕНИМ ЛУКОМ	47
2.2.5 НАВАРИВАЊЕ TIG МЕТОДОМ	48
2.2.6 НАВАРИВАЊЕ ПЛАЗМОМ	48
2.2.6.а Плазмено наваривање прахом	48
2.2.6.б Плазмено TIG наваривање	49
2.2.6.в Плазмено MIG наваривање	50
3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА	51
УВОД	51

3.1	ОСНОВНИ ПОЈМОВИ О ЗАВАРЉИВОСТИ МЕТАЛА	51
3.2	МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА	53
3.2.1	РАЧУНСКЕ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА	54
3.2.2	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ И ТЕХНОЛОШКЕ ПРОБЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА	58
3.3	ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА	60
3.3.1	ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ УГЉЕНИЧНИХ ЧЕЛИКА	60
3.3.2	ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ НИСКОЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА	62
3.3.3	ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	62
3.3.3.а	Оцена заварљивости С-Мп челика.....	63
3.3.3.б	Оцена заварљивости микролегираних (финозрних – ТМ) челика	64
3.3.3.в	Оцена заварљивости нисколегираних челика повишене јачине	64
3.3.3.г	Оцена заварљивости Сг-Мо челика	65
3.3.3.д	Оцена заварљивости високолегираних челика	66
3.4	ПРИМЕНА ПАРАМЕТАРСКИХ ЈЕДНАЧИНА ЗА ОЦЕНУ СКЛОНОСТИ ЧЕЛИКА ПРЕМА ПОЈАВИ ПРСЛИНА	67
3.4.1	ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ВРУЋИХ ПРСЛИНА	67
3.4.2	ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ХЛАДНИХ ПРСЛИНА.....	68
3.4.3	ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ПРСЛИНА ЖАРЕЊА	71
3.4.4	ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ЛАМЕЛАРНИХ ПРСЛИНА	72
4.	ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ ЗА НАВАРИВАЊЕ	75
	УВОД.....	75
4.1	УТИЦАЈ ЛЕГИРАЈУЋИХ ЕЛЕМЕНАТА НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА	75
4.1.1	УТИЦАЈ АУСТЕНИТИЗАТОРА НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА	76
4.1.2	УТИЦАЈ ФЕРИТИЗАТОРА НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА.....	78
4.2	КАРБИДИ У МЕТАЛНОЈ ОСНОВИ И ЊИХОВ УТИЦАЈ НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА	80
4.3	ИЗБОР ДОДАТНИХ МАТЕРИЈАЛА ЗА НАВАРИВАЊЕ	83
4.3.1	ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА НАВАРИВАЊЕ ОТПОРНИ НА ХАБАЊЕ	83
4.3.1.а	Материјали отпорни на адхезионо хабање	84
4.3.1.б	Материјали отпорни на абразивно хабање.....	84
4.3.1.в	Материјали отпорни на заморно хабање	84
4.3.1.г	Материјали отпорни на вибрационо хабање.....	85
4.3.1.д	Материјали отпорни на ерозионо хабање	85
4.3.1.е	Материјали отпорни на кавитационо хабање	86
4.3.2	ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА НАВАРИВАЊЕ ОТПОРНИ НА КОРОЗИЈУ	87
4.3.2.а	Хромове легуре.....	87
4.3.2.б	Хром – никлове легуре	88
4.3.2.в	Хром – манганове легуре.....	89
4.3.2.г	Кобалтове легуре	89
4.3.2.д	Титанове легуре.....	89
4.3.2.е	Никлове легуре	90
5.	ТОПЛОТНИ БИЛАНС ПРИ НАВАРИВАЊУ	93
	УВОД	93
5.1	ДИФЕРЕНЦИЈАЛНА ЈЕДНАЧИНА ПРОВОЂЕЊА ТОПЛОТЕ.....	93
5.2	МЕТОДЕ ЗА РЕШАВАЊЕ ДИФЕРЕНЦИЈАЛНЕ ЈЕДНАЧИНЕ ПРОВОЂЕЊА ТОПЛОТЕ	94
5.2.1	АНАЛИТИЧКЕ МЕТОДЕ	94
5.2.1.а	Температурско поље за случај непокретног извора топлоте.....	95
5.2.1.б	Температурско поље за случај покретног извора топлоте	96
5.2.2	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ	97
5.3	ПРОРАЧУН КАРАКТЕРИСТИЧНИХ ВЕЛИЧИНА ТЕМПЕРАТУРСКОГ ЦИКЛУСА ПРИ НАВАРИВАЊУ	98
5.3.1	МАКСИМАЛНА ТЕМПЕРАТУРА И ВРЕМЕ ЗАГРЕВАЊА	99
5.3.2	ВРЕМЕ ЗАДРЖАВАЊА ИЗНАД A_{C3} ТЕМПЕРАТУРЕ	99
5.3.3	БРЗИНА ХЛАЂЕЊА	100
5.3.4	ВРЕМЕ ХЛАЂЕЊА $t_{8/5}$	100

5.3.4.a	Прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ на основу граничне дебљине материјала s_{gr}	100
5.3.4.б	Прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ на основу формуле јапанских аутора	101
6.	ФАЗНЕ ПРОМЕНЕ У ЧВРСТОМ СТАЊУ ПРИ НАВАРИВАЊУ ЧЕЛИКА	103
	УВОД	103
6.1	ОСНОВИ ФАЗНИХ ПРОМЕНА МЕТАЛА У ЧВРСТОМ СТАЊУ	103
6.1.1	РАСПАД ЧВРСТОГ РАСТВОРА	104
6.1.2	ПРЕОБРАЖАЈ ЧВРСТОГ РАСТВОРА	105
6.2	ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ И ЊИХОВ ЗНАЧАЈ	106
6.2.1	ДИЈАГРАМИ ИЗОТЕРМИЧКОГ ПРЕОБРАЖАЈА АУСТЕНИТА (РА - ДИЈАГРАМИ)	107
6.2.2	ДИЈАГРАМИ АНИЗОТЕРМИЧКОГ ПРЕОБРАЖАЈА АУСТЕНИТА (АРА-ДИЈАГРАМИ)	111
7.	ТЕРМИЧКА ОБРАДА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	113
	УВОД	113
7.1	ВРСТЕ ТЕРМИЧКИХ ОБРАДА И ЊИХОВА ПРИМЕНА ПРИ НАВАРИВАЊУ	113
7.1.1	ПРЕТХОДНА И ТЕКУЋА ТЕРМИЧКА ОБРАДА ПРИ НАВАРИВАЊУ	113
7.1.2	НАКНАДНА ТЕРМИЧКА ОБРАДА ПОСЛЕ НАВАРИВАЊА	115
7.1.2.a	Напонско жарење наварених челика	116
7.1.2.б	Нормализационо жарење наварених челика	116
7.1.2.в	Дифузионо жарење наварених челика	116
7.1.2.г	Побољшање (каљење и отпуштање) наварених челика	117
7.1.2.д	Ниско отпуштање наварених челика	117
7.1.2.е	Средње отпуштање наварених челика	118
7.1.2.ж	Високо отпуштање наварених челика	118
7.2	ПРОМЕНЕ ПРИ ОТПУШТАЊУ НАВАРЕНИХ ЧЕЛИКА	118
7.2.1	ПРОМЕНА МАРТЕНЗИТА ПРИ ОТПУШТАЊУ НАВАРЕНИХ НЕЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА	118
7.2.2	ПРОМЕНА МАРТЕНЗИТА ПРИ ОТПУШТАЊУ НАВАРЕНИХ ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА	121
7.2.3	ОТПУСНА КРТОСТ НАВАРЕНИХ ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА	122
7.2.4	УТИЦАЈ ОТПУШТАЊА НА МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА НАВАРЕНИХ ЧЕЛИКА	123
8.	НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У НАВАРЕНИМ СПОЈЕВИМА	125
	УВОД	125
8.1	ТЕРМИЧКИ НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ ПРИ НАВАРИВАЊУ	126
8.2	СТРУКТУРНИ НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ ПРИ НАВАРИВАЊУ	128
8.3	МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКОГ СТАЊА	129
8.3.1	МАТЕМАТИЧКО ДЕФИНИСАЊЕ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКОГ СТАЊА	130
8.3.1.a	Напони и деформације	130
8.3.1.б	Једначине равнотеже у посматраној области чврстог тела	131
8.3.1.в	Деформација у посматраној тачки чврстог тела	132
8.3.1.г	Међусобна зависност напона и деформације	133
8.3.1.д	Основне једначине преношења топлоте	134
8.3.1.е	Основни принципи решавања проблема термоеластичности	135
8.3.2	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКОГ СТАЊА	137
8.4	УТИЦАЈ ПОСТУПАКА И ПАРАМЕТАРА НАВАРИВАЊА НА НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКО СТАЊЕ	138
8.5	МЕТОДЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ЗАОСТАЛИХ НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА	139
9.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА	141
	УВОД	141
9.1	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ ОСНОВНИХ СВОЈСТАВА НЕКИХ ВРСТА СТЕНСКИХ МАТЕРИЈАЛА	142
9.1.1	ОДРЕЂИВАЊЕ ПЕТРОГРАФСКИХ СВОЈСТАВА СТЕНА	144
9.1.2	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ НЕКИХ ФИЗИЧКИХ СВОЈСТАВА СТЕНА	147
9.1.2.a	Одређивање специфичне масе (густине) и запреминске масе стена	147
9.1.2.б	Одређивање порозности и склоности ка упијању воде стена	149

9.1.3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ НЕКИХ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА СЕНА	150
9.1.3.а Одређивање тврдоће стена	150
9.1.3.б Одређивање параметара еластичности стена	152
9.1.3.в Одређивање ударне жилавости неких врста стена	156
9.1.3.г Одређивање јачине стена	157
9.1.3.д Одређивање отпорности на хабање неких врста стена	162
9.1.4 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА	165
9.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА ПРИ РЕПАРАТУРНОМ И ПРОИЗВОДНОМ НАВАРИВАЊУ РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ	168
9.2.1 ДЕФИНИСАЊЕ НАЧИНА ИЗВОЂЕЊА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА	168
9.2.2 ОСНОВНИ МОДЕЛИ АБРАЗивног ХАБАЊА КАО НАЈЧЕШЋИ УЗРОЧНИЦИ ОШТЕЂЕЊА РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ	171
9.2.3 НЕКЕ СМЕРНИЦЕ ЗА НАВАРИВАЊЕ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ	174
9.2.3.а Избор методе наваривања	175
9.2.3.б Избор додатног материјала и технологије наваривања	176
9.2.3.в Репаратурно наваривање радних делова грађевинске механизације израђених од различитих врста основних материјала	177
9.2.3.г Репаратурно наваривање радних делова грађевинске механизације изложених различитим радним условима у току експлоатације	178
9.2.4 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА	179
9.3 МЕТАЛОГРАФСКА ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА НА ФИЗИЧКИМ МОДЕЛИМА	180
9.3.1 ИЗРАДА ФИЗИЧКИХ МОДЕЛА ЗА ИСПИТИВАЊЕ СВОЈСТАВА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	181
9.3.1.а Одређивање својстава испитиваних основних материјала	181
9.3.1.б Одређивање својстава испитиваних додатних материјала	185
9.3.1.в Оцена заварљивости основних материјала	188
9.3.1.г Моделирање параметара наваривања и одређивање оптималне технологије	189
9.3.2 ИСПИТИВАЊЕ ТВРДОЋЕ И МИКРОСТРУКТУРЕ НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	191
9.3.2.а Одређивање тврдоће карактеристичних зона навареног споја	192
9.3.2.б Одређивање микроструктуре карактеристичних зона навареног споја	198
9.3.2.в Промене тврдоће и микроструктуре код аустенитних манганских челика	213
9.3.3 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА	217
9.4 ТРИБОЛОШКА ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА НА ФИЗИЧКИМ МОДЕЛИМА	219
9.4.1 МЕРНА И РАЧУНАРСКА ОПРЕМА	220
9.4.2 ПРИПРЕМА БЛОКОВА И ДИСКОВА	224
9.4.3 РАСПОДЕЛА ТВРДОЋЕ И МИКРОСТРУКТУРА КОНТАКТНИХ ПОВРШИНА БЛОКОВА И ДИСКОВА	225
9.4.4 ТРИБОЛОШКА ИСПИТИВАЊА НАВАРА И ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА	230
9.4.5 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА	243
9.5 ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ТЕМПЕРАТУРСКОГ ЦИКЛУСА ПРИ НАВАРИВАЊУ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА	244
9.5.1 ОДРЕЂИВАЊЕ ТЕМПЕРАТУРСКИХ ЦИКЛУСА КОД НЕЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА	245
9.5.1.а Избор материјала и припрема узорка за мерење температура при наваривању	245
9.5.1.б Експериментални резултати снимљених температурских циклуса при наваривању нелегираних челика	246
9.5.1.в Одређивање времена хлађења $t_{8/5}$ добијеног различитим методама	248
9.5.2 ОДРЕЂИВАЊЕ ТЕМПЕРАТУРСКИХ ЦИКЛУСА КОД ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА	252
9.5.2.а Избор материјала и припрема узорка за мерење температура при наваривању	252
9.5.2.б Експериментални резултати снимљених температурских циклуса при наваривању легираних челика	253
9.5.2.в Упоредни преглед времена хлађења $t_{8/5}$ добијено различитим методама	255
9.5.3 ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА КН – ДИЈАГРАМА И ВРЕМЕНА ХЛАЂЕЊА $t_{8/5}$	257
9.5.4 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА	259
9.6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА НА РЕАЛНИМ РАДНИМ ДЕЛОВИМА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ	261
9.6.1 НАВАРИВАЊЕ ЗУБА УТОВАРНЕ КАШИКЕ УТОВАРИВАЧА	261
9.6.1.а Грађевинска машина, функција испитиваног дела и уочени недостаци	262
9.6.1.б Технологија наваривања зуба утоварне кашике	263

9.6.1.в	Одређивање отпорности на хабање	265
9.6.2	НАВАРИВАЊЕ ЛОПАТИЦА МЕШАЛИЦЕ ПОСТРОЈЕЊА ЗА ПРОИЗВОДЊУ АСФАЛТА ..	270
9.6.2.а	Постројење, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци	270
9.6.2.б	Технологија наваривања лопатица мешалице за асфалт	272
9.6.2.в	Одређивање отпорности лопатица на хабање.....	274
9.6.3	НАВАРИВАЊЕ УДАРНИХ ГРЕДА ДРОБИЛИЦЕ ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДРОБЉЕНОГ КАМЕНА	276
9.6.3.а	Постројење, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци	277
9.6.3.б	Технологија наваривања ударних греда дробилице.....	279
9.6.3.в	Одређивање отпорности на хабање	281
9.6.4	НАВАРИВАЊЕ НОЖЕВА УРЕЂАЈА ЗА УКЛАЊАЊЕ РАСТИЊА И НОЖЕВА УРЕЂАЈА ЗА ПОВРШИНСКО РАВНАЊЕ ТЕРЕНА	285
9.6.4.а	Грађевинска машина, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци.....	285
9.6.4.б	Одређивање отпорности на хабање	291
9.6.5	НАВАРИВАЊЕ НОЖЕВА УРЕЂАЈА ЗА ИСКОП КАНАЛА	294
9.6.5.а	Грађевинска машина, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци.....	295
9.6.5.б	Технологија наваривања ножева за ископ канала	296
9.6.5.в	Одређивање отпорности на хабање	297
9.6.6	НАВАРИВАЊЕ НОЖЕВА ПЛУГА ЗА ЧИШЋЕЊЕ СНЕГА	298
9.6.6.а	Грађевинска машина, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци.....	299
9.6.6.б	Технологија наваривања ножева плугова	300
9.6.6.в	Одређивање отпорности на хабање	301
9.6.7	НАВАРИВАЊЕ ЧЕКИЊА СЕКУНДАРНЕ ДРОБИЛИЦЕ ЗА ДРОБЉЕЊЕ КАМЕНА	303
9.6.7.а	Постројење, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци	303
9.6.7.б	Технологија наваривања чекића секундарне дробилице	304
9.6.7.в	Одређивање отпорности на хабање	305
9.6.8	КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА	307
9.7	ОПРАВДАНОСТ ПРИМЕНЕ РЕПАРАТУРНОГ И ПРОИЗВОДНОГ НАВАРИВАЊА РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ	310
9.7.1	МЕТОДЕ И КРИТЕРИЈУМИ ЗА ОЦЕНУ ОПРАВДАНОСТИ ПРИМЕНЕ RPN-а	312
9.7.1.а	Метода економичности (МЕК)	314
9.7.1.б	Улазни параметри МЕК за оцену оправданости примене RPN-а	317
9.7.2	ТЕХНО-ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ РЕПАРАТУРЕ ОШТЕЂЕНИХ РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ	318
9.7.3	ТЕХНО-ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ РЕПАРАТУРЕ ОШТЕЂЕНИХ СКЛОПОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ	321
9.7.4	КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА	323
10.	ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	325
	ЛИТЕРАТУРА.....	333

УВОДНЕ НАПОМЕНЕ

Наука о одржавању техничких система новијег је датума, а њен убрзан развој почиње када је функција одржавања постала ограничавајући фактор за потпуно искоришћење њихових производних капацитета и смањење трошкова пословања. Значај функције одржавања и њен утицај на резултате рада неког пословног система расте са повећањем степена механизације и аутоматизације ангажованих техничких система. Већи степен аутоматизације омогућава једноставније и безбедније руковање техничким системима, али се истовремено захтева већа стручност особља за одржавање. Зато није тешко схватити што је у привредно развијеним земљама велика потражња за стручњацима, специјалистима који се баве одржавањем техничких система. Директни трошкови на одржавању техничких система чине значајну ставку у укупним трошковима пословања, а када се томе додају и настали губици услед њиховог отказа и застоја, онда постаје јасно колики је значај функције одржавања и њен утицај на успешност пословања неког пословног система.

Анализом оштећења многих елемената различитих техничких система, и бројних података из доступне литературе [2,8,18,22,59], може се уочити да постоје различити узроци превременог отказа у току експлоатације. Према разним ауторима откази, застоји и њихова учесталост различито су класификовани, све у зависности од привредне гране у којој су ангажовани технички системи [22,199,200].

Укупна сагледавања ове проблематике наводе на то да се сви откази у основи, могу поделити на две групе:

- *Откази настали услед објективних фактора из тзв. техничких разлога;*
- *Откази настали услед субјективних фактора због утицаја људи.*

Откази настали из техничких разлога огледају се првенствено у превременом отказу услед преоптерећења елемената техничких система, триболошких процеса и процеса корозије. Откази изазвани људским фактором огледају се у неодговарајућем и непланском одржавању техничких система, неправилно пројектованим и израђеним конструкцијама, нестручном руковању, погрешно одабраном режиму рада, недовољно стручном људству и др. На неке од ових узрока могуће је утицати, па се њихово негативно дејство може смањити или потпуно уклонити, чиме се директно утиче на смањење трошкова одржавања, а самим тим и трошкове пословања.

У ужем смислу, функција одржавања обухвата скуп активности на очувању радне способности неког техничког система у оквиру дозвољених и прописаних граница. У ширем смислу, функција одржавања обухвата скуп активности које се изводе у неколико фаза [18,89,199]:

- *Пројектовање, израда или набавка техничког система;*
- *Активности у току експлоатације, као што су инсталирање, текуће одржавање, замена или обнављање оштећених елемената и контрола радних параметара;*
- *Активности око трајног искључења из процеса експлоатације, расхода и отписа техничког система.*

Привредно развијене земље приступају озбиљно проблему смањења трошкова у циљу повећања успешности пословања њихових привредних система. Изведена су свеобухватна истраживања за откривање узрока настанка хаваријских оштећења техничких система, с циљем да се она смање и предвиде. На основу ових истраживања дошло се до сазнања да највећи трошкови при одржавању техничких система настају због чувања и складиштења резервних делова. Ови трошкови на годишњем нивоу износе око тридесет и три процента од набавне цене новог резервног дела [194]. Управо ови трошкови условили су развој и примену заваривања и сродних технологија не само за репаратуру оштећених елемената техничких система већ и за израду нових. Данас је од свих уграђених елемената техничких система више од шездесет процената израђено применом ових технологија са тенденцијом повећања њихове примене.

Репаратурно или производно наваривање могуће је извести на многим машинским елементима, који су укључени у процесе експлоатације у различитим привредним гранама (рударству, водопривреди, пољопривреди, металургији, бродоградњи, грађевинарству итд.). Данас се у свету све већи значај придаје савременим технологијама наношења металних превлака, а за то су на располагању различити поступци наваривања и метализације. Потребно је рећи, иако постоји широк асортиман додатних материјала и значајан број поступака за наношење различитих врста металних превлака, пројектовање и извођење ових технологија много је сложеније од технологије заваривања. Основни разлог за то је што се технологија заваривања најчешће примењује при спајању материјала сличних својстава, док се технологије наваривања и метализације најчешће изводе спајањем материјала потпуно различитих својстава. Ова чињеница намеће потребу да се реши већи број додатних врло сложених проблема [97,124,141,194].

Уопштено се може рећи да се применом одговарајуће технологије наваривања могу извести следећи радови:

- *Репаратурно наваривање оштећених елемената техничких система услед дејстава триболошких процеса, корозије или лома;*
- *Производно наваривање при изради нових елемената у циљу побољшања својстава контактних површина;*
- *Наваривање нових елемената израђених са грешком углавном ливењем и ковањем.*

Имајући у виду техничке могућности које пружа технологија наваривања и могуће уштеде у материјалу, раду и енергентима, ова технологија заузима значајно место међу тзв. *напредним технологијама* [22,164,194].

Скоро сви елементи техничких система могу се наваривати применом одговарајуће технологије наваривања, па и најодговорнији елементи управљачких и кочионих система код транспортних средстава (возила, лифтова, дизалица итд.). Ипак се поставља питање оправданости наваривања, јер укупна цена укључује и дораду, термичку обраду и пооштрени контролу што би превазишло цену нових елемената. Данас се сматра да је више од половине укупно израђених елемената различитих техничких система, из техно-економског аспекта, оправдано обновити репаратурним наваривањем, и поново укључити у експлоатацију. Када је реч о грађевинској механизацији, која је у процесу експлоатације ангажована у више привредних грана, сматра се да је оправдано, применом неке заваривачке технологије, обновити више од седамдесет процената од укупног броја елемената уграђених у различите подсклопове и склопове ових техничких система [80,164,194].

Материјалне уштеде и друге погодности, које произлазе из пројектовања и примене наваривања, могуће су само тада када се овом послу приступи крајње професионално као текућој производној пракси, а не повременом раду наметнутом силом прилика због хаварије и отказа техничких система. Када се силом прилика организују ови радови успех наваривања је неизвесан, па најчешће доноси више штете него користи, зато што се завршна контрола најчешће изводи на крају процеса, када се већ учињене грешке више не могу исправити. Позитивни ефекти и остале предности наваривања могу се очекивати само ако се обезбеде одговарајући услови за наваривање (додатни материјал, уређаји за наваривање, место за несметано извођење процеса и др.), праћење (контрола квалитета наваара) и примена оптималне технологије.

Предмет овог рада је свеобухватно теоријско-експериментално истраживање оправданости примене репаратурног или производног наваривања радних делова грађевинске механизације, који су у директном контакту са разним грађевинским материјалима и током експлоатације најчешће истовремено изложени различитим триболошким процесима, процесима корозије и повременим или сталним јаким ударним оптерећењима. Технологија наношења металних превлака још није довољно истражена, па је из ове области мали број публикованих радова, што намеће потребу да се до сазнања везаних за ову проблематику може доћи само на основу теоријских анализа и бројних експерименталних истраживања.

Пројектовање оптималне технологије наваривања, тј. *моделирање процеса наваривања*, захтеве комплексна и дуготрајна теоријска и експериментална истраживања. Процес наваривања прате многе негативне појаве које утичу на квалитет наварених спојева. Неке од тих појава су: дифузија хемијских елемената, металуршке реакције основног и додатног материјала, појава прелазних и заосталих структурних и термичких напона, промена структуре у зони утицаја топлоте основног материјала и материјалу наварених слојева, прекомерни унос топлоте, неконтролисано мешање основног и додатног материјала, грешке у металу навара, трајне деформације навариваних елемената и др.

Оптимизација технологије наваривања почиње од избора одговарајућег поступка наваривања, избора најпогоднијег додатног материјала и дефинисања оптималних параметара наваривања у границама дозвољених одступања. У оквиру оптималне технологије наваривања морају се дефинисати претходна, текућа и накнадна термичка обрада, као и неопходна механичка обрада. Да би се успоставила веза улазних параметара наваривања и излазних својстава наварених спојева, потребно је извести бројне пробе на физичким моделима уз варирање параметара наваривања. Основни критеријум за оцену квалитета навара су захтевана својства наварених површина. Квалитет навара на радним деловима грађевинске механизације проверава се на основу бројних критеријума као што су: отпорност наварених спојева на различите процеса хабања, отпорност наварених спојева на корозију, јачина везе између основног и додатног материјала, микроструктура и тврдоћа наварених спојева, прелазно и заостало напонско-деформацијско стање, врсте и величине грешака у навареном споју и др.

На својства навара пресудни утицај имају: хемијски састав основног и додатног материјала, степен мешања основног и додатног материјала, температурски циклус наваривања, коефицијент линеарног ширења спајаних материјала и напонско-деформацијско стање проузроковано наваривањем. Познато је да се структурни напони не могу математички одредити, али се са смањењем брзине хлађења у критичном температурском интервалу најмање стабилности аустенита могу свести на минималне вредности. Термички напони се за једноставније облике радних делова могу израчунати познатим математичким методама термоеластичности и термопластичности. Прелазни напони утичу на заварљивост спајаних материјала, а заостали напони погоршавају сигурност и функционалност наварених делова [49,63,78,177].

Експериментална истраживања, у овом раду, обухватају: идентификацију главних узрочника оштећења радних делова грађевинске механизације, испитивање физичко-хемијских својстава основних материјала, оцену заварљивости различитих врста материјала, испитивање стварних својстава коришћених додатних материјала, пројектовање полазне технологије наваривања, израду физичких модела за лабораторијска испитивања, врсту испитивања на моделима у лабораторијским условима, избор најповољније технологије наваривања на основу добијених резултата лабораторијских испитивања, наваривање радних делова оптималним параметрима, испитивање наварених радних делова у различитим радним условима, техно-економску анализу оправданости примене предложене технологије наваривања и коначну одлуку о прихватању или одбацивању предложене технологије.

Универзалан модел за репаратурно или производно наваривање свих радних делова грађевинске механизације није могуће предложити јер наваривање сваког дела, због различитих специфичности, захтева прописивање и примена посебне технологије. Зато ће у овом раду, полазећи од добијених експерименталних резултата бити приказани усвојени модели репаратурног и производног наваривања за више група радних делова израђених од материјала сличних физичко-хемијских својстава, који су изложени сличним радним условима при експлоатацији.

Коначна одлука о прихватању предложене технологије наваривања донета је тек после анализе резултата експерименталних истраживања при реалним условима експлоатације и потврде економске оправданости предложене технологије. То је најсигурнији начин да се предложена технологија може прихватити као оптимално решење и модел за наваривање већег броја сличних радних делова грађевинске механизације.

Поред неопходних теоријских основа, за разумевање изузетно сложеног процеса наваривања, у највећем делу овог рада су приказани резултати сопствених теоријско-експерименталних истраживања које је пракса наметнула. Формирани модели пројектовања и извођења процеса наваривања радних делова грађевинске механизације представљени су тако да уз неопходне корекције могу корисно послужити као основа производног или репаратурног наваривања радних делова и других техничких система. Такође, добијени резултати могу корисно послужити као база података за даља истраживања из ове области.

Овај рад је раздвојен на десет тематских целина, тј. поглавља, да би се лакше разумела проблематика која је разматрана, мада је све међусобно повезано и реално посматрано представља једну нераскидиву целину. Колико је то било могуће, поглавља су изложена повезано по логичном редоследу да би се проблематика репаратурног и производног наваривања свестрано обухватила. Стога су поглавља изложена по следећем редоследу: основни узрочници оштећења елемената техничких система, савремене технологије наношења металних превлака, оцена заварљивости различитих врста челика, додатни материјали за наваривање, топлотни биланс при наваривању, фазне промене у чврстом стању при наваривању челика, термичка обрада наварених спојева, напони и деформације у навариваним спојевима, експериментална истраживања и закључци са неким смерницама за даља истраживања.

Прво поглавље обухвата проблематику везану за основне узрочнике оштећења елемената техничких система: триболошке процесе, корозију и појаву лома. Споменути су основни појмови о триболошким процесима (контактни процеси и подмазивање), а треће и процеси хабања су детаљније објашњени.

Друго поглавље обухвата основне појмове о наношењу металних превлака поступцима наваривања и метализације. Приказани су разни поступци као и њихове предности и недостаци. Иако је указано на велики практични значај наношења металних превлака, детаљније је обрађена само примена стандардних поступака наваривања и термичке метализације, док су други поступци метализације и тзв. *физички поступци наваривања* само укратко поменути.

Треће поглавље је релативно обимније и обухвата утицај различитих фактора на заварљивост челика. Објашњена је подела и значај овог комплексног технолошког својства метала при извођењу заваривачких радова. Објашњена је појава преласка челика у крто стање и штетне последице које због тога могу настати, као и опасност од појаве различитих врста грешака при наваривању. Појава различитих врста прелина при наваривању и њихов утицај на појаву кртог лома посебно је објашњен. У неопходној мери разматране су различите методе за оцену заварљивости појединих врста челика, а посебно се то односи на условно заварљиве челике, као што су високоугљенични, високолегирани и челици повишене јачине.

Четврто поглавље посебно је посвећено додатним материјалима за наваривање и поступак њиховог избора за наваривање различитих елемената техничких система од којих се захтева добра отпорност према различитим процесима хабања, корозије и појави лома. Детаљно је објашњен утицај појединих хемијских елемената на својства челика, а нарочито утицај угљеника и легирајућих елемената. Посебно су истакнути карбидотворни елементи и значај карбида на отпорност челика према различитим процесима хабања, корозије и појави лома.

Пето поглавље односи се на топлотни биланс при наваривању. Дати су основни начини провођења топлоте и основне математичке једначине провођења топлоте за различите случајеве наваривања, при чему је посебно размотрен општи случај почетних и граничних услова температурског поља. Исто тако, обрађене су различите методе за решавање диференцијалне једначине провођења топлоте, при чему је за различите случајеве детаљније обрађена аналитичка метода. Значај и начин примене аналогних, нумеричких и експерименталних метода, објашњени су само у мери неопходној за израду овог рада. Дате су емпиријске формуле за прорачун карактеристичних величина температурског циклуса при наваривању, као што су максимална температура и максимално време загревања, време задржавања на критичној температури као и времена хлађења $t_{8/5}$ у температурском интервалу најмање стабилности аустенита од 800 – 500°C. Одређује се помоћу различитих емпиријских формула, па је зато дат кратак осврт на најчешће коришћене формуле. Значај одређивања времена $t_{8/5}$ и његово уношење у одговарајуће дијаграме континуалног хлађења у условима наваривања посебно је потенциран. Применом ових

математичких формула и моделирања параметара наваривања омогућена је процена новонасталих фазних структура и њихових својстава при наваривању, и обрнуто, могуће је одредити оптималне параметре наваривања у циљу добијања оптималне структуре навара.

Шесто поглавље описује фазне промене у чврстом стању при наваривању челика. Поред основних појмова науке о материјалима и трансформацијама аустенита које се одвијају у чврстом раствору легура гвожђа, напоменуте су и фазне трансформације које се добијају при наваривању неких обојених метала. Исто тако, приказане су различите врсте трансформационих дијаграма, утицај различитих хемијских елемената на њихов облик, као и значај контролисане промене потхлађеног аустенита при извођењу заваривачких технологија, или при термичкој обради.

Седмо поглавље описује термичку обраду која прати или се посебно изводи при наваривању. Разматране су претходна, текућа и накнадна термичка обрада као и примена различитих технологија наваривања у циљу побољшања заварљивости и смањења сопствених напона и деформација у навареним спојевима. Посебно је обрађена накнадна термичка обрада, која се најчешће примењује при наваривању, са освртом на структурне промене у челику, и њихов утицај на добијену структуру. Детаљно су описане промене које се одвијају у нелегираним и легираним челицима при отпуштању. Објашњен је феномен настајања отпусне кртости код легираних челика.

Осмо поглавље односи се на појаву напонско-деформацијског стања при наваривању челика, појаву сопствених структурних и термичких напона и различите методе за одређивање напонско-деформацијског стања. Детаљно је објашњено математичко дефинисање напонско-деформацијског стања уз помоћ основних једначина термоеластичности и термопластичности. Укратко су описане различите експерименталне методе за одређивање напона и деформација. Посебно је разматран утицај поступка наваривања на појаву напона и деформација, и других негативних пратећих појава на својства навареног споја, као и методе за снижење нивоа заосталих напона и трајних деформација код наварених спојева.

Девето поглавље је најобимнији део овог рада у коме су приказана бројна експериментална истраживања с циљем да се одреди оптимална технологија наваривања, која је даље коришћена за компарацију аналитичких, нумеричких и експерименталних резултата. При извођењу експерименталних истраживања коришћени су различити мерни уређаји, односно мерни ланци. Да би добијени резултати експерименталних истраживања били што поузданији, експериментална лабораторијска испитивања на физичким моделима изведена су у условима блиским експлоатационим. Избор технологије наваривања је произашао из резултата експерименталних испитивања на моделима после већег броја варирања параметара наваривања. Оптимална технологија добијена наваривањем на моделима „пренета“ је на реалне радне делове грађевинске механизације, а даље су ови узорци практично проверавани при реалним експлоатационим условима. Наварени узорци су монтирани на грађевинску механизацију, и затим периодично контролисани, да би се детаљно пратио процес њиховог хабања. Основни критеријум за оцену примењене технологије је била отпорност ових радних делова на различите процесе хабања, корозију и појаву лома.

Десето поглавље садржи већи број закључака проистеклих из обимних теоријских и експерименталних истраживања, као и неке смернице за даља истраживања из ове области. Дат је критички осврт на досадашње резултате истраживања, као и на приказане резултате истраживања у овом раду.

На почетку сваког поглавља дат је кратак увод, а на крају поглавља одговарајући коментар истраживања. Теоријска и експериментална истраживања дата у овом раду неоспорно ће допринети даљем развоју и већој примени репаратурног и производног наваривања, ефикаснијем одржавању грађевинске механизације као и формирању базе података која ће корисно послужити за моделирање ових процеса и при одржавању других техничких система.

1. ОСНОВНИ УЗРОЧНИЦИ ОШТЕЋЕЊА ЕЛЕМЕНАТА ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА

УВОД

Анализом релевантних радова и литературних података [18,181,187,194,200] може се закључити да су основни узрочници оштећења радних елемената различитих техничких система у директној вези са експлоатационим условима.

У зависности од разматране привредне гране различити аутори [177,181,186,187,194] дошли су до сазнања по којим механизмима долази до оштећења радних елемената техничких система и извели класификацију главних узрочника оштећења која доводе до њиховог отказа и застоја у току експлоатације.

Имајући у виду различите експлоатационе услове у којима раде технички системи (изразито хабање, утицај околне средине, ударна и наизменична оптерећења итд.), установљено је да су основни узрочници отказа радних елемената: *триболошки процеси, процеси корозије и појава лома*. Иако је крајњи резултат триболошких и корозионих процеса, лом и губитак материјала, до изненадног отказа услед појаве лома може доћи и када поменути процеси нису достигли критичну фазу. При експлоатацији различитих техничких система посебне проблеме задају изненадни непредвиђени откази, па се највећи број аутора [18,73,145,146,186,192] првенствено бави проблематиком превремених отказа техничких система услед хаваријских оштећења њихових најоптерећенијих елемената.

Анализом резултата истраживања [2,59,89,97,199], може се закључити да је код више од 50% свих оштећених елемената различитих техничких система до оштећења дошло због утицаја триболошких процеса.

Из литературних података [40,65], долази се до сазнања да процеси корозије проузрокују трајан губитак значајне количине металних материјала, који је већи од 2% укупне годишње светске производње. Такође, процеси корозије у великој мери доприносе интензивирању различитих процеса хабања, а могу довести и до лома елемената техничких система услед тзв. статичког замора материјала.

Развој савремених техничких система захтева примену високовредних материјала за израду њихових одговорних елемената, а овакви материјали су по правилу осетљиви на појаву прелина и лома [145,146,147,169]. Лом одговорних елемената најчешће проузрокује изненадне отказе и тешке хаварије, које поред материјалне штете могу представљати опасност по околину и људство [54,173,186].

На основу претходних разматрања може се рећи, да је за успешност експлоатације и одржавања различитих техничких система неопходно познавање механизма настајања и развоја многих процеса, који доводе до оштећења радних елемената машина и уређаја.

1.1 ТРИБОЛОШКИ ПРОЦЕСИ У ТЕХНИЧКИМ СИСТЕМИМА

Према бројним литературним подацима [14,30,38,52,161,162,181] основни фактори који утичу на триболошке процесе могу бити: *геометријски, кинематски, динамички, физичко-хемијски и енергетски*.

Геометријски фактори се односе на: микрогеометрију оствареног контакта (тачкасти, линијски или површински), топографију контактних површина (храпавост, валовитост, коефицијент нерегуларности профила), микро и макро деформације контактних зона (линијска и површинска носивост контактних површина) и стварну површину оствареног контакта.

Кинематски фактори везани су за врсту и начин остваривања релативног кретања контактних површина (брзина кретања, начин кретања, време трајања контакта и др.).

Динамички фактори односе се на врсту, величину, расподелу и промену динамичких сила и специфичног притиска у контактним зонама услед промене спољашњег оптерећења.

Физичко-хемијски фактори зависе од врсте и својстава материјала спрегнутих парова, кристалне грађе површинских слојева материјала спрегнутих парова, врсте насталих једињења у зонама контакта (сулфиди, сулфати, оксиди и др.), дејства новонасталих хемијских једињења на материјале спрегнутих парова и њихове интеракције са мазивом и околном средином.

Енергетски фактори зависе од температуре у микроразнојама контакта услед ослобађања топлоте при унутрашњем и спољашњем трењу, топлотног биланса у микро и макрозојама контакта, начина одвођења топлоте из контактних зона и др.

Геометријски и физичко-хемијски фактори дефинишу основна својства спрегнутих парова, а кинематски, динамички и енергетски фактори дефинишу основне параметре процеса трења.

Сви напред описани фактори имају велики утицај на триболошке процесе, а бројна истраживања су изведена како би се рангирао њихов утицај на процесе трења и хабања. Досадашњим истраживањима о утицају геометријских чинилаца на коефицијент трења доста је постигнуто, али ипак још није утврђена корелација између геометрије дела и параметара хабања. Од кинематских фактора највише је истраживан утицај радне брзине спрегнутих делова на коефицијент трења и установљено је да са порастом брзине коефицијент трења опада. Истраживањима је утврђено да коефицијент трења и величина оптерећења нису линеарно зависни, већ да при веома великим специфичним притисцима у зони контакта, коефицијент трења расте. Бројним истраживањима физичко-хемијских чинилаца утврђено је да хемијски афинитет материјала спрегнутих парова значајно утиче на процесе трења и хабања [16,17,168].

Такође и кристална грађа материјала спрегнутих парова може битно утицати на триболошке процесе. Испитивања су показала да спрегнути материјали хексагоналних кристалних решетки имају мањи коефицијент трења и мању адхезиону силу, него када су спрегнути материјали кубне кристалне решетке. Највећи коефицијенти трења настају када су у контакту материјали површински центриране кубне решетке и хексагоналне решетке [14,30,65]. Сматра се да је то последица различитих положаја система клизања. Систем клизања је производ броја равни клизања и праваца клизања елементарне кристалне решетке. Што је већи број равни и праваца клизања лакше настаје деформација кристалне решетке, чиме се повећава храпавост контактне површине, што повећава коефицијент трења и интензитет хабања [14,52,53,65,168]. Материјали са мањим бројем система клизања имају хексагоналну кристалну решетку (Mg, Zn), и одликују се мањим коефицијентом трења у односу на метале са већим бројем система клизања (Fe, Cu, Al, Pb).

Често се при овим истраживањима узима у обзир међусобна растворљивост метала спрегнутих парова у течном и чврстом стању. Метали који имају добру растворљивост у течном и чврстом стању одликују се мањим коефицијентом трења (Cu - Ni, Co - Ni, Fe - Cr и др). Метали са добром растворљивошћу у течном стању и ограниченом растворљивошћу у чврстом стању (Cu - Ag, Pb - Sn) имају средње вредности коефицијента трења. Метали који се не растварају ни у течном ни у чврстом стању (Fe - Bi, Ni - Cu, Ni - Ag) имају велики коефицијент трења. Из ових разматрања произлази да се на основу бинарних равнотежних фазних дијаграма могу оценити триболошка својства метала, што је битно при избору материјала спрегнутих парова [16,65,168].

Поред растворљивости спрегнутих метала, на њихову отпорност према процесима хабања утиче тврдоћа, процес подмазивања и утицај околне средине. Сматра се да материјали веће тврдоће имају и већу отпорност према процесима хабања. То није увек тако, јер се неке легуре релативно мале тврдоће (лежачне бронзе, полимери и неки други материјали) одликују добром отпорношћу према хабању. Подмазивање, односно средства за подмазивање, такође имају велики утицај на процес хабања. Појава адсорпције и хемиосорпције мазива утичу на механизам процеса трења и хабања, као и на промену својстава граничних слојева спрегнутих материјала. Околна средина има велики значај на настанак и развој процеса хабања, јер она утиче на стварање оксида и других хемијских једињења. Формирани оксидни слој може бити непорозан или порозан. Када је он непорозан и компактан делује као средство за подмазивање и смањује интензитет хабања. Ако је пак оксидни слој порозан, груб и некомпактан долази до његовог одвајања од контактних површина па он делује као абразив и повећава интензитет хабања.

Енергетски чиниоци такође у знатној мери утичу на коефицијент трења. Са енергетске тачке гледишта трење је процес у коме се механичка енергија мења у друге облике енергије, сходно Првом закону термодинамике (закон о одржању енергије), по коме се енергија не губи, већ само прелази из једног облика у други. Другим речима при трењу у контактним зонама долази до трансформације механичке енергије у топлотну, хемијску и електричну. Такође, према енергетској теорији процесе унутрашњег и спољашњег трења у граничним контактним слојевима не треба разматрати одвојено, већ заједно јер представљају јединствен процес [14,38,52,112,186,187].

Хабање материјала контактних површина спрегнутих парова услед трења је неизбежан процес који доводи до великих трошкова. За смањење трења неопходно је применити савремена сазнања из области трибологије не само при конструисању, већ и при изради и експлоатацији техничких система како би се продужио радни век и повећао степен поузданости њихових спрегнутих елемената. При наваривању контактних површина радних делова морају се узети у обзир сви утицајни чиниоци, јер од избора додатног материјала, поступка и примењене технологије наваривања директно зависи структура (кристална грађа) метала навара, а самим тим и његова триболошка својства.

1.2 ОШТЕЋЕЊА ЕЛЕМЕНАТА ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА УСЛЕД ТРИБОЛОШКИХ ПРОЦЕСА

Главни узрочници оштећења и отказа техничких система углавном су *триболошки процеси*. Према литературним подацима [8,14,30,38,52,161,162], у триболошке процесе се сврставају: *контактни процеси*, *процес трења*, *процес подмазивања* и *процеси хабања*.

Контактни процеси се одвијају при различитим условима што изазива одређено *напонско-деформационо стање* у контактним зонама спрегнутих елемената.

Процес трења се јавља на контактним површинама и у контактним зонама спрегнутих елемената при њиховом релативном кретању.

Процес подмазивања се одвија при контакту два спрегнута елемента и мазива као трећег елемента у тој спрези.

Процеси хабања настају као резултат различитих дејстава при релативном кретању, трењу и подмазивању.

Сви ови основни триболошки процеси су међусобно повезани и условљени. Контактни процеси и процеси подмазивања директно утичу на ефекте процеса трења, од кога даље директно зависи *интензитет процеса хабања*. Сви триболошки процеси у великој мери зависе и од околне средине. Пошто се триболошки процеси одвијају у *контактним зонама* које представљају *трибо-техничке системе*, то се у зависности од доминантног механизма настајања и одвијања разликују: *трибо-механички* и *трибо-хемијски системи*. Трибо-механички систем углавном се састоји од два међусобно спрегнута чврста елемента, мазива и околне средине. Утицај околне средине на елементе у контакту умањује се дејством мазива. Постоје трибо-механички системи без трећег елемента (мазива), па се негативни утицај околне средине директно одражава на процесе у контактним зонама. Овај случај се јавља при експлоатацији грађевинске механизације, где су њени радни делови директно у контакту са грађевинским материјалима, па на интензитет хабања у великој мери утичу корозија и оштећења њихових радних површина.

1.2.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ ПРОЦЕСА ТРЕЊА

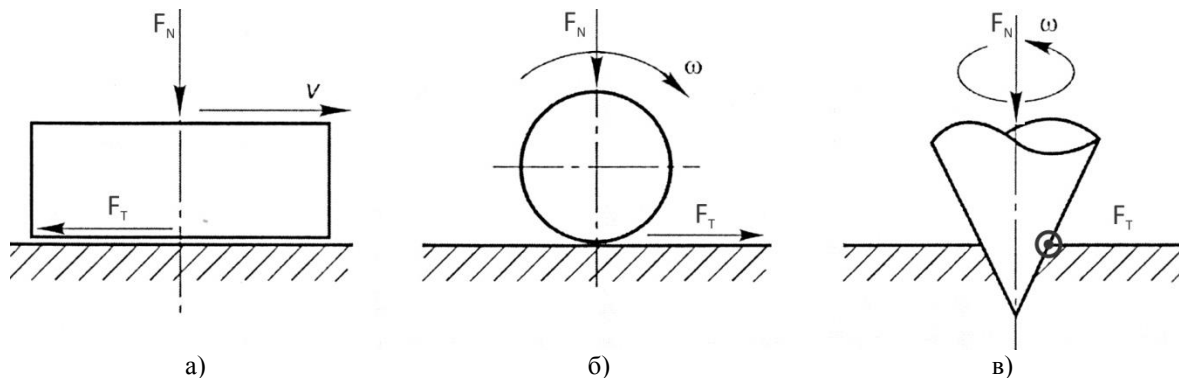
Под појмом *трење* подразумева се процес супротстављања релативном кретању тела која су у међусобном контакту. Трење се дефинише деформацијом средине у којој се неко тело креће, или утрошком рада неопходном за остваривање тог кретања [14,52,161,162,187]. Према агрегатном стању у коме се налазе активни елементи трибо-техничког система, може настати неколико основних врста трења: *трење чврстих тела*, *трење у течностима*, *трење у гасовима* и *трење плазме* које још није довољно истражено. Према зони у којој се процес трења одвија разликују се: *спољашње трење* и *унутрашње трење*.

Спољашње трење се јавља на контактним површинама два тела при њиховом међусобном релативном кретању и представља процес супротстављања том кретању.

Унутрашње трење се јавља при релативном кретању честица унутар неког тела, или при релативном померању једног у односу на други део неког тела (нпр. при клизању код поликристалних материјала, једног слоја течности у односу на другу и др.).

Спољашње трење је праћено деформисањем спољашњих контактних површина два спрегнута чврста тела, а унутрашње трење настаје у процесу деформације унутрашњих слојева чврстих тела, или тек при релативном кретању. У оба случаја долази до претварања механичке енергије у топлотну енергију.

У зависности од врсте међусобног релативног кретања (сл. 1.1) чврстих тела у контакту постоје: *трење клизања*, *трење котрљања* и *трење ротације*.



Слика 1.1 Врсте трења у зависности од облика релативног кретања: а) трење клизања, б) трење котрљања, в) трење ротације [14,181]

Процес трења је скуп субмикроскопских и микроскопских процеса у површинским слојевима материјала при њиховом контакту, који се јављају као последица сложеног напонско-деформацијског стања у контактної зони, изазваног дејством нормалне силе у условима одвијања тих процеса [14,52,162]. У пракси је међусобно релативно кретање тела у контакту сложено и представља комбинацију основних облика релативног кретања, па се тада користи термин *комбиновано трење*.

У литератури [14,52,161,162,187] се често користе термини *суво трење* и *гранично трење*. *Суво трење* се јавља код трибо-техничких система где нема мазива, а *гранично трење* се јавља код трибо-техничких система у присуству мазива, чија је дебљина мања од максималне висине неравнина контактних површина.

Основне величине које карактеришу процес трења су: *сила трења*, *коэффициент трења* и *нормална сила од спољашњег оптерећења*.

Сила трења као основна величина која карактерише процес трења представља потенцијалну енергију отпора при релативном померању. Дејствује у супротном смеру од смера релативног кретања, пропорционална је нормалној сили од спољашњег оптерећења и коэффициенту трења:

$$F_T = \mu \cdot F_N, \quad (1.1)$$

где је F_T - сила трења у N , F_N - нормална сила у N , μ - коэффициент трења.

Кoeffицијент трења представља однос између силе трења и нормалне силе од спољашњег оптерећења, а дат је изразом:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}, \quad (1.2)$$

па је стога бездимензиона величина.

По енергетском приступу коефицијент трења представља однос између потребне енергије за савладавање силе трења и укупне енергије утрошене на остваривање релативног кретања. Назива се још и *коефицијент утрошеног рада* и дат је изразом:

$$\mu_w = \frac{W_T}{W_U} = \mu, \quad (1.3)$$

где је μ_w - коефицијент утрошеног рада (коефицијент трења), W_T - рад који се троши на савладавање силе трења у Nm , W_U - укупан рад потребан за релативно кретање у Nm .

При котрљању једног по другом телу у контакту, долази до појаве еластичних и пластичних деформација у зони контакта, што проузрокује и појаву клизања због дејства тангенцијалних сила. Нормална сила F_N и њена реакција ($F_N = \mu \cdot F_N'$) стварају спрег, односно отпорни момент котрљању, који је потребно савладати да би се наставило релативно кретање. Савладавање тог отпора остварује се вучном силом, односно вучним моментом који је дат изразом:

$$M = F_N \cdot \lambda = F_0 \cdot R = F_T \cdot R, \quad (1.4)$$

где је M - вучни момент у Nm , F_0 - вучна сила у N , F_T - сила трења у N , F_N - нормална сила у N , R - полупречник тела које се котрља у m , λ - коефицијент отпора котрљању у m .

Из једначине (1.4) произлазе изрази за силу трења, коефицијент трења и коефицијент отпора према котрљању:

$$F_T = \frac{\lambda}{R} \cdot F_N = \mu \cdot F_N, \quad (1.5)$$

$$\mu = \frac{\lambda}{R}, \quad (1.6)$$

$$\lambda = \mu \cdot R. \quad (1.7)$$

Рад који се троши на путу x одређен је изразом:

$$W = \frac{M}{R} \cdot x. \quad (1.8)$$

Код различитих облика контактних површина елемената при котрљању, за одређивање карактеристичних напред наведених величина, користе се друкчији изрази [52,187].

На величину коефицијента трења утичу бројни фактори, али при истим осталим условима он је највећи при мировању, а најмањи при чистом слободном котрљању.

1.2.2 ОСНОВНЕ ТЕОРИЈЕ ТРЕЊА

Као што је више пута споменуто трење је основни узрочник настајања непожељних процеса хабања и отказа техничких система. Треба истаћи и да без природног феномена трења многи корисни процеси не би могли да се одвијају. Зато је неопходно довољно проучити механизме настајања и одвијања процеса трења да би се они могли регулисати. Мада су проблеми везани за процесе трења уочени од самог почетка људске цивилизације, они ни до данашњег дана нису довољно истражени.

Прва озбиљна истраживања процес трења започео је *Leonardo da Vinci* [52,161,162], који је први установио везу између оптерећења (нормалне силе) и силе отпора кретању (силе трења), а коефицијент пропорционалности ове две силе назвао је коефицијентом трења. Сматрао је да коефицијент трења представља константну величину која износи 0,25 без обзира на услове остваривања контакта.

Теорије трења, које су касније развијене, довеле су до сазнања да више фактора утиче на коефицијент трења и да он није константна величина. Серијом експеримената француски архитекта *Амонтон* поставио је три основна закона:

- *Сила трења је независна од величине контактне површине;*
- *Сила трења је пропорционална величини нормалног оптерећења;*
- *Коефицијент трења при граничном подмазивању износи 0,30.*

Постављене су и друге хипотезе о природи спољашњег трења, а једна од њих је механичка, односно геометријска хипотеза. По овој хипотези, трење је проузроковано међусобним продирањем неравнина на контактної површини спрегнутих тела. Око ове хипотезе сложило се више научника, а француски научник *Coulomb* је на основу својих истраживања предложио биномни израз за прорачун силе трења и коефицијента трења:

$$F_T = B \cdot F_N + A, \quad (1.9)$$

$$\mu = \frac{A}{F_N} + B \quad (1.10)$$

где је B - коефицијент који се односи на стање површине, A - коефицијент који се односи на отпор клизању услед привлачних сила контактних површина [52,53].

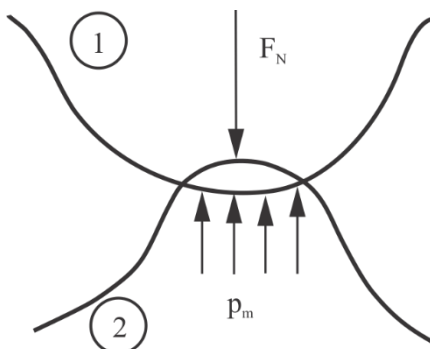
Изрази (1.9) и (1.10) представљају познат *Coulomb - Amontono* закон трења који је и данас задржан не само по облику већ и по физичком тумачењу трења, и служи као основа за развој постојећих и формулисање нових теорија трења.

Новија истраживање из области трења базирана су на проналажењу зависности између силе трења и брзине кретања тела, а у последње време усмерена су на истраживања хидродинамичког и граничног трења. Постоје бројни покушаји даљег развоја постојећих и формулисања нових теорија трења, које нису попримиле општи карактер, већ важе само за појединачне случајеве [52,161,162,181,187].

Према литературним подацима постоје пет основних хипотеза о трењу које имају теоријску и експерименталну потврду за већину метала, неметала и њихових комбинација. Основне теорије трења [14,52,181] су: *адхезиона теорија трења, модификована адхезиона теорија трења, молекуларна теорија трења, молекуларно-механичка теорија трења и енергетска теорија трења.*

1.2.2.а Адхезиона теорија трења

Према овој теорији адхезиони спојеви настају активирањем међумолекуларних привлачних сила потенцираним екстремно високим локалним специфичним притисцима на врховима контактних микронеравнина. Ту се јављају пластичне деформације и трају све до тренутка формирања реалне контактне површине. Адхезиона теорија трења заснива се на праћењу тока тих пластичних деформација све до формирања одређене контактне површине, када се успоставља равнотежа између спољашњих и унутрашњих сила - напона. На слици (1.2) приказан је јединични контакт између неравнина два чврста тела, као и пластична деформација тела мање тврдоће и формирање реалне контактне површине.



Слика 1.2 Начин остваривања јединичног контакта између два чврста тела [14,181]

На основу услова равнотеже у контактної зони два чврста тела нормална сила се може израчунати из израза:

$$F_N = p_m \cdot A_r, \quad (1.11)$$

где је p_m - притисак на контактної површини који одговара тврдоћи мекшег материјала ($p_m = HB$), а A_r - реална контактна површина.

На малој површини врхова неравнина настају високи специфични притисци који стварају услове за појаву адхезионих сила и појаву тзв. хладног заваривања материјала у контакту. На местима јединичних контаката настају заварени спојеви који се називају фрикционе везе. Да би дошло до кидања (разарања) фрикционих веза потребно је да у равни клизања дејствују веће смичуће силе него што је јачина фрикционих веза (микрозавара). Сила која се у равни смицања одупире кидању фрикционих веза, представља једну компоненту силе трења. Сила која пружа отпор кретању врхова неравнина материјала веће тврдоће преко контактної слоја представља другу компоненту силе трења.

Адхезиона теорија полази од основне претпоставке да је сила трења двојне природе и може се дефинисати изразом:

$$F_T = A_s \cdot \tau_s + F_c, \quad (1.12)$$

где је $A_s = A_r$ - површина смицања, τ_s - јачина на смицање материјала мање тврдоће, F_c – сила потребна за релативно кретање врхова неравнина материјала веће тврдоће кроз контактні слој.

У једначини (1.12) први члан представља адхезиону компоненту силе трења, а други деформациону компоненту силе трења. Адхезиона компонента силе трења је знатно већа од деформационе која се може занемарити, па израз за силу трења добија облик:

$$F_T = A_r \cdot \tau_s = F_N \cdot \frac{\tau_s}{p_m}. \quad (1.13)$$

Математички изрази (1.11) и (1.13) потврђују одавно познат закон трења, по коме су сила трења и реална површина трења директно сразмерне нормалној компоненти силе спољашњег оптерећења.

Коефицијент трења дефинисан је односом јачине на смицање фрикционих веза (микрозавара), и специфичног притиска на контактної површини, који изазива пластичну деформацију материјала мање тврдоће, што је дефинисано једначином:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{\tau_s}{p_m}. \quad (1.14)$$

Из једначине (1.14) види се да коефицијент трења директно зависи од односа јачине на смицање фрикционих веза и напона течења мекшег материјала, што показује да је коефицијент трења дефинисан јачином на смицање фрикционе везе.

1.2.2.6 Модификована адхезиона теорија трења

Ова теорија трења развијена је на претпоставци да повећање реалне контактне површине не зависи само од спољашње нормалне силе, већ и од смичућих сила у равни контакта, насталих при релативном кретању спрегнутих елемената. Веза између ове две врсте напрезања дата је изразом:

$$p^2 + \alpha \cdot \tau^2 = k^2, \quad (1.15)$$

где су α и k - константе чије величине зависе од својстава материјала елемената у контакту [53,187].

Увођењем величина нормалног и тангенцијалног напона у једначину (1.15), добија се следећа једначина за k^2 :

$$\left(\frac{F_N}{A_r}\right)^2 + \alpha \cdot \left(\frac{F_T}{A_r}\right)^2 = k^2. \quad (1.16)$$

Увођењем критичног напона смицања τ_s и једнакости $p_m^2 = k^2$ и $p_m^2 = \alpha \cdot \tau_s^2$, где је k - константа једнака притиску при напону течења материјала мање тврдоће уместо једначине (1.16) добија се израз:

$$A_r^2 = \left(\frac{F_N}{p_m}\right)^2 + \alpha \cdot \left(\frac{F_T}{p_m}\right)^2. \quad (1.17)$$

Први део израза (1.17) одговара утицају адхезионих сила трења на реалну контактну површину, а други део утицај тангенцијалних сила на ту површину. На основу овако одређене реалне контактне површине могу се израчунати сила трења и коефицијент трења.

У зависности од јачине на смицање материјала елемената могу се навести бројни примери о утицају процеса трења на хабање контактних површина [14,181]. Када процес трења доведе до почетка хабања почеће разарање површинских слојева материјала, и нагли раст силе трења што и интензивира процес хабања. Ако са τ_{s1} и τ_{s2} означимо јачину на смицање материјала веће односно мање тврдоће, а са τ_s напон кидања фрикционих веза (микроставара), односно адхезионих спојева, тада се сила трења може одредити помоћу израза:

$$F_T = A_r \cdot [\beta \cdot \tau_{s2} + (1 - \beta) \cdot \tau_s], \quad (1.18)$$

где је β - коефицијент удела похабане контактне површине у процесу трења.

На основу адхезионе теорије трења могу се извести неки основни закључци:

- *Реална контактна површина одређена је величином пластичне деформације материјала у зони контакта спрегнутих елемената;*
- *Контакт елемената остварује се по спољашњим граничним слојевима материјала, где су јачине на смицање мање од смицајне јачине основног материјала;*
- *Величине силе трења и коефицијента трења зависе од критичног напона смицања граничног слоја и напона течења основног материјала.*

Сила трења и коефицијент трења зависе од врсте материјала елемената у контакту, величине реалне контактне површине, брзине релативног кретања елемената у контакту и услова под којим се остварује контакт (микрогеометрија, површина, оптерећење контактне зоне, врсте мазива и др.).

1.2.2.в Молекуларна теорија трења

Молекуларна теорија трења заснива се на чињеници да се у зонама контакта два спрегнута елемента јављају привлачне и одбојне молекуларне силе. Једначина равнотеже молекуларних сила има облик:

$$F_N + \sum P_p = \sum P_n, \quad (1.19)$$

где је F_N - нормална компонента силе од спољашњег оптерећења, $\sum P_p$ - збир привлачних сила у зони контакта, $\sum P_n$ - збир одбојних сила у зони контакта.

Будући да је збир привлачних сила (кохезионих или адхезионих) знатно мањи од силе спољашњег оптерећења, израз (1.19) може се написати:

$$F_N = \sum P_n. \quad (1.20)$$

Ако је P величина спољашњег оптерећења које може да уравнотежи један пар молекула, онда n - парова молекула може да уравнотежи спољашњу нормалну силу F_N , што је дато изразом:

$$F_N = P \cdot n. \quad (1.21)$$

Број молекуларних веза које се остварују и кидају при кретању једног елемента по другом на путу x износи:

$$k = \frac{n \cdot x}{l}, \quad (1.22)$$

где је n - број парова молекула, x - пређени пут, l - растојање између молекула.

У општем случају, израз за број формираних и раскинутих веза на путу x , при међусобном релативном кретању елемената трибомеханичког система има следећи облик:

$$k = \frac{C_1 \cdot n \cdot x}{l}, \quad (1.23)$$

где је C_1 - константа која зависи од правца кретања једног елемента по другом у односу на њихове кристалографске осе.

Ако се сила трења, која у суштини представља отпор кидању формираних међумолекуларних веза у зони контакта, дефинише изразом:

$$F_T = \mu \cdot F_N = \mu \cdot P \cdot n, \quad (1.24)$$

онда ће укупан рад који се троши за раскидање формираних молекуларних веза на путу x бити:

$$W_T = F_T \cdot x = \mu \cdot P \cdot n \cdot x. \quad (1.25)$$

Будући да је $W_T = k W$, једначина (1.25) може се свести на:

$$k \cdot W = \mu \cdot P \cdot n \cdot x, \quad (1.26)$$

где је k - број остварених међумолекуларних веза, W - енергија потребна за раскидање везе једног пара молекула.

Када се у изразу (1.25) убаци израз за k из (1.23), онда израз за коефицијент трења има облик:

$$\mu = \frac{C_1 \cdot n \cdot W}{l \cdot F_N}. \quad (1.27)$$

На основу претходних разматрања молекуларне теорије трења, може се закључити да коефицијент трења и сила трења зависе од:

- *Енергије међумолекуларних веза у материјалу спрегнутих елемената, тј. од врсте материјала елемената у контакту;*
- *Броја остварених међумолекуларних веза у зони контакта;*
- *Правца кретања једног елемента по другом у односу на правце кристалографских оса;*
- *Растојања центра поларизованих молекула елемената у контакту;*
- *Величине силе спољашњег оптерећења у зони контакта.*

1.2.2.г Молекуларно - механичка теорија трења

Молекуларно - механичка теорија трења пружа сасвим прихватљива теоријска објашњења за процесе трења и хабања. Ова теорија је предложена и потврђена у неколико радова руских триболога. Теорија полази од тога да је додир чврстих тела дискретан и да њихови микроелементи врхова храпавости имају различиту тврдоћу. При контактним процесима дешава се да узвишења валовитости једне површине упадају у удубљења друге површине, а да истовремено врхови микронеравнина међусобно продиру једне у друге. Потпуно иста појава

настаје и при контакту истородних материјала, зато што њихови елементи храпавости имају различиту тврдоћу. При релативном кретању настају еластичне, потом пластичне деформације и на крају разарање. Због тога је процес праћен отпором релативном кретању у тангенцијалном правцу и појавом реактивне силе механичке природе.

Савладавањем силе отпора при релативном кретању, између две површине у контакту долази до запреминског деформисања материјала које се одвија на дубини која одговара величини продирања врхова микронеравнина [14,53,181]. На контактним површинама долази до разарања оксидних и других слојева, па се контакт остварује између чистих материјала спрегнутих елемената. Услед локалних притисака, на апсолутно чистим деловима контакте површине кристалне решетке могу се приближити на растојање реда величине њихових параметара, чиме су створени услови остваривање заједничких кристалних решетки материјала спрегнутих елемената, односно формирања заварених спојева (микрозавара).

При релативном кретању, формирани спојеви се разарају што изазива додатни отпор кретању, односно повећање силе трења. Ове адхезионе везе се непрестано формирају и кидају па се сила трења услед ове појаве стално повећава. На основу тога се може закључити да је сила трења двојне природе и има молекуларну и механичку компоненту. Молекуларна компонента настаје услед кидања међумолекуларних веза, док механичка компонента настаје услед кидања адхезионих веза на контактної површини при међусобном релативном кретању два спрегнута елемента. У зависности од величине адхезионих сила и дубине продирања микронеравнина постоји више начина успостављања и раскидања фриксионих веза [14,53,181].

Сила трења према претпоставци молекуларно-механичке теорије може се дефинисати према изразу:

$$F_T = F_{Tmol} + F_{Tdef}, \quad (1.28)$$

где је F_{Tmol} - молекуларна компонента која се јавља услед дејства међумолекуларних сила, F_{Tdef} - механичка компонента која се јавља услед деформације контактної слоја материјала мање тврдоће.

Укупна сила трења у зони контакта трибомеханичког система зависи од броја остварених контаката и дата је изразом:

$$F_T = \int_0^{n_r} F_{Ti} dn_r, \quad (1.29)$$

где је F_{Ti} - јединична сила трења, n_r - број реално остварених контаката на додирној површини.

Аналогно сили трења и коефицијент трења представља збир две компоненте:

$$\mu = \mu_{ad} + \mu_{def}. \quad (1.30)$$

Адхезиона компонента коефицијента трења израчунава се из израза:

$$\mu_{ad} = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta, \quad (1.31)$$

где је τ_0 - смичући напон екстраполиран на нормално оптерећење када је оно једнако нула, p_r - реални контактни притисак који је при пластичном контакту $p_r = HB$ материјала мање тврдоће, β - коефицијент удела похабане реалне контактне површине.

Молекуларна сила трења одређује се помоћу израза:

$$F_{Tmol} = A_r \cdot \tau_s. \quad (1.32)$$

Јачина на смицање адхезионих веза зависи од оптерећења, што се може приказати изразом:

$$\tau_s = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (1.33)$$

где је $\beta = 0,03 - 0,20$ - коефицијент молекуларне силе трења које се одређује експериментално.

Деформацијска компонента силе трења F_{Tdef} и коефицијент трења μ_{def} израчунавају се применом одговарајућих емпиријских формула добијених на основу бројних експерименталних података. Општи су извођени под претпоставком да се у зони контакта одвија еластично-пластична деформација, а ови подаци се односе на микрогеометрију и механичка својства граничних слојева контактних површина [14,53,181]. Деформацијска компонента коефицијента трења зависи од дубине продирања врхова неравна спрегнутих елемената, и може се приказати помоћу израза:

$$\mu_{def} = k \cdot \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (1.34)$$

где је $k = 0,5$ за идеалну пластичну деформацију или $k = 0,5 a_g$ за идеално еластичну деформацију, а a_g је коефицијент хистерезиса.

Однос параметара микронеравнине h/R зависи од врсте материјала и од тога да ли преовладава еластична или пластична деформација.

1.2.2.д Енергетска теорија трења

Енергетска теорија трења развијена је шездесетих година прошлог века и заснива се на следећим претпоставкама:

- *Трење је одређено радом потребним да се савлада сила трења, а тај рад је једнак количини енергије која се при процесу трења претвори у топлоту;*
- *Да постоји директна веза између рада потребног за савладавање силе трења и количине продуката хабања који при томе настају;*
- *У процесу трења могућа је појава промене физичко-хемијских својстава контактних слојева спрегнутих елемената.*

Укупан рад потреба за савладавање силе трења на неком путу x одређује се из израза:

$$W_T = F_T \cdot x. \quad (1.35)$$

Према закону термодинамике о одржању енергије укупан рад може се написати у облику:

$$W_T = W_{term.} + W_{hem.} + W_{el.} + W_{jon.} + W_{meh.o}, \quad (1.36)$$

где је W_T - укупна енергија трења, $W_{term.}$ - термичка енергија, $W_{hem.}$ - хемијска енергија, $W_{el.}$ - електрична енергија, $W_{jon.}$ - јонска енергија, $W_{meh.o}$ - енергија механичких осцилација.

Контакт два спрегнута елемента, због микрогеометрија површина, увек је дискретан и остварује се у коначном броју додирних тачака. Када се посматра целокупан триболошки систем, укупна утрошена енергија на трење може се углавном поделити на два дела:

- *Део који се троши на деформацијску-механичку компоненту трења;*
- *Део који се троши на молекуларну-адхезиону компоненту трења.*

Деформацијска компонента трења састоји се из еластичних и пластичних као и деформација због микрорезања у зони контакта спрегнутих елемената и граничног слоја.

Молекуларно адхезиона компонента трења доводи до одвајања материјала у спојевима спрегнутих елемената и граничног слоја. Због незнатног учешћа у процесу трења у односу на учешће деформацијске компоненте њен утицај може се занемарити, па се укупна енергија трења може приказати изразом:

$$W_T = \sum W_{ij}, \quad (1.37)$$

где је i - индекс првог елемента триболошког система, j - индекс другог елемента триболошког система, који учествују у контакту и деформацији.

Имајући у виду да се при одређивању укупне енергије трења полази од појединачних процеса у микрозони, једначина (1.37) може се изразити помоћу густине енергије, запремине која учествује у процесу трења и броја једнаких компоненти енергије:

$$W_T = \sum e_{ij} \cdot n_{ij} \cdot V_{ij}, \quad (1.38)$$

где је e_{ij} - густина енергије, n_{ij} - број истих компоненти енергије, V_{ij} - запремине појединих елемената који учествују у процесу трења.

Рачунска системска компонента енергије трења одређена је једначином:

$$e_T = \frac{W_T}{V_T} = \frac{\sum e_{ij} \cdot n_{ij} \cdot V_{ij}}{n_{ij} \cdot V_{ij}}. \quad (1.39)$$

Удео појединих елемената триболошких система у процес трења, а тиме и расподела сопствене енергије одређује се помоћу коефицијента расподеле енергије α дефинисаног изразом:

$$\alpha_{ij} = \frac{w_{ij}}{w_T}. \quad (1.40)$$

За поједине елементе триболошког система важи и израз:

$$\alpha_i = \sum \alpha_{ij}. \quad (1.41)$$

Имајући у виду да се енергија може расподелити максимално на три дела израз (1.41) може се свести на следећи облик:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \sum \alpha_i = 1, \quad (1.42)$$

где су сумирани само делови механичке енергије. Све остале врсте енергије које споља делују на систем, на почетку у току и при крају релативног кретања, не узимају се у обзир.

Карактеристичне енергетске величине могу се одредити као макроскопске карактеристике основног материјала и треба их одредити егзактно за површинске граничне слојеве у којима се одвија процес трења. То пре свега важи за одређивање нагомилане енергије критичне густине. Број једнаких компоненти истоврсне енергије одређује се методама математичке статистике при истовременом сагледавању величине геометрије контактне површине, која утиче на величину запреминине материјала који учествује у процесу трења. Густина енергије се одређује за сваки елемент триболошког система и прорачунава на основу механичких својстава основног материјала, која произлазе из отпора према деформацији у нормалном и тангенцијалном правцу, тј. из напона течења, јачине на кидање и јачине на смицање.

При еластичној деформацији густина енергије може се одредити из дијаграма јачине на кидање према изразу:

$$e_{el} = \frac{\varepsilon_{v,el}^2 \cdot E}{2}, \quad (1.43)$$

где је $\varepsilon_{v,el}$ - релативна деформација запремине која учествује у процесу трења, E - модул еластичности.

При пластичној деформацији густина енергије је одређена изразом:

$$e_{pl} = \varepsilon_{el} + \int_0^{\varepsilon_v} R_{eH} \cdot d\varepsilon, \quad (1.44)$$

где је R_{eH} - напон течења.

Деформација микрорезањем је стање при коме је постојеће напрезање, због пластичне деформације у зони контакта, толико да се достиже или превазилази јачина материјала. Према експерименталним резултатима [14,52,181], за почетну процену одређивања густине енергије

при деформацији микрорезањем, може се користити сила резања која применом специфичне вредности даје следећи рачунски израз:

$$e_{ir} = 3,82 \cdot k_s, \quad (1.45)$$

где је k_s - специфична сила резања.

Ова густина енергије изражава утицај пластичне деформације и одвајања делића материјала у зонама контакта. Такође, из експерименталних резултата [14,52,181] проистиче да је за процес микрорезања и одвајања материјала пресудна кохезиона енергија атомских парова коју карактерише модул еластичности.

Запремина која учествује у процесу трења јесте онај део граничних слојева материјала који се у току процеса деформишу, а при њеном одређивању полази се од појединачних микронеравнина контактне површине као и дубине слоја напрегнутог материјала. Дубина овог материјала одређује се у зависности од врсте деформације, тј. да ли је еластична или пластична. Еластична деформација прелази у пластичну у зони максималних смичућих напона и за пластичан контакт важи израз:

$$h_{k,pl} = 1,1 \cdot d_{e,pl}, \quad (1.46)$$

где је $d_{e,pl}$ - средњи пречник контакта, $h_{k,pl}$ - дубина напрегнутог слоја материјала.

Овде се подразумева да, у зависности од интензитета напрезања, пластична деформација може захватити целу зону контакта. Запремина напрегнутог материјала која учествује у процесу трења при одвајању адхезионог споја описује се различитим једначинама [14,52,181].

Укупна енергија трења одређена је збиром енергија трења појединих елемената триболошког система и важи релација:

$$W_T = W_{T1} + W_{T2} + W_{T3}. \quad (1.47)$$

Коефицијент трења одређује се као однос енергије потребне за савладавање силе трења и укупне доведене енергије триболошком систему, а ова релација је дата у једначини (1.3).

На процес трења утиче више спољашњих фактора, а неки од њих су: структура материјала и њена промена, брзина релативног померања, величина оптерећења, температура и др. На основу ових утицајних фактора изведена су бројна истраживања да би се успоставила корелација са коефицијентом трења, због специфичности и сложености проблематике, добијена решења нису општег карактера већ важе само за појединачне случајеве [14,52,181].

1.2.3 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ ПРОЦЕСА ХАБАЊА

Све теорије хабања засноване су на основним теоријама трења и служе да се помоћу математичких израза, са довољном тачношћу, одреди губитак материјала са контактних површина услед различитих врста процеса хабања. На основу теорије хабања изведена су различита сврставања процеса хабања [14,30,58,187]. Уопштено се може рећи да постоје два основна механизма хабања: *механички* и *хемијски*.

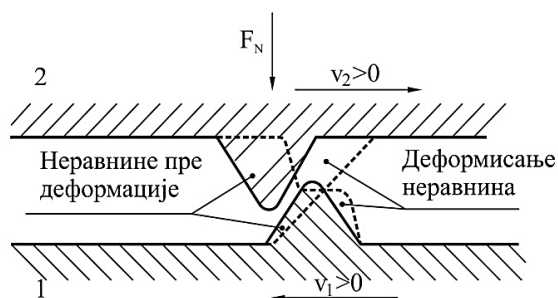
Под појмом *хабање* подразумева се процес који доводи до губитка материјала са контактних површина спрегнутих елемената услед различитих врста њиховог међусобног релативног кретања. У највећем броју случајева процес хабања је непожељан, а најчешће настаје услед механичког дејства које је готово увек потпомогнуто хемијским, термичким, електричним и другим дејствима. Услед одвајања, премештања и одстрањивања материјала са контактних површина, процес хабања неминовно доводи до промене облика, димензија и других карактеристика техничких система, као и смањења њихове поузданости, односно радне способности за предвиђен радни век [161,162,181].

У зависности од услова под којима се остварује контакт чврстих тела, разликују се три основне врсте хабања [14,53,187]: *линијско*, *површинско* и *запреминско* хабање. У литератури [187] среће се и појам *релативно хабање*, које представља однос величине хабања два различита материјала под истим радним условима.

Интензитет хабања или *брзина хабања* представља величину хабања у јединици времена. Одређује се преко *директних параметара* (промена облика, димензија и масе) или *индиректних параметара* који се односе на технички систем у целини (промена микрогеометрије контактних површина, мерење силе трења, величина температуре у појединим тачкама контактних површина и др.) [14,53,187].

Под утицајем спољашњег оптерећења и међусобног релативног кретања два спрегнута елемента, у контактним зонама се јавља одређено напонскодеформационо стање које изазива хабање контактних површина. Величина овог напонскодеформационог стања зависи од више фактора: *врсте и величине спољашњег оптерећења, услова остваривања контакта, врсте релативног кретања, микрогеометрије површина трења, механичких својстава материјала, температуре и др.*

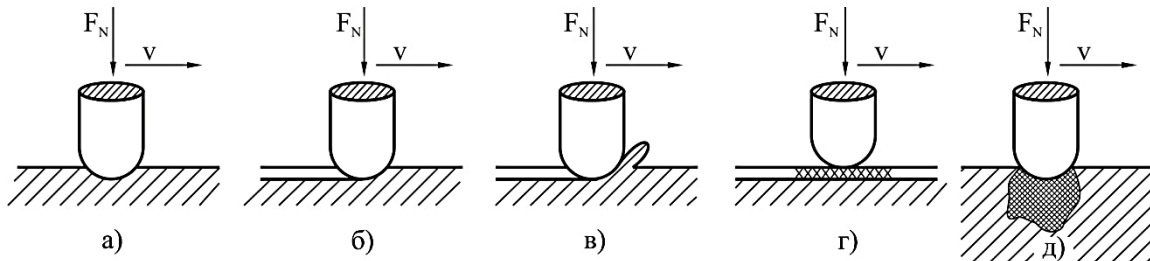
Ниједна до сада позната механичка обрада материјала не може да обезбеди идеално глатке обрађене површине, већ се добијају површине са финијом или грубљом микрогеометријом, што се дефинише *максималним висинама микронеравнина*. При контакту две површине стварни контакт се остварује по врховима микронеравнина па је стварна контактна површина далеко мања од граничних површина спрегнутих елемената (сл.1.3).



Слика 1.3 *Схема остваривања контакта између микронеравнина* [30,141]

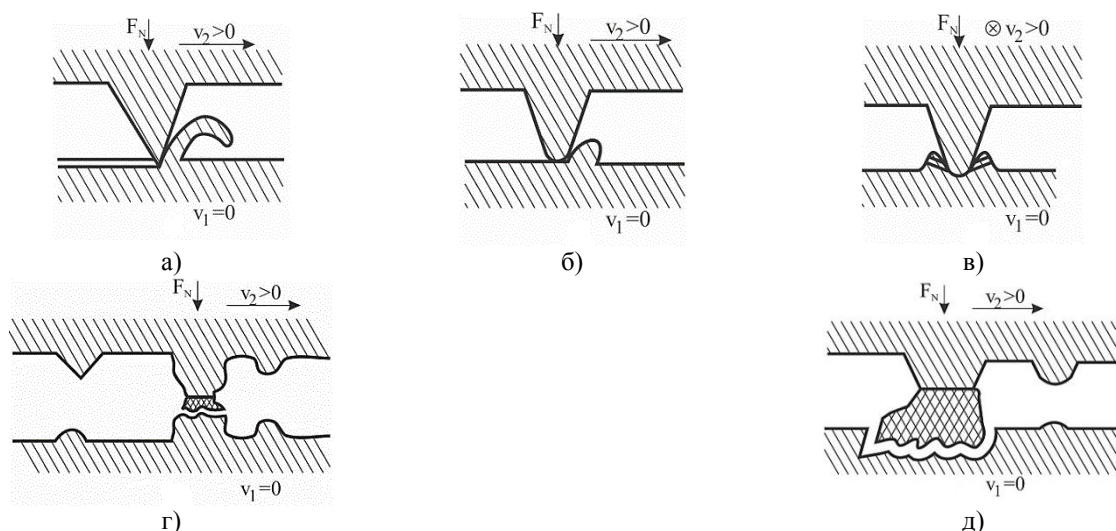
Као резултат интеракције контактних површина процес хабања започиње у додирним зонама врхова микронеравнина. Прво долази до еластичних, а затим пластичних деформација. Под утицајем одређеног напонскодеформационог стања, када материјал врхова микронеравнина не може више да се пластично деформише, долази до њиховог разарања и тренутног губитка контакта. Овај процес се назива *микрохабање*, а у суштини сваки процес хабања састоји се из великог броја процеса микрохабања.

Већина истраживача који се баве проучавањем процеса хабања, сматра да завршна фаза сваког процеса хабања, настаје разарањем материјала услед његовог замора. Такође, већина истраживача сматра да без обзира на механизам настајања, сваки процес хабања се састоји из више фаза. Фазе процеса хабања (сл.1.4) су: *еластичне деформације контактних површина, пластичне деформације контактних површина, одвајање граничног контактног слоја, прилепљивање или одстрањивање граничног слоја и одвајање основног материјала*.



Слика 1.4 *Фазе процеса хабања: а) еластичне деформације, б) пластичне деформације в) одвајање граничног контактног слоја, г) прилепљивање или одстрањивање граничног слоја, д) одвајање основног материјала* [30,141]

Процес хабања доводи до разарања површинских слојева материјала у контактним зонама, а најчешћи начин (сл. 1.5) су: *микрорезање, пластично истискивање, деламинација, одвајање и дубоко чупање*.



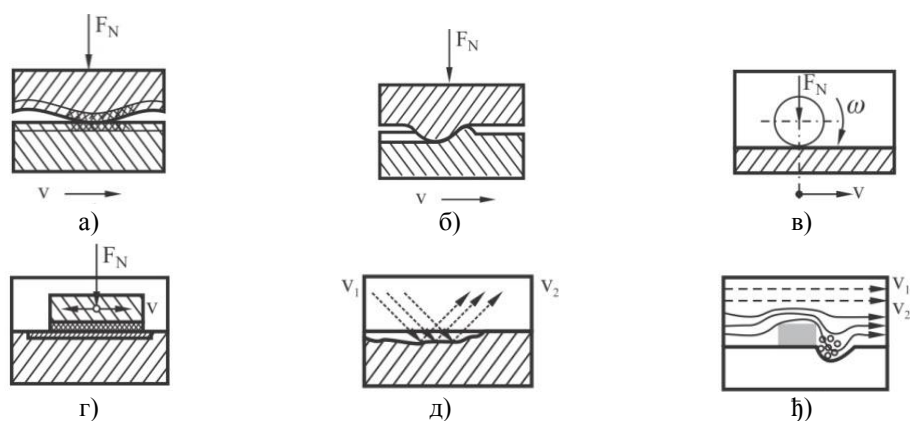
Слика 1.5 Најчешћи начин разарања материјала у контактним зонама: а) микрорезање, б) пластично истискивање, в) деламинација, г) одвајање, д) дубоко чупање [30,141]

Разарање контактних зона готово увек је праћено различитим физичко-хемијским процесима: дифузијом кисеоника из околне средине у површинске слојеве материјала, дифузијом хемијских елемената из једног у други материјал, дифузијом хемијских елемената између материјала и мазива, и др. Понекад ови процеси могу бити главни узрочници разарања материјала, а најчешће се њихов утицај под дејством топлоте интензивира, чиме се убрзава хабање.

Због дејства трења, на контактним површинама ослобађа се одређена количина топлоте, која је сразмерна *брзини трења*. Утицај брзине трења на фрикциона својства материјала није довољно истражен, али је установљено да она утиче на време трајања једне фрикционе везе и *брзину деформације* материјала. Загревање површина фрикционих веза доводи до промена механичких својстава због неизбежних хемијских и структурних промена материјала. При достизању одређених карактеристичних параметара у критичним контактним тачкама и доприноса физичко-хемијских процеса који се тада одвијају, неминовно долази до квалитативних промена својстава материјала контактних површина, па се и интензитет хабања скоковито мења.

1.2.4 ОСНОВНЕ ВРСТЕ ПРОЦЕСА ХАБАЊА

Класификација процеса хабања (сл. 1.6) изводи се према најдоминантнијем механизму настајања и одвијања тог процеса. Најобухватнија класификација хабања дата је у литератури [14,141], према којој оно може бити: *адхезионо*, *абразивно*, *заморно*, *вибрационо*, *ерозионо*, *агитационо* и *корозионо* хабање.



Слика 1.6 Шематски приказ основних врста хабања: а) адхезионо хабање, б) абразивно хабање, в) заморно хабање, г) вибрационо хабање, д) ерозионо хабање, њ) кавитационо хабање [14,141]

1.2.4.а Адхезионо хабање

Адхезионо хабање (сл. 1.6а), настаје као последица адхезије, која се јавља под утицајем различитих триболошких процеса у контактним зонама два спрегнута елемента [52,161].

Адхезионо хабање почиње контактним процесима који доводе до еластичних, а затим пластичних деформација врхова микронеравнина. То доводи до повећања реалне контактне површине и ослобађања топлоте услед унутрашњег трења врхова микронеравнина. Због малих величина појединих реалних контактних површина микронеравнина, спољашње оптерећење ствара високе специфичне притиске. Тада долази до приближавања врхова микронеравнина до растојања реда параметара кристалне решетке, чиме се стварају услови за формирање *заварених микроспојева* (фрикционих спојева).

Хладна пластична деформација материјала микронеравнина доводи до деформационог ојачања, па релативно кретање не изазива раздвајања материјала на ојачаним површинама, већ унутар основног материјала. Овај начин раздвајања материјала је последица дејства јаких *адхезионих међуатомних сила*, чије је дејство знатно јаче од дејства *кохезионих међуатомних сила* у основном материјалу. У зависности од адхезионих и кохезионих сила, насталих у контактної зони, одвојена честица материјала може се везати за материјал другог елемента, поново се везати за материјал елемента од кога је одвојена или се може слободно кретати између контактних површина.

Термичко хабање представља врсту адхезионог хабања, насталог због конструкционе грешке или неправилне експлоатације техничких система, када је недовољно мазива у контактним зонама, па настаје локално прегревање материјала. Термичко хабање почиње од тренутка формирања јаких заварених микроспојева и при дејству мањих специфичних притисака. Релативно кретање изазива дубинско одвајање материјала чупањем, а крајњи резултат ове врсте хабања је настајање великих (хаваријских) оштећења елемената техничких система.

1.2.4.б Абразивно хабање

Абразивно хабање (сл. 1.6б), настаје због абразије, приликом јаких динамичких удара абразива, а наставља се механизмом макро или микрорезања и одвајања материјала са контактних површина. Сматра се да више од 50% укупних продуката хабања настаје услед абразивног хабања [52,161].

Теорија абразивног хабања заснована је на два модела: *отвореном* и *затвореном* моделу. Први модел абразивног хабања настаје интеракцијом два чврста тела, а типичан пример је хабање при транспорту расутих материјала. Други модел абразивног хабања настаје интеракцијом три чврста тела, када се између два чврста тела налази абразивни материјал, а типичан пример овог процеса хабања је дробљење (млевење) различитих материјала.

Абразивно хабање може се одвијати на више начина [52], а као резултат овог хабања, на контактним површинама елемената техничких система остају трагови у облику густо

распоређених јамица, због одвајања материјала услед динамичког удара, или у облику бразди (огреботина), због одвајања материјала услед макро или микрорезања материјала.

На интензитет абразивног хабања велики утицај има облик, величина, тврдоћа абразива, као и тврдоћа контактних површина спрегнутих елемената. Повећањем тврдоће контактних површина спречава се продирање оштрица абразива, али се отпорност на хабање, на овај начин, може повећати само до одређеног односа тврдоће абразива и материјала елемената [52,161].

1.2.4.в Заморно хабање

Заморно хабање (сл. 1.6в), јавља се као последица механизма замора материјала, који настаје при променљивом динамичком оптерећењу. Према теорији заморног хабања, на овај процес утичу контактни процеси и трење, које настаје на контактним површинама микронеравнина. Због тога микрогеометрија контактних површина у значајној мери утиче на хабање услед замора материјала [52,161].

Механизам замора почиње када се при релативном кретању два елемента додирну микронеравнине, тада материјали микронеравнине веће тврдоће деформише материјал микронеравнине мање тврдоће, при чему се испред деформисане микронеравнине јавља напон на притисак, а иза деформисане микронеравнине јавља се напон на затезање. Променом смера релативног кретања спрегнутих елемената контакта се остварује преко нових површина, и долази до промене знака напона у деформисаном материјалу. Природно је да прво настају еластичне, а затим пластичне деформације и када се исцрпи могућност пластичног деформисања долази до повећања концентрације напона, разарања материјала микронеравнине и појаве продуката заморног хабања.

На замор материјала микронеравнина контактних површина, поред нормалних напона, велики утицај имају и тангенцијални напони, који се јављају услед процеса трења, и доводе до смицања и одвајања материјала микронеравнина у равни трења.

Код жилавих материјала, на контактним површинама, остају оштећења у облику округлих јамица, а код кртих материјала у облику разгранатих јамица. Непосредно пре разарања код жилавих материјала прво се јавља прелина, и затим лом, а код кртих материјала одмах настаје лом и стварање продуката хабања.

Питинг је врста заморног хабања које се јавља када се у површинским прелинама на контактним површинама нађе мазиво, које високим хидростатичким притиском доприноси расту прелина, лому материјала и интензивирању процеса хабања.

Спалинг је врста заморног хабања које настаје при трењу котрљања, када долази до честих понављања контаката истог материјала (пример котрљајних лежајева). Тада долази до процеса замора танког отвореног слоја материјала, појаве ламеларних прелина, лома и љуштења тврдог слоја од основног материјала.

1.2.4.г Вибрационо хабање

Вибрационо хабање (сл. 1.6г), настаје као последица триболошких процеса, који се јављају услед осцилаторног релативног кретања спрегнутих елемената са малим амплитудама осциловања. Ова врста хабања јавља се и код непокретних недовољно стегнутих елемената изложених вибрацијама [52,97,141].

Према литературним подацима [52], вибрационо хабање одвија се у четири фазе, при чему се појављују оштећења у облику јамица на контактним површинама спрегнутих елемената, чија величина расте са временом трајања контакта.

Фретинг је врста вибрационог хабања која се јавља при изузетно малим вибрацијама, а препознаје се по тамносмеђим мрљама и појави изузетно финог праха на контактним површинама спрегнутих елемената.

1.2.4.д Ерозионо хабање

Ерозионо хабање (сл. 1.6д), последица је различитих процеса ерозије, када се преко површине елемената креће неки флуид са или без абразивних честица [52,97,141]. Абразивне честице настају као продукти неке друге врсте хабања, које ношене неким флуидом ударају у материјал елемента, па се због тога често среће и назив *ударно хабање*. Овај процес има значајан удео у укупним процесима хабања елемената техничких система.

Интензитет ерозионог хабања зависи од више фактора: својстава абразивних честица, својстава медијума који носи честице, својстава материјала елемената и др. Експерименталним истраживањима дошло се до сазнања да на интензитет ерозионог хабања значајано утиче упадни угао под којим ударају честице у материјал. Код жилавих материјала највећи интензитет ерозионог хабања је при упадном углу од 20°, а код кртих материјала од 90° [52].

1.2.4.е Кавитационо хабање

Кавитационо хабање (сл. 1.6ђ), настаје као последица процеса кавитације, која се јавља када се створе услови за формирање и нестајање мехурова гаса или паре у некој течности, као последица кретања чврстих честица кроз течност или опструјавања течности око чврстог тела. На настајање мехурова гаса или паре и стварање кавитационих шупљина могу утицати: низак притисак течности или паре у систему, вибрације елемената система, смањење протока флуида непосредно пре уласка у систем, појава неког већег или мањег чврстог тела у систему, појава честица или неког расутог материјала већих димензија у систему и др.

Претпоставља се да кавитационе шупљине настају због пада притиска течности до притиска засићења паре на одређеној температури. При порасту притиска пара се кондензује, настаје брза имплозија течности у кавитациону шупљину, што је праћено великим хидрауличним ударима и великим напрезањем материјала у непосредној околини кавитационе шупљине. Кавитационе шупљине настају и нестају изузетно брзо (за неколико хиљадитих делова секунде), а при њиховом нестајању долази до ослобађања велике количине топлоте, локалне пластичне деформације материјала и његовог одвајања по механизму кавитационог хабања.

При кавитационом хабању на контактним површинама елемената остају оштећења у облику јамица, које се временом спајају, тако да цела површина добија сунђераст облик. Губљењем материјала долази до слабљења попречног пресека радног елемента, и када на таквој површини делују други концентратори напона, долази до лома елемента [52,97,141].

1.2.4.ж Корозионо хабање

Корозионо хабање је последица сложеног дејства хемијских и механичких процеса, који се одвијају при интеракцији контактних површина елемената и околне средине или мазива [52,187]. Често се у литератури ова врста хабања назива *оксидационо хабање* или *краће оксидација*.

За разлику од других врста хабања, код процеса корозионог хабања, контактне површине елемената поред међусобних реакција реагују и са околном средином, па се услед хемијских реакција на њима формирају филмови или скраме различитих својстава. Настале хемијске превлаке су најчешће оксидни слојеви који се стварају на фазним границама метала и околне средине.

Све хемијске реакције између контактних површина елемената могу се грубо свести на два случаја: стварање слојева оксида велике тврдоће (корозионе превлаке) веће од тврдоће материјала елемената и стварање превлака које су мање тврдоће од материјала спрегнутих елемената (сулфиди, фосфиди и др.). У оба случаја, све док не дође до одвајања честица ових превлака, може доћи до успоравања процеса хабања, а после тога наступа период убрзаног хабања [52,187].

1.2.4.3 Комбиновано хабање

Комбиновано хабање представља комбинацију неких горе наведених врста хабања. У реалним експлоатационим условима ретко се дешава да се процес хабања одвија по једном механизму, већ долази до њихове комбинације било истовремено или се надовезује једна врста хабања на другу. Због лакшег проучавања процеса хабања, разврставање се изводи према доминантном механизму појаве и развоја хабања. Све врсте хабања готово увек су праћене хемијским реакцијама између спрегнутих елемената, што у мањој или већој мери утичу на развој и брзину хабања.

Комбиновано хабање често се изучава као посебна врста хабања, али се описује као комбиновано хабање две или више врста хабања у одређеној хемијској активној средини. У оквиру комбинованог хабања изузетно је тешко одредити уделе појединих врста хабања, па се количина продуката хабања углавном одређује у целини.

Сиуфинг је типичан пример комбинованог хабања које се у првој фази одвија као адхезионо хабање, а у другој фази као абразивно. Ово хабање настаје као последица повремених прекида мазивног слоја у зони контакта услед високог специфичног притиска [14,97,141].

На основу претходних разматрања може се закључити да различити процеси хабања у великој мери утичу на промену облика димензија и својстава материјала контактних површина елемената техничких система. То је разлог што се непрекидно траже одговори на питање како повећати отпорност материјала према процесима хабања, и тиме смањити губитак скувих конструкционих материјала и расипање све скупље енергије.

Отпорност различитих материјала према процесима хабања одређује се експерименталним истраживањима применом различитих врста трибометара и друге пратеће опреме, помоћу које се успоставља веза између улазних и излазних параметара неког трибо-техничког система. На основу величине излазних параметара дефинише се интензитет хабања, па самим тим и отпорност испитиваног материјала према наведеним врстама хабања.

1.3 ОШТЕЋЕЊА ЕЛЕМЕНАТА ТЕХНИЧКИХ СИСТЕМА УСЛЕД ПРОЦЕСА КОРОЗИЈЕ

Хемијски процеси који настају при експлоатацији многих уређаја, могу бити саставни или пратећи део процеса хабања, а понекад и основни узрок хабања, због природног процеса познатог као корозија метала.

Корозија се може дефинисати као разарање материјала које настаје сложеним физичко-хемијским дејством околне средине. У физичком смислу корозија метала се може сматрати као обрнут процес од процеса добијања метала редукцијом из оксидних руда, те стога представља природну тежњу да се материјал врати у почетно равнотежно стање, тј. да се гвожђе оксидише јер је од оксидних руда и добијено [65,168,179].

Највеће штете код металних конструкција изазива *атмосферска корозија* која напада машинске и грађевинске конструкције у загађеној атмосфери, нарочито у индустријским зонама, градским срединама, рудницима, морској води, земљи и др.

Познавање проблема корозије је важно због чињенице да годишњи губици због корозије износе, у индустријским развијеним земљама, око 6% од бруто друштвеног производа [65].

Губици метала услед корозије могу се умањити на више начина: правилним избором метала или легуре веће корозионе отпорности, смањивањем агресивности атмосфере, воде и тла путем филтрације сагорелих гасова и загађеног ваздуха из индустријских постројења, примарним пречишћавањем и неутрализацијом отпадних вода, и применом привремених или трајних заштитних превлака. Главни је задатак заштитних превлака да се спречи корозија у условима:

- *Атмосферске корозије која обухвата и процесе у земљи, слаткој и морској води;*
- *Електрохемијске корозије која обухвата појаву разарања материјала у директној реакцији са околном средином;*

- Гасне корозије која обухвата процесе високотемпературске оксидације метала у загрејаном ваздуху, и агресивним загађивачима као што су сумпорни оксиди, сумпорводоник, азотни оксиди, хлор и др.

Лабораторијско испитивање корозионог деловања датог медијума заснива се на одређивању губитка масе метала или смањења дебљине пресека епрувете (или радног комада) у неком временском периоду. У неким случајевима, у зависности од намене дела, отпорност према корозији се оцењује и по паду почетних механичких својстава, погоршању термичке и електричне проводности и др.

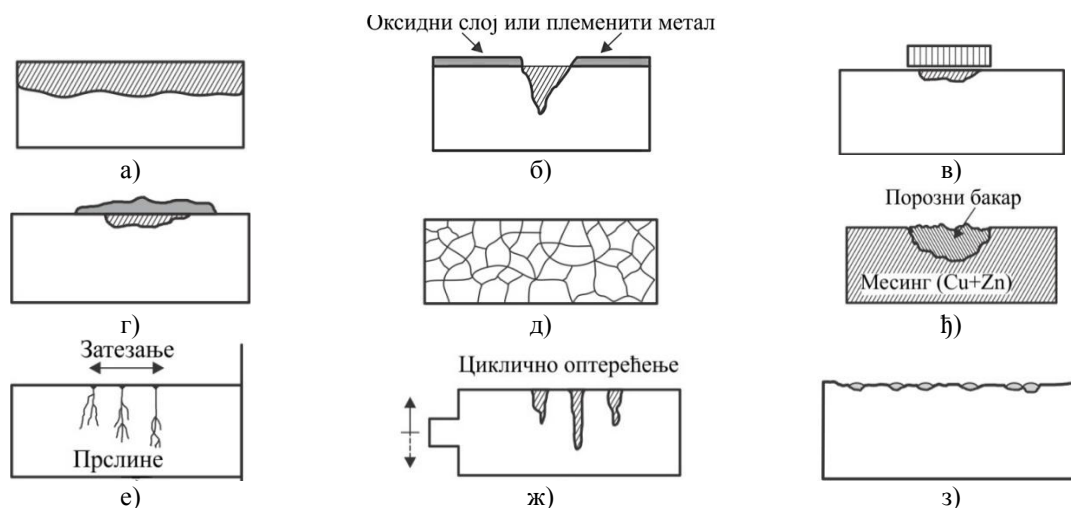
Имајући у виду штетно деловање корозије, посебно код делова хемијске и енергетске опреме, развијено је више специфичних корозионо отпорних легура на бази хрома, никла и кобалта, првенствено намењених за наваривање. Легуре кобалта су отпорне на водене растворе и гасове који садрже хлор и сумпор. Легуре никла одликују се високом отпорношћу на оксидацију на повишеним температурама, али су мање отпорне на дејство гасова који садрже хлор и сумпор. Бакарно-хромне легуре су отпорне у сланој води и сланим растворима, алуминијум и његове легуре су отпорне према киселинама, док нерђајући челици са $Cr > 12,5\%$ поседују релативно добру корозиону отпорност у различитим условима [65].

1.3.1 РАЗЛИЧИТЕ КЛАСИФИКАЦИЈЕ ПРОЦЕСА КОРОЗИЈЕ

Према спољашњој манифестацији корозионог деловања постоји: *равномерна* и *неравномерна* корозија. *Равномерна корозија* одликује се релативно уједначеним губитком материјала по целој површини елемента изложеног агресивној средини. *Неравномерна корозија* одликује се губитком материјала само на појединим местима површине елемента изложеног утицају агресивне средине.

Равномерна корозија (сл. 1.7а), је термин који се користи за многе облике корозије услед којих је цела површина материјала нападнута процесом корозије у приближно истој мери, па се релативно лако може предвидети радни век неког елемента и спречити хаварија услед кртог лома.

Неравномерна корозија (сл. 1.7б до сл. 1.7з), је много опаснија. Праћена је променом хемијског састава и својстава материјала, садржаја нечистоћа у металу, својстава околне средине и др. Тешко се може предвидети радни век неког елемента, па може доћи до појаве кртог лома и тешке хаварије техничких система. Најчешћи узроци настанка неравномерне корозије су промена суве у мокру средину и прелаз из једне у другу околну средину различитих хемијских састава. Неравномерна корозија може да се појави у макроскопском облику (питинг и тачкаста корозија), и у микроскопском облику (међукристална, селективна и напонска корозија).



Слика 1.7 Схематски приказ различитих облика корозије: а) равномерна корозија, б) питинг корозија, в) корозија у зазорима, г) корозија испод страних материјала, д) међукристална корозија, е) селективна корозија, ж) напонска корозија, з) заморна корозија, з) тачкаста корозија [64,141]

Питинг корозија (сл.1.7б), настаје код метала који имају катодну заштитну превлаку, која је на неким местима оштећена, па у основном материјалу настају јамице.

Корозија у зазорима (сл.1.7в), напада материјал на местима зазора између елемената различитих склопова. Типичан пример овог облика корозије је у зазорима између завртња и навртке.

Корозија испод наслага страних материјала (сл.1.7г), настаје на деловима метала који су дуго прекривени песком, муљем, папиром, лишћем и др. Изгледа парадоксално да се овај облик корозије јавља на местима која су релативно добро заштићена од дејстава медијума који је изазива. Типичан пример је корозија вентила од нерђајућег челика која се јавља управо испод наслага нечистоћа и каменца.

Међукристална корозија (сл.1.7д), настаје на границама кристалних зрна легура, која су због излучивања неке секундарне фазе по својим границама постала осетљива на дејство корозионог медијума. Типичан пример је аустенитни и нерђајући челик, код којег се на границама зрна, при загревању 480-760°C, излучују карбиди хрома који постају аноде (растварају се у електролиту), и имају мању отпорност према корозионим процесима.

Селективна корозија (сл.1.7ђ), настаје када процес корозије захвати само једну фазу у двофазној легури, или само један мање племенит метал у једнофазним легурама типа чврстог раствора. Најпознатији пример селективне корозије је губитак цинка чији је садржај већи од 15% у легури месинга. У месингу је племенитији метал бакар који представља катоду и остаје непромењен, а месинг представља аноду из које се цинк као мање племенит метал раствара и одлази у електролит. У том делу легуре остаје порозан бакар знатно снижених механичких својстава због сунђерасте структуре легуре из које је извучен цинк.

Напонска корозија (сл.1.7е), најчешће се јавља код двофазних или вишефазних легура, а код чистих метала овај облик корозије се не јавља, осим у случају када се чист метал нађе у раствору своје соли. Овај облик корозије настаје при истовременом дејству статичког напона на затезање и агресивног медијума. Код нелегираних челика напонска корозија настаје у високопроцентним алкалним растворима. Код легура алуминијума, магнезијума и аустенитних челика напонска корозија настаје у присуству хлора, а код месинга напонску корозију изазива присуство амонијака [40,65].

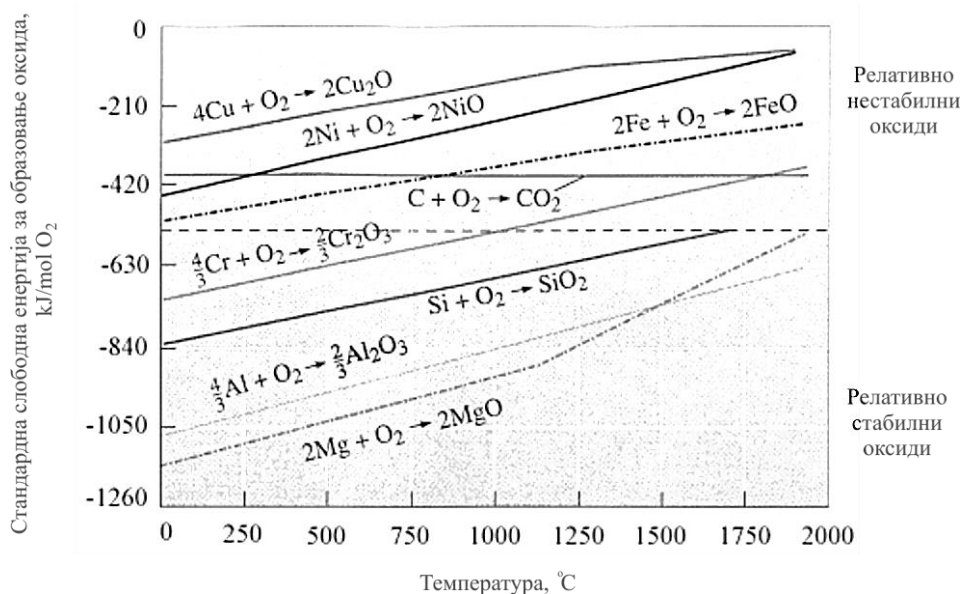
Заморна корозија (сл.1.7ж), настаје комбинованим дејством цикличних напона и агресивног медијума. Овом облику корозије су подложне готово све легуре метала, ако су створени услови за њено настајање. Отпорност неког метала или легуре према овом облику корозије изражава се односом између његове динамичке издржљивости одређене у сланој води и на ваздуху.

Тачкаста корозија (сл.1.7з), настаје на површини метала у удубљењима насталим при некој врсти механичке обраде. Типичан пример појаве тачкасте корозије су удубљења настала после fine обраде брушењем.

У претходним разматрањима приказане су различите врсте корозије, које се одвијају на основу два механизма, који дефинишу све корозионе процесе. Зато је најцелиходнија подела на: *хемијску корозију* (оксидацију) и *електрохемијску корозију*. Хемијска корозија настаје у електронепроводљивим, а електрохемијска корозија у електропроводљивим срединама (техничким електролитима), тј. воденим растворима киселина, база и соли [40,65].

1.3.2 ХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА - ОКСИДАЦИЈА

Хемијска корозија одвија се у загрејаним гасовима и течностима које не проводе електричну струју. Када се каже хемијска корозија углавном се мисли на високотемпературску оксидацију метала и легура. Скоро сви метали могу хемијски реаговати са кисеоником и другим гасовима. Ове реакције доводе до промене хемијског састава и својстава површинских слојева или целог пресека материјала. Метали као што су Al и Ti веома лако реагују са кисеоником. За техничке метале од посебног је интереса да се установи склоност ка оксидацији, природа формираног оксидног филма и брзина оксидације. Склоност ка оксидацији, тј. зависност слободне енергије оксидације и температуре даје Елингмов (Ellingham) дијаграм (сл. 1.8) [7,22].



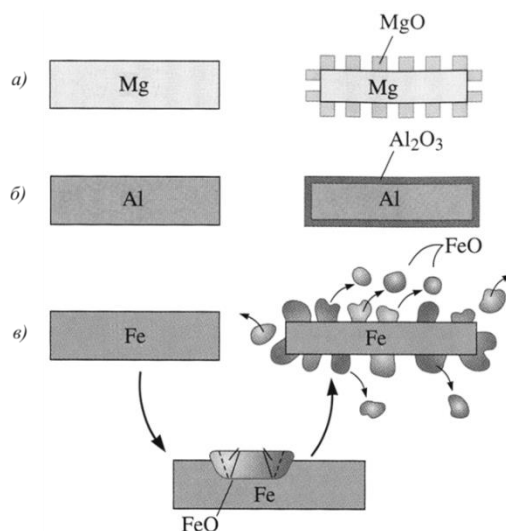
Слика 1.8 Стандардна слободна енергија за формирање неких оксида у функцији температуре (виша енергија – већа склоност ка оксидацији) [7,22]

Овај дијаграм указује на велику склоност ка оксидацији Mg и Al, и супротно томе на веома малу тенденцију ка оксидацији Ni и Cu. Ова склоност неметала Si и C и метала Fe и Cr налази се између наведених екстремних примера. То значи да метали са вишим нивоом стандардне слободне енергије имају и већу склоност према оксидацији [7,22,46,57].

Брзина оксидације зависи од броја атома кисеоника који се хемијски везују за поједине метале у одређеном временском периоду, и може се описати математичким формулама:

- *Линеарна брзина оксидације* $y = k \cdot t$ настаје код порозних оксида као код Mg (y - дебљина оксидисаног слоја, $k = const.$);
- *Параболички однос* $y = \sqrt{k \cdot t}$ запажен је код гвожђа, бакра и никла, где дифузију јона или електрона омета већ формиран непорозан оксидни слој;
- *Логаритамски однос* $y = k \cdot \ln(c \cdot t + 1)$ уочен је при порасту танког заштитног оксидног филма код алуминијума и хрома (c - константа за одређену температуру, околину и састав).

Три описана типа оксида, који се формирају на неким техничким металима, приказани су на слици (1.9).



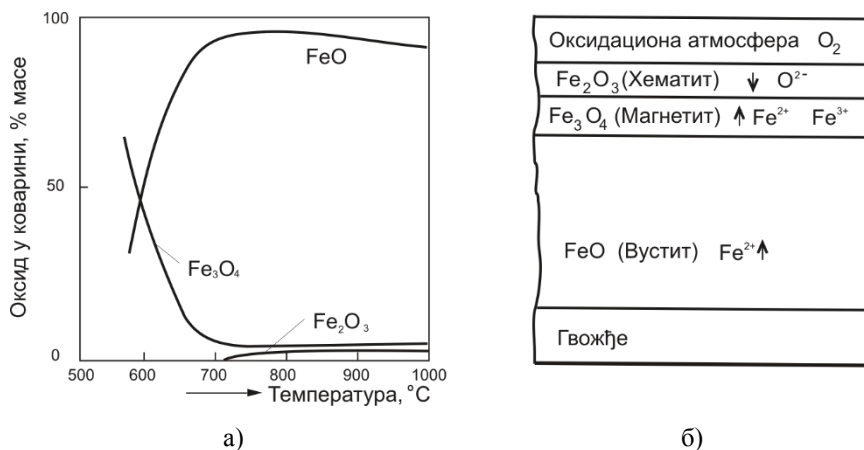
Слика 1.9 Врсте оксида зависно од односа специфичне запремине метала и њихових оксида:
 (а) магнезијум даје порозан оксидни филм, (б) алуминијум формира непорозан оксидни филм
 и (в) гвожђе формира прекидни оксидни филм који не штити од корозије [7,22]

Из свега реченог произлази да је за хемијску корозију у оксидационим срединама карактеристично стварање оксидних слојева на фазним границама између метала и околине. Настали продукти корозије имају карактер полупроводника, па је пораст слоја тада повезан са преносом субатомских честица на веће удаљености него што је међуатомска. То значи да је и овде у питању електрохемијски пренос металних јона, па се зато назив хемијска корозија може довести у питање.

Врста створених оксидних слојева битно утиче на даљи процес корозије. Компактни слој (нпр. код алуминијума) не дозвољава даљи директан приступ корозионог медијума ка чистом металу. Пут позитивних металних јона ка корозионој средини могућ је само дифузијом кроз оксидни слој, те се даље корозија умањује, ако је тај слој компактан. Слабо приањање слоја, порозност или слој који се круни, умањују заштитну улогу оксидних превлака. Добро приањање оксидног слоја још увек не значи да је постигнута трајна заштита. На то још утиче и читав низ унутрашњих и спољашњих фактора, зависних од својстава оксидних слојева и оксидисаног метала [65,179,195].

Међу унутрашње факторе, који директно утичу на особине оксидних слојева, могу се убројити: физичке својства продуката корозије, стабилност продуката корозије и састав продуката корозије.

Спољашњи фактори који утичу на отпорност према хемијској корозији јесу температура, притисак и састав корозионе средине. Посебно треба истаћи значај температуре која утиче на стабилност неких оксида. Код челичних делова углавном се образује слој од три различита оксида, а њихов релативни удео зависи од температуре на којој је радни део изложен (сл. 1.10а). Са ове слике се види да са порастом температуре изнад 565°C изразито расте удео FeO на рачун Fe₃O₄. Позитивни јони гвожђа (Fe²⁺ и Fe³⁺) и негативан јон O²⁻ (сл. 1.10б) лакше дифундују кроз FeO него кроз Fe₃O₄. Пошто удео компактније оксидне превлаке Fe₃O₄ нагло опада са порастом температуре, то се приступ кисеоника олакшава, те ће оксидација гвожђа изнад 565°C бити убрзана. Због тога се нискоугљенични челици не препоручују за дужи рад при температурама изнад 565°C. На високим температурама преко 700°C удео оксида Fe₂O₃ и Fe₃O₄ је готово занемарљив, што значи да је приступ кисеонику на површине челичних делова отворен [7,12,17,32,65].

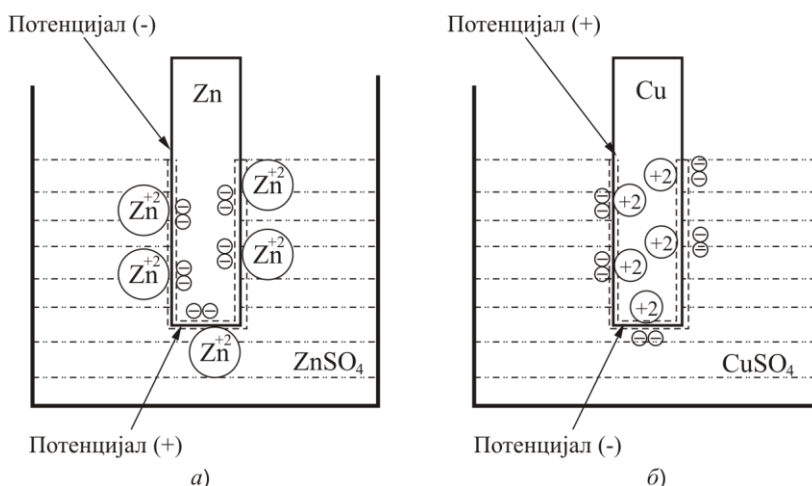


Слика 1.10 Састав оксидног слоја на гвожђу: а) у зависности од температуре, б) у зависности од удаљености од површине при температури вишој од 700°C (смер прелаза јона означен је стрелицама) [12,65]

1.3.3 ЕЛЕКТРОХЕМИЈСКА КОРОЗИЈА

Ова врста корозије настаје у течним електролитима, тј. воденим растворима киселина, база или соли. Јавља се као последица електрохемијских појава, сличних деловању галванске ћелије.

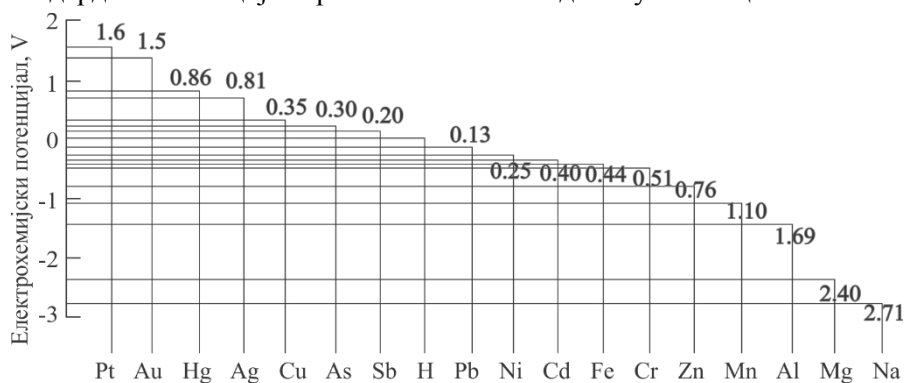
Уколико је метал уроњен у раствор сопствене соли, тј. у раствор који садржи јоне тог метала, у површинским атомима долази до ослобађања валентних електрона. Због емисије електрона стварају се позитивно наелектрисани површински јони који прелазе у раствор, и обрнуто, јони из раствора могу прелазити на метал. Уколико је *електролитички притисак растварања* већи од *равнотежног*, прелазиће позитивни јони метала у раствор, те се површина металне плочице наелектрисава негативним потенцијалом, па се каже да се метал раствара (сл. 1.11а). У супротном, кад се јони из раствора таложу на плочицу уроњену у електролит, она се наелектрисава позитивним потенцијалом (сл. 1.11б).



Слика 1.11 Појава апсолутног потенцијала после загњуривања метала у раствор сопствене соли: а) анодна реакција која доводи до оксидације (дисипације-губљења електрона), б) катодна реакција која доводи до редукције (примања електрона) [65]

На граници између метала и електролита се ствара потенцијална разлика, која има одређену вредност за сваки метал и назива се апсолутним електродним потенцијалом. Ова вредност се не може измерити, јер би се самим мерењем нарушило равнотежно стање. Зато се одређује разлика потенцијала између две електроде различитих материјала, тј. релативни потенцијал. Стандардна електрода за поређење (референтна електрода) зове се водоникова електрода (платинска плоча пресвучена прашкастом платином), чији се потенцијал узима да је нула. То омогућава да се за различите метале одреди тзв. стандардни електродни потенцијал, који се дефинише као релативни потенцијал датог метала, уроњеног у раствор своје соли при

25°C, а све измерено у односу на водоникову электроду. Овде се термин стандардни потенцијал односи на термодинамичке услове, тј. на притисак $p = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ и температуру $T = 25^\circ\text{C}$. Вредности стандардног потенцијала различитих метала дате су на слици 1.12.



Слика 1.12 Електрохемијски потенцијал разних метала у воденом раствору својих соли [196]

Искључивањем осталих фактора који утичу на корозију, може се закључити да су корозионо мање отпорни метали са негативнијим потенцијалом, и стога подложнији нападу електрохемијске корозије, иако има случајева који одступају од овог правила. Што је негативнији електрохемијски потенцијал датог метала, он је склонији ка оксидацији. На пример, метали на десном крају овог низа Mg и Na толико су реактивни тј. склони оксидацији да их можемо заштитити од сагоревања само ако спречимо сваки њихов контакт са кисеоником. Са друге стране, на почетку низа Pt, Au, Ag уопште не реагују са кисеоником, те их зовемо племенитим металима.

Метали који се највише примењују у техници (машинству, грађевинарству, електротехници) као што су Fe, Cu, Ni имају средњу реактивност. Али није само електрохемијски потенцијал мерило отпорности на корозију. На пример, алуминијум има јако негативан стандардни електродни потенцијал близак Mg, али ипак се почетна оксидација брзо зауставља, јер се формира заштитни површински филм алуминијумоксида који спречава дубинску корозију. Такође и титан у почетку лако реагује са кисеоником, али се брзо формира титанов оксид који представља баријеру за даљу дифузију кисеоника. Због тога се Al и Ti, иако високо реактивни метали, веома успешно одупиру корозији. Осим тога, горе приказан низ хемијских елемената говори о термодинамичкој могућности и погонској сили оксидације, али не и о самој кинетици реакције. На њу утиче концентрација електролита, у стварности увек различита од једномоларне (1-M), која је узета као основа за сврставање металних елемената у напонском низу (сл. 1.12). За концентрације електролита различите од (1-M), електродни потенцијал израчунава се по Нернстовој једначини (Nernst, 1905.):

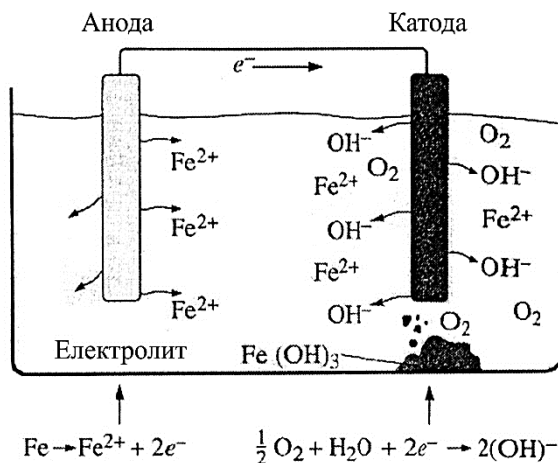
$$E = E^0 + \frac{0.0592}{n} \log(C_{jon}), \quad (1.48)$$

где је E^0 , V - стандардни електродни потенцијал у 1-M раствору, n - валенца металних јона (код већине метала ≤ 2 , код Al = 3, Pb = 4), C_{jon} - стварна концентрација металних јона у g/mol (за 1-M концентрацију $C_{jon} = 1$ и $E = E^0$).

Даље ће се размотрити под којим условима може да почне електрохемијска корозија. То се дешава ако се формира: *галански пар* између различитих метала, *напонска ћелија* због локалних разлика у концентрацији електролита, *концентрацијска ћелија* због локалних разлика у хемијском саставу.

Галвански пар, или *електрохемијска ћелија*, у ствари је струјно коло без спољашњег извора електричне струје. То коло образују анода, катода, метални контакт и електролит (сл. 1.13). Анода емитује електроне преко металног контакта ка катоде, а позитивни јони са катоде одлазе у електролит. У близини катоде позитивни јони прихватају електроне и стога прелазе у неутралне атоме. Процес траје док се не прекине струјно коло, или док се анода потпуно не истроши.

Из описа галванског пара произлази суштина електрохемијске корозије. Код челичних конструкција изложених корозији, позитивни јони гвожђа одлазе у електролит, и тиме се у ствари са површине челика постепено губи метална компонента. Процес се одржава захваљујући струјном колу успостављеном између аноде и катоде преко спољашњег металног контакта са једне стране и кроз електролит са друге стране.



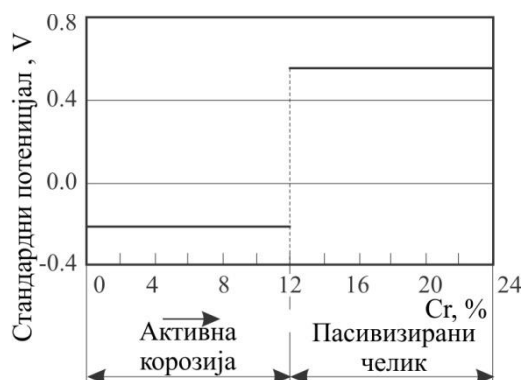
Слика 1.13 Галвански пар [7]

Као што је већ споменуто, метали са негативнијим стандардним потенцијалом би требало да кородирају интензивније него метали са мање негативним, односно позитивним стандардним потенцијалом. Та претпоставка не одговара увек стварности. Нпр. алуминијум, који има негативнији стандардни потенцијал него гвожђе (сл. 1.12) кородира мање интензивно, јер се при корозији у оксидационим срединама покрива танком превлаком оксида Al_2O_3 . То је продукт електрохемијске реакције који штити метал од даље корозије и врши његову пасивизацију. Потенцијал пасивизираниог метала се тако помера ка позитивној вредности.

До сличне ситуације долази дејством одговарајућих електролитичких раствора на хром и хромове челике. Слика (1.14) показује зависност електродног потенцијала хромових челика од садржаја хрома у раствору феро-сулфида у присуству ваздуха. Са слике је јасно да при садржају хрома више од 12% челици прелазе у пасивизирано стање, скоковито постижу позитивнији потенцијал него водоникова електрода, и не кородирају. Међутим код аустенитних нерђајућих челика, карбид хрома се у посебним условима може излучивати по границама металних зрна. За природну појаву образовања карбида, хром се дифундује из легираног аустенита блиском тим границама. Тако се на границама зрна добија ниско-хромни аустенит ($\text{Cr} < 12\%$) који је анодни у односу на остала зрна, те подлеже међукристалној корозији. То се одвија при заваривању аустенитних Cr - Ni челика, а манифестује се корозијом зона паралелних оси шавова које су биле загрејане од $425\text{-}870^\circ\text{C}$, где се дифузија хрома интензивира. Постоје четири могућа начина за решење овог проблема:

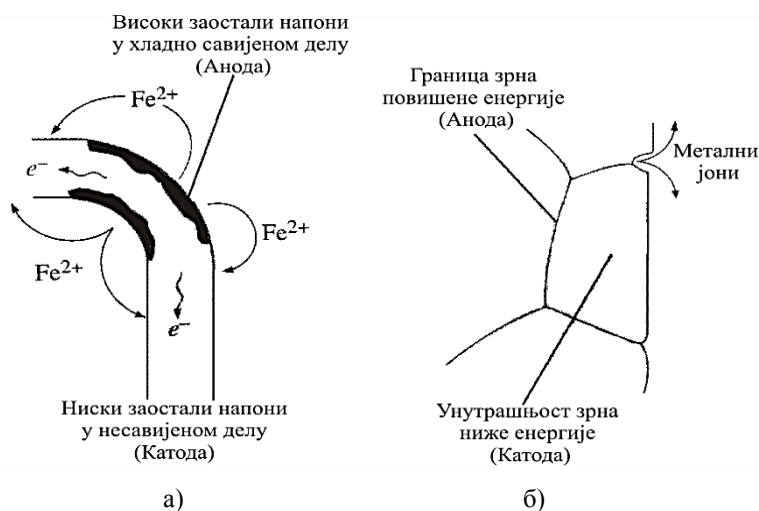
- *Брзо хлађење воденим млазом одмах после заваривања, чиме се спречава дифузија хрома ка границама зрна;*
- *Употреба аустенитног челика стабилизованог са титаном или ниобијумом ($\text{Ti}=(5-6)\text{C}$ или $\text{Nb}=10\text{C}$) који имају већи афинитет према угљенику него хром, те се они при заваривању хемијски сједињују са угљеником, а хром остаје у легираном аустениту у количини изнад 12%;*
- *Употреба челика са садржајем угљеника испод 0.03% тзв. безугљеничног челика;*

- Прекристализационо жарење целе заварене конструкције: загревање изнад 870°C, прогревање сразмерно дебљини да се растворе карбиди хрома и добије стопостотни легирани аустенит и најзад брзо хлађење да би се хром задржао у чврстом раствору.



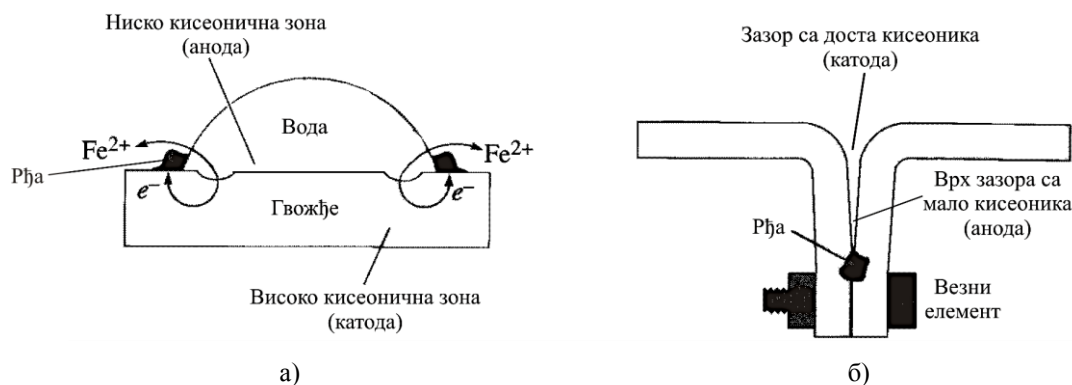
Слика 1.14 Зависност стандардног потенцијала хромових челика од садржаја Cr у феро-сулфиду [65]

Напонска ћелија настаје кад метални делови имају заостале напоне различитог нивоа у појединим зонама. Наиме, више напрегнуте зоне поседују већу слободну енергију па делују као аноде у односу на мање оптерећене зоне. На примеру челичне траке савијене на хладно (сл. 1.15.а), види се да зона савијања делује анодно (већа слободна енергија због савијања) у односу на недеформисану зону, па ће то место да кородира (напонска корозија). Код поликристалних материјала постоји разлика у слободним енергијама границе зрна и унутар зрна. Границе зрна имају виши енергетски ниво него унутрашњост металних зрна, те делују анодно и кородирају у електролиту (сл. 1.15б) [7].



Слика 1.15 Примери корозионих ћелија: а) савијањем челичне шипке на хладно настају заостали напони у зони савијања која је анодна и кородира, б) границе зрна поседују вишу енергију те су стога анодне те кородирају [7]

Концентрациона ћелија (сл. 1.16) настаје због локалне разлике у концентрацији електролита у појединим зонама око металног дела (види *Нернстову* једначину 1.48). Та разлика може се појавити и због ометеног приступа кисеоника ка појединим деловима металног дела због водене капљице (сл. 1.16а) или спојених металних делова (сл. 1.16б). Корозија настала у овим условима назива се *кисеонични колапс*.



Слика 1.16 Концентрациона ћелија: (а) корозија испод водене капљице на челичној плочи због ниске концентрације кисеоника у води; (б) корозија на врху расцепа због ограниченог приступа кисеоника [7]

Електрони са површине метала испод капљице, а са границе чврсто-течно стање (сл. 1.17а), одлазе кроз метал на слободну површину метала, да би се ту неутралисали са јонима Fe^{2+} доспелих са исте локације. На слободној површини металног дела, уз саму капљицу, не долази само до неутрализације ($Fe^{2+} + 2e^- = Fe$), већ и до формирања грудвица рђе ($Fe(OH)_2$).

Другим речима, водене капљице или лишће опало са дрвећа на површину метала, спречавају да кисеоник доспе до метала. Због тога граничне нискокисеоничне зоне делују као анода те кородирају. Слична је корозија у водоводним цевима. Метал изнад нивоа воде више је изложен кисеонику, док је метал испод водене линије готово лишен кисеоника те кородира. Нормално метал удаљенији од нивоа воде кородира много спорије него метал управо испод водене линије, због разлике у путу који електрони морају прећи. Слично томе, догађа се и на врху прслине или зазора, јер они имају мању концентрацију кисеоника него околни основни материјал, те стога делују као аноде, па настаје корозија у зазорима (сл. 1.17б).

Цеви, у земљу укопане, могу кородирати због разлике у саставу тла. Разлике у брзини воде у појединим деловима цеви због различитих пречника, могу произвести концентрациону разлику. Трома вода на проширеном делу цеви има малу концентрацију кисеоника, док брзо покретна вода која захвата ваздух тзв. аерисана вода има већу концентрацију кисеоника. Стога је метал у зони устајале воде анодан и кородира.

Микробиолошку корозију изазивају различити микроби, гљиве и бактерије стварајући услове који потпомажу електрохемијску корозију. Посебно у влажној атмосфери, ови организми расту на површини метала, стварајући нагомилане (неконтинуалне) колоније. Ове колоније, и споредни производи ослобођени при расту ових организама, доводе до промене околне средине која постаје агресивна.

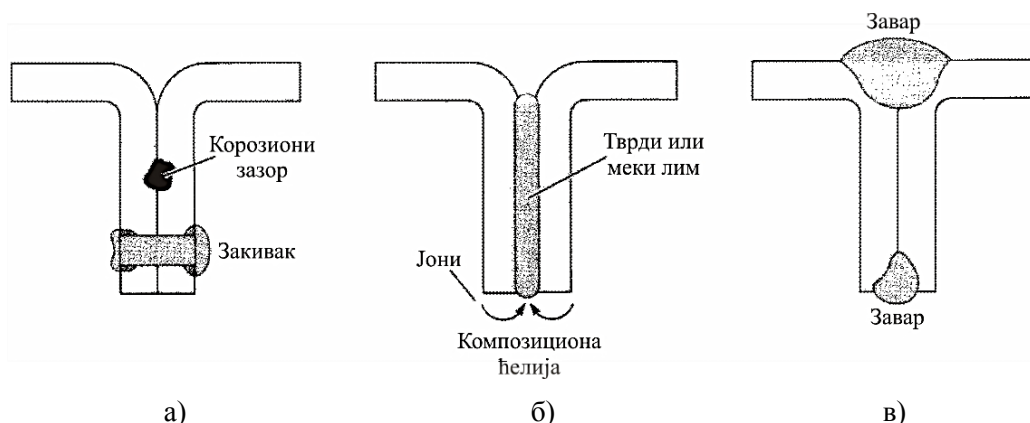
Тако нпр. неке бактерије редукују сулфате из околне средине, при чему се ствара сумпорна киселина која даље напада метал. Бактерије могу бити било аеробне (успевају у присуству кисеоника) или анаеробне (није им потребан кисеоник за даљи развој). Оне нападају низ метала, укључујући челике, нерђајуће челике, алуминијум и бакар, као и неке керамике и бетон. Често се као пример наводи алуминијумски резервоар за авионско гориво (керозин). Кад се гориво задржа нечистоћама, бактерије расту и излучују киселине. Оне делују агресивно на алуминијум, тако да резервоар после извесног времена може процурети.

1.3.4 НЕКИ НАЧИНИ ЗАШТИТЕ МЕТАЛА ОД КОРОЗИЈЕ

Заштита метала од корозије може се свести на: *конструкционе мере, површинску заштиту, примену инхибитора, катодну заштиту, пасивизацију и правилан избор основног материјала.*

Конструкционим мерама техничких система може се успорити или чак спречити корозија: да се спречи формирање галванских ћелија, употребљавају се у склопу метали и легуре који су блиски један другом у напонском низу (сл. 1.12); води се рачуна да површина аноде буде знатно већа од површине катоде; даље се пројектују затворени резервоари и цевоводи, јер

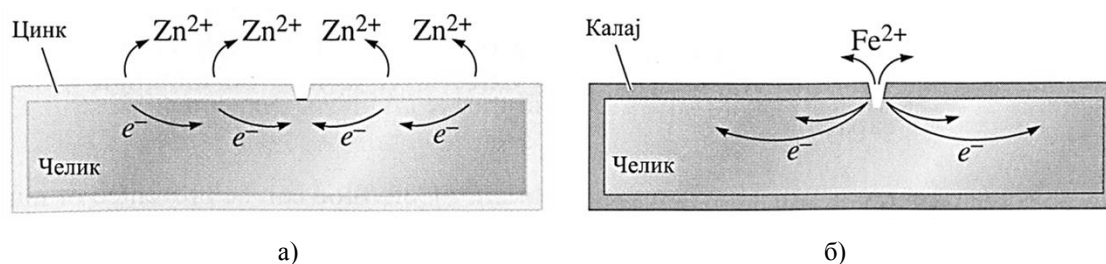
отворени системи, непрекидно захватају различите количине ваздуха у појединим зонама, што потпомаже образовање концентрационих ћелија; најзад треба елиминисати зазоре између закованих, залемљених или заварених делова (сл. 1.17); пројектују се тако да се кородирани делови могу лако и економично заменити.



Слика 1.17 Алтернативне методе за спајање челичних комада: а) закивање може створити концентрациону ћелију; б) тврдо или меко лемљење ствара композициону ћелију; в) заваривање са додатним металом који је сличан основном материјалу може спречити формирање галванске ћелије [7]

Заштитне превлаке нанете на површине металних делова омогућавају да се у електричном погледу изолују анодне и катодне зоне. Ове превлаке такође спречавају дифузију кисеоника или водене паре, као зачетнике корозије или оксидације. Привремене заштите, као што је премазивање металних делова машћу или уљем, намењене су за ограничено време, нпр. у току транспорта или складиштења (из Индије се масовно увозе тањирасто-конични зупчаници заштићени мазивом машћу за време бродског транспорта). Применом трајних органских превлака, као што су боје, керамичке материје (емајл или стакло), постиже се трајна заштита. Међутим, ако се превлака локално оштети (обије), ствара се анодна зона која подлеже корозији.

Металне превлаке наносе се на челичне лимове или траке калајисањем или потапањем у каде са цинком (поцинковавање на топло). Континуалне превлаке, било од калаја или цинка, изоловаће челик од агресивне спољне средине. Међутим, ако се превлака локално оштети, челик испод калајних и цинканих превлака реаговаће различито (сл. 1.18).



Слика 1.18 Заштитне металне превлаке за челик: а) метална превлака од цинка, б) метална превлака од калаја [7]

Цинкана превлака ће и поред локалног пробијања и даље деловати заштитно, јер је цинк анодан у односу на челик (брже кородира јер је електронегативнији). Пошто је катодна површина откривеног челика мала, цинкана превлака неупоредиво веће површине кородираће даље веома малом брзином те ће челик за извесно време остати заштићен. С друге стране, челик је анодан према калају, па ће откривен челик због оштећења калајне превлаке постати анода мале површине, те ће брза корозија челика одмах настати [7].

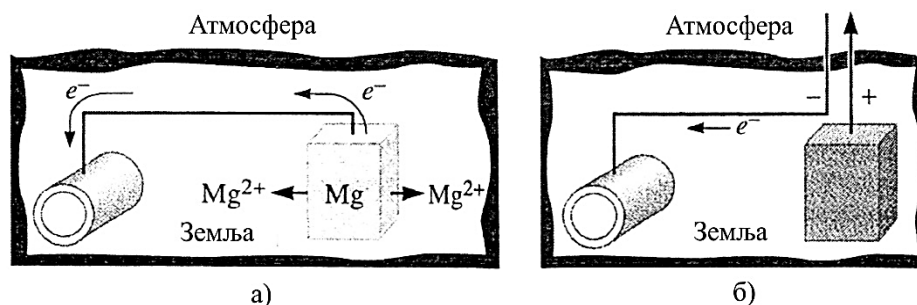
Оштећење заштитних превлака често настаје због хемијских реакција са околном средином. Течности као што су раствор цинка у ортофосфорној киселини образују добро приоњив фосфатни слој на површини метала. Тај је слој пак веома порозан и стога се углавном примењује да побољша приањање боје. Насупрот томе, стабилни, добро приоњиви, непорозни, електронепроводљиви оксидни слојеви формирају се на граничним површинама алуминијума, хрома и нерђајућег челика. Ови оксиди представљају баријеру за електролит и спречавају

формирање галванске ћелије. У новије време, резервоари за течности могу бити заштићени корозионо отпорним тефлоном (тетрафлуороетилен) или другим пластичним масама.

Инхибитори корозије се додају електролитичким растворима да би дошло до миграције неких састојака ка анодној или катодној површини и тако настала *концентрациона* или *резистентна* поларизација. Тако се, на пример, код аутомобилских челичних хладњака, расхладној течности додају натријум фосфат и хроматне соли као инхибитори. Слично томе, различити хромати, фосфати и нитрати образују заштитне филмове на аноди или катоди код парних котлова или измењивача топлоте, јер спречавају формирање галванских ћелија. Овде се само спомиње да је тачан састав и механизам деловања популарног спреја WD - 40 нејасан, али да он упркос томе делује као добар инхибитор. Сам назив потиче од почетних слова *water displacement*, што би значило *одстрањивање воде*, а његова ефикасност пре почетка производње доказана је на четрдесет проба на разним металима.

Катодна заштита заснива се на "убацивању" електрона на метал да би он постао катода (сл. 1.19). Катодна заштита остварује се помоћу "жртвоване" аноде или споља доведеним једносмерним напоном.

Жртвована анода (сл. 1.19а) електрично се повезује са штићеним материјалом образујући електрохемијско коло. Анода кородира шаљући електроне штићеном металу, а позитивне јоне у влажну земљу (електролит). Тиме се спречава анодна реакција на челичној цеви. Жртвоване аноде израђују се од цинка или магнезијума који се у току времена троше (одлазе метални јони M^{2+}), па се оне после одређеног времена морају заменити новим. Овако се од корозије штите укопане цеви, трупови бродова, морске платформе и бојлери.



Слика 1.19 Катодна заштита укопаних челичних цеви: а) жртвована магнезијумска анода којом се постиже да челична цев буде катода, б) споља доведен напон између помоћне аноде од старог гвожђа и цеви омогућује да цев постане катода [7,65]

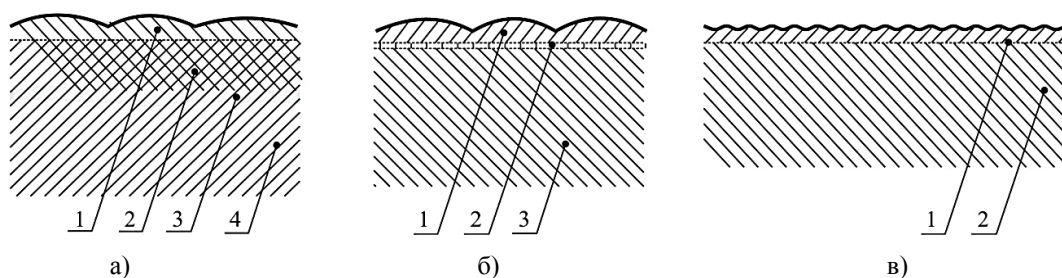
Спољашњи електрични напон доводи се из извора једносмерне струје повезаног са помоћном анодом и штићеним металом (сл. 1.19б). У суштини, батерију везујемо тако да електрони теку ка металу, чинећи да метал буде катода. Помоћна анода, као што је нпр. старо гвожђе, кородира, тј. шаље у земљу позитивне јоне [7,65].

2. САВРЕМЕНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ НАНОШЕЊА МЕТАЛНИХ ПРЕВЛАКА

УВОД

Метализација и наваривање се сврставају у савремене технологије наношења (формирања) металних превлака на радне површине елемената техничких система. То се остварује применом различитих метода, коришћењем одговарајућег енергетског извора (гасног пламена, електричног лука и др.), и погодног додатног материјала. Ове технологије се примењују за формирање металних превлака при: *репаратури оштећених елемената, изради нових елемената или доради новоизрађених елемената са грешком* [65,91,97,112,141,154].

Основна разлика између технологија наваривања и метализације је у томе што се при наваривању топе додатни материјал и површински слој основног материјала, а при метализацији најчешће се топи само додатни материјал (сл. 2.1).



Слика 2.1 *Схема формирања металних превлака: а) наваривањем (1-навар, 2-прелазна зона, 3-зона утицаја топлоте, 4-основни материјал), б) термичком метализацијом (1-метализирани слој, 2-зона делимично стопљеног основног материјала, 3-основни материјал), в) метализацијом прскањем (1-метализирани слој, 2-основни материјал) [97,141]*

Технологије метализације и наваривања, у зависности од примене, могу бити *производне* или *репаратурне*. Када се примењују као производне технологије, основни задатак је формирање металних превлака одређених физичко-хемијских својстава, које ће заштити површине новоизрађених елемената од процеса хабања и корозије. При репаратури или доради основни задатак је формирање слојева недостајућег материјала до пројектоване геометрије елемента. Зато што се у великом броју случајева физичко-хемијска својства додатних материјала разликују од својстава основних материјала, неопходно је правилно пројектовати и применити одговарајућу технологију метализације или наваривања, да би се добиле металне превлаке захтевних својстава и избегли нежељени ефекти (појава прслина, трајне деформације, заостали напони и др.).

Поред неких недостатака, због могућности постизања бољих ефеката од других технологија, метализација и наваривање налазе све ширу примену у различитим привредним областима. Основна предност ових технологија је што се њиховом применом на различите основне материјале могу формирати различите дебљине металних превлака од скоро свих метала, чиме се постиже добијање превлака најразличитијих својстава и отпорности према различитим процесима хабања и корозије [4,97,141].

У зависности од експлоатационих услова у којима раде елементи техничких система доноси се одлука о пројектовању и наношењу превлака различитих својстава (физичких, механичких, хемијских и др.), а све с циљем да се остваре захтевани резултати подобни радним условима.

Поред техничко-технолошке оправданости примене одговарајуће технологије неопходно је остварити и економске ефекте. Техно-економска оправданост примене неке технологије формирања металних превлака може се остварити само пројектовањем и извођењем оптималне технологије, а сваки други приступ најчешће доноси више штете него користи.

За наношење металних превлака данас се углавном примењују следеће технологије: *електролитичка или галванска, технологија потапања, метализација у високом вакууму, дифузна метализација, термичка метализација и наваривање*. При изради нових или репаратури

оштећених елемената техничких система, највећу примену имају технологије термичке метализације и наваривања. У највећем броју случајева ове две технологије се допуњавају, па када је потребно нанети превлаку мање дебљине примењује се термичка метализација, а за наношење превлаке веће дебљине примењује се наваривање. Може се рећи да савремене заваривачке и њима сродне технологије налазе све већу примену при изради и репаратури (обнављању, ревитализацији), савремених техничких система.

2.1 ПРИМЕНА РАЗЛИЧИТИХ МЕТОДА ТЕРМИЧКЕ МЕТАЛИЗАЦИЈЕ

Технологије термичке метализације и наваривања [63,78,97,122,141] су међусобно најсличније од свих заваривачких технологија, и погодне су за наношење превлака различитих својстава отпорних према процесима хабања и корозије (плакирање, платирање, репаратуру оштећених елемената техничких система и дораду нових елемената израђених са грешком.)

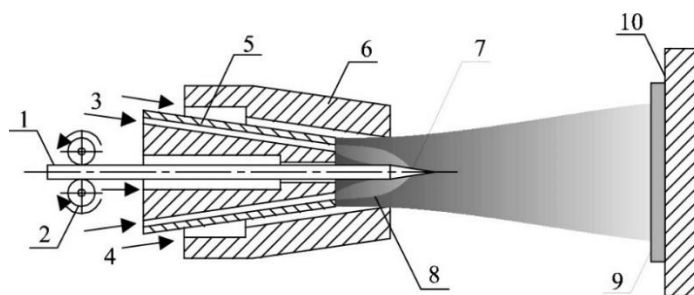
Термичка метализација се заснива на растапању одговарајућих додатних материјала и њиховом преношењу у облику капљица на површину елемента који се металзира. Додатни материјали могу бити у облику праха, жице или керамичких штапова. Спрашени материјали се израђују од легура које се не могу извлачити у облику жице, или када треба нанети мешавину метала који се не легирају. У спрашеном облику наносе се Zn и Al ради заштите од електрохемијске (атмосферске) корозије, а W, Mo и легуре са Ni-Cr и Co за заштиту од гасне корозије. Грануле за метализацију треба да имају приближно лоптаст облик пречника 10-250 μm . Жице за метализацију су пречника 1-8 mm, а израђују се од Al, Zn, Cd, Pb, Cu, бронзе, месинга и легура никла. Керамички штапови за метализацију су дужине од 600 mm и пречника 3,5-8 mm, а израђују се од керамичких материјала отпорних на хабање, корозију, а истовремено су електрични и топлотни изолатори. Данас се примењују неколико поступака термичке метализације: *гасна метализација, електролучна метализација и метализација плазмом.*

2.1.1 ГАСНА МЕТАЛИЗАЦИЈА

За извођење гасне метализације [63,77,78,97,122] користе се *гасни горионици* за метализацију: *жицом, прахом и керамичким штапом.* Ови горионици су различитих конструкционих облика и служе за топљење и депоновање додатног материјала на површине елемената који се металзирају.

2.1.1.a Гасна метализација жицом

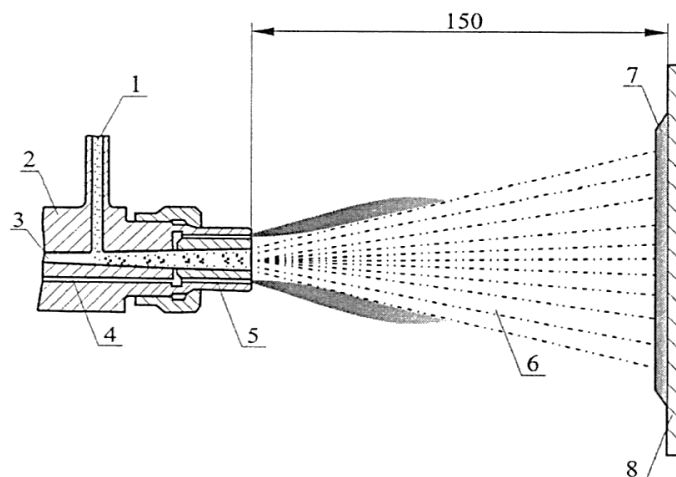
Гасни горионик са жицом као додатним материјалом (сл. 2.2) је уређај који омогућава посебно довођење мешавине горивог гаса ($\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$), за континуално топљење врха жице и компримованог ваздуха за распршивање и депоновање растопљених капљица на подлогу. Препоручује се предгревање основног материјала (подлоге) до 100°C, ради отклањања влаге, а и смањивање величине сопствених термичких напона, који су сразмерни температурском градијенту.



Слика 2.2 *Схема гасне метализације жицом: 1-жица, 2-погонски ваљци, 3-смеша горивог гаса, 4-компримовани ваздух, 5-млазница за довод мешавине горивог гаса, 6-млазница за довод ваздуха, 7-растопљени крај жице, 8-гасни пламен, 9-превлака, 10-основни метал (подлога) [63,97,177]*

2.1.1.б Гасна метализација прахом

Гасни горионик са прахом разликује се од гасног горионика са жицом по томе што даје дужи пламен, и што се зрна праха делом топе на врху млазнице, а делом за време преношења кроз пламен у бакљу (сл. 2.3). Најчешће се примењује прах од нисколегираних и нерђајућих челика као и термопостојаних легура на бази Ni, Cr, Co, Fe, Si, карбида волфрама, легура бакра и др.



Слика 2.3 *Схема гасне метализације прахом: 1-довод за прах, 2-кућиште горионика, 3-довод компримованог ваздуха, 4-довод смеше горивих гасова, 5-млазница, 6-млаз честица, 7-превлака, 8-основни материјал (подлога) [63,97,177]*

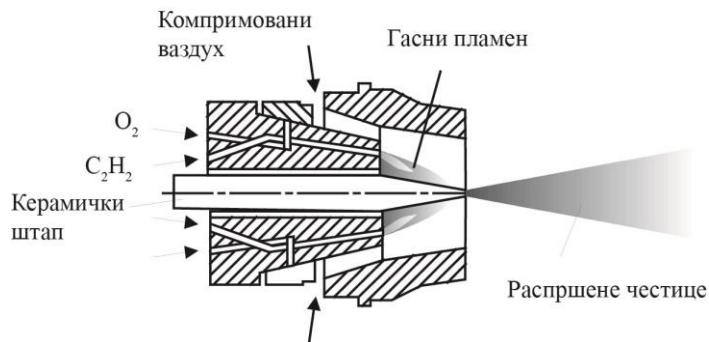
Зависно од намене и захтеваних својстава металних превлака, разликују се *метализација на хладно* и *метализација на топло*.

Метализација на хладно, примењује се код елемената од којих се захтева отпорност према адхезионом, кавитационом и корозионом хабању. Радне површине се најпре механички обрађују, ради повећања храпавости (сачмарење, израда жлебова и др.), предгревају до 100°C, па се затим наноси пластични међуслој од Ni-Al легура, и на крају се наносе слојеви од 0,2÷0,4 mm до постизања потребне дебљине превлаке.

Метализација на топло, примењује се код елемената од којих се захтева отпорност према абразивном, ерозионом и корозионом хабању на високим температурама. Прво се неутралним или редукујућим пламеном радни предмет предгрева на 150-500°C, потом наноси слој дебљине 0,2-0,5 mm за заштиту од оксидације, па загрева на 600-700°C, и затим наносе нови слојеви до 2 mm све до постизања потребне дебљине превлаке. После завршене металације потребно је споро хлађење на мирном ваздуху или под изолационим покривачем ради смањења сопствених термичких напона.

2.1.1.в Гасна метализација керамичким штапом

Гасни горионик са керамичким штапом (сл. 2.4) омогућава да се растопи и распраши керамички додатни материјал и да се депонују капљице на основни материјал. Метализација керамичким штапом слична је металацији жицом, али је горионик друкчије конструкције, зато што су у питању високе температуре. Углавном се примењују термопостојане керамике, а штапови се израђују повезивањем чистих керамичких материјала, уз додатак воденог стакла или високополимерних лепкова као везива. Најчешће се наносе оксиди метала, карбида, бориди, силикати, нитриди, или њихове комбинације. Такође, често се користе штапови волфрам-силицијум и молибден-силицијум, а металација се може извести на елементима техничких система било ког облика и димензија. Основни материјал не мора бити само од метала, већ и од керамичких материјала, полимера, стакла и др. Металне подлоге се предгревају на 100-150°C, у циљу отклањања влаге и смањења сопствених термичких напона.



Слика 2.4 Схеми гасне метализације керамичким штапом [63,97,177]

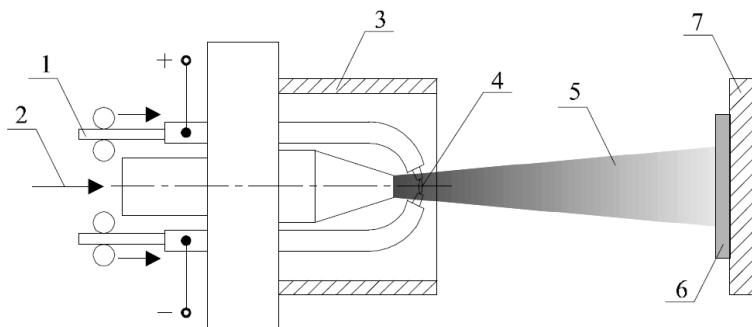
2.1.2 ЕЛЕКТРОЛУЧНА МЕТАЛИЗАЦИЈА

Развијена су два поступка електролучне метализације: *метализација топљивом електродом* и *метализација нетопљивом електродом*.

Електролучни пиштољи за метализацију могу радити само са додатним материјалом у облику жице. Синхронизовано се доводе електродне жице и на њиховим крајевима успоставља електрични лук, топе се врхови жица, а истопљени материјал се захвата компримованим ваздухом и депонује на основни материјал (подлогу). Електрични уређај за наваривање обезбеђује радни напон од 30-40 V и једносмерну струју јачине 250 A.

2.1.2.а Електролучна метализација топљивом електродом

Као и код осталих поступака наношења металних превлака површине за метализацију морају се припремити тако да буду чисте и хрпаве. На слици 2.5 дат је схематски приказ ове врсте метализације, где се види да је електрични лук успостављен између врхова две електродне жице.

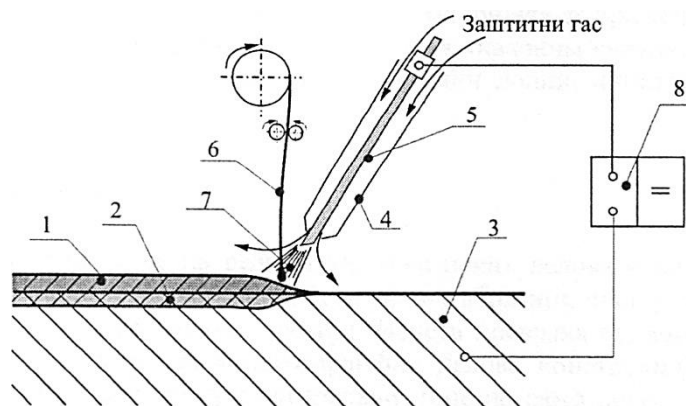


Слика 2.5 Схематски приказ електролучне метализације топљивом електродом: 1-електродне жице, 2-млазница компримованог ваздуха, 3-оклоп млазнице, 4-електрични лук, 5-млаз са растопљеним честичама, 6-превлака, 7-основни материјал [63,97,177]

За превлаке дебљине до 1 mm није потребан пластични (буфорни) међуслој, а за превлаке веће дебљине препоручује се наношење првог слоја од метала високе пластичности (никла или високоугљеничног манганског челика). Поред Al, Cu, Ni, монел метала, Cr-Ni челика, С-Mn челика, Zn, могу се наносити бронза, месинг, Бебитов метал, термопостојане легуре, феритни хромови челици, молибден и др.

2.1.2.б Електролучна метализација нетопљивом волфрамском електродом

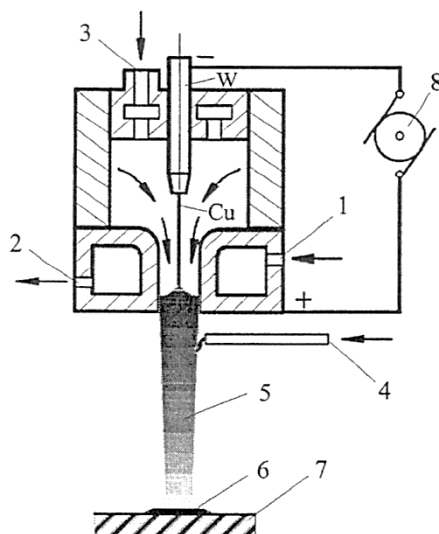
Схематски приказ овог начина метализације дат је на слици 2.6, одликује се високим квалитетом формираних превлака, ниском ценом и релативно једноставним наношењем. Изводи се волфрамском електродом, слично као TIG наваривање, али без топљења основног материјала. Могу се формирати превлаке од термопостојаних челика, легура велике тврдоће, легираних ливених гвожђа и легура обојених метала.



Слика 2.6 Схематски приказ електролучне металнизације нетопљивом волфрамом електродом:
1-превлака, 2-прелазна зона, 3-основни материјал, 4-млазница, 5-волфрамова електрода,
6-додатни материјал, 7-електрични лук, 8-извор једносмерне струје [63,97,177]

2.1.3 МЕТАЛИЗАЦИЈА ПЛАЗМОМ

Метализација плазмом (сл. 2.7) налази посебну примену при изради елемената најсложенијих облика помоћу графитних модела, где се прах топи у електричном луку успостављеном између волфрамоске катоде и бакарне аноде.



Слика 2.7 Схема металнизације плазмом: 1-довод текуће воде за хлађење млазнице, 2-одвод воде, 3-довод плазног гаса, 4-довод праха додатног материјала, 5-млаз плазме, 6-превлака, 7-основни материјал, 8-извор струје [63,97,177]

Основни плазмени гас је аргон, хелијум или азот, а помоћни водоник (5-25%). Ако се металнизира помоћу оксида алуминијума и оксида цирконијума, може се применити азот као знатно јефтинији гас, а који уз то додатно повећава и брзину депоновања. У другим случајевима азот се не сме употребљавати зато што састојци праха могу хемијски реаговати са њим, па постоји опасност од прегревања основног материјала (подлоге).

Ова врста металнизације изводи се тако што се на графитни модел, који је верна копија оригиналног елемента, наноси љуска одговарајућег материјала потребне дебљине. Затим се графитни модел разбија и његови делови избацују, слично као што се ради са ливачким калупима и језгрима. На овај начин израђују се заштитне облоге ракета, ватростални лонци, арматуре вакуумских лампи од метала и керамике и др. [63,78].

2.2 ПРИМЕНА РАЗЛИЧИТИХ МЕТОДА НАВАРИВАЊА

Наваривање се дефинише као процес наношења слојева метала (превлака) одређених физичко-хемијских својстава на радне површине елемената техничких система у циљу

побољшања њихове отпорности према процесима хабања и корозије. Такође, различите технологије наваривања се примењују при репаратури оштећених елемената (репаратурно наваривање) или доради машинских елемената израђених са грешком. Потребно је нагласити, да се при репаратурном наваривању додатни материјал углавном разликује од основног материјала, док су при доради елемената израђених са грешком додатни и основни материјал сличног хемијског састава. Када се радне површине елемената наварују ради побољшања њихових својстава, хемијски састав додатног материјала скоро увек се дијаметрално разликује од хемијског састава основног материјала [63,97,141,158].

У суштини, све технологије репаратуре имају за циљ наношење недостајућег материјала на оштећеним површинама елемената техничких система. Оштећење може настати због хабања, корозије и лома. Анализом радова неких аутора [4,177] дошло се до података да је у више од 70% случајева техно-економски оправдано приступити репаратури радних делова грађевинске механизације применом неке заваривачке технологије. Такође, из техно-технолошког аспекта, могуће је применом одговарајуће технологије обновити скоро све елементе техничких система, па чак и оне најодговорније. Уникатни елементи техничких система се репарирају без обзира на цену репаратуре, јер се економска оправданост постиже смањењем времена застоја и продужењем радног века многих машина и уређаја.

У највећем броју случајева применом репаратурног наваривања скраћује се време застоја техничких система. Ипак је за одлуку о примени репаратуре неопходно проверити бар три основна услова:

- *Могућност примене пројектоване технологије репаратуре;*
- *Цена процеса репаратуре не сме да буде већа од цене израде или набавке новог елемента;*
- *Квалитет репарираниог елемента мора да буде најмање једнак или бољи од квалитета новог елемента.*

Иако технологија наваривања има много сличности са технологијом заваривања, она је ипак најсличнија са технологијом термичке металizacione. Сличност са технологијом заваривања огледа се у следећем: слично се процењује заварљивост, зона утицаја топлоте, сопствено напонско-деформационо стање, а слични су или исти уређаји за извођење процеса и др. Разликују се у много чему, а пре свега различита је сврха примене, различита својства додатних материјала, различити режими и енергетски параметри (јачина струје, радни напон, брзина кретања додатног материјала, начин припреме спајаних елемената, дебљина и техника наношења додатних материјала и др.), [49,63,78,97,141,158]. Ипак је основна разлика између ове две технологије у томе што се при заваривању користи додатни материјал истих или сличних својстава као и основни материјал, док се при наваривању, у највећем броју случајева користи додатни материјал потпуно различитих својстава од основног материјала.

Чињеница да се применом напредних технологија наваривања данас успешно спајају два материјала дијаметрално различитих физичко-хемијских својстава, па чак и два до сада неспојива материјала, довела је до пораста примене ове технологије, усавршавање (модификовања) постојећих и развој потпуно нових технологија. Најчешће примењиване технологије наваривања су: *гасно наваривање; ручно електролучно (REL) наваривање; наваривање отвореним луком, (TIG) наваривање, електролучно (GMA) наваривање у заштити гаса (MAG\MIG или GMA), наваривање плазмом, наваривање под прахом (EPP) и наваривање под троском (EPT)* [45,62,97,141,151,167,177]. Поред ових постоје и различите савремене специјалне тзв. *физичке технологије наваривања: наваривање трењем, ласерско наваривање, дифузионо наваривање, наваривање електронским снопом, наваривање експлозијом, индукционо наваривање и др.* [62,151,167]. Овде се истиче да су савремена открића у физици и електроници најпре нашла практичну примену код заваривања и сродних технологија

Да би се боље схватила суштина, посебност и сложеност процеса наваривања неопходно је познавање неких металуршких појмова и појава: *тврдоћа при црвеном усипању, разблаживање навара основним материјалом (степен мешања), онечишћавање навара, пластичан (буфорни) међуслој, плакирање и платирање, наваривање тврдог метала, термичка и механичка обрадљивост навара, технике наношења навара, топографија навара и др.* [177].

На основу горе реченог, може се закључити да процес наваривања није само једна технологија за репаратуру оштећених елемената техничких система, већ је то и скуп савремених техничко-технолошких процеса, који омогућавају и израду специјалних радних делова. Примена технологије наваривања је готово увек могућа и економски оправдана ако се претходно изврши избор оптималне технологије.

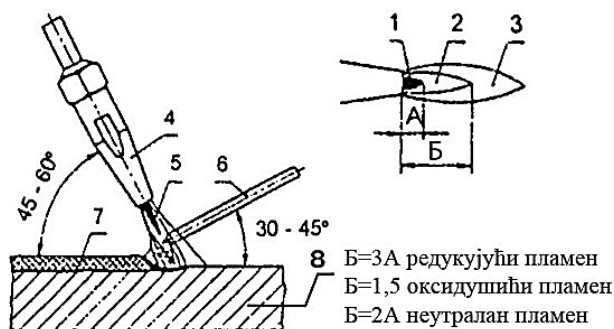
2.2.1 ГАСНО НАВАРИВАЊЕ

За гасно наваривање користи се иста опрема као и за гасно заваривање, с тим што се за гасно наваривање прахом користи специјално конструисани горионик. Гасно наваривање [61,62,63,73,78] се према облику додатних материјала разврстава на: *гасно наваривање жицом*, *гасно наваривање шипком* и *гасно наваривање прахом*. Жице могу бити пуне или пуњене, а као гориви гас се користи ацетилен, јер има могућност регулисања пламена због јасно одвојених зона пламена и могућности двофазног сагоревања. При наваривању већине техничких легура користи се благо редукујући или неутрални пламен, а само при наваривању легура бакра примењује се благо оксидишући пламен.

Техника наваривања може бити удесно или улево, при чему се техником улево постиже мање разблаживање навара, па је зато погодна за наношење кобалта на челичне елементе, као и за наношење олова и других метала са нижом тачком топљења.

2.2.1.а Гасно наваривање жицом и шипком

Гасно наваривање жицом (сл. 2.8), користи се за репаратурно или производно наваривање тврдих метала на елементе од челика, челичног лива, ливеног гвожђа, као и на легуре бакра (бронзе).



Слика 2.8 *Схема гасног наваривања жицом и шипком и препоручено регулисање окси-ацетиленског пламена: 1-жезро, 2-редукујућа зона, 3-оксидишућа зона, 4-гасни горионик, 5-гасни пламен, 6-додатни материјал, 7-навар, 8-основни материјал [63,141]*

Да би се добио гладак и висококвалитетан навар, при гасном наваривању, потребна је велика вештина заваривача, зато што се додатним материјалом (пуна или пуњена жица) и гориоником (пламеном) мора руковати синхронизовано. Додатни материјали су у облику жице на бази легура бакра, олова, никла, кобалта, хрома, као и нисколегираних и високолегираних материјала на бази гвожђа. Практично се могу наваривати елементи од легура обојених метала, различитих врста челика и ливеног гвожђа [97,141,150,154,155,158].

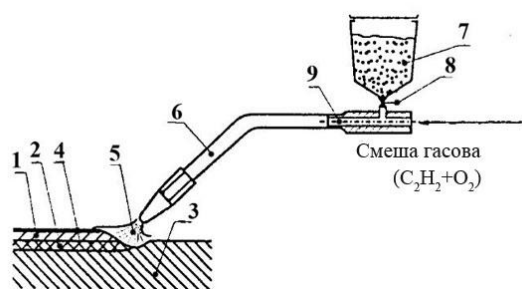
Пре наваривања неопходно је радне површине очистити, охрпавити и осушити, да би се створили услови за спајање основног и додатног материјала. При наваривању делова од челика чистих и сувих површина, није потребан топитељ, а ако се површина не може очистити користе се топитељи. Када се тврдим легурама наварују делови од ливених гвожђа и метала склоних оксидацији, увек се користи топитељ. По потреби, елементи се после уобичајене припреме за наваривање предгревају, а после наваривања загревају до црвеног усијања (граница прелаза метала у стање пластичности), без обзира да ли је претходно било или није било предгревања. Непосредно пре наваривања загрева се и врх жице док не почне њено топљење, па тек тада се почиње са наваривањем. Када наваривана површина заблиста, капљице истопљене жице квасе основни материјал и разливају се равномерно по радној површини.

Гасно наваривање шипком (сл. 2.8) углавном служи за наваривање тврдих метала. Најчешће се користе стелитне шипке које се топе благо редукујућим (троперним) пламеном (вишак C_2H_2 од 20-30%), што потпомаже редукацију оксида и обогаћује површински слој навариваног елемента угљеником, чиме се смањује дубина уваривања [63,73].

Додатни материјали састоје се од тврдих карбида зрнастог облика, упакованих у цевчице од нискоугљеничних челика, да би се наваривање могло извести стандардном опремом за заваривање. При топљењу ових цевчица најпре се депонује матрица у коју се затим равномерно утискују тврди карбиди отпорни на хабање. Овим поступком могу се нанети различити оксиди, нитриди, бориди, силикати (волфрама-силицијума, молибден-силицијума), као и њихове комбинације.

2.2.1.6 Гасно наваривање прахом

Гасно наваривање прахом (сл. 2.9) изводи се горионцима специјалне конструкције, који су снабдевени резервоаром и дозатором за регулацију протока праха. Суви прах гранулације 0,01-0,03 *mm*, услед створеног подпритиска, бива усисан млазом горивог гаса, истопљен пламеном и депонован на површину елемента где се стапа са основним материјалом.



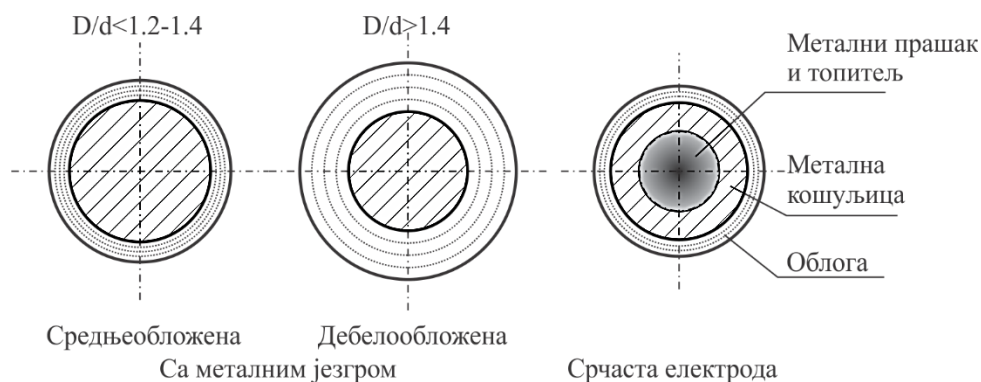
Слика 2.9 *Схема гасног наваривања прахом: 1-навар, 2-зона стапања, 3-основни материјал, 4-троска, 5-растопљени прах, 6-горионик, 7-резервоар, 8-дозатор, 9-комора за мешање [63,97]*

Главна предност овог поступка наваривања је могућност коришћења додатних материјала који се не могу израдити у облику жице или шипке. У једном пролазу могу се добити глатки непорозни слојеви дебљине 0,02–3,5 *mm*. Најчешће се после предгревања на 400–800°C наноси пластичан међуслој дебљине око 0,25 *mm*, а затим наносе слојеви навара од различитих врста додатних материјала. Када су основни и додатни материјал добро заварљиви, онда се једнопролазни навари дебљине до 0,5 *mm* могу нанети без полагања пластичног међуслоја, а квалитет навара не зависи од субјективног фактора тј. од вештине заваривача.

У односу на друге начине гасног наваривања овај има низ предности али и неке недостатке, јер најчешће захтева предгревање, а често и накнадну термичку обраду. Због лоше заварљивости ређе се овим поступком наварују ливена гвожђа, а изузетак чине ковно гвожђе и бели темпер лив. Када је потребно постићи добру отпорност на хабање овом методом се наноси стелит, а када се захтевају отпорност на корозију и добра клизна својства наноси се бронза. Углавном се користи прах различитих врста легираних челика отпорних на хабање, корозију и високе температуре, легуре бакра и легуре са карбидима волфрама [63,73,177].

2.2.2 РУЧНО ЕЛЕКТРОЛУЧНО (REL) НАВАРИВАЊЕ

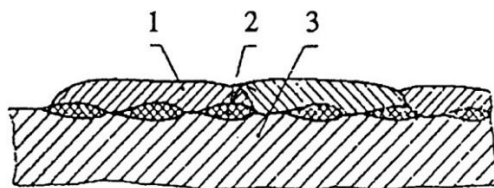
Опрема за извођење REL наваривања иста је као опрема за REL заваривање, с тим што се енергетски параметри наваривања разликују, с циљем да се смањи дубина уваривања и разблаживање навара основним материјалом. Овом методом се тек у трећем пролазу добија навар хемијског састава подобном додатном материјалу. Дебљина једног слоја је 1,5 *mm* а додатни материјал је искључиво у облику обложене електроде пречника 3,25–6 *mm* (сл. 2.10). Главна предност обложених електрода је што се често и у другом пролазу може постићи потребан хемијски састав навара, па није потребна посебна заштита растопљеног материјала, те се може наваривати струјом веће јачине и др. [63,70,78].



Слика 2.10 Попречни пресеци електрода за REL наваривање [97,141]

Примена ове методе је изузетно широка, јер омогућава наваривање готово свих метала на површине делова израђених од челика, легура бакра, легура алуминијума, легура никла и др. Наваривање се може извести више пута на истом делу тзв. *вишеструким наваривањем*, с тим што је претходно потребно обрадити оштећене површине брушењем и уклонити прслине које делују као високи концентратори напона. Наваривање слојева веће дебљине на масивне челичне подлоге са садржајем угљеника изнад 0,25%, захтева обавезно предгревање на 150°C, и одржавање ове температуре у току наваривања догревањем. При наваривању аустенитних манганских челика прогревање се не препоручује, због потребе минималног уноса топлоте и брзог хлађења струјањем ваздуха или млазом воде, да би се спречила појава кртости [20,21,63,66].

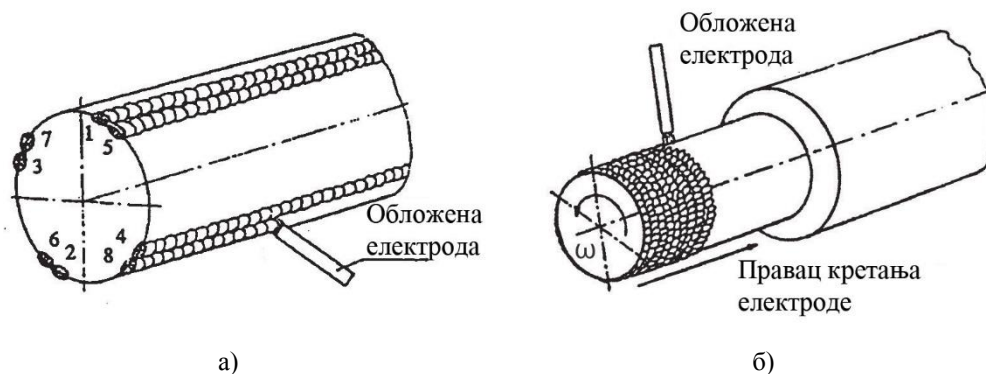
При наваривању метала добре заварљивости полажу се широки навари, а користи се струја веће јачине, док се при наваривању метала који су склони појави прслина полажу краћи навари и користи струја мање јачине. Наваривање већих површина кртих материјала захтева претходно полагање пластичног међуслоја аустенитним електродама или електродама Fe-Ni, а навари морају бити растављени. Наредни наварени слој наноси се широким наварима и максималном јачином струје као при заваривању (сл. 2.11). Наношење пластичног међуслоја препоручује се и када се основни и додатни материјал знатно разликују по хемијском саставу, али и када основни материјал спада у условно заварљиве челике [63,70,97,141].



Слика 2.11 Начин наношења дебелих наварених слојева код кртих метала: 1-навар од легуре са 60% волфрамовог карбида, 2-навар од челика 18Cr8Ni, 3-основни материјал Č1212 [97,141]

Када се захтева да наварене површине имају постојану тврдоћу на повишеним температурама, отпорност на термичке ударе, хабање, корозију и др., овим начином је могуће извести наваривање стелитним електродама, које се израђују у облику шипки или обложених електрода. Пре употребе, стелитне електроде се суше на 300°C (2–4 h), а наваривање се изводи најмање са два слоја једносмерном струјом обрнутог поларитета и што мање јачине. Неопходно је предгревање основног материјала на 600°C које се одржава догревањем у току наваривања. Хлађење до 400°C не сме бити брже од 50°C/h, а најбоље је хлађење извести у пећи коришћеној за предгревање.

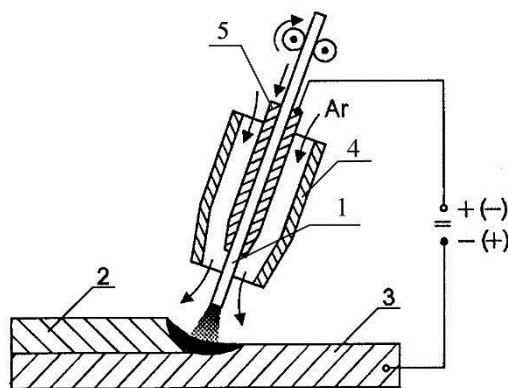
Поред наваривања равних површина овај метод се користи и за наваривање цилиндричних површина делова, тако што се полаже уздужни или кружни навар (сл. 2.12).



Слика 2.12 Препоручени начини наношења навара на цилиндричне површине елемената: а) уздужни навари, б) кружни навари [97,141]

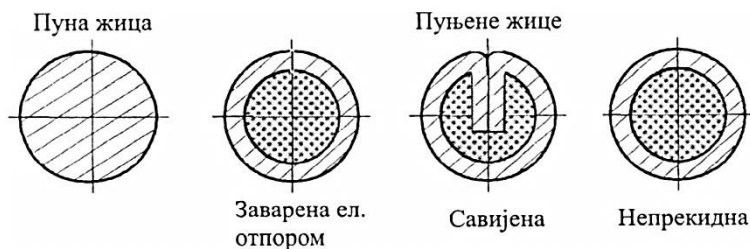
2.2.3 ЕЛЕКТРОЛУЧНО (GMA) НАВАРИВАЊЕ

Електролучно наваривање топљивом електродном жицом у заштити инертног или активног гаса (MIG/MAG) назива се GMA метода [9,63,64,74,76,78], где се електрични лук успоставља између топљиве пуне или пуњене жице и навариваног елемента, а стапањем додатног материјала и основног материјала формира се навар (сл. 2.13). Додатни материјал је у облику жице пуног пресека пречника 0,5–1,6 mm или пуњене жице пречника 1,2–8 mm.



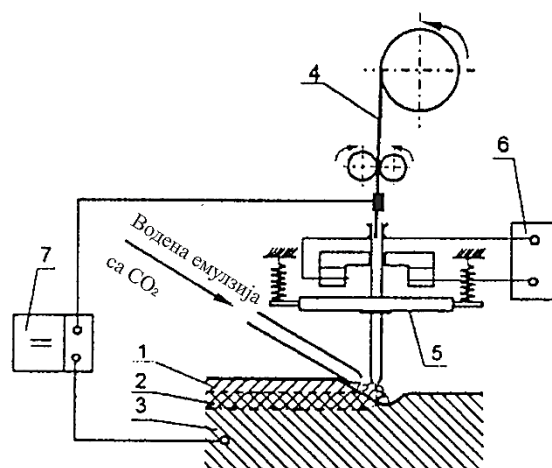
Слика 2.13 Схема наваривања GMA поступком: 1-топљива електрода, 2-навар, 3-основни материјал, 4-млазница, 5-бакарна вођица [63,97,141]

Овом методом може се извести и наваривање краткоспојеним жицама пречника 0,5–1,2 mm чиме се обезбеђује минимално топљење основног материјала, минимално разблаживање навара, минимални сопствени напони и деформације. У циљу повећања количине депонованог материјала може се увести додатна хладна или предгрејана жица.



Слика 2.14 Попречни пресеци пуне и пуњених жица за наваривање [63,97,141]

Поред стандардног GMA наваривања постоје и више његових модификација (сл. 2.15): *виброконтатно, електровибрационо и наваривање применом водене емулзије.*

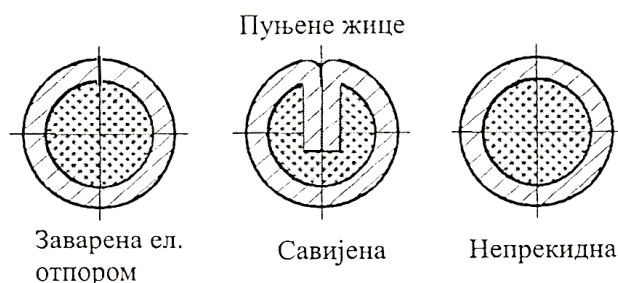


Слика 2.15 Модификације GMA наваривања: 1-навар, 2-зона топљења, 3-основни материјал, 4-електрода, 5-вибратор, 6-извор струје за напајање вибратора, 7-извор струје [63,97,141]

Овај метод и његове модификације имају широку примену код производног и репаратурног наваривања елемената техничких система сложених облика и различитих димензија израђених од нелегираних и легираних челика. Вибрирањем главе за наношење додатног материјала или мењањем напона електричног лука постиже се краткотрајно загревање основног материјала и смањење дубине уваривања. Интензивним хлађењем емулзијом готово у потпуности се елиминишу деформације, па се могу наваривати веома танки и дугачки елементи, и нанети танки слојеви депонованих материјала. Применом пуне жице, у једном пролазу може се нанети слој дебљине 0,5–3 *mm*, а пуњеном жицом слој дебљине 0,5–6 *mm*, уз минимално разблаживање навара (0,5–4%). Због велике продуктивности и других предности над осталим методама, овај начин је погодан за полуаутоматско и аутоматско наваривање равних и сферних површина велике ширине, уз примену најразличитијих додатних материјала [62,63,155,158].

2.2.4 НАВАРИВАЊЕ ОТВОРЕНИМ ЛУКОМ

Наваривање отвореним луком је полуаутоматски електролучни метод без употребе топитеља и заштитног гаса, јер се користи пуњена електродна жица (сл. 2.16), која у свом језгру садржи спрасшене легирајуће елементе и дезоксидаторе [63,78].



Слика 2.16 Попречни пресеци пуњених жица за наваривање отвореним луком [63,141]

Пуњене жице, поред легирајућих елемената и дезоксидатора, садрже и састојке чијим сагоревањем или разлагањем настаје заштитна атмосфера у зони наваривања. Облик пуњених жица може да буде различит и он утиче на стабилност електричног лука. Предност овог у односу на друге електролучне методе је једноставна опрема, која је иста (извор струје и пиштољ) као за GMA наваривање.

Пуњене жице су најчешће као и за GMA наваривање пречника 0,5–1,6 mm ређе 2,4 mm и 4 до 8 mm; кошулица је од нискоугљеничног челика. Слично као и обложене електроде пуњене жице могу бити базичне, рутилне и рутилно – базичне. Дебљина навара у једном пролазу креће се од 3-6 mm, и већ у првом пролазу постижу се потребна својства, али се најчешће при наваривању равних и сферних површина наносе два слоја. При наваривању одговорних радних делова отвореним луком може се применити и додатна заштита гасом CO₂ или Ar и CO₂.

2.2.5 НАВАРИВАЊЕ TIG МЕТОДОМ

Овим методом наваривања најчешће се репарирају или производно наварују делови мањих димензија израђени од нерђајућих челика, обојених метала и њихових легура. Поред ручног вођења главе за наваривање и додатног материјала могуће је и аутоматизација овог поступка. Карактеристичан пример аутоматизације је пооловљавање (плакирање) унутрашње површине резервоара. Оловна жица у заштити аргона доводи се у поље дејства електричног лука насталог између волфрамове електроде и основног материјала резервоара. Оловни слој наноси се једносмерном струјом обрнутог поларитета, при чему се резервоар окреће, а глава за наваривање изводи праволинијско кретање. Пре наваривања, унутрашњост резервоара се чисти до металног сјаја и наноси пластичан међуслој од калајно–оловне бронзе [62,63,72,77,78,177].

Код овог метода дебљина навара у једном пролазу креће се од 1,5–5 mm а разблаживање је 5–10%. Техником наношења навара улево постиже се мање разблаживање и већа продуктивност. Додатни материјал може бити у облику жице, пуњене жице, шипке, а код једне модификације овог метода може се применити и додатни материјал у облику праха. Модификација се састоји у томе што се прах од карбида волфрама или хрома насипа на навариване површине које се при загревању плитко топе, а карбиди се у њих чврсто утискују.

За полагање навара велике тврдоће користе се стелитне легуре хемијског састава од 60% Co; 25% Cr; 6% W; 1,5% C и 1% Si, а израђују се у облику шипке, односно штапа. За полагање навара отпорних на јака ударна оптерећења користи се аустенитни мангански *Хадфилдс* (*Hadfields*) челик 1,0 - 1,4% C и 10-14% Mn. Корозионо отпорни навари су од монел метале легуре (67% Ni; 30% Cu; 1,5% Fe и 1,5% Mn) која је отпорна на корозију чак и у киселинама, базама и гасовима. За наливање клизних лежишта употребљава се Бебитов метал (40% Sn; 48,5% Pb; 10% Sb и 1,5% Cu), која је изузетно отпорна на процес хабања [63,78,177].

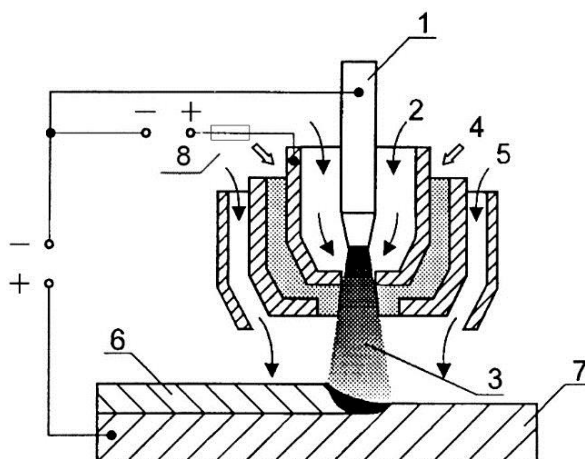
Овим методом могу се наваривати делови од челика, челичног лива, ливеног гвожђа, легуре бакра и легуре алуминијума. Додатни материјали су стелит, олово, бронзе, легуре никла и аустенитни челици. Успешно могу да се наносе металне превлаке отпорне према хабању и корозији као што су Cr – Ni и Cr – Mn челици, као и горе споменути монел метал и Бебитов метал.

2.2.6 НАВАРИВАЊЕ ПЛАЗМОМ

Наваривање плазмом заснива се на стапању додатног материјала у облику праха или жице у плазменом луку веома високе температуре, који са плитко растопљеним основним материјалом формира навар. Наваривање се изводи полуаутоматски или аутоматски у хоризонталном положају. Разликују се следећи начини наваривања плазмом: *плазмено наваривање прахом*, *плазмено TIG наваривање* и *плазмено MIG наваривање* [62,63,72,77,78,177].

2.2.6.а Плазмено наваривање прахом

Наваривање прахом (сл. 2.17) је погодно за полуаутоматско или аутоматско наваривање помоћу различитих легура у облику праха, које се доводе и депонују плазменом млазницом. Кроз сужени отвор млазнице прах се дејством плазменог гаса убрзава до брзине звука, па плазма достиже изузетно високу температуру. Стопљени прах великом брзином удара у површински растопљени основни материјал па се после очвршћавања формира навар са минималним разблаживањем (5–10%). Наваривање се најчешће изводи у једном пролазу, а дебљина навара може бити 0,25–7 mm. Лице навара је толико глатко да најчешће није потребна завршна обрада брушењем или полирањем [63,78].



Слика 2.17 *Схема плазменог наваривања прахом: 1-волфрамова електрода, 2-плазмена млазница, 3-плазмени лук, 4-прах, 5-заштитни гас, 6-навар, 7-основни материјал, 8-отпорник за регулисање помоћног лука [63,141]*

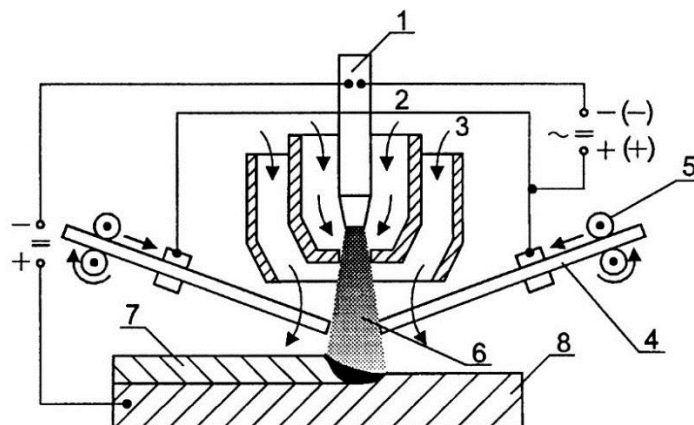
Спрашени додатни материјали су легуре Co, Ni, Al, Cr, Cu и Sn, а такође и челици отпорни на корозију, тешко топљиви метали, као и карбиди W укључени у матрицу легура Ni и Co. Овим поступком може се успешно наносити већина оксида метала Al, Ti, Cr, Zn, карбид Cr, Ti, W, легуре Cr – Ni или Cr – Ni – Co – Al и синтеровани метало-керамички материјали Ni – оксид Mg или Ni – оксид Al. Гас за образовање плазменог лука и депоновање праха је аргон.

Овим поступком могу се наваривати равне и цилиндричне површине делова од нелегираних и легираних челика, специјалних челика отпорних на корозију и хабање, челичних ливова и неких врста ливених гвожђа.

2.2.6.6 Плазмено TIG наваривање

Плазмено TIG наваривање је потпуно аутоматизован поступак (сл. 2.18), који се заснива на довођењу врућег или хладног додатног материјала у облику жице у зону плазменог лука, где се стапа са површинским слојем основног материјала и тако образује навар.

Претходним загревањем додатног материјала електричним отпором постиже се мање уваривање, мање разблаживање и већа продуктивност. Додатни материјал у облику пуњене жице дебљине 1,2–2 mm, доводи се у зону електричног лука помоћу електронски управљивог додача, а дебљина навареног слоја у једном пролазу је 2–15 mm. Разблаживање је мање од 10%, па је често довољно наношење само једног слоја за постизање захтеваних својстава навара. За наваре веће дебљине од 15 mm, неопходно је вишеслојно наваривање уз истовремено коришћење више различитих жица додатног материјала.

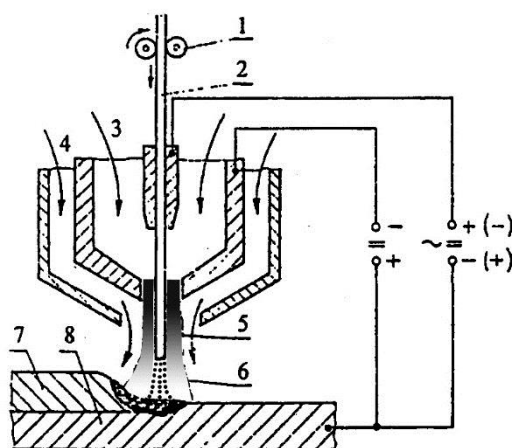


Слика 2.18 *Схема плазменог TIG наваривања: 1-волфрамова електрода, 2-плазмени гас, 3-заштитни гас, 4- додатни материјал, 5-додача, 6-плазмени лук, 7-навар, 8-основни материјал [63,141]*

Главна предност TIG наваривања је могућност регулисања и одржавања минималног уноса топлоте, чиме се термички напони и деформације своде на минимум. На процес наваривања нема утицај примицање и одмицање главе за наваривање јер се увек одржава стабилан лук између волфрамове електроде и основног материјала. Мана овог поступка је што се код вишеслојних навара веће дебљине мора извести накнадна термичка обрада. Овим поступком наваривања најчешће се наносе металне превлаке од аустенитних челика, легура бакра и легура никла.

2.2.6.в Плазмено MIG наваривање

Плазмено MIG наваривање обједињује предности TIG и MIG заваривања (сл. 2.19). Најпре се успоставља електрични лук између додатног и основног материјала, као код обичног MIG заваривања, да би се после неколико милисекунди спонтано успоставио плазмени лук између млазнице и основног материјала, као код TIG заваривања. Споља посматрано, овај поступак изгледа као обично MIG заваривање, с том разликом што заштитни гас херметички опкољава и штити плазмени лук. На овај начин се у потпуности елиминише прштање капљица основног и додатног материјала. Плазмени гас је аргон, док заштитни гас може бити аргон, угљен-диоксид или њихова комбинација, што зависи од својстава основног и додатног материјала.



Слика 2.19 Схема плазног MIG наваривања: 1-додавач, 2-додатни материјал, 3- плазмени гас, 4- заштитни гас, 5- плазмени лук, 6-електрични MIG лук, 7-навар, 8-основни материјал [63,141]

Додатни материјал је у облику пуних или пуњених жица пречника 0,8–2,4 mm. Навари могу бити хемијског састава нелегираних и легираних челика отпорних према корозији и легуре Ni, Cu, Al. Разблаживање је у границама 5–15%, а дебљина навара у једном пролазу је 5–6 mm, док је ширина 40–50 mm. Најчешће се овако плакирају челични резервоари и судови под притиском, а такође репарирају и оштећени делови техничких система [63,78,97,141].

Поред горе наведених метода наваривања користе се још два начина: *наваривање под прахом* (ЕРР) и *наваривање под троском* (ЕРТ). Међутим, и поред више предности над другим методама наваривања (развијених модификација, високе продуктивности, могућност аутоматизације, наношење навара велике дебљине, равномеран квалитет навара и др.), ови начини се ређе користе при репаратурном и производном наваривању, јер им је примена ограничена због неких мана (немогућност примене за теренски рад, наваривање само у хоризонталном или вертикалном положају, велико разблаживање навара, појава кртости при наваривању аустенитних манганских челика и др.).

3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА

УВОД

Заварљивост материјала је део науке о материјалима у коме се проучава најважније својство при пројектовању и извођењу заваривачких и њима сродних технологија. При обради материјала, применом заваривачких технологија долази до различитих изузетно сложених појава у материјалу, чије је познавање неопходно да би се процес успешно извео. Захваљујући многобројним методама заваривања данас је могуће успешно међусобно спојити у чврсту нераскидиву целину различите врсте материјала (метале, неметале, метале са неметалима). Спајање материјала заваривањем одвија се на нивоу атомских кристалних решетки дејством међуатомских *кохезионих* или *адхезионих* сила, и представља обрнут процес од његовог раздвајања услед појаве лома. Да би дошло до спајања два метала дејством привлачних међуатомских сила, неопходно је да се савлада енергетска баријера, односно да наступи активација валентних електрона и формирање заједничког *електронског облака* (метална веза). Два метала ће се спојити ако се доведу на растојање реда величине параметара кристалних решетки, а то се може постићи: *довођењем или ослобађањем потребне топлоте за локално топљење метала, деловањем довољно високог притиска на контактним површинама спајаних метала и комбинованим дејством притиска и топлоте*. Најчешћи начин формирања завареног споја постиже се комбинацијом топлоте и притиска [43,44,45,49].

Заварљивост је изузетно комплексно својство метала што је разлог да у литератури [58,62,63,174] постоје више дефиниција заварљивости, али нема униформне и експлицитне дефиниције овог за праксу изузетно важног технолошког својства метала. Заварљивост одређује релативну способност неког метала да применом одговарајућег поступка и технологије може да формира спојеве захтеваног квалитета. Уопштено се при спајању два метала применом неке заваривачке технологије могу формирати заварени спојеви: *доброг квалитета, задовољавајућег квалитета и лошег квалитета*. То значи да одређени метали могу имати *добру заварљивост, условну заварљивост и лошу заварљивост*. Може се рећи, да је дати метал добро заварљив ако се нпр. REL методом заваривања може добити заварени спој који испуњава радне захтеве. Претпоставља се да се спајање изводи у стандардним условима, применом рутилних сувих или базичних електрода.

Оцена заварљивости различитих метала има велики значај, како при избору додатних материјала и метода за израду заварених конструкција, тако и при избору додатних материјала и метода репаратуре оштећених радних делова. Оцена заварљивости на основу само једне методе је непоуздана па је развијено више технолошких проба. Савремен приступ оцени заварљивости подразумева: коришћење рачунских метода које узимају у обзир граничне услове; пробе са симулирањем температурских циклуса заваривања (наваривања); пробе на моделима са стварним параметрима заваривања (наваривања). Одређивање структуре, хемијског састава, тврдоће, жилавости основног и додатног материјала, и завареног споја као целине је припрема за дефинисање технологије заваривања. За одређивање оптималне технологије неопходна је провера понашања наварених радних елемената у експлоатационим условима.

3.1 ОСНОВНИ ПОЈМОВИ О ЗАВАРЉИВОСТИ МЕТАЛА

Под појмом *заварљивост* подразумева се *опита заварљивост*, која представља комплексно својство везано истовремено за материјал, технологију и конструкцију. Мере за побољшање заварљивости омогућавају да се добију заварени спојеви захтеваних својстава и од условно заварљивих метала и легура. Заварљивост се процењује на основу утицаја заваривања, односно наваривања на заварени спој, и његово понашање у топлотном и напонско-деформацијском смислу за време и после заваривања (наваривања). Заварљивост челика обрнуто је пропорционална његовој закаљивости, па челици који имају мању закаљивост и добру ковност имају добру заварљивост [28,29,31,49]. Из тога произлази да се заварљивост челика погоршава са порастом садржаја угљеника и легирајућих елемената.

Општа заварљивост представља глобалну оцену квалитета основног, додатног и помоћног материјала, пројектованих технологија формирања споја, одабраних и изведених поступака, напонско-деформацијског стања у формираном споју и др. Општа заварљивост показује реакцију на унос топлоте, топљење, хлађење и деформације у зонама формираног споја. Основне зоне споја су: завар (навар), где се основни и додатни материјали потпуно топе, мешају и затим очвршћавају примарном кристализацијом; прелазна зона стапања, где је материјал у полуистопљеном стању и настаје делимична кристализација; зона утицаја топлоте, где се мењају физичко-хемијска својства материјала у чврстом стању услед температурског циклуса (загревања и хлађења) и образовања нових структурних фаза. Многи процеси који се одвијају у одређеним зонама навареног споја не могу се директно запазити, већ само накнадним испитивањима механичких својстава и структуре заварених спојева. При оцени опште заварљивости неопходно је установити какве се промене дешавају у основном материјалу, у најнеповољнијим условима формирања споја, јер се од основног материјала захтева добра поузданост у свим условима израде и експлоатације.

На заварљивост неког метала утичу различити *спољашњи* и *унутрашњи* фактори. У *спољашње факторе* убрајају се: избор метода и технологије заваривања (наваривања), позиционирање завариваних делова, термичка обрада (претходна, текућа и завршна) и др. У *унутрашње факторе* убрајају се: хемијски састав основног и додатног материјала, технологија израде делова (полуфабриката) који се спајају и њихова термо-физичка својства (термичка проводност), линерано ширење и др. Да би се лакше разматрао утицај појединих фактора на заварљивост, уводе се ужи појмови као што су: *металуршка заварљивост*, *конструкциона заварљивост* и *технолошка заварљивост* [151,153,155,156].

Металуршка заварљивост метала условљена је: хемијским саставом основног материјала, начина производње, полуфабриката садржаја различитих врста гасова, садржаја неметалних укључака и др. На металуршку заварљивост утичу све структурне промене услед уноса унете топлоте при заваривању (наваривању). У току процеса формирања споја може доћи до недопустивог снижења механичких својстава основног материјала, нарочито у зони утицаја топлоте и прелазној зони, због промене хемијског састава, појаве тврде (крте) или меке структуре, појаве различитих врста грешака и др. Утврђено је, да су легуре металуршки незаварљиве ако неки елементи те легуре не образују чврсте растворе, већ тврда и крта хемијска једињења. Металуршки су заварљиви сви метали који могу да образују чврсте растворе, еутектичке и нееутектичке смеше. Метали који поседују добру металуршку заварљивост увек се могу заваривати ако се изабере одговарајући метод и технологија [42,46,49,152,174,185].

Конструкциона заварљивост зависи од више фактора: дебљине материјала, врсте спојева, броја и распореда спојева, величине завара или навара и др. Конструкциона заварљивост зависи од пројектованих захтева првенствено везаних за врсту и начин оптерећења техничких система, и експлоатационих услова [153,153,155].

Технолошка заварљивост првенствено подразумева утицај технолошких параметара на квалитет споја: врсте и својства основног и додатног материјала, примењеног начина и пројектоване технологије за формирање споја, количине унете топлоте у материјал, брзине загревања и хлађења материјала и др. На основу технолошке заварљивости процењује се, да ли се заварени спој може формирати без тешкоћа, или су неопходне посебне мере, као што су предгревање, жарење, заваривање у заштитној атмосфери и др.

На основу технолошке заварљивости изведена је и класификација метала на: *добро заварљиве* и *условно заварљиве* метале [156,174,185]. Ова оцена даје се на основу предузетих мера да се добије спој захтеваног квалитета. Из оперативног аспекта, добро заварљиви метали су они који при заваривању (наваривању) дају чист и хомоген метал завара (навара), топе се без тешкоћа и појаве прштања, гасних мехурова, прслина и других грешака. Условно заварљивим, сматрају се метали, који уз примену посебних додатних мера могу образовати спој захтеваног квалитета. Оперативно, заварљивост материјала погоршавају прљавштина, масти, уља, вода и други контаминанти.

При оцени заварљивости треба увек узети у обзир узајамну везу између конструкције техничког система (кртост конструкције, димензије саставних елемената, врсту и облик споја и др.), својства материјала (њихова заварљивост) и технологије (могућност извођења одређеног поступка спајања). Због међузависности ових фактора није увек могуће оценити заварљивост само једном врстом практичних проба. На пример, за оцену заварљивости легираних челика уведе се и *допунски показатељи* [49,63,78,97,141].

Најважнији критеријум за оцену заварљивости је хомогеност споја (механички континуитет-континуум), која може бити нарушена грешкама у облику: заједа, неметалних укључака, пора, гасних мехурова, непровара и прслина. Поред хомогености битан је и критеријум механичких својстава споја (својства отпорности, тврдоћа, ударна жилавост и др.), при чему се ударна жилавост узима као најпозданији показатељ, који прецизно реагује на сваку промену енергетских параметара [15,62,63,122].

У пракси су уобичајена два приступа за оцену заварљивости: *тестирање материјала и потврда примењене технологије*. *Тестирањем материјала* проверава се да ли основни материјал одговара за пројектовану конструкцију, а *потврда примењене технологије* добија се испитивањем пробних узорака. На овај начин одређују се нивои заварљивости (добра, условна, лоша), и доноси оцена о погодности и могућностима спајања испитиваних материјала одабраном технологијом [97,141,174,183].

На основу претходних разматрања може се рећи, да је заварљивост метала у директној вези са могућим грешкама у завареним или навареним спојевима. Специфични услови формирања заварених (наварених) спојева, односе се на изузетно брзе металуршке реакције различите, температурске циклусе, напонско-деформацијска стања и др. [42,46,49,93,97].

Грешке у завареним спојевима смањују еластичност и жилавост, а повећавају склоност ка кртости и појави лома. Процена нивоа допуштених грешака у завареним спојевима доноси се на основу *концентрације напона*. По том мерилу, допуштене грешке су гасни мехурови и укључци троске, а недопустиве грешке су непровар и прслине, које су опасни *концентратори напона*, јер доводе до замора материјала и кртог лома.

За оцену глобалне (опште) заварљивости метала развијене су различите методе: *рачунске методе, технолошке пробе и лабораторијска испитивања*. Најопасније грешке у завареним спојевима су прслине, јер су највећи концентратори напона. Зато, је при оцени *опште заварљивости* укључена и релативно млада (нова) научна дисциплина *Механика лома*. Досадашња научна сазнања из ове области обезбеђују пројектовање и израду заварених спојева који могу поуздано радити у предвиђеном времену експлоатације, без опасности од појаве кртог лома.

3.2 МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА

Због специфичних услова формирања завареног споја (брзих металуршких реакција, појаве напонско-деформацијског стања и др.), неизбежних грешака у завару (навару) и зони утицаја топлоте, нема метала који поседује идеалну заварљивост. Најчешће грешке су: *непровар, порозност, заједи, укључци троске и прслине*.

Штетан утицај наведених грешака оцењује се према концентрацији напона, а не према умањењу попречног пресека завареног споја. У пракси се не може никад постићи идеална заварљивост, јер се ниједном заваривачком технологијом не може добити спој потпуно истих физичко-хемијских својстава материјала у завару (навару), зони утицаја топлоте и основном материјалу [49,174]. Зато се критеријуми за оцену заварљивости свде на процену потребних вредности усвојених *показатеља заварљивости*. Полазна основа је испитивање заварљивости основног материјала, затим избор додатог материјала и најзад њихова међусобна заварљивост. За оцену заварљивости различитих врста челика потребно је испитати склоност њихових заварених (наварених) спојева ка појави најопаснијих грешака, а то су различите врсте прслина. За ове потребе користе се различите научно засноване методе: *рачунске методе и експерименталне методе* (технолошке пробе и испитивања механичких својстава).

3.2.1 РАЧУНСКЕ МЕТОДЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА

Рачунске методе за оцену заварљивости челика односе се углавном на израчунавање одређених параметара на основу чијих вредности се процењује максимална очекивана тврдоћа у зони утицаја топлоте, критична брзина хлађења, очекивана структура споја и др. На основу ових параметара доноси се одлука да ли се заваривање изводи без предгревања или са предгревањем, односно одређује се технологија извођења процеса. Постоје више рачунских метода а неке од њих су: *одређивање хемијски еквивалентног угљеника (СЕ), прорачун параметара предгревања по Сеферијану, ВВРА метода*, као и коришћење *Шефлеровог дијаграма, КН-дијаграма и параметарских једначина*.

Метода хемијски еквивалентног угљеника (СЕ), заснива се на хемијском саставу челика и дебљини радних предмета према формулама различитих аутора [63,78]. На склоност челика ка појави прслина утиче и брзина хлађења, па се за оцену заварљивости мора узети у обзир и дебљина материјала спајаних елемената. При истим осталим условима, елементи веће дебљине брже се хладе, па су склонији ка појави прслина. Ова метода даје само грубу процену па се углавном користи за оцену заварљивости нелегираних (угљеничних челика) и нисколегираних (микролегираних) челика. Анализом ова два параметра одлучује се да ли ће се применити предгревање или не при извођењу процеса заваривања односно наваривања.

Метода Сеферијана, заснована је на увођењу укупног еквивалентног угљеника, где се поред хемијског састава челика узима у обзир дебљина завариваних елемената и брзина хлађења. За условно заварљиве челике *Сеферијан* је извео модификовану формулу по којој се израчунава температура предгревања. Ова метода се најчешће користи за оцену заварљивости нисколегираних челика [63,78,174].

Како дебљина елемената утиче на брзину хлађења, а самим тим и на појаву прслина, показује следећи пример. За исти основни материјал предгрејан до 200°C, брзина хлађења износи 5°C/s за дебљину од 12 mm и 28°C/s за дебљину од 25 mm. Због тога је Сеферијан извео израз за укупни еквивалентни угљеник:

$$[C] = [C]_h + [C]_s \quad (3.1)$$

Садржај хемијски еквивалентног угљеника израчунава се из формуле:

$$[C]_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 \cdot Mo}{90}, \% . \quad (3.2)$$

Хемијски еквивалентни угљеник дебљине израчунава се из формуле:

$$[C]_s = 0,005 \cdot s \cdot [C]_h, \% . \quad (3.3)$$

На крају се добија:

$$[C] = [C]_h \cdot (1 + 0,005 \cdot s), \% . \quad (3.4)$$

За условно заварљиве челике Сеферијан препоручује предгревање до температуре:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{[C] - 0,25}, \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (3.5)$$

Шефлеров дијаграм се користи за анализу међусобне заварљивости челика различитих физичко-хемијских својстава, као што су samozакаљиви нисколегирани челици, који се заварују аустенитним електродама, или при наваривању челика различитим врстама додатних материјала. Структура метала завара (навара) не зависи само од својстава основног и додатног материјала, већ и од степена њиховог мешања, јер су у питању *хетерогени спојеви*.

При заваривању, нисколегираних samozакаљивих челика аустенитним електродама појављује се неколико проблема: склоност аустенитног додатног материјала ка појави топлих прслина око солидус температуре; појава дифузије хемијских елемената, посебно угљеника, из основног материјала; образовање кртих карбида, зато што је садржај угљеника у основном материјалу знатно већи него у завару (навару). Склоност ка појави топлих прслина умањује се

погодним избором додатних материјала, који после заваривања дају двофазну аустенитно-феритну структуру са 4÷7% δ -ферита. Већи садржај ферита није пожељан, јер утиче на смањење пластичности аустенитног завара (навара). Степен мешања (разблаживања) рачунски се одређује из Шефлеровог дијаграма и бира аустенитна електрода која даје завар (навар) са максимално 5-10% δ -ферита.

Иако је *Шефлеров дијаграм* намењен за избор додатних материјала да би се добили добри хетерогени спојеви, успешно се примењује и при добијању хомогених спојева легираних Cr-Mo и високолегираних Cr-Ni челика. За случај хомогених спојева не израчунава се степен мешања, јер он не утиче битније на хемијски састав метала завара (навара). Хром-молибденови челици се заварују (наварују) електродама истог типа и својстава као и основни материјал (хомоген спој), или аустенитним електродама (хетероген спој), а хром-никлови челици углавном се заварују (наварују) само електродама истог типа као и основни материјал (хомоген спој).

При заваривању, односно наваривању аустенитних челика јављају се најмање три проблема: због мање термичке проводности и већег коефицијента линеарног термичког ширења, него код угљеничних челика, јавља се велико сопствено напонско-деформацијско стање, па су склони ка појави топлих прслина у завару или наварау и зони утицаја топлоте; склони су појави међукристалне корозије због излучивања карбида хрома (Cr_4C) на границама металних зрна; склони су појави кртости на високим температурама због образовања σ -фазе (кртог једињења Cr-Fe). Једино решење је да се настанак ове фазе спречи, јесте израда навара са ниским садржајем δ -ферита (2÷4%), што омогућава поуздан рад навариваних спојева у области критичних температура.

Оцена заварљивости ових челика изводи се прво израчунавањем хемијски еквивалентног никла (Ni_e) и хемијски еквивалентног хрома (Cr_e) помоћу израза:

$$(Ni)_e = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn, \% \quad (3.6)$$

$$(Cr)_e = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5Nb, \% \quad (3.7)$$

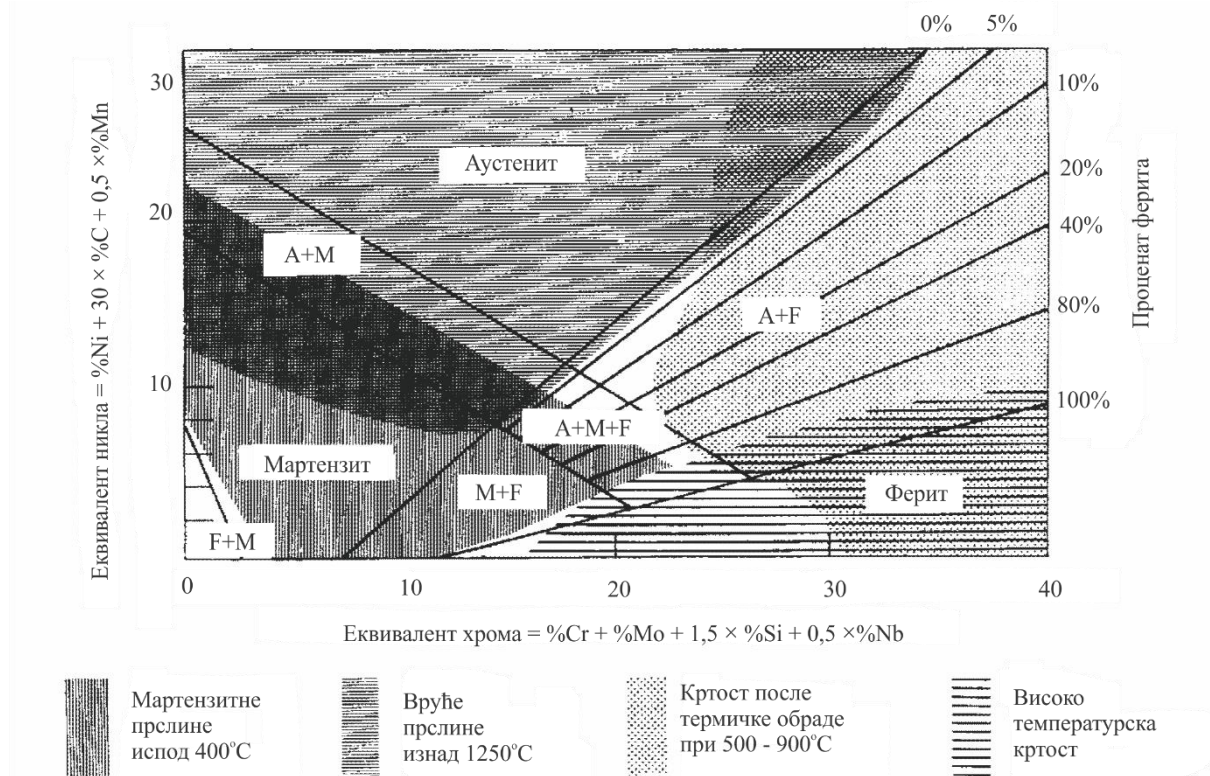
Затим се израчунава садржај δ -ферита помоћу *Сеферијанове формуле*:

$$\delta = 3 \cdot [(Cr) - (Cr)_c], \% \quad (3.8)$$

$$(Cr)_c = 0,93Ni + 6,7, \% \quad (3.9)$$

Израчунавањем хемијски еквивалентног хрома (Cr_e) и никла (Ni_e), и израчунавањем садржаја δ -ферита помоћу претходних формула (3.6÷3.9), усваја се дозвољен садржај δ -ферита у двофазном металном систему завара, односно навара. Помоћу *Шефлеровог дијаграма* бира се додатни материјал одговарајућег хемијског састава који ће обезбедити добијање тражене структуре метала завара (навара) [63,78,141].

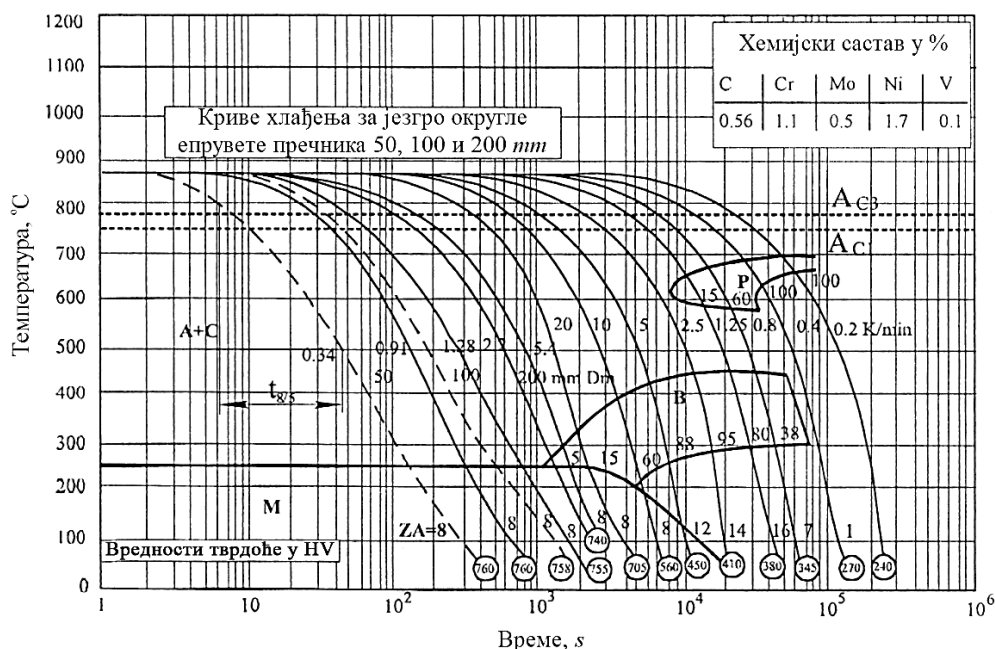
Потенцијалне грешке карактеристичне за поједине структурне фазе нерђајућих челика приказане су на Шефлеровом дијаграму (сл. 3.1), који може бити од користи при процени да ли су завари (навари) датих комбинација основног и додатног материјала склони типичним грешкама ове класе челика.



Слика 3.1 Локација грешки у зависности од структуре у Шефелровом дијаграму [63,141]

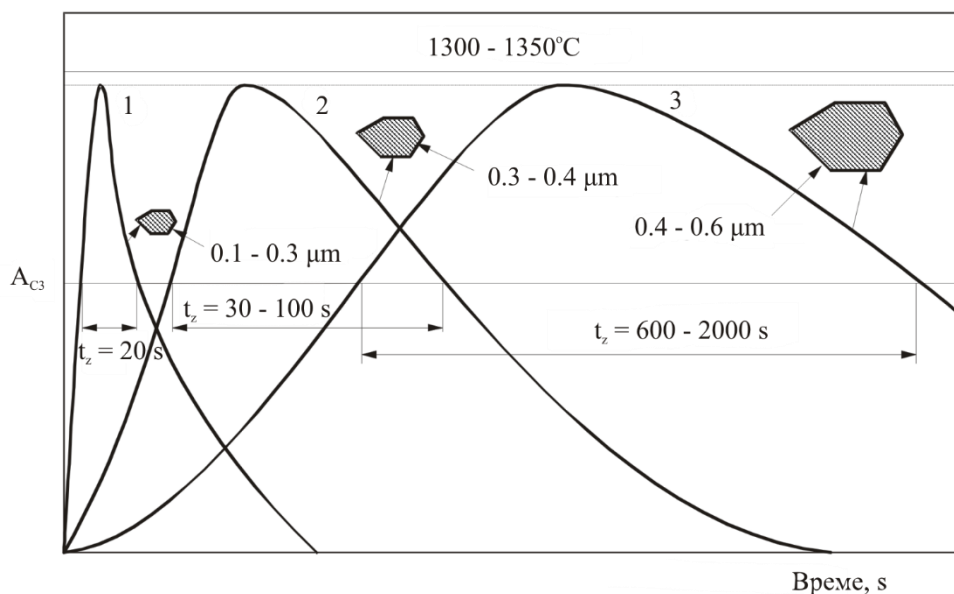
Потребно је напоменути да Шефлеров дијаграм, поред наведеног, може корисно послужити и при избору одговарајућих додатних материјала, како би се извело успешно заваривање (наваривање) и других врста нерђајућих челика: феритних, аустенитних, мартензитних и таложно ојачаних [63].

Дијаграми континуалног хлађења (КН-дијаграми), могу корисно послужити при разматрању заварљивости различитих конструкционих челика код којих се морају узети у обзир утицаји температурских циклуса на структуру и тврдоћу у зони утицаја топлоте. Температурски циклус било које тачке ове зоне одређен је брзином загревања, максималном температуром, временом загревања изнад одређене температуре и брзином хлађења. За неке конструкционе челике могу се наћи, углавном у страниј литератури [125,126,127,175], дијаграми континуалног хлађења у условима заваривања (КНЗ-дијаграми), а добијају се у специјализованим металуршким лабораторијама. Дијаграм (сл. 3.2) показује разлагање потхлађеног аустенита при различитим брзинама хлађења које одговарају различитим температурским циклусима. У литератури [48,83,84,85,86] приказују се у полулогаритамском координатном систему температура - време (логаритамска подела) или температура - време хлађења $t_{8/5}$. Време $t_{8/5}$ је време хлађења од 800-500°C и у логаритамској подели се наноси на апсцисну осу. У самом дијаграму дају се линије које ограничавају поједине структурне фазе (мартензит, бејнит, ферит, перлит) у зависности од времена $t_{8/5}$.



Слика 3.2 Дијаграм континуалног хлађења челика 56NiCrMoV7 [84,97]

Параметри температурског циклуса могу се прорачунати применом одговарајућих математичких израза [36,50,97,166], или читавањем са експериментално добијеног дијаграма температурског циклуса [94,97,108,109]. Сви параметри температурског циклуса су важни за оцену заварљивости, а време задржавања је изузетно битно, јер показује утицај различитих температурских циклуса, односно примењеног начина и технологије заваривања или наваривања, на величину аустенитних зрна (сл. 3.3). Код неких врста челика повишене јачине време задржавања изнад одређене температуре (A_{C3}) мора се ограничити да би се у зони утицаја топлоте спречила деградација корисних својстава материјала добијених сложеним поступцима термомеханичке обраде (нпр. ТМО-челика).



Слика 3.3 Пораст зрна аустенита у зависности од температурског циклуса: 1-електролучно ручно заваривање челика дебљине до 10 mm, 2-заваривање под прахом челика дебљине 15-20 mm, 3-заваривање под троском челика дебљине 100-200 mm [63,78]

Оцена заварљивости конструкционих челика, применом дијаграма континуалног хлађења, доноси се тако што се прво, израчуна време хлађења $t_{8/5}$ на бази граничне дебљине лима, или на основу формуле јапанских аутора (*Ito-Bessyo*). Добијени резултат времена хлађења уноси се у дијаграм, уцртава крива брзине хлађења и читава очекивана структура и тврдоћа у најкритичнијој зони утицаја топлоте испод корена навара, где је највиша температура и највећа брзина хлађења. На основу наших истраживања установили смо да се формула јапанских аутора за прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ најбоље слаже са експерименталним резултатима добијених са кривих температурског циклуса и емпиријским формулама Рикалина и других аутора [36,50,63,108,109,166]. Поред задовољавајуће тачности ова формула је далеко једноставнија за примену, јер не садржи арбитрарне променљиве које се понекад бирају према личној процени, и не узима у обзир граничну дебљину основног материјала. Потребно је напоменути да поред рачунског одређивања времена хлађења оно може да се одреди и експериментално на завареним или навареним моделима [63,108,109].

Поред процене заварљивости конструкционих челика, дијаграми континуалног хлађења још омогућавају: избор бољег основног материјала од више расположивих, према траженим својствима (тврдоћа, жилавост, отпорност на хабање и др.), преко граничног времена $t_{8/5}$ (t_{100}), које одговара чисто мартензитној структури; прорачун режима заваривања различитих основних материјала (q , T_p) усвајањем времена хлађења $t_{8/5}$ из дијаграма које даје тражену структуру; израчунавање погонске енергије и других параметара заваривања садржаних у једначини за израчунавање времена хлађења $t_{8/5}$.

Параметарске једначине користе се углавном за оцену заварљивости челика повишене јачине који су осетљиви на појаву дефеката, а посебно на концентраторе напона као што су различите врсте прлина. Зависно од аутора, у ову групу сврставају се различите врсте челика, као што су: *С - Mn челици, микролегирани финозрни челици и нисколегирани челици повишене јачине*.

Параметарске једначине користе се за одређивање склоности појединих челика према појави прлина, а аутори из различитих земаља развили су знатан број ових једначина [63,78]. Оне најчешће узимају у обзир: *хемијски састав основног материјала, садржај дифузованог водоника, крутост завареног споја, дебљину основног материјала, затезну јачину* и др.

Параметарске једначине су добијене на основу великог броја дуготрајних експерименталних истраживања и технолошких проба на узорцима различитих челика. Њихова примена је оправдана, јер се задовољавајућа оцена заварљивости може добити без скупих експерименталних истраживања, а уједно оне омогућују избор оптималног режима заваривања или наваривања. Због све веће примене и великих тешкоћа при заваривању или наваривању челика повишене јачине, проблеми њихове заварљивости у овом раду биће посебно обрађени.

Челици повишене јачине сврставају се у условно заварљиве. Имајући у виду, да при заваривању или наваривању долази до топљења додатног и површинског слоја основног материјала, и да се температурске промене одвијају великом брзином, појава најопаснијих грешака у завареним спојевима увек је могућа.

3.2.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ И ТЕХНОЛОШКЕ ПРОБЕ ЗА ОЦЕНУ ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА

Велики број експерименталних метода заснован је на технолошким пробама и испитивању механичких својстава заварених или наварених спојева. Резултати испитивања служе за проучавање појаве прлина у формираном споју при различитим условима испитивања. Из литературе [62,63,78,122,151,167] познато је да постоји велики број практичних проба (више од 900) од којих су неке стандардизоване.

Одређивање заварљивости различитих врста челика овим методама засновано је на проучавању појаве различитих врста прлина у материјалу завареног споја у току извођења процеса, непосредно после изведеног процеса и после одређеног времена (најчешће 48 или 72 h) од завршетка процеса заваривања метала [63,78,141].

Савремен приступ процене заварљивости различитих врста челика подразумева проширивање примене практичних проба и експерименталних истраживања на појаву прелина при термичкој обради и у току експлоатације техничких система. Уопштено се може рећи, да је појава прелина у формираном споју резултат дејства сложеног напонско-деформацијског стања, које материјал смањене пластичности не може издржати већ настаје декохезија (стварања прелине, раста прелине изнад критичне вредности и лома).

Критеријуми за оцену заварљивости могу бити различити, али су углавном засновани на одређивању критичне величине деформације или напона у функцији температуре, који доводи до појаве прелина. Код највећег броја експерименталних метода, практичне пробе се изводе тако, што се испитивани спојеви излажу температурском циклусу (стварном или симулираном), локално или на целом испитиваном узорку. Степен насталих промена у споју одређује се познатим методама испитивања механичких својстава материјала (затезање, савијања, мерењем тврдоће, одређивањем ударне жилавости, и др.). Резултати насталих промена процењују се упоређивањем резултата практичних проба пре и после дејства температурског циклуса. Због осетљивости на појаву прелина и опасности од појаве кртог лома код челика повишене јачине, врло често се практичним пробама одређују све врсте промена, а посебно се испитује појава прелина у металу завара или наvara, зони утицаја топлоте, и основном материјалу, по систему „јавља се - не јавља се“, као што је дато у табlici 3.1.

Таблица 3.1 Систематизован приказ најчешће коришћених практичних проба за оцену заварљивости челика [63,78]

Критеријум		Врста пробе	Назив пробе	Оцена
Склоност ка појави прелина	Хладним	Самоукрућење	CTS, Крстаца, Fisco, Tekken, Кружна	Прелине се појављују или не појављују
		Са регулисаним напоном	TRC, RRC, IMPLANT, LTP...	
		Симулирање термичких циклуса	BWRA и имитацијом загревањем, електричним отпором, индукцијом (струјом високе фреквенције)	
	Топлим	Укрућена	Tekken, Fisco, Кружна	
		Са регулисаним напоном	Varestraint, Bauman	
	Ламеларним	Металографска-структурна механичка	Испитивање затезањем у правцу дебљине материјала	
Жарења	Изотермичка кратковременог течења			
Механичке особине	Тврдоћа	Мерење тврдоће	Викерсова метода	$HV < HV_{max}$
	Својства јачине (чврстоће)	Испитивање затезањем	Метод затезања	$R_m^{OM} \approx R_m^{\check{s}(n)}$
	Ударна жилавост	Испитивање жилавости	Шарпијева метода	Прелазна температура
CTS – Controlled Thermal Severity		TRC – Tensile Restraint Cracking		Š – Шав (навар)
RRC – Rigid Restraint Weld Cracking		OM – Основни материјал		

У литератури [63,78], на основу критеријума појаве прслина, могу се наћи различите класификације експерименталних метода, а најчешће према врстама прслина: пробе за оцену склоности челика према појави *врућих прслина*, пробе за оцену склоности челика према појави *хладних прслина*, пробе за оцену склоности челика према појави *прслина жарења* и пробе за оцену склоности челика према појави *ламеларних прслина*. Даље се ове пробе могу класификовати на *пробе са властитим укрућењем* и *пробе са принудним укрућењем* (спољшњим затезањем). Према начину остваривања температурског циклуса ове пробе се могу класификовати на: испитивања са *стварним циклусом* заваривања или наваривања, и испитивања са *симулираним циклусом* заваривања, наваривања или термичке обраде.

У завареним или навареним спојевима скоро увек се појављују грешке: *мехурови* (лоптасти, подужни, ланчasti); *троска* (делимична, ланчаста); *метални укључци*; *налепљивање*; *прслине* (подужне, попречне, зракасте); *прокапавање*; *неравно лице* завара или навара (надвишење); *заједи* и *непровар*. Све ове грешке деле се на: *површинске* (прслине, хладни спојеви и др.) и *просторне* (укључци троске, гасни мехурови, грешке облика споја).

Будући да су због концентрације напона грешке типа прслина и најопасније по елементе техничких система, то су и експерименталне методе њима прилагођене. У последње време, привредно развијене земље све више уводе технологије спајања метала са већом концентрацијом топлоте, што значи да се умањује термичко напонско-деформацијско стање услед дејства топлоте, и тиме побољшава заварљивост различитих врста метала.

Напонско-деформацијски циклуси не могу се прецизно одредити аналитички, јер су поред низа технолошких чинилаца условљени и крутошћу заварених или наварених елемената техничких система. Зато се користе експерименталне методе којима се одређује склоност према појави различитих врста прслина [78,146,147,169,185].

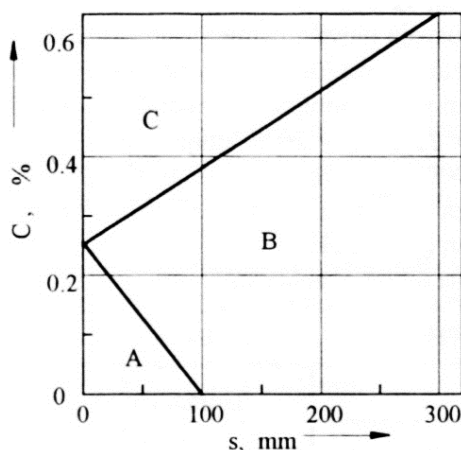
3.3 ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА

Примена различитих метода за оцену заварљивости челика захтева познавање потребних података као што су: хемијски састав основног и додатног материјал; облик, дебљина и врста споја; примењени поступак и начин извођења споја и др. Овим методама оцењује се заварљивост различитих врста челика по групама: нелегираних (угљеничних) челика, нисколегираних (микролегираних) челика, челика повишене јачине (С-Mn челика, финозрних-ТМ челика, бејнитних челика, нисколегираних побољшаних челика - Q+T), Cr-Mo челика и високолегираних челика [63,78].

3.3.1 ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ УГЉЕНИЧНИХ ЧЕЛИКА

Будући да су ови челици намењени углавном за заварене конструкције које су оптерећене статичким оптерећењима, сматра се да су добро заварљиви ако јачина споја одговара јачини основног материјала, и када нема прслина у зони споја, као ни великог пада пластичности у прелазној зони.

За грубу оцену заварљивости угљеничних челика, користи се дијаграм приказан на слици 3.4, где се на основу дебљине материјала и садржаја угљеника изводи класификација заварљивости на групе угљеничних челика (А, В, С).



Слика 3.4 Дијаграм за оцену заварљивости нелегираних челика: А-заварљиви, В-заварљиви са предгревањем, С-заварљиви са предгревањем и накнадном термичком обрадом [63,78]

Предгревањем се смањује брзина хлађења, а тиме и тврдоћа у ZUT-у. Сама по себи, висока тврдоћа није штетна, али у комбинацији са дифузодованим водоником у ZUT-у и његовим преображајем у молекуларни облик, доводи до појаве хладних прелина. Угљенични челици који садрже $C \leq 0,25\%$, $Mn \leq 0,4\%$, $Si \leq 0,3\%$, и P и $S < 0,05\%$, сматрају се добро заварљивим.

Процена заварљивости према хемијском саставу челика је оријентациона метода која се заснива на израчунавању тзв. хемијски еквивалентног угљеника (CE), који исказује познату чињеницу да се са повећањем садржаја угљеника погоршава заварљивост. При томе се утицај на заварљивости неког хемијског елемента садржаног у челику, изражава коефицијентом еквивалентности у односу на угљеник.

За закаљиве угљеничне челике хемијског састава $Mn > 0,4\%$ и $Si > 0,3\%$, CE се израчунава помоћу израза:

$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \% \quad (3.10)$$

одакле произлази, да повећање садржаја угљеника утиче на погоршање заварљивости четири пута више од пратећих елемената Si и Mn.

За угљеничне челике који још имају додатке Cr и Mo испод граничног садржаја за легирајуће елементе $Cr < 0,30\%$ и $Mo < 0,08\%$, а при том повећавају склоност ка закаљивању и погоршавају заварљивост, користи се израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \% \quad (3.11)$$

При оцени склоности челика ка настајању хладних прелина, поред CE, битан фактор је и брзина хлађења. Следи, да се при разматрању заварљивости мора узети у обзир и дебљина завариваних елемената, јер је чињеница да се делови веће дебљине при истим осталим условима брже хладе. Код њих је већи температурски градијент, односно термички напони, па су склонији ка појави хладних прелина.

Сматра се, да су добро заварљиви угљенични челици, имају $CE < 0,45\%$ и дебљину $s \leq 25 \text{ mm}$, односно $CE < 0,41\%$ за $s > 25 \text{ mm}$. Челици који се по CE и s не уклапају у ове границе, сматрају се условно заварљивим. Они захтевају предгревање на $100-150^\circ\text{C}$. Оваква процена заварљивости челика, само на основу CE и „ s “ је груба, јер не узима у обзир начин производње челика, поступак и технологију заваривања или наваривања и др.

3.3.2 ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ НИСКОЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА

Повезујући заварљивост и прокаљивост као међусобно реципрочна својства, и познавајући факторе који повећавају прокаљивост и смањују критичну брзину хлађења, оријентационо се може судити о утицају тих фактора на заварљивост нисколегираних челика. И код нисколегираних челика угљеник је основни хемијски елемент који утиче на заварљивост, јер доводи до закаљивања у ZUT-у и образовања карбида код Cг-Мо челика. Угљеника у овим челицима обично има до 0,25%, а легирајући елементи који побољшавају корисна својства челика, истовремено неповољно утичу на заварљивост.

Погоршање заварљивости, у зависности од квалитативно-квантитативног садржаја легирајућих елемената у челику и њиховог утицаја на заварљивост сразмерно угљенику, проучавана је од стране бројних аутора, па се у литератури може наћи велики број једначина за израчунавање CE и оцену заварљивости [63,78].

У пракси се код нисколегираних челика највише користе формуле:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% ; \quad (3.12)$$

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}, \% ; \quad (3.13)$$

$$CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}, \% . \quad (3.14)$$

Уколико су вредности CE веће од дозвољених, може настати закаљивање у ZUT-у. Проучавањем утицаја CE на тврдоћу у ZUT-у, установљена је корелациона веза између HV_{max} и CE:

$$HV_{max} = 1200 \cdot CE - 200, \quad (3.15)$$

односно

$$HV_{min} = 1200 \cdot CE - 260, \quad (3.16)$$

која је применљива у границама $0,2\% < CE < 0,6\%$, јер за веће вредности CE зависност није више линеарна. Уз велике апроксимације, занемаривањем једног броја утицајних фактора, може се сматрати да је челик заварљив ако тврдоћа у ZUT-у не прелази вредност од 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензит. Ова гранична тврдоћа одговара вредности $CE = 0,45\%$, па се усваја да су челици са $CE < 0,45\%$ заварљиви без примене посебних мера, док су челици са $CE > 0,45\%$ условно заварљиви, тј. захтевају примену посебних мера.

Непожељне структуре каљења при трансформацији, обично се спречавају избором оптималних параметара заваривања или предгревањем. То значи, смањењем брзине хлађења у области најмање стабилности аустенита, односно повећањем времена хлађења ($t_{8/5}$) у интервалу 800-500°C. За одређивање температуре предгревања користи се метода Сеферијана или препоруке произвођача.

3.3.3 ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Савремене тенденције при пројектовању и изради заварених конструкција усмерене су ка смањењу њихове масе и повећању носивости, што се може постићи применом лаких металних материјала или челика повишене јачине. Код првих заварених конструкција примењивали су се челици напона течења до 250 MPa, да би се увођењем C - Mn челика умиренних алуминијумом та граница повећала на 300-360 MPa. Металуршко-механичким поступцима (микролегирање, нормализација и ваљање) та граница је повећана до приближно 450 MPa, а патентирањем нисколегираних бејнитних челика (први пут произведених у Енглеској), она достиже 550 MPa. Најзад, са развојем побољшаних нисколегираних челика (Q + T) та граница се повећава до 700 MPa. Сви челици са напоном течења већим од 300 MPa сврставају се у челике повишене јачине, а проблеми њихове заварљивости морају се за сваку групу челика посебно размотрити.

Подаци који се дају у стандардима [5,6,180] нису довољни за пројектовање оптималне технологије заваривања или наваривања, јер се ту само дају упутства о евентуалном предгревању, а оно се не повезује са енергетским параметрима заваривања и захтеваним радним карактеристикама завареног споја.

Готово сви челици повишене јачине одликују се ситнозрнастом грађом металних зрна, склони су ка појави прслина, односно кртом лому. Зависно од утицаја различитих фактора у одређеним условима испитивања или експлоатације, сви метали се могу понашати као жилави или крти. Теоријски није могуће повући границу између кртих и жилавих материјала, јер на ова својства утичу различити фактори: хемијски састав, структура, грешке у материјалу, врста оптерећења, напонско-деформацијско стање, услови експлоатације, околна средина, врста механичке и термичке обраде.

За инжењерску праксу од изузетног је значаја познавање начина деформисања појединих метала и њихових легура под утицајем различитих унутрашњих и спољашњих фактора, јер жилавост или кртост неког метала одређује његово понашање при деформацији. Готово по правилу крти материјали имају и лошу заварљивост, јер су осетљиви на појаву различитих структурних грешака (дефеката), као што су: *ваканције* (празнине), *Шоткијев дефект* (истовремено недостају анјон и катјон у јонској решетки), *Френкелов дефект* (вишак атома у интерстицијском простору решетке), *границе зрна* и *субзрна*, *грешке у слојевима*, *дислокације* и др. Кретање дислокација је основни узрок настајања прслина, па су метали са више равни и праваца клизања жилавији (дуктилнији, пластичнији), односно структура метала поред температуре, при истим смичућим напонима, има највећи утицај на својства пластичности метала и отпорност према појави кртог лома [65,121,140,159,172,186].

Најбољи пример утицаја различитих фактора на појаву кртог лома је хаварија бродова Либерти (*Liberty*) произведених у току Другог светског рата у Енглеској. Иако су биле задовољене све мере предострожности при пројектовању и изради, код четвртине ових ратних бродова дошло је до хаварије услед појаве кртог лома, а неки од њих су се преломили на два дела још док су били усидрени у луци. Сви бродови су били израђени заваривањем од челика повишене јачине. Детаљним испитивањем дошло се до закључка да је до хаварије дошло због концентратора напона, односно отвора на палуби и што се те хладне зиме 1943. околна температура приближила прелазној [128,186].

На основу претходно реченог, може се закључити да је оцена заварљивости челика повишене јачине изузетно комплексан посао и најчешће се своди на оцену њихове склоности ка појави различитих врста прслина као најопаснијих концентратора напона. Зато је неопходна комбинација различитих аналитичких, аналогних, нумеричких и експерименталних метода, које се користе у различитим научним областима.

3.3.3.а Оцена заварљивости С-Мп челика

Ови челици су перлитно-феритне структуре, те имају повећан напон течења због пораста удела перлита у структури и ојачања ферита манганом, који образује чврст раствор замене у α -*жвожђу* и уситњава метална зрна.

Уколико је дебљина завариваних елемената $s < 25mm$, хемијски еквивалентни угљеник $CE < 0,45\%$, као што је раније било поменуто, челик се може заварити и без предгревања. За веће дебљине, као и при заваривању на сниженим температурама, неопходно је предгревање или заваривање кратким заварима. Еквивалентни угљеник се за С-Мп челике израчунава на основу израза:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% \quad (3.17)$$

При заваривању С-Мп челика, перлит се на температурама вишим од A_{C1} трансформише у аустенит, који се при брзом хлађењу у ZUT-у може трансформисати у мартензит. Појава мартензитне или доњобејнитне структуре у ZUT-у је један од могућих разлога због којих настају хладне прслине. Други разлог је присуство веће количине дифузованог водоника. Тачније речено, ако тврдоћа надмаши извесну границу која зависи од садржаја дифузованог водоника,

појавиће се прслине. Зато се гранична тврдоћа у ZUT-у везује за количину водоника [63,78]. За рутилне електроде које су највише у примени, а које садрже 20-35 ml водоника на 100 g метала навара, допуштена тврдоћа је 350 HV. Што значи да су челици са CE < 0,45% добро заварљиви, а они са већим CE су условно заварљиви, тј. захтевају предгревање. У том случају температура предгревања рачуна се по методи Сеферијана, применом једначине (3.5), или на основу препорука произвођача челика [83,84,85,86].

3.3.3.6 Оцена заварљивости микролегираних (финозрних – ТМ) челика

Ови челици се користе за цевоводе високог притиска, судове под притиском, делове друмских возила, железничке вагоне и цистерне за превоз гаса, мостове и индустријске хале и др. Веома добра заварљивост и висок напон течења до $\leq 450 \text{ MPa}$, постиже се микролегирањем нискоугљеничних челика са C < 0,2%, тј. додавањем малих количина микролегирајућих елемената Nb, Ti, V, Al, Ta, Zr чији збирни садржај не прелази 0,2%.

До појаве челика повишене јачине својстава отпорности конструкционих челика повећавана су изразом челика са већим садржајем угљеника. Међутим, ту постоји граница јер висок садржај угљеника погоршава заварљивост и омогућава појаву кртог лома.

Основна предност финозрних конструкционих челика је у томе што се методом микролегирања стварају фина зрна, чиме се повећава јачина челика, али не на рачун пораста садржаја угљеника, јер би то погоршало заварљивост, већ путем уситњавања металних зрна и стварања нитрида, карбида и карбонитрида микролегирајућих елемената, који се издвајају по границама металних зрна и спречавају њихов раст у аустенитном подручју. Уситњавање зрна постиже се нормализационим жарењем или контролисаним ваљањем и хлађењем полуфабриката. Ово су тзв. *Термо-Механички ваљани челици - ТМ челици* дебљине до 10 mm. Означавање ТМ челика састоји се из словног симбола \check{C} и даља два словна симбола који означавају намену, а иза њих је број који означава вредност најмањег гарантованог напона течења у MPa: $\check{C}RO$ – основна група, $\check{C}RN$ – за употребу на сниженим температурама, $\check{C}RV$ – за употребу на повишеним температурама.

Претходна оцена о заварљивости финозрних микролегираних челика са садржајем 0,1 - 0,18% C; 1,0 - 1,6% Mn и 0,025 - 0,095% Nb може се донети на основу следеће формуле за еквивалентни угљеник:

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + 3 \cdot Nb, \%, \quad (3.18)$$

када финозрни челик има и додатке ванадијума и азота користи се следећи израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + \frac{V}{3} + 3 \cdot N, \%. \quad (3.19)$$

Ако се добије CE < 0,35%, челици се могу заваривати без посебних мера. За CE = 0,35-0,45% потребно је предузети посебне мере при MAG и EPP заваривању или наваривању. Посебне мере се пре свега односе на повезивање температуре предгревања са погонском енергијом и међупролазном температуром између полагања два завара (навара).

3.3.3.в Оцена заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

Бејнитни челик је први пут произведен у Енглеској, под називом *FORTYWELD*. Садржај угљеника је ограничен на 0,18%; нешто повећан садржај Mn. Легирани су са 0,5% Mo и 0,003% V. Присуство Mo и V у наведеним процентима, омогућава да се добије бејнитна структура и при веома малим брзинама хлађења, чак и при хлађењу на ваздуху. Додаци Mn и Si омогућавају да се температура бејнитне трансформације снизи на 600-300°C, чиме се постиже уситњавање металних зрна и већа дисперзија карбидних честица, што за последицу има повећање јачине. Даље се, после нормализације, може добити напон течења $R_{eH} = 460-600 \text{ MPa}$ по целом пресеку делова дебљине до 100 mm.

Висок напон течења, чини бејнитне челике врло применљивим за израду различитих конструкција: дизалица, железничких платформи, транспортних цистерни, грађевинских машина. Не примењују се за конструкције које раде на сниженим температурама.

Будући да бејнитни челици спадају у групу челика повишене јачине, то основни проблем при заваривању представља појава хладних прслина у завару и ZUT-у, као и пад жилавости у ZUT-у. Наравно, овај проблем се решава смањењем брзине хлађења после заваривања, што се практично постиже предгревањем или повећањем погонске енергије.

Нисколегирани побољшани челици (Q + T - quenching + tempering) се примењују за израду: дизалица, железничких платформи, железничких цистерни, грађевинских машина, резервоара за гориво, мостова, бродске опреме и др. Ови челици, су нискоугљенични $C < 0.2\%$, али су склони закаљивању, чак и при релативно спором хлађењу. Највеће вредности својстава отпорности могу се добити каљењем на мартензитну структуру напона течења $R_{eH} = 400-800 \text{ MPa}$. Типичан пример челика ове групе је челик који садржи: 0,16% C; 0,9% Mn; 0,87% Ni; 0,5% Cr; 0,45% Mo; 0,06% V; 0,003% B. Посебно је значајан утицај бора, јер он доводи до уситњавања примарних зрна, дезоксидације и денитрирања металног купатила, као и до великог повећања прокаљивости. Иначе бор у количини од 0,0015-0,003% може да замени 1,0-1,25% Ni; 0,1-0,25% Mo; 0,3-0,35% Cr; 0,2-0,7% Mn; 0,12% V и 1,6% Si.

Челици (Q+T) су финозрни, јер се кале са температуре при којој су тек настала ситна аустенитна зрна. Тако се добијају челични полупроизводи велике јачине и добре заварљивости. Побољшање (Q+T) челика подразумева обраду у специјалној и скупој технолошкој опреми. Каљење се изводи млазевима текуће воде директно после топлог ваљања са температуре од око 900°C до температуре око 300°C. Лимови после ваљања могу се охладити до температуре околине и накнадно загревати ради каљења. После тога изводи се операција отпуштања у проточним пећима на температурама 500-700°C, са задржавањем од 1 h, а затим се лимови хладе на ваздуху. На температури отпуштања од 500°C, добија се тврдоћа од 350 HV, $R_{eH} = 490 \text{ MPa}$ и жилавост од 3.5 J, док се при температури отпуштања од 700°C постиже 230 HV, $R_{eH} = 320 \text{ MPa}$ и жилавост 11 J.

При прописивању технологије заваривања, треба имати у виду да су својства нисколегираних побољшаних (Q+T) челика добијена оптималном термичком обрадом, па ће се због дејства температурских циклуса заваривања оне променити на појединим зонама споја. Значи да поред хемијског састава (Q+T) челика, при избору режима заваривања, треба водити рачуна о томе да су корисне особине челика добијене термичком обрадом побољшања. Зато се за сваки челик из ове класе мора дефинисати опсег варирања брзине хлађења, одакле произлазе и граничне вредности погонске енергије, као и време задржавања ZUT-а изнад A_{C3} температуре. Доња гранична вредност погонске енергије проистиче из услова да се спречи појава хладних прслина. Горња вредност погонске енергије, као и време задржавања изнад A_{C3} температуре, одређује се из услова да се пад јачине у ZUT-у сведе на најмању могућу меру.

Због свега тога, код нисколегираних побољшаних челика је боље примењивати технологије које дају ниже погонске енергије, што није био случај код других заварљивих конструкционих челика. Нарочито за ове челике важи препорука да се технологија заваривања прописује повезано са траженим излазним карактеристикама завареног споја. Препоруке су да за REL-заваривање q_l буде у границама 8-12 kJ/cm, а за EPP од 13-30 kJ/cm. Међутим, вредност погонске енергије није могуће увек варирати тако да задовоље технолошке потребе. Зато је за спречавање појаве хладних прслина често потребно предгревање, одржавање међупролазне температуре и понекад догревање. Такође је битна и ширина појаса код локалног предгревања, јер и она утиче на брзину хлађења до 300°C, као и на дифузију водоника из завара у ZUT. Ово је посебно значајно за први (коренски) завар, у коме се иначе највише јављају хладне прслине.

3.3.3.г Оцена заварљивости Cr-Mo челика

Челици Cr - Mo се највише користе у енергетској индустрији, петрохемији и авионској индустрији. Обично садрже 0,10 - 0,20% C; 0,30 - 0,60% Mn; 0,10 - 0,50% Si; 0,70 - 10,00% Cr; 0,45 - 1.1% Mo и највише до 0,03% S и P. Оцена заварљивости се посебно разматра за челике

типа: 0,5% Cr - 0,5% Mo; 1,25% Cr - 0,5% Mo; 2,25% Cr - 1,0% Mo; (4 - 6)% Cr - 0,5% Mo, и нисколегирани челици Cr - Mo који се користе у авионској индустрији.

Челик типа 0,5% Cr - 0,5% Mo заварује се свим поступцима за овај материјал дебљине до 2 mm, а најбоље је применити GPZ. За веће дебљине материјала боље је применити REL, TIG или MIG методе. Тањи делови се предгревају на 100°C, а дебљи на 150-200°C. Понекад се после заваривања (наваривања) спој отпушта на 650°C у току од 2 h, и то у случају када спој треба омекшати. Додатни материјал за GPZ мора да буде истог састава као и основни, а да би се спречила оксидација Cr и Mo потребно је користити топитељ [63,78,152].

При гасном заваривању користи се строго неутралан пламен, јер чак и мали вишак кисеоника подстиче стварање оксида хрома, гасних мехурова и порозних места. Код REL-а углавном се користе базичне електроде, чије језгро по хемијском саставу одговара основном материјалу.

Челици типа 1,25% Cr - 0,5% Mo такође се заварују са предгревањем до око 200°C применом базичних електрода. Челици типа 2,25% Cr - 1,0% Mo су намењени за израду делова опреме термоелектрана који раде на температурама вишим од 540°C. Америчко друштво за заваривање (*American Welding Society*) препоручује предгревање на 150°C за материјале дебљине од 10 mm, затим накнадно загревање на 730°C и отпуштање на 650°C у току пола сата непосредно после заваривања, без принудног хлађења до собне температуре. Челици типа (4-6)% Cr и до 0,5% Mo се доста примењују за израду опреме у индустрији прераде нафте. Заварују (наварују) се електродама истог типа као и основни материјал (хомоген спој), или аустенитним електродама (хетероген спој). У оба случаја је потребно предгревање на 300°C или тачније до температуре одређене по Сеферијановој формули на основу укупног еквивалентног угљеника. Код хомогених спојева, само предгревање није довољно за изједначавање механичких својстава у овим зонама споја, па је потребна накнадна термичка обрада отпуштања на 730°C. Код хетерогених спојева, изведеним аустенитним електродама, користи се Шефлеров дијаграм и устаљена процедура за избор одговарајуће аустенитне електроде и одређивање степена мешања да би се добио проценат δ -ферита у прописаним границама, најбоље око 5%.

3.3.3.д Оцена заварљивости високолегираних челика

Према садржају и распореду угљеника у кристалној решетки нерђајући челици се деле на: *феритне, аустенитне, мартензитне и таложно ојачане*.

Феритни нерђајући челици садрже веома мало угљеника, а хрома више од 12,5%, што је услов за њихову корозиону отпорност. Због ниског садржаја угљеника не отврдњавају при термичкој обради, већ ојачавају прерадом на хладно као нпр. ваљањем, дубоким извлачењем тј деформационим ојачањем.

Аустенитни нерђајући челици имају површински центрирану кубну решетку за разлику од феритних челика који имају просторно центрирану кубну решетку. Аустенитни челици најчешће садрже око 18% Cr, 8% Ni, и веома мало угљеника, па не отврдњавају при термичкој обради, већ у великој мери ојачавају обрадом на хладно. За ту обраду су погодни, јер имају велику резерву пластичности дефинисану разликом између техничке границе течења (конвенционални напон течења) и јачине на кидање. Аустенитни челици могу да садрже и мање Ni али са повећањем садржаја Mn, што их чини јефтинијим. Из аспекта заварљивости, значајно је да се при хлађењу са веома високих температура не закаљују, већ постају мекши и пластичнији.

Мартензитни нерђајући челици садрже 12-17% Cr и 0,15-1,0% C, што омогућава да се добије мартензитна структура, чак и при спором хлађењу из аустенитног фазног подручја. То значи, да се при термичкој обради, ови челици понашају слично као угљенични и нисколегирани челици. После термичке обраде, неки мартензитни нерђајући челици, достижу техничку границу течења од 1380 MPa и јачину на кидање од 1930 MPa, али њихова отпорност према корозији, и пластичност далеко заостаје за феритним и аустенитним челицима [63,78,97].

Таложно ојачани нерђајући челици су такође легуре Cr-Ni намењене за израду зупчаника, ексцентара, делова за авионе, турбине и нарочито космичку технику. За заварене конструкције у енергетици и хемијској индустрији најчешће се примењују аустенитни челици

састава 18% Cr - 8% Ni; 20% Cr - 10% Ni; 20% Cr - 8% Ni; хемијски постојани челици састава 20% Cr - 12% Ni и челици постојани на високим температурама састава 25% Cr - 20% Ni.

Аустенитни челици, па и метал навара који се добија применом аустенитних електрода, имају мању термичку проводност и већи коефицијент линеарног термичког ширења него угљенични челици, што ствара високе сопствене напоне и деформације. Делом и због тога склони су на појави топлих прслина у металу навара и ZUT-у, појави међукристалне корозије због излучивања карбида хрома по границама металних зрна, као и кртости на високим температурама због образовања δ -фазе [63,78,97].

Склоност ка појави прелома око солидус температуре може се тумачити издвајањем танке силикатне опне мале кохезионе јачине по границама металних зрна. Појава ових прслина се спречава стварањем друге фазе нпр. феритне, по границама аустенитних зрна. Садржај ферита се ограничава мање од 10%, јер он смањује пластичност метала навара.

Иако је Шефлеров дијаграм првенствено намењен за избор додатног материјала хетерогених спојева, он се успешно примењује и код аустенитних Cr-Ni челика. У случају хомогених спојева није потребно одређивати степен мешања, јер он битније не утиче на хемијски састав и својства метала навара. Потенцијалне грешке карактеристичне за поједине структурне фазе високолегираних нерђајућих челика приказан је на слици 3.1, а овакав приказ може бити од користи при процени да ли су наварени спојеви основног и додатног материјала склони ка појави типичних грешака код ове врсте челика.

3.4 ПРИМЕНА ПАРАМЕТАРСКИХ ЈЕДНАЧИНА ЗА ОЦЕНУ СКЛОНОСТИ ЧЕЛИКА ПРЕМА ПОЈАВИ ПРСЛИНА

Параметарске једначине су развијене за оцену заварљивости, првенствено челика повишене јачине и то склоности према појави: *врућих прслина*, *хладних прслина*, *прслина жарења* и *ламеларних прслина*. Код различитих врста челика могу се јавити разне врсте прслина, које се могу предвидети применом параметарских једначина. Дисконтинуитети се могу јавити у металу завара или навара (кристалizacione прслине) и у ZUT-у (ликвационе прслине). Оне се простиру уздужно и попречно у односу на осу завара или навара. Такође, прслине се могу јавити при високим температурама (вруће прслине) и на температурама нижим од 200°C (хладне прслине).

3.4.1 ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ВРУЋИХ ПРСЛИНА

Вруће прслине код челика настају за време хлађења у температурском подручју око солидус линије између 900 и 800°C. Оне се могу појавити у металу завара или навара, када се називају кристалizacione прслине, и зони утицаја топлоте, када се називају ликвационе прслине. Главни узрочник настајања врућих прслина је мала способност деформације метала у двофазном чврстом и течном стању на границама кристалита. При хлађењу формираног споја настају затежући напони као последица ливачког скупљања метала и еластично-пластичних деформација. Брзина хлађења, затежући напони и брзина деформације су променљиве величине које дефинишу област названу подручје високотемпературске кртости. При константном односу чврсте и течне фазе метала добија се температурски интервал кртости, који представља везу између температуре и деформације када настају прслине.

При заваривању, односно наваривању, сваки слој метала пролази кроз температурску област врућих прслина, без обзира да ли је реч о нискоугљеничним, аустенитним или челицима повишене јачине. Нарочито се мора водити рачуна о челицима повишене јачине, јер се у високотемпературском подручју понашају као нискоугљенични челици, а одговарајућу јачину добијају тек после фазне трансформације аустенита у α -ферит. Код формираног споја на склоност ка врућим прслинама, поред хемијског састава, утиче начин примарне кристализације, односно примењена технологија. Зато је потребно одредити оптималну заваривачку технологију, односно правилно изабрати и одржавати енергетске параметаре (радни напон, јачину струје, брзину, пречник електроде и др.). Препоручују се поступци који омогућавају формирање споја са мањим уносом топлоте, и одговарајуће мере за смањење брзине деформације и снижење нивоа сопствених напона. Практичним испитивањима дошло се до закључка да је појава врућих

прслина врло вероватна ако у споју постоји већи садржај хемијских елемената (S, C, Si, Ni), јер су они склони ка стварању нискотопљивих еутектика по границама металних зрна, па затежући напони лако раздвајају метална зрна те настаје међукристални лом [63,78].

Према руским изворима, склоност нискоугљеничних челика према појави врућих прслина може се оценити помоћу модификованог еквивалентног угљеника:

$$CE_m = C + 2 \cdot S + \frac{P}{3} + \frac{Si - 0.4}{10} + \frac{Mn - 0.8}{12} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr - 0.8}{15}, \% \quad (3.20)$$

па су челици који имају $CE_m > 0,45\%$ склони ка појави врућих прслина, и обрнуто.

Јапански аутори су извели израз за оцену склоности челика према појави врућих прслина H.C.S. (Hot Crack Sensitivity):

$$H.C.S. = \frac{C \cdot \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}, \quad (3.21)$$

а критеријум за оцену зависи од врсте челика. Тако су угљенични и нисколегирани челици склони ка појави врућих прслина ако је $H.C.S. > 4$. Код челика повишене јачине, чија је затезна јачина већа од 700 MPa , ова граница је оштрија, па је критеријум за танке материјале $H.C.S. > 2$, а за дебеле материјале $H.C.S. > 1,6$.

Поред глобалне оцене склоности челика ка врућим прслинама, за сврхе поређења исте класе челика, понекад се одређује температурски интервал кристализације ($\Delta T = T_l - T_s$) и критична брзина деформације ($v_{kr.d.}$). Челици са малом разликом између ликвидус температуре (T_l) и солидус температуре (T_s), лако се заварују помоћу додатног материјала сличних својстава основном (хомогени спој). Многи високолегирани челици и већина легура обојених метала имају велику разлику између ликвидус и солидус температуре, па се морају заваривати додатним материјалом различитих својстава од основног (хетерогени спој), да би се створила тзв. еутектичка испуна која зацељује почетне прслине.

За процену интервала очвршћавања и критичне брзине деформисања mm/min користе се изрази:

За угљеничне челике

$$\Delta T = 238 \cdot S + 56,7 \cdot C - 3,6 \cdot Mn, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.22)$$

$$v_{kr.d.} = 27,7 - 76 \cdot C + 184 \cdot S + 24 \cdot Mn, \text{ } mm/min; \quad (3.23)$$

За легиране челике

$$\Delta T = 609 \cdot S + 113 \cdot C + 20 \cdot Si - 8,7 \cdot Mn - 14 \cdot Mo, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.24)$$

$$v_{kr.d.} = 19 - 42 \cdot C - 411 \cdot S - 3,3 \cdot Si + 5,6 \cdot Mn + 6,7 \cdot Mo, \text{ } mm/min; \quad (3.25)$$

За високолегиране челике

$$\Delta T = 609 \cdot S + 113 \cdot C + 20 \cdot Si - 8,7 \cdot Mn - 14 \cdot Mo, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.26)$$

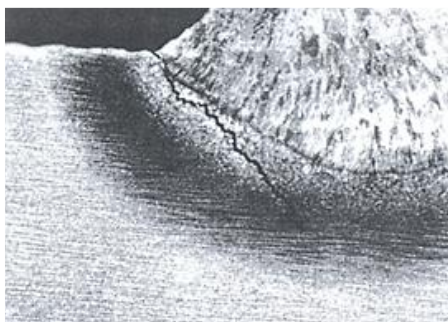
$$v_{kr.d.} = 54 - 2,6 \cdot \Delta T + 0,034 \cdot \Delta T^2, \text{ } mm/min \quad (3.27)$$

По природи ствари ови изрази служе за поређење челика исте класе, а отпорнији су на појаву кристализационих прслина они челици који имају мању вредност ΔT , и већу вредност $v_{kr.d.}$. Критична брзина хлађења је минимална брзина којом се спречава дифузиона промена аустенита све до температуре почетка мартезитне трансформације.

3.4.2 ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ХЛАДНИХ ПРСЛИНА

Хладне прслине, водоником индукване или закасне прслине су грешке које настају после завршетка процеса заваривања или наваривања, или после полагања појединих слојева при нижој температури од 300°C . Ове прслине су посебно опасне, јер могу настати у формираном

споја и после дужег времена од завршетка процеса. Могу бити уздужне и попречне, појављују се како у металу завара или навара тако и у зони утицаја топлоте (сл. 3.5).



Слика 3.5 Хладна прелина у угаоном споју [63,78]

Хладне прелине у ZUT-у настају на местима око навара која су била загрејана изнад температуре A_{C3} . Главни узрочник је присуство дифундованог водоника и не јављају се само на површини, па се теже могу открити. Поред присуства дифундованог водоника код челика повишене јачине, настанак ових прелина је условљена мартензитном или доњебејнитном структуром и дејством притискујућих напона, при преласку атомног водоника у молекуларни. Најчешће настају код С-Mn челика, нисколегираних и микролегираних челика са напоном течења 272-870 МПа [63,78].

У току заваривања или наваривања водоник из метал завара или навара дифудује у ZUT, нарочито за време фазне трансформације аустенита у ферит, када је у делу метала навара ова трансформација већ завршена, а у ZUT-у је још аустенитна структура. Тада нагло опада растворљивост водоника у металу навара и он дифундује у ZUT. При високим температурама водоник је у дисоцираном стању, а хлађењем испод 200°C у маси метала на слободним местима (микропорама) издваја се водоник у молекуларном облику. Процес преображаја водоника праћен је високим температурама и великим притискујућим напонима. Утицај дифундованог водоника може бити *пролазан* и *трајан*. Пролазан утицај водоника се уочава при испитивању навара у току, или непосредно после формирања споја, док се трајан утицај уочава испитивање после одређеног временског периода, када могу настати грешке у облику хладних прелина.

Настајању хладних прелина су склони челици који имају добру прокаљивост јер се мартензитна структура ствара не само у површинским слојевима, већ дубоко по дебљини материјала. Сегрегација и образовање еутектикума на границама металних зрна умањују јачину границе зрна и стварају услове за појаву транскристалног кртог лома. Хладне прелине могу се спречити избором оптималне технологије заваривања, која може да обезбеди најповољнији температурски циклус и контролисани унос топлоте. Такође, неопходно је сушење електрода, предгревање и накнадна термичка обрада.

Према чешким ауторима оцена склоности челика према појави хладних прелина доноси се на основу следећих параметарских једначина:

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0,015 \cdot \log \frac{H}{2,77}, \text{ за } K \leq 1300, \quad (3.28)$$

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0,075 \cdot \log \frac{H}{2,77}, \text{ за } K > 1300, \quad (3.29)$$

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5 \cdot B, \quad (3.30)$$

где је $K = 70 \cdot s$ - фактор крутости сучеоног споја; s - дебљина завариваног материјала, mm ;

H - садржај дифундованог водоника у металу завара (навара), $cm^3/100 g$.

Заварен спој за који се добија $P_{hp} \leq 0,24$ сматра се отпорним према појави хладних прслина, док је за вредност $P_{hp} > 0,24$ потребно предгревање на температури:

$$T_p = 1600 \cdot P_{hp} - 308, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.31)$$

Од стране јапанских аутора, по аналогији са формулом еквивалентног угљеника, предложено је израз за процену склоности нисколегираних челика ка појави хладних прслина:

$$P_c = P_{CM} + \frac{s}{600} + \frac{H}{60}, \text{ } \%, \quad (3.32)$$

где је s - дебљина завариваног материјала, mm ; H - количина дифузованог водоника, $cm^3/100 g$; P_{CM} - показатељ који узима у обзир хемијски састав основног материјала, %.

Показатељ који узима у обзир утицај хемијског састава основног материјала израчунава се из израза:

$$P_{CM} = C + \frac{V}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + 5B, \text{ } \%. \quad (3.33)$$

Ако је $0,25 < P_c < 0,40$ при средњој погонској енергији (уносу топлоте), $q_1 = 13,9 kJ/cm$, онда је потребно предгревање до температуре:

$$T_p = 1440 \cdot P_c - 392, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.34)$$

При заваривању челика повишене јачине промена је знатно шириа $0,25 < P_c < 0,50$ па се температура предгревања израчунава по формули:

$$T_p = 350 \cdot \left\{ 1 - e^{[-5 \cdot (P_c - 0,27)]} \right\}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.35)$$

која одговара и за $P_c < 0,40\%$.

Одсуство хладних прслина није и довољан услов да се заварен спој сматра задовољавајућим, већ је неопходно да се задрже и добра механичка својства основног материјала. Истраживања многих аутора су показала да при заваривању нисколегираних челика повишене јачине, треба познавати и минималну брзину хлађења метала око зоне заваара или навара, полазећи од величине жилавости која се нормативно прописује за одговарајући тип споја. За нисколегиране челике ($0,19 < P_{CM} < 0,31$) та брзина износи $v_{hmin} = 0,8-3,5, \text{ } ^\circ\text{C/s}$, и расте са повећањем степена легирања челика. Установљена је веза између минималне брзине хлађења којој гарантује ударну жилавост при -40°C на нивоу захтева за основни материјал и показатеља:

$$v_{hmin} = -3,1 + 19,2 \cdot P_{CM}, \text{ } ^\circ\text{C/s}. \quad (3.36)$$

Познавање максималне и минималне брзине хлађења омогућава да се одреди оптимални интервал уноса топлоте, који гарантује отпорност према појави хладних прслина, и очување остварених механичких својстава завареног споја на нивоу основног материјала.

Поред ових једначина, које директно не садрже брзину хлађења, мада је она битан фактор за појаву хладних прслина, *Мајнер (Maunier)* је извео израз за критичну брзину хлађења v_{kr} на 300°C :

$$\log v_{kr} = k - (4,62 \cdot C + 1,05 \cdot Mn + 0,54 \cdot Ni + 0,5 \cdot Cr + 0,66 \cdot Mo), \quad (3.37)$$

где је $k = 3,38$ за дебеле материјале ($s \geq s_{gr}$); $k = 3,00$ за танке материјале ($s < s_{gr}$).

Стварна брзина хлађења на 300°C (v_{300}) израчунава се по обрасцу *Котрела (Cottrel)*:

$$v_h = \left(\frac{122 \cdot q_1}{10^6 N} + 0,05 \right)^{-2}, \text{ } ^\circ\text{C/s}, \quad (3.38)$$

где је q_1 - погонска енергија заваривања, J/cm ; s - дебљина материјала, mm ; N - фактор облика споја ($N = 8 \cdot s/25,4$ -за сучеоно спој; $N = 12 \cdot s/25,4$ -за угаони спој).

Стварну брзину хлађења, одређену према претходном обрасцу, треба упоредити са критичном брзином хлађења, при чему се за $v_{300} \geq v_{kr}$ ствара мартензитна структура, а за $v_{300} \leq v_{kr}$ ствара мешовита мартензитно-бејнитна структура, или чисто бејнитна структура.

На основу односа v_{300}/v_{kr} , садржаја дифундованог водоника и крутости споја, долази се до параметарске једначине:

$$P_s = \log \frac{v_{300}}{v_{kr}} \frac{H}{10} + \frac{K}{5000}, \% \quad (3.39)$$

где је H - садржај дифундованог водоника, $cm^3/100 g$; $K = 66 \cdot s$ - крутост завареног споја; s - дебљина основног материјала (обично $s = 5 - 50 mm$).

За величину $P_s < -0,5$ хладне прслине се не јављају, док је за $P_s = 0,3$ вероватноћа њихове појаве 50%, а за $P_s < 1,0$ оне увек настају.

Температура предгревања, одређена за нисколегиране челике и челике повишене јачине на овде описане или друге начине, не би практично смела да буде виша од температуре почетка разлагања потхлађеног аустенита ($T_p \leq M_s$), јер би у противном могле да настану вруће ликвационе прслине. Ако се за основни материјал не располаже дијаграмом континуалног хлађења температура M_s се приближно израчунава помоћу израза:

За угљеничне и нисколегиране челике

$$M_s = 539 - 423 \cdot C - 30,4 \cdot Mn - 17,7 \cdot Ni - 12,1 \cdot Cr - 7,5 \cdot Mo, ^\circ C; \quad (3.40)$$

За челике повишене јачине

$$M_s = 550 - 360 \cdot C - 39 \cdot Mn - 20 \cdot Ni - 39 \cdot Cr - 28 \cdot Mo, ^\circ C. \quad (3.41)$$

Ако је прорачуната температура предгревања виша од $300^\circ C$ или виша од M_s - температуре, онда се за такав челик, дати спој и усвојену технологију морају извести технолошке пробе за оцену склоности челика према појави хладних прслина, нпр. *Текен проба* [63,78].

3.4.3 ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ПРСЛИНА ЖАРЕЊА

Прслине жарења могу да настану и да се шире при термичкој обради, најчешће жарењу ради смањења сопствених напона. Ове прслине се теже откривају, јер се контрола споја најчешће изводи пре накнадне термичке обраде, тако да многи елементи уђу у процес експлоатације са већ створеним прслинама жарења. Настанак прслина жарења могу да иницирају и зачеци топлих или хладних прслина у виду локалних оштећења граница примарних зрна и умањења њихове кохезионе јачине. При загревању до температуре жарења (најчешће нешто испод A_{c1} температуре), оне се могу проширити и до критичних величина. При формирању споја настају неравнотежне структуре (мартензитна, мартензитно-бејнитна или бејнитна) и пресићени чврсти раствори, па се структурни напони суперпонирају (сабирају) са термичким напонима, тако да на појединим местима споја долази до превазилажења јачине метала и појаве прслина жарења.

При жарењу могу настати *нискотемпературске* и *високотемпературске* прслине. *Нискотемпературске прслине* су зачете у области $200-300^\circ C$, још приликом загревања до температуре жарења. *Високотемпературске прслине* настају при температури жарења. Механизам настанка прве врсте прслина довољно је проучен и постоје решења да се оне спрече, док механизам настајања друге врсте прслина није довољно проучен и разјашњен, па се посебно проучава на нивоу хипотеза заснованих на сложеним структурама формираних спојева и дифузионим процесима при жарењу [63,78].

Појава настајања и ширења нискотемпературских прслина жарења може се спречити на два начина. *Први начин* је изузетно ефикасан и састоји се из спорог загревања до температуре око $300^\circ C$, посебно код спојева велике дебљине и масе, због концентратора напона као што су нпр. површински слојеви навара. *Други начин* је да се одмах после формирања споја и хлађења до тзв. *прелазне температуре*, која је око $150-350^\circ C$, настави са загревањем до температуре жарења [63,78].

У литератури се даје више параметарских једначина за оцену склоности челика ка појави прслина жарења, или за међусобно поређење различитих врста челика према тој склоности. Тако се нпр. за челик који садржи $C \leq 0,18\%$ и $Cr \leq 1,5\%$ препоручује параметарска једначина:

$$\Delta G = Cr + 3,3 \cdot Mo + 8,1 \cdot V - 2. \quad (3.42)$$

Челици са $\Delta G \geq 0$ склони су ка појави високо температурских прслина жарења. Исти критеријум, уз одређене резерве, може се прихватити и за оцену појаве нискотемпературских прслина жарења. Челици са $\Delta G = 0-1$ склони су ка појави прслина испод навара услед спонтаног загревања претходних слојева при вишеслојном наваривању, слично као при термичкој обради жарењем.

Челици хемијског састава 0,1 - 0,25% C; до 1,5% Cr; до 20% Mo; 0,1% Cu и до 0,15% V, Ni и Ti склони су појави прслина жарења обе врсте ако је параметар $Pz > 0$:

$$Pz = Cr + Cu + 2 \cdot Mo + 10 \cdot V + 7 \cdot Nb + 5 \cdot Ti - 2. \quad (3.43)$$

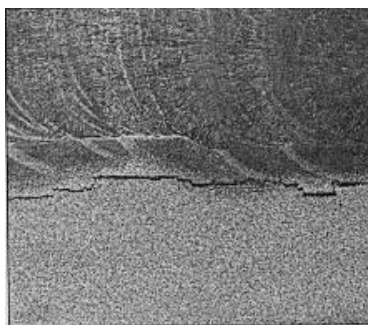
За међусобно поређење склоности различитих врста челика према појаве различитих прслина жарења примењује се параметарска једначина:

$$S_p = 0,4 \cdot Mn + Cu + 5 \cdot Al - 3 \cdot (Ti + Sn). \quad (3.44)$$

Основни материјал са већом вредношћу S_p осетљивији је на појаву прслина жарења од материјала са мањом вредношћу овог показатеља. За коначну оцену склоности челика ка прслинама жарења треба извести технолошке пробе нпр. кружну пробу заварљивости BWRA [63,78].

3.4.4 ПАРАМЕТАРСКЕ ЈЕДНАЧИНЕ ЛАМЕЛАРНИХ ПРСЛИНА

Ламеларне прслине могу се појавити ако у зони утицаја топлоте дејствују затежући напони у правцу дебљине основног материјала. Ове прслине су по свом облику најчешће степенасте (сл. 3.6), и настају при заваривању (наваривању) елемената веће дебљине и то на крају зоне утицаја топлоте или у основном материјалу.



Слика 3.6 Ламеларне прслине у зони утицаја топлоте Т- споја [63,78]

На појаву ламеларних прслина утичу својства пластичности по дебљини основног материјала, технологија формирања споја, дебљина споја итд. Појава ових прслина повезана је углавном са садржајем неметалних укључака у основном материјалу, (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , MnO_3 , MnO_4 , P_2O_5 , AlN , Fe_2N , Fe_4N и графит), који се при преради челика топлим ваљањем растапају и стварају тракасте или нагомилане (лоптасте) структуре које ремете целовитост метала.

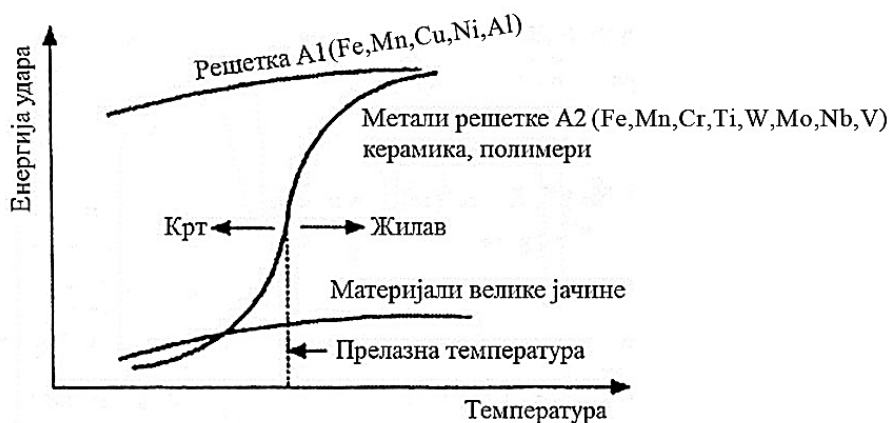
Без обзира што се знају узрочници настајања ламеларних прслина није једноставно спречити њихову појаву. Препоручује се контрола својства пластичности по дебљини основног материјала, предгревање и накнадна термичка обрада. Ипак је најефикаснији начин правилан избор основног материјала, чија су својства пластичности у правцу дебљине материјала задовољавајућа.

Јапански истраживачи су, полазећи од чињеница да ламеларно цепање код дебелих челичних лимова настаје због тракастих сулфидних укључака и дејства нормалних затежућих напона, извели параметарску једначину за оцену појаве ламеларних прслина:

$$P_L = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5 \cdot B + \frac{H}{60} + 6 \cdot S. \quad (3.45)$$

Челици код којих је показатељ $P_L \leq 0,40$ отпорни су на ламеларне прслине. На основу овог показатеља могу се класификовати челици према склоности ка овим прслинама. Поред тога, у литератури се могу наћи и препоруке о процени отпорности челика према ламеларним прслинама на основу релативног издужења при испитивању на затезање микропрувета исечених по дебелини основног материјала [63,78].

Ударна жилавост је веома важно својство формираног завареног или навареног споја, нарочито за техничке системе који раде у условима променљивог оптерећења и променљивих температура. Поред вредности *апсолутне жилавости*, односно *жилавости лома* изузетно је битна и тзв. *прелазна температура* која представља средњу вредност температурске области промене жилавог у крти лом једног те истог материјала (сл. 3.7).



Слика 3.7 Ударна жилавост различитих материјала у зависности од температуре испитивања [65,128]

Прелазна температура може се одредити експериментално али и рачунски. Прелазна температура на граници ZUT-а и основног материјала при аутоматском заваривању или наваривању челика ЕРР поступком може се одредити помоћу параметарске једначине:

$$T_{pr} = -70 + 290 \cdot C + 28 \cdot Mn + 46 \cdot Cu + 28 \cdot Cr + 23 \cdot Mo - 6 \cdot Ni. \quad (3.46)$$

Поред напред приказаних метода за оцену заварљивости различитих врста челика постоје и друге аналитичке и експерименталне методе, и допунски параметри за оцену заварљивости и квалитета спојева формираних неком заваривачком технологијом, укључујући и методе *Механике лома* [145,146,169,173,186].

4. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ ЗА НАВАРИВАЊЕ

УВОД

Данас се у обимној литератури [41,42,43,180,185] и каталозима произвођача могу наћи бројне класификације различитих додатних материјала које су састављене према националним стандардима, научно-техничким друштвима, удружењима и др. као и препоруке о њиховој примени. Препоруке се најчешће дају према врсти и својствима основног материјала, условима експлоатације и усвојеном начину наваривања [1,5,6,29,30].

Каталози произвођача додатних материјала у основи садрже: стање испоруке додатног материјала (обложена електрода, пуна или пуњена електродна жица, прах и др.), тачно дефинисане димензије и масу паковања додатног материјала, начин складиштења и чувања, препоручене параметре наваривања (јачина струје, радни напон, брзина наваривања, пречник електроде, проток горивог или заштитног гаса, потрошња смеше гасова или праха и др.), хемијски састав додатног материјала, својства нанетих навара (очекивана структура, степен мешања-разблаживања, физичко-хемијска својства), препоруке о техници и методи наваривања, препоруке о поступцима наваривања, препоруке о потреби термичке и механичке обраде формираних навара, препоруке о примени за одређене експлоатационе услове на основу очекиване отпорности према различитим врстама хабања, корозије појави прслина и др. [82,97,141,175].

Произвођачи додатних материјала у својим каталозима дају податке најчешће на основу резултата добијених испитивањима у лабораторијским условима. За избор одговарајућег додатног материјала ово најчешће није довољно, већ је неопходно извести и испитивања у реалним експлоатационим условима. Тек после ових испитивања могуће је одредити се за додатни материјал који се показао најбољим у реалним радним условима [63,65,78,97].

4.1 УТИЦАЈ ЛЕГИРАЈУЋИХ ЕЛЕМЕНАТА НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА

Нелегирани (угљенични) челици не могу испунити све пројектоване захтеве код многих конструкција код којих је неопходан не само довољно висок напон течења, већ истовремено и одређене динамичка издржљивост, граница пузања, затезна јачина и жилавост на сниженим, нормалним и повишеним температурама. Поред основних механичких својстава од челика се врло често захтева да имају добру отпорност према различитим процесима хабања, корозије и појаве лома, као и добру термостойаност, електропроводљивост, топлотну проводљивост, магнетичност и др. Ова специјална својства челика постижу се додавањем различитих хемијских елемената, односно *легирањем*. Пошто сви нелегирани челици садрже основне хемијске елементе (Fe, C, Si, Mn) и нечистоће (P и S), као и мање количине хемијских елемената који у челик прелазе из руде или при претапању отпадног челика, у стандарде различитих земаља уводи се граница изнад које се елементи сматрају за легирајуће [180,185]. Према нашем стандарду за легирајуће елементе сматрају се они елементи, чији је садржај у челику већи од садржаја датог у табелици 4.1.

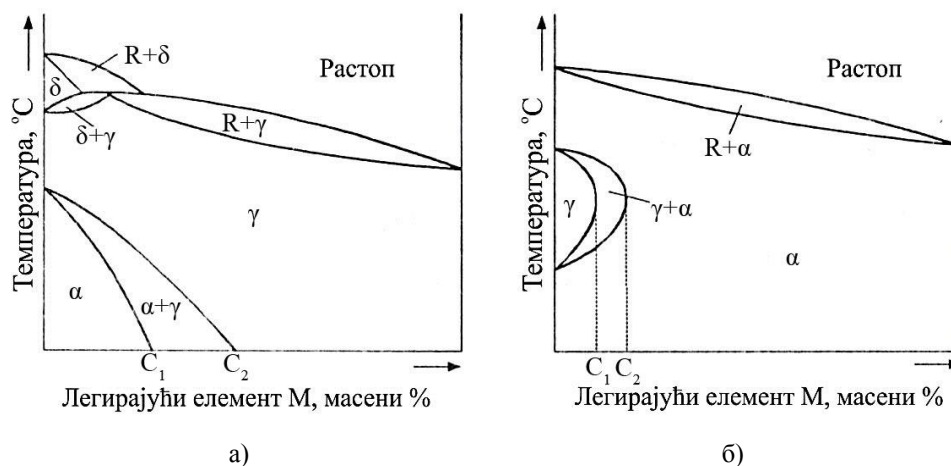
Таблица 4.1 Минимални садржај хемијских елемената у легираним челицима [65]

Легирајући елементи	Mn	Ni	V	Al	Si	W	Co	Cu	Cr	Mo	Ti
% > од	0.8	0.3	0.05	0.05	0.6	0.1	0.05	0.03	0.2	0.05	0.05

Угљеник (C) и гвожђе (Fe) су основне компоненте различитих легура челика и ливених гвожђа. Одређени садржај угљеника у челику омогућује каљење и постизање потребне тврдоће, и то важи како за нелегиране тако и за легиране челике. Сваки легирајући елемент мења својства челика у зависности од тога у коме је облику и којој количини присутан у структури, односно да ли је потпуно или делимично растворен у чврстом раствору основне металне масе (аустениту или фериту). Легирајући елемент може бити хемијски везан са угљеником (карбид), са азотом (нитрид), са кисеоником (оскид), а врста везе пресудно утиче на својства челика. У зависности од хемијског састава челици су, у мањој или већој мери, осетљиви на структурне промене под

утицајем температурског циклуса испод навара, односно стварању нових структурних фаза. Ниво утицаја сваког хемијског елемента на структуру челика не зависи само од његовог процентуалног садржаја, већ и од садржаја других хемијских елемената у челику који са гвожђем граде чврсте растворе.

Сви легирајући елементи утичу у већој или мањој мери на промену температуре пре кристализације челика, а тиме и на величине аустенитне или феритне области (гама или алфа). У том смислу легирајући елементи се могу поделити у четири групе: *елементи који потпуно отварају област гама, елементи који проширују област гама, елементи који потпуно затварају област гама и елементи који сужавају област гама.*



Слика 4.1 Равнотежни бинарни дијаграми: а) отворена област гама, б) затворена област гама [65]

Према утицају на структуру челика легирајући елементи се деле на две основне групе: *аустенитизаторе* (C, N, Cu, Ni и Mn) и *феритизаторе* (Cr, Mo, W, Si, V, Ta, Al, Ti и Nb) [55,65]. *Аустенитизатори* (γ -гени елементи) проширују аустенитну, и сужавају феритну област, док *феритизатори* (α -гени елементи) сужавају аустенитну, и проширују феритну област.

Повећањем процентуалног садржаја аустенитотворних елемената у челику долази до снижавања температуре његове прекристализације, односно на ширење аустенитне области. Температура прекристализације утиче на структуру челика, односно финоћу перлитних ламела, што омогућава да се променом те температуре могу добити челици различитих механичких особина. Када се температура прекристализације довољно снизи и када је брзина хлађења мала, дифузионе промене готово престају па ће у тим условима аустенит прекристалисати у мартензит бездифузионо, механизмом клизања [65]. Ако се повећа садржај аустенитизатора у челику изостаће прекристализација и задржаће се аустенитна структура и на собној температури (сл. 4.1а). Овакви челици називају се аустенитним а одликују се малом тврдоћом, ниским напоном течења, високом дуктилношћу, отпорни према корозији и нису магнетични. Супротно томе, са повећањем садржаја феритизатора у челику, доћи ће до сужавања аустенитне и ширења феритне области, тако да може остати феритна структура и до температуре топљења (сл. 4.1б). Ови челици се називају феритним, магнетични су и имају низак садржај угљеника.

4.1.1 УТИЦАЈ АУСТЕНИТИЗАТОРА НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА

Угљеник (C), као компонента челика има највећи утицај на структуру и својства челика и ливених гвожђа, јер и веома мали садржај угљеника изразито мења својства гвожђа, тако да код нелегираних челика прекрива утицај других елемената и одређује њихову структуру и својства [31,32,65].

Пошто су атоми угљеника релативно мали ($r = 0,079 \text{ nm}$) могу са гвожђем да образују интерстицијске (адicione) чврсте растворе стварајући различите структуре: α -ферит, δ -ферит и аустенит (γ). Све ове структуре имају различиту тврдоћу, релативно издужење, јачину, магнетичност и др. Највећа растворљивост угљеника у α -фериту је на температури 727°C и износи 0,025%, док је на собној температури занемарљивих 0,008%. У δ -фериту максимална

растворљивост угљеника од 0,10% је на температури 1495°C. У чврстом раствору аустенита (γ) максимална растворљивост угљеника од 2,11% постиже се на температури 1148°C [34,35,65].

За техничку праксу од великог значаја је готово цело подручје садржаја угљеника у гвожђу. Од 0,10-6,687% масених, односно 0-25% атомских. Легуре са мањим садржајем угљеника (до 2,11%) називају се челици и то: *подеутектоидни* (до 0,77%), *еутектоидни* (од 0,77%) и *надеутектоидни* (0,77 – 2,11%). Легуре са већим садржајем угљеника од 2,11% су *бело* и *сиво ливено гвожђе* (подела према боји површине лома-чистоћи): *подеутектичка* (2,11-4,3%), *еутектичка* (4,3%) и *надеутектичка* (4,3-6,77%). Из литературе [31,32,49,63], може се закључити да угљеник код наварених спојева повећава јачину, тврдоћу, отпорност на хабање, прокаљивост, а снижава пластичност, жилавост и погоршава заварљивост. Код нелегираних и микролегираних челика садржај угљеника (0,20–0,25%) погоршава заварљивост, док код легираних челика, због хемијских реакција са легирајућим елементима у великој мери утиче на погоршање заварљивости [157,168,172].

У легираним челицима угљеник са другим елементима гради карбиде који се издвајају по границама зрна, што у аустенитним нерђајућим Cr-Ni челицима ствара услове за појаву међукристалне корозије. Спречавање ове појаве постиже се додавањем Ti и Nb овим челицима који делују као стабилизатори, зато што са угљеником стварају стабилне карбиде (TiC, NbC). На тај начин спречава се формирање карбида хрома и осиромашење чврстог раствора у хрому. Друго решење је производња нерђајућих Cr-Ni челика са веома ниским садржајем угљеника (испод 0,03%), али се тиме погоршава њихова термостојаност. Побољшање термостојаности ових челика постиже се додавањем угљеника и азота у допуштеним границама.

Азот (N), слично угљенику, повећава тврдоћу челика на собној и повишеним температурама. Често се до одређене количине користи као замена никла, зато што се хемијски не везује за хром, па не умањује отпорност челика према корозији. Навари са повећаним садржајем азота, и поред присуства титана као стабилизатора, могу бити подложни корозији, јер се део титана једини са азотом, па не може за себе везати сву издвојену количину угљеника из чврстог раствора на границама зрна. Азот утиче на смањење пластичности и побољшање обрадљивости навара [31,32,63,65].

Бакар (Cu), када се у конструкционим челицима нађе до око 0,5%, не погоршава њихову заварљивост и не смањује битно пластичност, а повећава *напон течења* (R_{eH}) и *јачину на затезање* (R_m). При наваривању високолегираних челика са повећаним садржајем бакра може доћи до појаве врућих прслина као последице топљења еутектике на границама зрна аустенита. Садржај бакра у наварау повећава отпорност према атмосферској корозији.

Никал (Ni), растворен у фериту повећава јачину и жилавост навара уз одржање његове високе пластичности. Дејство никла као аустенитизатора у великој мери зависи од садржаја хрома у челику. Легирани Cr-Ni челици са садржајем никла изнад 8% при односу Cr / Ni < 1,8 имају чисто аустенитну структуру. Никал као легирајући елемент у челику до 5% повећава његову јачину и нарочито жилавост на сниженим температурама. Легура која садржи 40% Ni, 49% Cu и 1% Mn при загревању има исти коефицијент линеарног ширења као и стакло, док легуре које садрже 30–40% Ni оксидишу истом брзином као и чист никал.

Навари са чистом аустенитном структуром склони су ка појави врућих прслина, док отпорни на сниженим температурама, због пада *прелазне температуре*, тј. преласка из жилавог у крто стање. Никал снижава критичну брзину хлађења, повећава прокаљивост и погоршава заварљивост челика. Смањењем садржаја никла испод одређене границе умањује се стабилност аустенитне на рачун мартензитне структуре, јер долази до померања тачке мартензитне трансформације аустенита ка вишим температурама. Навари са већим садржајем никла морају имати што мање угљеника, зато што никал доприноси графитизацији (разлагању) цементита, чиме се добијају лошија механичка својства навара.

Манган (Mn), се раствара у фериту и доприноси порасту отпорности челика на хабање, јер повећава тврдоћу навара. Манган повећава и отпорност навара према појави врућих прслина. Захваљујући сулфиду (MnS) чија је температура топљења око 1620°C, манган доприноси смањењу количине нискотопљиве еутектике (Fe-FeS) у нелегираним (угљеничним)

и нисколегираним (микролегираним) челицима. Повећањем садржаја мангана у челицима до 1,5% расту јачина и жилавост навара, а задржава се и добра пластичност.

По питању мангана као аустенитизатора мишљења су подељена, тако да неки истраживачи тврде да је он аустенитизатор који има два до три пута мањи утицај од никла, док други истраживачи тврде да манган није аустенитизатор, већ само доприноси стабилности аустенита при хлађењу [46,65,78,97]. Сви легирајући аустенитотворни елементи не утичу подједнако на ширење аустенитне и сужење феритне области. Никал и манган потпуно одвајају аустенитну област, док бакар и азот проширују али не отварају аустенитну област.

При довољно спором хлађењу наварених легура Fe – Mn - C, у зависности од садржаја мангана и угљеника, добијају се различите структуре челика: *перлитна, мартензитно-перлитна, мартензитно-аустенитна* и *чисто аустенитна*. За практичну примену корисни су перлитна и аустенитна структура, док су мартензитно-перлитна и мартензитно-аустенитна структура непожељне, због изузетно ниске пластичности и велике кртости. Скоро сви мангански челици имају смањену пластичност и велику јачину, а одговарајућом термичком обрадом побољшава им се пластичност и смањује кртост. При томе треба водити рачуна да не дође до прегревања, јер долази до наглог раста кристалних зрна. Најпознатији мангански челик са садржајем 13% Mn и 1% C назива се Хадфилдсов челик, који је изузетно осетљив на прегревање, и веома отпоран на хабање [65,97,141,185]. Повећање пластичности аустенитних манганских челика постиже се термичком обрадом која се састоји из загревања на температури од 950-1050°C, прогревања на тој температури и наглог хлађења у води овим тзв. *гашењем аустенитних челика*, добија се аустенитна структура знатне пластичности.

4.1.2 УТИЦАЈ ФЕРИТИЗАТОРА НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА

Хром (Cr), у нелегираним челицима налази се у количини до 0,3%, у легираним челицима 0,7-3,5%, у хромовим челицима 12-18%, и у Cr - Ni челицима 9-35%. Садржај хрома у челицима (чврстом раствору) изнад 12% скоковито мења њихов електродни потенцијал од негативног у позитиван, чиме их чини отпорним према корозији. Комбинацијом 18% Cr и 8% Ni добијају се познати аустенитни челици високе отпорности према корозији. Даље повећање хрома доводи до пораста јачине и отпорности према корозији, али смањује својства пластичности. Садржај хрома у челицима изнад 20% значајно утиче на пад њихове пластичности јер се формирају тврди карбиди, најчешће Cr₃C и Cr₄C. Ови карбиди у челику могу се наћи као слободни или повезани са карбидом гвожђа Fe₃C (цементитом). Повишен садржај хрома смањује термичку проводност, и повећава термостојаност челика. У оксидационим условима хром посебно повећава термостојаност челика, али у мањој мери него молибден и ванадијум. Код нисколегираних челика хром погоршава заварљивост, јер повећања прокаљивост. Ова чињеница налаже предострожност при наваривању, заваривању и термичкој обради ових челика, због појаве кртих фаза које смањују њихову жилавост.

Већи садржај угљеника, него што је потребно за образовање перлита, ствара повољне услове за издвајање слободних карбида по границама аустенитних зрна и може изазвати међукристалну корозију. Критична температура за њихово издвајање је при хлађењу у температурској области 800-500°C [44,65,97]. Хром доводи до пораста критичне температуре A_{с1}, што смањује растварање карбида у чврстом раствору, па је у високолегираним хромовим челицима њихова растворљивост мања него у нелегираним челицима. То је разлог што се после загревања челика са садржајем хрома изнад 12% на температурама преко 1000°C и брзог хлађења добија мартензитна структура, док се при спором хлађењу добија перлитна структура са раствореним карбидима. Легуре Fe – Cr - C после рекристализације могу имати следеће структуре: *подеутектоидну, надеутектоидну, ледебуритну* и *феритну* са карбидима. Све ове структуре челика имају своју практичну примену.

Молибден (Mo), у конструкционим челицима се креће у границама 0,15-0,8%. Доприноси уситњавању металних зрна и повећању жилавости при високим температурама, али повећава закаљивост и погоршава заварљивост. Молибден утиче на додатну термостојаност легираних челика за рад на топло, као и аустенитних челика због повећања стабилности чврстог раствора услед повећања јачине граница кристалних зрна. Са повећањем садржаја молибдена расте затезна

јачина челика и напон течења, а када се садржај повећа преко 2,3% долази до опадања својства пластичности и повећања кртости [65,97,196,198]. Повећан садржај молибдена у навареном споју доводи до закаљивања у зони утицаја топлоте, па је пре наваривања неопходно извести предгревање, а у металу навара његов садржај је знатно мањи због његове активне оксидације.

Волфрам (W), доводи до уситњавања металних зрна у челику јер образује тешко растворљив карбид. Слично као и молибден повећава термостојаност челика, корозиону отпорност као и отпорност, аустенитних челика према међукристалној корозији. Волфрам релативно мало повећава прокаљивост и погоршава заварљивост челика, а при већем садржају угљеника се знатно оксидише [65,97].

При наваривању Cr - Ni челика присуство волфрама доприноси формирању δ -ферита и порасту тврдоће у зони утицаја топлоте. Код аустенитних челика који садрже до 0,15% C и до 3% W заварљивост се не погоршава. Легуре Fe - W - C после хлађења и очвршћавања могу образовати различите структуре: *подеотектоидне*, *надеутектоидне*, *ледебуритне* и *феритне*. Ледебуритни челици имају ситне кристале аустенита и цементита. Са порастом садржаја волфрама у овим легурама повећава се електрична отпорност, опада термичка проводљивост, а повећава се и њихова специфична густина, али само до садржаја од 7,6%. Легирани волфрамски челици са садржајем волфрама до 18% задржавају добру тврдоћу и жилавост и при *црвеном усијању* (око 750°C). Волфрамски челици, како феритни тако и ледебуритни, имају практичну примену.

Силицијум (Si), супституцијски се раствара у фериту при чему повећава његову јачину, и нарочито границу еластичности, па се користи као легирајући елемент код челика намењених за израду опруга. У високолегираним челицима силицијум спречава оксидацију хрома, а већина аустенитних челика садржи до 1% Si.

При наваривању челика, силицијум смањује отпорност навара према појави врућих прслина, и то нарочито при већем садржају угљеника. При већем садржају угљеника и силицијума (C > 0,8% и Si > 0,8%), цементит (Fe₃C) повећава склоност челика ка графитизацији. Силицијум не подлеже сегрегацији, већ напротив, отежава или спречава сегрегацију неких штетних хемијских елемената (P, S и др.).

У Cr-Ni челицима силицијум доприноси образовању ферита, повећању јачине и повећању отпорности према међукристалној корозији, мада при садржају изнад 0,5% доводи до смањења жилавости. Челик са око 1% Mn и 0,5% Si има одличне магнетне карактеристике. Легуре Fe-Si-C после очвршћавања могу имати следеће структуре: *подеутектоидну*, *надеутектоидну*, *ледебуритну* и *феритну*. Челици ових структура, осим ледебуритне, имају практичну примену.

Ванадијум (V), у специјалним челицима налази се у границама 0,2-0,85%, а у челицима за рад на повишеним температурама 1-1,5%. Због повећања прокаљивости ванадијум погоршава заварљивост челика, али му смањује осетљивост на прегревање, зато што карбиди волфрама коче пораст металних зрна. При наваривању интензивно се сједињује са гасовима из ваздуха (O₂ и N₂), па се због тога препоручује додатни материјал са повећаним садржајем алуминијума који служи као дезоксидатор. Утицај ванадијума на термостојаност челика је незнатан као и на отпорност аустенитних челика према појави врућих прслина. Ванадијум заједно са ниобијумом и силицијумом повећава отпорност према међукристалној корозији у наварама формираним аустенитним додатним материјалом типа 18Cr8Ni.

Тантал (Ta), је легирајући елемент са великом склоношћу ка образовању карбида. У аустенитним Cr - Ni челицима служи као стабилизатор који спречава међукристалну корозију. Суштина је у томе што тантал спречава образовање карбида хрома код аустенитних челика, под условом да је присутан у довољној количини како би могао за себе да веже сав угљеник издвојен из чврстог раствора хрома.

Алуминијум (Al), показује већу склоност ка образовању нитрида (AlN) од склоности ка образовању карбида (Al₄C₃), па на тај начин утиче на снижење осетљивости челика према старењу. Захваљујући кочионом дејству нитрида и оксида алуминијума Al₂O₃, алуминијум спречава пораст првобитног аустенитног зрна, па се најчешће додаје челицима у количини

0,02–0,2%. И у овако малим количинама алуминијум не само да кочи раст аустенитног зрна, већ смањује склоност челика ка закаљивању у прелазној зони, чиме донекле побољшава његову заварљивост. Код челика отпорних на хемијску корозију алуминијум доприноси повећању њихове отпорности према гасној оксидацији. Челици са садржајем изнад 1% Al сврставају се у тешко заварљиве челике.

Титан (Ti), је легирајући елемент који има највећи афинитет према угљенику па се због тога користи као стабилизатор у аустенитним челицима како би везао за себе угљеник и спречио стварање карбида хрома. Ако је у аустенитним челицима садржан у довољним количинама титан чини челик отпорним према међукристалној корозији задржавајући хром у гвожђа. Титан са азотом образује нитрид титана који је нерастворљив у чврстом раствору челика, делује као центар кристализације, тако да при фазним променама доприноси уситњавању структуре навара. Титан доприноси и повећању отпорности навара према појави врућих прелина.

Ниобијум (Nb), показује велику склоност према угљенику и образује карбид NbC, па је његов користан утицај на својства челика пре свега заснован на кочењу процеса сегрегације. У неким микролегираним челицима додаје се у количини до 0,05% ради побољшања неких својстава. Хромови феритни челици који садрже одређену количину ниобијума, мање су осетљиви према појави врућих прелина. Ниобијум сужава аустенитну област, смањује прокаљивост и побољшава заварљивост челика [32,65,97].

Потребно је рећи да сви аустенитотворни и феритотворни елементи не утичу подједнако на ширење и сужавање аустенитне и феритне области. Тако на пример, хемијски елементи (C и Mn) потпуно отварају аустенитну област, док хемијски елементи (Cu и N), само проширују ову област. Такође, док неки елементи (Ta, Nb, Zr и Ce) сужавају аустенитну област, други елементи (Cr, Mo, V, W, Si, Al, Ti и P) потпуно затварају аустенитну област.

Поред угљеника и легирајућих елемената сврстаних у аустенитизаторе и феритизаторе, мање или више утичу на особине челика и остали хемијски елементи: бор, сумпор, фосфор, кобалт, водоник и кисеоник. Други хемијски елементи имају значајан утицај на својства обојених метала, а њихов утицај на својства челика је незнатан. Бор и кобалт углавном позитивно утичу на својства челика, док сумпор, фосфор, водоник и кисеоник негативно утичу на њихова својства [65,97].

Бор (B), је легирајући елемент који образује карбиде, па и када је у челику садржан у изузетно малим количинама знатно повећава прокаљивост. Повећањем садржаја бора прокаљивост челика опада, али настаје грубозрнаста структура, па се зато додаје челицима у микроколичинама око 0,003%. У аустенитним челицима горња граница садржаја бора је најчешће 0,005-0,01%. Неки аутори тврде да се при садржају бора изнад 0,2% повећава отпорност навара од аустенитних челика према појави врућих прелина. Тврди се да бор донекле проширује аустенитну област [44,65,97]. У аустенитним Cr-Ni челицима мала количина бора повећава њихову термостојаност, због повећања јачине границе зрна, док садржај бора у границама 1-2% смањује пластичност на повишеним температурама.

Кобалт (Co), је легирајући елемент који у челику делује слично као волфрам, а донекле и као никал. При наваривању, као додатни материјали користе се стелити, који дају изузетно тврде наваре отпорне и постојане на високим температурама. На собној температури тврдоћа навара је око 63 HRC, а на температури 1000°C пада на око 43 HRC. Легуре кобалта су веома отпорне на хабање и корозију, и на високим температурама. Кобалт се у овим легурама може делимично заменити са никлом, а волфрам са молибденом, ванадијумом, титаном и танталом.

4.2 КАРБИДИ У МЕТАЛНОЈ ОСНОВИ И ЊИХОВ УТИЦАЈ НА СВОЈСТВА ЧЕЛИКА

При наваривању различитих врста челика у зависности од њиховог хемијског састава, температурског циклуса, утицаја околне средине и др., настају фазне промене и различита хемијска једињења у металној основи: *карбиди, нитриди, оксиди, бориди, сулфиди, фосфиди* итд. Ова хемијска једињења, посебно карбиди имају значајан утицај на структуру и својства навара.

Већи број легирајућих елемената сједињава се са угљеником у челику или ливеном гвожђу стварајући интерстицијске фазе, односно сложене структуре које се називају *карбиди*.

Експерименталним истраживањима утврђено је да карбиде могу образовати само они хемијски елементи чији је подслој *d* мање поседнут електронима од подслојева гвожђа. Што је код неког хемијског елемента мањи број електрона у подслоју *d* његова склоност ка образовању карбида је већа и створени карбиди су стабилнији. Подслој *d* имају само електронски слојеви удаљенији од језгра атома. Експериментална истраживања у вези са могућношћу и количинама образовања карбида презентовани су у литератури [51,88,121,195,196]. У литератури [120,196], наведени су атомски бројеви, енергетско стање (потенцијал) и атомски радијуси само неких важнијих карбидотворних хемијских елемената (таб. 4.2).

Таблица 4.2 Атомски бројеви, енергетско стање и величина атомских радијуса у *nm* важнијих карбидотворних елемената и однос радијуса угљеника према радијусима тих елемента [120,196]

ПЕРИОДА - Главни квантни број	N (4)	Ti	22	V	23	Cr	24	Mn	25	Fe	26
		3d ² 4s ²		3d ³ 4s ²		3d ⁵ 4s ¹		3d ⁵ 4s ²		3d ⁶ 4s ²	
		0.147/0.524		0.132/0.583		0.125/0.616		0.112/0.688		0.124/0.621	
	O (5)	Zr	40	Nb	41	Mo	42				
		4d ² 5s ²		4d ⁴ 5s ¹		4d ⁵ 5s ¹					
		0.158/0.487		0.143/0.539		0.136/0.566					
	P (6)	Hf	72	Ta	73	W	74				
		5d ² 6s ²		5d ³ 6s ²		5d ⁴ 6s ²					
		0.157/0.490		0.143/0.538		0.137/0.562					

У складу са *правилем стабилности формирања карбида* може се закључити да њихова стабилност расте од карбида Fe, преко карбида Mn, Cr, V до карбида Ti (Fe→Mn→Cr→V→Ti), затим од карбида Mo преко карбида Nb до карбида Zr (Mo→Nb→Zr), и од карбида W преко карбида Ta до карбида Hf (W→Ta→Hf).

Хемијски елементи који имају потпуно поседнут (испуњен) подслој *d*, и они елементи чији је подслој *d* поседнутији електронима од подслоја *d* гвожђа (Cu, Zn, и др.) не могу да образују карбиде. Ако се у легури гвожђа налази више карбидотворних елемената, угљеник ће се увек сјединити са елементом веће склоности ка стварању карбида. На пример, ако се у челику налазе Cr и V, треба очекивати прво стварање карбида V па затим карбида Cr. При довољном садржају Cr и V у челику неће доћи до стварања карбида Fe, јер ће се целокупна садржина излученог угљеника везати за Cr и V [195,196].

Када је однос радијуса атома угљеника ($r = 0,079 \text{ nm}$) према радијусу неког карбидотворног елемента ($r > 0,1 \text{ nm}$) већи од 0,59 долази до формирања *интерметалних кристалних фаза* које имају следеће карактеристике: задржавају стехиометријски однос MC или M₂C (M - метал, C - угљеник); најчешће имају просту површински центрирану кубну решетку (карбиди типа MC), или хексагоналну решетку (карбиди типа MC или M₂C); могу кристалисати и формирати решетку непопуњену угљеником у свим чворовима; ова једињења су веома стабилна, имају изузетно високу тачку топљења (2000-4000°C) и њихова растворљивост у аустениту је незнатна. Температуре топљења тешко топљивих карбида су: TiC = 3140°C, ZrC = 3530°C, HfC = 3890°C, NbC = 3500°C, TaC = 3880°C, WC = 2600°C, W₂C = 2700°C, Mo₂C = 2400°C, MoC = 2700°C.

Када је однос радијуса угљеника према радијусу карбидотворног елемента већи од 0,59 долази до образовања *карбида сложене структуре*. Већина познатих карбидотворних елемената могу да се кристалишу у три кристалографска система: *кубном, хексагоналном и ромбичном* [196]. Неки карбидотворни елементи могу образовати и две врсте карбида, а Mn и Cr могу образовати чак три врсте карбида са различитим кристалним решеткама.

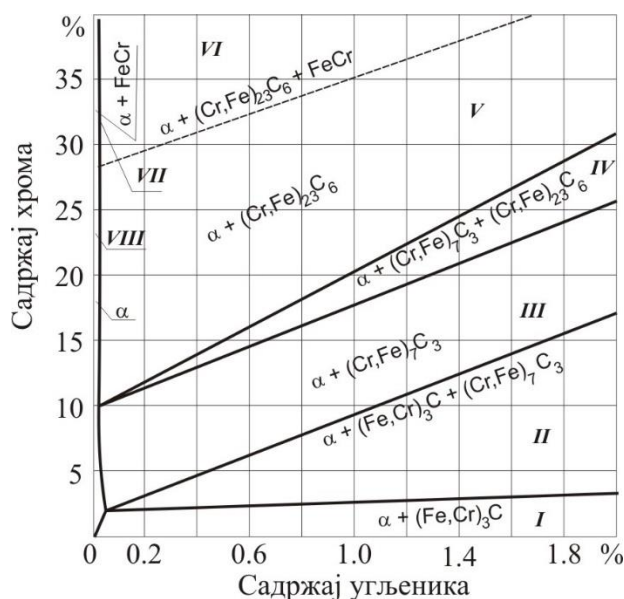
Најпростији карбиди су они који се кристалишу у облику просте кубне решетке (типа МС), и такве карбиде образују легирајући елементи V, Ti, Nb, Ta и Hf. Сложенији карбиди су они који се кристалишу у облику хексагоналне решетке (типа МС), које образују Мо, W, V, Nb и Та. Хексагоналну решетку имају и тзв. ϵ -карбиди, који се јављају у каљеним и ниско отпуштеним челицима. Сложене карбиде са ромбичном решетком образују Cr, Mn, Fe, Co и Ni, док легирајући елементи Cr, Ni и Co заједно са Fe никад не образују карбиде са ромбичном решетком. Типична решетка сложених структура (M_3C) је решетка цементита (Fe_3C) и она је изоморфна са решетком карбида мангана (Mn_3C). То значи да се оба карбида могу међусобно потпуно растворити формирајући при томе чврсте растворе. Често се дешава да два карбидотворна елемента образују сложени карбид који има компликовану регуларну кубну решетку (типа M_6C). Такве карбиде најчешће образују Мо и W, и њихов састав најчешће није сталан и креће се у границама $Fe_3(W, Mo)_3C$ до $Fe_4(W, Mo)_2C_2$.

Фазе интерстицијског типа (WC , W_2C , MoC , Mo_2C), изузетно су стабилне и минимално се растварају у аустениту што погоршава својства челика, па је неопходно извести хлађење растопа тако да се омогући издвајање (излучивање) сложених карбида Fe_3W_3C , Fe_3Mo_3C , или најчешће $Fe_3(W, Mo)_3C$, који се далеко лакше растварају у аустениту.

Из аспекта отпорности челика према хабању и термостојаности неопходно је проучити формирање карбида хрома и карбида мангана, који су доста слични и могу формирати кубну (регуларну) решетку, хексагоналну решетку (Cr_7C_3 и Mn_7C_3) и ромбичну решетку (Cr_3C_2 и Mn_3C_2). Осим карбида хрома Cr_3C_2 сви остали се јављају у легурама гвожђа, при чему у неким од њих одређен број атома гвожђа или неког другог елемента може бити замењен атомима неког другог метала који се налази у карбиду [196]. Хром образује два карбида: $Cr_{23}C_6$ који има елементарну површински центрирану решетку кубног система са шеснаест атома и параметар атомске решетке $a = 1,066 \text{ nm}$, и Cr_7C_3 који се кристалише у хексагоналном систему елементарне решетке са 80 атома и параметре $a = b = 1.398 \text{ nm}$ и $c = 0,453 \text{ nm}$.

У састав карбида хрома може ући и гвожђе, јер се хром раствара у цементиту замењујући у његовој решетки гвожђе, а исто тако и гвожђе се раствара у карбиду хрома замењујући у његовој решетки атоме хрома. Због тога се израз за легирани цементит може написати као $(Fe, Cr)_3C$, а израз за легирани карбид хрома Cr_7C_3 као $(Cr, Fe)_7C_3$.

Различите врсте карбида у металној основи дају различите структуре и својства челика, а као пример на слици 4.2 наводе се више сложених фаза и структура у легурама типа Fe-Cr-C у зависности од садржаја хрома и угљеника.



Слика 4.2 Различите фазе и сложене структуре легуре Fe – Cr – C на температури 20 °C, у зависности од садржаја C и Cr [97,196]

При малом садржају хрома још се не образује његов карбид, који раствара у фериту и цементиту дајући мешавину $\alpha + (Fe, Cr)_3C$. Поред ове мешавине образује се ферит и два карбида

(Fe, Cr)₃C и (Fe, Cr)₇C₃. Са повећањем садржаја хрома нема више појаве цементита, већ се поред ферита јавља само његов карбид са раствореним гвожђем у (Fe, Cr)₇C₃. Далјим порастом садржаја хрома, поред ферита и првог карбида хрома долази до појаве и другог карбида хрома са раствореним гвожђем у (Fe, Cr)₂₃C₆. Када се даље повећава садржај хрома поред ферита јавља се и други карбид хрома. Најзад се повећањем садржаја хрома, поред ферита и другог карбида хрома, јавља и интеркристална фаза гвожђа и хрома (Fe–Cr–C) на крају се јавља само ферит. Сви остали системи типа (Fe–M–C) слични су систему (Fe–Cr–C), али су нешто једноставнији због мањег броја структурних фаза [141].

Различите комбинације карбидотворних елемената у основном и додатном материјалу добијању различите структуре и својства навара. Тако на пример, додатни материјал са *волфрам-карбидом* даје наваре велике тврдоће и мале пластичности, као и отпорност према корозији и прслинама.

Волфрам-карбид има изузетно високу отпорност према абразивном хабању због тврдоће од 2400-2700 HV, који је у металној основи навара тврдоће 45-65 HRC, што указује на изузетно високу јачину на притисак, али и веома ниску пластичност. На температури изнад 538°C [196] зрна карбида волфрама се оксидишу (тзв. жути оксид), па се ови навари не препоручују за рад у условима корозије. Метал навара је веома осетљив за попречне преломе. Додатни материјал са манганом даје наваре супротних својстава од волфрама, јер манган са угљеником не образује посебан карбид, већ се делимично раствара у цементиту (легирани цементит), где надомешта недостајуће атоме гвожђа.

Специјални карбиди имају већу тврдоћу од цементита и мању растворљивост у аустениту, па ова чињеница може утицати на добијање захтеваних својстава навара. После дужег држања на температури отпуштања, код неких челика, мења се тип излучених карбида, јер се при отпуштању не формира одмах стабилан (равнотежан) карбид, већ се најпре формира прелазни (нестабилан) тип карбида, који касније под дужим утицајем температуре прелази у стабилан карбид. У зависности од захтеваних својстава навар се дуже или краће загрева и држи на температури жарања, при чему се добија мања или већа тврдоћа, односно мања или већа отпорност на хабање. На отпорност навара на хабање не утиче само тврдоћа карбида већ њихов облик, величина и распоред у металној основи. Већи и грубљи карбиди лакше се чупају из металне основе и тиме смањују отпорност навара на хабање.

Може се рећи, да карбиди у металној основи имају велики утицај на својства навара, првенствено на отпорност према различитим процесима хабања. Познавањем хемијског састава основног и додатног материјала, и температурских циклуса наваривања, могу се предвидети врсте карбида који ће се формирати у навару, па самим тим и својства отпорности наварених површина.

4.3 ИЗБОР ДОДАТНИХ МАТЕРИЈАЛА ЗА НАВАРИВАЊЕ

При избору додатних материјала за наваривање полази се од хемијског састава и структуре основног материјала, техничко-технолошке могућности извођења процеса наваривања и захтеваних својстава навара. Без обзира на врсту навара неопходна је мања склоност ка прслинама и што већа жилавост. Легуре отпорне према различитим процесима хабања или корозије могу се класификовати у неколико група: челици, челични ливови, бела ливена гвожђа, карбиди, стелити, легуре кобалта, легуре никла, легуре бакра и др [42,43,44,45]. Стелити су тврде легуре које се углавном наварују на разне ивице алата за опсецање, а то су карбиди Cr и W са везивом Cr и 100% Fe.

4.3.1 ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА НАВАРИВАЊЕ ОТПОРНИ НА ХАБАЊЕ

Најотпорније легуре према хабању су углавном додатни материјали који дају наваре велике тврдоће, мада тврдоћа не може бити једино мерило за оцену отпорности навара на хабање. Повећањем тврдоће отпорност на хабање навара расте само до одређене границе. Захтевана тврдоћа навара служи као један критеријум за додатни материјал при наваривању. Други

критеријум је врста хабања, јер свака врста има неке своје специфичности, које мора да испуни додатни материјал, како би се добили навари тражених карактеристика.

4.3.1.а Материјали отпорни на адхезионо хабање

Отпорност контактних површина елемената техничких система према адхезионом хабању постиже се наваривањем тврдих слојева додатних материјала на оба елемента у контакту. То су тврди додатни материјали који садрже карбиде волфрама, титана или бора. Изузетно добра отпорност на адхезионо хабања постиже се наваривањем додатних материјала од белог ливеног гвожђа легираног хромом чија је тврдоћа 55-65 HRC. Када је дозвољено мање деформисање једног елемента у контакту добри резултати се постижу наваривањем додатним материјалима различитих тврдоћа. Контактна површина одговорнијег спрегнутог елемента наварује се легуром веће тврдоће, а другог елемента легуром мање тврдоће. Примери таквих спрегнутих парова су челик-лежишни метали, или челик-неметални материјали.

4.3.1.б Материјали отпорни на абразивно хабање

При избору додатних материјала за наваривање делова отпорних на абразивно хабање мора се водити рачуна о начину дејства абразива на контактне површине, а најкарактеристичнија су два начина: *дејство абразива при високим специфичним притисцима под утицајем променљивих ударних оптерећења уз локалну деформацију и дејство расутог абразива на радне површине где делују релативно мали специфични притисци.*

Код грађевинске, рударске и пољопривредне механизације најчешће настаје абразивно хабање а највећу отпорност на ударно абразивно хабање, показали су мангански аустенитни челици који садрже 12-14% Mn и 1,2-1,4% C, понекад са додатком око 1% Cr, а најпознатији међу њима је Хадфиелдов челик са (13% Mn и 1,2% C). Добру отпорност према овој врсти абразивног хабања имају и остали мангански челици.

Репаратурно наваривање оштећених површина елемената од манганских аустенитних челика и манганских челичних ливова изводи се базичним манганским електродама. Навар од ових електрода нема велику тврдоћу одмах после наваривања, већ му се тврдоћа повећава током експлоатације. Потребно је нагласити да повећање тврдоће наварених површина аустенитним електродама не расте због деформационог ојачања, већ због локалне мартензитне трансформације аустенита инициране великом пластичном деформацијом изазвану ударним оптерећењем.

Када је реч о абразивном хабању и деловању расутих материјала, радни делови су од микролегираних алатних челика, или ледебуритних челика, као и челичних ливова и др. [12,30]. При репаратурном наваривању могу се користити различити додатни материјали слични као и за остале делове оштећене ударним хабањем. Због специфичних експлоатационих услова већина оштећених елемената грађевинске механизације репарира се наваривањем додатним материјалима са знатним садржајем угљеника и више од 12% Mn. Резни елементи алата за бушење, сечење, дробљење и разбијање минерала у рудницима и каменоломима наварују се додатним материјалима који имају висок садржај угљеника и више од 20% Mn и Cr [12,30].

4.3.1.в Материјали отпорни на заморно хабање

Репаратурно наваривање оштећених елемената услед заморног хабања изводи се коришћењем додатних материјала довољно високе *динамичке издржљивости*. Пре свега је рез о доброј жилавости, како не би дошло до чупања навара. Најбољу отпорност према заморном хабању имају додатни материјали хемијског састава и структуре опружних челика. Навари од додатног материјала састава 0,45% C и 1,5% Si, термички се обрађују ради смањења заосталих напона и побољшања динамичке издржљивости. Код ових материјала садржај силицијума не сме да пређе 3,5%, јер су навари веома крти, што им смањује отпорност према заморном хабању. Недезоксидисани навари имају лошу отпорност према заморном хабању због *ефекта зареза* у наварима, док сулфиди доводе до повећања ове отпорности јер формирају меке превлаке преко тврдих и оштрих оксида, па тако смањују ефекат зареза и концентрацију напона.

На развој процеса заморног хабања велики утицај имају контактни напон, па је неопходно фина обрада наварених површина, јер грубе површине стварају велике контактне притиске, односно, круњење и љуштење навара [12].

4.3.1.г Материјали отпорни на вибрационо хабање

Већи број фактора утиче на појаву и интензитет вибрационог хабања, а најважнији су: међусобно релативно кретање контактних површина, величина притиска у тим зонама, време трајања процеса и средина у којој се остварује контакт. Она углавном садржи кисеоник, азот и водену пару. Експерименталним истраживањима дошло се до закључка да присуство кисеоника интензивира процес вибрационог хабања чак за 80% у односу на околни чист азот [12]. Зато се данас препоручује пуњење аутомобилских пнеуматика азотом уместо ваздухом. Смањењем влажности на контактним површинама, односно површинама трења, опада интензитет вибрационог хабања. Вибрационо хабање одвија се у четири основне фазе и представља сложен облик хабања, па је и избор додатног материјала за наваривање отежан. При избору погодних материјала морају се узети сви фактори који карактеришу настајање и развој ове врсте хабања, основне фазе одвијања процеса (адхезија, абразија, корозија), а најбољи резултати постижу се комбинацијом додатних материјала са што већом разликом у тврдоћи, али морају да имају и добру отпорност према стварању оксидних превлака. Неповољне комбинације су челик са Al, Ni, Sn и легуре ливеног гвожђа са Al, Mg и Sn, или алуминијума са Pb, Ag, Au и тефлоном, иако је испуњен услов комбинације материјала са великом разликом у тврдоћи [12].

Вибрационо хабање наварених контактних површина може се смањити механичким или термичким третманом, конструкционим решењима (огрубљивањем контактних површина, прекривањем гумом или пластиком и др.), и коришћењем чврстих мазива (графитна маст и др.).

4.3.1.д Материјали отпорни на ерозионо хабање

На интензитет ерозионог хабања утиче већи број фактора који се односе на носећи медијум, ношене честице, физичко-хемијска својства материјала контактних површина, утицај околне средине и др. Наварене површине изложене овој врсти хабања при удару честица под мањим упадним угловима, што је најчешћи пример у пракси, изложене су оштећењима у виду бразда. На ерозионо хабање добру отпорност имају навари од тврдих метала. Наварене површине изложене ударима честица под већим упадним угловима потребно је формирати од додатних материјала способних да апсорбују кинетичку енергију ових честица. Интензитет ерозионог хабања зависи од сличних фактора као и заморно, корозионо и абразивно хабање, а материјали који имају добру отпорност према ерозионом хабању су: каљени, цементирано или нитрирано челици; мартензитно бело ливено гвожђе; синтеровани материјали (карбиди, корунд, базалт).

Нисколегирано челици код којих садржај легирајућих елемената (Mn, Si, Cr, Mo, Ni, V, понекад и В) не прелазе 5% а имају 0,15-0,5% С поседују добру отпорност према ерозионом хабању [12,30]. Веома добру отпорност на ерозионо хабање имају мартензитно легирано челици (Cr, Mo, понекад и Ni са 0,8-1,2% С. После наваривања овим додатним материјалима неопходна је термичка обрада побољшања (каљење и отпуштање). Каљење се изводи са температуре 950–1050°C, ради добијања мартензитне структуре, а ниско отпуштање на 250°C уз хлађење на мирном ваздуху, омогућава смањење тврдоће и нивоа заосталих напона. Добру отпорност на ерозионо хабање при удару ерозионих честица на наварену површину под већим угловима имају додатни материјали који формирају жилаве наваре.

Веома добру отпорност према ерозионом хабању имају и мартензитно комплексно легирана бела ливена гвожђа код којих је удео легирајућих елемената (Cr, Ni и Mn) од 4–8%. Имају мешовиту структуру: мартензит и заостали аустенит са карбидима типа M_3C . Наварени елементи се жаре по режиму 275°C/5 h, чиме се повећава њихова отпорност и према кртом лому услед удара. Највећу отпорност на ерозионо хабање имају додатни материјали који формирају наваре мартензитне структуре високолегираних белих ливених гвожђа са садржајем до 30% Cr уз мале додатке Mo и V. Основна структура је мартензитна са заосталим аустенитом и укљиченим веома тврдим комплексним карбидима типа M_7C_3 [12].

4.3.1.e Материјали отпорни на кавитационо хабање

Према кавитационом хабању веома су отпорни навари од додатних материјала који имају хомогену аустенитну и феритну структуру. Навари хетерогене перлитне, перлитно-феритне, феритно-аустенитне у феритне структуре, знатно су неотпорнији на ову врсту хабања. Наиме, нехомогени навари садрже различите грешке и мање отпорне фазе излучене по границама кристалних зрна. Најмању отпорност има феритна, а највећу отпорност мартензитна структура. Стабилна аустенитна структура нема добру отпорност, јер се брзо појављују оштећења на границама металних зрна која прелази у прелине. Нестабилна аустенитна структура има бољу отпорност, јер током кавитационог хабања долази до локалне трансформације аустенита у мартензит. Овај случај се најчешће јавља код аустенитног Cr-Mn челика хемијског састава 0,5% C, 10% Cr и 10% Mn [12]. Добру отпорност према овој врсти хабања имају и легуре хемијског састава 0,16% C, 16% Cr, 4% Fe, 4% Si а остало Ni и В, које у својој структури имају карбиде или бориде хрома [12,30,92]. Процес кавитационог хабања често је праћен и корозионим процесима, па навари морају да буду отпорни и на корозију.

Поред легура гвожђа које имају добру отпорност према процесима хабања постоје и легуре обојених метала и неметални материјали који су отпорни према појединим процесима хабања. Легуре неких обојених метала, имају и добру отпорност нарочито према корозионом хабању. Највећу практичну примену нашле су различите врсте бронзи: *калајна, алуминијумска, оловна, силицијумска, фосфорна и берилијумска*.

У табелици 4.3 дате су структуре неких додатних металних материјала за наваривање и њихова својства отпорности према различитим врстама хабања.

Таблица 4.3 Утицај структуре додатних материјала за наваривање на отпорност њихових превлака према различитим процесима хабања [30,97,141,177]

СТРУКТУРА	ГЛАВНЕ ОСОБИНЕ	
1. Перлитна структура	Отпорност на ударно оптерећење, абразивно хабање	
2. Карбиди W у мекој основи	Велика отпорност на абразивно хабање, навар је релативно крт	
3. Аустенитна структура са већим садржајем Cr (Cr ≥ 12%)	Добра отпорност на ерозију, оксидацију и корозију	
4. Аустенитне легуре са већим садржајем Co (Fe-Ni-Co)	Добра отпорност на високим температурама (500-1000°C), оксидацију, корозију и абразивно хабање	
5. Аустенитне легуре са већим садржајем Ni	Добра отпорност на корозију и оксидацију	
6. Мартензитна структура	Велика отпорност на абразивно хабање, као и отпорност на притисак (гњечење)	
7. Мартензитни челици	Добра отпорност на абразивно хабање, ударно оптерећење, на дејство притискујућих сила и др.	
8. Аустенитни челици	8.1 Аустенитни нерђајући челици - CrNi	Добра отпорност на корозију и оксидацију, средња отпорност на абразивно хабање
	8.2 Аустенитни мангански челици (1.2% C, ≈ 13% Mn)	Велика отпорност на ударно оптерећење, посебно после хладне деформације
9. Фосфорне бронзе	Отпорне на адхезију и корозију	
10. Алуминијумске бронзе	Отпорне на удар, кавитацију и корозију	
11. Никал - алуминијумске бронзе	Отпорне на удар и кавитацију	

4.3.2 ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА НАВАРИВАЊЕ ОТПОРНИ НА КОРОЗИЈУ

Избор додатних материјала за наваривање делова отпорних на корозију првенствено се изводи да би се спречило настајање корозионих продуката (најчешће оксида) који изазивају корозионо хабање. Корозионо (трибо-хемијско) хабање настаје дејством оксида као продуката хемијске корозије, када је брзина оксидације већа од брзине разарања оксида услед трења. При коришћењу наварених делова, током експлоатације мора се спречити њихова оксидација, чији су производи тврда и крта хемијска једињења са високом тачком топљења, јер они изазивају корозионо хабање и интензивирање других врста хабања.

На избор додатних материјала за наваривање одлучујући утицај имају својства околне средине. Са повећањем агресивности те средине, повећаног садржаја кисеоника у њој, пораста радне температуре и склоности додатних материјала према апсорпцији кисеоника, расте корозионо хабање.

Добру отпорност према корозији [65,97] имају следеће легуре: *хромове, хром-никлове, хром-манганове, кобалтове, титанове, никлове* и неке друге легуре. Додатни материјали отпорни према процесима корозије испоручују се најчешће у ваљаном или ливеном стању и сличног су хемијског састава као и основни материјал. Све ове легуре су разврстане у две основне групе: *термопостојане* (ознака Н) и *корозионо отпорне* (ознака С).

Термопостојане легуре користе се за радне температуре од 650-1200°C, код којих је знатно већи садржај С, Cr и Ni, а отпорне су на сагореле гасове, пепео, сумпорна и хлорна испарења [65].

Корозионоотпорне легуре користе се за радне температуре до 650°C, и те су легуре отпорне према електрохемијској корозији изазваној дејством течне агресивне средине (неорганске и органске киселине, раствори соли–електролити, једињења азота) [65].

Према металуршкој структури челици за наваривање деле се на: *аустенитне, феритне, мартензитне и таложно ојачане* челике. Према хемијском саставу челици за наваривање добре отпорности према процесима корозије могу се сврстати у следеће групе: *хромови, хром-никлови и хром-манганови* челици. Поред корозионоотпорних легура гвожђа овде још спадају: *легуре кобалта* које су отпорне према високотемпературској корозији изнад 700°C, *титанове легуре, никлове легуре* и легуре (Cu, Zn, и Pb), чија је примена релативно велике.

4.3.2.а Хромове легуре

Хромови челици имају својство хемијске отпорности и термопостојаности. Углавном се могу сврстати у три групе додатних материјала: *каљиви мартензитни челици, делимично каљиви феритни челици* и *некаљиви феритни челици*.

Каљиви мартензитни (ледебуритни) челици садрже 12–18% Cr; 0,15-1% С; и мале количине других легирајућих елемената. Примењују се за израду или репаратурно односно производно наваривање елемената техничког система који раде у мање агресивним срединама (органске и неорганске киселине), односно тамо где је први приоритет тврдоћа и јачина елемената, а пожељна је њихова отпорност према процесима корозије. Мање су корозионо отпорни од аустенитних и феритних челика, магнетични су, а после термичке обраде побољшања постижу велику јачину и просечну жилавост.

Представник ове групе челика је мартензитни, односно ледебуритни челик са 17% Cr, 1% Мо; 0,18% С и остало Fe, а користе се за наваривање елемената који раде на нормалним и повишеним температурама (ваљци за континуално ваљање материјала на топло и др.). Неки мартензитни челици склони су отпушној кртости, ако се споро хладе у температурском интервалу 400-300°C.

Делимично каљиви полуферитни (феритно-мартензитни) челици су термопостојани и имају добру отпорност према процесима корозије. Термопостојани полуферитни челици садрже 6-14% Cr, 1-2% Si, 0,1% С са додатком до 1% Al. Полуферитни корозионоотпорни челици имају хемијски састав 16–18% Cr, око 0,1% С, а остало Fe.

Термопостојани челици ове врсте користе се као додатни материјали при репаратурном наваривању елемената парних турбина, индустријских пећи, сушара у асфалтним базама, пећи за производњу креча и цемента и др. Корозионоотпорни челици ове врсте најчешће се користе за репаратурно наваривање елемената хидрауличних пумпи и мотора са унутрашњим сагоревањем, који раде у агресивној средини.

Некаљиви феритни челици садрже више Cr, а мање C од мартензитних или полуферитних челика. Најчешћи садржај ових челика је 20–26% Cr и 0,05–0,2% C. Применом поступка аргонско – кисеоничког разугљенисавања (AOD поступак), произведено је неколико класа феритних челика који имају већи садржај Cr и Mo, и минималан садржај C. Неки од ових челика су са 18% Cr и 2% Mo; 26% Cr и 1% Mo; 29% Cr, 4% Mo и 2% Ni. Ови челици су магнетични, а када садрже довољну количину Cr и Mo задржавају своју структуру све до тачке топљења.

Феритни челици најчешће се користе где се захтева добра термопостојаност, а понекад и отпорност према хемијски агресивним срединама. Имају добру отпорност према продуктима сагоревања у оксидишућој и наугљенисавајућој средини, и средини која има сумпора. Намењени су за наваривање елемената од којих се захтева висока термопостојаност, средња отпорност према хемикалијама и мања жилавост. Нашли су примену при репаратурном наваривању елемената изложених опасности од појаве хемијске корозије појачане дејством хлороводоничне киселине (опрема за пренос топлотне енергије у хемијској и петрохемијској индустрији) елемената мотора са унутрашњим сагоревањем (првенствено издувних система) и др.

Сви феритни и феритно–мартензитни хромови челици склони су ка појави кртости при жарењу ако се споро хладе у температурском интервалу 500–450°C, јер при дужем задржавању на повишеним температурама долази до излучивања хрома у виду карбида по границама кристалних зрна. То доводи до осиромашења чврстог раствора хромом испод 12%, чиме се остварују услови за појаву селективне међукристалне корозије. Ова непожељна појава може се умањити стабилизацијом челика додавањем хемијских елемената Ti, Nb или Ta, који имају већи афинитет према угљенику од хрома, или снижавањем садржаја угљеника у челику испод 0,03%, када долази до извесног пада термопостојаности [12,40,65,82,97,141,151].

Нисколегирани хромови челици који садрже до 3% Cr; 0,30% C; 1% Mo и незнатну количину W и V намењени су за радне температуре до 600°C, и практично су неограничено постојани без опасности од разарања. *Средњелегирани хромови челици* са 5-10% Cr, до 0,30% C; 0,5-1% Mo, а понекад W и V имају добру отпорност према угљоводоничним гасовима и сумпорводонику на температурама вишим од 600°C. *Високолегирани хромови челици* (термопостојани феритни челици) са више од 12% Cr, до 0,20% C и додацима Mo, W, V, понекад Ti и Nb примењују се у агресивној гасној средини која садржи сумпор на температурама чак и до 1200°C.

4.3.2.6 Хром – никлове легуре

Хром–никлови челици имају добра својства термопостојаности и отпорности према хемијској корозији, аустенитне су структуре и немагнетични. Корозионоотпорни челици углавном се употребљавају при изради и репаратури елемената од којих се захтева не само корозиона отпорност већ и добра жилавост.

Додатни материјали од аустенитних челика израђују се углавном од Cr-Ni-Mn челика, као и од Cr-Ni и Cr-Mn-N челика. Њихов хемијски састав је најмање 16% Cr и мање од 0,15% C, док садржај Mn и Ni мора да буде довољан да се задржи аустенитна структура у *криогеној области* до 760°C, и даље до тачке топљења. Легуре Cr-Mn-N називају се *азотом ојачане легуре*, чији је напон течења после термичке обраде жарења, 50% виши него код легура без азота. Хром-никлове легуре посебно су отпорне према растворима соли, органским и неорганским киселинама.

Из групе аустенитних челика отпорних према корозији најпознатији су Cr–Ni челици који су истовремено отпорни према киселинама и термопостојани су, а могу бити *нестабелизовани* и *стабилизовани* са Ta, Ti или Nb. Основни представник ове групе је додатни материјал са 18% Cr и 8% Ni, који даје изузетно жилаве наваре аустенитне структуре. За рад у агресивним срединама

постоје и друге врсте додатних материјала, са већим или мањим садржајем Cr, Ni и других легирајућих елемената. Врхунски челик из ове групе је легура са 25% Cr, 20% Ni и 2% Si које су термостојане до око 900°C, али је неопоран у агресивној средини која садржи сумпор [40,82].

Потребно је рећи, да код хром-никлових челика постоји опасност од повећања кртости у температурској области 500-450°C, услед појаве σ -фазе (интерментално крто једињење са 78% Fe и 22% Cr), која се кристалише при константној температури и при nižем просечном садржају хрома него у горе поменутом. Да би се ово избегло неопходно је користити стабилизоване додатне материјале чиме се смањује могућност појаве међукристалне корозије, али стабилизатор не сме бити титан, јер је подложен оксидацији.

4.3.2.в Хром – манганове легуре

Хром манганове легуре за наваривање садрже око 15% Mn; 0,1% C и неколико десетих делова процента азота. Структура навара ове легуре може бити претежно аустенитна или феритна. Овде, Mn растворен у фериту доприноси повећању пластичности, јачине и отпорности према појави врућих прелина. Азот, слично угљенику, повећава тврдоћу и јачину ових легура, и додат у малим количинама не умањује њихову отпорност према корозији. Манган и азот делимично или у потпуности замењују аустенитотворно дејство никла. Да би имале потребну отпорност према хемијској корозији ове легуре морају да садрже више од 12% Cr (обично око 15% Cr) у чврстом раствору, док у термостојаним легурама његов садржај најчешће не прелази 10%. У поређењу са Cr-Ni-N челицима, аустенитни Cr-Mn-N челици имају виши напон течења и већу јачину, бољу заварљивост, а лошију отпорност према корозији [40,84].

4.3.2.г Кобалтове легуре

Кобалтове легуре састоје се од Co, Cr и W, и додатних елемената C, Mn и Si, а садржај Fe не прелази 5%. Легурама кобалта за наваривање додаје се и бор, а понекад одређену количину Co замењује Ni. Одликују се високом отпорношћу према високотемпературској корозији као и структурном стабилношћу на температурама до око 700°C. Повећање тврдоће и јачине ових легура настаје услед излучивања карбида хрома чија је тврдоћа 1400–1600 HV. Због тога ове легуре поред отпорности према корозији имају и добру отпорност на абразивно и ерозионо хабање.

Пошто су скупе и тешко их је набавити на тржишту оне се као додатни материјал за наваривање употребљавају само у специјалним случајевима. Навари се полажу искључиво једносмерном струјом обрнутог поларитета јачине до 40 А по једном милиметру пречника језгра електроде [12,40,82].

4.3.2.д Титанове легуре

Захваљујући пасивизирајућем дејству титан-диоксида нанети навари од ових легура имају веома добру отпорност према хемијској и електрохемијској корозији, органским киселинама, хлорисаним органским једињењима и алкалним растворима, на собној и повишеним температурама. Отпорност легура титана према корозији у морској води и агресивној атмосфери боља је од отпорности корозионо отпорних челика. Са порастом температуре преко 300°C, чист титан почиње да губи структурну стабилност, па се за више радне температуре употребљавају његове легуре, најчешће са Al и додацима Cr, Mn, V, Sn, Zr, Fe и Mo.

Применом термичке обраде легура титана (нпр. Ti-6Al-4V) постиже се структурна стабилност и побољшање корисних својстава. Највећа структурна стабилност постиже се жарењем што доприноси повећању термостојаности. При каљењу титанових легура битније се не повећава тврдоћа, зато што титанов мартензит првенствено утиче на уситњавање структуре. Овим се постиже оптимална комбинација пластичности и јачине, као и пораст отпорности према појави кртог лома.

Супротно од челика, при отпуштању закаљивих титанових легура, долази до знатног повећања тврдоће и пада пластичности, али се повећава и отпорност према хабању. Отпорност

титанових легура према хабању повећава се и нитрирањем при температури 850–950°C у атмосфери азота у временском интервалу 30–60 h.

Додатни материјали од легура титана имају велику примену при заваривању, наваривању или лемљењу елемената техничких система када је примарни захтев висок однос јачине према маси, велика отпорност према корозији и средња отпорност према процесима хабања. Заваривање, наваривање и лемљење искључиво се изводе у заштитној атмосфери инертних гасова (Аг или Не), јер при извођењу ових радова у присуству ваздуха титан се оксидише што повећава кртост његових легура. Легуре титана најчешће се примењују при изради или репаратури елемената који раде у изузетно агресивним корозионим срединама.

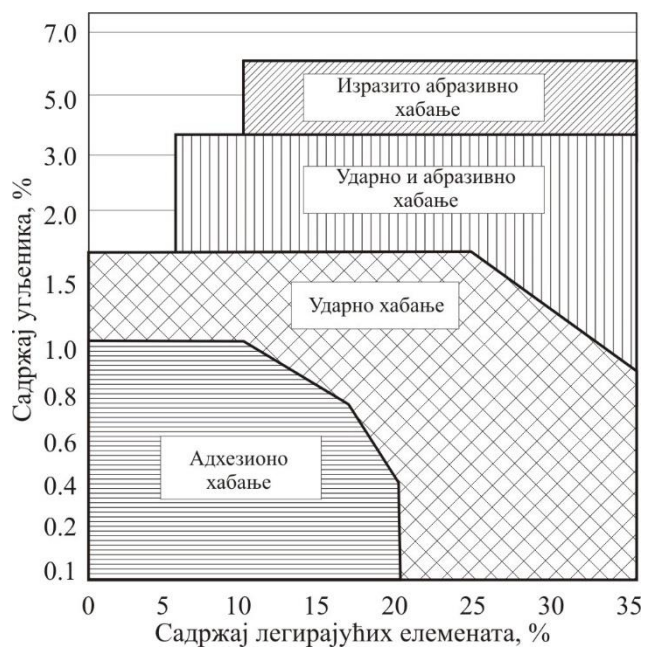
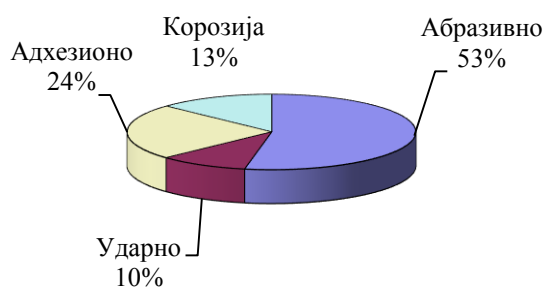
4.3.2.e Никлове легуре

Никал је један од најотпорнијих метала на дејство атмосферске корозије, морске воде, водене растворе алкалних и органских соли, растворе сумпорне киселине у хладној води, док је неотпоран на растворе азотне киселине. Никлове легуре, где је никал легиран са Cu, Cr, Fe и Mn, имају високу отпорност према корозији. Легура *константан* (60% Cu и 40% Ni) има добру термостојаност на повишеним температурама, док легуре Ni-Cr и Ni-Mn имају добру термостојаност и на високим температурама. Од чистог Ni или легура Ni-Fe и Ni-Cr израђују се додатни материјали за заваривање и наваривање сивог ливеног гвожђа.

Навари од додатних материјала на бази Ni наносе се како електролучном тако и гасним пламеном. Бољи резултати постижу се применом електролучних метода, јер угљеник из окси-ацетиленског пламена прелази у растоп, што повећава кртост. Легура никла 67% Ni; 30% Cu; 1,5% Fe и 1,5% Mn назива се *монел метал*, и одликује се високом отпорношћу према корозији чак и у присуству киселина, јаким база и агресивних гасова, па се користи за израду или репаратуру елемената који раде у изузетно агресивним срединама. Легура никла са 12-16% Cr, 6-8% Fe и остало Ni назива се *инконел*, и спада у изузетно отпорне материјале према корозији, а бољи су од ове само племенити метали Ag, Au и метали платинске групе Pt, Ir, Rh.

Термостојаност ових челика је до 600°C, а за више температуре ово својство им се знатно повећава додавањем легирајућих елемената Mo, W и Si. Ако се овим челицима дода више Mo повећава се њихова отпорност према сумпорној киселини (H₂SO₄), а ако су легирани са више Si повећава се њихова термостојаност. Познато је да поред нерђајућих челика, легуре Co, Ti и Ni, добру отпорност према корозији имају и неки други метали и њихове легуре (Cu, Zn, Al, Sn, Pb, Mg), па се и они често користе за nanoшење металних превлака различитим методама метализације и наваривања.

Највећи број елемената техничких система повлачи се из експлоатације због похабаности њихових радних површина. На основу литературних података, од укупног броја оштећених елемената услед процеса хабања око 53% узрочник је абразивно хабање, око 24% узрочник је адхезионо хабање, око 10% узрочници су остале тзв. ударне врсте хабања, и око 13% узрочник је корозионо хабање (сл. 4.3а). Зато је корисно, илустрације ради, дати оријентационе дијаграме зависности између потребног садржаја угљеника и легирајућих елемената у легурама за наваривање (сл. 4.3б), да би се постигла потребна отпорност према поменутиим врстама хабања и корозије.



а)

б)

Слика 4.3 Учешће појединих врста хабања у укупном процесу хабања (а), избор легура за наваривање (б) [97,141]

5. ТОПЛОТНИ БИЛАНС ПРИ НАВАРИВАЊУ

УВОД

При наваривању различитих врста челика, посебно челика склоних ка закаљивању, није довољно одабрати технолошке параметре наваривања који обезбеђују формирање квалитетног навара, већ се мора узети у обзир и негативан утицај уноса топлоте. Својства закаљивих челика у зони под утицајем топлоте у великој мери зависе од температурског циклуса који утиче на пораст тврдоће, промене физичко-хемијских својстава, појаву неповољних структура, појаву заосталих напона и деформација, склоност према појави прелина и др. Отуда произлази да је од изузетног значаја познавање *температурског поља*, односно преношења топлоте при наваривању у одређеним временским интервалима. Пренос и расподела топлоте при наваривању представљају веома сложене процесе који се могу приближно проценити помоћу основних закона физике и термодинамике [33,50,51,87,90,93,97].

Уопштено се може рећи да се топлота преноси на три начина: *провођењем* (кондукцијом), *струјањем* (конвекцијом) и *зрачењем* (радијацијом). При наваривању топлота се преноси на сва три начина, с тим што први начин провођења топлоте представља корисно употребљену топлоту, а друга два начина представљају топлотне губитке [129,142,160].

Провођење топлоте у чврстим кристалним телима остварују атоми који су распоређени у рогљевима кристалне решетке. Они осцилују око својих равнотежних положаја и на тај начин преносе топлотну енергију коју су примили од неког извора топлоте. Атоми кристалних решетки појединих чврстих тела осцилују различитим амплитудама па отуда и различите вредности њихових коефицијената топлотне проводљивости (термичке проводности).

Основни задатак је да се при наваривању ови процеси преношења топлоте добро проуче и омогући њихово праћење како би се на њих могло утицати, ради добијања оптималних својстава навариваних делова. То захтева познавање промена температуре у појединим карактеристичним тачкама око навара и познавање утицаја тих промена код материјала у току процеса наваривања. Правилно одређивање карактеристичних величина температурског циклуса, и на основу њих правилно бирање параметара наваривања, омогућавају да се добију оптимална својства наварених слојева и на најмању могућу меру сведу непожељне промене у материјалу у зони утицаја топлоте [170,177,184].

5.1 ДИФЕРЕНЦИЈАЛНА ЈЕДНАЧИНА ПРОВОЂЕЊА ТОПЛОТЕ

Преношење топлоте при наваривању се у највећем делу одвија провођењем (кондукцијом), док се преношење струјањем (конвекцијом) и зрачењем (радијацијом) може занемарити. При наваривању је неопходно познавати температурско поље које представља скуп температура у свим тачкама одређене запремине метала у датом тренутку посматрања. У било којој посматраној тачки датог простора температура је одређена координатама те тачке и временом, тако да је за Декартов правоугли координатни систем дата изразом:

$$T = T(x, y, z, t). \quad (5.1)$$

Промена температуре са временом у датој тачки назива се *температурским циклусом* који је дат изразом:

$$T = T(x_0, y_0, z_0, t). \quad (5.2)$$

У литератури [32,33,36,50] постоје бројне методе за решавање проблема расподеле температура у појединим тачкама неког температурског поља, али све оне у основи полазе од основног израза за температурско поље у случају познатог запреминског извора топлоте који је развио Фурије:

$$W_{(x,y,z)} = c \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T). \quad (5.3)$$

Једначина (5.3) представља основни израз за температурско поље, а служи за одређивање температура и температурских циклуса при различитим поступцима заваривања или наваривања металних материјала. Оног тренутка када дође до прекида довођења топлоте или се постигне квазистационарно стање члан са леве стране знака једнакости постаје једнак нули, настаје хлађење материјала, а температурско поље описују чланови са десне стране знака једнакости.

При практичним решавањима проблема температурског поља неопходно је извести одређена упрошћења (апроксимације). Основна упрошћења су да термичка проводност материјала не зависи од правца провођења топлотне нити од температуре. Узимајући у обзир ова ограничења добија се израз за температурско поље:

$$W_{(x,y,z)} = c \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \lambda \cdot \nabla^2 T. \quad (5.4)$$

После сређивања једначине (5.4) добијају се изрази:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{W_{(x,y,z)}}{c \cdot \rho}, \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{W_{(x,y,z)}}{c \cdot \rho}, \quad (5.6)$$

где је ∇ - Лапласов оператор у случају Декартовог правоуглог координатног система, $a = \lambda/c\rho$ - коефицијент температурске проводности или температурска дифузија, T - температура, t - време, c - специфична топлота, λ - термичка проводност, ρ - запреминска маса и W - издашност топлотног извора.

При одређивању температурских поља при наваривању диференцијална једначина (5.6) се трансформише и прилагођава одређеним условима који се односе на различите дебљине материјала (танке или дебеле плоче), различите врсте извора топлоте (издашност извора) и начине одавања топлоте (покретан или непокретан извор) [22,86,130].

5.2 МЕТОДЕ ЗА РЕШАВАЊЕ ДИФЕРЕНЦИЈАЛНЕ ЈЕДНАЧИНЕ ПРОВОЂЕЊА ТОПЛОТЕ

Диференцијалну једначину провођења топлоте кроз чврста тела, коју је развио Фурије (5.3), можемо решити на различите начине [87,166,170,184]: *аналитичким методама, аналогним методама, нумеричким методама и експерименталним методама.*

Код сложених облика навариваних површина, проблем одређивања температурског поља најлакше се решава применом нумеричких метода, јер се тако могу узети у обзир унутрашњи извори топлоте, зависност термофизичких својстава навариваног материјала од температуре и положаја у односу на извор топлоте, нелинеарност граничних услова температурног поља итд. Применом различитих експерименталних метода најпоузданије се одређује температурско поље при наваривању јер се долази до стварних температура у појединим посматраним тачкама, али је потребан већи број експеримената и дуже време да би се дошло до резултата. Експерименталне методе због поузданости добијених резултата при одређивању температурског поља служе углавном за проверу резултата добијених неком другом методом.

5.2.1 АНАЛИТИЧКЕ МЕТОДЕ

Аналитичким методама могу се решити само једноставнији проблеми провођења топлоте при наваривању. Ове методе се примењују при решавању проблема провођења топлоте код елемената правилних и једноставних геометријских облика као што су: полубесконачне или бесконачне дебеле и танке плоче, цилиндри бесконачних или полубесконачних дужина, и други правилни геометријски облици (коцка, квадар, лопта и др.). Овакви облици имају једноставне граничне услове, па се може решити парцијална диференцијална једначина провођења *топлоте* (5.3), док је код сложенијих облика то неупоредиво теже.

Аналитичке методе одређивања температурског поља при наваривању примењују се уз нужна упрошћења проблема увођењем одређених претпоставки. Те претпоставке су: да се топлота преноси према Фуријеовом закону, снага топлотног извора је константна за време наваривања, топлотни извор је непокретан или се креће константном брзином: гранична површина чврстог тела се сматра адијабатском ($q_A = 0, \partial T / \partial n = 0$), што значи да је топлотни флуks на граничним површинама једнак нули, односно да температура на овим површинама има константну вредност; да се фазне промене у металима одвијају без губитака топлоте, да је познат распоред температура у посматраној области у тренутку почетка наваривања $t = 0$ и др.

На основу претходних претпоставки неки аутори [109,125] су развили методе за аналитички прорачун расподеле температура, односно различите семе одређивања температурског поља за случајеве непокретног извора топлоте (тренутно стање) и покретног извора топлоте (квазистационарно стање $t = \text{const.}$).

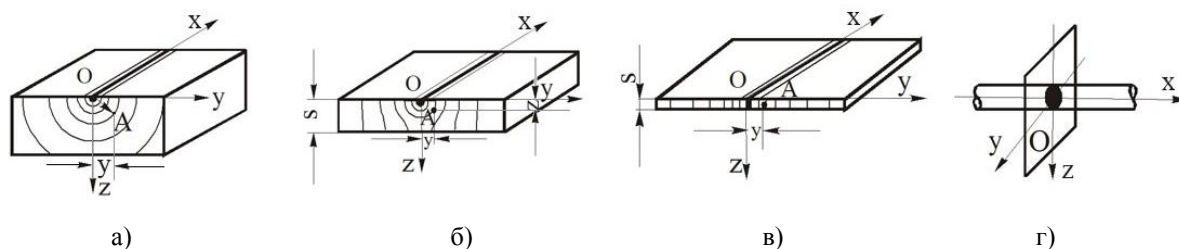
5.2.1.а Температурско поље за случај непокретног извора топлоте

Расподела температура, односно температурско поље у случају непокретног извора топлоте проучава се за карактеристичне случајеве: *полубесконечно масивно тело* (дебела плоча), *танко полубесконечно тело* (танка плоча) и *полубесконечно тело са малим попречним пресеком и неограниченом дужином* (штап).

Температурско поље у случају полубесконечног масивног тела (дебела плоча), при дејству тачкастог извора топлоте може се описати изотермама полупречника R (сл. 5.1а). Температурско поље, односно расподела температура описује се изразом:

$$T_{(R,t)} = \frac{2q}{c \cdot \rho (4\pi \cdot a \cdot t)^{3/2}} \cdot e^{\left(\frac{R^2}{4a \cdot t}\right)} \quad (5.7)$$

где је $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ - растојање у простору посматране тачке радијус вектора (x, y, z) од центра тачкастог извора топлоте, $q = U \cdot I \cdot \eta$ - ефективна топлотна моћ електричног лука (снага лука).



Слика 5.1 Основни облици схема провођења топлоте у случају непокретног извора топлоте: а) масивно тело, б) дебела плоча, в) танка плоча, г) штап [97,141,166]

Температурско поље када је у питању тело мале дебљине (танка плоча), чија је димензија у правцу дебљина мала, а у остала два правца неограничена има посебан облик. Извор топлоте се такође сматра концентрисаним (тачкастим) док у случају тела малих дебљина (сл. 5.1в) изотерме су представљене правим линијама паралелним z оси. У том случају температурско поље је у облику цилиндара паралелних z оси. Расподела температуре, односно температурско поље дато је изразом:

$$T_{(r,t)} = \frac{q}{4\pi \cdot a \cdot t \cdot c \cdot \rho \cdot s} \cdot e^{\left(\frac{r^2}{4a \cdot t} - b_2 \cdot t\right)}, \quad (5.8)$$

где је $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ - растојање у равни одговарајуће тачке $A(x, y)$, $b_2 = 2\alpha_k / c \cdot \rho \cdot s$ - коефицијент размене топлоте на граничним површинама танке плоче, α_k - коефицијент конвекције и s - дебљина плоче.

Температурско поље за случај тела у облику штапа, чији је пречник занемарљиво мали у односу на неограничену дужину (сл. 5.1г). У овом случају се сматра да је топлота сконцентрисана у малој запремини у самом координатном почетку. Температурско поље, односно расподела температуре се описује изразом:

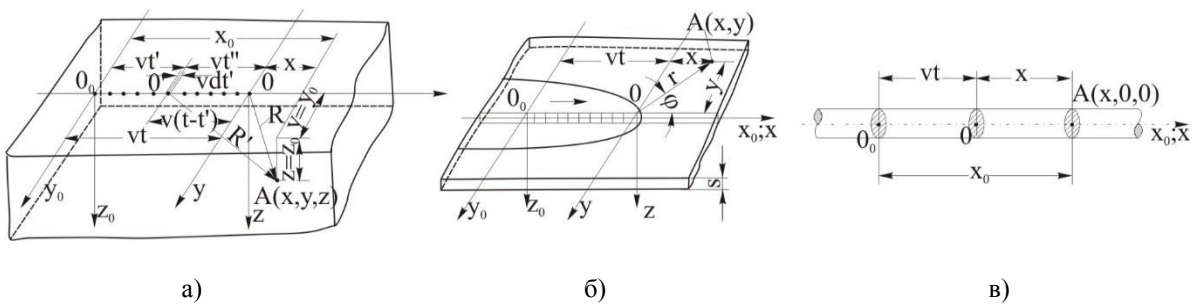
$$T_{(x,t)} = \frac{q}{c \cdot \rho \cdot A \cdot (4\pi \cdot a \cdot t)^{1/2}} e^{\left(-\frac{x^2}{4a \cdot t} - b_1 \cdot t\right)}, \quad (5.9)$$

где је $b_1 = \alpha_k \cdot O / c \cdot A$ - коефицијент размене топлоте, A - површина попречног пресека штапа, O - обим штапа и α_k - коефицијент конвекције.

Поред приказаних схема расподеле топлоте, често се анализира и схема расподеле топлоте код полубесконачних плоча средње дебљине (сл. 5.1б), која представља међурешења између схема (сл. 5.1а и сл. 5.1в).

5.2.1.6 Температурско поље за случај покретног извора топлоте

Ово је случај када се уместо непокретног концентрисаног извора топлоте посматра покретан концентрисани извор топлоте који се креће константном брзином v (сл. 5.2).



Слика 5.2 Основни облици схема провођења топлоте у случају покретног извора топлоте а) дебела плоча, б) танка плоча, в) штап [97,141,166]

У случају покретног извора топлоте, размотриће се распоред температура, односно температурско поље код полубесконачног масивног тела (дебеле плоче) и полубесконачног танког тела (танке плоче).

Температурско поље код полубесконачног масивног тела (сл. 5.2а) за концентрисан (тачкасти) извор топлоте који се креће константном брзином по површини израчунава се помоћу израза:

$$T_{(R,x)} = \frac{q}{2\pi \cdot \lambda \cdot R} e^{\left(-\frac{v \cdot x}{2a} - \frac{v \cdot R}{2a}\right)}, \quad (5.10)$$

где је $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ - радијус вектор у простору.

У случају концентрисаног извора топлоте који се креће великом брзином дуж координате $x = v \cdot t$ израз (5.10), трансформише се у следећи облик:

$$T_{(y,z,t)} = \frac{q}{2\pi \cdot \lambda \cdot v \cdot t} e^{\left(-\frac{r^2}{4a \cdot t}\right)}, \quad (5.11)$$

где је $r = (y^2 + z^2)^{1/2}$ - радијус вектор у равни.

Температурско поље код танке полубесконачне плоче (сл. 5.2б) када се покретни извор топлоте може сматрати линијским, израчунава се помоћу израза:

$$T_{(y,t)} = \frac{q}{v \cdot s \cdot (4\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot t)^{1/2}} e^{\left(\frac{-y^2 - b \cdot t}{4a \cdot t}\right)}, \quad (5.12)$$

где је $r^2 = (x^2 + y^2)^{1/2}$ - радијус вектор, $b = 2\alpha/c \cdot \rho \cdot s$ - константа помоћу које се дефинише одвођење топлоте у околину (конвекцијом и зрачењем $\alpha = (\alpha_k + \alpha_z)$).

У случају концентрисаног извора топлоте који се креће великом брзином расподела температура у различитим тачкама плоче може израчунати помоћу израза:

$$T_{(y,t)} = \frac{q}{v \cdot s \cdot (4\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot t)^{1/2}} e^{\left(\frac{-y^2}{4a \cdot t}\right)}. \quad (5.13)$$

У литератури се могу наћи и анализе расподеле температура односно температурско поље при наваривању различитих елемената правилних геометријских облика и попречних пресека, на пример код штапа (сл. 5.2б), расподела топлоте израчунава се преко модификованих претходних израза (5.10), (5.11), (5.12) и (5.13), у којима су уведени и различити коефицијенти повећаног одвођења топлоте у околину.

Прорачунима и експерименталним методама [36,43,128,151,166] утврђено је да се температурски циклуси у наредним тачкама зоне под утицајем покретног извора топлоте понављају после одређених временских интервала, а исто тако и температурска поља. Детаљном анализом претходних израза може се доказати да облик температурског поља зависи од врсте, топлотне моћи и брзине топлотног извора, као и од дебљине навариваног елемента.

5.2.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ

Експерименталне методе се примењују како би се измериле температуре у појединим областима или појединим карактеристичним тачкама неког тела у току процеса наваривања. За одређивање расподеле температура у ZUT-у користе се мерни уређаји (термометри) од којих су неки прилагођени за мерење повишених температура, а неки за мерење високих температура.

Према принципу рада термометри за мерење температура при наваривању могу бити: *гасни, електроотпорни, биметални, експанзиони и оптичко-радијациони*. *Оптичко-радијациони* уређаји се називају *пирометрима* [3,60,97], најсавременији су, а типичан пример је *оптичка камера*. *Оптичка камера* се примењује за одређивање температуре на бази инфрацрвеног зрачења које емитује свако тело а осећа се као топлота.

Неки термометри служе за директно мерење температура у појединим тачкама, док други служе за индиректно мерење температура, а то су оптички термометри, који одређују зоне једнаких температура на основу зрачења топлоте. Најчешће су у примени биметални термометри (термопарови) који раде на принципу различитих проводности топлоте појединих материјала.

Због низа предности, највише се употребљавају термопарови, чија је најважнија предност што се везивањем за писач, вишеканални осетљиви осцилоскоп или рачунар, могу регистровати и меморисати промене температуре у току посматраног интервала времена. Скуп измерених температура појединих тачака у посматраној области одређује температурско поље.

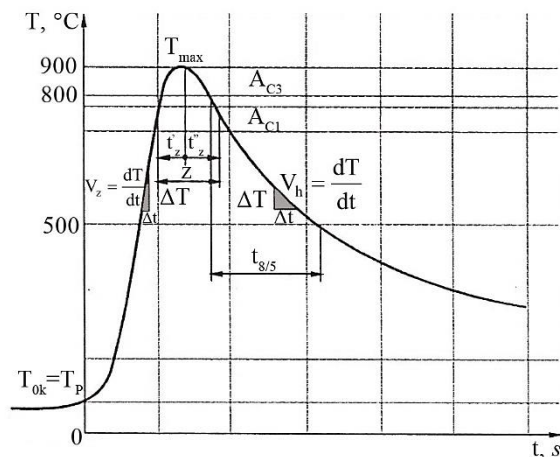
Експериментално одређивање температурског поља при наваривању добија се мерењем температура у карактеристичним тачкама испод навара у ZUT-у. Температурски циклус при наваривању најчешће се одређује истовременим мерењем температура на истим растојањима испод навара снимањем температурског циклуса. Различитим експерименталним методама, варирањем појединих значајних фактора, долази се до поузданих резултата промене температура што олакшава проучавање процеса наваривања различитих материјала. Најчешће се варирају дебљина и врста основног материјала, врста и дебљина навареног слоја додатих материјала, број наварених слојева, поступак наваривања, параметри наваривања и контролна мерна места [70,73].

5.3 ПРОРАЧУН КАРАКТЕРИСТИЧНИХ ВЕЛИЧИНА ТЕМПЕРАТУРСКОГ ЦИКЛУСА ПРИ НАВАРИВАЊУ

Мерењем температуре у току наваривања, било помоћу термопарова или на неки други начин, може се добити температурски циклус било које тачке ZUT-а. Основни елементи температурског циклуса (сл. 5.3) било које тачке ZUT-а су: брзина загревања, максимална достигнута температура, време задржавања у одређеном опсегу температура и брзина хлађења.

Структура метала у ZUT-у зависи од брзине загревања, достигнуте максималне температуре, времена задржавања изнад температуре A_{C3} и брзине хлађења. При извођењу наваривања брзине загревања су велике као на пример, код електролучног наваривања у границама 50-400°C/s, док је код ласерског наваривања чак око 1000°C/s, што доводи до тога да се температура преображаја ферита знатно подиже. Због тога да челик може имати феритно-аустенитну структуру и на температурама изнад 1000°C, а такве структурне промене зову се неравнотежне. Максимална достигнута температура и време задржавања изнад A_{C3} односно ($A_{C3}+100^\circ\text{C}$) температуре, такође утиче на крајњу структуру ZUT-а.

Највећи утицај на структуру навариваних челика, поред максималне температуре, има брзина хлађења после наваривања, нарочито при температури најмање стабилности аустенита која се за већину челика креће у температурској области 800-500°C, а код челика повишене јачине 800-300°C. Критична брзина хлађења представља најмању брзину хлађења при којој долази до преображаја аустенита у мартензит (мартензитни преображај аустенита), и најмања је за високоугљеничне челике.



Слика 5.3 Основни елементи температурског циклуса [63,97]

Може се рећи, да ће се при истом температурском циклусу, зависно од хемијског састава челика, услова претходне термичке или механичке обраде, брзине загревања и хлађења, максималне температуре и др., могу добити различите структуре. Стога је неопходно познавање ових величина при наваривању како би се добиле тражене структуре наварених слојева и захтевани квалитет навара.

5.3.1 МАКСИМАЛНА ТЕМПЕРАТУРА И ВРЕМЕ ЗАГРЕВАЊА

Да би се аналитички одредила *максимална температура* у појединим тачкама ZUT-а полази се од аналитичког израза за расподелу температура око навара у току наваривања.

За полубесконачно масивно тело (изразито дебелу плочу) полази се од израза:

$$T_{(y,z,t)} = \frac{q_l}{2\pi \cdot \lambda \cdot t} \cdot e^{-\frac{r^2}{4at}}, \quad (5.14)$$

и поставља услов $\partial T / \partial t = 0$, да би се одредила екстремна вредност (максимум) функције $T(y,z,t)$. Из овог услова се може одредити време потребно за постизање максималне температуре у посматраној тачки ZUT-а:

$$t_{\max} = \frac{r^2}{4 \cdot a}. \quad (5.15)$$

Даље се може одредити и максимална температура:

$$T_{\max(r,t)} = \frac{0,234 \cdot q_l}{c \cdot \rho \cdot r^2}, \quad (5.16)$$

где је $q_l = U \cdot I \cdot \eta / v_z$ - погонска енергија наваривања за линијски извор унос (топлоте) при чему је U - напон лука, I - јачина струје, η - коефицијент искоришћења, v_z - брзина наваривања и $r = (y^2 + z^2)^{1/2}$ - радијус удаљења посматране тачке A од осе навара Ox (сл. 5.1), дуж које се равномерно креће топлотни извор.

За танко полубесконачно тело (танку плочу) максимална температура одређује се из израза:

$$T_{\max(y)} = \frac{0,242 \cdot q_l}{c \cdot \rho \cdot w \cdot y} \left(1 - \frac{b \cdot y^2}{2 \cdot a} \right), \quad (5.17)$$

где је s - дебљина плоче, y - растојање од осе навара Ox (сл. 5.1). Члан у загради узима у обзир утицај одавања (губитка) топлоте конвекцијом и зрачењем у околину. Ако се узму у обзир и губици услед одавања топлоте околној средини, користе се модификовани изрази који дају дужа времена загревања (t_{max}) да би се постигла максимална температура (T_{max}).

5.3.2 ВРЕМЕ ЗАДРЖАВАЊА ИЗНАД A_{C3} ТЕМПЕРАТУРЕ

Време задржавања изнад A_{C3} температуре може се израчунати помоћу одговарајућих израза.

За масивно тело време задржавања одређује се помоћу израза:

$$t_z = f_3 \frac{q}{\lambda \cdot (T_{\max} - T_{0k})}. \quad (5.18)$$

За танку плочу време задржавања одређује се помоћу израза:

$$t_z = f_2 \frac{q_l}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot s^2 \cdot (T_{\max} - T_{0k})^2}. \quad (5.19)$$

Коефицијенти f_2 и f_3 одређују се помоћу номограма које је дао Рикалин [166] у зависности од величине θ дате изразом:

$$\theta = \frac{T - T_{0k}}{T_{\max} - T_{0k}}, \quad (5.20)$$

где је T - тренутна температура у посматраној тачки, T_{\max} - максимална температура и T_{0k} - температура околине.

5.3.3 БРЗИНА ХЛАЂЕЊА

Брзина хлађења се може израчунати помоћу одређених израза у зависности од масе елемента и термичке проводности материјала.

За *полубесконечно масивно тело (масивну плочу)* брзина хлађења се може израчунати из израза:

$$v_h = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \frac{(T_k - T_{0k})^2}{q_l \cdot N_3}. \quad (5.21)$$

За *полубесконечно танко тело (танку плочу)* брзина хлађења се може израчунати из израза:

$$v_h = 2\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot s^2 \frac{(T_k - T_{0k})^2}{q_l^2 \cdot N_2}, \quad (5.22)$$

где је $T = T_k$ - температура најмање стабилности аустенита (критична температура), T_{0k} - почетна температура (температура околине) и N_2 , N_3 фактори облика споја [63,78,97,141].

5.3.4 ВРЕМЕ ХЛАЂЕЊА $t_{8/5}$

Брзина хлађења при наваривању није константна величина већ она опада са смањењем максималне температуре. Параметар који најбоље карактерише услове хлађења ZUT-а, код већине челика је *време хлађења* од 800-500°C, означено као $t_{8/5}$ и гранична дебљина материјала означена са s_{gr} . Структурне промене, а тиме и својства навариваног челика, у појединим зонама ZUT-а у највећој мери зависе од постигнуте максималне температуре (T_{max}) и времена хлађења ($t_{8/5}$). Са порастом постигнуте максималне температуре повећава се степен прегревања аустенита, што доводи до раста аустенитних зрна и количине растворених укључака у аустениту, снижава се M_s температура на којој почиње бездифузиона (мартензитна) промена аустенита, чиме се одлаже промена аустенита у α -ферит. Растворени укључци имају сличан ефекат као и потхлађивање аустенита, па слој ZUT-а у непосредној близини навара при загревању достиже највишу температуру и има најмању критичну брзину хлађења, тј. најлакше се закаљује. С тога ове зоне достижу највећу тврдоћу и кртост, а најмању жилавост, па су највише склоне ка *хладним прслинама*. Зато се најнеповољнија својства ZUT-а добијају испод навара, а критичне карактеристике материјала проверавају баш у овој области. То је и разлог што је најбитније да се температурски циклус практично и експериментално одреди управо у тачки испод навара [97,109].

Време хлађења најтачније се може одредити експерименталним методама са криве температурског циклуса, али се може са довољном тачношћу добити на основу прорачуна појединих делова температурског циклуса. У литератури се могу наћи и емпиријски изрази за прорачун времена хлађења $t_{8/5}$, углавном на основу: *граничне дебљине материјала* $t_{8/5} = f(s_{gr})$ и *формуле јапанских аутора* [50,78,97].

5.3.4.a Прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ на основу граничне дебљине материјала s_{gr}

За *дебеле материјале* ($s > s_{gr}$), време хлађења се израчунава помоћу формуле:

$$t_{8/5} = \frac{q_l \cdot N_3}{2\pi \cdot \lambda} \left(\frac{1}{500 - T_{0k}} - \frac{1}{800 - T_{0k}} \right). \quad (5.23)$$

За *танке материјале* ($s \leq s_{gr}$), време хлађења се израчунава помоћу формуле:

$$t_{8/5} = \frac{q_l^2 \cdot N_2}{4\pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot s^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_{0k}} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_{0k}} \right)^2 \right]. \quad (5.24)$$

У претходним једначинама (5.23) и (5.24), N_2 и N_3 су фактори облика споја, q_l - је погонска енергија (унос топлоте), а T_{ok} је температура околине, ($T_{ok} = 20^\circ\text{C}$ када нема предгревања и $T_{ok} = T_p$ када се изводи предгревање).

Термофизичке константе у горњим изразима зависе од врсте материјала и мењају се са променом температуре. Са довољном тачношћу могу се усвојити за средњу вредност температурског интервала $800\text{-}500^\circ\text{C}$ тј. 650°C .

Фактори облика споја служе за корекцију при израчунавању времена хлађења $t_{8/5}$, јер брзина хлађења завареног (навареног) споја зависи од дебљине навариваних елемената и смерова одвођења топлоте (врсте споја). При наваривању се усваја да су ови фактори, слични као код сучеоног споја при заваривању, једнаки и износе $N_2 = N_3 = 1$.

Гранична дебљина или прелазна дебљина између танких и дебелих плоча условљена је начином провођења топлоте од два у три смера. Двосмерно провођење топлоте односи се на танке плоче где се усваја да је температура константна по целој дебљини материјала, док се код дебелих плоча температура мења и по дебљини материјала ($\partial T/\partial z \neq 0$).

Гранична дебљина за одређени материјал се израчунава помоћу израза:

$$s_{gr} = \sqrt{\frac{q_l \cdot N_3}{2 \cdot \rho \cdot c} \left(\frac{1}{500 - T_{ok}} + \frac{1}{800 - T_{ok}} \right)}, \quad (5.25)$$

одакле се види да, за дати основни материјал, гранична дебљина зависи од: *погонске енергије, типа споја и почетне температуре* навариваних делова

5.3.4.6 Прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ на основу формуле јапанских аутора

Прорачун времена хлађења према јапанским ауторима изводи се по формули

$$t_{8/5} = \frac{k \cdot q_l^n}{\beta (T_{sr} - T_{ok})^2 \left[1 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left(\frac{s - s_0}{\alpha} \right) \right]}, \quad (5.26)$$

где је q_l - погонска енергија, T_{ok} - температура околине, $T_{sr} = 650^\circ\text{C}$ - средња температура у области $800\text{-}500^\circ\text{C}$ и k, n, α, β, s_0 - параметри који зависе од начина наваривања и врсте споја [63,78,166].

Остали подаци и параметри потребни за прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ могу се наћи у литератури [63,78]. Помоћу времена хлађења $t_{8/5}$ може се *одредити структура* најкритичније области навареног споја ZUT-а. Уношењем израчунатог времена $t_{8/5}$ у КНЗ-дијаграм навариваног материјала може се предвидети структура испод навара, или што је важније, могу се израчунати параметри наваривања (унос топлоте) да се добије захтевана структура ZUT-а. Наиме, ако се из КНЗ-дијаграма за дати челик усвоји време хлађења $t_{8/5}$, које даје повољну структуру ZUT-а и унесе у израз 5.26, може се израчунати погонска енергија q_l (унос топлоте) као једина непозната величина.

6. ФАЗНЕ ПРОМЕНЕ У ЧВРСТОМ СТАЊУ ПРИ НАВАРИВАЊУ ЧЕЛИКА

УВОД

Теорија фазних промена заснована на сазнањима из физике, физичке хемије и кристалографије представља једну од основних области модерне науке о металним материјалима, [1,16,17,29,30]. Овакав приступ проучавању фазних промена код метала новијег је датума, а развој ове научне дисциплине био је веома брз. Бави се описом реакција у металима и њиховим легурама под утицајем температурских циклуса, механизмима и погонским силама које омогућавају настанак и одвијање ових реакција. Развој експерименталних метода омогућио је да се поред описа реакција у чврстом стању може дати и њихов квантитативан приказ. У пракси се највише користе легуре које су вишекомпонентног састава. Чак и технички чисти метали стандардног квалитета нису једнокомпонентни, јер увек у себи садрже одређену количину примеса (друге метале, неметале и нечистоће). За проучавање металних легура неопходно је упознати се са основним појмовима из неорганске и физичке хемије [34,35,155,160,168] као што су: компоненте, фазе, течан раствор, чврст раствор, интерметалне фазе (карбиди, нитриди, метална једињења–електронске фазе и др.). Компоненте су хемијски елементи који образују легуру (код челика Fe-C, код бронзе Cu-Sn, код месинга Cu-Zn, код силумина Al-Si итд.).

Фазе су хомогени део истог агрегатног стања хетерогеног система, а чврсти раствори су фазе у којима једна компонента задржава своју решетку и она је растварач, док се атоми друге компоненте распоређују у решетку растварача и оне су растворак. У зависности од начина распореда раствора у растварачу разликују се: супституцијски и интерстицијски чврсти раствори. Супституцијски чврсти раствори настају заменом атома растварача атомом раствора у његовој кристалној решетки. Интерстицијски чврсти раствори добијају се размештањем атома раствора у празнине кристалне решетке растварача. На тај начин настају нове фазе другачијих физичко – хемијских својства [31,65,159,169].

6.1 ОСНОВИ ФАЗНИХ ПРОМЕНА МЕТАЛА У ЧВРСТОМ СТАЊУ

Фазне промене које се одвијају при очвршћавању растопа (кристализација) не представљају завршетак промена у металу, већ се оне код већине метала и њихових легура настављају и у току даљег хлађења (прекристализација, рекристализација). То доводи до промена физичко - хемијских својстава легура и даје могућност да се управља овим променама тако да се добију структуре захтеваних својстава. За разлику од кристализације која се увек одвија на високим температурама, па је дифузија олакшана и одвија се великом брзином, фазне промене у чврстом стању дешавају се на повишеним или собним температурама, где је процес дифузије отежан или немогућ. Зато се фазне промене у чврстом стању деле на: *дифузионе* и *бездифузионе* [172,185,197].

Дифузија атома обично се одвија од места више ка местима ниже концентрације атома, али код појединих метала нпр. алуминијума овај процес може бити обрнут, настаје тзв. *инверзна дифузија*. При наваривању или заваривању ова појава доводи до нагомилавања атома угљеника. Кретање атома у сопственој кристалној решетки назива се *самодифузија*.

Бездифузионе промене настају код челика на температурама испод 200°C, при довољно брзом хлађењу, а одвијају се правилним групним премештањем атома *механизмом клизања*, при чему релативно померање атома не прелази међуатомско растојање.

Покретачка сила дифузије је тежња да се успостави *термодинамичка равнотежа*, а процес кристализације и фазних промена доводи до; смањења *слободне енергије система* (слободна ентропија или термодинамички потенцијал); промене *везане енергије* сходно *закону ентропије* [17,32,33,65,88].

После довршених промена настаје равнотежа система, која може бити *стабилна* и *метастабилна*. Равнотежна стања легура далеко се више проучавају него стања чистих метала, због знатно веће примене легура. Код легура се разматрају углавном бинарни системи и приказују се *равнотежним дијаграмима* у којима су ограничене области егзистенције појединих фаза у зависности од температуре и процентуалног удела компонената [17,65].

Фазне промене у чврстом стању код метала настају када се створе одређени термодинамички услови, слично као при кристализацији, али уз већи утицај околне средине, пре свега велики отпор према деформисању околног материјала. Зависно од расподеле атома у кристалној решетки матичне и новонастале фазе, њихове везе међу површина могу бити: *некохерентне* (дифузионе), *семикохерентне* и *кохерентне* (бездифузионе). То зависи не само од укупне промене слободне енергије, већ и од промене компонената слободне енергије: *запреминске*, *површинске* и *деформацијске*. Укупна промена *енергије система* при стварању нове *клице* једнака је збиру промена свих енергија, а њихове величине одређују међусобну повезаност старих (матичних, постојећих) клица и клица новонасталих фаза [65].

Слично као у течном и у чврстом стању постоје три облика растворљивости: *потпуна растворљивост*, *ограничена растворљивост* и *потпуна нерастворљивост*. На пример у структури бакарних легура могу се наћи сви основни типови фаза: *чврсти раствори*, *хемијска једињења* и *механичке мешавине* [65]. Сама чињеница да једну те исту легуру, на различитим температурама, образују различите фазе, представља доказ постојања (егзистенције) фазних промена.

Равнотежни дијаграми легура различитих метала дају само температурску и концентрацијску зависност трансформације једне у другу фазу, али не и податке везане за време, односно *кинетику фазних промена*. Зато равнотежни дијаграми важе само за услове веома спорог хлађења, или дугог задржавања на одговарајућој температури, када се може постићи равнотежно стање. То је разлог што се својства неравнотежних знатно разликују од својстава равнотежних структура. Различитим брзинама хлађења могу се у широком опсегу мењати својства једне те исте легуре па за оцену фазних промена треба користити *трансформационе дијаграме* [32,65].

Код техничких метала и њихових легура изузетно је важно проучавање фазних промена у чврстом стању, а нарочито фазних промена насталих процесом дифузије. При наваривању или заваривању различитих метала и њихових легура у изузетно кратком временском интервалу долази до загревања, топљења и очвршћавања основног и додатног материјала, што доводи до појаве различитих структурних фаза у релативно малој запремини материјала. Тада може доћи до појаве непожељних структура па је неопходно добро проучити фазне промене у чврстом стању, посебно код челика, у свим деловима навареног споја, а нарочито, у ZUT-у и навару [62,63,97]. Од промена које су у чврстом раствору неизбежне код техничких легура гвожђа најважније су: *распад чврстог раствора* и *преображај чврстог раствора*.

6.1.1 РАСПАД ЧВРСТОГ РАСТВОРА

Распад чврстог раствора може настати услед: *промене растворљивости*, *еутектоидне реакције* и *великог потхлађења (распад због брзог хлађења)*.

Распад чврстог раствора услед промене растворљивости одвија се на одређеним температурама када опада растворљивост једне компоненте у другој. Промена растворљивости доводи до излучивање нових фаза у зависности од температуре. На вишим температурама нова фаза ће се излучивати на границама кристалних зрна (сегрегација), а на нижим температурама и унутар кристалног зрна (таложeње). Када при таложeњу расту механичка својства каже се да настаје отврдњавање челика, а када се погоршавају та својства реч је о старењу челика. Старeње челика на повишеним температурама назива се вештачко старење, а на нормалним температурама природно старење. На основу тога настаје промена растворљивости, таложeње може бити: потпуно таложeње, таложeње у ћелији, таложeње по Гуиниер-Престоновим зонама, кохерентно таложeње преципитата и некохерентно таложeње преципитата [65,97,141].

Еутектоидни распад чврстог раствора подразумева распад хомогеног раствора на две фазе које се разликују како по хемијском саставу тако и кристалографски. Новонастала смеша назива се еутектоид. Фаза која почиње прва да се излучује назива се главном фазом, док је друга пратећа фаза. Еутектоидним распадом хомогеног чврстог раствора могу настати: две чисте компоненте, два нова чврста раствора различита од матичног и међусобно, чиста компонента и чврст раствор. Еутектоидни распад је познат код многих легура, а најпознатији је распад аустенита у перлит код легура гвожђа, при чему се већом брзином потхлађивања добија фини перлит.

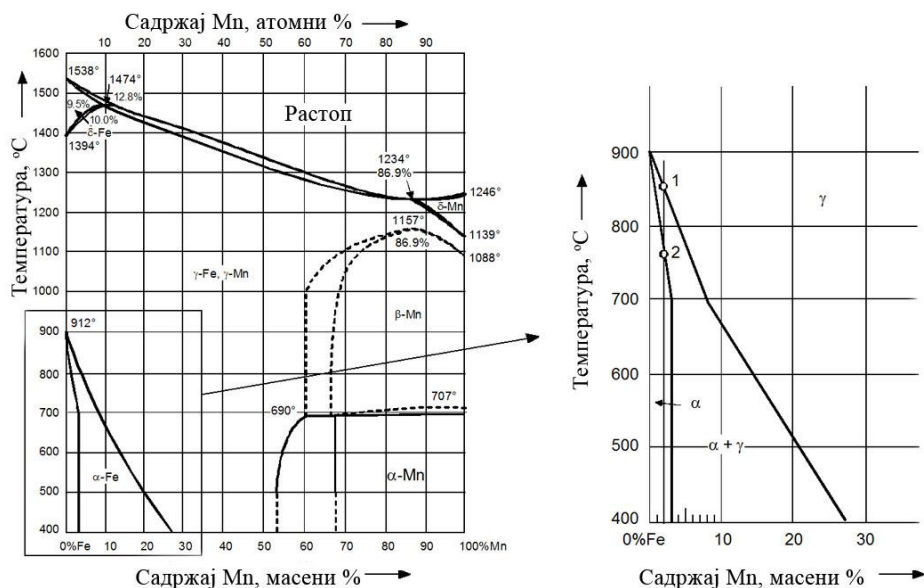
Велико потхлађивање (брзо хлађење) доводи до распада чврстог раствора, када долази до излучивања нове фазе на одређеним кристалографским равнима матичног чврстог раствора, карактеристичног геометријског распореда (Видманштетенова структура). Нова фаза се излучује на равнима где су најсродније кристалне решетке нове и старе фазе, тако да обе решетке остају у одређеним кристалографским односима. Оваква структура настаје код средњеугљеничних челика при прекристализацији крупних аустенитних зрна, али се може појавити и у другим легурама.

6.1.2 ПРЕОБРАЖАЈ ЧВРСТОГ РАСТВОРА

При овој трансформацији матични хомогени чврсти раствор мења се у други чврсти раствор који има другачији распоред атома, али исти хемијски састав. При томе долази до *преображаја неуређеног у уређен чврст раствор, преображаја једног у други чврст раствор и мартензитна трансформација.*

Преображај неуређеног у уређен чврст раствор почиње на вишим температурама, када је вероватнија појава неуређеног чврстог раствора, а при паду температуре атоми у кристалној решетки ће се уредити и добија се *суперлегура*. Процес уређивања може бити *потпун* или *делимичан*, па се може говорити о *степену уређености*. У уређеним чврстим растворима различитих легура, атоми растварача и растворка размештени су по слојевима, тако да сви атоми растворка заузимају за њих предвиђена места у решетки растварача. У *делимично уређеним чврстим растворима*, само су неки атоми растворка правилно распоређени, а остали атоми су случајно распоређени. Уређен распоред атома има за последицу промену структуре и физичких својстава легуре: расте електрична и топлотна проводност, специфична маса (густина) и тврдоћа.

Преображај једног у други чврст раствор дешава се када неки хемијски елемент, на пример манган, може да образује чврсте растворе како са α тако и са γ гвожђем. У том смислу је на слици 6.1 дат бинарни равнотежни дијаграм Fe–Mn, где гвожђе и манган образују чврсте растворе различитих кристалних решетки.



Слика 6.1 Равнотежни дијаграм Fe – Mn [65]

Са равнотежног дијаграма (сл. 6.1) уочава се да при ниским садржајима мангана и собној температури образује се једнофазна α структура, док се при порасту садржаја мангана или порасту температуре добија двофазна мешовита структура α и γ , или једнофазна γ структура. Ако пратимо прекристализацију легуре са 2% Mn (видети сл. 6.1 десно) може се уочити да она почиње када се при хлађењу достигне температура око 850°C (тачка 1), а завршава се на температури око 770°C (тачка 2). Испод ове температуре постоји нов чврст раствор α структуре уместо почетног раствора γ структуре, али се хемијски састав при овим трансформацијама није променио.

Од легура Fe – Mn технички је најважнији феро-манган садржаја 30-80% Mn, који има аустенитну структуру и на собној температури, а користи се за дезоксидацију и десумпорисање у металургији челика и ливених гвожђа (тзв. умирење челика). Такође, као дезоксидатор служи и легура Fe – Mn тзв. *сјајно гвожђе* садржаја 15–20% Mn које се додаје при производњи бронзе [65].

Мартензитна трансформација је појава при којој се из једне чврсте фазе ствара друга чврста фаза без дифузионог померања атома (јона). Мартензитна трансформација аустенита је најпознатији пример преображаја чврстог раствора која се јавља код великог броја металних система: *интерстицијском чврстом раствору гвожђа, супституцијском раствору гвожђа, супституцијском чврстом раствору обојених метала и чистим металима који имају алотропске модификације*. Нова фаза настаје при групном прелажењу атома са чворова старе на чворове нове кристалне решетке бездифузионо, при чему међусобно померање атома не прелази међуатомско растојање, а сама трансформација се одвија по механизму хомогеног клизања суседних равни. Мартензитна трансформација има сличности са деформацијом двојниковањем. Трансформација дела запремине, због њеног повећања и отпора нетрансформисане структуре, доводи до појаве сопствених напона у структури легуре.

Кад је реч о легурама гвожђа (челика) најзначајнија је трансформација (фазна промена) аустенита, која зависно од новоформиране фазе (структуре) може бити: *перлитна, бејнитна и мартензитна*. Фазне промене се не остварују у целом металном систему истовремено, већ се клице нове фазе образују поступно. Интензитети њиховог формирања и раста изражавају се *брзином нуклеације и брзином раста*. Слично као и при кристализацији и при фазним трансформацијама, грешке и примесе на границама кристалних решетки су места са већом вероватноћом појаве и раста клица, односно почетка фазних промена у чврстом стању.

6.2 ТРАНСФОРМАЦИОНИ ДИЈАГРАМИ И ЊИХОВ ЗНАЧАЈ

Трансформациони дијаграми приказују промене потхлађеног аустенита и дају утицај температуре и времена на токове фазних промена. Разликују се од равнотежних дијаграма по томе што важе само за конкретан челик одређеног хемијског састава, а узимају у обзир и услове аустенитизације (величину зрна, хомогеност аустенитне структуре и др.). У овим дијаграмима садржани су подаци о почетку и крају излучивања *проеутектоидних фаза, перлитне, бејнитне и мартензитне* трансформације аустенита у челицима. Конструирају се на основу резултата експерименталних испитивања различитим методама: *дилатометријском, резистометријском, магнетометријском и металографском* методом. *Дилатометријска метода* заснована је на разлици специфичних запремина аустенита и новонасталих фаза. *Резистометријска метода* заснована је на различитој електроотпорности односно електропроводљивости појединих структурних фаза. *Магнетометријска метода* заснована је на магнетичности појединих фаза, јер је аустенит немагнетичан, док су продукти његове трансформације магнетични. *Металографском методом* се под микроскопом процењује удео *трансформисаног аустенита* у неке новонастале фазе и удео *нетрасформисаног – заосталог аустенита*.

Трансформациони дијаграми могу се наћи у литератури у два облика: *изотермички (IRA)*, и *анизотермички (ARA)*. *Изотермички дијаграми* приказују промене аустенита у изотермичким условима и нашли су примену при избору радних параметара *изотермичког каљења, изотермичког жарења* и др. Карактеристично је да дају мало података о насталим структурама у условима брзог и континуалног хлађења, које се одвија при формирању заварених спојева. *Анизотермички дијаграми* приказују промене аустенита при различитим брзинама хлађења. Ови дијаграми су нашли примену при избору параметара различитих врста термичке

обrade, заваривања и наваривања. Користе се за предвиђање својства новонасталих структура, процену тврдоће у ZUT-у и заварљивости челика за које се располаже АRA-дијаграмима.

За заваривање и наваривање посебно су конструисани дијаграми континуалног хлађења тзв. КHZ-дијаграми, који су прилагођени начину аустенитизације челика у условима заваривања. Ови дијаграми дају најпотпуније податке на основу којих се може са великим степеном поузданости оценити заварљивост неког челика. Њихов значај је у толико већи, што омогућавају да се одреди температура предгревања и оптимални параметри загревања посебно при наваривању или заваривању челика високог напона течења. Ако се располаже КHZ-дијаграмом неког челика могу се повезати сви параметри који утичу на коначну структуру и својства споја: хемијски састав челика, температура предгревања, критично време односно брзина хлађења и др. На основу одабране структуре ZUT-а могу се усвојити енергетски и други параметри наваривања пресудни на излазни квалитет наварених спојева. Међутим, и поред података који се добијају применом трансформационих дијаграма континуалног хлађења, коначна оцена о заварљивости и квалитету спојева изведених одабраном заваривачком технологијом, може се са сигурношћу донети само на основу резултата практичних испитивања. Тек на основу експерименталних резултата доноси се одлука о прихватању или одбацивању предложене технологије.

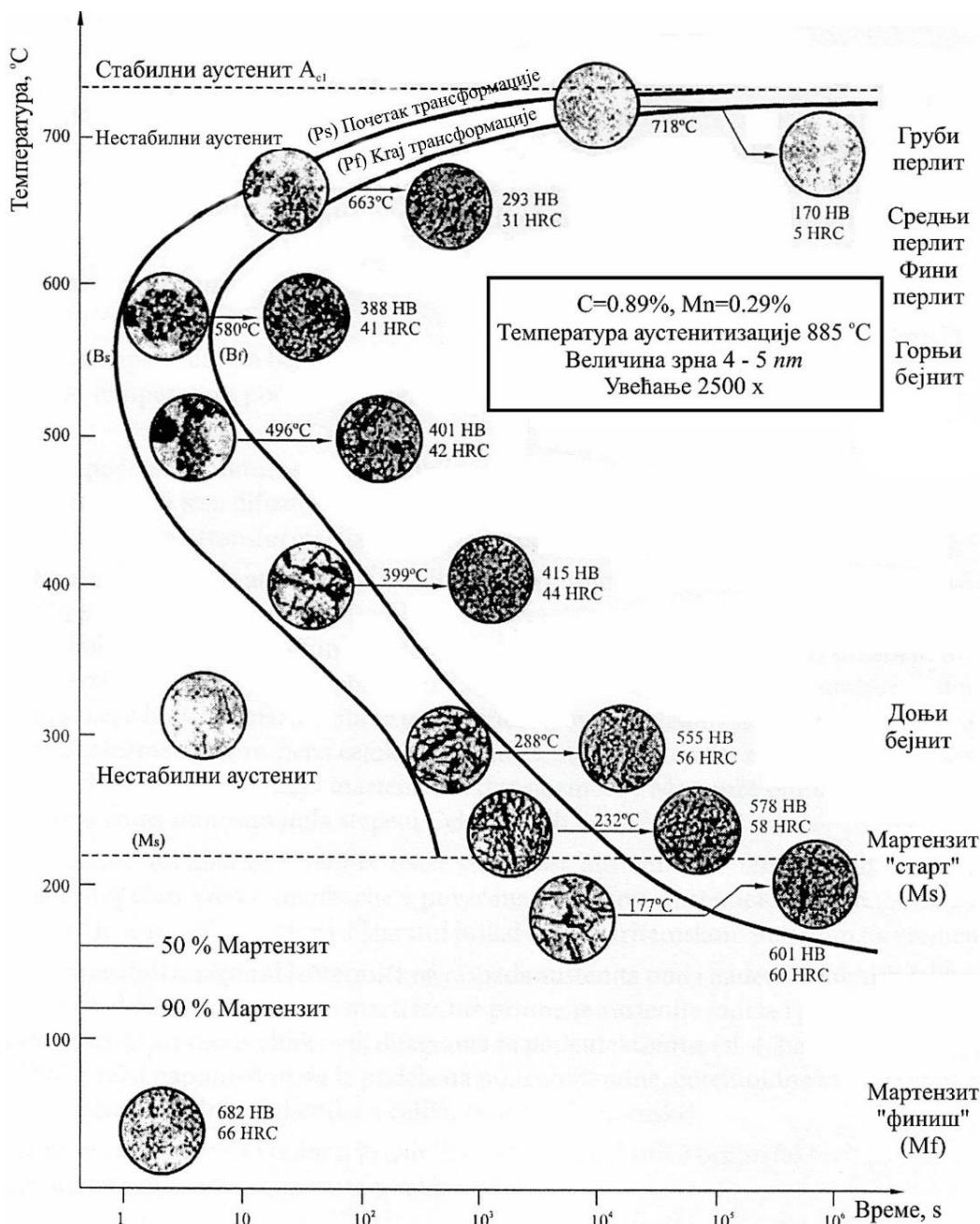
6.2.1 ДИЈАГРАМИ ИЗОТЕРМИЧКОГ ПРЕОБРАЖАЈА АУСТЕНИТА (IRA – ДИЈАГРАМИ)

При одређеним условима на температурама испод A_{C1} , односно A_{F1} долази до промене аустенита у еутектоидним челицима дифузионим или бездифузионим процесима у нове фазе, а те промене могу бити: *перлитна*, *бејнитна* и *мартензитна*. Брзина ових промена је различита у зависности од температуре, брзине хлађења, хемијског састава челика, брзине дифузије, брзине нуклеације, брзине раста новонастале фазе и других фактора. Криве линије почетка и краја трансформације аустенита у новонастале изотермичке фазе приказане су на слици 6.2 за нелегирани еутектоидни челик.

Перлитна промена аустенита је дифузиона промена, која се одвија образовањем клица и њиховим растом на повишеним температурама, а брзина промене је условљена брзином раста клица. При малом потхлађивању аустенита испод A_{C1} температуре, брзина промене је релативно мала и прве клице новонастале фазе појављују се тек после дугог времена задржавања на трансформационој температури, а укупно време промене је доста дуго. Снижавањем трансформационе температуре при већем потхлађивању аустенита, смањује се и брзина дифузије угљеника, па брзина промене опет опада. Због тога криве почетка и краја промене аустенита имају специфичан облик “S” [97,141,157]. Део прве криве означен са P_s представља почетак, а део друге криве означен са P_f крај перлитне трансформације. Новонастале фазе перлита разликују се по финоћи, па се добија: *груби*, *средњи* и *фини перлит*.

Бејнитна промена аустенита је дифузиона промена која се одвија на нижима температурама од перлитне, па се дифузија, првенствено угљеника, одвија мањом брзином. То утиче на физичко - хемијска својства новонастале фазе. Слично као и код перлитне промене део прве криве (сл. 6.2) означен са V_s представља почетак, а део друге криве означен са V_f крај бејнитне трансформације аустенита [97,141,157].

Област на слици 6.2 која је ограничена линијама A_{C1} , P_s , V_s и M_s , представља област нестабилног аустенит. Линија A_{C1} раздваја стабилни аустенит (изнад A_{C1} линије) и нестабилни аустенит (испод A_{C1} линије), а простире се све до M_s линије која представља почетак мартензитне трансформације. Област која је ограничена линијама P_f , V_f и M_s , представља област новоформираних фаза перлита и бејнита. Новонастали бејнит се дели на: *горњи бејнит* и *доњи бејнит* (сл. 6.2). На вишим температурама настаје горњи бејнит мање тврдоће, а на нижим температурама доњи бејнит веће тврдоће.



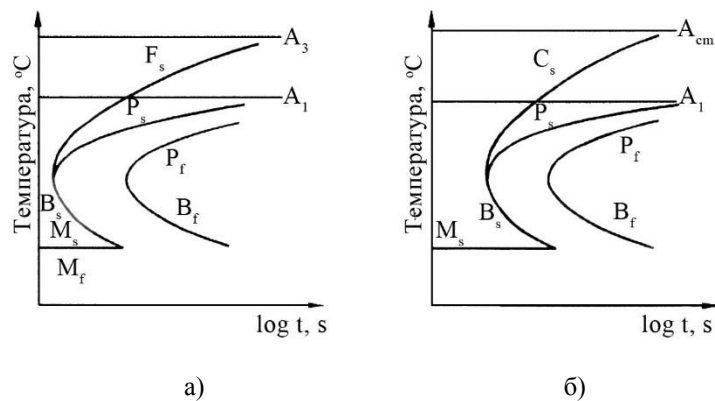
Слика 6.2 Дијаграм изотермичком преображаја аустенита еутектоидног нелегираног челика (IRA – дијаграм) [97,141,157]

У температурској области нешто испод A_{c1} линије, због температурског хистерезиса од A_{r1} линије па до температуре од око 550°C (колело, односно нос кривих) настају различите новонастале фазе трансформисаног аустенита које се разликују по структури и физичко-хемијским својствима [65,141]. Са дијаграма (сл. 6.2) види се да тврдоћа новонасталих структурних фаза расте са смањењем трансформационе температуре. Такође, при температури око 550°C брзина трансформације аустенита је највећа, јер се настајање и раст клица одвија знатно већом брзином. Зато је то температура најмање стабилности аустенита. Доминантна је фина перлитна структура прекривена горњим бејнитом. Са снижавањем трансформационе температуре брзина промене нестабилног аустенита поново опада и ствара се структурна фаза доњег бејнита. Кратко време инкубације и веома мала стабилност аустенита око 550°C , и супротно томе, дуго време инкубације и повећана стабилност аустенита око температура A_{c1} и M_s линија, намећу потребу да се трансформациони дијаграми приказују са логаритамском поделом на временској осци.

Мартензитна промена аустенита је бездифузионе природе, а нестабилан аустенит прелази у мартензит, који има посебна физичко-хемијска својства. Трансформација аустенита на температури M_s за еутектоидни челик са 0,8% С почиње на температури од 216°C , а завршава се на -46°C . Мартензитна трансформација аустенита почиње на температурама када престаје дифузија свих хемијских елемената, па и угљеника, а одвија се великом брзином око 10^3 m/s . Та брзина се упоређује са брзином звука у металима и активација није зависна од температуре у температурском интервалу $M_s - M_f$. Трансформација аустенита у мартензит не одвија се не до краја, па у структури остаје нетрансформисани заостали аустенит, који се накнадно може трансформисати третманом тј. јаким потхлађивањем–замрзавањем. Мартензитна структура је у ствари структура α -ферита пресићена угљеником, а температуре M_s и M_f зависе од садржаја раствореног угљеника у аустениту, па се зато за различите врсте челика и ове температуре разликују.

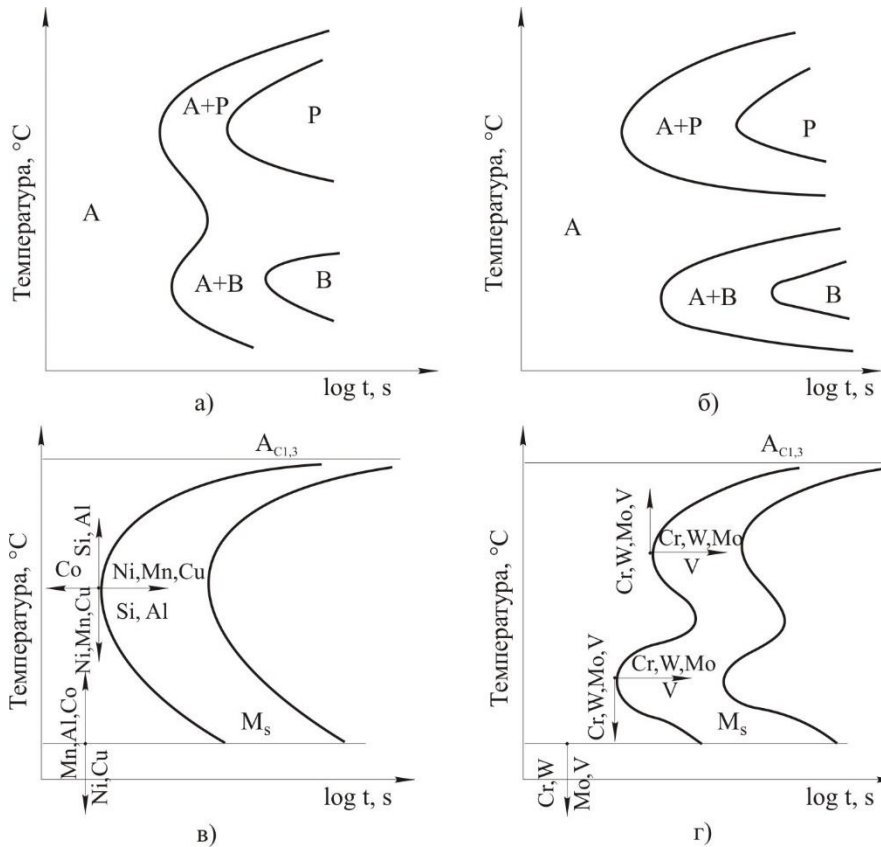
Пошто је реч о бездифузионој промени новостворена фаза има исти хемијски састав као и матрица, и представља трансформацију једнофазног система. Донедавно су као главни знаци мартензитне трансформације сматрани: *велика брзина хлађења, велика тврдоћа, тетрагонална решетка и повећана запремина*. Као типични знаци мартензитне трансформације данас се узимају: *смичући карактер промене, бездифузиона промена, појава рељефа на слободним површинама узорка и повећање запремине*, које може да буде и више од 5%.

Трансформациони дијаграми изотермичког распада аустенита код подеутектоидног и надеутектоидног челика приказани су на слици 6.3. Поред перлитне, бејнитне и мартензитне трансформације аустенита ови дијаграми садрже и проеутектоидне промене, односно феритну и цементитну линију по чему се и разликују IRA-дијаграми за подеутектоидне челике (сл. 6.3а) и надеутектоидне челике (сл. 6.3б). Подела на подеутектоидне, еутектоидне и надеутектоидне челике везана је за процентуални садржај угљеника у челику (масени или атомски).



Слика 6.3 Дијаграми изотермичког преображаја аустенита за: а) подеутектоидне челике, б) надеутектоидне челике [65,141]

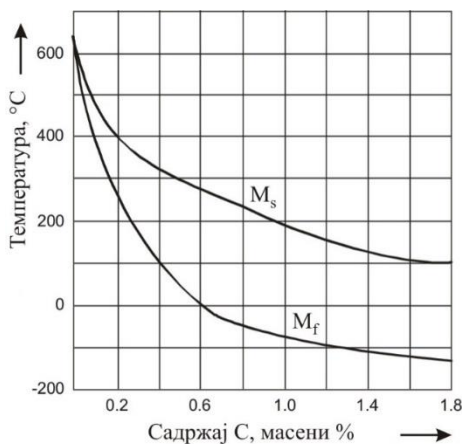
На облик и положај кривих IRA–дијаграма утичу бројни фактори, а овде ће се размотрити утицај легирајућих елемената у челику [65,97,141,157]. Из литературе [65,97,141,157], познато је да сви легирајући елементи у челику, осим кобалта и алуминијума повећавају стабилност аустенита, што значи да померају удесно криве почетка и краја промене аустенита у новоформиране фазе (сл. 6.4). Легирајући елементи као што су никал и бакар не мењају облик дијаграма већ утичу на његово померање удесно. Карбидотворни елементи као што су хром, молибден, ванадијум и волфрам изразито мењају облик дијаграма, јер продужавају време инкубације, али и међусобно удаљавају (раздвајају) перлитну и бејнитну фазу (сл. 6.4а и 6.4б).



Слика 6.4 Утицај легирајућих елемената на облик кривих у IRA–дијаграму: а) низак садржај угљеника, б) висок садржај легирајућих елемената в) утицај Mn, Ni, Si, Co, Al и Cu, г) утицај Cr, Mo, W, V, Ti и Nb [65,141]

Поред утицаја легирајућих елемената, односно хемијског састава челика, облик ових дијаграма увелико зависи од услова аустенитизације као што су: брзина загревања, температури аустенитизације и време држања при тој температури. Већа хомогеност аустенитне структуре и дуже време држања на температури изнад A_{C1} линије доводи до пораста аустенитних зрна и померања почетка и краја преображаја аустенита удесно. Нехомогеност аустенитне структуре и краће време задржавања на температури изнад A_{C1} линије, условљавају добијање ситнијих аустенитних зрна, а присуство других фаза у аустениту (карбида, нитрида, оксида, сулфида и др.), померају се S-криве улево (сл. 6.4б).

На положај кривих и температурски интервал $M_s - M_f$ у којем се одвија мартензитна промена аустенита, поред услова аустенитизације (T, t), знатно утичу садржај и врста легирајућих елемената. Сви хемијски елементи растворени у аустениту, осим кобалта и алуминијума, снижавају температуру почетка мартензитне промене M_s . Код угљеничних челика са повећаним садржајем угљеника, M_s температура се снижава, према изразу $M_s = 550 - 360\% C$. Повећањем температуре аустенитизације која је неопходна ради растварања карбида у аустениту, нарочито код легираних челика који садрже и већи проценат угљеника, M_s температура се снижава. На температуру почетка мартензитне трансформације аустенита, не утиче укупан садржај угљеника у челику, већ само део угљеника раствореног у аустениту. На сличан начин опада и температура краја мартензитне трансформације аустенита M_f . Одређивање ове температуре је отежано због заустављања мартензитне промене на нижим температурама, као и због заосталог аустенита, односно његове еластичне деформације. Температура краја мартензитне трансформације аустенита M_f може бити изнад или испод нуле у зависности од врсте челика. На величину температура почетка и краја мартензитне трансформације аустенита, па и на температурски интервал $M_s - M_f$ највећи утицај има количина раствореног угљеника у аустениту, а нешто мањи утичу легирајући елементи. Са (сл. 6.5) запажа се да челик са око 0,6% C има температуру M_f око $0^\circ C$, док је за челик са садржајем угљеника изнад 0,6% температура M_f мања од $0^\circ C$.

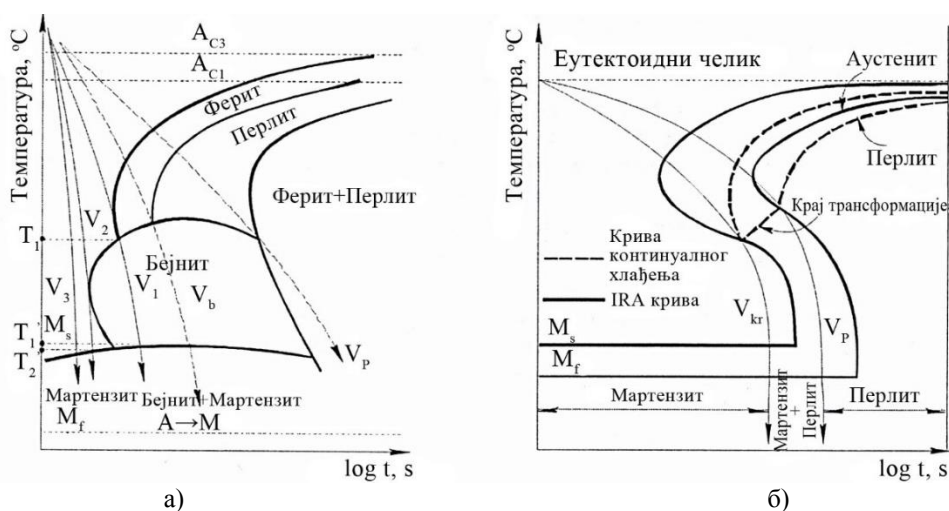


Слика 6.5 Зависност температура M_s и M_f од садржаја угљеника раствореног у аустениту [65]

6.2.2 ДИЈАГРАМИ АНИЗОТЕРМИЧКОГ ПРЕОБРАЖАЈА АУСТЕНИТА (АРА-ДИЈАГРАМИ)

Из литературе [65,97,141,157], познато је да при равнотежном хлађењу аустенита са температуре A_{C1} , његова слободна енергија практично се изједначава са слободном енергијом нискотемпературских фаза, тј. перлита и цементита. У реалним условима, већим или мањим потхлађивањем аустенита испод A_{C1} линије, може настати метастабилна (прелазна) фаза склона што бржој промени у стабилнију или стабилну (равнотежну структуру).

У циљу конструисања АРА-дијаграма, потребно је најпре за дати челик одредити време почетка и краја трансформације аустенита у условима континуалног хлађења различитим брзинама (на мирном ваздуху, принудном струјању ваздуха, у уљу, у води, у воденом раствору 5-10% NaCl и др.). Тако се добија дијаграм континуалног хлађења КН или АРА-дијаграм. Општи облик ових дијаграма за један нелегирани подеутектоидни и један нелегирани надеутектоидни челик приказани су на слици 6.6.



Слика 6.6 АРА-дијаграм: а) подеутектоидног угљеничног челика, б) надеутектоидног угљеничног челика (испрекидана линија) и ИРА-дијаграм угљеничног еутектоидног челика (пуна линија) [65,97,141]

Слично као и код изотермичког разлагања аустенита, већим брзинама хлађења одговара финија перлитна структура, а највећој брзини хлађења одговара чисто мартензитна структура. Зависно од брзине хлађења често се добијају различите величине зрна перлитне структуре: *груби перлит*, *средњи перлит* (сорбит-двофазна легура перлита коју чине танке густо сложене феритне и цементитне честице добијене при изотермичком хлађењу челика на температури око 650°C) и *фини перлит* (трустит-двофазна легура перлита коју чине танке ламеле ферита и цементита добијене потхлађивањем и изотермичким задржавањем челика на око 550°C). Повећањем брзине хлађења настају финије перлитне структуре *сорбит* и *трустит* за разлику од грубе перлитне структуре која настаје при мањој брзини хлађења.

Основне разлике између изотермичке трансформације аустенита (IRA-дијаграма) и дијаграма анизотермичке трансформације аустенита (ARA-дијаграма) су:

- **Почетак и крај преображаја аустенита**, код IRA-дијаграма, прати се по изотерми ($T = const.$), а код ARA-дијаграма (сл. 6.6а) преображај аустенита прати се по одговарајућим кривама брзине хлађења (v_1, v_2, v_3, \dots);
- **Чисто бејнитна структура** може се добити само у изотермичким условима хлађења, а не континуалним хлађењем, због времена хлађења, које је изузетно битно за одвијање дифузије;
- **Трансформационе криве, почетка и краја промене**, код ARA-дијаграма померене су у десно и надолу (испрекидана линија на слици 6.6б) у односу на IRA-дијаграме (пуна линија на слици 6.6б).

При анализи ARA-дијаграма (сл. 6.6а) може се уочити да при брзини хлађења $v_1 < v_{kr}$ део аустенита остаје нетрансформисан све до температуре почетка мартензитне трансформације M_s , када почиње његова директна бездифузиона трансформација у мартензит. При брзини хлађења $v_2 = v_{kr}$ треба очекивати директну трансформацију аустенита у мартензит, али је то практично немогуће јер остаје извесна количина нетрансформисаног аустенита. При брзини хлађења $v_3 > v_{kr}$, долази до потпуне трансформације аустенита у мартензит, због великог потхлађивања (прехлађивања).

Металографским испитивањима утврђено је да у структури каљених челика увек остаје извесна количина нетрансформисаног (заосталог) аустенита. Готово потпуна трансформација аустенита у мартензит, код високолегираних и угљеничних челика са високим садржајем угљеника (већим од 0,6%), постиже се само при нискотемпературском каљењу (замрзавању испод 0°C), тј. *субнултом третману*, када се достиже температура краја мартензитне трансформације аустенита M_f .

Код високолегираних челика (Fe–Ni–Cr, Fe–Mn–Cr и др.), при континуалном снижавању температуре одвија се и мартензитна трансформација на константној температури (изотермичка трансформација), јер се после јаког потхлађивања (прехлађивања) до -180°C , и затим повећања температуре до -100°C , аустенит се постепено трансформише у мартензит.

При трансформацији аустенита у нове фазе, оне готово никада нису строго одвојене, већ се најчешће добијају смеше напред наведених фаза (мешовите структуре). Ако се даље анализира дијаграм (сл. 6.6а), уочава се да при хлађењу брзинама мањим од v_p настаје се коначна мешовита структура ферита и перлита (F+P). При хлађењу брзинама између v_p и v_b настаје мешовита структура ферита, перлита, бејнита и мартензита (F+P+V+M). Брзина хлађења између v_b и v_l даје мешовиту структуру ферита, бејнита и мартензита (F+V+M). При хлађењу брзинама између v_l и v_2 структура ће бити бејнита и мартензита (V+M). При хлађењу брзинама већим од критичне брзине v_{kr} (сл. 6.6б) или брзином $v_3 > v_2 = v_{kr}$ (сл. 6.6а) настаје мартензитна структура (M) са одређеном количином нетрансформисаног (заосталог) аустенита. Минимална брзина хлађења при којој се одлаже промена аустенита све до температуре почетка мартензитне трансформације M_s , при којој се аустенит трансформише само у мартензит назива се *критична брзина хлађења* v_{kr} .

Угљенични челици имају веома велику критичну брзину хлађења која се углавном креће од $200\text{--}800^\circ\text{C/s}$, при чему веће брзине одговарају нискоугљеничним челицима, а најмања еутектоидном челику. Структуре легираних челика су сложеније од структура нелегираних (угљеничних челика) па оне могу бити мешовите (P+V+M+A), и немају стабилну фазну структуру, па се зато називају *међуфазне структуре*. При пројектовању и изради заварених конструкција тежи се да навари или завари имају компактну мешовиту бејнитно-мартензитну структуру, јер она има добру тврдоћу, и довољно добру жилавост, односно отпорност према процесима хабања и појави кртог лома.

7. ТЕРМИЧКА ОБРАДА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

УВОД

Термичка обрада је технолошки процес који се састоји из загревања метала до одређене температуре, задржавања на тој температури (прогревање) и хлађења до собне температуре. Понекад се у циљу трансформације заосталог аустенита наставља хлађење до одређене температуре испод нуле, задржавање на тој температури (замрзавање) и загревање до собне температуре [12,32,65,121,168].

Код наварених спојева, осим уобичајене термичке обраде за снижавање заосталих напона, примењују се и друге врсте термичких обрада да би се побољшала структура навара и добила боља механичка својства, јер се поступцима наваривања не могу увек добити спојеви захтеваних (тражених) својстава [176,177,183]. Због високе цене извођења термичке обраде, кад год је то могуће, треба избећи њену примену. Ипак се често мора применити термичка обрада како би се добили навари доброг квалитета или побољшала заварљивост спајаних материјала. Примена неког вида термичке обраде наварених спојева, неопходна је ако се после наваривања мора извести механичка обрада наварених површина, или када се делимично наварују сегменти оштећених елемената техничких система.

Иако се термички најчешће обрађују легуре карактеристичне по фазним променама у чврстом стању (челик, ливено гвожђе), неки видови термичке обраде (рекристалizaciono жарчење, напонско жарчење и др.) примењују се и при наваривању обојених метала и њихових легура (неке легуре алуминијума и др.). Термичка обрада се по потреби изводи пре наваривања, у току самог процеса, или накнадно после завршеног наваривања. Када се термичка обрада наварених спојева легура гвожђа изводи при температури изнад критичних температура (A_{C1} , односно A_{C1}), настаће поред структурних и фазне промене у основном материјалу, док при температури нижој од критичне настају само структурне промене. При избору врсте термичке обраде наварених спојева треба се одредити за обраду код које настају само структурне а не и фазне промене [185,191,197].

7.1 ВРСТЕ ТЕРМИЧКИХ ОБРАДА И ЊИХОВА ПРИМЕНА ПРИ НАВАРИВАЊУ

Сви видови термичке обраде навариваних елемената који се препоручују у циљу промене структуре материјала и релаксације напонско-деформацијског стања, могу се поделити у три групе: *претходну*, *текућу* и *накнадну*. *Претходна* термичка обрада изводи се пре процеса наваривања; *текућа* у току самог процеса наваривања и *накнадна* после завршеног наваривања. Међутим, пошто се често претходна и текућа термичка обрада примењују комбиновано пре и у току процеса наваривања често се текућа термичка обрада подводи под претходну термичку обраду [63,65,153,163].

7.1.1 ПРЕТХОДНА И ТЕКУЋА ТЕРМИЧКА ОБРАДА ПРИ НАВАРИВАЊУ

Претходна термичка обрада најчешће представља загревање навариваних елемената пре наваривања и зове се *предгревање*. Ако се изводи док траје наваривање онда се назива *догревање* или *прогревање*. Ова термичка обрада је у ствари припрема основног материјала за заваривање (наваривање), да би се одстранила влага са радних предмета, смањили термички напони и деформације, снизили већ затечени заостали напони, и спречила појава хладних прслина у навареном спој.

Предгревање, као вид термичке обраде, веома често се примењује пре наваривања, а у зависности од основног материјала, температура предгревања може бити од неколико десетина до неколико стотина °C. Предгревање до релативно ниских температура, нижих од 100°C, односи се на челике који су склони појави водоником индукваних хладних прслина. Овим загревањем испарава влага са навариваних површина па се често назива *предгревање ради сушења*. Тиме се елиминише водоник као узрочник појаве хладних прслина.

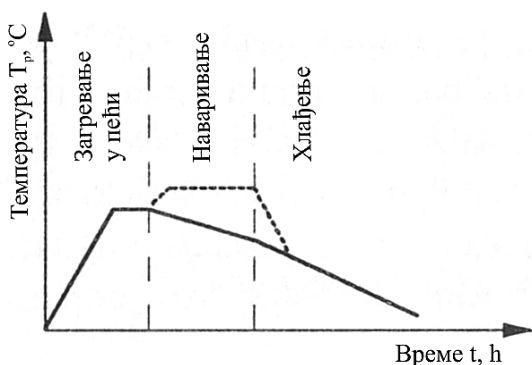
Предгревање ради смањења брзине хлађења навара износи 100-250°C за нелегиране челике, односно 100-450°C за легиране челике. Температура предгревања за различите врсте челика може се одредити рачунским методама и практичним пробама. Неке рачунске методе заснивају се на: формули Сеферијана, BWRA–методи, параметарским једначинама, KHZ–дијаграми и времену хлађења $t_{8/5}$. Прорачуната температура предгревања може се остварити са тачношћу $\pm 10^\circ\text{C}$ када се предмети предгревају у пећима за термичку обраду. У случајевима када се за предгревање користе други извори топлоте, постигнута температура може се посредно контролисати термокредама или термопаровима. Термокреде се топе или мењају боју на тачно одређеним температурама, што је дато у упутству произвођача уз сваки сет креда. Многе фирме производе термокреде за различите опсеге температура, најчешће од 60÷700°C [41,63,82,97].

Прогревање и догревање примењују се како би се одржавала почетна температура предгревања за све време наваривања. На смањење почетне температуре предгревања при наваривању могу утицати: термичка проводност основног материјала, дебљина и облик навариваног елемента, место где се изводи наваривање и др.

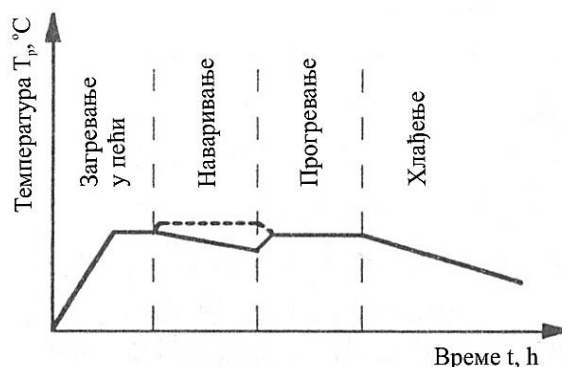
О значају предгревања говори и чињеница да се и класификација различитих метода наваривања везује за претходну термичку обраду, па имамо следеће методе наваривања: наваривање са предгревањем; наваривање са предгревањем, догревањем и прогревањем; наваривање са предгревањем и прогревањем; наваривање са међухлађењем (*interpass*) и наваривање са степенастим предгревањем.

Наваривање са предгревањем (сл. 7.1), изводи се при наваривању масивних елемената, код којих температура предгревања спорије опада. Применом аутоматских поступака наваривања, или применом електрода већег пречника језгра температура предгревања може да се повећа.

Наваривање са предгревањем и прогревањем (сл. 7.2), изводи се при наваривању масивних елемената од нискоугљеничних и нисколегираних челика, јер је код њих велика брзина хлађења покривног (првог слоја) навара. Прогревањем последњег навара изједначавају се услови његовог наношења са наношењем претходних навара, чији се слојеви спонтано термички обрађују при полагању наредних навара.

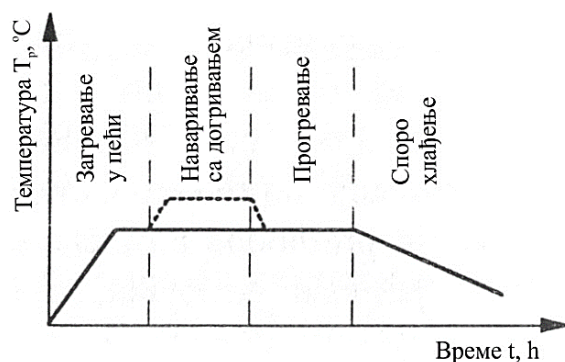


Слика 7.1 Наваривање са предгревањем [63,141]



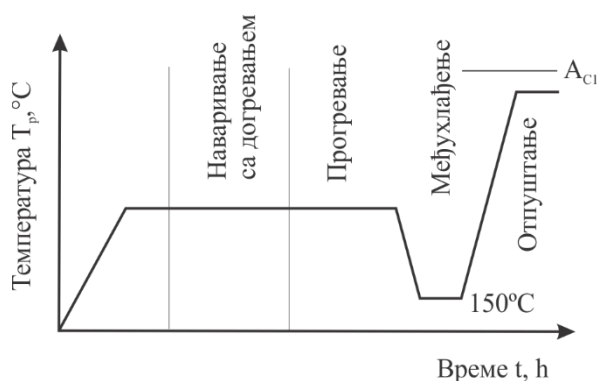
Слика 7.2 Наваривање са предгревањем и прогревањем [63,141]

Наваривање са предгревањем, догревањем и прогревањем (сл. 7.3) изводи се при наваривању танкозидних елемената, наношењу навареног слоја мале дебљине, наваривању елемената сложеног облика и наваривању елемената са већим површинама. Ова метода наваривања изводи се при наваривању нискоугљеничних, угљеничних и нисколегираних челика који се брже хладе, док се при наваривању високолегираних челика, због њиховог споријег хлађења ова метода не примењује, јер им је термичка проводност знатно мања, па температура основног материјала расте у току процеса наваривања.

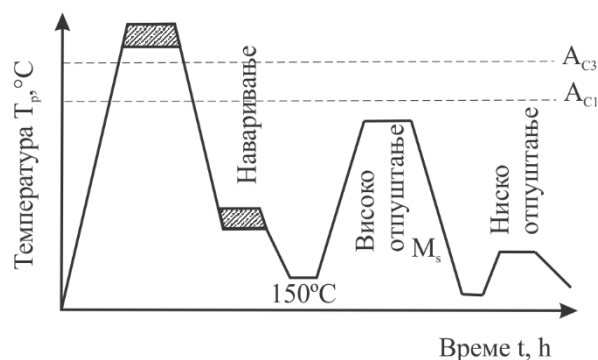


Слика 7.3 Наваривање са предгревањем, догревањем и прогревањем [63,141]

Наваривање са међухлађењем (interpass) (сл. 7.4), представља савремену методу наваривања, чијом применом се спречава појава прслина. Наваривани елементи се пре и у току процеса наваривања предгревају, догревају и прогревају, а затим хладе до температуре од око 150°C , на којој се одређено време задржавају, па се после тога отпуштају. Ова метода је погодна при наваривању дебелих челичних елемената, или при наношењу дебелих слојева навара, који садрже већу количину заосталог аустенита. Задржавањем на температури од око 150°C одлаже се преображај заосталог аустенита у мартензит, чиме се после отпуштања омогућава добијање бејнитне, бејнитно-мартензитне или нискоугљеничне мартензитне структуре мање тврдоће која није подложна појави прслина.



Слика 7.4 Наваривање са међухлађењем (interpass) [63,141]



Слика 7.5 Наваривање са степенастим предгревањем [63,141]

Наваривање са степенастим предгревањем (сл. 7.5), је компликована и скупа метода наваривања, па је њу оправдано применити када је потребно добијање наварених слојева високог квалитета. Примена ове методе искључује накнадну термичку обраду. Наваривани елементи се предгревају до температуре аустенитног подручја (A_{C3} -линије), па се затим хладе до температуре наваривања, која је нешто изнад температуре почетка мартензитне трансформације аустенита M_s , чиме се спречава појава врућих прслина у току наношења наварених слојева. Затим се наварени елементи хладе до температуре од око 150°C , и са те температуре двоструко отпуштају, прво високо па затим ниско отпуштање.

7.1.2 НАКНАДНА ТЕРМИЧКА ОБРАДА ПОСЛЕ НАВАРИВАЊА

Од бројних видова термичке обраде, наварени елементи најчешће се накнадно термички обрађују: *жарењем*, *отпуштањем* и *каљењем*. Постоје више врста термичке обраде жарења: *дифузионо*, *нормализационо*, *меко*, *потпуно*, *рекристалizaciono* и *напонско жарење*. Најчешће се примењује *нормализационо жарење*, *дифузионо жарење* и *напонско жарење*. *Отпуштање* може бити *ниско*, *средње* или *високо*, а све у зависности од захтеваних својстава наварених елемената. *Каљење* се ретко примењује, а и кад се примени, после каљења одмах следи *отпуштање*. Поступак каљење са високим отпуштањем назива се *побољшање*. Од свих напред

поменутих накнадних термичких обрада овде ће бити речи само о најчешћим термичким обрадама наварених спојева код челика.

7.1.2.а Напонско жарење наварених челика

Напонско жарење (жарење ради смањења заосталих напона), као релаксациона метода, примењује се код наварених елемената који се после наваривања механички обрађују, јер би услед високих заосталих напона дошло до промене равнотежног напонског стања, трајних деформација, промене димензија и појаве прелина. Ове појаве су недопустиве код одговорних елемената техничких система, а напонско жарење примењује се ако је њихова дебљина већа од 30 mm, или код других елемената за које важи услов $0,1 \cdot R_{eH} + s \geq 50$ [63].

Температура загревања при напонском жарењу код челика износи 620 - 650°C. Наварени део ставља се у пећ на собној температури и загрева тако да пораст температуре буде обрнуто сразмеран његовој дебљини (приближно 50/s, °C/min). Време држања навареног дела на температури жаренја је око 2 min/mm његове дебљине, али не сме бити краће од 1h нити дуже од 5h. Хлађење се изводи у искљученој пећи тако да брзина хлађења буде упола мања од брзине загревања. Нестручним извођењем напонског жаренја могу настати супротни ефекти од жељених, односно може доћи до повећања, уместо смањења нивоа заосталих напона.

Треба знати да правилно изведено отпуштање напона жарењем, не значи да ће се они у потпуности одстранити, већ се само своде на ниво који одговара напону течења (граница еластичности) навариваних материјала на температури напонског жаренја. Закључак произлази из физичких појава које се јављају при жаренју челика са заосталим напонима. Порастом температуре загревања тотална (укупна) деформација ε_T остаје константна величина, али пластична компонента деформације ε_p расте на рачун компоненте еластичне деформације ε_e , све док се заостали напони не смање и дођу до величине напона течења на температури напонског жаренја. Релаксација заосталих напона одвија се према изразима: $\varepsilon_T = \varepsilon_p + \varepsilon_e = const$, $\sigma = E \cdot \varepsilon_e \rightarrow R_{eH}$, $\varepsilon_e \rightarrow 0$, $\varepsilon_T \rightarrow \varepsilon_p$ и $\sigma \rightarrow 0$ [63].

Напонско жарење се препоручује за релаксацију напонског стања при наваривању већине челика и ливених гвожђа, осим финозрних челика повишене јачине, код којих може доћи до погоршања карактеристика основног материјала (пад тврдоће и својстава отпорности ZUT-a). Због високе цене опреме и извођења, напонско жарење се примењује само када је то неопходно. Иако напонско жарење повећава трошкове наваривања, код конструкција од којих се захтева висок степен сигурности, или делова који су изложени високим ударним или термичким оптерећењима, његова примена представља и законску обавезу.

7.1.2.б Нормализационо жарење наварених челика

Нормализационо жарење или *нормализација*, изводи се загревањем нешто испод критичне тачке A_{c3} , прогревањем на тој температури и спорим хлађењем, најчешће на мирном ваздуху. На тај начин се добија равномерна и ситнозрнаста структура. Најчешће се нормализују наварени делови од челичног лива и наварени челични делови велике дебљине. При наваривању високоугљеничних и легираних челика, због њихове закаљивости, после нормализационог жаренја следи високо отпуштање.

7.1.2.в Дифузионо жарење наварених челика

Дифузионо жарење (*хомогенизација*), састоји се из загревања наварених челичних делова до високих температура (1050-1150°C), тј. нешто испод солидус линије, дуготрајног прогревања (8-15h, а понекад и 40h) и спорог хлађења. Примењује се ређе од напонског и нормализационог жаренја и то код наварених одливака, или делова наварених ЕРР или ЕРТ поступцима код којих се полажу навари већих дебљина. Дифузионим жарењем водоник дифундује из навара и побољшава се структура, неуједначена дендритна структура, постаје хомогена, а зрно остаје крупно због дуготрајног држања на високој температури. Зато се после дифузионог жаренја наварени елементи подвргавају и нормализацији да би се добила ситнозрнаста структура.

7.1.2.г Побољшање (каљење и отпуштање) наварених челика

Побољшање је термичка обрада која се практично састоји од две узастопне термичке обраде, прво *каљење* па затим одмах *отпуштање*.

Каљење се састоји из загревања челика до температура аустенитне области, прогревања на тој температури и хлађења брзинама већим од критичне брзине. Разликују се: *запреминско (потпуно) каљење* и *површинско (непотпуно) каљење* [63,168,191].

Запреминско каљење може бити: *мартензитно (континуално и степенасто) каљење* и *бејнитно (изотермичко) каљење*. Постоје и друге варијанте запреминског каљења: *прекидно мартензитно, континуално бејнитно, таложно* и *каљење на ниским температурама (замрзавање)* [63,191].

Површинско каљење може бити: *поступно каљење* и *каљење изједна*. Према извору топлоте разликују се: *површинско каљење пламеном* и *индукционо површинско каљење* [63,191].

Суштина сваког вида каљења челика је да се потхлађивањем аустенита спречи његова дифузиона промена све до температуре почетка мартензитне трансформације, када настаје његова трансформација механизмом клизања. Као резултат каљења добија се структура тетрагоналног мартензита која има велику тврдоћу, а ниске вредности пластичности и жилавости.

Максимална тврдоћа мартензита од 64 HRC постиже се при каљењу еутектоидног челика са приближно 0,7% C, а већи садржај раствореног угљеника у аустениту незнатно утиче на повећање његове тврдоће, чак и после каљења на ниским температурама. Код закаљивих угљеничних челика ($C > 0,25\%$) *горња критична брзина хлађења*, при којој се добија чисто мартензитна структура је око 140-250°C/s, док је *доња критична брзина хлађења*, при којој се добија мешовита структура, нпр. мартензитна и бејнитна око 40°C/s. Треба знати да се једино из аустенита може добити мартензит, и да на температуре почетка и краја мартензитне трансформације аустенита не утиче укупан садржај угљеника у челику, већ само садржај угљеника раствореног у аустениту.

Отпуштање је термичка обрада која се састоји из загревања до одређене температуре (у зависности од врсте отпуштања), прогревања на тој температури и спорог хлађења. Отпуштањем се постиже да се нестабилна структура челика трансформише у стабилније структуре. Мартензитна структура заједно са заосталим аустенитом је типична структура челика после каљења. Ова структура је неравнотежна и нестабилна услед пресићења угљеником, а може се одржати и на собној температури само захваљујући малој покретљивости атома. Мартензитна структура челика је сувише крта, уз знатне заостале напоне, те се стога готово увек после каљења изводи отпуштање.

Заостали напони у навареним челичним деловима углавном се смањују отпуштањем. Тако на пример, код челика са 0,3% C после отпуштања на 550°C, ниво заосталих напона пада са 600 на 80 MPa [63,97,141,163]. На смањење нивоа заосталих напона, поред температуре на којој се изводи отпуштање и дужине времена прогревања на тој температури, знатно утиче и брзина хлађења. Са смањењем брзине хлађења заостали напони ће бити нижи, и обрнуто. Зато се при отпуштању наварени делови споро хладе, јер при брзом хлађењу челика са температуре од 600°C до околне температуре (собне температуре) генеришу се нови сопствени напони у навару. У зависности од висине температуре загревања при отпуштању разликују се: *ниско отпуштање, средње отпуштање* и *високо отпуштање*.

7.1.2.д Ниско отпуштање наварених челика

Ниско отпуштање наварених челичних делова изводи се загревањем до температуре 150-250°C, прогревања 1-45h у зависности од дебљине материјала и хлађења на мирном ваздуху, при чему тетрагонални мартензит прелази у кубни. Заостали напони настали при наваривању, се отпуштањем знатно снижавају, а незнатно се побољшава пластичност и одржава висока тврдоћа, јачина и отпорност на хабање [63,97,163].

7.1.2.е Средње отпуштање наварених челика

Средње отпуштање наварених челичних делова изводи се загревањем до температура 350-500°C, прогревањем 2 min/mm дебљине материјала, али не мање од 1 h, и затим хлађењем у води. Средњим отпуштањем се постиже да јачина и напон течења остају исти као и после каљења, а расте граница еластичности, отпорност на релаксацију и динамичка издржљивост, због појаве површинских притискујућих напона услед хлађења у води [63,97,163].

7.1.2.ж Високо отпуштање наварених челика

Високо отпуштање наварених челичних делова изводи се на температурама између 500°C, и критичне температуре A_{c1} , чиме се постиже најбоља пластичност и жилавост материјала. Каљење праћено високим отпуштањем зове се побољшање. Термичка обрада, побољшања доводи до истовременог повећања јачине, напона течења, пластичности, контракције и нарочито ударне жилавости. Слично томе, наваривање челика уз велике брзине хлађења и накнадно високо отпуштање омогућује добијање велике тврдоће, јачине, пластичности и ударне жилавости [63,97,141,163].

Брзим хлађењем у току наваривања добијају се углавном навари претежно мартензитне структуре. Да би се добила стабилнија структура од чисто мартензитне, односно структура бољих својстава, препоручује се накнадна термичка обрада: жарење, побољшање или отпуштање. Ниско, средње или високо отпуштање дају различите структуре па тиме и механичка својства. На овај начин се постижу бољи резултати него ако би се трансформација аустенита извела у равнотежним условима, тј. при брзини хлађења мањој од критичне. Брзим хлађењем и отпуштањем може се контролисати трансформација аустенита. Међутим, накнадна термичка обрада, па и отпуштање, имају неке недостатке: термичка обрада је скуп дуготрајних процеса, потребан је стручан кадар и скупа опрема.

Велики проблем при отпуштању неких челика је појава *отпусне кртости*, где у одређеној температурској области долази до повећања кртости, због трансформације заосталог аустенита.

7.2 ПРОМЕНЕ ПРИ ОТПУШТАЊУ НАВАРЕНИХ ЧЕЛИКА

У току термичке обраде отпуштања закаљивих наварених челика долази до трансформације нестабилних у стабилније структуре. Ова појава је повезана са разлагањем нестабилног мартензита и заосталог аустенита у стабилне структуре које се састоје из ферита и цементита код нелегираних челика, или њихово разлагање у међуфазне структуре са карбидима код легираних челика.

Мартензит и заостали аустенит разлажу се дифузијом угљеника, а брзина разлагања условљена је количином топлоте и временом загревања, при чему мартензит као нестабилнији почиње први да се разлаже. Мартензит је пресићен чврст раствор α -ферита угљеником и поседује вишак слободне енергије (енталпије), а у равнотежно стање прелази излучивањем вишка угљеника у виду карбида (ϵ -карбида и карбида гвожђа-цементита). Процес дифузије угљеника из пресићеног раствора мартензита различито се одвија код наварених нелегираних и наварених легираних челика, па отуда се промене мартензита разликују.

7.2.1 ПРОМЕНА МАРТЕНЗИТА ПРИ ОТПУШТАЊУ НАВАРЕНИХ НЕЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА

Први стадијум промене мартензитне структуре нелегираних челика одвија се при загревању 80-200°C, када долази до излучивања вишка угљеника у облику субмикроскопских честица карбида (ϵ -карбида изузетно мале дебљине састава $Fe_2C - Fe_3C$), са густо пакованом хексагоналном кристалном решетком. Резултат промене мартензита је постепено смањивање тетрагоналности његове решетке, опадање унутрашњих напона и смањење притискујућих напона мартензита на заостали аустенит. Степен тетрагоналности мартензитне кристалне решетке, представља однос $c/a > 1$ где је „c“ - висина тетраедра, а „a“ - стране квадратне основе.

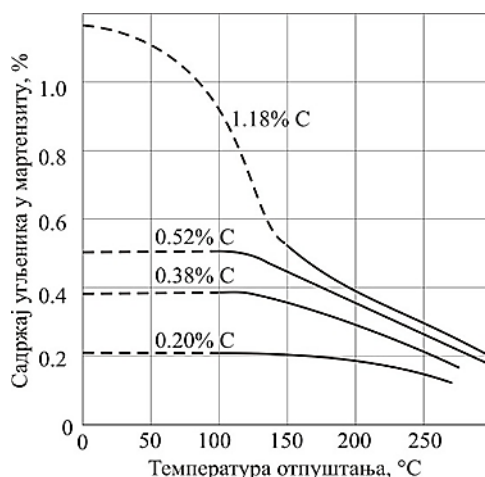
Дифузија угљеника из мартензита прво почиње на границама кристала мартензита и местима структурних грешака.

Други стадијум одвија се при температурама 200-300°C, у коме се наставља формирање ε -карбида све док у чврстом раствору мартензита остане око 0,2% C (сл. 7.6), при чему промена степена тетрагоналности мартензита доводи до даљег снижавања притискујућих напона на заостали аустенит. Захваљујући томе наставља се промена заосталог аустенита у мартензит. Ова трансформација почиње још у првом стадијуму при температурама 150-180°C. Добијена структура се назива *отпуштени мартензит* [12,32,97,120,141,160].

Трећи стадијум одвија се при температурама 300-400°C, у коме се наставља издвајање субмикроскопских честица ε -карбида и његовог преображаја у цементит, на претходно створеним клицама цементита. На температури од око 400°C ови процеси престају, па се добија равнотежни садржај угљеника у чврстом раствору мартензита са степеном тетрагоналности мартензита $c/a \approx 1$. Тако долази до промене мартензита у смешу ферита и цементита, при чему се облик карбидних честица ($\sim 3\mu m$) приближава сфероидалном. Тако се добија структура *високоотпуштеног мартензита* односно *отпуштени трустит* састављен од веома ситних куглица цементита у феритној основи.

Четврти стадијум је последњи и одвија се при температурама од 400°C па до критичне температуре A_{C1} , када настаје уобличавање субмикроскопских честица цементита, зачетих на нижим температурама у облику правилних куглица. На температурама до 600°C настаје коагулација ситних куглица цементита које се међусобно повезују образујући све веће куглице величине $3 \cdot 10^{-5} - 30 \cdot 10^{-5} mm$, док се при температурама изнад 650°C излучује микроскопски цементит и настаје пораст феритних зрна.

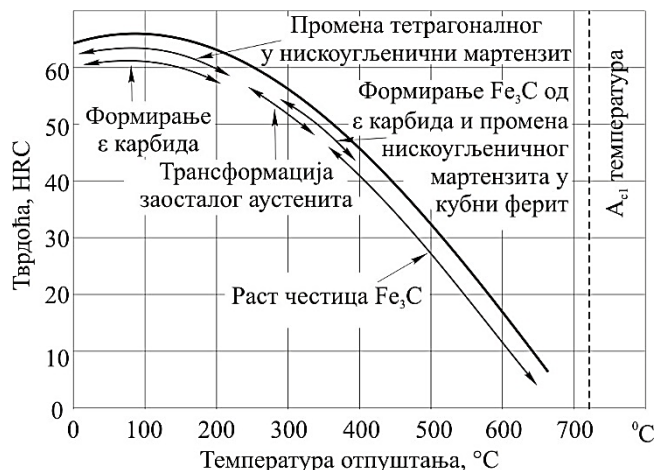
У прва два стадијума преображаја мартензита добија се сложена неуједначена двофазна структура делимично пресићеног чврстог раствора угљеника у α -фериту и субмикроскопских ε -карбида која се назива *отпуштени мартензит*. Последња два стадијума преображаја мартензита дају двофазну уједначену структуру мешавине ферита и цементита, са дисперзијом цементита која се смањује при порасту температуре. У трећој фази настаје структура која се назива *високоотпуштени мартензит*, односно *отпуштени трустит*, док у четвртој фази настаје *високоотпуштени трустит*, односно *отпуштени сорбит*.



Слика 7.6 Утицај температуре на садржај угљеника у отпуштеном мартензиту [41,160]

За разлику од продуката промене бејнитне и перлитне структуре, где се добија плочасти цементит и ферит, као продукти промене мартензита добијају се лоптасти цементит и ферит, при чему је лоптасти цементит распоређен у феритној основи. Овако добијена структура, у зависности од дисперзије цементита, има тврдоћу од 200-500 НВ. Потребно је рећи, да је *сорбит* структура која се добија загревањем мартензитног челика на 650-680°C чија је тврдоћа 300 НВ. Загревањем мартензитног челика од 680°C до A_{C1} добија се структура која се назива *сфероид* због лоптастог цементита чија је тврдоћа 200-300 НВ. Загревањем мартензитног челика изнад A_{C1} добија се *аустенитна структура* услед преображаја лоптастог цементита чија је тврдоћа мања од 200 НВ.

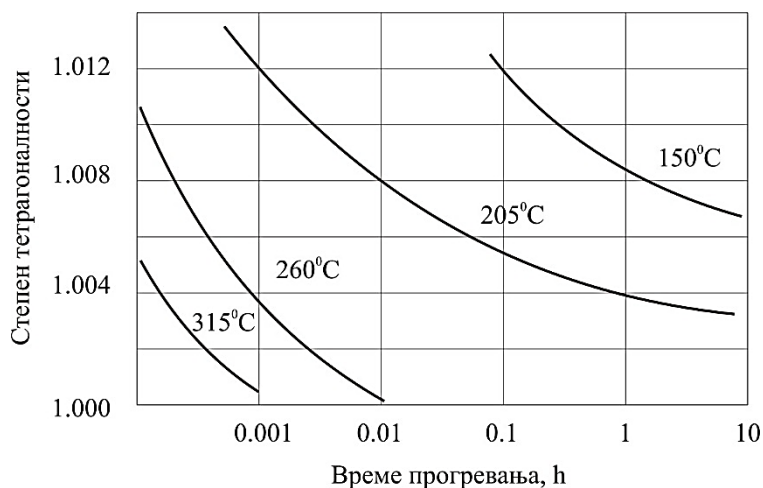
Према разним ауторима [16,160], претходно наведени стадијуми разлагања неравнотежних структура при отпуштању нелегираног еутектоидног челика приказани су графички на слици 7.7.



Слика 7.7 Промена тврдоће и структуре при отпуштању нелегираног еутектоидног челика [16,141]

Различите специфичне запремине мартензита и аустенита омогућавају да се у току преображаја мартензита дилатометријским методама прате резултати трансформације мартензита и аустенита у челику на основу промене димензија. Процес дифузије, односно излучивања угљеника из пресићеног чврстог раствора мартензита изазива смањење специфичне запремине, док је процес преображаја аустенита у мартензит праћен повећањем специфичне запремине. Као резултанта ових процеса настаје линеарна промена димензија челика [32,97,120,160]. У ствари, при отпуштању нелегираних челика, преображај неравнотежних структура је континуални процес, јер се поједини стадијуми преклапају, па су због тога наведени температурски интервали оријентациони.

Поред температуре, битан чинилац је и време прогревања, тако да дуготрајно прогревање на нижим температурама може довести до преображаја мартензита у већем обиму од краткотрајног прогревања на вишим температурама (сл. 7.8). Пораст температуре отпуштања најчешће побољшава својства пластичности и жилавости на рачун смањења тврдоће и јачине. Зато се код неких наварених челика нарочито код тврдих навара, ограничава температура отпуштања на 250°C, да би се задржала довољно велика тврдоћа, а тиме и већа отпорност на хабање.



Слика 7.8 Утицај температуре и времена отпуштања на степен тетрагоналности мартензита [141,160]

7.2.2 ПРОМЕНА МАРТЕНЗИТА ПРИ ОТПУШТАЊУ НАВАРЕНИХ ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА

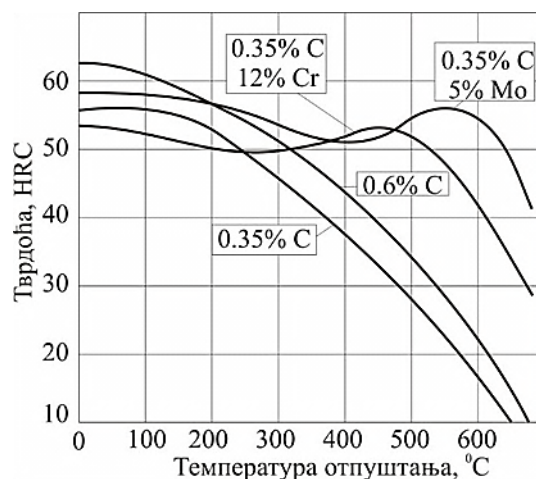
Од легирајући елемената садржаних у челику зависи температурски интервал бездифузионе трансформације аустенита као врсте новонасталих структура. Већина легирајућих елемената снижава температуру почетка мартензитне трансформације аустенита (Mn, Mo, Cr, Ni и Cu), док Al, Co и Si подижу ову температуру. Сви легирајући елементи, осим Co, померају удесно криву почетка трансформације аустенита, смањујући тиме критичну брзину хлађења при којој настаје мартензитна структура челика.

Карбидотворни легирајући елементи (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Ta, W), повећавају стабилност аустенита у одређеној температурској области и раздвајају перлитни и бејнитни преображај аустенита.

При отпуштању легираних челика, процеси разлагања мартензита, коагулација карбида и преображаја заосталог аустенита, одвијају се на вишим температурама него код угљеничних челика. Температуру почетка преображаја аустенита подижу легирајући елементи Cr, Mn и Si. На кашњење разлагања мартензита утичу Ti, V, Cr, Mo, W и Si. Код легираних челика који садрже Cr, W и Si коагулација карбида одвија се при температури од око 450°C, док се код челика легираних са Mo и V коагулација карбида одвија при око 550°C [16, 160]. Карбидотворни легирајући елементи, који имају већу склоност ка формирању карбида (Ti, V, Cr, Mn, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta и W), везују за себе излучен угљеник из мартензита и формирају сложене карбиде који се на различитим температурама растварају у аустениту.

Изразита разлика при разлагању мартензита код нелегираних и легираних челика настаје тек у четвртом стадијуму при вишим температурама од 400-450°C, када се зађе у област најмање стабилности цементита. На нижим температурама могуће је само дифузија угљеника из мартензита и излучивање ϵ -карбида, док дифузија других легирајућих елемената и гвожђа почиње изнад 400°C.

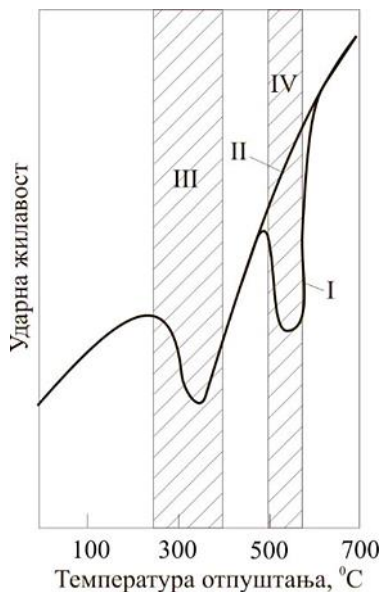
За време отпуштања легираних челика, карбидотворни елементи стварају комплексне карбиде типа $(Fe, Mn)_3C$, који се током времена мењају. Као резултат њихове промене може доћи до издвајања нове фазе на границама карбида, која расте на рачун полазног карбида, и раздвајања карбид типа M_3C и чврстог раствора. Такође, може доћи до разлагања карбида M_3C и образовања новог сложеног карбида уместо полазног карбида. Код челика легираних са Cr редослед промене карбида у току отпуштања је Fe_2C (ϵ -карбид) $\rightarrow M_3C \rightarrow M_7C \rightarrow M_{23}C_6$, док код челика легираних са Mo или W промена карбида одвија се по редоследу Fe_2C (ϵ -карбид) $\rightarrow M_3C \rightarrow M_2C \rightarrow M_6C$. Код челика легираних са Cr, Mo, V, W или Ti издвајање карбида легирајућих елемената доводи до пораста тврдоће и кртости при температурама отпуштања на 500-600°C, а последица те појаве је секундарна тврдоћа (сл. 7.9).



Слика 7.9 Промена тврдоће неких челика у зависности од температуре отпуштања [92,97,141]

7.2.3 ОТПУСНА КРТОСТ НАВАРЕНИХ ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА

Ако се неки челици отпуштају на температурама 250-400°C, или на температурама 500-550°C, долази до смањења њихове ударне жилавости, а сама та појава је позната као отпусна кртоост. Код легираних челика (сл. 7.10) могу се јавити две врсте отпусне кртости: *неповратна* (иреверзибилна), односно кртоост првог реда и *повратна* (реверзибилна), односно кртоост другог реда.



Слика 7.10 Зависност ударне жилавости челика од температуре отпуштања и брзине хлађења: I споро хлађење, II брзо хлађење, III - температурски интервал неповратне кртости, IV - температурски интервал повратне кртости [97, 141]

Неповратна или кртоост првог реда, настаје при отпуштању легираних челика на температурама 250-400°C, а битна одлика ове врсте кртости је пад жилавости, која се не може повратити ни после поновног отпуштања на истим температурама. Кртоост је изазвана просторним тродимензионалним напонским стањем насталим при неуниформном разлагању мартензита. Изглед прелома челичног материјала указује на *крти интеркристални лом*.

Повратна или кртоост другог реда, настаје код неких легираних челика који се после отпуштања на 500-550°C споро хладе, или сувише дуго држе на температури отпуштања. Ова врста отпусне кртости драстично смањује ударну жилавост челика и ствара хладне прслине, за чију је пропацију (раст - ширење) довољна мала енергија. Повратна отпусна кртоост може се спречити брзим хлађењем, тј. каљењем у води са температуре и 500-650°C. После тога добиће се влакнаста структура, чији је прелом карактеристичан за *жилав лом* (дуктилно стање), док се супротно томе, после спорог хлађења добија карактеристичан прелом за *крти лом* (крто стање) [125, 126, 127].

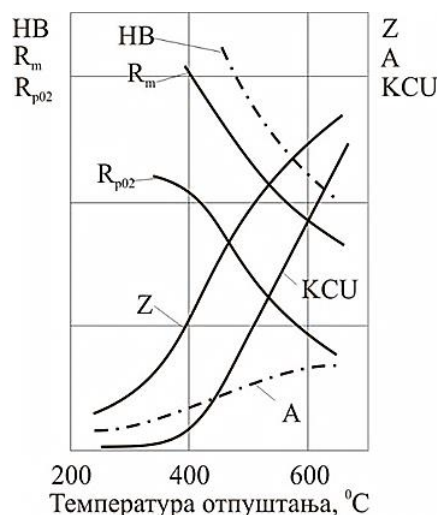
Суштинска разлика између кртости првог реда и кртости другог реда је у томе што је кртоост другог реда повратна, јер ако настане при отпуштању са температура између 500-550°C, може бити елиминисана после поновног отпуштања са нешто више температуре 600-650°C и брзог хлађења. Ако се поновно отпуштање изведе између 500-550°C, после дужег држања на овој температури, кртоост се може поново јавити. Кртоост другог реда најпре је запажена код легираних челика повећаног садржаја P, Mn, Cr и Si, или када челик истовремено садржи Cr, Ni и Mn. Садржај Mo или W у челику, чак и у мањим количинама (0,2-0,3% Mo или 0,5-0,7% W), знатно повећава његову отпорност према отпусној кртости.

Појава отпусне кртости другог реда највероватније је повезана са дифузијом хемијских елемената растворених на границама кристалних зрна, и засићењем површинских слојева овим хемијским елементима, без преципитације вишка финалних диспергованих фаза (карбида, нитрида, фосфида). Обогаћивање граница зрна фосфором има нарочито неповољан утицај, јер се тиме знатно смањује потребан рад за стварање прслина и њихово ширење између металних зрна.

Неки истраживачи повезују отпусну кртоност другог реда са преципитацијом диспергованих фаза (карбида, нитрида, фосфида и др.), из чврстог раствора α -ферита на границе зрна.

7.2.4 УТИЦАЈ ОТПУШТАЊА НА МЕХАНИЧКА СВОЈСТВА НАВАРЕНИХ ЧЕЛИКА

При отпуштању долази до разлагања мартензита, што доводи до структурних промена наварених челика, па самим тим и промене њихових механичких својстава. Склоност челика према појави *кртог лома* умањује се отпуштањем на ниским температурама 200-250°C, при чему долази до пада тврдоће и незнатног повећања јачине и жилавости. На промену тврдоће више утиче садржај угљеника у феритној основи од садржаја легирајућих елемената. При отпуштању челика са температура 500-680°C, долази до већег смањења јачине и напона течења, уз повећање дуктилности и контракције (сл. 7.11). До ових појава долази услед пада растворености угљеника у фериту, нестанку кохеренције између издвојених карбида и феритне фазе, појаве опорављања (релаксације) челика, пораста величине карбида и рекристализације.



Слика 7.11 Зависност механичких својстава челика од температуре отпуштања [92,97,141]

Ако се отпуштање изводи на истој температури, легирани челици који имају карбидотворне елементе, имаће већу тврдоћу од нелегираних челика. До овога долази због кашњења разлагања мартензита у легираним челицима због дејства карбидотворних легирајућих елемената и формирања комплексних карбида, чија је тврдоћа већа од тврдоће карбида гвожђа (цементита). Тврдоћа неких легираних челика при отпуштању на температурама од 500-600°C може се чак и повећати, ако садрже легирајуће елементе Cr, Mo, V и W, који се излучују у виду преципитата честица сложених карбида, односно ситних честица сличних карбиду. Ове честице су веома тврде и крте, а самим тим су и готово нулте дуктилности [92,97,141].

8. НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У НАВАРЕНИМ СПОЈЕВИМА

УВОД

При дејству спољашњих сила на површинама елемената техничких система, или под утицајем запреминских сила које дејствују у свакој материјалној тачки елемента, долази до деформација, при чему се јављају унутрашње силе које се супротстављају деформацији тј. *напони*. Поред сила насталих због различитих врста оптерећења, запреминских сила насталих услед инерције и гравитације, *померања, деформације и напоне* код наварених елемената може да изазове и температурско поље које настаје при процесу наваривања, термичке и механичке обраде, или за време експлоатације због утицаја околне средине [10,13,19,52,60]. Највећи утицај на појаву померања, деформација и напона у навариваним елементима имају врста и интензитет спољашњег оптерећења и температурски циклус при наваривању, тако да у њима настају две врсте напонско-деформацијског стања: *напонско-деформацијско стање услед спољашњих сила и сопствено напонско-деформацијско стање услед наваривања* [149,173,185]. Практично, у навареним елементима истовремено дејствују напони услед спољашњих сила и сопствени напони који у одређеним условима могу да се *суперпонирају* (сабирају), и доведу до лома [60,97,128,148].

Сопствено напонско-деформацијско стање у навареним елементима, последица је неравномерног загревања и хлађења материјала (ометено ширење и скупљање), при чему се иницирају физички, хемијски и металуршки процеси у навару и његовој околини. Неки од тих процеса су: дифузија неметалних и металних хемијских елемената, специфични начини рекристализације метала, напонско-деформацијске промене и др.

За разлику од напонско-деформацијског стања услед спољашњих сила, сопствено напонско-деформацијско стање настаје за време и после процеса наваривања. Тако се разликују: *прелазно* и *заостало* напонско-деформацијско стање. *Прелазно напонско-деформацијско стање* првенствено утиче на заварљивост материјала, и има велики значај при изради техничких система. *Заостало напонско-деформацијско стање* има изузетан значај из аспекта пројектовања и експлоатације техничких система [62,63,87,97,149,165].

Свака тачка навариваног материјала која се нађе у температурском пољу, зависно од геометријског распореда у односу на центар топлотног извора, пролази кроз различите температурске циклусе, при чему је изложена променљивим и врло сложеним напонско-деформацијским стањима. Различити су узроци настајања сопственог напонско-деформацијског стања: еластичне и пластичне деформације због неравномерног загревања и хлађења метала при наваривању; еластичне и пластичне деформације при монтажи, демонтажи или доради; фазне трансформације услед неједновремених структурних промена метала и др. Зато се разликују: *сопствени термички напони* и *сопствени структурни напони*. Због сложености процеса који прате појаву сопственог напонског стања, изузетно их је тешко математички описати, па је зато само за мали број једноставних примера могуће добити тачна аналитичка решења, и то за сопствене термичке напоне, док се сопствени структурни напони не могу описати до сада познатим математичким методама.

Према начину дејства напони могу бити: *линијски (једноосни), равански (двоосни) и запремински (троосни)*. У пракси, напони и деформације код наварених спојева дејствују у свим правцима, променљивог су смера и интензитета, а ова подела је изведена према правцима дејства напона највећег интензитета тзв. *главних напона* с циљем олакшавања аналитичких прорачуна [58,128,173,186].

Заостало напонско стање је неизбежно при извођењу различитих заварених и наварених појава, Ово стање има велики утицај на карактеристике спојева, па су зато изведена бројна експериментална истраживања која су омогућила да се утврди расподела заосталих напона сучеоног заварених и наварених спојева многих техничких метала различитим поступцима [60,63,128]. Поред *аналитичких метода* за израчунавање заосталог напонског стања развијен је већи број приближних тзв. *нумеричких метода* и већи број *експерименталних метода* [39,123,173,186,193]. У зависности од места у запремини навареног споја где настаје

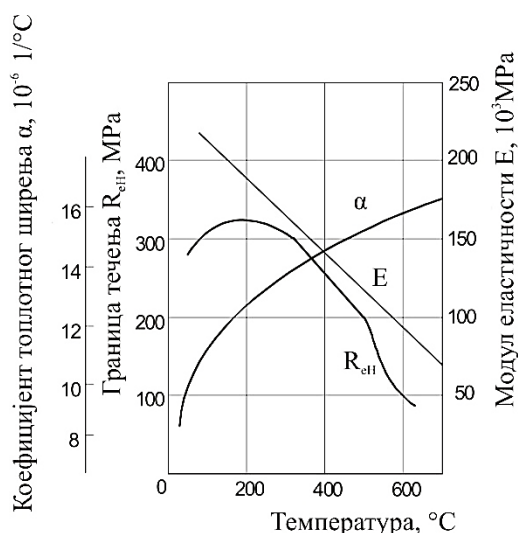
уравнотежавање заосталих напона они се деле на: *заостале макроскопске напоне (I врсте)*, *заостале микроскопске напоне (II врсте)* и *заостале субмикроскопске напоне (III врсте)*. При процесу наваривања најинтересантнији су *макрозапремински заостали напони*, па су они и највише проучавани [60,87,128,186].

8.1 ТЕРМИЧКИ НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ ПРИ НАВАРИВАЊУ

Процес наваривања остварује се локалним загревањем основног и додатног материјала, њиховим стапањем и хлађењем наvara и околног основног материјала, што ствара неравномерно температурско поље и ометено ширење и скупљање материјала, односно термичке напоне. Они су сразмерни температурском градијенту у правцу нормале на изотермичку површину ($gradT = \partial T / \partial n$), односно порасту или паду температуре. Ниво термичких напона је виши при хлађењу него при загревању, због веће разлике температура у појединим тачкама, што је посебно изражено при наваривању елемената већих попречних пресека, или при нашошењу наварених слојева веће дебљине. Температурско поље је у функционалној зависности од координата појединих тачака навариваног односно радног дела у односу на изворе топлотне енергије, па су термички напони дати изразом:

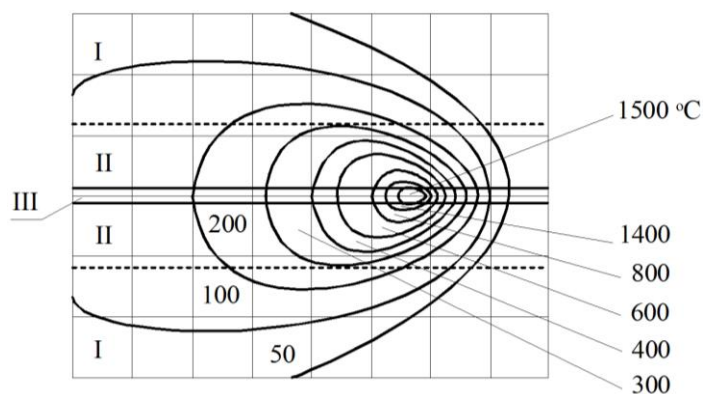
$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (8.1)$$

где је: E - модул еластичности навариваног материјала, α - коефицијент линеарног ширења навариваног материјала и ΔT - температурска разлика између геометријских тачака основног материјала. Величине E и α и напон течења R_{eH} неког метала зависе од температуре појединих тачака навареног радног дела, односно од температурског поља, па је проблематика термичких напона и деформација веома сложена, како са гледишта теоријског објашњења, тако и са гледишта експерименталне практичне провере. Може се закључити, да ће температурски градијент при наваривању неког метала бити већи, што је дебљина тог метала већа и што је његова термичка проводност мања.



Слика 8.1 Промена неких карактеристика челика са температуром [63,97,141]

При анализи напонско-деформацијског стања при наваривању челика треба имати у виду чињеницу да при нижој температури од 300°C настају еластичне деформације и одговарајући термички напони, при температури 300-600°C настају еластично-пластичне деформације и одговарајући термички напони и при температури изнад 600°C настају пластичне деформације и одговарајући термички напони. Имајући ово у виду, температурско поље око покретног извора топлоте може се поделити на три зоне (сл. 8.2) у којима се јављају одређени типови деформација и термичких напона [165].



Слика 8.2 Температурско поље око покретног извора топлоте [63,97,141]

Зона I обухвата област у металу која је у току наваривања била загрејана до 300°C , у којој су се јавиле еластичне деформације и термички напони услед еластичних деформација.

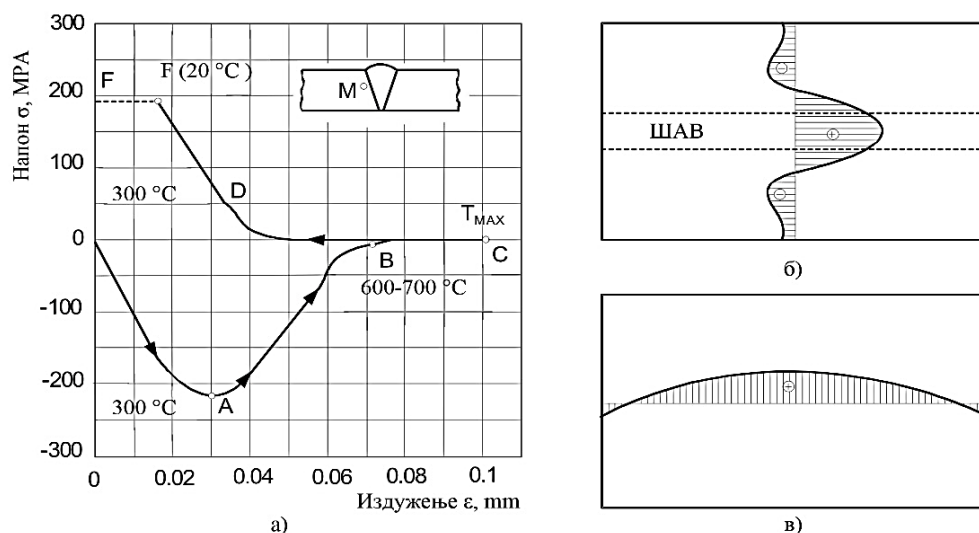
Зона II је најкритичнија област у металу, јер су у њој достигнуте температуре од $300\text{-}1500^{\circ}\text{C}$, што условљава појаву еластично-пластичних деформација и чисто пластичних деформација и појаву одговарајућих термичких напона. У овој зони се на изотерми од 600°C мења знак заосталих затежућих термичких напона у навару и ближој околини у притискујуће у даљим тачкама основног материјала.

Зона III представља област у металу у којој се постижу температуре изнад тачке топљења, па су својства навареног метала зависна од металуршких, технолошких, напонско-деформацијских и других фактора. Температурско поље може бити различитог облика и зависи од врсте навариваног метала, издашности топлотног извора и брзине кретања извора при наваривању. Тако су нпр. при наваривању алуминијума ове зоне веће, а растојање између изотерми се проширује. При наваривању већим брзинама зоне се сужавају, а изотерме су збијеније. У тренуцима кад почиње и када се завршава процес наваривања (мирује извор топлоте) температурско поље је у облику круга (као при тачкастом заваривању), а изотерме су представљене концентричним круговима око топлотног извора.

Ако се посматра материјална тачка "М" у ZUT-у, непосредно испод навара (сл. 8.3), где је достигнута највиша температура метала у чврстом стању и највећа брзина хлађења, уочава се да је тачка "М" у фази загревања изложена притиску због знатно веће запремине растопљеног метала од запремине чврсте фазе. Притисак на ту тачку изазива деформације и напоне, чији је однос линеаран до 300°C , јер важи *Хуков закон*. Са порастом температуре смањује се отпор метала према деформацији тако да и при напону нижег интензитета настаје релативно велика деформација. Отпор метала према деформацији у подручју пластичног течења $600\text{-}700^{\circ}\text{C}$ је изузетно низак па су деформације релативно велике и када је интензитет напона близак нули.

Крајња тачка "С" на дијаграму (сл. 8.3а) одговара максималној прелазној деформацији, која је проузрокована највишом температуром у тачки "М" одређеном из њеног температурског циклуса. Када се топлотни извор довољно удаљи од посматране тачке "М" наступа фаза хлађења и при температури од око 600°C притискујући напони прелазе у затежуће, па је ово прелазно напонско-деформацијско стање у току хлађења до око 300°C критично, због могућности појаве тзв. врућих прслина како у навару тако и у ZUT-у. При даљем хлађењу од 300°C до температуре околине, зависност затежућег напона и деформације опет постаје линеарна, јер се прелази у еластично подручје у коме важи *Хуков закон еластичности*.

Када се наварени слој метала охлади до температуре околине у њему и околном металу остају последице, а то су трајне деформације и заостали сопствени напони који могу променити облик комада или довести до појаве прслина и лома. Трајне деформације и промена облика јављају се при наваривању делова тањих пресека, а манифестују се као: *уздужно скупљање, попречно скупљање, угаоне деформације, угиби и витоперење наварених елемената*.



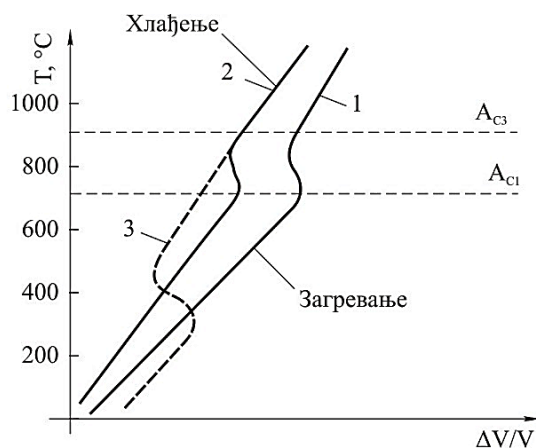
Слика 8.3 Прелазно напонско-деформацијско стање тачке ZUT-a (а), заостали попречни напони (б), заостали уздужни напони (в) [63, 97, 141]

8.2 СТРУКТУРНИ НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ ПРИ НАВАРИВАЊУ

Поред термичких напона и деформација у навариваним елементима могу се појавити и структурни напони и деформације. У случају наваривања новоизрађених елемената или при репаратурном наваривању оштећених елемената посебан значај имају термички напони, мада се понекад не могу занемарити и структурни напони који зависе од хемијског састава челика, кинетике промене аустенита, брзине хлађења, времена $t_{8/5}$ и др. [62,63,78,165,191].

Да би се разумео механизам настајања структурног напонско-деформацијског стања при наваривању неопходно је размотрити ток структурних промена у навариваном металу. При загревању навариваних елемената од челика, на температурама 1050-1150°C достиже се солидус температура у површинским слојевима метала, тј. почиње топљење. Дубина на којој је достигнута ова температура назива се дубина уваривања. Испод тога налази се зона која је била преведена у чисто аустенитну структуру, или феритно-аустенитну, односно феритно-цементитну структуру. При хлађењу долази до трансформације аустенита у фазе различитих специфичних запремина (перлит, бејнит, мартензит), при чему се стварају различита напонско-деформацијска стања. Најнеповољнија је мартензитна структура, која има највећу специфичну запремину, која се не може слободно ширити, зато што је окружена другим структурама мањих специфичних запремина (слично као загревање и хлађење челичног укљештеног штапа). Ако се мартензитна трансформација аустенита одвија на вишим температурама, напони притиска стварају веће пластичне деформације, док та трансформација на нижим температурама ствара мање деформације. Када се заврши хлађење навариваног челика до температуре околине, у зонама са мартензитном структуром, долази до затежућих напона који могу надмашити јачину челика и изазвати прелине и каткад лом.

При наваривању или заваривању нискоугљеничних (незакаљивих челика) величина структурних напона је изузетно мала, јер се фазне промене одвијају у пластичном подручју (сл. 8.4-крива 2) при температурама изнад 600°C, па се зато између осталог ови челици сматрају добро заварљивим. Међутим, код нисколегираних (микролегираних), високолегираних и високоугљеничних челика (закаљивих челика) фазне промене при хлађењу (сл. 8.4-крива 3) одвијају се у еластично-пластичној зони при температурама 600-300°C или испод 300°C (подручје потхлађеног аустенита), што онемогућава слободно ширење мартензита, па у њему ствара притискујуће напоне, а у околној структури затежуће напоне. Они могу довести до појаве хладних прелина што се одражава на погоршање заварљивости, па се каже да је реч о условно заварљивим челицима.



Слика 8.4 Промена запремине при наваривању две врсте челика: 1) промена запремине при загревању обе врсте челика, 2) промена запремине при хлађењу незакаљивог челика, 3) промена запремине при хлађењу закаљивог челика [62, 141]

Структурне промене при наваривању челика не зависе само од температуре трансформације аустенита односно хемијског састава челика, већ и од времена трајања преображаја појединих структурних фаза. Због значајног утицаја овог времена у *металургији заваривања* уводи се појам *кинетики промене аустенита*. Тако се на пример, у току процеса хлађења при веома кратком времену задржавања у температурском интервалу 800-500°C добија мартензит, при нешто дужем времену задржавања бејнит, а при још дужем времену задржавања перлит. Време хлађења $t_{8/5}$ обрнуто је пропорционално *брзини хлађења*. Што је то време краће брзина хлађења је већа и обрнуто [97,141]. Ако челик садржи довољну количину угљеника и легирајућих елемената, аустенит ће се при брзини хлађења већој од критичне трансформисати у тетрагонални мартензит. То изазива кртост челика испод навара због велике тврдоће и напона течења, а мале жилавости тог слоја основног материјала.

8.3 МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКОГ СТАЊА

Могућност да се процени ниво заосталих напона и деформација при наваривању елемената техничких система је од великог значаја, нарочито код одговорних конструкција које су изложене дејству сложених и променљивих спољашњих ударних оптерећења. Познавањем напонско-деформацијског стања у елементима може понекад избећи скупу термичку обраду, смањити димензије и масе елемената, повећати степен сигурности, смањити трошкови израде и др. То је условило развој бројних *аналитичких*, *нумеричких* и *експерименталних* метода за одређивање заосталих напона и деформација [39,60,97,188,189].

Аналитичке методе представљају различите рачунске варијационе методе, везане за проблем термоеластичности различитих материјала у одређеним условима, са одређеним упрошћењима у циљу добијања употребљивих резултата. Ове методе најчешће представљају упрошћен прорачун термичких (заосталих) напона и деформација, а њихова погодност се огледа у једноставности примене због повезаности заосталих напона са осталим утицајним факторима [128,173].

Нумеричке методе, уз примену рачунара, представљају моћно средство за довољно тачан прорачун заосталог напонско-деформацијског стања. Применом ових метода могу се узети у обзир промене термофизичких карактеристика метала у зависности од температуре, затим различити облици, димензије и врсте додатних материјала, као и различити гранични услови наваривања. Најчешће су у примени тзв. *итерацијске методе*, а инжењерска метода коначних елемената је нашла највећу примену. Ови прорачуни се све више примењују за одређивање напонско-деформацијског стања, проверу резултата аналитичких метода, и као могућу замену за веома скупе и дуготрајне експерименталне процедуре [90,91,170,171].

Експерименталне методе за одређивање заосталог напонско-деформацијског стања су најпоузданије и најефикасније методе, али су доста скупе па је због тога њихова примена

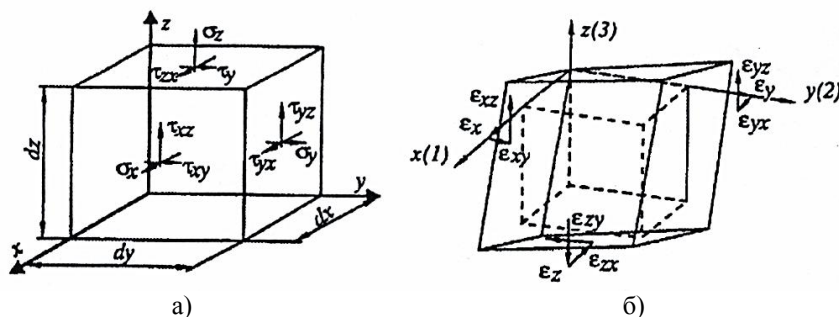
ограничена. Најчешће се примењују при верификацији резултата добијених аналитичким и нумеричким методама, као и при истраживачким радовима који се односе на наваривање нових материјала и увођење нових технологија. Експерименталне методе су незаменљиве при одређивању напонско-деформацијских стања која се математички не могу изразити, као што је случај код напона и деформација насталих услед структурних промена при наваривању [93, 97].

8.3.1 МАТЕМАТИЧКО ДЕФИНИСАЊЕ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКОГ СТАЊА

8.3.1.а Напони и деформације

Да би се дефинисало *напонско поље* или *деформацијско поље* неопходно је поћи од напонско-деформацијског стања које се односи на елементарну запремину (материјалну тачку).

Под утицајем спољашњих фактора (механичких, термичких, електромагнетних и других сила и момената) у посматраном телу настају унутрашње силе које сведене на елементарну површину представљају напоне. Напони се приказују *векторима напона* који зависе од оријентације у односу на правац нормале елементарне површине и положаја посматране материјалне тачке у односу на усвојени координатни систем (најчешће Декартов правоугли координатни систем). Познато је из математике да је за дефинисање неког вектора па и вектора напона потребно три компоненте тог вектора. Вектор напона је дефинисан правцем, смером и интензитетом, а свакој равни у истој тачки одговара други вектор напона. То значи да је напон као механичка величина сложеније природе и заправо представља *тензор*, јер се при промени координата због измене координатног система понаша по *тензорским правилима* [67].



Слика 8.5 Елементарна запремина са распоредом: а) компоненти тензора напона, б) компоненти тензора деформације [48,60,141]

Ако се посматра елементарна запремина коју ограничавају равни паралелне са координатним равнима, онда се разлагањем *тензора напона* на те равни добијају нормалне компоненте тог тензора које се означавају са σ_{ij} . Истовремено се добијају и две тангенцијалне компоненте које се означавају са τ_{ij} (сл. 8.5а) и леже у посматраним равнима. Као и напони и деформације су тензорске величине, јер су деформације и напони међусобно повезане и зависне величине а распоред компоненти тензора деформације приказан је на (сл. 8.5б). По аналогији са *тензором напона* и код *тензора деформације* постоје *нормалне компоненте* ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$) тзв. *тензорске компоненте*, и *тангенцијалне компоненте* ($\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$) тзв. *инжењерске компоненте*.

Веза између тензорских и инжењерских компонената деформације дата је математичким изразима:

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy}; \epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \gamma_{xz}; \epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \gamma_{yz} \quad (8.2)$$

За означавање компоненти тензора напона и тензора деформације најчешће се користе два индекса (i, j), при чему први индекс означава правац нормалне равни у којој дејствује одговарајућа компонента тензора напона или деформације, а други индекс означава правац њиховог дејства.

У свакој тачки елементарне запремине може настати девет компоненти тензора напона и девет компоненти тензора деформације што се може изразити матрицом напона и деформације:

$$T_{\sigma} = (\sigma_{ij}) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}; T_{\varepsilon} = (\varepsilon_{ij}) = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (8.3)$$

при чему је очигледно да су ово симетрични тензори другог реда.

Будући да су у равнотежним условима тангенцијалне компоненте тензора напона и компоненте тензора деформација индекса xy , и yx , xz и zx , yz и zy једнаке:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (8.4)$$

као и компоненте тензора деформације

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}, \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx}, \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} \quad (8.5)$$

може се рећи да у свакој тачки елементарне запремине могу настати шест различитих компоненти тензора напона и шест различитих компоненти тензора деформације.

За случај тродимензионалне (просторне) деформације, компоненте тензора деформације у односу на Декартов правоугли координатни систем, могу да се изразе преко компоненти вектора померања (u , v , w) помоћу математичких израза, који важе за инфинитезимална померања:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (8.6)$$

где је u - померање у правцу x осе, v - померање у правцу y осе и w - померање у правцу z осе. Ако се користи тензорска нотација изрази за резултујући напон могу се написати у облику:

$$\sigma_i^{(n)} = \sigma_{ij} \cdot n_j \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (8.7)$$

Изрази за деформацију се могу написати у облику:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (8.8)$$

При наваривању, слично као и при заваривању, ознака σ_x односи се на нормални напон дуж осе навара, σ_y на нормални напон попречно на осу навара и σ_z на нормални напон који је управан на раван наваривања. Правци и смерови тангенцијалних компоненти тензора напона дефинишу се на основу праваца и смерова нормалних напона, а исто важи и за компоненте тензора деформације (сл. 8.5б).

За дефинисање напонско-деформацијског стања неке материјалне тачке при наваривању, неопходно је одредити три компоненте вектора померања, шест компоненти тензора деформације, шест компоненти тензора напона и температуру, што је практично решив математички проблем. Ипак је одређивање свих ових величина изузетно сложен задатак, па се експерименталним истраживањима најчешће одређују главни напони ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) и главне деформације ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$). За раванске проблеме главни напони и деформације могу се одредити и графички помоћу два, а за просторне проблеме помоћу три Морова круга [60,128].

8.3.1.6 Једначине равнотеже у посматраној области чврстог тела

Ако се посматра произвољна област R и површина S са јединственом нормалом n , која припада овој области код неког чврстог тела у равнотежи, претпоставља се да су резултујућа сила и резултујући момент у оваквој произвољно изабраној тачки на површини S једнаки нули. У посматраној области R , силе које дејствују на материјал могу да буду површинске и запреминске. Површинске силе дејствују на јединицу посматране површине S , док запреминске силе дејствују на јединицу запремине посматране области R . Из услова равнотеже проистиче да сума свих тих сила мора да буде једнака нули, што је дато изразом:

$$\sum N_i = \int_R \rho \cdot f_i \cdot dV + \int_S \sigma_i^{(n)} \cdot dS = 0. \quad (8.9)$$

Резултујући моменат (спрег сила) у посматраној тачки исто је једнак нули што је дато изразом:

$$\sum M_i = \int_R \rho \cdot e_{jpr} \cdot x_p \cdot f_q \cdot dV + \int_{-S} e_{jpr} \cdot x_p \cdot \sigma_q^{(n)} \cdot dS = 0, \quad (8.10)$$

где је: x_p - координата вектора положаја посматране материјалне тачке у односу на координатни почетак; ρ - специфична запремина (густина) посматраног материјала; e_{jpr} - пројектована компонента главне деформације; f_{Ry} - резултујућа запреминска сила од спољашњег оптерећења; $\sigma_q^{(n)}$ - резултујући напон од спољашњег оптерећења на посматраној површини.

Коришћењем тензорске нотације једначине равнотеже (8.9) и (8.10) могу да се напишу:

$$\int_R \rho \cdot f_i \cdot dV + \int_S \sigma_{ij} \cdot n_j \cdot dS = 0; \quad (8.11)$$

$$\rho \cdot e_{jpr} \cdot x_p \cdot f_q \cdot dV + \int_S e_{jpr} \cdot x_p \cdot \sigma_{rq} \cdot n_r \cdot dS = 0 \quad (8.12)$$

Применом Гаусове теореме о дивергенцији трансформише се површински интеграл у запремински па се добијају једначине равнотеже:

$$\int_S \sigma_{ij} \cdot n_j \cdot dS = \int_R \sigma_{ij,j} \cdot dV = 0; \quad (8.13)$$

$$\int_S \rho \cdot e_{jpr} \cdot x_p \cdot \sigma_{rp} \cdot dS = \int_R \rho \cdot e_{jpr} (\sigma_{rq} \cdot x_p)_{,r} \cdot dV = \int_R \rho \cdot e_{jpr} (\sigma_{rq,r} \cdot x_p + \sigma_{pq}) \cdot dV. \quad (8.14)$$

После тога једначине (8.11) и (8.12) могу да се напишу у облику:

$$\int_R (\sigma_{ij,j} + \rho \cdot f_i) \cdot dV = 0; \quad (8.15)$$

$$\int_R e_{jpr} [x_p (\sigma_{rq,r} + \rho f_q) + \sigma_{pq}] \cdot dV = 0. \quad (8.16)$$

Ове математичке релације морају да важе за целу посматрану област R неког чврстог тела, а да би интегрални били једнаки нули морају да буду подинтегралне функције једнаке нули из чега проистичу једначине:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \cdot f_i = 0; \quad (8.17)$$

$$\sigma_{jk} = \sigma_{kj}. \quad (8.18)$$

Систем једначина (8.17) описује равнотежу међусобног дејства сила посматраних области чврстог тела, док систем једначина (8.18) описује равнотежу момената у посматраној области чврстог тела. Системи једначина (8.18) приказују познат закон о еквивалентности тангенцијалних напона, као и то да је тензор напона симетричан тензор другог реда.

8.3.1.в Деформација у посматраној тачки чврстог тела

Применом тензорске нотације компоненте деформације у посматраној тачки чврстог еластичног тела дате су системом диференцијалних једначина:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (8.19)$$

Између компонената деформације мора да важи *правило компатибилности*:

$$\varepsilon_{ij,km} + \varepsilon_{km,ij} - \varepsilon_{ik,jm} - \varepsilon_{jm,ik} = 0, \quad (8.20)$$

што математичким језиком речено значи да функције компонента деформација морају бити такве да векторско поље померања мора бити једнозначно и континуално. То значи да при деформацији материјал физички мора да буде континуалан (механика континуума).

При промени координатног система поједине компоненте деформације израчунавају се из система једначина:

$$\varepsilon_{km} = \varepsilon_{ij} \cdot n_{ik} \cdot n_{jm}. \quad (8.21)$$

По аналогија са тензором напона, исто ће важити и за тензор деформације ($\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$), што значи да је *тензор деформације симетричан тензор другог реда* (8.3).

8.3.1.г Међусобна зависност напона и деформације

Ако се посматра неко чврсто тело [142,165], за кога важи *Хуков закон*, и ако се укључи температура, као променљива величина зависна од координата посматраних тачака и времена $T = T(x, y, z, t)$, тада важи систем једначина којима се описује деформација:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left[(1 + \mu) \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \mu \cdot \sigma_{kk} \right] + \delta_{ij} \cdot \alpha (T - T_0), \quad (8.22)$$

где је: E - модул еластичности, μ - Поасонов број, α - коефицијент линеарног ширења материјала, δ_{ij} - Кронекеров симбол ($\delta_{ij} = 1$ за $i=j$, $\delta_{ij} = 0$ за $i \neq j$).

Промена елементарне запремине чврстог тела услед релативног померања, односно промене температуре, може се изразити преко једначине:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = e = \varepsilon_{kk}, \quad (8.23)$$

Промена напона у чврстом телу услед релативних померања може се изразити преко једначине:

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma = \sigma_{kk}. \quad (8.24)$$

За општи случај троосног напрезања у некој тачки материјала посматраног чврстог тела, где дејствују нормални напони $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, *принцип суперпозиције* омогућава израчунавање укупних нормалних деформација:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[\sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z) \right]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[\sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z) \right]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[\sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y) \right]. \end{aligned} \quad (8.25)$$

Заменом израза (8.25) у једначину (8.23), и после сређивања, добија се једначина која даје везу између нормалних напона и нормалних деформација:

$$\varepsilon_{kk} = \sigma_{kk} \cdot \frac{(1 - 2\mu)}{E} + 3\alpha \cdot (T - T_0), \quad (8.26)$$

где први члан здесне стране ове једначине описује релативну промену јединичне запремине чврстог тела услед дејства напона, а други члан описује релативну промену јединичне запремине услед промене температуре.

Једначина (8.26) може се написати у облику:

$$\sigma_{kk} = \frac{E}{(1 - 2\mu)} \left[\varepsilon_{kk} - 3\alpha \cdot (T - T_0) \right]. \quad (8.27)$$

За материјал код кога важи *Хуков закон еластичности* може се успоставити зависност између тангенцијалних (смичућих) напона и смичућих деформација, полази се од разматрања материјалне тачке чврстог тела у којој дејствују напони, при чему је један од ових нормалних напона притискујући, а други затежући. Ако се претпостави да су ови напони по апсолутним вредностима једнаки, онда је нормалан напон једнак нули, а смичући напон достиже максималну вредност.

Компоненте деформације одређене су изразима:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(1+\mu) \cdot \sigma_z; \quad \varepsilon_z = \frac{1}{E}(1+\mu) \cdot \sigma_z; \quad \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \sigma_z. \quad (8.28)$$

Пошто је $\tau = \sigma_z = \sigma_y$, добија се општи израз за угаоне деформације:

$$\gamma_{ij} = \frac{2(1+\mu)}{E} \tau_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = \frac{(1+\mu)}{E} \tau_{ij}. \quad (8.29)$$

Из израза (8.29) следи да је смичућа деформација пропорционална смичућем напону. Често се уместо горњих релација између Поасоновог коефицијента (μ) и модула еластичности (E) користи модул клизања (G).

Заменом израза (8.27) у једначину (8.22) и после трансформације добија се једначина:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1+\mu)} \left[\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon_{kk}}{(1-2\mu)} - \delta_{ij} \cdot \frac{(1+\mu)}{(1-2\mu)} \alpha \cdot (T - T_0) \right]. \quad (8.30)$$

Ако се компоненте материјала чврстог тела, коефицијента еластичности (E) и Поасонов коефицијент (μ) изразе помоћу Ламеових константи добија се:

$$N = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad \Lambda = \frac{\mu \cdot E}{(1+\mu)(1-2\mu)}. \quad (8.31)$$

Тада се једначине (8.22) и (8.30) могу написати у облику:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2N} \cdot \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \frac{\Lambda}{(3\Lambda + 2N)} \cdot \sigma_{kk} \right) \sigma_{ij} \cdot \alpha \cdot (T - T_0), \quad (8.32)$$

$$\sigma_{ij} = 2N \cdot \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \cdot \Lambda \cdot \varepsilon_{kk} - \delta_{ij} \cdot (3\Lambda + 2N) \cdot \alpha \cdot (T - T_0). \quad (8.33)$$

Из система једначина за деформације и напоне (8.32) и (8.33) проистиче да је за решење проблема термоеластичности неопходно познавање температурског поља у разматраном чврстом телу, а да би се то постигло морају се знати основни закони преношења топлоте.

8.3.1.д Основне једначине преношења топлоте

Са места више температуре до места ниже температуре у чврстом телу топлота се у општем случају може преносити: *провођењем* (кондукцијом), *струјањем* (конвекцијом-прелазом) и *зрачењем* (радијацијом). При разматрању напонско-деформацијског стања у чврстом телу услед промене температуре (температурског градијента) од посебног значаја је познавање простирања топлоте провођењем, док простирање топлоте конвекцијом и зрачењем имају свој значај као гранични услови [36,142,165,166].

Основна једначина простирања топлоте на основу Фуријеовог закона који каже, да је проток топлоте (топлотни флукс) кроз јединицу површине у јединици времена, директно сразмеран паду температуре (температурском градијенту) у правцу нормале на посматрану површину, што се може представити математичким изразом:

$$q_0 = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (8.34)$$

где је q_0 - топлотни проток (флукс), λ_T - термичка проводност и n - нормала на посматрану површину.

Разматрањем прираста температуре у правцу појединих оса координатног система може се написати основна једначина провођења топлоте:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_T \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_T \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \cdot dV + q_0 \cdot dV = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} dV. \quad (8.35)$$

Применом тензорске нотације израз (8.35) може се написати у облику:

$$\left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial i} \right)_{,i} + q_0 = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (8.36)$$

Ако се усвоји апроксимација (упрошћење) да је термичка проводност у целом посматраном чврстом телу константна вредност добијају се изрази:

$$\lambda_T \cdot T_{,ii} + q_0 = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (8.37)$$

односно:

$$T_{,ii} + \frac{q_0}{\lambda_T} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (8.38)$$

Ако се занемари утицај топлоте, настале услед претварања механичке енергије у топлоту, једначина провођења топлоте има облик:

$$T_{,ii} + \frac{q_0}{\lambda_T} - \frac{(3\Lambda + 2N)}{\lambda_T} \alpha \cdot T_0 \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (8.39)$$

Једначина (8.39) је основна једначина провођења топлоте, а њено решавање у случају наваривања за различите граничне услове и различите изворе топлоте, изводи се занемаривањем промене јединичне запремине у току времена [97,141,166].

8.3.1.e Основни принципи решавања проблема термоеластичности

Решавање проблема термоеластичности своди се на математичко решавање система једначина и одређивање непознатих величина. Одређивање ових непознатих величина изводи се помоћу система од три једначине равнотеже или кретања, система од шест једначина зависности између напона и деформације, система од шест једначина зависности између деформације и померања и једне једначине за провођење топлоте. То значи, да се проблем своди на решавање система од шеснаест једначина са шеснаест непознатих величина, што је математички лако решив проблем.

Једначине равнотеже, и једначине кретања применом тензорске нотације имају облик:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad (8.40)$$

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (8.41)$$

при чему је прва једначина равнотеже, а друга једначина кретања.

Једначине зависности између напона и деформација, применом тензорске нотације, имају облик:

$$\sigma_{ij} = 2N \cdot \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \cdot \Lambda \cdot \varepsilon_{kk} - \delta_{ij} (3\Lambda + 2N) \cdot \alpha (T - T_0). \quad (8.42)$$

Једначине зависности између деформације и померања применом тензорске нотације имају облик:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (8.43)$$

Једначина за провођење топлоте применом тензорске нотације има облик:

$$T_{,ii} + \frac{q_0}{\lambda_T} - \frac{(3\Lambda + 2N)}{\lambda_T} \alpha \cdot T_0 \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (8.44)$$

Решења ових једначина морају да задовоље одговарајуће граничне услове који могу бити изражени: *по померањима*, *по напонима* или *комбиновано* (за један део чврстог тела решење се тражи по померањима, а за други по напонима).

Гранични услови по померањима дају се на два начина:

$$\begin{aligned} \text{за } t = 0, u_i &= g_i^{(1)}(x_i), \frac{\partial u_i}{\partial t} = g_i^{(2)}(x_j), T = G_T(x_j); \\ \text{за } t > 0, u_i &= h_i(x_j, t), T = G^T(x_j, t). \end{aligned} \quad (8.45)$$

Гранични услови по напонима дају се као $\sigma_{ij} \cdot n_j = P_i(x_k)$. У зависности од граничних услова бира се и поступак прорачуна тако да се повезују претходни изрази (8.40 - 8.43), чиме се добија основна једначина по напонима, по или комбиновано.

Основне једначине термоеластичности могу се сада изразити по померањима, тако да се до једначина равнотеже долази на основу једначину (8.42), која има облик:

$$\sigma_{ij,j} = 2N \cdot \varepsilon_{ij,j} + \delta_{ij} \cdot \Lambda \cdot \varepsilon_{kk,j} - \delta_{ij} (3\Lambda + 2N) \alpha (T - T_0), \quad (8.46)$$

под претпоставком да су λ , G , и α непроменљиве у целом чврстом телу.

Пошто се други и трећи члан здесне стране знака једнакости разликују од нуле само за $i = j$, једначине провођења топлоте свде се на облик:

$$2N \cdot \varepsilon_{ij,j} + \Lambda \cdot \varepsilon_{kk,i} - (3\Lambda + 2N) \alpha \cdot T_{,i} + F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}. \quad (8.47)$$

Једначине (8.43) сада добијају облике:

$$\varepsilon_{ij,i} = \frac{1}{2} (u_{i,ji} + u_{j,ii}) = \frac{1}{2} (u_{j,kk} + u_{k,kj}), \quad (8.48)$$

$$\varepsilon_{ij,j} = \frac{1}{2} (u_{i,jj} + u_{j,ij}) = \frac{1}{2} (u_{i,kk} + u_{k,ik}). \quad (8.49)$$

Једначина провођења топлоте у условима термоеластичности сада има облике:

$$N \cdot u_{i,kk} + N \cdot u_{k,ik} + \Lambda \cdot u_{k,ki} - (3\Lambda + 2N) \cdot \alpha \cdot T_{,i} + F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (8.50)$$

односно

$$N \cdot u_{i,kk} + (\Lambda + N) u_{k,ik} - (3\Lambda + 2N) \alpha \cdot T_{,i} + F_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}. \quad (8.51)$$

Имајући у виду да је реч само о напонима изазваним температурским градијентом, уз претпоставку да нема запреминских сила ($F_i = 0$), и да под утицајем температурског градијента не настају знатније инерцијалне силе $\rho \cdot \ddot{u}_{i,t} = 0$ једначине (8.50) и (8.51) добијају следеће облике:

$$N \cdot u_{i,kk} + (\Lambda + N) \cdot u_{k,ik} = (3\Lambda + 2N) \cdot \alpha \cdot T_{,i}. \quad (8.52)$$

односно

$$u_{i,kk} + \frac{1}{1-2\mu} \cdot u_{k,ki} = \frac{2(1+\mu)}{(1-2\mu)} \cdot \alpha \cdot T_{,i}. \quad (8.53)$$

Када је $\partial^2 u_i / \partial t^2$ односно $\ddot{u}_{i,t} = 0$, члан здесне стране знака једнакости у једначини (8.50) отпада, па настаје квазистационарно дејство термоеластичности материјала чврстог тела. Из једначине (8.50) јасно је да тада израз за запреминску силу постаје:

$$F_i = (3\Lambda + 2N) \cdot \alpha \cdot T_{,i}, \quad (8.54)$$

одакле се види да је дејство термичких напона анулирано и да се проблем своди на изотермички проблем, па се та чињеница користи при експерименталном одређивању термичких напона.

Основне једначине термоеластичности могу се изразити и преко напона, ако се користе гранични услови по напонима:

$$(3\Lambda + 2N) \cdot \sigma_{ij,kk} + 2(\Lambda + N) \cdot \sigma_{kk,ij} + 2\alpha \cdot N(2\Lambda + N) \cdot \left[\delta_{ij} \cdot \frac{(3\Lambda + 2N)}{(\Lambda + 2N)} T_{,kk} + T_{,ij} \right] = 0, \quad (8.55)$$

односно

$$(1 + \mu) \cdot \sigma_{ij,kk} + \sigma_{kk,ij} + \alpha \cdot E \left[\delta_{ij} \cdot \frac{(1 + \mu)}{(1 - \mu)} T_{,ij} \right] = 0. \quad (8.56)$$

Систем једначина (8.50) или (8.51) заједно са једначином за провођење топлоте (8.44) омогућавају да се одреди напонско и температурско поље. Детаљним проучавањем ових једначина може се уочити да су њихова решења узајамно зависна и да се те две једначине могу спојити у једну, чиме се уводи тзв. *спрегнути принцип термоеластичности* [142].

8.3.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКОГ СТАЊА

Због потребе да се проуче напонско-деформацијска стања при наваривању или некој другој обради материјала (заваривање, термичка обрада итд.) развијене су или су у развоју бројне експерименталне методе. За разлику од аналитичких и нумеричких метода, експерименталним методама могу се одредити прелазно и заостало напонско-деформацијско стање настало због одвијања напред описаних процеса или услед дејства спољашњег оптерећења.

Све експерименталне методе за одређивање напонско-деформацијског стања могу се поделити у две основне групе: *методе са разарањем материјала* и *методе без разарања материјала*. Методе без разарања користе се и при контроли квалитета формираних спојева (заваривањем или наваривањем) на готовим елементима техничких система. Све ове методе, будући да служе за одређивање тензора деформације и тензора напона, називају се једним именом *тензометријске методе*.

Прву групу метода са разарањем материјала обухвата механичко-електричне методе, чија примена намеће потребу делимичног или потпуног разарања материјала поступцима сечења, кидања, урезивања, бушења и др., што може да утиче на релаксацију заосталог напонско-деформацијског стања, па самим тим и на тачност измерених величина. За регистровање величине померања, односно компонената деформације, најчешће се користе мерне траке различитих облика које раде на принципу промене електричног отпора, који се региструје на електричним мерним уређајима, при чему је очитана величина сразмерна мереној механичког величини [39,41,60,148,188,193].

Друга група метода без разарања материјала заснована је на неким физичким појавама које не доводе до разарања материјала. У ову групу сврставају се рендгенографске, ултразвучне, магнетне, и оптичке методе (фотоеластична, холографска и Моаре метода). У ову групу метода може се сврстати и *метода кртих лакова*, која се најчешће изводи у комбинацији са *методом мерних трака*, и *електроаналогна метода* [39,41,60,148,188,193].

Експерименталним методама углавном се одређује напонско-деформацијско стање у макрозапреминама наварених елемента, док се напонско-деформацијско стање у микрозапреминама одређује, углавном рендгенографском методом. Такође, експерименталним методама најтачније се одређује заостало напонско-деформацијско стање, па оне служе за проверу резултата добијених аналитичким и нумеричким методама.

8.4 УТИЦАЈ ПОСТУПАКА И ПАРАМЕТАРА НАВАРИВАЊА НА НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИЈСКО СТАЊЕ

Поред хемијског састава основног и додатног материјала, начина израде полупроизвода (ливење, ковање, механичка обрада, заваривање и др.), при репаратурном наваривању елемената техничких система велики утицај на величину сопственог (структурног и термичког) напонско-деформацијског стања имају *методе и параметри наваривања*. Заостали напони и деформације у навареним елементима не могу се у потпуности избећи. Ипак се избором одговарајућих метода и поступака, наваривања као и предузетим техничко-технолошким мерама, њихова величина и утицај на својства материјала наварених елемената могу свести на најмању могућу меру [42,43,44,97].

Изабрани метод и поступак наваривања преко количине унете топлоте има велики утицај на заостале напоне и деформације у навариваним елементима. Мање деформације изазива примена метода који се одликују већом концентрацијом, па се по томе начини наваривања могу сврстати по следећем редоследу: MAG/MIG (GMA), REL, TIG, EPP и најнеповољније гасно наваривање [153,154,155].

Изабрани параметри наваривања, поред хемијског састава материјала, имају пресудан утицај на величину и расподелу, како прелазног тако и заосталог напонско-деформацијског стања, при наваривању елемената техничких система. Основни параметри наваривања су: *топлотна снага извора, брзина наваривања, температура предгревања, брзина хлађења, дебљина навара и маса навариваног елемента* [97,141]. Пресудну улогу имају енергетски параметри, јачина струје и напон електричног лука и брзина наваривања, јер они одређују унос топлоте.

Топлотна снага извора изражава се ефективном снагом електричног лука, или гасног пламена, тако да повећањем снаге извора, до одређене критичне границе, повећава се и деформација навариваног елемента, а затим долази до смањења његове деформације. Што је већа концентрација топлотне енергије (топлотног флукса), мања је количина стопљеног материјала, мање су структурне промене у материјалу и мањи утицај температуре, па је и напонско-деформацијско стање нижег нивоа [156,157,158].

Брзина наваривања и температура предгревања имају сличан утицај, јер се предгревањем проширује температурска област изнад 600°C, чиме се смањује брзина хлађења, тако да се код закаљивих челика умањује могућност појаве кртих фаза, а тиме и прелина.

Дебљина навара и маса навариваног елемента знатно утичу на брзину хлађења навареног дела, па је захтевану дебљину навара боље постићи у више пролаза. Дебљина навареног дела знатно утиче на појаву напона преко количине унете топлоте и брзине хлађења. Делови мање дебљине, при наваривању, подлежу већој деформацији.

Брзина хлађења највише утиче на структуру навара, па самим тим, и на одређено напонско-деформацијско стање. Брзина хлађења зависи од основног материјала, дебљине елемента, температуре предгревања, дебљине навара и др.

Наведени и други фактори, као што су хемијски састав основног и додатног материјала, геометријски облик и димензије навариваних елемената, услови под којима се изводи наваривање и др. одређују облик температурског поља. Експериментално је доказано да до највећих пластичних деформација челика долази у областима температурског поља у којима је била прекорачена температура од 600°C. Тада напон течења опада на минималне вредности, при чему значајан утицај има однос ширине овом температуром захваћене области према укупној ширини навариваног елемента [47]. Према ауторима [47,198], до највеће деформације долази када је ширина области изложена температури изнад 600°C, приближно 15% од укупне ширине навариваних плоча, а када је ширина ове области мања или већа деформације су мање.

8.5 МЕТОДЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ЗАОСТАЛИХ НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА

На основу бројних теоријских и експерименталних истраживања дошло се до закључка да заостало напонско-деформацијско стање може да достигне високе нивое, тако да већ при доношењу првог оптерећења (услед суперпонирања заосталих напона и напона изазваних спољашњим оптерећењем), може доћи до појаве лома елемената и хаварије неког техничког система са катастрофалним последицама по систем, околину и људство. Стога се овом проблему придаје посебан значај, и предузимају различите мере за њихово умањење у току процеса, и за накнадно смањење заосталих напона и деформација после процеса наваривања.

Примена различитих метода за смањење напона, тј. релаксацију, има своје пуно оправдање, али се из економских разлога иде на јефтиније методе, при чему се води рачуна да се постигну позитивни ефекти. Неопходно је нагласити да је неопходно при отпуштању напона проблем добро проучити, јер нестручно отпуштање напона може да изазове супротан ефекат од очекиваног. Све релаксационе методе могу да се класификују у две основне групе: *механичке* (нетермичке) *методе* и *термичке методе*. Такође треба рећи да постоје и неки термомеханички начини отпуштања напона.

Механичке методе релаксације напонско-деформацијског стања засноване су на томе, да се непосредно после наваривања и потпуног хлађења примени механичка енергија, и материјал навара доведе у стање пластичности, тиме се стварају услови за успостављање напонске равнотеже. У механичке методе сврставају се: *искривање материјала навара, ваљање* (гњечење) *зоне навара, увођење спољашњег оптерећења изнад напона темеља, вибрациона метода и релаксација експлозијом* [10,62,97,141].

Термомеханички поступци састоје се из локалног загревања и хлађења наварених површина, често уз примену додатног оптерећења, како би се извршило превођење еластичне у пластичну деформацију, и променити знак заосталих напона [63,78].

Термичке релаксационе методе се односе на различите већ поменуте видове термичке обраде, које се примењују при наваривању елемената техничких система, како би се у њима смањило напонско-деформацијско стање у току процеса наваривања, или и после процеса наваривања у циљу снижавања нивоа заосталих напона и деформација. За смањење напонско-деформацијског стања при наваривању примењују се *претходне* и *накнадне* термичке обраде. Примена претходне термичке обраде (предгревање, догревање и прогревање) доводи до смањења напонско-деформацијског стања у току трајања процеса наваривања, чиме се постиже боља заварљивост условно заварљивих челика и смањује ниво заосталог напонско-деформацијског стања. У том циљу примењују се различите комбинације претходних термичких обрада, што је детаљније разјашњено у претходном одељку овог рада. Од накнадних термичких обрада најчешће се изводи *напонско жарчење* и *отпуштање* наварених елемената техничких система [10,97,141].

У литератури [10], приказани су резултати експерименталних истраживања из аспекта утицаја различитих метода релаксације заосталог напонско-деформацијског стања (вибрациона метода, релаксациона метода експлозијом и метода напонског жарчења), на отпорност према замору материјала, при различитим условима извођења експеримената. Такође, дато је међусобно поређење ефикасности ових метода из аспекта смањења заосталих напона и деформација.

9. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

УВОД

Експериментална истраживања су незаобилазна при развоју било које научне области, јер се добијају егзактни резултати на основу којих се верификују или одбацују резултати добијени аналитичким, нумеричким или неким другим истраживачким методама. Извођење експерименталних истраживања је дуготрајан, мукотрпан и скуп посао, јер захтева дефинисање процедуре истраживања, припрему узорака за испитивање, извођење различитих опита, понављање опита при најразличитијим условима испитивања, употреба најчешће врло скупе мерно-регулационе опреме, ангажовање обученог научно истраживачког кадра, сређивање и анализа добијених резултата итд. [164]. Да би се добили што поузданији резултати експерименталних истраживања неопходно је непрекидно радити на усавршавању научноистраживачког кадра, модификације постојећих и развоју нових експерименталних метода истраживања, модификацији постојеће и развоју нове опреме неопходне за извођење експерименталних истраживања, обезбеђивању приступа досадашњим резултатима истраживања и протоку информација о новим достигнућима, практичној припреми и праћењу постигнутих резултата истраживања и др. Потребно је рећи, да ниједно експериментално истраживање није узалудан посао, односно не може се рећи да је неки експеримент пропао, јер ако се и не добију очекивани резултати они ипак омогућавају корак напред у развоју истраживања и стицању нових сазнања.

Израда, експлоатација и одржавање техничких система, пред науком и технологијом постављају бројне захтеве, а основни задатак је да се омогући израда поузданих техничких система уз минимално учешће живог људског рада, и максимално могућу уштеду све скупљих материјала и енергије. Ово је условило примену висококвалитетних лаких материјала високог напона течења и јачине, који су по правилу осетљиви на различите конструкционе, металуршке и друге дефекте. Примена заваривања и сродних технологија при спајању материјала неминовно доводи до појаве различитих врста грешака у спојевима, а промене структуре и својстава материјала увек настаје као и сопствени напони-деформације [60,63,78]. И поред ових проблема заваривање и сродне технологије су при изради и одржавању техничких система највише примењиване од свих других технологија, уз даљу тенденцију пораста њихове примене. При репаратури оштећених склопова техничких система оне су незаменљиве, а при изради нових елемената све више се примењују [177,194]. То неизоставно доводи до сложених експерименталних истраживања пре увођења нових додатних материјала, примене савремених заваривачких технологија, пројектовања оптималних технологија и сталног усавршавања истраживача из ове области. Највећи број истраживача бави се проучавањем и решавањем проблема заварљивости различитих метала, јер при примени ових технологија заварљивост представља најзначајнију технолошку карактеристику различитих врста метала. Ова истраживања су омогућила да се данас успешно могу спајати, не само истородни, већ и разнородни метални материјали, као и неки метали са неметалним материјалима.

Имајући у виду, да су грађевинске машине при експлоатацији изложене различитим оптерећивањима, и да при контакту њихових радних делова долази до физичко-хемијских процеса, од истраживача се захтева поседовање мултидисциплинарних знања из више области, да би се установила оптимална технологија, па и технологија производног или репаратурног наваривања [22,97,141].

При репаратурном наваривању оштећених делова дате грађевинске машине разликују се два основа случаја: *репаратура оштећених делова који су саставни елементи склопа машине* (делови мотора, преносника снаге, хидрауличних или пнеуматских система, кочионог система, управљачког система и др.) и *репаратура радних делова који су у директном контакту са различитим грађевинским материјалима* (алати за обраду, транспорт и уградњу грађевинских материјала). Ове групе делова током експлоатације раде у сасвим различитим условима, па је при експерименталним истраживањима неопходно узети у обзир и одговарајуће утицајне факторе који одређују процес репаратуре. Током експлоатације, за ова два случаја, у контактним зонама спрегнутих радних површина елемената одвијају се два различита триболошка процеса,

односно формирају се различити *трибо-технички системи*. У првом случају трибо-технички систем сачињавају два спрегнута метална елемента, мазиво и околна средина. У другом случају трибо-технички систем сачињавају метални радни елемент, грађевински материјал и околна средина. Зато је при извођењу ових експерименталних истраживања било неопходно истражити и неке карактеристике различитих врста грађевинских материјала [131,141,190].

При извођењу грађевинских радова радни делови грађевинске механизације најчешће су у директном контакту са разним материјалима (камен, шљунак, земља, асфалт, бетон итд.), а често су у контакту и са водом. Топографија земљине коре не може се тако лако изменити. Снажне и разноврсне грађевинске машине које се користе при производњи, транспорту и уградњи грађевинских материјала неопходних за изградњу грађевинских објеката различите намене, изложене су најразличитијим врстама изузетно јаких напрезања. Најоптерећенији делови грађевинске механизације су елементи који су у директном контакту са грађевинским материјалима, јер су најчешће истовремено изложени процесима интензивног хабања, процесима корозије, а повремено или стално и ударним оптерећењима различите јачине. И најснажнија грађевинска машина је немоћна, ако нема квалитетне радне делове, односно алате за обраду, транспорт и уградњу грађевинских материјала. Квалитет радних делова грађевинске машине, који су у директном контакту са горе поменутиим материјалима, директно утичу на радни век и искоришћење капацитета дате машине. Главни узрочник оштећења радних делова грађевинских машина су различити процеси хабања и корозије, а посебно абразивно хабање, при контакту радних делова и њима сличним материјалима. Зато су у овом раду експериментално истраживана нека њихова својства, јер од њих директно зависи дужина радног века радних делова грађевинских машина. Највећи утицај на радни век, имају физичко-механичка својства стенских и њима сличних материјала, који су при експлоатацији у директном контакту са радним деловима машина.

9.1 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ ОСНОВНИХ СВОЈСТАВА НЕКИХ ВРСТА СТЕНСКИХ МАТЕРИЈАЛА

Најзначајнија техничка својства стена су: *петрографска, физичка, механичка и технолошка* [56,131]. Ова својства стена при дејству воде, мрза и топлоте се знатно мењају, па је изузетно важно упознати се са променама услед дејства ових фактора. Својства стена директно зависе од својстава минерала који их чине. Сви минерали стенских маса најчешће се могу свести на седам група: *силикати, карбонати, оксиди, сулфати, сулфиди, хлориди и хидроксиди*. Ради потпуније слике о броју различитих минерала у саставу стена потребно је рећи да само група силиката садржи око 800 разних минерала који се могу разврстати у више подгрупа [56,190].

• **Петрографска својства технички значајних стена** су: *минерални састав, структура и текстура*. Хемијска, физичка, механичка и остала својства стена углавном одговарају својствима стенске масе од које је та стена формирана, при чему одлучујући утицај на многе од ових својстава имају *минералошки састав стене и услови њеног формирања*. Све стене су састављене од различитих минерала, који су физички и хемијски хомогена тела настала у земљиној кори као резултат дуготрајних физичких и хемијских процеса. Највећи број минерала је у чврстом агрегатном стању и одликују се кристалном грађом. У природи постоји преко две хиљаде минерала, а једно од најбитнијих својстава минерала, а самим тим и стена, јесте њихова тврдоћа [56].

Структура стене подразумева облик, величину и начин везивања појединих минералних зрна. Структура стена најчешће се разматра независно од начина њеног настанка и може бити: *кристаласта, стакласта, порфирска и кластична* [190].

Текстура стене подразумева размештај и распоред минерала који улазе у њен састав, као и присуство пора и микропрелина. Текстура код различитих врста стена може бити: *масивна, флуидална, мехураста, мандоласта, тракаста, бречаста и икриљаста* [190].

• **Физичка својства стена** су: *оптичка, водно-физичка, топлотна, електрична, магнетна, радиоактивна* и др. *Оптичка својства* стена најчешће су дефинисана њиховом бојом која је одраз хемијског састава њихових минерала и деле се на: *светле* (САЛ-ске) и *тамне* (ФЕМ-ске).

Светли минерали су богати са Al и Si, док су тамни минерали богати са Fe и Mg. *Водно-физичка својства стена су: специфична маса (густина), запреминска маса, порозност, збијеност, стишљивост, водопропустљивост, влажност, капиларност, лепљивост, бубрење, проветривост и др.* [56,131,190].

- **Механичка својства стена** испољавају се када су оне изложене дејству сила од спољашњег оптерећења, које може бити: *статичко* и *динамичко*. У ову групу својстава сврставају се: *јачина (чврстина), тврдоћа, жиљавост, еластичност, пластичност, изотропност, отпорност на хабање* и др. Као и при одређивању својства отпорности метала код стена се одређују јачина на: *притисак, затезање, савијање, торзију (увијање) и смицање*. Поред ових механичких својстава стена одређују се и *реолошка својства, релаксација и динамичка издржљивост* [190]. Минерали у земљиној кори могу се наћи у *везаном (каменом) облику и невезаном (расутом) облику*, па се према јачини везе стене деле на: *слабе, јаке и изузетно јаке*, што зависи од облика у коме се налазе минерали (кристалном, кристаластом, или аморфном облику).

- **Технолошка својства стена** испољавају се при њиховој обради и уградњи, а то су: *обрадљивост, дробљивост, бушивост, ломљивост (цепљивост) и растреситост* [131,190].

Према начину настанка све стене могу се сврстати у три велике групе: *магматске (еруптивне), седиментне (таложне) и метаморфне (преображајне)* [131,190].

- **Магматске стене** настају кристализацијом и очвршћавањем растопљене силикатне масе која потиче из дубљих делова земљине коре. Постоје: *дубинске магматске стене (плутонити), површинске магматске стене (вулканити), жичне магматске стене и вулкански туфови*. Најважније врсте дубинских магматских стена су: *гранити, сијанити, гранодиорити, диорити, габри и перидотити*. Најважније врсте површинских магматских стена су: *риолити, порфири, трахити, кварцпорфирити, дацити, андезити, порфирити, базалти, дијабази, мелафири и пикрити*. Жичне магматске стене се стварају утискивањем магме у прелине већ насталих, најчешће магматских стена, а најважније врсте су: *пергаматити, аплити, лампрофири и долерити*. Вулкански туфови, односно пирокластичне стене настају ерупцијом појединих вулкана, чије магме садрже знатне количине гасова и прегрејане паре, које очвршћавају у камену масу. Према хемијском саставу, све врсте магматских стена, деле се на: *риолитске, дацитске, андезитске*, итд. [56].

- **Седиментне стене** настају на површини земљине коре, а формиране су у доста дугом и сложеном процесу који почиње физичко-хемијским процесом разградње (распадања) постојећих стена, наставља се преносом и таложењем продуката разлагања и растворених супстанци, а завршава се (код појединих врста стена) везивањем, односно окамењавањем. Разликују се *класични седименти (механички), хемијски седименти и органогени седименти (биогени)*. *Класични седименти су: невезани (песак, шљунак, дробина, прашина, муљ), полувезани (прашинац, лес, глина, лапор), и везани (глинац, лапорац, пешчар, бреча, конгломерат)*. *Хемијски седименти су: бигар, мермер, гипсит, анхидрид, со, лед и кречњак*. *Органогени седименти су: зоогени (кречњак, доломит), фитогени (кречњак, тресет, лигнит, мрки угаљ, антрацит, рожнац) и фитозоогени (нафта, асфалт, битумијски шкриљци)* [56].

- **Метаморфне стене** настају у дубљим деловима земљине коре, где владају високи притисци и високе температуре, када долази до преображаја, односно промене структуре и минералшког састава, било магматских или седиментних стена. Могу бити у облику кристаластих шкриљаца и масивних метаморфних стена. Кристаласти шкриљци вишег кристалитета су: *знајс и микашист*. Нижег кристалитета су: *фимитски, хлоритски, талков, амфиболски, серицитски и графитски шкриљци*. Масивне метаморфне стене су: *кварцити, мермери, серпентинити и амфиболит* [56].

Експерименталним испитивањима одређује се погодност стена за примену у грађевинарству; стабилност терена на коме се изводи изградња објеката; могућност примене и правилније експлоатације грађевинске механизације при обради, транспорту и уградњи стенских материјала и њихових агрегата.

9.1.1 ОДРЕЂИВАЊЕ ПЕТРОГРАФСКИХ СВОЈСТАВА СТЕНА

У овом раду дата су различита испитивања петрографских својстава неких врста стена из неколико лежишта, које се најчешће користе при изградњи путева, а то су: *органогени кречњак*, *доломитски кречњак*, *калцитско-доломитски кречњак* и *андезит*. Највећу примену нашле су различите врсте кречњака и то у више од седамдесет процената случајева јер се од њих израђују неколико слојева путева, а од једрих кречњака и хабајући слој. Андезит има бољу отпорност на хабање него кречњаци па се он најчешће користи при изради завршног (хабајућег) слоја пута.

Испитивање петрографских својстава стена изведено је на Институту за материјале Србије (ИМС) у Београду. Ова испитивања изведена су визуелно, помоћу лупе, микроскопа и компаратора. Петрографска својства испитивана су према одређеним важећим стандардима [180]. Узорци су узети из четири лежишта, припремљени за испитивање и испитани и контролисани уз поштовање одредница важећег стандарда у свакој фази испитивања, од узимања узорка до приказивања добијених резултата.

Петрографска својства стена (минерални састав, структура и текстура) готово увек утичу на њихова физичка, механичка и технолошка својства (сл. 9.1.1).



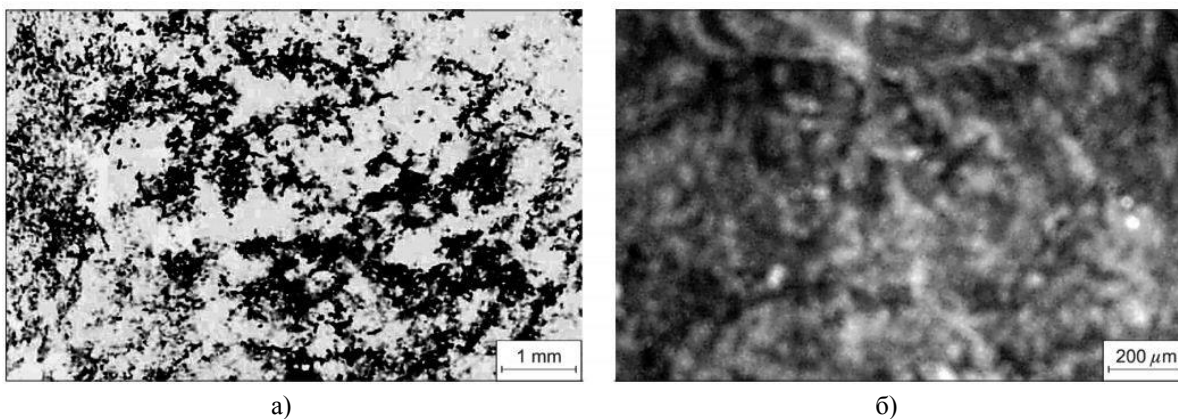
Слика 9.1.1 Схематски приказ утицаја петрографских својстава на остала својства стена [56]

Састав стена чине *основни, споредни и случајни* минерали, при чему су основни минерали они минерали којих има највише, и њихова својства пресудна су за својства стена. При анализи утицаја минералног састава стена на њихова друга својства, најбитније је обратити пажњу на врсту минерала или одломака стена који их сачињавају, количину појединих минерала, свежину (старост) минерала, као и присуство штетних и неповољних минерала. Потребно је истаћи, да свежији минерали дају боља својства стена, а штетни минерали лако мењају физичко-хемијска својства, и негативно утичу на остале минерале у саставу стена, односно погоршавају својства стена. Поред утицаја врсте минерала на својства стена, они утичу и на њихову структуру и текстуру. Структура зависи од величине зрна и јачине њихове везе, што даје различита својства чак и код истих врста стена. Текстуру стене чине просторни распоред минерала и начин испуњености стенске масе минералима, што опет даје различита својства и код стена у једном те истом блоку.

• *Лежиште органогеног кречњака “Вучјак”* углавном је састављено од органогено-дентритичног кречњака. *Структура* испитиваних узорка ове врсте стене је кристаласта до микрокристаласта. *Текстура* стене је масивна и компактна. На слици 9.1.2 приказан је макроскопски и микроскопски изглед структуре ове стене.

Макроскопски изглед стене је камени материјал сиве до сиво-смеђе боје, масивне текстуре, неравномерног до иверастог прелома са фином храпавошћу преломљене површине и оштрим ивицама лома. Интензивно је тектонизирана тј. испресецана жилама и жилицама које су повезане (маркиране) лимонитом и запуњене калцитом димензија до 2 mm. У маси стене запажају се и стиолити запуњени глином, као гнездаста нагомилања калцита димензија до 1,5 x 0,8 mm. Стена бурно реагује са петопроцентним раствором хлороводоничне киселине.

Микроскопски изглед стене је камени материјал састављен од одломака микрокристалистих и органогених кречњака са траговима олилитичких кречњака и знатне количине фосилних остатака везаних спаритским цементом. Одломци микрокристалистих кречњака су заобљених до угластих форми, док су одломци органогених кречњака заобљени и настали су од фосилних остатака везаних микритским везивом делимично прекристалисаних у микрокристалисти калцит. Ретки одломци оолитичких кречњака настали су од оолита величине око $0,2\text{ mm}$ повезаних микритским везивом. Фосилни остаци организама најчешће су крупни и до 4 mm , са сачуваним скелетним формама или прекристалисаним кристалистим калцитом. Од секундарних састојака присутан је лимонит који је fino диспергован по зрнима микрокристалистог и кристалистог калцита.

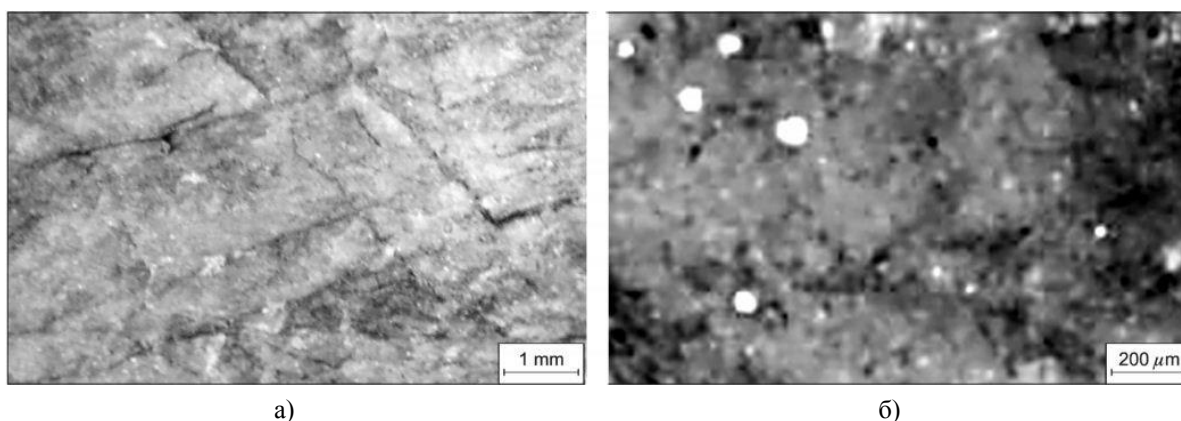


Слика 9.1.2 Изглед структуре стене органогеног кречњака: а) макроскопски изглед, б) микроскопски изглед

- *Лежиште доломитског кречњака “Самар”* углавном је састављено од доломита. Структура ове врсте стене је гранобластична. Текстура је масивна и некомпактна. На слици 9.1.3 приказан је макроскопски и микроскопски изглед структуре ове стене.

Макроскопски изглед стене је камени материјал сиве до сиво-жуте боје, масивне до текстонизираних текстуре, неравне преломљене површине са грубом храпавошћу површине прелома и оштрих ивица лома. Интензивно је текстонизирана што се манифестује присуством великог броја жила и жилица беле до жуто-беле боје које су везане (маркиране) лимонитом и запуњене калцитом.

Микроскопски изглед стене је камени материјал од изометричних зрна доломита уједначене величине која мозаички срастају. Величина зрна варира и највећи број је од $0,5 \times 0,2\text{ mm}$, док је дуж равни слојевитости (нехомогености) приметна појава рекристализације. Калцита има у малим количинама и јавља се у облику неправилних гнездастих гомилица. Од споредних минерала присутан је кварц и металични минерали, као и секундарни лимонит који везује присутне жилице у стени.

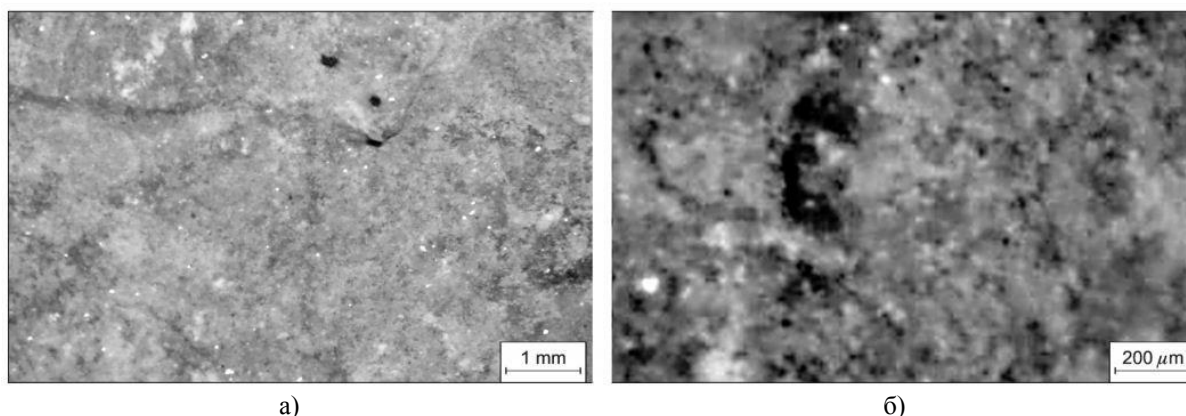


Слика 9.1.3 Изглед структуре стене доломитског кречњака: а) макроскопски изглед, б) микроскопски изглед

• **Лежиште калцитско-доломитског кречњака „Градац“** углавном је састављено од доломитског кречњака. *Структура* ове стене је гранобластична. *Текстура* стене је хомогена и компактна. На слици 9.1.4 приказан је макроскопски и микроскопски изглед структуре ове стене.

Макроскопски изглед стене је камени материјал беле боје и хомогене текстуре, преломљена површина је равна са грубом храпавошћу и умерено оштрим ивицама лома.

Микроскопски изглед стене је камени материјал састављен од кристаласог доломита повезаног калцитским цементом (око 90%), величине зрна 0,5-1,0 *mm*. Око 10% су ситнија зрна доломита величине 0,1-0,3 *mm* и незнатан део лиски мусковита (око 0,5%) је величине 0,2-0,3 *mm*.

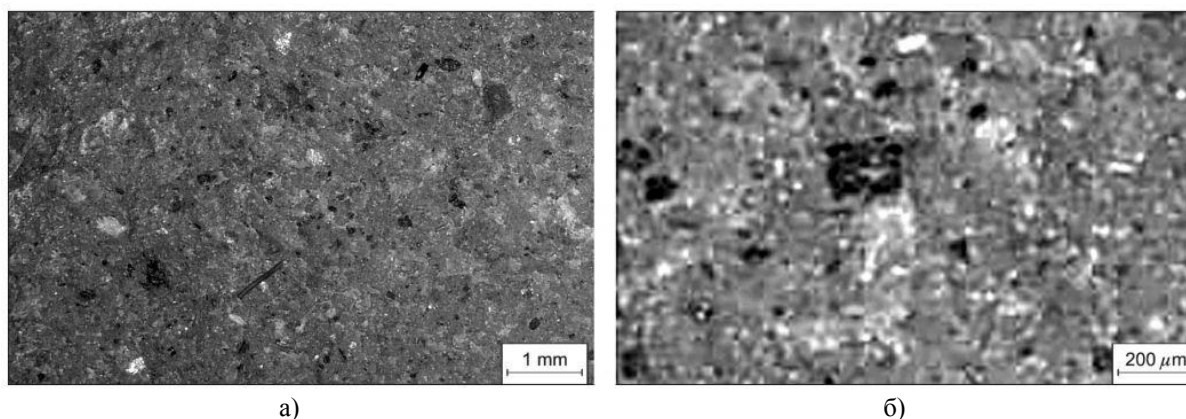


Слика 9.1.4 Изглед структуре стене калцитско-доломитског кречњака: а) макроскопски изглед, б) микроскопски изглед

• **Лежиште андезита „Шумник“** углавном је састављено од различитих врста андезита. *Структура* стене је холокрystalасно-порфирска. *Текстура* стене је масивна. На слици 9.1.5 приказан је макроскопски и микроскопски изглед структуре ове стене.

Макроскопски изглед стене је камени материјал сиво-зелене боје, масивне текстуре и порфирске структуре, а запајају се и обојени фенокристали најчешће идиоморфних форми, величине до 4 *mm*. Преломљена површина стене је неправилна и грубе је храпавости са изузетно оштрим ивицама лома.

Микроскопски изглед стене је камени материјал састављен од фенокристала плагиокласабленде и биотита, који леже у холокрystalасној основној стенској маси. Као секундарни минерали у стени се јављају калцит и кварц у облику изометричких кристала.



Слика 9.1.5 Изглед структуре стене андезита: а) макроскопски изглед, б) микроскопски изглед

9.1.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ НЕКИХ ФИЗИЧКИХ СВОЈСТАВА СТЕНА

Од свих својстава везаних стена (камена) и њихових агрегата најчешће се експериментално испитују специфична маса (густина), запреминска маса, порозност, склоност ка упијању воде и збијеност. Остала физичка својства стена ређе се испитују и то у случајевима када се оне употребљавају за неке специфичне намене. Физичка својства директно утичу на промену механичких и технолошких својстава стена и њихових агрегата. Начини и поступци ових испитивања дефинисани су одговарајућим стандардима, а ова испитивања изведена су на Институту за материјале (ИМС) у Београду. Овде неће бити детаљно описивани начини извођења експерименталних испитивања, јер су дефинисана нашим важећим стандардима [180], већ ће бити само приказани резултати испитивања и нека неопходна објашњења.

9.1.2.а Одређивање специфичне масе (густине) и запреминске масе стена

- **Специфична маса (густина) стена** је маса чврстих честица њених минерала без пора и шупљина у јединици запремине $\rho_s = m_s / V_s$ где је ρ_s - специфична маса чврстих честица стене, g/cm^3 ; m_s - маса суве минералне супстанце, g ; V_s - запремина суве минералне супстанце, cm^3 . За одређивање специфичне масе користи се прах минералне масе око 50 g. Овај прах мора проћи кроз сито са величином окаца од 0,09 mm без остатка. За ова испитивања изводе се најмање три пробе. Специфична маса стена може се одредити лабораторијски на спрашеним узорцима помоћу пикнометра у вакууму, или при атмосферском притиску. Посредно служи за одређивање апсолутне порозности стена. Ово својство стена зависи само од специфичне масе појединих минерала који сачињавају ту стену. У табlici 9.1.1 дат је преглед специфичних маса неких стенских минерала.

Таблица 9.1.1 Преглед специфичне масе (густине) неких стенских минерала [56,141]

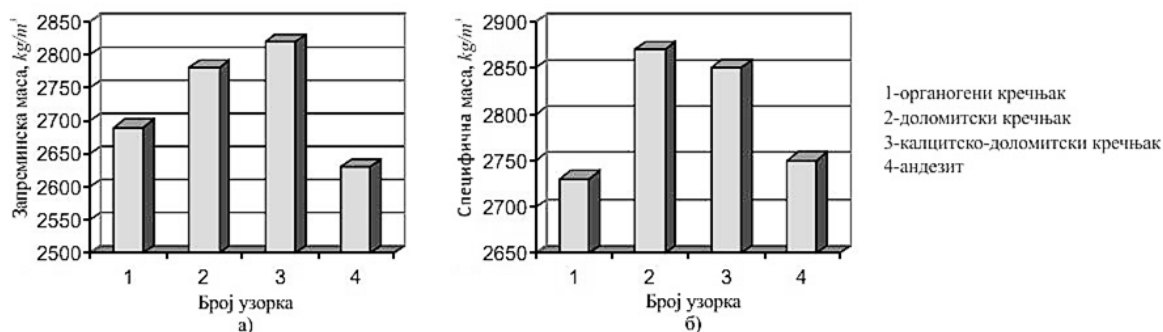
Врста и назив минерала	Хемијска ознака минерала	Специфична маса минерала, $\rho_s = m_s / V_s$, g/m^3	Врста и назив минерала	Хемијска ознака минерала	Специфична маса минерала, $\rho_s = m_s / V_s$, g/m^3
Силикати			Оксиди		
Фелдпасти: -ортоклас	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	2,55	Кварц	SiO_2	2,65
-албит	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	2,62	Магнетит	$FeO \cdot F_2 \cdot O_3$	5,10-5,30
-анордит	$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	2,76	Хематит	$Fe_2 \cdot O_3$	4,80-5,30
			Корунд	$Al_2 \cdot O_3$	3,90-4,10
Лискуни: -мусковит	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$	2,80-2,90	Карбонати		
-биотит	$K_2O \cdot 2(Al,Fe) \cdot O_3 \cdot 4(Mg,Fe) \cdot O \cdot 6SiO_2 \cdot H_2O$	2,80-3,20	Калцит	$CaCO_3$	2,70
			Магнезит	$MgCO_3$	2,90-3,10
Амфиболи: -хорнбленда	$2CaO \cdot 4(Mg,Fe) \cdot O \cdot Al_2O_3 \cdot 7SiO_2 \cdot H_2O$	3,30	Доломит	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$	2,60-2,95
-актинолит	$2CaO \cdot 5(Mg,Fe) \cdot O \cdot 8SiO_2 \cdot H_2O$	3,00	Арагонит	$CaCO_3$	2,80-3,00
Пироксени: -енстатит	$MgO \cdot SiO_2$	3,10	Хидроксиди		
-бронзит	$(Mg,Fe) \cdot O \cdot SiO_2$	3,10	Лимонит	$Fe_2O_3 \cdot n \cdot H_2O$	3,50-4,00
-диописид	$CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$	3,50	Боксит	-	2,30-3,50
			Опал	$SiO_2 \cdot n \cdot H_2O$	2,00-2,30
Каолини: -каолинит	$Al_2 \cdot Si_2 \cdot O_5(OH)_4$	2,60	Сулфати		
-морионит	$Al_2 \cdot Si_4 \cdot O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$	2,00-2,20	Анмиорит	$CaSO_4$	2,80-3,00
Гранити: -алмадин	$3FeO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$	1,00-4,30	Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2,10-2,40
-пироп	$3MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$	3,70-3,80	Сулфиди		
-гросулар	$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SiO_2$	3,40-3,60	Пирит	FeS_2	4,90-5,10
Талк	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	2,702,80	Хлориди		
Серпентин	$6MgO \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$	2,50-2,70	Халит	$NaCl$	2,10-2,30
Оливин	$2(Mg,Fe) \cdot O \cdot SiO_2$	3,30-4,00	Напомена: таблица је сачињена на основу прикупљених резултата експерименталних испитивања специфичне масе домаћих стена, на ИМС у Београду.		
Епидот	$Ca(Al,Fe) \cdot OH \cdot (SiO) \cdot 3$	3,30-3,50			

• **Запреминска маса стена** је маса чврстих честица са порама и шупљинама у јединици укупне запремине $\gamma_v = m_s / V$, где је γ_v - запреминска маса са порама и шупљинама, kg/m^3 ; m_s - маса сувог пробног узорка, kg ; V - укупна запремина сувог пробног узорка, m^3 . Запреминска масе најчешће се одређује на узорцима правилног геометријског облика (коцка, призма и др.), а може се извести и на узорцима неправилног облика [56,190]. Када се испитивања изводе на узорцима правилног облика ниједна страница не сме бити краћа од 40 mm, а код узорака неправилног облика њихова маса не сме бити испод 150 g.

За испитивање запреминске масе коришћено је по пет пробних узорака за сваку врсту стена. Испитивања су изведена на собној температури $20 \pm 2^\circ C$, а узорци у облику коцке димензије $50 \pm 0,1$ mm сушени су на температури $105 \pm 5^\circ C$ у сушари са регулатором задате температуре. У табелици 9.1.2 и на слици 9.1.6 приказане су средње вредности запреминске масе и специфичне масе четири врсте стена, а одређен је и коефицијент запреминске масе.

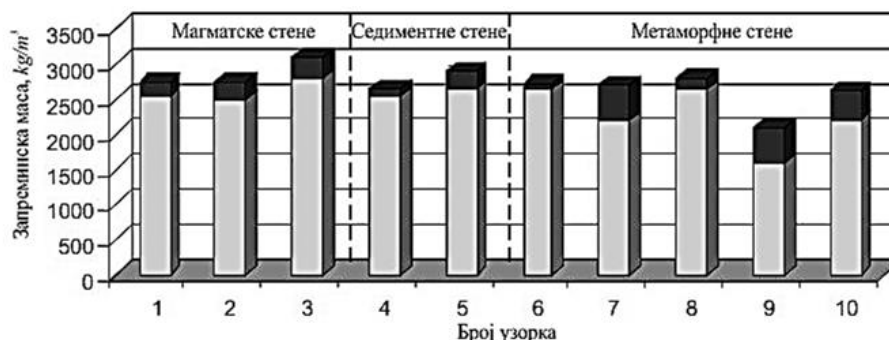
Таблица 9.1.2 Запреминска маса, специфична маса и коефицијент запреминске масе неких врста стена

Испитивано својство стена	Врста стене и њено порекло			
	Орг.кречњак – Вучјак	Долом.креч. - Самар	Калц.-дол.креч. - Градац	Андезит - Шумник
Запреминска маса, $\gamma_v = m_s / V, kg/m^3$	2690	2780	2820	2630
Специфична маса (густина), $\rho_s = m_s / V_s, kg/m^3$	2730	2870	2850	2750
Коефицијент запреминске масе, $i = \gamma_v / \rho_s$	0,985	0,969	0,989	0,956



Слика 9.1.6 Резултати испитивања запреминске масе и специфичне масе неких врста стена: а) запреминска маса, б) специфична маса

На слици 9.1.7 приказане су запреминске масе неких врста стена на основу података експерименталних истраживања на ИМС у Београду. Овде су приказани резултати најнижих и највиших вредности запреминске масе појединих врста стена у природном стању (без сушења).



Слика 9.1.7 Резултати испитивања запреминске масе неких врста стена у природном стању: 1-гранит, гранодиолит, кварцпорфирит; 2-дацит, андезит, порфирит; 3-габро, базалт, диабаз; 4-гнајс, микашист, филит; 5-серпентинит; 6-мермернионикс; 7-кречњак; 8-доломит; 9-бигар; 10-пеишар [56,141]

Према запреминској маси стене се деле на: *врло лаке* ($\gamma_v < 1000, \text{ kg/m}^3$); *лаке* ($\gamma_v = 1000-1500, \text{ kg/m}^3$); *средње масивне стене* ($\gamma_v = 1500-2500, \text{ kg/m}^3$); *масивне стене* ($\gamma_v = 2500-3000, \text{ kg/m}^3$); и *врло масивне стене* ($\gamma_v > 3000, \text{ kg/m}^3$) [190]. Стене које смо испитивали, према вредностима добијених резултата за запреминске масе, могу се сврстати у масивне стене. Познавање запреминске масе стена је изузетно значајно при пројектовању и изградњи грађевинских објеката, али исто тако и при експлоатацији грађевинске механизације, нарочито при утовару, транспорту и уградњи ових грађевинских материјала.

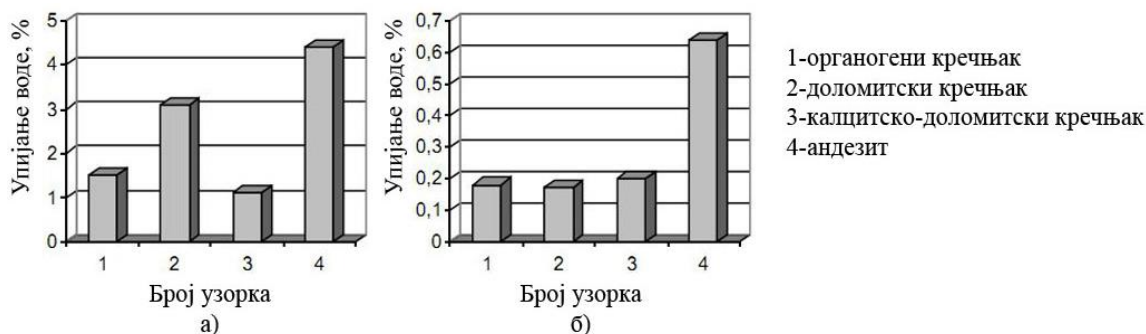
9.1.2.6 Одређивање порозности и склоности ка упијању воде стена

Порозност стена је укупан празан простор у јединици запремине који није испуњен минералном супстанцом, а зависи од структуре и текстуре стена, односно величине зрна и начина њиховог паковања (агрегације). Порозност стена одређује се из израза $p = [1 - (\gamma_v / \rho_s) \cdot 100], \%$, где је p - порозност, %; γ_v - запреминска маса; ρ_s - специфична маса (густина). Ово својство је једно од најбитнијих јер директно утиче на друга својства стена [56].

Упијање воде стена је својство које значајно утиче на њихова физичка и механичка својства. Представља могућност да сува стена упије одређену количину воде до њене природне влажности. Упијање воде дефинисано је односом масе воде и масе чврсте минералне супстанце. За различите врсте стена варира од неколико стотих делова процената, а одређује се из израза $w = (m_v - m_s) / m_s \cdot 100, \%$ где је m_v - маса воде, m_s - маса суве супстанце. Резултати експерименталних испитивања порозности и упијања воде испитиваних узорака неких стена дати су у табlici 9.1.3 и на слици 9.1.8.

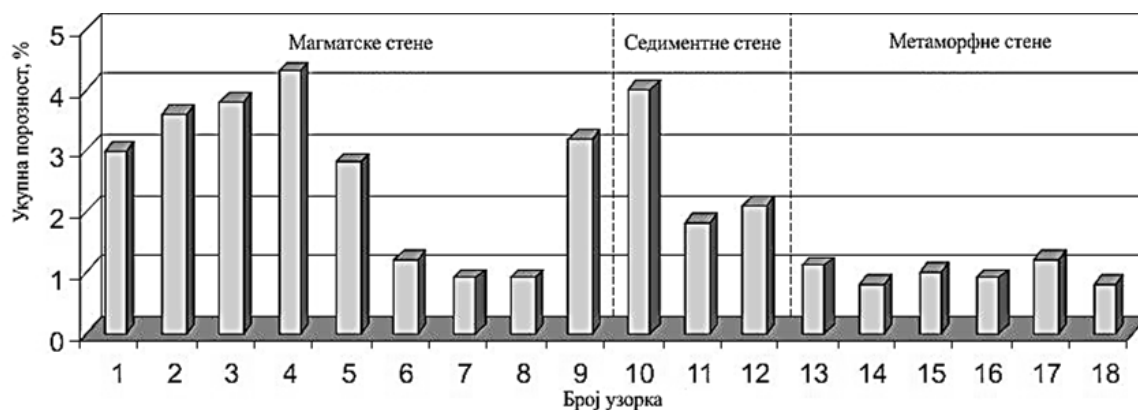
Таблица 9.1.3 Порозност и упијање воде испитиваних узорака неких врста стена

Испитивано својство стена	Врста стене и њено порекло			
	Орг.кречњак - Вучјак	Долом. креч. - Самар	Калц.-дол. креч. - Градац	Андезит - Шумник
Запремински маса, $\gamma_v = m_s / V, \text{ kg/m}^3$	2690	2780	2820	2630
Специфична маса (густина), $\rho_s = m_s / V_s, \text{ kg/m}^3$	2730	2870	2850	2750
Порозност, $p = [1 - (\gamma_v / \rho_s) \cdot 100], \%$	1,50	3,10	1,10	4,40
Упијање воде, $w = (m_v - m_s) / m_s \cdot 100, \%$	0,18	0,17	0,12	0,64



Слика 9.1.8 Резултата испитивања порозности и упијања воде неких врста стена: а) порозност, б) упијање воде

Највећа разлика у порозности стена јавља се код различитих врста пешчара, андезита и кречњака, а најчешће вредности порозности испитиваних стена приказани су на слици 9.1.9.



Слика 9.1.9 Порозност различитих врста стена: 1-риолит, 2-трахит, 3-дацит, 4- андезит, 5-базалт, 6-гранит, 7-диабаз, 8-габро, 9-диорит, 10-пешчар, 11-кречњак, 12-доломит, 13-гнајс, 14-микашист, 15-филит, 16-мермер (мармор), 17-кварцит, 18-анфиболит [56,141]

После приказа и анализе резултата ових испитивања може се закључити да је порозност најзначајније својство, јер директно утиче на запреминску масу и упијање воде различитих врста стена. Резултати испитивања других својстава стена показују да порозност директно утиче и на та својства. Највећа разлика у порозности стена јавља се код пешчара, андезита и кречњака, јер на порозност утичу врсте шупљина, која могу бити *изоловане* и *ефективне*. Изолована порозност јавља се када су шупљине међусобно одвојене, док се ефективна порозност јавља када су шупљине спојене.

Према порозности чврсто везане (камене) стене деле се на: *слабо порозне* ($p = 1,0-2,5\%$); *порозне* ($p = 2,5-5,0\%$); *доста порозне* ($p = 5-10\%$); *јак* *порозне* ($p = 10-20\%$) и *изузетно порозне* ($p > 20\%$) [56,190].

Наша испитивања су показала да испитиване стене органогеног кречњака и калцитско-доломитског кречњака могу да се сврстају у групу слабо порозних стена, док доломитски кречњак и андезит припадају групи порозних стена. Порозност и упијање воде стена су значајне при изградњи подземних објеката, брана, канала и устава, и при процени услова експлоатације грађевинске механизације.

Потребно је рећи, да својства порозности и упијања воде директно утичу на *збијеност стена* и њихових агрегата. Најмања могућност збијања је код стена које имају најмању порозност и упијање воде. Међутим, на могућност збијања стене значајан утицај има и јачина кохезионих веза између зрна минерала од којих је стена формирана. Стене код којих је јача кохезиона веза, зрна минерала имају мању могућност збијања због отежаног истискивања упијене воде.

9.1.3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОДРЕЂИВАЊЕ НЕКИХ МЕХАНИЧКИХ СВОЈСТАВА СТЕНА

Од механичких својстава стена најчешће се испитују јачина на притисак, тврдоћа, еластичност, жилавост, отпорност на хабање и отпорност на дробљење. Ређе се испитују јачине на затезање, савијање, торзију (увијање) и смицање. Остала механичка својства испитују се само када је то неопходно, као што су реолошка својства, отпорности на извијање и др. Од свих механичких својстава стена најзначајнија су тврдоћа и јачина на притисак [131,190].

9.1.3.а Одређивање тврдоће стена

Тврдоћа стена представља отпор продирању другог чврстог тела у масу стене и једно је од најзначајнијих механичких својстава стена, јер од тврдоће зависе друга механичка својства. За практичну употребу стена довољно је одредити њихову релативну тврдоћу, која се одређује

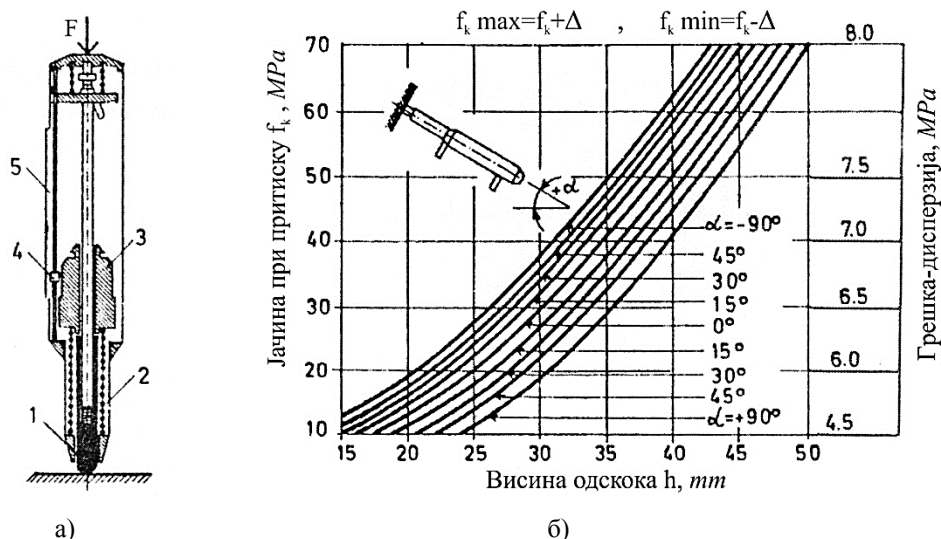
помоћу Мосове (*Mohs*) скале приказане у табlici 9.1.4. Тврдоћа стене је ништа друго, него тврдоћа минерала који је формирају и минерала који служе као цемент за њихову везу у чврсту стенску масу.

Таблица 9.1.4 Мосова (*Mohs*) скала за одређивање тврдоће стенских минерала [56,131,190]

Степен тврдоће минерала	Врста минерала	Чиме се пара или шта он пара
1	Талк	Пара се ноктом
2	Гипс - Халит	Пара га нокаг
3	Калцит	Он пара алуминијум
4	Флуорит	Лако га пара челик средње тврдоће
5	Апатит	Пара челик средње тврдоће
6	Фелдспат	Пара стакло
7	Кварц	Лако пара стакло
8	Топаз	Сече стакло
9	Корунд	Пара га једино дијамант
10	Дијамант	Тврдоћа ≈ 2500 НВ

Основна Мосова (*Mohs*) скала направљена је тако да сваки минерал реже (пара) све претходне минерале, а тврдоћа се изражава *степеном тврдоће* који се креће у границама $1 \div 10$, при чему је најмања тврдоћа талка (степен), а највећа тврдоћа дијаманта (10 степени, односно ≈ 2500 НВ).

Када је потребно тврдоћа стена одређује се и другим методама: *HPS метода* и *склероскопска метода*. *HPS метода* представља модификовану Бринелову методу (куглица пречника од 10 mm и мерење отиска), после ударца произведеног путем тачно дефинисаног рада. Тврдоће се одређује на бази утврђене функционалне зависности пречника отиска и јачине на притисак. *Склероскопска тврдоћа* одређује се помоћу Шмитовог (*Schmit*) чекића, тако, што се успоставља зависност између тега и јачине на притисак. Изглед Шмитовог чекића (склерометра) и начина одређивања тврдоће приказани су на слици 9.1.10а и 9.1.10б. *Склероскопска метода* због нехомогености и различите тврдоће стена доста је непоуздана, па се користи најчешће при одређивању тврдоће компактних стена или бетона [190].



Слика 9.1.10 Склероскопска метода за одређивање тврдоће стена: а) Шмитов чекић (1-ударни део, 2-опруга, 3-тег, 4-мерна скала, 5-тело), б) дијаграм зависности висине одскока од јачине на притисак [190]

Највећу тврдоћу имају кристобаласте ситнозрне стене формиране од минерала велике тврдоће чија су зрна непосредно везана (срасла). То су најчешће магматске стене кварцити, кварцни пешчари итд. Малу тврдоћу имају стене формиране од минерала мање тврдоће код којих су зрна посредно везана природним везивним материјалима (цементом).

На пример, мермер у Венчацу код Аранђеловца је изузетно чист и састоји се од 66,69% CaO; 43,66% CO₂; 0,001% Fe₂O₃; 0,005% SiO₂ и 0,09% H₂O [56], па је његову тврдоћу лакше одредити јер је уједначена по читавој структури стене. Поред калцита и доломита у структури кречњака и мермера могу се наћи и зрна кварца, лискуна, хлорита, графита, спидота и других најчешће метаморфних силиката, који више утичу на тврдоћу ових стенских материјала.

Тврдоћа различитих врста андезита се, слично као и код различитих врста кречњака, креће у широком опсегу и то у зависности од врсте андезита. На пример, биотитски андезит има најмању тврдоћу; енститицијски андезит има већу тврдоћу; анфиболски андезит има велику тврдоћу. Кварц у андезиту знатно му повећава тврдоћу па су тврдоће андезита са доста кварца изузетно високе.

Тврдоћа стена има велики утицај на њихову отпорност према хабању, њихову обраду и примену, али и на оштећења услед процеса хабања радних делова грађевинске механизације при обради и уградњи различитих врста стена и њихових агрегата. За израду и репаратуру радних делова грађевинске механизације морају се користити материјали који имају велику тврдоћу, али и добру жилавост. Зато се при изради и репаратури радних делова грађевинских машина, који су у директном контакту са стенским материјалима, углавном користе две групе материјала: *тврди метални материјали* који у металној основи имају распоређене тврде карбиде, и *меки аустенитни челици* чија се структура под притиском или ударима може трансформисати у мартензитну структуру.

У табlici 9.1.5 приказана је тврдоћа по Мосовој скали различитих врста стенских минерала који формирају стене.

Таблица 9.1.5 Тврдоћа различитих врста стенских минерала [56,141]

Врста и назив минерала	Хемијска ознака минерала	Тврдоћа по Мосу	Врста и назив минерала	Хемијска ознака минерала	Тврдоћа по Мосу
Силикати			Оксиди		
Фелдпасти:			Кварц	SiO ₂	7,0
-ортоклас	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	6,0	Магнетит	FeO·F ₂ ·O ₃	5,5-6,5
-албит	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	6,5	Хематит	Fe ₂ ·O ₃	5,5-6,5
-анордит	CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	6,0	Корунд	Al ₂ ·O ₃	9,0
Лискуни:			Карбонати		
-мусковит	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂ ·H ₂ O	2,0-2,5	Калцит	CaCO ₃	2,5-3,0
-биотит	K ₂ O·2(Al,Fe)·O ₃ ·4(Mg,Fe)·O·6SiO ₂ ·H ₂ O	2,0-3,0	Магнезит	MgCO ₃	2,5-3,5
Амфиболи:			Доломит	CaCO ₃ ·MgCO ₃	3,5-4,5
-хорнбленда	2CaO·4(Mg,Fe)·O·Al ₂ O ₃ ·7SiO ₂ ·H ₂ O	5,0-6,0	Арагонит	CaCO ₃	3,5-4,0
-актинолит	2CaO·5(Mg,Fe)·O·8SiO ₂ ·H ₂ O	5,5-6,0	Хидроксиди		
Пироксени:			Лимонит	Fe ₂ O ₃ ·n·H ₂ O	5,0
-енстатит	MgO·SiO ₂	3,1	Боксит	-	2,5-6,5
-бронзит	(Mg,Fe)·O·SiO ₂	5,5	Опал	SiO ₂ ·n·H ₂ O	5,5-6,5
-диопад	CaO·MgO·SiO ₂	5,5-6,0	Сулфати		
Каолини:			Анмиорит	CaSO ₄	3,0-4,0
-каолинит	Al ₂ ·Si ₂ ·O ₅ (OH) ₄	2,0-2,5	Гипс	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2,0
-морионит	Al ₂ ·Si ₄ ·O ₁₀ (OH) ₂ ·H ₂ O	2,0	Сулфиди		
Гранити:			Пирит	FeS ₂	6,0-6,5
-алмадин	3FeO·Al ₂ O ₃ ·3SiO ₂	7,0-7,5	Хлориди		
-пироп	3MgO·Al ₂ O ₃ ·3SiO ₂	7,5	Халит	NaCl	2,0
-гросулар	3CaO·Al ₂ O ₃ ·3SiO ₂	7,0	Напомена: таблица је сачињена на основу прикупљених резултата експерименталних испитивања специфичне масе домаћих стена, на ИМС у Београду.		
Талк	3MgO·4SiO ₂ ·H ₂ O	1,0			
Серпентин	6MgO·4SiO ₂ ·4H ₂ O	2,5-4,0			
Оливин	2(Mg,Fe)·O·SiO ₂	6,5-7,0			
Епидот	Ca(Al,Fe)·OH·(SiO) ₃	6,0-7,0			

9.1.3.6 Одређивање параметара еластичности стена

- **Еластичност стена** је њихово својство да под дејством силе могу променити свој облик и димензије, а да се после дејства силе могу вратити у првобитно стање, при чему сила мора да

буде мања од оне која доводи до пластичне деформације и лома. Параметри еластичности су: Поасонов коефицијент (ν), модул еластичности (E), модул клизања (G) и запремински модул (K). Својство еластичности је карактеристика чврсто везаних стена, и зависи од врсте и тврдоће стенских минерала, структуре и текстуре, зглобљености зрна и свежине минерала, влажности, јачине и правца дејства оптерећења и др. Ситнозрне стене, са добро зглобљеним зрнима имају веће вредности модула еластичности од крупнозрних и лоше зглобљених стена истог минералогског састава. Код слојевитих и шкриљавих стена модул еластичности је већи у управном него у паралелном правцу са правцем простирања слојевитости и шкриљавости. Такође, модул еластичности је већи код масивних и свежих стена него код испрсканих и старих стена. Влажност код стена по правилу смањује модул еластичности, али има и изузетака, као што је случај код гранита и мермера. Модул еластичности, односно Јунгов (*Jung*) модул, је сила која узорац јединичног попречног пресека издужи за износ првобитне дужине, и није исти чак и код узорака исте врсте стена. Поасонов (*Pousson*) број представља однос релативне уздужне и релативне попречне деформације, променљиве је вредности и за различите врсте стена креће се у опсегу од $5 \div 10$. Поасонов коефицијент представља реципрочну вредност Поасоновог броја, односно представља однос између релативне попречне и релативне уздужне деформације, и за стене има вредност од $0,1 \div 0,4$. Код већине чврсто везаних (камених) стена он је најчешће око $0,25$ [56,141].

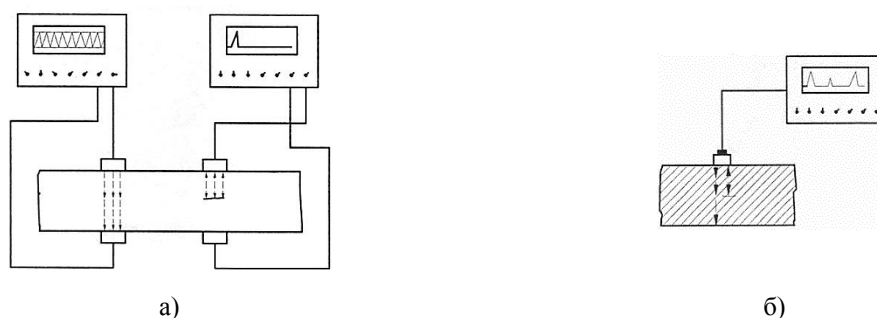
Модул еластичности стена може се одредити у лабораторијским условима и на терену на више начина. У лабораторијским условима он се одређује применом познатих статичких и динамичких метода, а на терену најчешће се примењује метода „хидрауличног јастука“ [56,190]. Интересантно је да се код статичких метода, пре испитивања мора извести „тренирање“ узорка док се не постигне линеарна зависност напона и деформације када важи Хуков (*Hock*) закон еластичности по коме је однос напона и деформације линеаран. Најчешће примењиване динамичке методе су ултразвучне методе: *метода пригушења* и *ехо метода*.

Конкретна експериментална истраживања у овом раду изведена су на узроцима органогеног кречњака применом ултразвучног уређаја PUNDIT, засновано на ултразвучној методи пригушења (сл. 9.1.11а). Ова истраживања су изведена на Рударско-геолошком факултету у Београду.



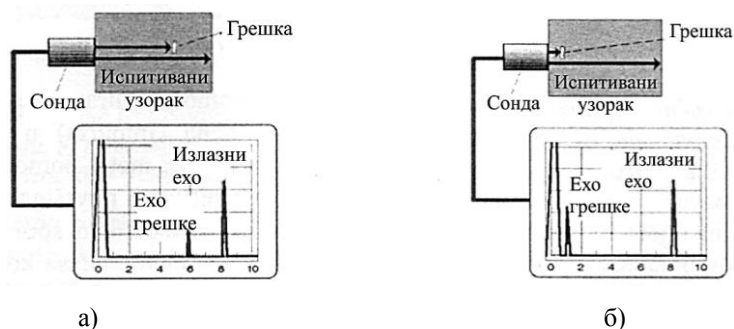
Слика 9.1.11 Приказ различитих врста ултразвучних уређаја: а) PUNDIT, б) DM2E, в) ION-3 [70,190]

На слици 9.1.12 су схематски приказане две ултразвучне методе: *метода пригушења* и *ехо-метода*.



Слика 9.1.12 Различите врсте ултразвучних метода: а) метода пригушења, б) ехо-метода [70]

На слици 9.1.13 приказан је начин рада ултразвучног уређаја применом ехо-методе.



Слика 9.1.13 Принцип рада ултразвучног уређаја применом ехо-методе: а) грешка у унутрашњости испитиваног узорка, б) грешка при површини испитиваног узорка [70]

Уређај има могућност подешавања фреквенције ултразвучних осцилација и избора врсте ултразвучних таласа. Када се користе лонгитудинални (подужни) таласи грешка уређаја је максимално 5%, а када се користе трансверзални (смичући) таласи максимална грешка је до 10%. Припрема узорака за испитивање изведена је резањем стене у облику коцке, и брушењем страница коцке све док нису уклоњени трагови резања, односно до димензија ивица страница коцке од $50 \pm 1 \text{ mm}$. Затим су узорци сушени на температури $105 \pm 5^\circ\text{C}$ све до постизања сталне (природне) запреминске масе кречњака.

Испитивања су изведена по важећем стандарду на пет припремљених узорака и у три међусобно управна правца (правац I-I је паралелан са слојевитошћу стене, правац II-II је управан на претходни правац и леже у паралелној равни са слојевитошћу стене, правац III-III је управан на раван простирања слојевитости стена). Потребно је рећи, да овако одређени правци испитивања важе за сва изведена испитивања механичких својстава стена, а ово је важно јер се механичка својства стена значајно разликују у зависности од правца простирања слојевитости и шкриљавости, односно нехомогености стена [56,190].

Таблица 9.1.6 Брзине простирања ултразвучних таласа кроз испитиване узорке стене

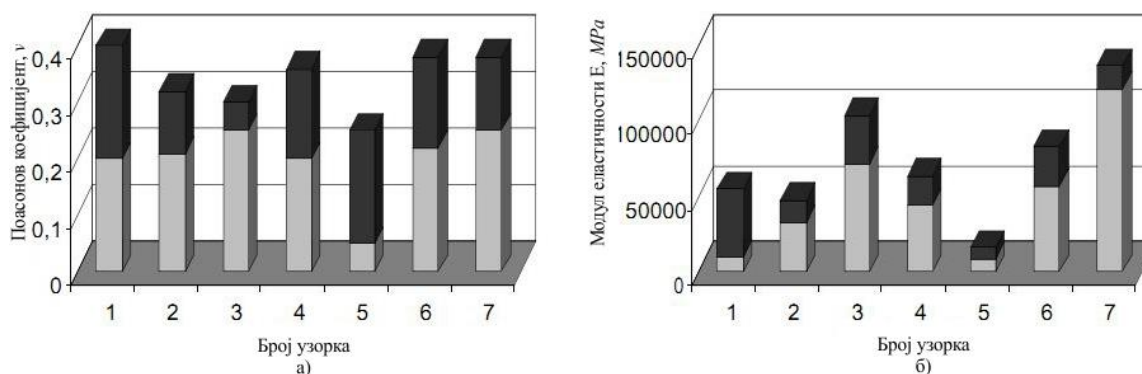
Правац мерења-број узорка	Дужина мерења, $l, \text{ mm}$	Време простирања лонгитудиналних таласа $t_l, \mu\text{s}$	Брзина простирања лонгитудиналних таласа $v_l, \text{ m/s}$	Време простирања трансверзалних таласа $t_t, \mu\text{s}$	Брзина простирања трансверзалних таласа $v_t, \text{ m/s}$
Правац I-I					
1.	51,00	7,50	5466,67	16,00	2581,25
2.	51,00	7,50	5466,67	15,00	2773,33
3.	51,00	7,30	5616,44	18,50	2227,03
4.	51,00	8,00	5125,00	16,00	2550,00
5.	51,00	7,10	5774,65	17,00	2411,76
Средње вредности	51,00	7,48	5489,88	16,50	2508,68
Правац II-II					
1.	51,00	7,10	5746,48	19,00	2157,89
2.	50,20	7,40	5540,54	15,00	2733,33
3.	50,40	7,10	5802,82	18,00	2277,78
4.	50,60	7,00	5900,00	16,00	2562,50
5.	50,80	7,60	5473,00	16,50	2484,85
Средње вредности	50,60	7,24	5692,70	16,90	2443,27
Правац III-III					
1.	51,00	7,20	5694,44	15,00	2733,33
2.	51,00	7,10	5774,65	14,00	2928,57
3.	51,00	7,20	5694,44	14,00	2925,57
4.	51,00	8,00	5125,00	17,00	2411,76
5.	51,00	7,40	5540,54	14,00	2928,57
Средње вредности	51,00	7,38	5565,82	14,80	2786,16

Да би се израчунао модул еластичности потребно је одредити време, односно брзину простирања лонгитудиналних и трансверзалних ултразвучних таласа, као и специфичну масу (густину) испитиваних узорка стена. На основу ових вредности израчунавају се остали параметри еластичности, односно модул клизања и запремински модул испитиваног материјала. Вредности измерених времена простирања еластичних ултразвучних таласа кроз материјале испитиваних узорка органогеног кречњака и одговарајуће брзине дате су у табелици 9.1.6. Специфична маса (густина) органогеног кречњака одређена је и дата у таблицама 9.1.2. и 9.1.3. На основу резултата испитивања брзине простирања ултразвучних таласа (таб. 9.1.6) и добијених вредности за специфичну масу испитиваних узорка може се израчунати Поасонов коефицијент (ν) и остали параметри еластичности (E , G , K), а резултати испитивања су приказани у табелици 9.1.7.

Таблица 9.1.7 Резултати испитивања Поасоновог коефицијента, модула еластичности, модула клизања и запреминског модула

Правца мерења-број узорка	Брзина простирања лонгитудиналних таласа v_L , m/s	Брзина простирања трансверзалних таласа v_T , m/s	Специфична маса ρ , kg/cm ³	Поасонов коефицијент $\nu = \frac{0.5v_L^2 - v_T^2}{v_L^2 - v_T^2}$	Модул еластичност $E = 4q \frac{0.75v_L^2 - v_T^2}{(v_L/v_T)^2 - 1}$, MPa	Модул клизања $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, MPa	Запремински модул $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$, MPa
Правца I-I							
1.	5466,67	2581,25	2703	0,38	49760	18029	69111
2.	5466,67	2773,33	2703	0,33	55180	20744	54098
3.	5616,44	2227,03	2703	0,41	37900	13440	70185
4.	5125,00	2550,00	2703	0,38	48420	17543	67250
5.	5774,65	2411,76	2703	0,38	43500	15761	60417
Средње вредности	5489,88	2508,68	2703	0,38	46952	17103	64212
Правца II-II							
1.	5746,48	2157,89	2719	0,41	35650	12642	66019
2.	5540,54	2733,33	2719	0,33	54160	20361	53098
3.	5802,82	2277,78	2719	0,34	56190	21284	58531
4.	5900,00	2562,50	2719	0,33	47600	17895	46667
5.	5473,00	2484,85	2719	0,39	46560	16748	70545
Средње вредности	5692,70	2443,27	2719	0,36	48032	17786	58972
Правца III-III							
1.	5694,44	2733,33	2686	0,35	54180	20067	60200
2.	5774,65	2928,57	2686	0,33	61150	22985	59951
3.	5694,44	2925,57	2686	0,32	60840	23045	56333
4.	5125,00	2411,76	2686	0,36	42430	15599	50512
5.	5540,54	2928,57	2686	0,31	60190	22973	52798
Средње вредности	5565,82	2786,16	2686	0,33	55758	20935	55959

На основу добијених резултата испитивања може се уочити да је највећа вредност коефицијента еластичности у правцу који је управан на правац простирања нехомогености стене, што се поклапа са литературним подацима [56,131,190]. Потребно је рећи, да се за стенске материјале, најчешће одређује модул еластичности, а ређе модул клизања и запремински модул. Испитивањем свих пет узорка у сва три правца рачунски се добија да је средња вредност Поасоновог коефицијента $\nu = 0,36$ што је веће од уобичајене вредности за стенске материјале. Средња вредност модула еластичности је $E = 50247 \text{ MPa}$, модула клизања $G = 18608 \text{ MPa}$ и запреминског модула $K = 59714 \text{ MPa}$. Ова три параметра еластичности показују како се понаша материјал стене у напонско-деформацијском пољу у зависности од Поасоновог коефицијента. На слици 9.1.14 приказане су вредности Поасоновог коефицијента и модула еластичности за различите врсте неких домаћих стена на основу изведених испитивања на Рударско-геолошком факултету у Београду.



Слика 9.1.14 Поасонов коефицијент (а) и модул еластичности (б) за неке врсте стена: 1-кречњак, 2-андезит, 3-мермер, 4-гранит, 5-пеишкар, 6-кварцит, 7-англошист (слате) [141,190]

Са слике 9.1.14 уочава се да и код исте врсте стена из истог лежишта могу добити различите вредности за Поасонов коефицијент и модул еластичности. То је везано за природу стенских материјала, јер њихова својства зависе од бројних утицајних фактора. И друга механичка својства немају сталне вредности, већ се крећу у одређеним границама [131,141,190].

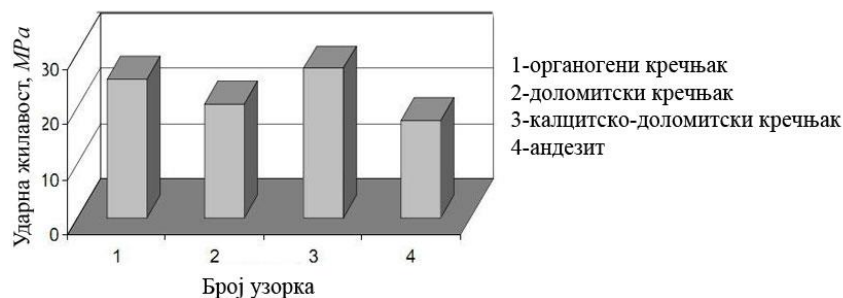
9.1.3.в Одређивање ударне жилавости неких врста стена

- **Ударна жилавост** представља отпор који стена пружа док не наступа прелом. Ово својство највише зависи од склопа, односно структуре стене, па тек онда од врсте минерала који је сачињавају. На ударну жилавост стена највише утичу порозност и свежина минерала од којих су формиране. Највећу жилавост имају стене афитске, затим криптокристаласте (зрнасте), па порфирске структуре [56,190]. Ударна жилавост стена знатно се разликује од њихове јачине на притисак, и ова два својства нису у корелацији, тј. стене које имају релативно велику јачину на притисак могу имати малу ударну жилавост. Испитивање ударне жилавости стена дефинисано је одговарајућим стандардима и изводи се на неколико начина. По нашем стандарду жилавост стена се најчешће испитује при слободном паду маља одређене масе са све веће и веће висине, док не дође до разарања испитиваног узорка. Постоје више варијанти овог начина испитивања ударне жилавости стена, а један од начина је и примена уређаја на принципу физичког клатна, који је сличне конструкције као и Шарпијево клатно за испитивање ударне жилавости металних материјала [37,130,190].

Експериментално је ударна жилавост одређена на по три узорка од сваке врсте стена. Припремљени узорци за ова испитивања су у облику коцке дужине ивице $50 \pm 1 \text{ mm}$. Коришћен је уређај са слободним падом маља израђеног од ливеног гвожђа масе $0,5 \text{ kg}$. Резултати експерименталних испитивања приказани су у табlici 9.1.8 и на слици 9.1.15.

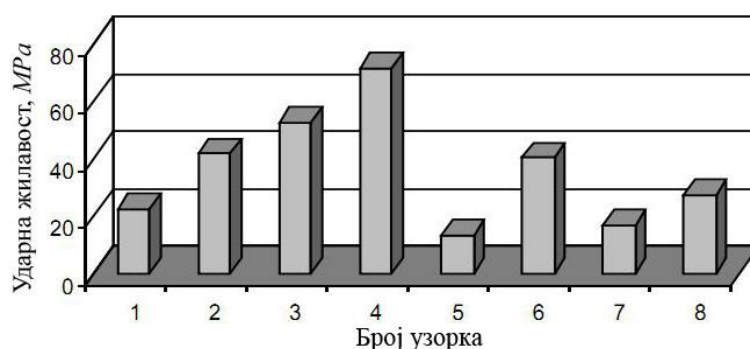
Таблица 9.1.8 Ударна жилавост испитиваних врста стена

Ударна жилавост, MPa	Врста стене и њено порекло			
	Орг.кречњак-Вучјак	Долом.креч.-Самар	Калц.-дол.креч-Градац	Андезит-Шумник
Ударна жилавост у правцу, I - I	22,40	17,00	27,20	13,40
Ударна жилавост у правцу, II - II	24,20	20,60	26,10	17,20
Ударна жилавост у правцу, III - III	28,80	24,60	28,30	22,40
Средње вредности	25,13	20,73	27,20	17,67



Слика 9.1.15 Графички приказ ударне жилавости испитиваних врста стена

На основу приказаних вредности ударне жилавости ових врста стена може се закључити да је реч о кртим стенама релативно мале ударне жилавости, што се може закључити и према изгледу површине лома, јер су оне грубе храпавости и оштрих ивица лома. Ради поређења ударне жилавости испитиваних врста стена, на слици 9.1.16 дат је приказ жилавости неких врста домаћих стена на основу испитивања изведена на институту ИМС у Београду.



Слика 9.1.16 Ударна жилавост различитих врста стена (средње вредности): 1-гранит, 2-дијабаз, 3-порозни базалт, 4-једри базалт, 5-кречњачки пешчар, 6-силицијумски пешчар, 7-крупнозрни мермер, 8-ситнозрни мермер [56,141]

Са претходне слике јасно се уочавају различите ударне жилавости разних, па и истих врста стена у зависности од начина формирања и структуре. Најмању ударну жилавост има кречњачки пешчар, док највећу ударну жилавост има једри базалт. Познавање ударне жилавости различитих врста стена битно је за избор грађевинских материјала као и за избор материјала радних делова машина за обраду (дробљењу, млевењу) стенских материјала.

9.1.3.г Одређивање јачине стена

- **Јачина стена** је отпор који она пружа када је изложена различитим врстама оптерећења при притиску, затезању, савијању, смицању, увијању или извијању. Најчешће се одређују јачине на притисак, затезање, савијање и смицање, док се јачина на увијање (торзију) и извијање ређе одређују, и то само у случајевима када је то неопходно. Стога се и у овом раду приказују само неки резултати испитивања јачине на притисак, затезање и савијање одређених врста стена.

При одређивању ових својстава стена прираст силе услед оптерећења је континуалан (150 ± 20 N/s), па се тако добија статичка јачина. Експериментално испитивање јачине стена изводи се на најмање три, а најчешће на пет узорка исечених из стене. Испитивање се изводи у три међусобно управна правца. За ова испитивања најчешће се користе узорци призматичног облика, а цео поступак испитивања од припреме узорка, начина испитивања и приказивања резултата дефинисани су одговарајућим стандардима [180].

Јачина стена зависи од: тврдоће минерала, структуре, текстуре, облика и величине додирних површина зрна, свежине минерала, врсте и количине везива, порозности, механичке оштећености, влажности и последица дејства ниских температура, начина припреме узорка за испитивање, правца наношења оптерећења, начина наношења оптерећења и др. Већу јачину имају стене са доста кварца, амфибола, пироксена, свежих фелдспата и других минерала веће тврдоће. Једре, мање порозне и ситнозрне стене са добром заобљеношћу зрна и јачим везивом

имају већу јачину. Већу јачину имају суве стене од водом засићених стена и стена које су биле изложене замрзавању. Узорци стена који нису припремани применом експлозива и нису били изложени јаким тектонским поремећајима имају већу јачину. Већа јачина се постиже при испитивању стена под дејством силе оптерећења у правцу управном на правац простирања слојевитости и шкриљавости, него при испитивањима у другим правцима [190].

- **Јачина на притисак** је својство стена која се најчешће испитује. Утицај влажности стена на ову јачину изражава се тзв. *степеном омекшања* (K_{om}), који представља однос јачине на притисак водом засићеног узорка и узорка суве стене. Овај коефицијент је најчешће мањи од јединице, али има случајева када је он код неких врста стена већи од јединице, па је тада реч о *степену отврдњавања*. Карактеристични случајеви су седиментна стена бихацит са лежишта у Бихаћу и магматска стена базалт са лежишта у месту Мало Нагоричине, чији је коефицијент омекшања $K_{om}= 1,15$, односно $K_{om}= 1,20$. Најповољније за коришћење су стене са коефицијентом омекшања $K_{om}= 0,6-0,9$, а употреба стена са коефицијентом омекшања мањим од 0,6 се не препоручује [56,141].

Експериментално се најчешће изводи испитивање јачине стена на притисак у сва три стања: сувом стању, водом засићеном стању и после одређеног броја циклуса замрзавања и одмрзавања. На сличан начин се испитује и јачина на притисак различитих врста бетона [37,130]. Све стене имају знатно већу јачину на притисак од јачине на затезање, савијање или смицање итд., а однос јачине на притисак у односу на остале јачине код различитих врста стена знатно се разликује. Код различитих врста кречњака јачина на притисак је најчешће већа за око седамнаест пута од јачине на затезање, око дванаест пута од јачине на савијање и око осам пута од јачине на смицање. Код магматских стена, на пример код гранита, јачина на притисак је чак око тридесет и шест пута већа од јачине на затезање, и око четрнаест пута од јачине на савијање и јачине на смицање [190].

Јачина на притисак за потребе овог рада одређена је на сувим и водом засићеним узорцима у облику коцке ($40\pm 1\text{ mm}$), чије су површине брушене и планпаралелне. Испитивање је изведено коришћењем стандардизоване опреме и на начин који је описан у нашим стандардима. Експериментална испитивања јачине стена обављена су на: универзалној хидрауличној преси са мерном опремом и могућношћу постизања максималне силе од 60 000 или 100 000 *daN*, а сила се читава са тачношћу $\pm 1\%$. За припрему узорка коришћена је машина за резање стена, машина за брушење стена, сушара са могућношћу постизања и регулисања температуре од $105\pm 5^\circ\text{C}$, прецизна вага тачности $\pm 0,01\%$, помоћни уређаји и др.

Меродавна јачина на притисак, за сваку врсту стена, добија се као средња вредност из пет узорака за сваки правац испитивања. У табелици 9.1.9 дати су резултати испитивања јачине на притисак узорака израђених од органогеног кречњака.

Таблица 9.1.9 Резултати испитивања јачине на притисак узорака органогеног кречњака

Број узорка	Површина попречног пресека узорка A, cm^2	Сила притиска P, daN	Јачина на притисак $R_{cm}=P/A,$ MPa	Сила притиска P, daN	Јачина на притисак $R_{cm}=P/A,$ MPa	Сила притиска P, daN	Јачина на притисак $R_{cm}=P/A,$ MPa
		Правац I-I		Правац II-II		Правац III-III	
1.	16,81	23000	136,82	22300	132,65	23000	136,82
2.	16,81	22500	133,84	23400	139,20	23700	140,98
3.	16,81	23300	138,60	22800	135,63	20300	120,76
4.	16,81	18500	110,05	20100	119,57	22000	130,87
5.	16,81	21700	129,08	22100	131,46	22100	131,46
Средње вредности	16,81		129,67		131,70		132,17

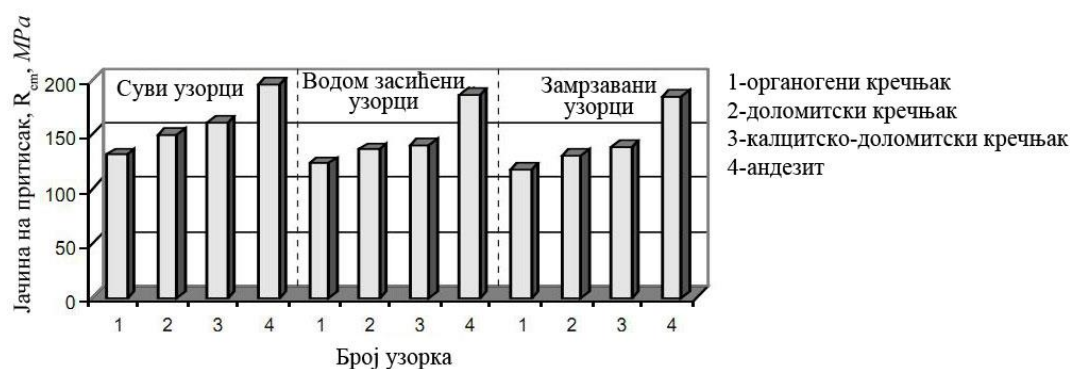
У претходној табелици дате су јачине на притисак за различите правце доношења оптерећења, тако да је средња вредност јачине на притисак испитиваних узорака кречњака $R_{cm}= 131\text{ MPa}$. На исти начин изведена су испитивања јачине на притисак и на узорцима других врста стена: доломитског кречњака, калцитско-доломитског кречњака и андезита.

За испитивања водом засићених узорака коришћено је по петнаест узорака за сваку врсту стене, а за одређивање јачине на притисак после 25 циклуса замрзавања и одмрзавања коришћено је по три узорка у облику коцке ($100 \pm 1 \text{ mm}$), за сваку врсту стена.

Резултати испитивања јачине на притисак испитиваних врста стена за сва три случаја дати су у табlici 9.1.10 и на слици 9.1.17.

Таблица 9.1.10 Јачина на притисак испитиваних врста стена

Врста и порекло стена	Јачина на притисак $R_{cm}=P/A$, МПа			Коефицијент омекшавања K_{om}
	Суви узорци	Водом засићени узорци	Узорци после 25 циклуса замрзавања	
Орг.кречњак-Вучјак	131	123	117	0,94
Долом.креч.-Самар	150	136	130	0,91
Калц.-дол.креч.-Градац	161	140	138	0,87
Андезит-Шумник	195	186	184	0,95



Слика 9.1.17 Приказ резултата испитивања јачине на притисак неких врста стена [133,141]

Таблица 9.1.11 Јачина на притисак различитих врста стена из неких лежишта

Број Узорка	Врста стене	Лежиште	Јачина на притисак $R_{cm}=P/A$, МПа			Коефицијент омекшавања K_{om}
			Суви узорци	Водом засићени узорци	Узорци после 25 циклуса замрзавања	
1. 2. 3.	Седиментне стене: Бихацит Пешчар Кречњак	Бихаћ Беле Воде Зидани Мост	142,00 109,90 140,00	164,00 99,10 99,00	163,00 78,40 81,00	1,15 0,87 0,69
1. 2. 3.	Метаморфне стене: Гнајс Серпентинит Мермер	Кочани Погорелац Небрегово	205,90 152,40 224,00	193,00 138,70 205,00	196,70 137,70 204,00	0,94 0,91 0,92
1. 2. 3. 4. 5. 6.	Магматске стене: Гранит Сијенит Латит Дацит Диабаз Базалт	Шутица Танда Лединци Славковци Пчелинац Мало Нагоричане	187,90 105,00 261,40 210,40 397,70 254,30	140,50 100,00 243,30 175,50 361,70 306,00	138,20 121,50 230,00 176,00 257,70 251,50	0,75 0,95 0,93 0,83 0,91 1,20

• **Јачина на затезање** се ређе одређује него јачина на притисак, мада је и она значајно својство стена. Користе се узорци истог облика и димензија као и за јачину на притисак, али су испитивани само суви узорци на којима су изведени додаци, како би могли да се стегну у алат уређаја за испитивање на затезање. Ови додаци су у облику металних плочица са куком које су залепљене за испитиване узорке, а поступак испитивања је сличан испитивању на притисак изведен у истим условима. Испитивање је изведено на по пет узорака за сваки правац испитивања, а добијени резултати за узорке органогеног кречњака приказани су у табlici 9.1.12.

Таблица 9.1.12 Резултати испитивања јачине на затезање узорака органогеног кречњака

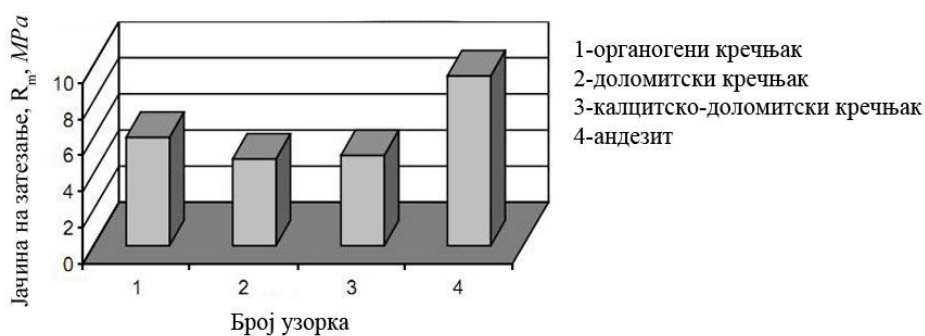
Броја узорка	Површина попречног пресека узорка A, cm^2	Сила затезања P, daN	Јачина на затезање $R_m = P/A, \text{MPa}$	Сила затезања P, daN	Јачина на затезање $R_m = P/A, \text{MPa}$	Сила затезања P, daN	Јачина на затезање $R_m = P/A, \text{MPa}$
		Правац I-I		Правац II-II		Правац III-III	
1.	17,02	11000	6.46	12000	7.05	10200	5.99
2.	17,02	8300	4.88	11500	6.76	12100	7.11
3.	17,02	13000	7.64	8900	5.23	8800	5.17
4.	17,02	7000	4.11	9000	5.29	10300	6.05
5.	17,02	11500	6.76	10800	6.35	8700	5.11
Средње вредности	17,02		5,97		6,14		5,89

Средња вредност јачине на затезање испитиваних узорака органогеног кречњака је $R_{cm} = 6 \text{ MPa}$. На основу великог броја испитиваних узорака различитих врста кречњачких стена на институту ИМС јачина на затезање се креће у широким границама од $1,5 \text{ MPa}$ код порозних кречњака до око 10 MPa код једрих и свежих кречњака.

На исти начин и на истим уређајима изведено је испитивање јачине на затезање и осталих врста стена, а добијени резултати су дати у табелици 9.1.13 и на слици 9.1.18.

Таблица 9.1.13 Јачина на затезање испитиваних врста стена

Врста и порекло стене	Јачина на затезање $R_m = P/A, \text{MPa}$			
	Правац I-I	Правац II-II	Правац III-III	Средње вредности
Орг.кречњак - Вучјак	5,97	6,14	5,89	6,00
Долом. креч. - Самар	5,26	5,42	3,72	4,80
Калц.-дол. креч. - Градац	5,61	5,36	4,03	5,00
Андезит - Шумник	9,48	9,84	8,90	9,40

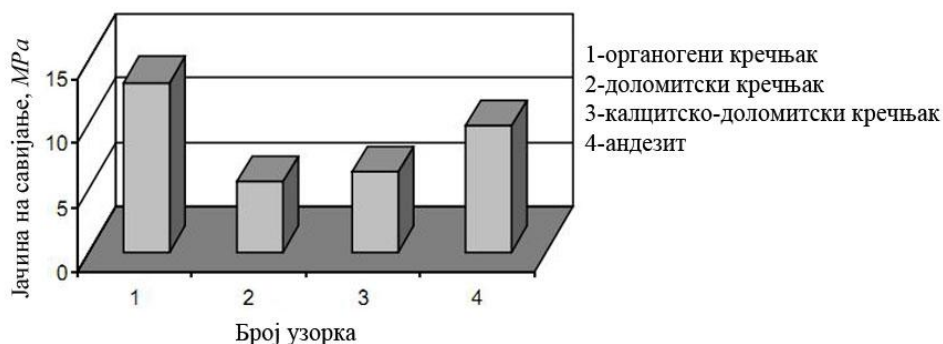


Слика 9.1.18 Приказ резултата испитивања јачине на затезање неких врста стена

• **Јачина на савијање** ређе се одређује, а овде је то урађено, али само на по једном узорку за сваку врсту испитиваних стена на свим узорцима, и то за правац који је управан на раван простирања слојевитости и шкриљавости, јер се тада очекују највеће јачине на савијање. Узорци су припремљени на начин који је дефинисан стандардом за ову врсту испитивања, а наношење оптерећења је изведено поступно брзином од $20 \pm 5 \text{ N/s}$, све до лома узорака [131,190]. Јачина на савијање неких врста стена дата је у табелици 9.1.14 и на слици 9.1.19.

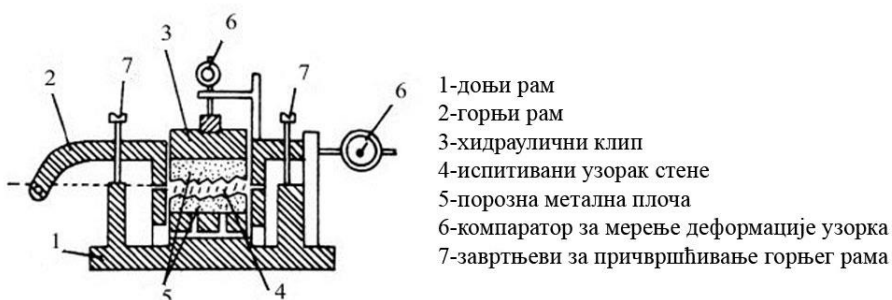
Таблица 9.1.14 Јачина на савијање испитиваних врста стена

Врста стена	Орг.кречњак-Вучјак	Долом.креч.-Самар	Калц.-дол.креч.-Градац	Андезит-Шумник
$\sigma_s = \frac{3 P \cdot L}{2 b \cdot h^2}, \text{MPa}$	13,20	5,46	6,25	9,82



Слика 9.1.19 Приказ резултата испитивања јачине на савијање неких врста стена

• **Јачина на смицање** одређена је само на сувим узорцима органогеног кречњака. Параметри јачине на смицање су кохезиона јачина (C) и угао унутрашњег трења (ϕ), а могу се довољно тачно одредити само на припремљеним стандардизованим узорцима уз примену стандардне процедуре испитивања. Припрема узорка изведена је као и за испитивање јачине на притисак. Испитивање је изведено на по пет сувих узорка по сваком правцу испитивања, који су у облику коцке ($41 \pm 1 \text{ mm}$). Опит је изведен поступком директног смицања узорка помоћи Касаграндеовог уређаја приказаног на слици 9.1.20.



Слика 9.1.20 Схема Касаграндеовог уређаја за извођење опита директног смицања [56,190]

Овај уређај је тако конструисан да може истовремено, или одвојено, да наноси вертикално оптерећење и хоризонтално смицање на испитиваним узорцима, а на мерним уређајима се региструју компоненте деформације. Касаграндеов уређај се користи тако што се монтира на универзалну хидрауличну пресу. Узорак стене се ставља у посебно конструисану *ћелију за смицање*, и пре испитивања изводи се „тренирање“ узорка наношењем вертикалног оптерећења, како би се постигли услови линеарне зависности између напона и деформације, када важи Хуков закон еластичности. Узорак стене се прво излаже вертикалном оптерећењу, а затим смицању у хоризонталној равни у једнаким временским интервалима. Уређај има могућност да се испитивање јачине на смицање може извести под различитим угловима, али најчешће под угловима смицања од 45° и 60° . На основу очитаних вредности деформација и познате вредности модула еластичности за одређену стену, применом познатих математичких израза израчунава се одговарајући напон. Вредности напона услед различитих величина силе оптерећења узорка за углове смицања од 45° и 60° дате су у таблицама 9.1.15 и 9.1.16.

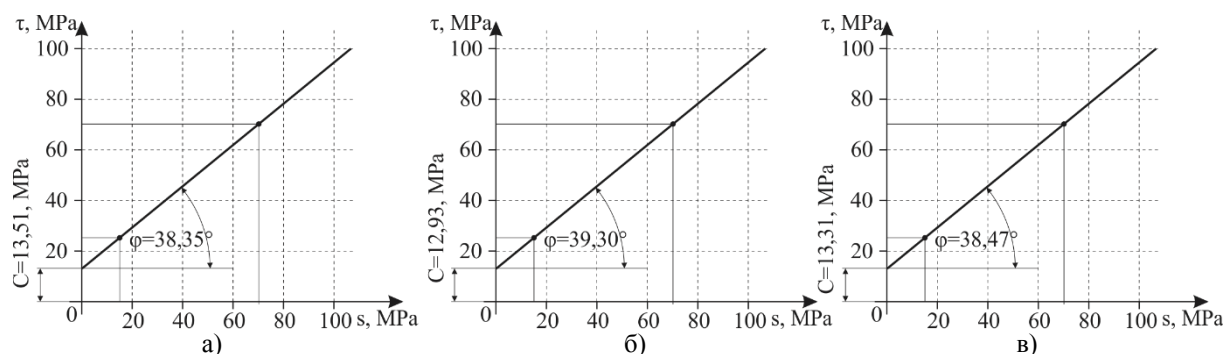
Таблица 9.1.15 Одређивање нормалног и тангенцијалног напона за угао смицања од 45°

Број узорка	Површина попречног пресека узорка, A, cm^2	Сила притиска	Нормални напон	Танген. напон	Сила притиска	Нормални напон	Танген. напон	Сила притиска	Нормални напон	Танген. напон
		P, daN	σ, MPa	τ, MPa	P, daN	σ, MPa	τ, MPa	P, daN	σ, MPa	τ, MPa
		Правац I-I			Правац II-II			Правац III-III		
1.	17,015	15700	65,25	65,25	15200	63,17	63,17	16200	67,32	67,32
2.	17,015	11800	49,04	49,04	18800	78,13	78,13	12800	53,19	53,19
3.	17,015	19300	80,21	80,21	19100	79,38	79,38	18300	76,05	76,05
4.	17,015	19200	79,79	79,79	15000	62,34	62,34	18800	78,13	78,13
5.	17,015	14400	59,84	59,84	14400	59,84	59,84	15500	64,42	64,42
Средње вредности	17,015		66,83	66,83		68,57	68,57		67,82	67,82

Таблица 9.1.16 Одређивање нормалног и тангенцијалног напона за угао смицања од 60°

Броја узорка	Површина попречног пресека узорка А, cm ²	Сила притиска Р, daN	Нормални напон σ, МПа	Танген. напон τ, МПа	Сила притиска Р, daN	Нормални напон σ, МПа	Танген. напон τ, МПа	Сила притиска Р, daN	Нормални напон σ, МПа	Танген. напон τ, МПа
		Правац I-I			Правац II-II			Правац III-III		
1.	17,015	6100	17,93	31,15	6000	17,63	30,54	5800	17,04	29,52
2.	17,015	3300	9,70	16,80	4700	13,81	23,92	3800	11,17	19,34
3.	17,015	4600	13,52	23,41	3500	10,29	17,81	4500	13,22	22,90
4.	17,015	4300	12,64	21,89	6200	18,22	31,56	4400	12,93	22,40
5.	17,015	6300	18,51	32,07	3500	10,29	17,81	5900	17,34	30,03
Средње вредности	17,02		14,46	25,06		14,05	24,33		14,34	24,84

На основу добијених средњих вредности нормалних и тангенцијалних напона конструисани су дијаграми $\tau = f(\sigma)$ помоћу којих су одређени параметри јачине на смицање испитиваних узорака за различите правце испитивања, што је приказано на слици 9.1.21.



Слика 9.1.21 Графички приказ одређивања параметара смицања (C, φ) за органогени кречњак: а) правац смицања I-I, б) правац смицања II-II, в) правац смицања III-III

Потребно је рећи, да кохезиону јачину, односно јачину на смицање, имају само везане стене (камен), док је она код невезаних стена једнака нули. Такође, потребно је рећи да се угао унутрашњег трења угао смицања не мери, већ добија прорачуном помоћу $\text{tg}\phi$ из израза $\tau = \sigma \cdot \text{tg}\phi + C$. Из техничког аспекта јачина стена при различитим начинима оптерећења је од изузетног значаја јер од овог њиховог својства зависи њихова обрадљивост и примена. Параметри јачине стена на смицање у великој мери зависе од њихове влажности, што нарочито важи за угао унутрашњег трења.

После великог броја експерименталних испитивања различитих врста стена дошло се до сазнања, да је у највећем броју случајева јачина једне те исте врсте стене на притисак најчешће 20÷40 пута већа од јачине на затезање, 20÷30 пута већа од јачине на увијање и смицање и 10÷20 пута већа од јачине на савијање [56]. Потребно је нагласити да су ово само оријентационе величине, јер због утицаја различитих фактора на својства стена ове вредности могу бити различите и код узорака узетих из једног блока једне те исте стене [56,131].

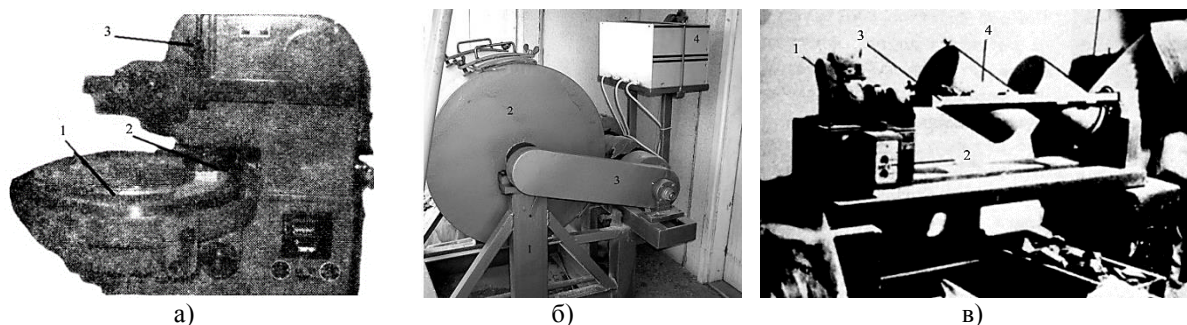
9.1.3.д Одређивање отпорности на хабање неких врста стена

Отпорност на хабање стена представља њихову постојаност према различитим процесима хабања, што се дефинише мањим или већим губитком стенске масе материјала. Њихова отпорност на хабање не зависи само од тврдоће минерала, који формирају (граде) стену, већ и од начина њихове агрегације, свежине минерала, цепљивости, врсте природног везива (цемента) и др. Када су у питању везане стене, мању отпорност према хабању имају стене састављене од минерала мање тврдоће (лискун, талк, крупнозрнасти калцит и др.). Уопштено мању отпорност према хабању имају хлоридне, сулфидне и карбонатне стене, док већу отпорност имају силицијумске и силикатне стене састављене од свежих минерала.

Експериментално испитивање отпорности на хабање стена и њихових агрегата дефинисано је одговарајућим стандардима. Према нашим стандардима предвиђене су три различите методе: *метода Бома*, *метода Лос Анжелес* и *метода Девала*. *Метода Бома*

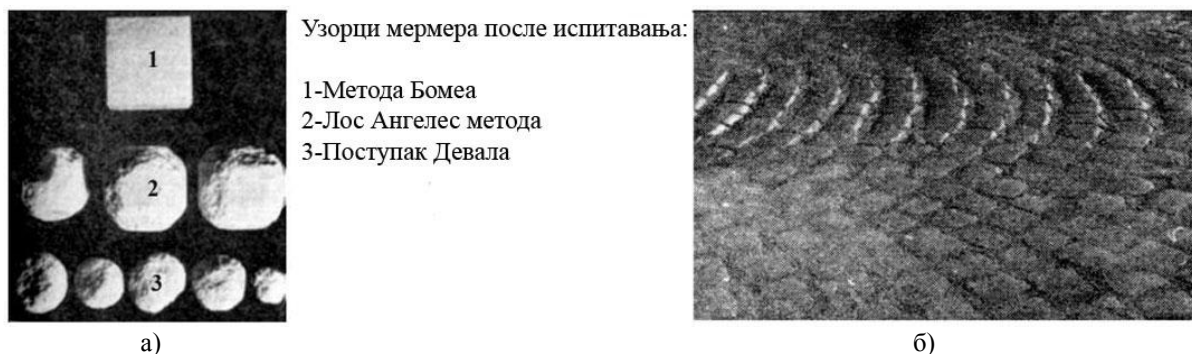
примењује се за испитивање отпорности на хабање узорака у облику коцке тачно одређених димензија. *Лос Ангелес* метода користи се за испитивање отпорности на хабање (дробљивост) природног и ломљеног камена различитог облика. *Метода Девала* такође служи за одређивање отпорности на дробљење природног и ломљеног камена, и пружа могућност истовременог испитивања више врста стенских материјала при истим условима.

На слици 9.1.22 приказани су различити уређаји за испитивање отпорности на хабање стенских материјала применом различитих стандардизованих метода.



Слика 9.1.22 Различите методе за испитивање отпорности на хабање стенских материјала:
 а) метода Бомеа (1-хабајућа путања-прстен, 2-узорак, 3-погонски систем уређаја),
 б) Лос Ангелес метода (1-постоље, 2-бубањ, 3-преносник, 4-командни панел),
 в) метода Девала (1-погонски мотор, 2-командни панел, 3-рам са осовином, 4-цилиндри за узорке) [56,141,190]

Илустрације ради, на слици 9.1.23 приказани су узорци (коцке) мермера после испитивања њихове отпорности на хабање применом различитих стандардизованих метода, и узорци (коцке) гранита у реалним условима хабања при експлоатацији на путу.



Слика 9.1.23 Хабање узорка мермера и гранита: а) хабање исте врсте мермера при испитивању различитим методама, б) хабање исте врсте гранита у реалним условима експлоатације [56,141]

- **Експериментално одређивање отпорности стена на хабање по методи Бомеа** изведено је на по три сува узорка израђених од четири врсте стена. Испитивање је изведено на уређају за брушење приказаном на претходној слици према важећем стандарду. Приказани уређај за испитивање отпорности стена на хабање је у ствари један трибометар, а у зависности од конструкционог решења има их више врста.

Брусни прстен израђен је од челичног лива спољашњег пречника 750 mm, чија је тврдоћа 185-220 НВ, у који може да се утисну зрна абразива. Као средство за брушење користи се технички корунд прописане гранулације. Држач испитиваног узорка служи као вођица, а притискивач мора да обезбеди силу од 300 N. Погонски механизам даје број обртаја $n = 30 \pm 1 \text{ min}^{-1}$, односно брзину $v = 0,5 \text{ m/s}$, и његово аутоматско заустављање после сваких двадесет и два обртаја.

Испитивање отпорности на хабање применом ове методе, изводи се на сувим и водом засићеним узорцима, а у овом случају испитивања су изведена на сувим узорцима, зато што се тада добијају веће масе продуката хабања. Разлика при испитивању је само у томе, што се при испитивању водом засићених узорка они морају пре испитивања држати потопљени у води

седам дана, и што се при извођењу самог опита морају квасити по стандардизованој процедури, како би се задржала почетна влажност испитиване површине узорка.

Припрема узорка је слична као и код претходних испитивања, а разлика је само у томе што су узорци у облику коцке дужине ивице 71 mm, односно што ближе вредности која даје површину једне стране коцке од 50 cm². На сличан начин изводи се припремање узорка од бетона, а разлика је само у томе што се они могу држати потопљени у води на собној температури двадесет и осам дана због сазревања бетона [37,130].

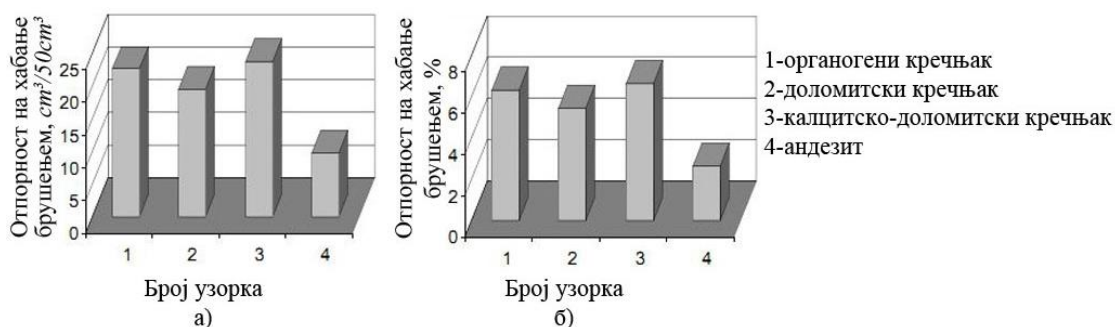
Поступак испитивања је релативно једноставан. Пре почетка испитивања измере се масе и димензије узорка. Испитивани узорак се постави у држач и после сваких 22 обртаја брусног прстена додаје се ново средство за брушење. После 110 обртаја брусног прстена треба измерити масу испитиваног узорка и окренути га за 90° како би хабању била изложена следећа страница. Поступак се понавља још два пута и после 440 обртаја брусног прстена поново се мери маса и димензија испитиваног узорка [180].

Губитак масе узорка после сваких 110 обртаја брусног прстена мери се због праћења интензитета хабања у току испитивања, а величина укупног хабања израчунава се помоћу израза $H_B = m/\rho_s \cdot A/50$, где је H_B - величина хабања, cm³/50 cm²; $m = m_1 - m_5$ - губитак масе узорка услед процеса хабања, g; $\rho_s = m_1/V$ - специфична маса узорка у сувом стању, g/cm³; A - укупна површина која је изложена процесу хабања, cm². Губитак масе узорка оријентационо се може проценити и на основу повремених мерења димензија испитиваног узорка.

Отпорност на хабање стенских материјала применом методе Бомеа даје се као средња вредност резултата испитивања на најмање три узорка, а добијени резултати заокружују се на 0,10 cm³/50 cm². Резултати испитивања отпорности на хабање неких врста стена дати су у табlici 9.1.17 и на слици 9.1.24.

Таблица 9.1.17 Резултати испитивања отпорности на хабање стена по методи Бомеа

Број Узорка	Врста и порекло стена	Величина хабања, $H_B = m / \rho_s \cdot A / 50, \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$				Губитак масе, %
		Узорак 1.	Узорак 2.	Узорак 3.	Средње вредности	
1.	Орг.кречњак-Вучјак	23,20	22,90	21,80	22,63	6,32
2.	Долом.креч.-Самар	19,50	18,30	20,60	19,47	5,44
3.	Калц.-дол.креч-Градац	23,40	24,30	23,60	23,77	6,64
4.	Андезит-Шумник	10,20	9,10	9,90	9,73	2,62



Слика 9.1.24 Графички приказ отпорности на хабање стена испитиваних по методи Бомеа: а) средње вредности губитка масе, б) губитак масе изражен у процентима

• **Експериментално одређивање отпорности на хабање стена по методи Лос Анжелес** добија се збирна отпорност услед међусобног трења агрегата (туцаника) и ударног оптерећења куглама од ливеног гвожђа пречника око 47 mm и масе 390÷445 g. Комплетно пуњење представља сет од дванаест кугли укупне масе 5000±25 g. Погонски мотор обрће цилиндар (бубањ) уређаја равномерним бројем обртаја 30÷33 min⁻¹. Трајање испитивања зависи од броја обртаја цилиндра (бубња) уређаја, тако да за гранулације узорка А, В, С и Д мора да укупан број обртаја буде 500, а за гранулацију Е неопходно је 1000 обртаја. После рада уређаја вади се агрегат, а затим се просејава прво на сити пречника отвора од 6,3 mm, а онда на сити пречника отвора од 2 mm. Остаци на ситима после оба просејавања се измешају, оперу и осуше до природне запреминске

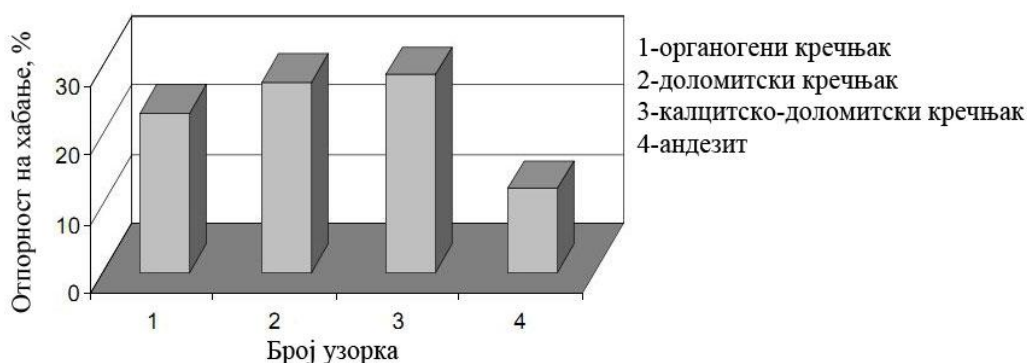
маса, и осушена маса остатка материјала се мери што је могуће прецизније. Градација гранулометријског састава испитиваних узорака, укупна маса испитиваних узорака, укупна ударна маса (број кугли) и поступак испитивања дефинисани су одговарајућим стандардима [180].

Коефицијент похабаности по Лос Ангелес методи израчунава се помоћу израза $H_{LA}=(m_1-m_2/m_1) \cdot 100, \%$, где је m_1 -маса сувог узорка пре испитивања, m_2 -маса осушеног остатка испитиваног узорка кроз сита пречника отвора од 2 mm. Конкретна испитивања су изведена на по три узорка за сваку врсту стена исте гранулације, како би се добијени резултати отпорности на хабање (таб. 9.1.18 и сл. 9.1.25) могли међусобно да упоређују.

Таблица 9.1.18 Резултати испитивања отпорности на хабање стена по Лос Ангелес методи

Број Узорка	Врста и порекло стена	Градација	Величина хабања $H_{LA}=(m_1-m_2/m_1) \cdot 100, \%$			Средње вредности, %	Дозвољена величина хабања по градацијама
			Узорак 1.	Узорак 2.	Узорак 3.		
1.	Орг.кречњак-Вучјак	В	22,80	23,10	23,40	23,10	$K^* < 25-28-30-40$
2.	Долом.креч.-Самар	В	27,70	27,30	28,10	27,70	$K^* < 25-28-30-40$
3.	Калц.-дол.креч-Градац	В	29,30	28,20	28,60	28,70	$K^* < 25-28-30-40$
4.	Андезит-Шумник	В	11,80	12,10	12,40	12,10	$E^* < 16-18-22-30$

*Напомена: К – кречњачке стене, Е – еруптивне стене.



Слика 9.1.25 Графички приказ отпорности на хабање стена испитиваних по Лос Ангелес методи

Према резултатима испитивања отпорности на хабање по овој методи може се рећи, да узорци органогеног кречњака имају средњу или добру отпорност, јер се губитак масе креће у границама од 6÷10%. Узорци доломитског кречњака имају добру отпорност, јер се губитак масе креће у границама од 4÷6%. Узорци калцитско-доломитског кречњака имају средњу или добру отпорност јер се губитак масе креће од 6÷10%. Узорци андезита имају изузетно добру отпорност, јер се губитак масе материјала креће у границама 0÷4%.

Ова испитивања отпорности наведених стена нам указују на то, да су делови грађевинске механизације при контакту са стенским материјалима у току рада изложени абразивном хабању високог интензитета.

9.1.4 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА

При производњи, транспорту и уградњи различитих грађевинских материјала на контактним површинама радних делова грађевинских машина ствара се трибо-технички систем којег чине чврсти грађевински материјал, са једне, и материјал радних делова који су у директном контакту са грађевинским материјалима, са друге стране. Ови процеси се готово увек одвијају у агресивној околној средини без присуства средства за подмазивање. Због тога је неопходно познавање својстава грађевинских материјала, материјала од кога су израђени радни делови грађевинских машина и утицај околне средине, како би се могли пратити и контролисати различити триболошки процеси, који настају у зонама тренутног додира и на контактним површинама.

Радни делови грађевинских машина, који су у директном контакту са грађевинским материјалима, најчешће су изложени процесима абразивног хабања оба типа, а највећи интензитет хабања се јавља при обради, транспорту и уградњи чврсто везаних стенских материјала (камена). На интензитет хабања металних радних делова највећи утицај имају петрографска својства стенских материјала, односно врста, величина, облик и јачина везе зрна минерала од којих су стене формиране. Једно од најзначајних својстава стенских материјала је њихова порозност, јер директно утиче на остала својства ових материјала.

У овом поглављу приказани су резултати експерименталних испитивања петрографских, физичких и механичких својстава четири врсте стенских материјала, и то три врсте кречњака из различитих лежишта, који припадају групи седиментних стена и андезита, који се сврстава у површинске магматске стене. Ови стенски материјали се најчешће користе за израду саобраћајница, и у директном су контакту са металним материјалима радних делова грађевинске механизације, који су предмет истраживања у овом раду. Поред резултата сопствених испитивања ових стенских материјала [133,141], приказани су и неки резултати добијени дугогодишњим експерименталним испитивањима својстава других стенских материјала који се користе у грађевинарству, што служи за упоређивање својстава отпорности различитих врста стенских материјала.

Приликом одређивања петрографских својстава стенских материјала утврђен је њихов минералоски састав, структура и текстура. Минералоски састав чине основни, споредни и случајни минерали. Њихова величина, облик, јачина међусобне везе, просторни распоред и испуњеност простора стене минералима дефинишу структуру и текстуру стена. Структуре ових испитиваних стенских материјала су различите, а текстуре су хомогене, масивне и компактне, осим код доломитског кречњака чија је текстура масивна али некокомпактна.

Одређивањем неких физичких својстава стенских материјала, специфичне масе (густине), запреминске масе, порозности и упијањем воде, дошло се до више значајних резултата. Испитивани стенски материјали сврставају се у групу масивних стена, различите порозности и склоности ка упијању воде. Најмању порозност и упијање воде има калцитско-доломитски кречњак и може се разврстати у групу слабо порозних стена, као и органогени кречњак, док доломитски кречњак и андезит спадају у стене умерене порозности и упијања воде. Упијање воде, уз ниске и високе температуре увелико утичу на промену својстава стенских материјала, тако што их углавном погоршавају.

Највеће разлике у порозности и упијању воде уочене су код разних врсте кречњака, пешчара и андезита. Код водозасићених узорака, код већине стенских материјала, долази до пада јачине на притисак, тзв. *омекшавања стена*, али постоје стене код којих се ово својство побољшава, а пример су стенски материјали бихацит и базалт где се јачина на притисак повећава за 15%, односно 20%. Стенски материјали код којих је коефицијент омекшања већи од 40% нису за техничку употребу [131,190]. Испитивањима је установљено да се после вишеструког замрзавања и одмрзавања узорака, јачина на притисак знатно смањује.

Ниске температуре неповољно утичу на механичка својства код свих стенских материјала, а бољу отпорност имају стенски материјали велике јачине и мале порозности од стена мале јачине и велике порозности. Бигар и неке врсте стена велике јачине имају суперкапиларну порозност и потпуно су отпорне на дејство ниских температура, јер лед има довољно простора да се неометано шири, па се не стварају услови за изузетно високе притиске у шупљинама стена који доводе до њиховог разарања.

Високе температуре неповољно утичу на механичка својства стена. Скоро све врсте стена добро подnose повишене температуре до 500°C. На високим температурама постојаније су стене формиране од минерала чија се топлотна проводљивост знатно не разликује од тачке до тачке. Кречњаци и мермери имају добру отпорност све до температуре од 800°C када наступа њихово калцинисање.

Тврдоћа стена зависи од тврдоће минерала од којих су формиране и од тврдоће везива (цемента) који везују минерална зрна, а модул еластичности и остали параметри еластичности зависе од врсте и тврдоће стенских минерала, структуре и текстуре, јачине везе минералних зрна и свежине минерала, влажности, јачине и смера дејства оптерећења, и др. Модул еластичности је већи код масивних, компактних и свежих стена, него код нехомогених, а влажност стена смањује параметре еластичности, али има и изузетака, као на пример, код гранита и мермера. Испитивањем модула еластичности, Поасоновог коефицијента и осталих параметара еластичности на узорцима од органогеног кречњака дошло се до резултата који су у горњој зони вредности за групу кречњачких стена.

На ударну жилавост стенских материјала највише утичу структура, порозност и свежина минерала од којих су формиран. Највећу ударну жилавост имају стене афитске, затим криптокристаласте (зрнасте) па порфирске структуре. Ударна жилавост стена није сагласна јачини на притисак, будући да стене релативно велике јачине на притисак, могу имати малу ударну жилавост. Испитивањем ударне жилавости узорака три врсте кречњака и једне врсте андезита добијени су веће вредности ударне жилавости код кречњака него код андезита, што иде у прилог претходно изнетом ставу да ово својство стена највише зависи од структуре стенских материјала, а исто тако, да већа јачина на притисак не обезбеђује и већу ударну жилавост стена.

Резултати испитивања јачине на притисак разних врста стена, довели су до сазнања да највећу јачину и коефицијент омекшавања има андезит, а најмању органогени кречњак. Највећу јачину на затезање показао је андезит, а најмању доломитски кречњак. Највећу јачину на савијање показао је органогени кречњак, а најмању доломитски кречњак. Испитивањем јачине на смицање органогеног кречњака дошло се до резултата да је средња вредност те јачине око десет пута мања од јачине на притисак. Испитивањем механичких својстава великог броја разних стенских материјала из домаћих лежишта у различитој литератури [56,131,190] дошло се до оријентационих односа између јачина на притисак, затезање, савијање, увијање и смицање. Највеће вредности, јачине на затезање, савијање и др. су неколико десетина пута мање у односу на јачину на притисак. Механичка својства стена се знатно разликују чак, и код једне те исте врсте стена, па и код узорака из истог стенског блока, те ове односе треба узети као смернице при истраживању. Из тог разлога су прописане законске норме за периодична лабораторијска испитивања неких својстава стенских материјала, не само при истраживању лежишта, већ и при производњи и њиховој уградњи. Такође, и други грађевински материјали, у зависности од њихове намене, подлежу повременим испитивањима.

Испитивањем отпорности на хабање различитих врста стенских материјала дошло се до податка да најбољу отпорност има андезит, а остали кречњачки стенски материјали имају отпорност на хабање, око два и по пута мању него андезит. То је и разлог што се хабајући слојеви асфалта на саобраћајницама израђују од мешавине стенских материјала веће отпорности на хабање. Испитивањем отпорности на хабање стенских материјала услед дробљења по другим методама, такође дају сличне резултате, јер су ове прописане методе компаративне.

Познавање својстава различитих грађевинских материјала, а посебно стенских материјала, није важно само из аспекта изградње грађевинских објеката, већ ништа мање и из аспекта производње (обrade), транспорта и уградње ових материјала. Познавањем различитих својстава грађевинских материјала обезбеђује се правилно конструисање, израда и експлоатација грађевинских машина, нарочито њихових радних делова који су у директном контакту са грађевинским материјалима. На овај начин могуће је израдити, или репарирати разне радне делове грађевинских машина, што доприноси повећању њихове продуктивности и радног века, као и смањењу трошкова одржавања у току експлоатације.

9.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА ПРИ РЕПАРАТУРНОМ И ПРОИЗВОДНОМ НАВАРИВАЊУ РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ

Експериментална истраживања из области наваривања, било да је реч о репаратурном или производном наваривању, могуће је извести на више начина. Избор модела истраживања мора да омогући добијање употребљивих резултата зависно од постављеног циља истраживања. Основни циљ овог рада је, да се применом одговарајућег поступка, избором погодних додатних материјала и пројектовањем оптималне технологије, изведе успешно репаратурно или производно наваривање радних делова грађевинских машина из аспекта техно-економске оправданости. Да би се дошло до оптималне технологије наваривања потребно је испитати хемијски састав и механичка својства материјала од кога су израђени радни делови грађевинских машина. Ови резултати представљају први корак при овим истраживањима и основни полаз за избор поступка наваривања, избор одговарајућег додатног материјала и пројектовање оптималне технологије наваривања.

Да би се пројектовала оптимална технологија наваривања неопходно је извести већи број испитивања својстава основног и додатног материјала на физичким моделима (моделска испитивања), односно моделирање овог процеса. Моделирање процеса наваривања подразумева израду бројних физичких модела за испитивање, а оптимална технологија наваривања може се одредити тек после бројних проба, варирањем улазних подесних параметара. Радни делови грађевинских машина израђују се од посебних материјала (челика, ливеног гвожђа и др.), који се сврставају у групу условно заварљивих метала што значи да је неопходно предузети додатне мере и створити услове за успешно наваривање.

Квалитет наварених превлака проверава се истим методама као и код заварених спојева, али треба нагласити да се поузданији резултати добијају применом метода са разарањем од метода без разарања материјала [60,63].

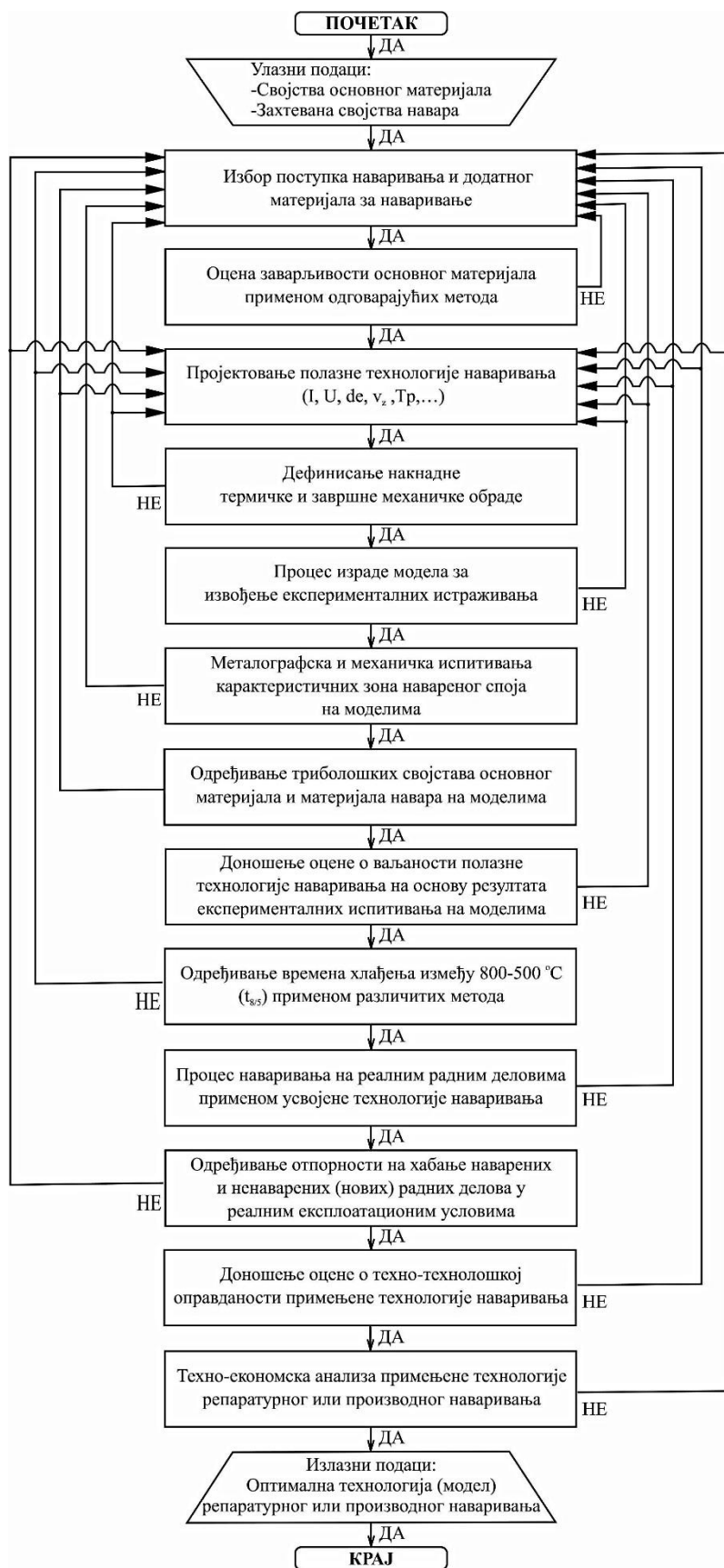
Испитивањем механичких својстава основног и додатног материјала (навара) изводи се применом стандардизованих метода, које тачно прописују поступак испитивања на узорцима [180]. Најбоља оцена о механичким својствима навареног споја може се дати на основу испитивања ударне жилавости, јер се на тај начин може одредити изузетно важно својство *жилавост лома* [145,146,147], док је најбољи начин за оцену квалитета наваривања испитивање јачине на смицање споја на основном и међуповршини додатног материјала [97,102].

На основу резултата експерименталних истраживања на физичким моделима доноси се оцена о квалитету процеса наваривања, односно одлука о потврди, побољшању или одбацивању предложеног модела наваривања. Међутим, коначна одлука о усвајању предложеног модела репаратурног или производног наваривања може се донети тек после његове провере, испитивањем на реалним радним деловима грађевинске механизације при њиховој експлоатацији у реалним радним условима.

9.2.1 ДЕФИНИСАЊЕ НАЧИНА ИЗВОЂЕЊА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Пре почетка наваривања неког радног дела грађевинске механизације неопходно је одредити својства материјала од кога је овај део израђен (хемијски састав, физичко-механичка својства, термичка својства, геометрију и масу дела, могућност механичке и термичке обраде и др.), јер под утицајем различитих фактора за време експлоатације, у мањој или већој мери, долази до промене ових својстава. Захтевана својства навара дефинишу се на основу више утицајних фактора, углавном везаних за радне услове дела током експлоатације, мада могу бити везана и за изглед наварених површина.

Уопштено говорећи, експериментална истраживања могу се извести према различитим моделима, а ова истраживања изведена су према алгоритму (блок дијаграму) приказаном на слици 9.2.1



Слика 9.2.1 Алгоритам експерименталних истраживања

Додатни материјал бира се на основу захтеваних својстава навара, док избор начина наваривања произлази из захтева да се добије навар који ће поуздано радити за предвиђени радни век.

После избора одговарајућег додатног материјала и начина наваривања неопходно је проценити заварљивост основног материјала са изабраним додатним материјалом. Ако је основни материјал условно заварљив, неопходно је предузети додатне мере како би се побољшала заварљивост основног материјала, и добио спој који испуњава тражене захтеве.

У циљу процене излазних својстава навара, препоручује се прорачун времена хлађења између 800 и 500°C, а то време означава се са $t_{8/5}$. Оно омогућава да се са задовољавајућом тачношћу може одредити очекивана микроструктура навара, тврдоћа и заварљивост челика за које постоје конструисани КНЗ-дијаграми. Такође, применом ових дијаграма и времена хлађења $t_{8/5}$, могуће је дефинисати улазне параметре наваривања, како би се добила потребна структура навара.

Оптимална технологија наваривања одређује се експериментално после великог броја проба варирањем параметара наваривања (q_1 , T_p). Потребно је дефинисати редослед и начин доношења навара, дебљину и број нанетих слојева, врсту и начин извођења претходне текуће и накнадне термичке обраде, начин и брзину хлађења навара и др. [97,98,176].

Накнадна термичка обрада најчешће зависи од захтеваних својстава контактних површина наварених делова, при чему се узима у обзир завршна механичка обрада ових делова. Тврдоћа навара је главни критеријум за избор завршне механичке обраде. Она зависи од врсте изабраног додатног материјала, примењеног начина и технологије наваривања, термичке обраде при наваривању и основног материјала. За обраду наварених површина тврдоће до 350 HV користе се неки од поступака машинске обраде резањем, а за веће тврдоће брушење, а по потреби и полирање. Накнадну термичку обраду потребно је избећи кад год је то могуће, јер она поскупљује процес наваривања. Када је неопходно при наваривању се најчешће примењују напонско жарење и отпуштање, а остале врсте термичке обраде само у изузетним случајевима [167,176].

Металографска и механичка испитивања на моделима имају за циљ да се одреди микроструктура, тврдоћа и жилавост карактеристичних зона навареног споја (О.М., ZUT-а, навара), а посебно ZUT-а што је пресудно за оцену квалитета навареног споја. Сва ова испитивања изводе се на физичким моделима из којих се исцајају узорци за испитивање (металографски избрусци, пинови, блокови, епрувете и др.). Одређивањем микроструктуре и тврдоће појединих зона навареног споја могу се проценити механичка својства појединих зона навареног споја.

Моделским испитивањима триболошких својстава основног материјала и навара, по скраћеном поступку, долази се до резултата помоћу којих се одређује отпорност основног и додатног материјала према процесима хабања. Триболошка испитивања на моделима морају се извести у што приближнијим условима радним да би се дошло до што поузданијих резултата, да не буде несагласности при истраживањима на моделима и на реалним деловима. Испитивањем отпорности неког материјала према триболошким процесима на моделима, може се са довољном сигурношћу проверити погодност изабраног додатног материјала, изабраног поступка наваривања и примењене технологије.

Резултати експерименталних испитивања на моделима служе за доношење оцене о успешности предложеног модела репаратурног или производног наваривања. Када су добијени резултати, нарочито при триболошким испитивањима, испод очекиваних вредности цео поступак се понавља са другим додатним материјалима од којих се очекује добијање навара веће отпорности на хабање. Ако су добијени резултати сагласни са захтеваним својствима навара, привремено се усваја предложени модел репаратурног или производног наваривања, и изводи наваривање на реалним радним деловима, с циљем настављања истраживања до доношења коначне одлуке о прихватању или одбацивању предложеног модела.

Најреалнија оцена о предложеном моделу репаратурног или производног наваривања добија се наваривањем у реалним погонским условима, а провера у најнеповољнијим

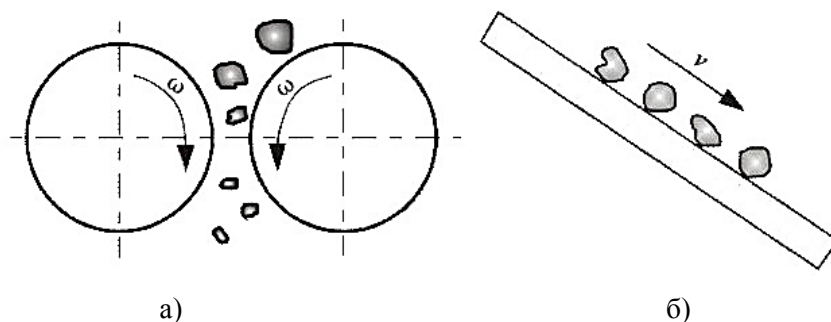
експлоатационим условима, јер ако се овако добију повољни резултати сигурно ће се добити и при бољим радним условима. Зато су ова експериментална истраживања и изведена наваривањем на реалним репрезентативним радним деловима грађевинске механизације, коришћењем различитих врста додатних материјала, применом REL метода. У већем броју случајева праћен је губитак масе материјала делова у реалним радним условима при дејству различитих утицајних фактора (интензивно хабање, корозија, ударна оптерећења и др.). На овај начин проверава се примењен модел репаратурног или производног наваривања репрезентативних делова. Такође, изведено је истраживање економске оправданости по принципу директне користи, чиме је истражена техноекономска оправданост примењеног модела репаратурног или производног наваривања радних делова.

Потребно је нагласити, да се при репаратурном или производном наваривању услед и ношења велике количине топлоте у навариване делове, јављају структурне промене у материјалу, које доводе до појаве прелазног и заосталог напонско-деформационог стања, чије је одређивање изузетно значајно из више аспеката. Посебно се придаје значај мерењу заосталих напона и деформација, јер сопствени напони могу при одређеним условима довести до лома наварених делова, а трајне деформације могу их учинити неупотребљивим [97,171,173]. Истраживањима у овом раду нису мерени заостали напони и деформације, али су предузимане све мере за њихово смањење на најмању могућу меру. Због тога је наваривање, како на моделима, тако и на реалним деловима, изведено после предгревања, или нашошења пластичног међуслоја. Такође је извођено искивање навара, делимично отклањање дела материјала последњег слоја навара брушењем, а водило се рачуна о техници наваривања и редоследу полагања навара.

9.2.2 ОСНОВНИ МОДЕЛИ АБРАЗивног ХАБАЊА КАО НАЈЧЕШЋИ УЗРОЧНИЦИ ОШТЕЋЕЊА РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ

Према наводима више аутора [97,177,194], абразивно хабање је најопаснија врста хабања јер проузрокује више од половине свих регистрованих оштећења радних елемената техничких система. Типични примери абразивног хабања су оштећења радних делова грађевинске механизације у директном контакту са грађевинским материјалима. Чак и када су радни делови грађевинске механизације изложени различитим врстама хабања, њихова оштећења најчешће настају због доминантног утицаја абразивног хабања. Статичка испитивања показује да је абразивно хабање радних делова грађевинске механизације, главни је узрочник њиховог оштећења у више од седамдесет одсто случајева [194].

Према начину остваривања контакта између радних делова разликују се два основна модела абразивног хабања (сл. 9.2.1). *Први модел*, тзв. *затворен модел* (сл. 9.2.2а), односи се на интеракцију три чврста тела. Типичан пример овог модела абразивног хабања код грађевинске механизације настаје код дробилица и млинова за камен. *Други модел* тзв. *отворени модел* (сл. 9.2.2б), односи се на интеракцију два чврста тела. Типичан пример овог типа абразивног хабања јавља се при транспорту и уградњи расутих материјала.

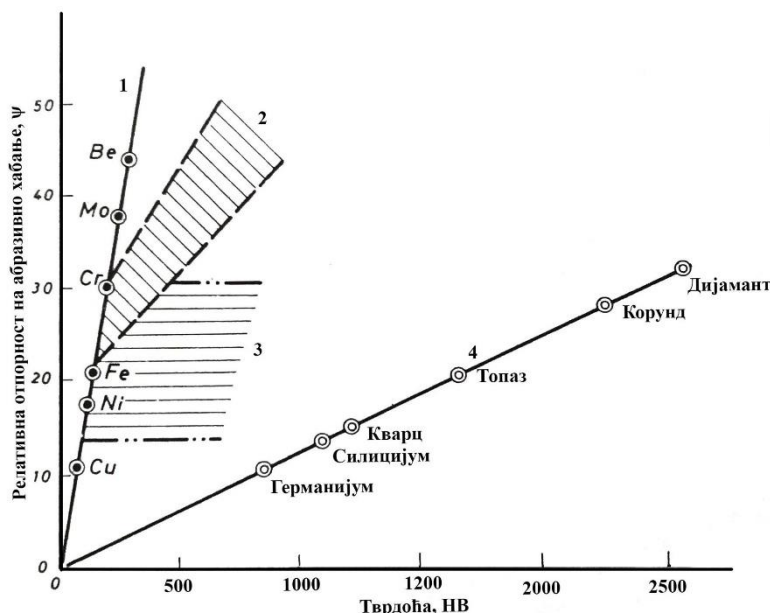


Слика 9.2.2 Основни модели абразивног хабања: а) први (затворен) модел абразивног хабања, б) други (отворен) модел абразивног хабања [132]

Оштећење радних делова по првом моделу абразивног хабања настаје уз присуство повремених или сталних динамичких удара средње до високе јачине, а на радним површинама појављују се трагови хабања у облику густо распоређених јамица. Оштећење радних делова по другом моделу абразивног хабања најчешће настаје без јачих динамичких удара, па су трагови

хабања на радним површинама у облику бразди, због резања материјала мање тврдоће од стране материјала веће тврдоће. Напред наведено је изузетно битно познавати, како би се правилно пројектовала технологија репаратурног или производног наваривања радних делова грађевинске механизације изложених процесима абразивног хабања.

Експерименталним истраживањима установљене су одређене зависности између отпорности према абразивном хабању и механичких својстава неких метала. Зато се на основу неких својстава, пре свега тврдоће, може проценити отпорност према абразивном хабању. Дубина продирања страних честица у неки материјал директно је пропорционална тврдоћи његовог површинског слоја. Експериментално се дошло до међусобне зависности релативне отпорности према абразивном хабању и тврдоће неких материјала, што је графички приказано на слици 9.2.3.



Слика 9.2.3 Зависност релативне отпорности на абразивно хабање (ψ) од тврдоће (НВ): 1-чисти метали, 2-термички обрађени челици, 3-челици ојачани услед пластичне деформације на хладно, 4-неметални материјали [31]

Са графика (сл. 9.2.3) се види да између отпорности према абразивном хабању чистих метала (ψ) и њихове тврдоће (Н), постоји линеарна зависност $\psi = b \cdot H$ (права 1), где је b - константа. Испитивања су показала, да је отпорност на абразивно хабање код термички необрађених челика такође линеарно зависна од њихове тврдоће. Код термички обрађених челика, та зависност остаје линеарна али права која дефинише линеарну зависност не пролази кроз координатни почетак, што указује на то, да се избором одговарајућег поступка термичке обраде и повећања површинске тврдоће, може повећати отпорност челика према абразивном хабању (област 2). Слично термичкој обради на повећање отпорности на абразивно хабање показује и легирање челика карбидотворним елементима. Деформационо ојачани чисти метали и челици, при одређеној тврдоћи, достижу максималну отпорност према абразивном хабању (област 3). Даље повећање њихове тврдоће не утиче на пораст отпорности према абразивном хабању, већ је то константна вредност. Наведени резултати испитивања односе се на случајеве када је тврдоћа абразива знатно већа од тврдоће испитиваних материјала. Између отпорности на абразивно хабање и тврдоће неметалних материјала (минерала) постоји линеарна зависност (права 4), а на њихову отпорност на хабање, поред њихове тврдоће, у великој мери зависи од јачине везе између појединих кристала (кохезиона јачина).

Већина аутора се слаже да отпорност према абразивном хабању легура исте тврдоће може бити различита, зависно од хемијског састава и структуре легуре. То значи, да отпорност према хабању не зависи само од тврдоће, већ и од облика, величине и распореда структурних фаза. До сада нема јединственог става о најповољнијем типу структуре из аспекта отпорности према абразивном хабању. Неки аутори сматрају да је за легиране челике најповољнија аустенитно-

карбидна структура, а други да је то мартензитно-карбидна структура. Ови различити ставови произлазе из разнородности абразива и различитих радних услова.

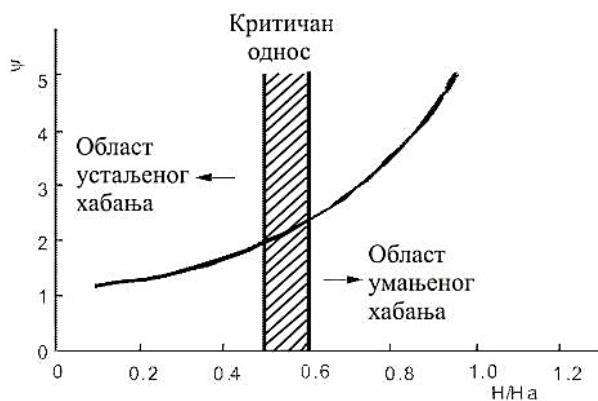
Свака структурна фаза челика утиче на ниво отпорности на абразивно хабање сразмерно својој тврдоћи и релативном уделу у структури. Абразивно хабање условљено је пре свега могућношћу утискивања абразива у површинске слојеве челика и јачином везе структурних компоненти на границама металних зрна. То значи да ће закаљен челик бити отпорнији од челика феритно-перлитне структуре. Тврдоћа не може бити једини критеријум, јер се показало да је чисто мартензитна структура, и при мањој тврдоћи, отпорнија од мартензитно-карбидне структуре.

Експерименталним истраживањима легура гвожђа показало се да најмању отпорност према абразивном хабању има феритна структура. Легирањем ферита, та отпорност расте у складу са повећањем тврдоће. Карбидотворни легирајући елементи, поред легирања металне матрице, образују и специјалне карбиде. Прелаз од цементита на специјалне карбиде, и са једног на други специјални карбид који садржи више атома легирајућег елемента, доводи до повећане отпорности на хабање [197]. Најмању отпорност на абразивно хабање показују челици који у структури имају само карбид гвожђа-цементит. При процени утицаја легирајућих елемената узима се у обзир не само њихов садржај, већ и однос легирајућег елемента према угљенику, који карактерише расподелу тих елемената између фаза. Досадашња испитивања су показала да је однос $Cr/C = 1,8-5$ и $W/C = 0,4-1,6$ некористан, као и однос $V/C > 1$. При вишеструком легирању мења се оптимални однос легирајућих елемената и угљеника [12,14]. Осим врсте створених карбида важан је њихов релативни удео у металној матрици, као и њихов облик и величина. Пораст удела карбида у челику, до одређеног процента, повећава њихову отпорност на абразивно хабање. Оптимални удео карбида је различит за различите структурне фазе.

Промена експлоатационих услова доводи до промене интензитета абразивног хабања. Ови услови се односе на тврдоћу, облик и величину абразивних честица, начин спрезања делова, специфични притисак на контактним површинама, пут и релативну брзину клизања, влажност и хемијску агресивност радне средине и др.

Могућност абразива да продре у материјал радних површина не зависи само од његове тврдоће, већ и од геометријског облика и величине. Тако на пример, оштре честице релативно мекшег материјала могу изазвати већа оштећења контактних површина него заобљене честице материјала веће тврдоће. Испитивањима се дошло до закључка да се са повећањем димензија абразива повећава и хабање, али само до одређене граничне вредности. За челике гранична вредност абразива је око $100 \mu m$, а за остале метале $120-150 \mu m$.

Једна од најважнијих карактеристика отпорности према абразивном хабању је однос тврдоће основног метала и тврдоће абразива, што је дато изразом $k = H/H_a$. Отпорност челика на абразивно хабање знатно расте када је вредност коефицијента k већа од 0,6 (сл. 9.2.4).



Слика 9.2.4 Зависност отпорности на абразивно хабање (ψ) од односа тврдоћа основног метала (H) и абразива (H_a) [14,100]

Из напред изложеног, може се закључити да избор методе и додатног материјала за наваривање радних делова грађевинске механизације представља изузетно сложен задатак.

Пројектована технологија наваривања мора да обезбеди добијање навара отпорних на процесе хабања, корозије и лома услед високих динамичких оптерећења.

9.2.3 НЕКЕ СМЕРНИЦЕ ЗА НАВАРИВАЊЕ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ

Процес наваривања представља скуп активности које се изводе из више корака. Најпре је неопходно одредити хемијски састав и механичка својства основног материјала. На основу ових резултата бира се додатни материјал за наваривање који ће дати наварени спој доброг квалитета и захтеваних својстава. Затим је неопходно одабрати начин наваривања који ће омогућити топлеење основног и додатног материјала, и депоновање додатног на основни материјал у циљу добијања навареног споја захтеваних карактеристика. Такође, даље се пројектује оптимална технологија наваривања као и процесна и завршна контрола. Често се може чути мишљење, да је за успешно заваривање и наваривање, довољно је одабрати погодан додатни материјал, моћан уређај за заваривање и обученог заваривача. Ово мишљење је део маркетинга произвођача опреме и додатног материјала за заваривање и наваривање. Међутим, да би се успешно извело заваривање, а посебно наваривање, ови услови су потребни али нису и довољни, јер најбитније је пројектовање оптималне или њој блиске технологије за конкретан случај репаратурног или производног наваривања.

Да би се могло добро пројектовати и успешно извести наваривање делова грађевинске механизације неопходно је те делове поделити у две основне групе. *Прву групу* сачињавају различити склопови, преносници снаге и обртног момента, управљачког и кочионог система и др. *Другу групу* сачињавају радни делови грађевинске механизације који су ништа друго него алати за обраду, транспорт и уградњу различитих грађевинских материјала (земље, бетона, камена, асфалта). Прва група делова израђена је од челика уобичајеног квалитета, слично као и код других техничких система. Друга група делова израђена је од специјалних челика, јер су за време експлоатације најчешће истовремено изложени процесу хабања јаког интензитета, корозији и ударним оптерећењима.

У грађевинску механизацију убраја се сва опрема која се користи при изградњи грађевинских објеката, било да је реч о објектима високоградње, нискоградње или хидроградње. Грађевинска механизација се не користи само у грађевинарству већ и у другим привредним гранама као што су водопривреда, рударство и енергетика, фабрике за производњу грађевинских материјала (креча, цемента, опеке, црепа, бетонске галантерије и др.). Грађевинска механизација се дели на: *покретну грађевинску механизацију*, машине које имају сопствени погон или се премештају уз помоћ вучних возила, и *непокретну грађевинску механизацију* (стабилна постројења за производњу каменог материјала, асфалта, бетона и других грађевинских материјала) [131,190]. На основу разноврсности, и сложености, услова рада при експлоатацији, разноврсности материјала од којих су израђени радни делови, склопови и агрегати, може се слободно рећи да је одржавање грађевинске механизације изузетно сложен, одговоран и специфичан посао.

Репаратурним наваривањем могу се успешно поправити различити елементи возила, делови гусеничних склопова (водећи погонски точкови, затезачи, осовине, гусенице и др.), делови различитих врста дробиличних постројења (облоге, ударне греде, чељусти, батови и др.), делови утоварних кашика (зуби, клизни лежајеви, тела кашике и др.), постројења за производњу асфалта, бетона и цемента (облоге, чистачи, усмеривачи, лопатице, руке, делови сушара и др.), радни делови багера, булдозера, грејдера, чистача снега (ножеви, рипери и др.), радни делови уређаја за бушење (резне ивице бургија, крунице, наставци и др.), зупчаника и зупчастих летви, хидрауличних елемената, мотора и др. Посебан проблем представљају оштећења радних елемената грађевинске механизације који су у току експлоатације у директном контакту са различитим грађевинским материјалима, јер иако су најчешће израђени од квалитетних високолегираних челика и ливених гвожђа, њихов радни век је у поређењу са радним веком других делова изузетно кратак.

У зависности од радних услова елементи радних делова грађевинске механизације израђују се од различитих материјала, па је њихова репаратура изузетно сложен посао, јер

поправке репаратура сваког елемента захтева посебну технологију и посебну процедуру. Радни делови грађевинске механизације, као и делови других техничких система, су изложени најразличитијим врстама хабања и корозији, уз истовремена динамична оптерећења већег или мањег интензитета. И поред тога могу се у литератури наћи неки подаци о покушајима моделирања репаратурног наваривања за неке делове техничких система [194].

Ови модели су добијени систематским и дуготрајним истраживањима различитих врста хабања делова производне опреме у разним привредним гранама. Чињеница да се у многим случајевима процес хабања делова одвија по механизму комбинованог хабања, доводи до тешкоћа при решавању конкретних проблема. Међутим, и поред тешкоћа ови модели могу корисно послужити, јер помажу при одређивању примарних и секундарних узрочника оштећења једног дела или групе делова, и њихов удео у укупном процесу хабања приказује се квантитативно и квалитативно [194].

Примарни узрочници хабања су абразија, притисак и удар. Секундарни узрочници хабања су корозија, топлота, ерозија и кавитација. Оваква подела основних механизма појединих врста хабања, делова грађевинске механизације, одређивање интензитета појединих врста хабања и доминантног механизма хабања, за конкретан радни део, од изузетног је значаја за избор одговарајућег додатног материјала. Избор додатног материјала за репаратурно наваривање неког дела, чији су интензитет и врста хабања препознати изводи се тако, да отпорност према хабању додатног материјала буде већа него за основни материјал.

Колико је за репаратурно наваривање значајна технологија говори и податак да се до оптималне технологије не може доћи само из литературних података. Ако она тако усвоји биће непотпуна, јер је сам поступак репаратуре често заштићен као патент [194]. Да би се усвојио модел репаратуре неког дела, или групе делова, неопходно је развити и методе за избор додатног материјала и оптималне технологије. Тек тада се може рећи да је успешно изведено моделирање неког процеса репаратурног или производног наваривања. На овом месту биће приказане само неке смернице за извођење наваривања радних делова машина и уређаја који су у директном контакту са грађевинским материјалима.

9.2.3.a Избор методе наваривања

При репаратурном или производном наваривању од великог значаја је правилан избор начина наваривања, јер од тога зависи унос топлоте у основни материјал. Унета топлота главни је узрок структурних промена основног материјала испод навара, као и појаве прелазних и заосталих структурних и термичких напона, односно деформација које наваривани део могу учинити неупотребљивим.

Скоро сви начини заваривања и опрема за заваривање могу се користити и за наваривање уз одређено прилагођавање специфичностима процеса наваривања. Такође, при избору начина наваривања мора се водити рачуна да изабрани извори напајања могу да остваре изабране параметаре наваривања. Из аспекта аутоматизације начини наваривања се сврставају у три основне групе: *методе ручног наваривања, методе полуаутоматског наваривања и методе аутоматског наваривања*. Све ове методе се могу користити како за репаратурно тако и за производно наваривање, с тим што су за репаратурно наваривање погоднији ручни методи, а за производно наваривање полуаутоматски и аутоматски методи, што у крајњој линији опет зависи од случаја до случаја. Као и код других техничких система, тако и код опреме за наваривање, методе ручног наваривања захтевају већу вештину и бољу обученост радника заваривача.

На избор методе наваривања утиче више чинилаца, а неки од њих су: расположиви извори напајања; техничка могућност примене неке методе; услови под којима се изводи наваривање; обученост и расположивост људства; захтевана својства навара, економска исплативост и др. Избор метода наваривања најчешће се ограничава на постојећу опрему или се позива да услугу наваривања изврши друго предузеће. Услови при којима се изводе радови на оспособљавању грађевинске механизације, у радионицама и врло често на градилишту, диктирани су расположивом опремом за заваривање. Углавном грађевинска предузећа располажу са опремом за GPZ и REL заваривање, а скоро ниједно предузеће нема опрему за полуаутоматско и аутоматско заваривање. Најчешће се примењује REL метода, јер се тако постижу бољи резултати, а опрема

је безбеднија за транспорт и рад него опрема за гасно заваривање. При REL наваривању користе се различите врсте обложених електрода, које се бирају када је потребно нанети недостајући материјал на оштећеним или новоизрађеним дефектним деловима којима недостаје до десет процената од укупне масе. Ако је услед различитих врста процеса хабања, корозије или лома дошло до губитка веће масе материјала препоручује се избор неке друге методе наваривања, која обезбеђује већу продуктивност, односно боље техноекономске ефекте. Потребно је нагласити да, процес репаратурног наваривања треба извести правовремено, јер не сме се чекати да дође до већих оштећења, будући да често, није могуће нанети дебеле наварене слојеве и добити навар доброг квалитета, а и економски ефекти су знатно мањи.

9.2.3.6 Избор додатног материјала и технологије наваривања

Применом REL наваривања на својства навара највише утиче додатни материјал, тј. електроде чије облоге садрже потребне легирајуће елементе. Језгра електрода израђена су од квалитетних нискоугљеничних челика тзв. *меких челика* произведених у електричним пећима. Електроде различитих пречника добијају се калибрацијом, а номинални пречник електроде је пречник њеног језгра. Други начини наваривања условљавају и примену додатних материјала израђених у другом облику (пуне и пуњене електродне жице, прах и др.)

За различите методе наваривања користе се одговарајући додатни материјали који се разликују не само по облику већ и по хемијском саставу, димензијама, механичким својствима итд. Избор додатног материјала за производно наваривање новоизрађених делова са грешком не представља неки посебан проблем, јер се полази од правила да додатни материјал буде сличан основном. Избор додатног материјала за наваривање нових радних делова са циљем повећавања тврдоће радних површина представља компликованији задатак, јер је најчешће потребно спојити два материјала дијаметрално различитих својстава. Ово се односи и на репаратурно наваривање, јер се при експлоатацији похабаног дела, знатно погоршавају својства основног материјала.

На основу нама доступних података из литературе [95,96,103,105], може се закључити да се репаратурно или производно наваривање може извести на многим елементима техничких система који су наменски пројектовани и предвиђени за рад у најразличитијим условима у многим привредним гранама. Тако на пример, код моторних возила репаратурним наваривањем се могу обновити похабана седишта вентила, рукавци брегастих осовина, и коленастих вратила, зуби и главчине зупчаника, блокови мотора, кућишта мењача и диференцијала и др. Такође се могу репарирати осовине локомотива и вагона, венци точкова, укрснице, кочиони дискови итд. [25,136]. У железарама се најчешће изводи репаратура посуда за транспорт шарже, ваљци ваљаоничних станова, ваљци за транспорт ваљаних полупроизвода и др. У енергетици се применом репаратурног наваривања и термичке метализације изводи репаратура лопатица и кола турбина, уводника, облога, вратила и др. У хемијској индустрији применом наваривања изводи се репаратура оштећених судова под притиском, седишта вентила и других оптерећених делова. У грађевинарству, пољопривреди, водопривреди и рударству применом репаратурног наваривања могу се поправљати многи делови, као што су: транспортни ваљци, точкови дизалица и вагонета, ланчаници, зупчаници и зупчасте летве, клизна лежишта и осовине, чланци и затезачи гусеница, чељусти и облоге дробилица, облоге и лопатице мешалица за асфалт и бетон, зуби и лопате утоварних кашика, пужни транспортери, радне површине алата за бушење и радне површине других делова које су у директном контакту са грађевинским материјалом. Из претходно наведеног може се створити слика о комплексности проблема при избору одговарајућих додатних материјала и одређивању различитих технологија неопходних за успешно наваривање оштећених делова техничких система [71,80,98,110].

На избор додатног материјала и прописивање технологије наваривања утичу бројни фактори, а међу најважнијима су: врста и својства основног материјала, захтевана својства наварених површина, могућност машинске обраде, техно-економски ефекти и др.

Својства додатног материјала, која декларише произвођач, могу се постићи само ако се пропише оптимална технологија, и ако је реализују вешти заваривачи. Највећа тврдоћа се добија при вишеслојном наваривању без предгревања и то у површинском делу навара, односно у последњем нанетом слоју. При наваривању тврдых и кртих материјала веће дебљине на већим

површинама, може доћи до појаве различитих врста прелина, како у навару тако и у зони утицаја топлоте. Појава прелина може се спречити предгревањем или прогревањем на одређеним температурама, које морају да буде више ако се наносе навари веће дебљине и ако је основни материјал закаљив. Температура предгревања, за конкретне случајеве наваривања, одређује се применом рачунских и емпиријских формула [36,63,78,166,174], које треба узети само као оријентационе. Ова температура се најтачније одређује снимањем температурских циклуса, а затим се проверава наваривањем пробних узорка [93,94,97].

При наваривању дебљих делова, предгрејана плоча се спорије хлади па може доћи и до смањења тврдоће навара. Да би се постигла захтевана тврдоћа навара мора се применити накнадна термичка обрада, што поскупљује наваривање. Захтевана својства наварених површина могуће је постићи и наношењем само једног навара, али само применом неких метода и технологија наваривања.

При наваривању се интензивно мешају истопљени основни и додатни материјал, односно разблажује се додатни основним материјалом, те се декларисана својства чистог метала навара најчешће постижу тек у трећем нанетом слоју, а доста ређе у другом и изузетно ретко у првом слоју. Тачније речно, највише се разблажује први слој, мање други, а незнатно трећи. Спречавање прекомерног топлења основног материјала и смањење степена мешања основног и додатног материјала може се постићи применом различитих техничко-технолошких мера.

9.2.3.в Репаратурно наваривање радних делова грађевинске механизације израђених од различитих врста основних материјала

- *Репаратурно наваривање делова израђених од нискоугљеничних челика који нису термички обрађени* (вратила, осовине, точкови и др.), изводи се REL-ом електродама хемијског састава 0,06% C; 0,9% Mn; 0,3% Si; 1,0% Ni; 0,5% Mo, и електродама 0,07% C; 1,4% Mn; 0,3% Si; 1,9% Ni; 0,4% Cr; и 0,5% Mo. Такође, могу се користити и електроде хемијског састава 0,15% C; 1,2% Mn; и 0,3% Si. Наваривање се најчешће изводи без предгревања, а када основни материјал садржи изнад 0,35% C, или наварују делови већих дебљина, односно наносе навари већих дебљина, примењује се предгревање до температуре 150°C, коју треба одржавати догревањем у току процеса наваривања [97].

- *Репаратурно наваривање делова израђених од нискоугљеничних и средњеугљеничних челика који су термички обрађени* (зупчаници, зупчасте летве и др. чија тврдоћа не прелази 300 HV), најбоље се наварују помоћу електроде хемијског састава 0,08% C; 1,4% Mn; 0,4% Si; и 1,4% Mo, јер она даје потребну тврдоћу навара без накнадне термичке обраде [82,97]. Репаратурно наваривање делова може се извести и другим додатним материјалима, али се захтева претходна и накнадна термичка обрада.

- *Репаратурно наваривање делова израђених од нискоугљеничних и средњеугљеничних челика, чије су радне површине од неког легираног челика* може се успешно извести применом електроде хемијског састава 15% Co и 15% W, електроде 15% Co и 15% Mo, и електроде 20% Co и 10% Mo. Прва електрода даје навар који се може обрадити резањем, док се применом друге и треће електроде добијају навари који се могу обрадити само брушењем. Наваривање овим електродама изводи се после предгревања на температури 200-300°C. Захтевана тврдоћа навара добија се накнадним жарењем на температури око 500°C у току 3-5 h са одговарајућом брзином хлађења у зависности од масе радног предмета [97].

- *Репаратурно наваривање делова израђених од високоугљеничних и легираних челика* чија је тврдоћа већа од 300 HV (радни делови, зупчаници, ваљци транспортера, затезачи гусеница и др.), најчешће се изводи применом додатних материјала чији је хемијски састав чистог метала навара што је могуће ближе хемијском саставу основног материјала. Међутим, успешно наваривање делова грађевинске механизације израђених од ових челика и ливених гвожђа захтева пројектовање посебних технологија наваривања.

Потребно је нагласити, да су ово само неке смернице за избор додатних материјала и технологије репаратурног наваривања према доступним подацима и нашим истраживањима.

Успешна репаратура може се извести применом и других додатних материјала, метода и технологија наваривања [82].

9.2.3.г Репаратурно наваривање радних делова грађевинске механизације изложених различитим радним условима у току експлоатације

- **Репаратурно наваривање делова изложених абразивном хабању од стране растреситих грађевинских материјала**, најчешће се изводи применом електрода хемијског састава 0,22% С; 1,4% Мп и 1,5% Сг, која служи као пластични међуслој, а завршни слој отпоран на абразију добија се применом електроде хемијског састава 0,5% С; 7,5% Мп и 0,5% Сг, или електроде 2,5% С; 2,5% Мп; 2,0% Si и 1,0% Сг. Неопходно је предгревање на 250-300°C и споро хлађење после наваривања. Ове електроде већ у првом пролазу дају наварен слој ледебуритне структуре па није потребно вишеслојно наваривање. Ледебурит је веома крт па горње електроде не треба користити за наваривање делова грађевинске механизације изложене јаким ударним оптерећењима [82,141].

- **Репаратурно наваривање делова изложених абразивном хабању при високом притиску и ударним оптерећењима**, може се успешно извести применом електроде хемијског састава 1,2% С; 12,5% Мп; 0,6% Сг и 0,6% Si, или неке друге електроде сличног хемијског састава, као што је електрода 1,2% С; 13% Мп и 0,7% Si, односно електрода 1,2% С; 12,5% Мп и 0,7% Мо. Истим електроде имају чист метал навара структуре аустенитних манганских челика. Овим електродама могу се наварити и други делови грађевинске механизације израђених од угљеничних челика. Термички необрађени навари имају тврдоћу од 200-220 НВ, а под утицајем деформације на хладно услед статичке силе притиска 15-20 kN, или удара (искивања) долази до трансформације аустенита у мартензит у танком површинском слоју, чија тврдоћа достиже 510-520 НК. Репаратурно наваривање најчешће се изводи без предгревања, осим ако се наносе слојеви велике дебљине, када кртост навара расте услед прегревања, изазвана уношењем велике количине топлоте [82,141].

- **Репаратурно наваривање делова који су изложени процесима корозије**, може се успешно извести са већим бројем додатних материјала различитог хемијског састава у зависности да ли је реч о хемијској или електрохемијској корозији. Ове електроде, поред отпорности на корозију, морају да буду отпорне па хабање.

За наваривање делова који раде у влажној средини, могу се користити електроде намењене за повишене температуре. Углавном су у питању електроде са повећаним садржајем хрома. За електроде са садржајем до 15% Сг потребно је предгревање делова до 250°C и споро хлађење. Електродама сличног хемијског састава и повећаним садржајем хрома и угљеника, (22-30% Сг и више од 2,5% С), наваривање се изводи са предгревањем од 500-600°C и спорим хлађењем [82,97,141].

За наваривање делова израђених од високолегираних челика, код којих се захтева истовремено добра отпорност на корозију и хабање, користе се високолегиране феритне електроде као што је на пример, електрода хемијског састава 0,15% С; 16,50% Сг; 0,50% Ni и 1,10% Мо. Такође, примењују се високолегиране феритно-аустенитне електроде као на пример, електрода хемијског састава 0,05% С; 18,50% Сг; 11,50% Ni и 2,70% Мо, или електрода са 0,15% С; 1,50% Мп; 29% Сг и 9% Ni, која је веома отпорна и на појаву прслина. Добру отпорност на корозију, поред већ поменутих, има и чисто аустенитна електрода хемијског састава мање од 0,12% С; 7% Мп; 19% Сг и 9% Ni, која служи и за наносење пластичног међуслоја тзв. буфорног слоја [82,97,141].

- **Репаратурно наваривање делова који раде на повишеним и високим температурама**, као што су делови сушара за стенске агрегате и производњу грађевинских материјала, може се успешно извести применом различитих врста електрода. Наваривање делова изложеним повишеним температурама, односно температурама до 600°C, успешно се може извести електродама хемијског састава: 0,35% С; 6% Сг; 1,5% Мо и 1,7% V, или електродом хемијског састава: 0,30% С; 3% Сг и 1% Мо, V, W. Ови делови се практично могу знатно оптеретити без опасности од појаве кртог лома, а навари имају добру отпорност на хемијску корозију. Електроде хемијског састава: 0,20% С; 5-10% Сг и до 1% V и W дају наваре добре отпорности према

интеркристалној корозији, и у срединама које садрже водоник и сумпорводоник. Електроде 18% Cr; 8% Ni и остало Fe дају аустенитну структуру, и користе се за наваривање делова који раде на повишеним температурама.

Електроде хемијског састава 0,20% C; 12% Cr и додацима Mo, V, W, Ti, Nb и Si дају феритну структуру навара који имају добру отпорност на корозију, и до 1200°C. Наваривање овим електродама изводи се са предгревањем до око 850°C и спорим хлађењем. Електроде хемијског састава 25% Cr; 20% Ni; 2% Si и додацима Mo и V дају наваре отпорне на корозију, до 900°C без опасности од појаве кртог лома. Када је неопходно да се навари машинске обраде користе се електроде хемијског састава 0,2% C; 18% Cr; 8% Ni; 1,2% Mn и 3,5% Si, а навари имају и добру отпорност на абразивно хабање. За наваривање овим електродама није неопходно предгревање, али да би се постигла потребна тврдоћа и отпорност на хабање потребно је контролисано хлађење или нека накнадна термичка обрада [82,97,141].

• **Репаратурно наваривање делова који раде на сниженим и ниским температурама** може се успешно извести са више врста електрода које се могу разврстати у три групе. *Прву групу* ових електрода сачињавају средње и високолегиране базичне електроде, помоћу којих се могу навари делови израђени од материјала повишене и високе јачине, а навари су отпорни на појаву кртог лома на сниженим и ниским температурама. За представника ове групе може се узети електрода хемијског састава 0,06% C; 0,5% Si; 0,9% Mn и 2,5% Ni. Са повећањем садржаја 3-5% Ni радни делови могу да раде на температурама до -100°C, а када се узму електроде са 8-10% Ni радна температура достиже -196°C, без опасности од појаве кртог лома. Посебна електрода која гарантује добра механичка својства навара у широком температурском интервалу од -196÷600°C је електрода састава 0,05% C; 0,50% Si; 8% Mn; 15% Cr; 2% Nb; 6% Fe и остало Ni [82,141].

Другу групу електрода за криогену технику чине феритно-аустенитне електроде, чији је типични представник електрода хемијског састава 0,05% C; 19% Cr и 10% Ni, или електрода са садржајем 0,03% C; 0,40% Si; 1% Mn; 19% Cr и 10% Ni. Прва електрода даје наваре отпорне на оксидацију до 800°C и добру жилавост до -196°C [82,141].

Трећу групу чине високолегиране аустенитне електроде хемијског састава 0,05% C; 19% Cr; 10% Ni и нешто Nb, или електрода хемијског састава 0,10% C; 25% Cr и 20% Ni. Прва електрода даје наваре добре отпорности према интеркристалној корозији до 350°C, оксидацији до 800°C и добру жилавост до -196°C. Друга електрода даје наваре добрих механичких својстава у температурском интервалу од -196÷1200°C [82,141].

Потребно је истаћи, да поред ових додатних материјала за репаратурно и производно наваривање елемената у директном контакту са грађевинским материјалима и раде у различитим радним условима, на располагању су и други додатни материјали (електроде, пуне и пуњене жице, траке, прах и др.). За ове додатне материјале користе се друге методе наваривања. Применом ових додатних материјала, уз нешто измењену технологију, могуће је не само репаратурно већ и производно наваривање радних делова грађевинских механизација, било да је реч побољшању својстава контактних површина, или доради делова израђених са грешком [82,141].

9.2.4 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА

Радни делови грађевинске механизације, који су у директном контакту са грађевинским материјалима, при експлоатацији су најчешће истовремено изложени различитим врстама процеса хабања, процесима корозије и сталним или повременим динамичким оптерећењима различитог интензитета. Овако захтевним и ригорозним условима експлоатације могу да одговоре само радни делови израђени од посебних материјала, а то су најчешће различите врсте легираних челика, који припадају групи условно заварљивих челика. Како би се успешно извео изузетно сложен процес репаратурног или производног наваривања радних делова грађевинске механизације, неопходно је предузети већи број превентивних мера, јер у супротном, крајњи резултат процеса наваривања може бити неповољан. Поред избора одговарајућег начина наваривања и погодног додатног материјала неопходно је прописати оптималну технологију наваривања, јер ће у супротном репаратура проузроковати већу штету него корист.

Избор оптималне технологије наваривања је изузетно сложен посао, јер је поред познавања теоријских основа из више области, потребно извести много практичних проба са варирањем параметара наваривања, како на физичким моделима, тако и на реалним радним деловима. Да би се успоставила веза између процесних параметара наваривања, експериментална истраживања је неопходно извести по одређеној процедури, по тзв. „плану експеримента“. Само на тај начин успоставља се веза између улазних параметара и захтеваних својстава навареног споја. Веза између улазних процесних параметара и излазног критеријума квалитета успоставља се при оптималној технологији наваривања. Познавањем ових корелационих веза стварају се услови за управљање процесом наваривања и постизање траженог квалитета навара што се може постићи само применом оптималне технологије наваривања.

Иако су радни делови грађевинске механизације, у току процеса експлоатације, изложени различитим врстама процеса хабања при нормалним, повишеним и сниженим температурама, и најчешће раде у агресивној околној средини, ипак је доминантно абразивно хабање и процеси атмосферске корозије отпорности на абразивно хабање пре зависи од утискивања абразива у површинске слојеве основног материјала, и јачине везе структурних компоненти на границама металних зрна. Тврдоћа не може бити једини критеријум за оцену отпорности неког материјала према абразивном хабању, јер је експериментално утврђено да неке структуре мање тврдоће имају бољу отпорност, а исто тако, да повећање тврдоће неких метала изнад одређене вредности не доприноси повећању отпорности на хабање. Само начелно се може рећи, да према абразивном хабању отвореног типа бољу отпорност имају материјали веће тврдоће, док су према абразивном хабању затвореног типа отпорнији аустенитни челици мање тврдоће због ударне трансформације аустенита у мартензит. Штавише, смањење количине мартензита на рачун заосталог аустенита у мартензитно-карбидној структури повећава отпорност према абразивном хабању без обзира на смањење тврдоће. Доказано је да бољу отпорност према абразивном хабању има аустенитно-карбидна, а не мартензитно-карбидна структура, како би се то према тврдоћи очекивало. То је због тога што јачу адхезиону везу остварују зрна аустенит-карбид него мартензит-карбид [14,66,99,116,118].

Наваривање сваког радног дела грађевинске механизације захтева одређивање посебне технологије, мада се за радне делове од материјала истих или сличних својстава, који су изложени сличним условима експлоатације, може на основу резултата експерименталних истраживања формирати модел репаратурног или производног наваривања, и одредити оптимална технологија наваривања за групу радних делова [23,24,117,119]. Применом сазнања проистеклих из теоријских и експерименталних истраживања, формиран је алгоритам (сл. 9.2.1) који се може уградити у рачунарски програм, што би омогућило да се варирањем улазних параметара процеса наваривања тако добије база оптималних технологија наваривања појединих или групе радних делова грађевинске механизације. Ова база података могла би послужити за моделирање процеса наваривања и делова неких других техничких система, који раде у сличним радним условима. Установљени модели наваривања омогућавају да се успостави веза између улазних процесних параметара наваривања и излазног критеријума квалитета навара, односно својстава наварених спојева изведеним различитим технологијама наваривања. На основу овако формиране базе података, применом познатих корелационих веза, могуће је оценити допринос репаратурног или производног наваривања на одржавање и радне способности грађевинских машина и друге производне опреме.

9.3 МЕТАЛОГРАФСКА ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА НА ФИЗИЧКИМ МОДЕЛИМА

Пројектовање оптималне технологије наваривања радних делова грађевинске механизације је сложен и одговоран посао из више аспеката. За успешно наваривање неопходан је стручни приступ решавању бројних проблема везаних за заваривање наваривања и сродне технологије. Први корак је одређивање својстава основног материјала, радног елемента. Увек је потребно одредити хемијски састав и нека механичка својства основног материјала, јер се под утицајем различитих фактора, током израде и експлоатације, у мањој или већој мери, мењају ова својства. Даљни ток пројектовања и извођења процеса наваривања зависи од својстава основног материјала и захтеваних својстава навара.

Правилан приступ решавању проблематике процеса наваривања подразумева експериментална истраживања на физичким моделима у лабораторијским условима, уз примену потребних мерно-регулационих уређаја, како би се добили релевантни резултати. Анализом добијених резултата може се проценити подобност полазне технологије наваривања. Да би се дошло до оптималне технологије наваривања неопходно је израдити наварене физичке моделе и на њима извести неопходне пробе уз варирање параметара наваривања. Узорци могу бити различитих облика и димензија. Овде спадају металографски узорци-избрусци, епрувете, пинови, блокови, дискови и др., у зависности од експерименталних испитивања [97,141].

Металографска и механичка испитивања на моделима омогућавају да се одреде микроструктура, тврдоћа и друга механичка својства карактеристичних зона навареног споја (О.М., ZUT-а и навара) у лабораторијским условима, а добијени резултати служе за оцену квалитета навара и полазне технологије наваривања.

Експериментална наваривања на моделима у лабораторијским условима јесу потребна, али често не и довољна за поуздану оцену успешности изведеног процеса наваривања. Зато је неопходно, кад год је то могуће, експериментална истраживања извести и на радним деловима у реалним радним условима. Радни делови наварују се под истим условима, параметрима наваривања и технологијом као и при изради модела. Тако припремљени узорци, који су исти као и радни делови, монтирају се на грађевинске машине и прате промене на тим узроцима у току одређеног периода експлоатације. Тек ако се и после ових истраживања добију позитивни резултати може се предложена технологија наваривања усвојити као оптимална.

Овако одређена оптимална технологија наваривања усвојена је на основу техничко-технолошких показатеља. Тек ако се покаже да су и техно-економски показатељи позитивни, оптимална технологија репаратурног или производног наваривања може послужити као основа за моделирање ових процеса, и формирање модела репаратурног или производног наваривања, једног или групе радних делова грађевинске механизације.

9.3.1 ИЗРАДА ФИЗИЧКИХ МОДЕЛА ЗА ИСПИТИВАЊЕ СВОЈСТАВА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

При изради физичких модела за лабораторијска испитивања, од велике важности је познавање хемијских и механичких својстава основних и додатних материјала, јер својства спајаних материјала директно утичу на квалитете наварених спојева. За ова истраживања неопходно је било израдити већи број физичких модела од различитих основних и додатних материјала. Основни материјали су бирани од оних који су најчешће коришћени за израду карактеристичних радних делова грађевинске механизације. Додатни материјали су првенствено изабрани према критеријуму добре отпорности према доминантним процесима абразивног хабања којима су најчешће изложени поједини елементи грађевинске механизације, али се водило рачуна да навари буду довољно отпорни према корозивним процесима и кртом лому. При изради физичких модела претходно се мора оценити заварљивост одабраних основних материјала и прописати оптимална технологија наваривања.

9.3.1.a Одређивање својстава испитиваних основних материјала

- **ЋЛ3134** примењује се за израду већег броја радних делова грађевинских машина: зуба утоварних кашика утоваривача, ровокопача и багера, као и ојачање ивица утоварних кашика; наглавака рипера грејдера и булдозера; стабилних и покретних ваљака за вођење и затезање гусеница код грађевинских машина, погонских ланчаника и водећих точкова код гусеничара; ланаца и папуча гусеница; ваљака транспортних трака; делова млинова и др. Овај челични лив, најкраће речено, примењује се за израду радних делова грађевинске механизације изложених абразивном хабању и ударима средњег интензитета.

Потребно је истаћи, да су при попуњавању наредних таблица уношени не само литературни подаци [31,141], већ и експериментално проверен хемијски састав, измерена тврдоћа и читавана микроструктура свих основних материјала коришћених за израду модела.

Прописан и анализиран хемијски састав основног материјала ČL3134 и смернице за његову намену дати су у табlici 9.3.1, а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.2

Таблица 9.3.1 Хемијски састав и намена ČL3134 [31,141]

О.М. ČL3134	Хемијски састав, %					Намена
	C	Si	Mn	P	S	
Прописан	0,45	0,50	1,80	0,04	0,04	ČL3134-За израду делова отпорних на хабање: делови дробилица и млинова изложених хабању мањег интензитета, делова гусеница, делова кашина грађевинске механизације и др.
Анализиран	0,35	0,40	1,85	0,04	0,035	

Таблица 9.3.2 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура ČL3134 [31,141]

Упоредне ознаке		Механичка својства					Микроструктура
JUS	DIN	R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A ₅ , %	KV, J	Тврдоћа, HB	
ČL3134	GS-36 Mn5	780-930	390	7	-	340-430 после побољшања	ČL3134 - Међуфазна структура побољшања, мартензитно-бејнитна

- **ČL4150** примењује се за радне делове грађевинских машина изложене абразивном хабању и ударима ниског интензитета. Примењује се за израду лопатица и облога мешалица за производњу асфалта, бетона и других грађевинских материјала (цигле, црепа, блокова и др.).

Прописан и анализиран хемијски састав челичног лива ČL4150 и смернице за његову намену дати су у табlici 9.3.3, а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.4.

Таблица 9.3.3 Хемијски састав и намена ČL4150 [31,141]

О.М. ČL4150	Хемијски састав, %							Намена
	C	Si	Mn	Cr	V	P	S	
Прописан	2,00	0,40	0,30	12,00	0,10	0,035	0,035	ČL4150-За израду делова изложених хабању и ударима мањег интензитета.
Анализиран	2,00	0,38	0,30	12,50	0,10	0,025	0,025	

Таблица 9.3.4 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура ČL4150 [31,141]

Упоредне ознаке		Механичка својства					Микроструктура
JUS	DIN	R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A ₅ , %	KV, J	Тврдоћа, HB	
ČL4150	G-X190Cr10	-	-	-	-	552-555 после каљења	ČL4150 – Ледебуритна.

- **ČL3160** и **ČL3460** примењују се за израду радних делова грађевинских машина изложених абразивном хабању и ударима јаког интензитета. Од ових материјала се израђују делови дробиличних постројења и то: облога дробилице, чекића, чељусти, уводника материјала и др.

Прописан и анализиран хемијски састав и смернице за намену ових материјала дати су у табlici 9.3.5, а упоредне ознаке нека механичка својства и микроструктура ових материјала дати су у табlici 9.3.6.

Таблица 9.3.5 Хемијски састав и намена ČL3160 и ČL3460 [31,141]

Основни материјал		Хемијски састав, %						Намена
		C	Si	Mn	Cr	P	S	
ČL3160	Прописан	1,20	0,50	12,00	-	0,035	0,10	ČL3160 и ČL3460 – За израду делова изложених абразивном хабању и јаким ударним оптерећењима као што су: радни делови млинова, дробилица, грађевинских машина за рад са материјалима велике тврдоће и др.
	Анализиран	1,20	0,48	12,35	-	0,025	0,10	
ČL3460	Прописан	1,20	0,50	13,00	1,00	0,040	0,10	
	Анализиран	1,20	0,55	13,14	1,12	0,350	0,15	

Таблица 9.3.6 Упоредне ознаке, нека механичка својства и микроструктура ČL3160 и ČL3460 [31,141]

Упоредне ознаке		Механичка својства					Микроструктура
JUS	DIN	R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A ₅ , %	KV, J	Тврдоћа, НВ	ČL3160 – Аустенитна ČL3460 - Аустенитна
ČL3160	G-X120Mn12	≈200	-	-	-	200 после гашења	
ČL3460	G-X120Mn12	≈210	-	-	-	210 после гашења	

• **Č0363** и **Č0645** припадају групи општих конструкционих специјално умирених челика и примењују се за израду одговорних делова заварених конструкција, отковака и других јако напрегнутих делова у машиноградњи (осовине, вратила, вретена, зупчasti и пужни преносници и др.), односно конструкција код којих би услед појаве кртог лома дошло до хаваријског оштећења, и угрожености целе конструкције. Код ових челика нема опасности од појаве кртог лома. Испоручују се у облику различитих профила, цеви, табли и у грађевинарству служе за израду различитих конструкција: одбојних ограда, носача саобраћајне сигнализације, портала и полупортала и др. Ови основни материјали су коришћени за израду највећег броја физичких модела.

Хемијски састав и намена ових материјала дати су у табlici 9.3.7, а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.8.

Таблица 9.3.7 Хемијски састав и намена Č0363 и Č0645 [31,141]

Основни материјал		Хемијски састав, %				Намена
		C	P	S	N	
Č0363	Прописан	0,17	0,05	0,05	0,007	Č0363 и Č0645 – За израду одговорних делова заварених конструкција, отковака и других јако напрегнутих елемената конструкција код којих не постоји опасност од појаве кртог лома.
	Анализиран	0,15	0,03	0,04	0,007	
Č0645	Прописан	0,40	0,05	0,05	-	
	Анализиран	0,42	0,04	0,05	-	

Таблица 9.3.8 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура Č0363 и Č0645 [31,141]

Упоредне ознаке		Механичка својства					Микроструктура
JUS	DIN	R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A ₅ , %	KV, J	Тврдоћа, НВ	Č0363-међуфазна феритно-перлитна Č0645-међуфазна перлитно-феритна
Č0363	St 37-2	370-450	220-240	18-25	27	130-145	
Č0645	St 60-2	620-720	320-340	10-15	-	145-185	

• **Č1530** припада групи угљеничних челика за побољшање и има широку примену при изради различитих делова техничких система. Испоручује се у различитим облицима као што су шипке различитих попречних пресека и лимови средњих и већих дебљина. Код грађевинских машина од овог челика најчешће се израђују ножеви плугова за чишћење снега, ножеви грејдера и булдозера, саставни делови плугова, делови утоварних машина, делови посипача, као и за завртње и навртке и др.

Прописан и анализиран хемијски састав смернице за његову намену дати су у табlici 9.3.9., а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.10.

Таблица 9.3.9 Хемијски састав и намена Č1530 [31]

О.М. Č1530	Хемијски састав, %					Намена
	C	Si	Mn	P	S	
Прописан	0,42-0,50	0,04	0,50-0,80	0,045	0,045	Č1530 – За израду конструкционих делова техничких система.
Анализиран	0,50	0,04	0,80	0,035	0,035	

Таблица 9.3.10 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура Č1530 [31]

Упоредне ознаке		Механичка својства						Микроструктура
JUS	DIN	R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A ₅ , %	Z, %	KV, J	Тврдоћа, HB	
Č1530	C45	700-850	500	14	30	32	334-340 после побољшања	Č1530 – међуфазна структура побољшања, претежно труститна

• **Č2330** примењује се најчешће за израду гибљева и тањирастих опруга веће дебљине, алата за обраду земље, посуда конвејера и др. Израђује се у различитим облицима, а може бити изливен као челични лив, као и прерађен деформисањем на хладно и топло.

Прописан и анализиран хемијски састав и смернице за његову намену дати су у табlici 9.3.11, а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.12.

Таблица 9.3.11 Хемијски састав и намена Č2330 [31]

О.М. Č2330	Хемијски састав, %					Намена
	C	Si	Mn	P	S	
Прописан	0,55-0,65	1,30-1,60	0,90-1,20	0,040	0,040	Č2330 - За израду лиснатих и тањирастих опруга веће дебљине, алата за обраду земље и др.
Анализиран	0,60	1,50	1,20	0,035	0,020	

Таблица 9.3.12 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура Č2330 [31]

Упоредне ознаке		Механичка својства						Микроструктура
JUS	DIN	R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A ₅ , %	Z, %	KV, J	Тврдоћа, HB	
Č2330	60SiMn5	1320-1570	1130	6	32	-	272-290 после побољшања	Č2330-Међуфазна структура побољшања, претежно сорбитна.

• **Č5430** примењује се најчешће за израду високооптерећених делова техничких система: погонских вратила, зупчаника, осовина, клипњача, ножева, карданских вратила и других делова већих димензија.

Прописан и анализиран хемијски састав и смернице за његову намену дате су у табlici 9.3.13, а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.14.

Таблица 9.3.13 Хемијски састав и намена Č5430 [31]

О.М. Č5430	Хемијски састав, %								Намена
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	
Прописан	0,32 до 0,40	0,40	0,50 до 0,80	0,90 до 1,20	0,90 до 1,20	0,15 до 0,30	0,035	0,030	Č5430 - За израду високо оптерећених делова техничких система: зупчаника, погонских вратила, ножева и др.
Анализиран	0,40	0,35	0,80	1,20	1,00	0,30	0,030	0,020	

Таблица 9.3.14 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура Č5430 [31]

Упоредне ознаке		Механичка својства						Микроструктура
JUS	DIN	R _m , МПа	R _{eH} , МПа	A ₅ , %	Z, %	KV, J	Тврдоћа, HB	
Č5430	36CrNiMo4	1250 до 1450	900 до 1050	9	40	-	460-520 после побољшања	Č5430 - Међуфазна структура побољшања мартензитно - бејнитна

• **Č4732** најчешће се примењује за израду високо оптерећених делова техничких система као што су полуосовине возила и машина, цилиндри мотора, кардански преносници и др. Код грађевинске механизације, поред претходно наведеног примењује се и за израду ножева косилица за кошење траве и ножева уређаја за чишћење растиња, зупчаника, обртних назубљених венаца, зупчастих летви и др. Делови који се израђују од овог челика добијају се пластичном деформацијом на топло ковањем или ваљањем.

Прописан и анализиран хемијски састав и смернице за његову намену дати су у табlici 9.3.15, а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.16.

Таблица 9.3.15 Хемијски састав и намена $\check{C}4732$ [31]

О.М. $\check{C}4732$	Хемијски састав, %							Намена
	C	Si	Mn	Cr	Mo	P	S	
Прописан	0,38 до 0,45	0,15 до 0,40	0,50 до 0,80	0,90 до 1,20	0,15 до 0,30	0,035	0,0035	$\check{C}4732$ -За израду високо оптерећених делова возила и машина који се израђују поступком пластичне деформације на топло.
Анализиран	0,45	0,40	0,80	1,20	0,30			

Таблица 9.3.16 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура $\check{C}4732$ [31]

Упоредне ознаке		Механичка својства						Микроструктура
JUS	DIN	R_m , MPa	R_{eH} , MPa	A_5 , %	Z, %	KV, J	Тврдоћа, HB	
$\check{C}4732$	42CrMo4	1100 до 1300	900	10	40	34	298-305	$\check{C}4732$ -Међуфазна структура побољшања сорбит са учешћем ферита по границама зрна.

- **$\check{C}4830$** најчешће се примењује за израду опруга свих врста за највећа оптерећења код друмских и шинских возила, као и за полуосовине и зупчанике, на зубљена вратила и др. Код грађевинских машина од овог материјала израђују се гибљеви и торзионе опруге, као и ножеви за чишћење и равнање терена, алати за обраду земље и др. Делови од овог материјала могу се израђивати пластичном деформацијом на хладно и на топло.

Прописан и анализиран хемијски састав, и смернице за намену овог материјала дати су у табlici 9.3.17, а упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура у табlici 9.3.18.

Таблица 9.3.17 Хемијски састав и намена $\check{C}4830$ [31]

О.М. $\check{C}4830$	Хемијски састав, %							Намена
	C	Si	Mn	Cr	V	P	S	
Прописан	0,47 до 0,55	0,15 до 0,40	0,70 до 1,10	0,90 до 1,20	0,10 до 0,20	0,035	0,035	$\check{C}4830$ - За израду најјаче напругнутих опруга код друмских и железничких возила, поступком на хладно или на топло.
Анализиран	0,55	0,40	1,00	1,00	0,20			

Таблица 9.3.18 Упоредне ознаке, механичка својства и микроструктура $\check{C}4830$ [31]

Упоредне ознаке		Механичка својства						Микроструктура
JUS	DIN	R_m , MPa	R_{eH} , MPa	A_5 , %	Z, %	KV, J	Тврдоћа, HB	
$\check{C}4830$	50CrV4	1100 до 1300	900	9	40	34	488-501	$\check{C}4830$ - Међуфазна структура побољшања, претежно труститна.

9.3.1.6 Одређивање својстава испитиваних додатних материјала

Додатни материјали за наваривање изабрани су према препоруци произвођача [82], и користе се за полагање на радне делове грађевинских машина који су током експлоатације најчешће изложени процесима абразивног хабања прве и друге врсте и процесима корозије. За сва наваривања при овим истраживањима коришћени су додатни материјали произвођача SŽ-Elektrode Jesenice.

- **ABRADUR 58** је обложена рутилна електрода за наношење тврдих навара на делове изложене врло јаком абразивном хабању и ударним оптерећењима средње јачине. Примењује се за наваривање делова багера, булдозера, дробилица за дробљење стенских материјала мање тврдоће, вођица транспортера и др. Због велике тврдоће, навари се обрађују брушењем. Пре наваривања препоручује се наношење пластичног међуслоја електродом INOX В 18/8/6, или електродом Е Мп 17 Cr 13, која се препоручује за наваривање аустенитних манганских челика.

- **CrWC 600** је дебелообложена базична електрода за наношење изузетно тврдих навара са високим садржајем хром и волфрам карбида, који су врло отпорни на абразивно хабање дејством минералних и других материјала. Навари нису отпорни на ударна оптерећења већег интензитета. Препоручује се наваривање преко пластичног међуслоја нанетог електродом INOX B 18/8/6 или комбиновано наваривање са електродом E DUR 600. Овом електродом се могу наваривати челици, челични ливови и аустенитни мангански челици.

- **E DUR 600** је базична електрода легирана хромом погодна за наношење тврдих навара на челичне делове од којих се захтева врло висока отпорност на хабање. Примењује се за наваривање делова дробилица, делова багера, раоника плугова, пнеуматских алата, ножева за маказе, алата за пресовање, пробијање и ковање, као и других алата за рад у хладном и топлим стању. Навари су жилави и отпорни на ударна оптерећења. Овом електродом се могу наваривати челици и челични ливови.

- **E DUR 400** је базична електрода, легирана Cr и Mn. Користи се за наваривање похабаних точкова, ваљака, шина, ланчаника, зупчаника и других делова на машинама и возилима са гусеницама. Овом електродом могу се наваривати и други машински делови који су изложени интензивном хабању. Навари су жилави, отпорни на хабање и ударна оптерећења и могу се механички обрађивати. Ова електрода се примењује за наваривање челика и челичних ливова.

- **INOX B 18/8/6** је аустенитна базична електрода за заваривање Cr и CrNi челика, челика велике јачине и челика лоше заварљивости за међусобно спајање разнородних челика, наваривање пластичних међуслојева који служе за смањење сопствених напона, и за наваривање површина отпорних на хабање и корозију. Навари су немагнетични, отпорни на оксидацију до температуре од 800°C, жилави до температуре од -100°C и отпорни на појаву прелина. Овом електродом могу се наваривати и заваривати челици са високим садржајем угљеника, челици високе јачине и високолегирани мангански челици. Применом ове електроде могу се међусобно спајати нелегирани конструкциони челици са нерђајућим феритним и аустенитним челицима. Наваривањем овог додатног материјала могу се репарирати делови оштећени услед кавитационог хабања.

- **INOX R 29/9** је феритно-аустенитна рутилна електрода за заваривање челика велике јачине, разнородних челика и челика лоше заварљивости, наваривање пластичног међуслоја и репаратурно наваривање похабаних делова. Ову электроду одликује стабилан лук, нема прскања материјала, а додатни материјал се депонује у ситним капљицама. Троска се изузетно лако отклања, а навари су веома глатки и отпорни на појаву пора и прелина. Овом електродом могу се заварити или наварити тешко заварљиви челици као што су: високолегирани, високоугљенични побољшани, опружни и високомангански челици.

- **E Mn 14** је базична електрода за репаратурно и производно наваривање делова изложених хабању и ударним оптерећењима јаког интензитета, као и за спајање заваривањем високолегираних манганских челика дебљине до 10 mm. Навари имају високу отпорност на ударна оптерећења, а после ојачавања на хладно, и добру отпорност на абразивно хабање. Пре ојачавања, наваре је могуће механички обрађивати. Користи се за заваривање и наваривање високолегираних манганских челика који служе за израду делова шинских возила, скретница и др., као и за наваривање делова млинова и дробилица (уводници, облоге, ударне греде, чељусти и др.). Ова електрода се првенствено примењује при заваривању и наваривању аустенитних манганских челика у којима је садржај мангана око 14%.

- **E Mn 17 Cr 13** је високопродуктивна рутилна електрода за заваривање и наваривање манганских челика ($Mn \approx 14\%$), као и других челика од којих се захтева изузетна отпорност на ударна оптерећења и кавитацију. Такође, користи се за наваривање пластичног међуслоја пре наваривања електродама из групе АБРАДУРА. Користи се за репаратурно и производно наваривање батова хидрауличних преса, делова дробилица, делова на железници, радних делова грађевинске механизације. Наваре је, пре ојачавања, могуће механички обрађивати. Овом електродом могу се заваривати и наваривати нисколегирани челици, високолегирани аустенитни мангански челици и други челици добре отпорности на хабања.

• **FILTUB 12 В** је базична пуњена жица погодна за заваривање нелегираних конструкционих челика, челика за израду котлова, челика који се користе у бродоградњи, челика за израду цеви и профила, челичних ливова и финозрних челика повишене јачине. Такође се примењује при наношењу пластичног међуслоја код челика лоше заварљивости. Заваривањем или наваривањем овом пуњеном жицом постижу се одлична механичка својства и при ниским температурама; троска се лако уклања а распрскивање је минимално.

• **FILTUB DUR 16** је базична средњелегирана пуњена жица, погодна за наваривање тврдих навара на делове који су изложени процесима хабања високог интензитета. Навари су без пора и прслина због чега су отпорни на промењива динамичка и ударна оптерећења. При наваривању делова израђених од челика лоше заварљивости потребно је наварити пластичан међуслој применом пуњене жице FILTUB 12 В или FILTUB DUR 3. Наваре је, због велике тврдоће, могуће обрадити само брушењем. Примењује се за наваривање лопатица и облога мешалица, зуба и других делова грађевинске механизације, делова дробилица као што су конусни уводници, чељусти, ударне греде, облоге и др. Овом електроодом могу се наваривати челици и челични ливови.

Пре израде физичких модела изведене су бројне пробе наваривања различитим додатним материјалима на разне радне предмете. Варирањем параметара наваривања (јачине струје, радног напона, брзине, пречника додатног материјала, дебљине радних предмета и др.), дошло се до технолошких параметара наваривања којима се добијају наварени спојеви задовољавајућег квалитета. Хемијски састав и упоредне ознаке испитиваних додатних материјала дати су у табlici 9.3.19, а механичка својства чистог метала навара добијене овим испитиваним додатним материјалима дати су у табlici 9.3.20.

Таблица 9.3.19 Хемијски састав и упоредне ознаке испитиваних додатних материјала [82]

Упоредне ознаке D.M.		Хемијски састав, %						
SŽ - Elektrode Jesenice	DIN 8555,8556	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo
ABRADUR 58	E10-UM-60-GR	3,60	-	-	32,00	-	-	-
Cr WC 600	E10-UM-60-C	4,00	-	-	26,00	-	4,00	-
E DUR 600	E6-UM-60	0,50	-	-	7,50	-	-	-
E DUR 400	E1-UM-400	0,22	-	1,40	1,50	-	-	-
INOX B 18/8/6	E 18 8 Mn B20	0,12	0,80	7,00	19,00	9,00	-	-
INOX R 29/9	E 29 9 R26	0,15	≤0,9	0,9	29,00	9,00	-	-
E Mn 14	E7-UM-200-KP	1,20	-	12,50	-	-	-	0,70
E Mn 17 Cr 13	E7-UM-200-KP	0,60	-	16,50	13,50	-	-	-
FILTUB 12 В	T424BC3H5	0,05	0,35	1,40	-	-	-	-
FILTUB DUR 16	MSG6-GF-C1-60-GP	0,45	0,60	1,60	5,50	-	-	0,80

Таблица 9.3.20 Механичка својства чистог метала наваре испитиваних додатних материјала [82]

Ознаке D.M. SŽ – Elektrode Jesenice	Механичка својства				
	R _m , MPa	R _{eH} , MPa	A ₅ , %	KV, J	Тврдоћа, HB, HRC
ABRADUR 58	-	-	-	-	Од 57÷62 HRC, а најчешће 58 HRC на 20°C.
Cr WC 600	-	-	-	-	Од 57÷62 HRC, а најчешће 60 HRC на 20°C.
E DUR 600	-	-	-	-	Од 57÷62 HRC, а најчешће 60 HRC на 20°C.
E DUR 400	-	-	-	-	Од 350÷450 HB, а најчешће 400 HB на 20°C.
INOX B 18/8/6	590 до 690	>350	>40	>80 на 20°C	Приближно 200 HB.
INOX R 29/9	740 до 840	>500	>20	-	Приближно 235 HB.
E Mn 14	-	-	-	-	Од 175÷225 HB, а најчешће 220 HB, односно 48 HRC после деформације на хладно.
E Mn 17 Cr 13	-	-	-	-	Од 220÷260 HB, а најчешће 220 HB, односно 48 HRC после деформације на хладно.
FILTUB 12 B	510 до 610	>420	>26	>160 на +20°C >200 на -20°C >60 на -40°C	Приближно 200 HB.
FILTUB DUR 16	-	-	-	-	Од 57÷62 HRC, а најчешће 60 HRC на 20°C.

9.3.1.в Оцена заварљивости основних материјала

Радни делови грађевинске механизације су у току експлоатације најчешће истовремено изложени различитим процесима хабања, корозије и сталним или повременим ударним оптерећењима. Због тога се ови делови по правилу израђују од висококвалитетних легираних челика и челичних ливова. Ови материјали углавном припадају групи условно заварљивих челика, па је неопходно при заваривању и наваривању предузети додатне мере, како би се добили спојеви захтеваног квалитета.

Опште је познато, да на заварљивост челика, највише утичу његов хемијски састав и дебљина. Повећан садржај угљеника и легирајућих елемената погоршава заварљивост челика и ливених гвожђа. Садржај угљеника у челику изнад 0,25% сврстава овај материјал у групу условно заварљивих челика. Заварљивост додатно погоршавају и легирајући елементи који иначе побољшавају нека друга својства челика. Поред угљеника и легирајућих елемената на погоршање заварљивости челика утичу и нечистоће (P и S), као и низ других фактора [49,78,159].

Постоји више рачунских метода за оцену заварљивости различитих врста челика, а овде је коришћена модификована метода Сеферијана, која поред хемијски еквивалентног угљеника узима у обзир и дебљину материјала. Највећи број физичких модела у овом раду израђен је од С0363 добре заварљивости, па је Сеферијанова формула била сасвим довољна за оријентациону оцену заварљивости овог и других основних материјала као и за одређивање температуре предгревања. И поред тога, за оцену заварљивости и одређивање температуре предгревања, за неке основне материјале, коришћени су КНЗ-дијаграми и време хлађења $t_{8/5}$. Тако је процењивана новонастала структура у зони утицаја топлоте [85,86]. Прорачун температуре предгревања за поједине врсте основног материјала је изведен за дебљину $s = 10 \text{ mm}$, јер су сви физички модели израђени од материјала ове дебљине. Прорачунате и усвојене температуре предгревања за различите основне материјале дате су у табlici 9.3.21.

Таблица 9.3.21 Температуре предгревања испитиваних основних материјала дебљине $s = 10 \text{ mm}$

Начин одређивања температуре предгревања T_p	Модификована форма Сеферијана	Врста О.М.	Температура предгревања $T_p, ^\circ\text{C}$	
			Рачунска	Усвојена
Метода Сеферијана	$CE = CE_h + CE_s = CE_h (1 + 0.005 \cdot s), \%$ $CE_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{18}, \%$ $T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0,25}, ^\circ\text{C}$	ČL3134	~ 230	250
		ČL4150	~ 634	650
		Č1530	~ 214	250
		Č2330	~ 229	250
		Č5430	~ 254	300
		Č4732	~ 266	300
		Č4830	~ 271	300

Температуре предгревања дате у табlici 9.3.21 израчунате су за најнеповољнији случај, односно за максимални садржај угљеника и легирајућих елемената према прописаном саставу за одређену врсту челика. Основни материјали Č0363, ČL3160 и ČL3460 нису уврштени у таблицу 9.3.21, јер је реч о материјалима добре заварљивости. Челик Č0363 припада групи угљеничних специјално умирених челика са малим садржајем угљеника од 0,17%. Челици ČL3160 и ČL3460 припадају групи високолегираних манганских челика са високим садржајем угљеника и мангана, аустенитне су структуре и не препоручује се предгревање због могућег прегревања услед прекомерног уноса топлоте, нарочито код материјала веће дебљине. Аустенитна структура гарантује добру заварљивост ових материјала, а прекомерно уношење топлоте доводи до раста (укрупњавања) аустенитних зрна што погоршава његова механичка својства у зони утицаја топлоте. Зато се после наваривања ових челика препоручује одмах брзо хлађење тзв. *гашење* под млазом хладне воде, чиме се спречава пораст металних зрна [78,97].

9.3.1.г Моделирање параметара наваривања и одређивање оптималне технологије

Припрема основних материјала за израду физичких модела састоји се из сечења материјала на одговарајуће димензије, његовог одмашћивања и храпављења навариваних површина. Сечење материјала је изведено уз интензивно хлађење да би се спречила промена структуре услед загревања. Припрема додатног материјала за израду физичких модела односи се на сушење на температури 350-400°C у трајању од 2 h.

Наваривање пуњеним жицама изведено је МАГ-ом, коришћењем пуњене жице пречника 1,2 mm. Физички модели израђивани су наваривањем различитих врста додатних материјала на различите основне материјале. У циљу упоређивања својстава различитих додатних материјала, неки модели су израђени коришћењем различитих додатних материјала. Сви модели израђени су у истим лабораторијским условима, а наваривање је изведено у хоризонталном положају. Температура предгревања контролисана је помоћу термопарова и термокредна.

Моделирањем процеса наваривања, варирањем параметара наваривања, одређени су оптимални параметри наваривања, који обезбеђују наварен спој доброг квалитета. Основни критеријум за оцену квалитета наварених спојева јесте да навар буде хомоген без пора, укључака и прлина, како у металу навара тако и металу основног материјала (зони утицаја топлоте). Потребно је напоменути да се при извођењу бројних проба дошло до сазнања да постоје знатне разлике између препоручених и потребних параметара наваривања да би се добио наварен спој доброг квалитета. Такође, избор оптималних параметара наваривања није нимало једноставан посао, јер је потребно велики број проба са различитим параметрима наваривања, што захтева доста времена. Без обзира на то, оптималне параметре наваривања неопходно је одредити, јер само они могу дати наварене спојеве захтеваног квалитета.

После бројних проба усвојени су оптимални параметри наваривања који су примењени при изради физичких модела. Ови модели су послужили за испитивања наварених спојева у лабораторијским условима. Процесни параметри наваривања при изради физичких модела REL-ом и обложених електрода дати су у табlici 9.3.22. Препоручени и усвојени процесни параметри наваривања при изради физичких модела МАГ-ом помоћу пуњених електродних жица приказани су у табlici 9.3.23.

Таблица 9.3.22 Процесни параметри наваривања применом REL наваривања

Дебљина О.М. s, mm	Ознака електроде SŽ-Elektroda Jasenice	Пречник електродне жице d _e , mm	Струја наваривања I, A	Радни напон U, V	Брзина наваривања v _z , cm/s	Погонска енергија наваривања $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i, J/cm$
10-24	ABRADUR 58	3,25-5,00	130-160	25-26	0,124±0,145	20968-22952
	Cr WC 600	3,25-5,00	125-220	25-29	0,116±0,180	21555-28356
	E DUR 600	3,25-5,00	120-200	25-28	0,119±0,220	20168-25455
	E DUR 400	3,25-5,00	120-180	25-27	0,120±0,160	20000-24300
	INOX B 18/8/6	3,25-5,00	100-140	24-26	0,136±0,178	14118-18696
	INOX R 29/9	3,25-5,00	100-160	24-26	0,135±0,180	16000-20780
	E Mn 14	3,25-5,00	120-180	25-27	0,148±0,162	16216-24000
E Mn 17 Cr 13	3,25-5,00	130-200	25-28	0,152±0,168	17105-26667	

*Напомена: η_i -коэффициент искоришћења топлоте и износи 0,80 при наваривању базичним електродама, и 0,90 при наваривању рутилним електродама.

Таблица 9.3.23 Процесни параметри наваривања применом MAG наваривања.

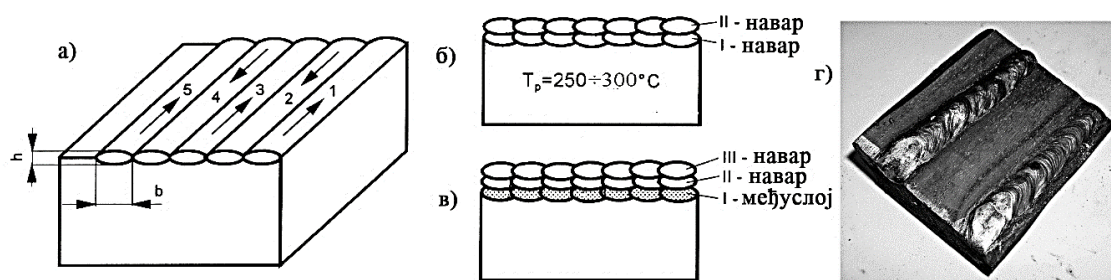
Дебљина О.М. s, mm	Ознака електродне жице SŽ- Elektroda Jasenice	Пречник електродне жице, d _z mm	Количина заштитног гаса, l/min	Струја наваривања I, A	Радни напон U, V	Време наваривања v _z , m/h	Погонска енергија наваривања $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i, J/cm$
10	FILTUB 12 B	1,2	Препоручена 18-20 Усвојена 18	Препоручена 150-200 Усвојена 150	Препоручен 20-27 Усвојен 23	Препоручено 3,0-10,0 Усвојено 5	Препоручена 31875-9107 Остварена 20946
	FILTUB DUR 16	1,2	Препоручена 18-20 Усвојена 18	Препоручена 130-250 Усвојена 150	Препоручен 23-28 Усвојен 23	Препоручено 3,5-8,0 Усвојено 5	Креће се у распону 31875-13330 Остварена 20946

*Напомена: η_i -коэффициент искоришћења топлоте и износи 0,85 за MAG, 0,75 за MIG и 0,65 за TIG.

MAG-метода наваривања има више предности у односу на REL-методу, па се данас све више користи наваривање у заштитној атмосфери и пуњене електродне жице као додатни материјал.

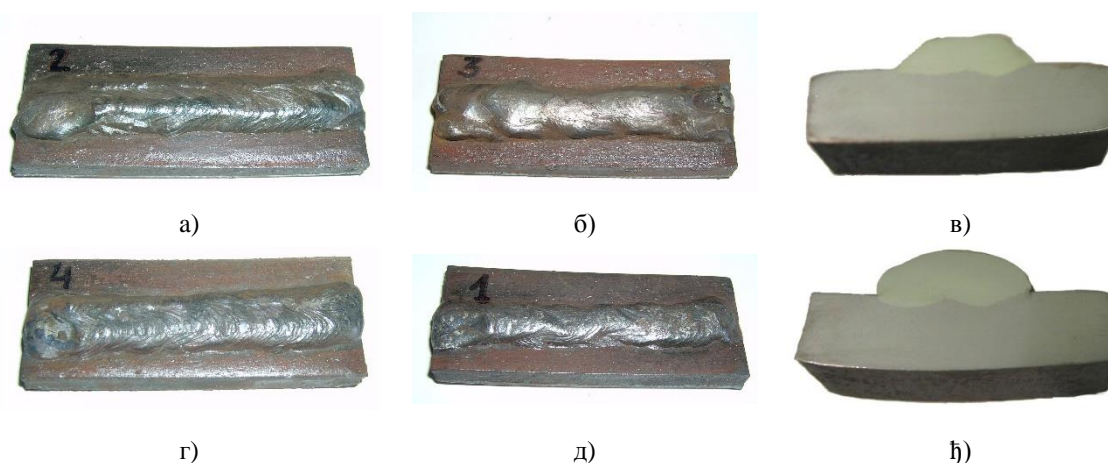
Физички модели су израђени паралелно у две варијанте, а са истом технологијом, и истим процесним параметрима наваривања. *Прва варијанта* израде физичких модела односи се на наваривање са предгревањем или без предгревања, у зависности од заварљивости основних материјала. *Друга варијанта* израде физичких модела заснива се на наношењу пластичног међуслоја, без предгревања. Разлог за овакав приступ је да се уоче евентуалне разлике, у добијеним резултатима и процени којој варијанти треба дати предност.

За наношење пластичног међуслоја коришћен је додатни материјал INOX B 18/8/6 код физичких модела израђених REL-ом, и додатни материјал FILTUB 12 B код физичких модела израђених MAG-ом. Начин полагања навара, редослед и број нанетих слојева и изглед једног физичког модела, у обе варијанте, приказани су на слици 9.3.1.



Слика 9.3.1 Начин и редослед полагања наvara при изради физичких модела: а) начин полагања наvara, б) редослед нанетих слојева (прва варијанта са предгревањем), в) редослед нанетих слојева (друга варијанта без предгревања са nanoшењем међуслоја), г) изглед физичког модела

При полагању наvara пре сваког наредног слоја уклања се троска и врши искивање. После наваривања готови модели хладе се на мирном ваздуху. При изради физичких модела (сл. 9.3.2) није извођена накнадна термичка обрада, из разумљивих разлога, да би се испитала стварна својства наварених спојева, који се термичком обрадом мењају.



Слика 9.3.2 Изглед неких припремљених физичких модела (а, б, в, г) и металографских избрусака (д, њ) који су коришћени за лабораторијска експериментална испитивања

9.3.2 ИСПИТИВАЊЕ ТВРДОЋЕ И МИКРОСТРУКТУРЕ НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

Из дефиниције идеалне заварљивости произлази да зоне навареног споја (основни материјал, зона утицаја топлоте и навар) треба да буду једнаких механичких, физичких и хемијских својстава [49]. Међутим, при формирању навареног споја свака тачка споја испод наvara изложена је различитом температурском циклусу, па ће наварени спој имати мање или више хетерогену структуру различитих механичких, физичких и хемијских својстава. Посебне промене својстава основног материјала одвијају се у зони утицаја топлоте и оне се разликују од слоја до слоја где је настало потпуно топљење, непотпуно топљење, прегревање, нормализација, непотпуна прекристализација и рекристализација [62,70]. Стога је испитивање својстава материјала у зони утицаја топлоте непосредно испод наvara од велике важности за оцену квалитета комплетног навареног споја, јер је ова зона најчешће најслабија „карика“ навареног споја.

Одређивањем најважнијих својстава наvara, као што су јачина на смицање и жиљавост, најчешће се добијају резултати за наварен спој у целини. О својствима појединих зона навареног споја може се посредно закључити мерењем тврдоће и снимањем микроструктуре појединих зона наvara, као и симулирањем појединих температурских циклуса.

- **Тврдоћа** навареног споја мери се у различитим правцима, тако да иста линија обухвата све зоне наvara. Имајући у виду нехомогеност навареног споја, обично се техничким условима захтева да највећа тврдоћа у зони утицаја топлоте буде највише 20 до 30% већа од тврдоће основног материјала. У противном, захтева се предгревање или отпуштање после наваривања.

Код кртих структура ($HV > 350$) услед динамичких оптерећења настаје крти лом. Тврдоћа се најчешће мери методом Викерс [60,65].

- **Микроструктура** појединих зона навареног споја испитује се снимањем на металографском микроскопу. Код наварених спојева најчешће се настају међуфазне (мешовите) структуре, а коначна структура се дефинише према доминантној фази.

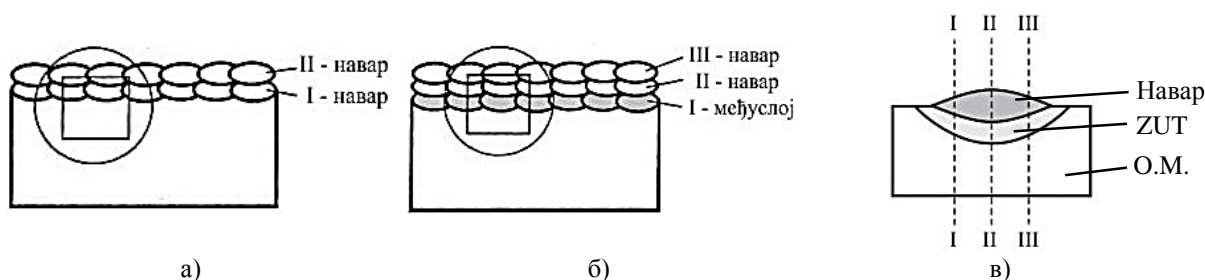
Металографска испитивања уопштено говорећи могу бити *макроскопска* и *микроскопска*. *Макроскопска испитивања* изводе се посматрањем голим оком или под лупом увећањем до 30 пута и истовремено се испитује навар, зона утицаја топлоте и основни материјал и служе за претходну оцену навареног споја или за оцену квалификације заваривача. *Микроскопска испитивања* изводе се применом оптичких или електронских микроскопа са могућностима увећања најчешће 1000 до 2000 пута. Потребно је напоменути да *оптичка металографска метода* у англосаксонским земљама, има велику примену при оцени отпорности материјала према појави кртог лома, тако што се анализира површина прелома материјала. Овом методом одређује се процентни удео површине зрнастог изгледа, карактеристичне за појаву кртог лома, у односу на укупну површину попречног пресека испитиваног узорка, и доноси оцена његове склоности према појави кртог лома [186].

За металографска испитивања неопходна је израда и припрема металографских узорака, који се називају „шлифови“ или металографски избрусци. Ови узорци се добијају исецањем и брушењем из припремљених модела применом посебне технологије која обезбеђује непроменљивост својства испитиваног материјала. Узорци за металографска испитивања се секу тако да обухватају све зоне навареног споја (навар, ZUT и О.М.).

После исецања и брушења даља припрема металографских узорака састоји се у нагризању испитиваних површина чиме се стварају услови за снимање и разликовање (препознавање) појединих микроструктура навара. Постоје више различитих средстава за нагризање металних површина, а за ова испитивања коришћен је нитал тј. двоцентни раствор азотне киселине у денатурисаном алкохолу [65].

Металографска испитивања изводе се у циљу утврђивања: структурних фаза навара, зоне утицаја топлоте (ZUT-а) и основног материјала (О.М.); ширине и појединих структура у ZUT-у; структурних грешака (гасних мехурова, укључака троске, оксида, нитрида, микропрелома, зона наугљеничења и разугљеничења, зоне закаљивања и др.).

На слици 9.3.3а,б приказано је исецање узорка, а на слици 9.3.3в правци мерења тврдоће.



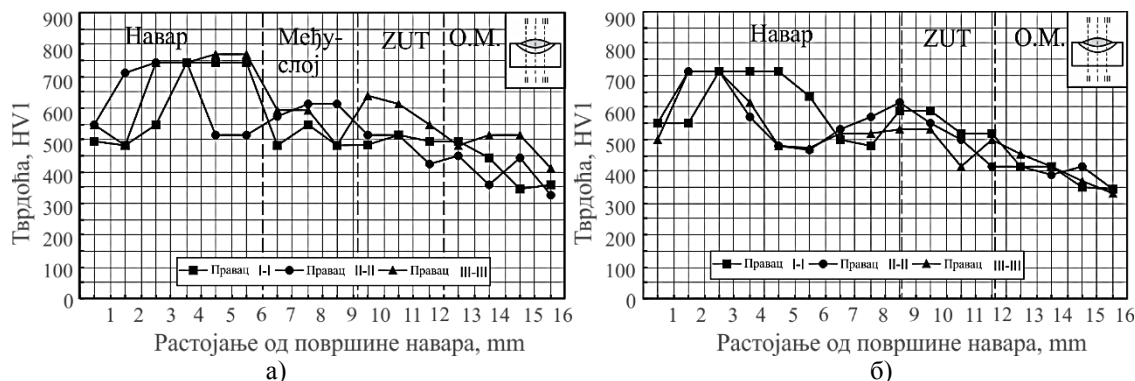
Слика 9.3.3 Начин припреме металографских узорака: а) исецање из двослојног навара, б) исецање из трослојног навара, в) правци мерења тврдоће

9.3.2.а Одређивање тврдоће карактеристичних зона навареног споја

Тврдоћа карактеристичних зона навара мери се најчешће у три међусобно паралелна правца. Правци мерења тврдоће приказани су на следећим сликама за сваки конкретан случај, и обележени са I-I, II-II, III-III. Мерење тврдоће по Викерсу изведено је помоћу одговарајућих уређаја високе тачности, тако да је тврдоћа мерена на растојању 0,1-1 mm.

На слици 9.3.4а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног REL-ом обложен електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$, на ČL3134 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено ношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX В 18/8/6, и двослојног навара електродом ABRADUR 58.

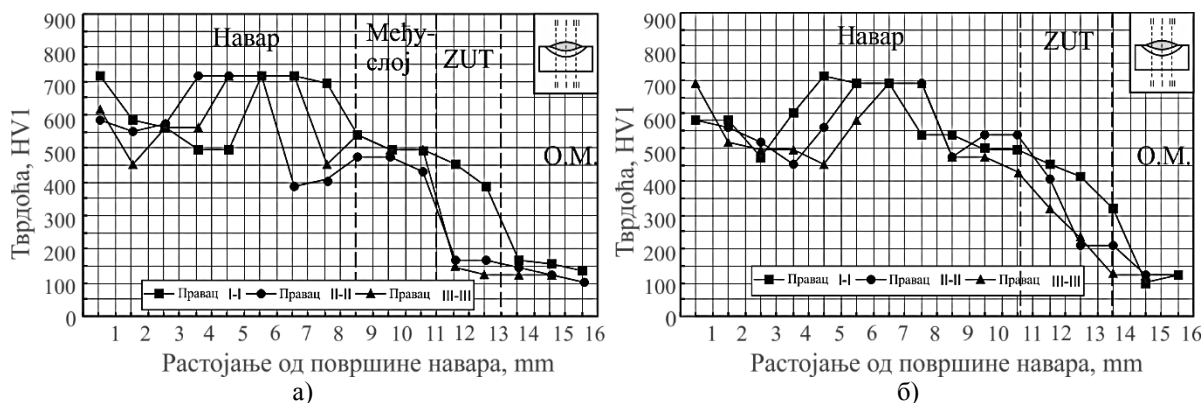
На слици 9.3.4б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног REL-ом обложеном електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{C}L3134$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 250°C , при чему су нанета два слоја наваара електродом ABRADUR 58.



Слика 9.3.4 Распдела тврдоће по пресеку наваара: а) O.M. - $\check{C}L3134$; D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6 D.M. наваара - ABRADUR 58; б) O.M. - $\check{C}L3134$, D.M. наваара - ABRADUR 58

На слици 9.3.5а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног REL-ом обложеном електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{C}0363$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6 и двослојног наваара електродом ABRADUR 58.

На слици 9.3.5б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом обложеном електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{C}0363$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем двослојног наваара електродом ABRADUR 58 без предгревања.



Слика 9.3.5 Распдела тврдоћа по пресеку трослојног наваара: а) O.M. - $\check{C}0363$; D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6; D.M. наваара - ABRADUR 58; б) O.M. - $\check{C}0363$; D.M. наваара - ABRADUR 58

На слици 9.3.6а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{C}0363$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6, и двослојног наваара електродом CrWC 600.

На слици 9.3.6б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{C}0363$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем двослојног наваара електродом CrWC 600 без предгревања.



а)

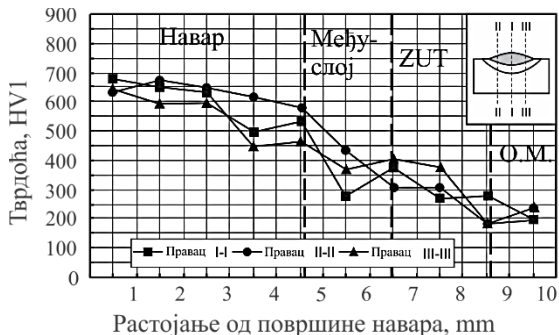


б)

Слика 9.3.6 Распдела тврдоће по пресеку наvara: а) O.M.-Č0363; D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6; D.M. наvara – Cr WC 600; б) O.M.-Č0363; D.M. наvara – Cr WC 600

На слици 9.3.7а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6, и двослојног наvara електродом E DUR 600.

На слици 9.3.7б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем двослојног наvara електродом E DUR 600 без предгревања.



а)

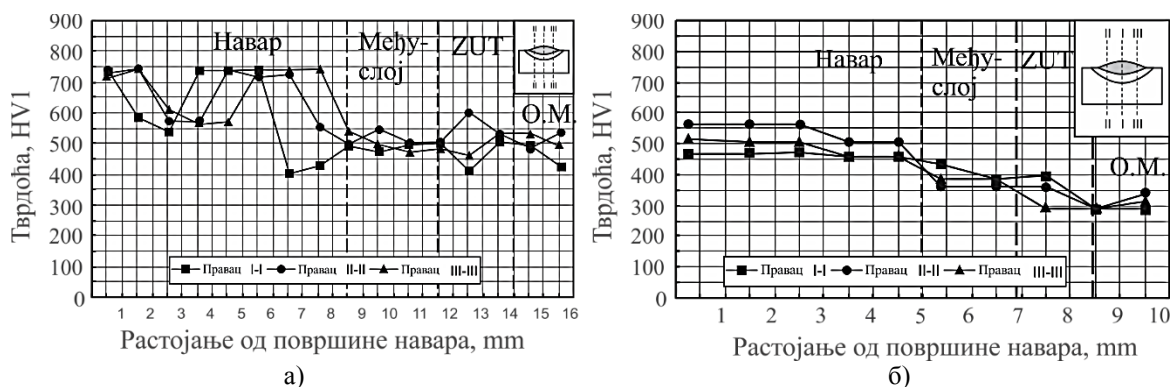


б)

Слика 9.3.7 Распдела тврдоће по пресеку наvara: а) O.M.-Č0363; D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6; D.M. наvara - E DUR 600; б) O.M.-Č0363; D.M. наvara - E DUR 600

На слици 9.3.8а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом обложеном електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на ČL4150 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 650°C , прогревањем на овој температури, наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6 и наношењем двослојног наvara електродом ABRADUR 58.

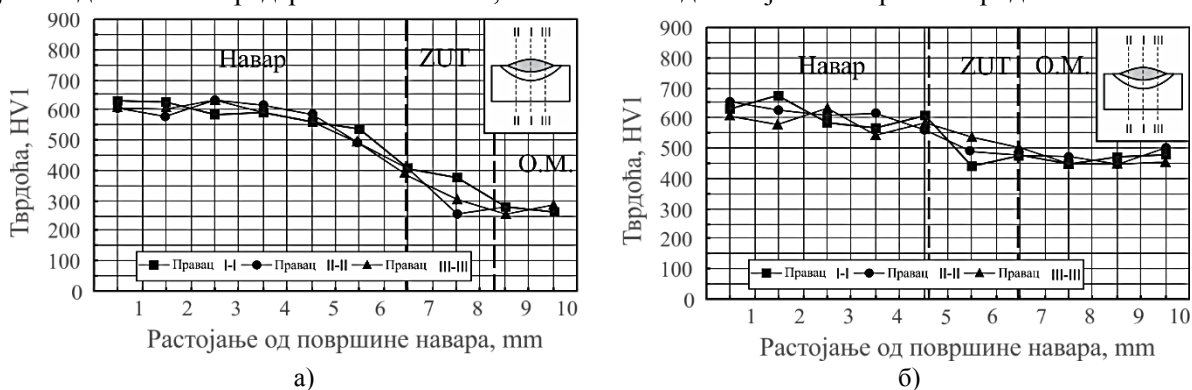
На слици 9.3.8б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом обложеном електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на ČL4150 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 650°C , прогревањем на овој температури, наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6 и наношењем двослојног наvara електродом CrWC 600.



Слика 9.3.8 Распдела тврдоће по пресеку трослојног навара: а) O.M. - ČL4150, O.M. међуслоја - INOX B 18/8/6; D.M. навара - ABRADUR 58; б) O.M. - ČL4150, D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6; D.M. навара - Cr WC 600

На слици 9.3.9а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č4732 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 300°C , и наношењем двослојног навара електродом E DUR 600.

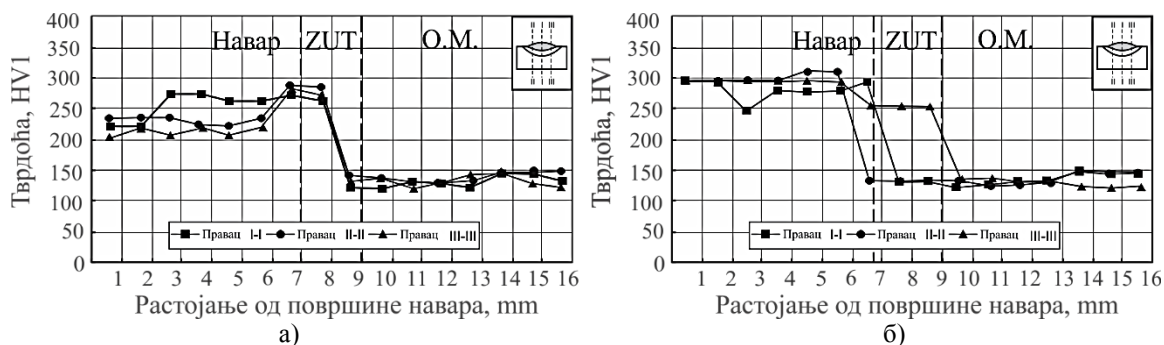
На слици 9.3.9б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č4830 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 300°C , и наношењем двослојног навара електродом E DUR 600.



Слика 9.3.9 Распдела тврдоће по пресеку навара: а) O.M. - Č4732; D.M. навара - E DUR 600; б) O.M. - Č4830; D.M. навара - E DUR 600

На слици 9.3.10а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено без предгревања наношењем двослојног навара електродом E Mn 14.

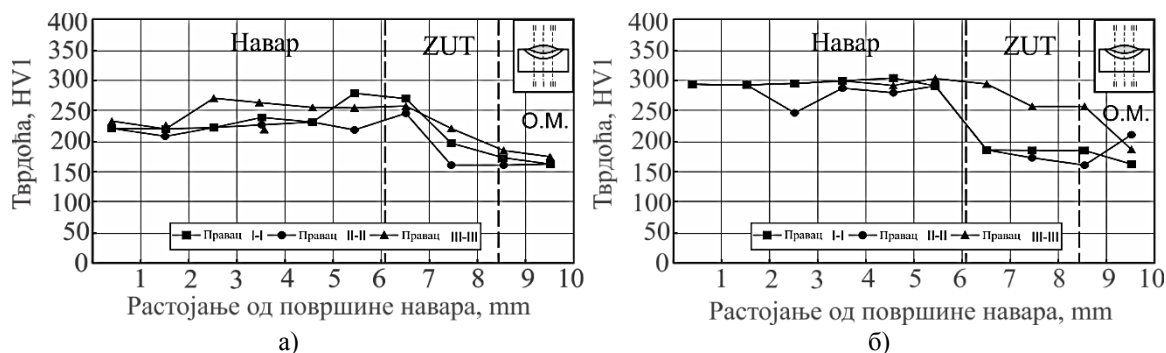
На слици 9.3.10б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено без предгревања наношењем двослојног навара електродом E Mn 17 Cr 13.



Слика 9.3.10 Распдела тврдоће по пресеку навара: а) O.M. - Č0363; D.M. навара - E Mn 14; б) O.M. - Č0363; D.M. навара - E Mn 17 Cr 13

На слици 9.3.11а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на ČL3160 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено без предгревања наношењем двослојног навара електродом E Mn 14.

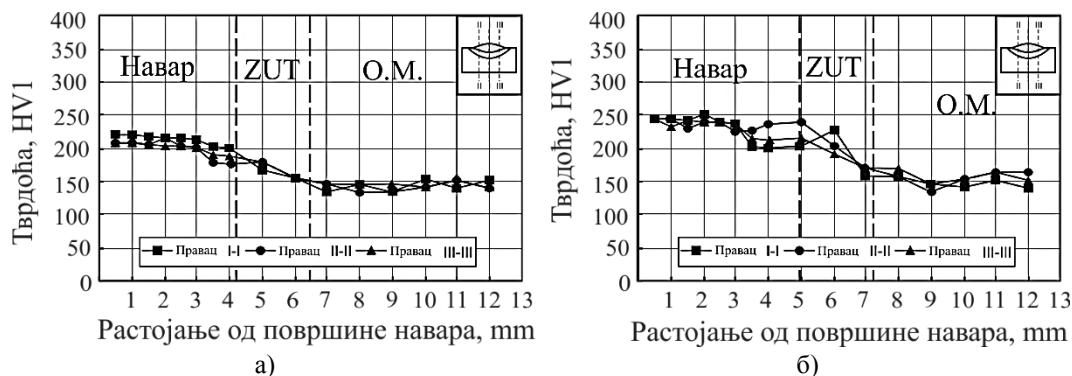
На слици 9.3.11б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на ČL3460 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено без предгревања наношењем двослојног навара електродом E Mn 17 Cr 13.



Слика 9.3.11 Расподела тврдоће по пресеку навара: а) $O.M.$ - ČL3160, D.M. навара – E Mn 14; б) $O.M.$ - ČL3460, D.M. навара – E Mn 17 Cr 13

На слици 9.3.12а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем једнослојног једнопролазног навара пуњеном жицом FILTUB 12 В.

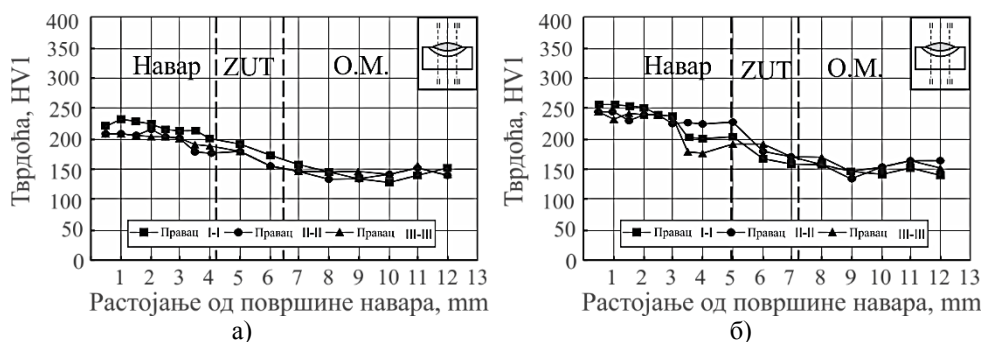
На слици 9.3.12б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0645 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем једнослојног једнопролазног навара пуњеном жицом FILTUB 12 В.



Слика 9.3.12 Расподела тврдоће по пресеку навара: а) $O.M.$ – Č0363, D.M. навара - FILTUB 12 В; б) $O.M.$ – Č0645, D.M. навара - FILTUB 12 В

На слици 9.3.13а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем једнослојног навара у три пролаза пуњеном жицом FILTUB 12 В.

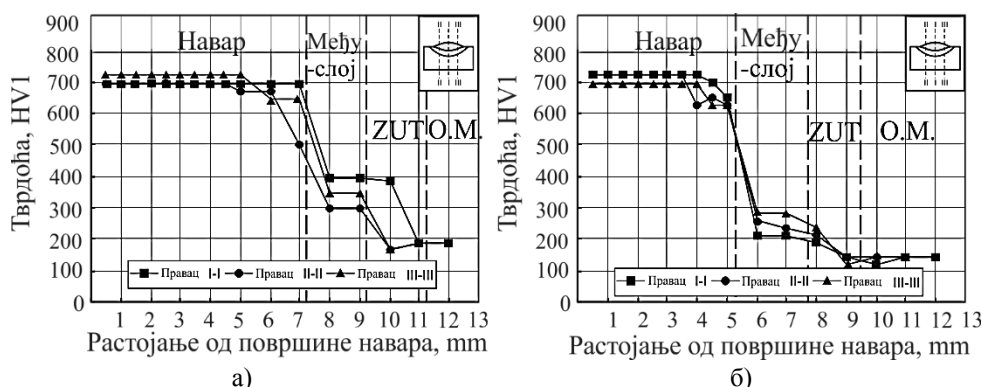
На слици 9.3.13б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0645 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем једнослојног навара у три пролаза пуњеном жицом FILTUB 12 В.



Слика 9.3.13 Распдела тврдоће по пресеку навара: а) O.M.-Č0363, D.M. наведa – FILTUB 12 B; б) O.M.-Č0645, D.M. наведa – FILTUB 12 B

На слици 9.3.14а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем пластичног међуслоја попуњеном жицом FILTUB 12 B, а затим наношењем двослојног навара пуњеном жицом FILTUB DUR 16.

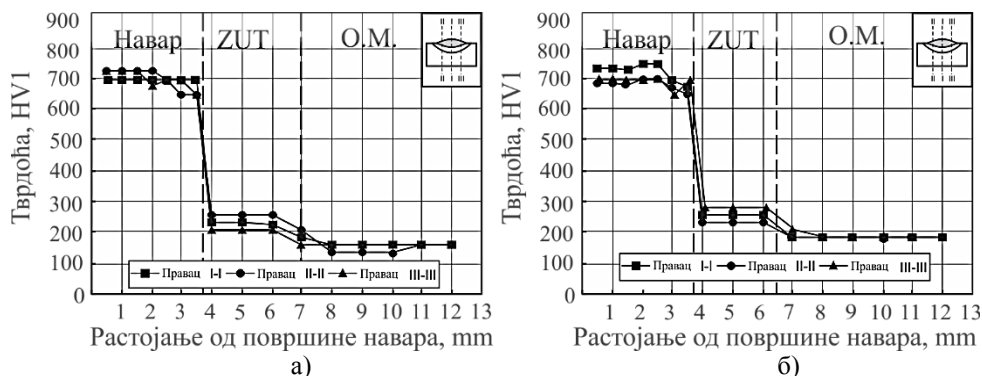
На слици 9.3.14б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0645 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем пластичног међуслоја пуњеном жицом FILTUB 12 B, а затим наношењем двослојног навара пуњеном жицом FILTUB DUR 16.



Слика 9.3.14 Распдела тврдоће по пресеку навара: а) O.M. - Č0363; D.M. међуслоја – FILTUB 12 B; D.M. наведa - FILTUB DUR 16; б) O.M. – Č0645; D.M. међуслоја – FILTUB 12 B; D.M. наведa - FILTUB DUR 16

На слици 9.3.15а приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено директно наношењем двослојног навара пуњеном жицом FILTUB DUR 16, без наношења пластичног међуслоја.

На слици 9.3.15б приказане су измерене тврдоће по зонама навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0645 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено директно наношењем двослојног навара пуњеном жицом FILTUB DUR 16, без наношења пластичног међуслоја.

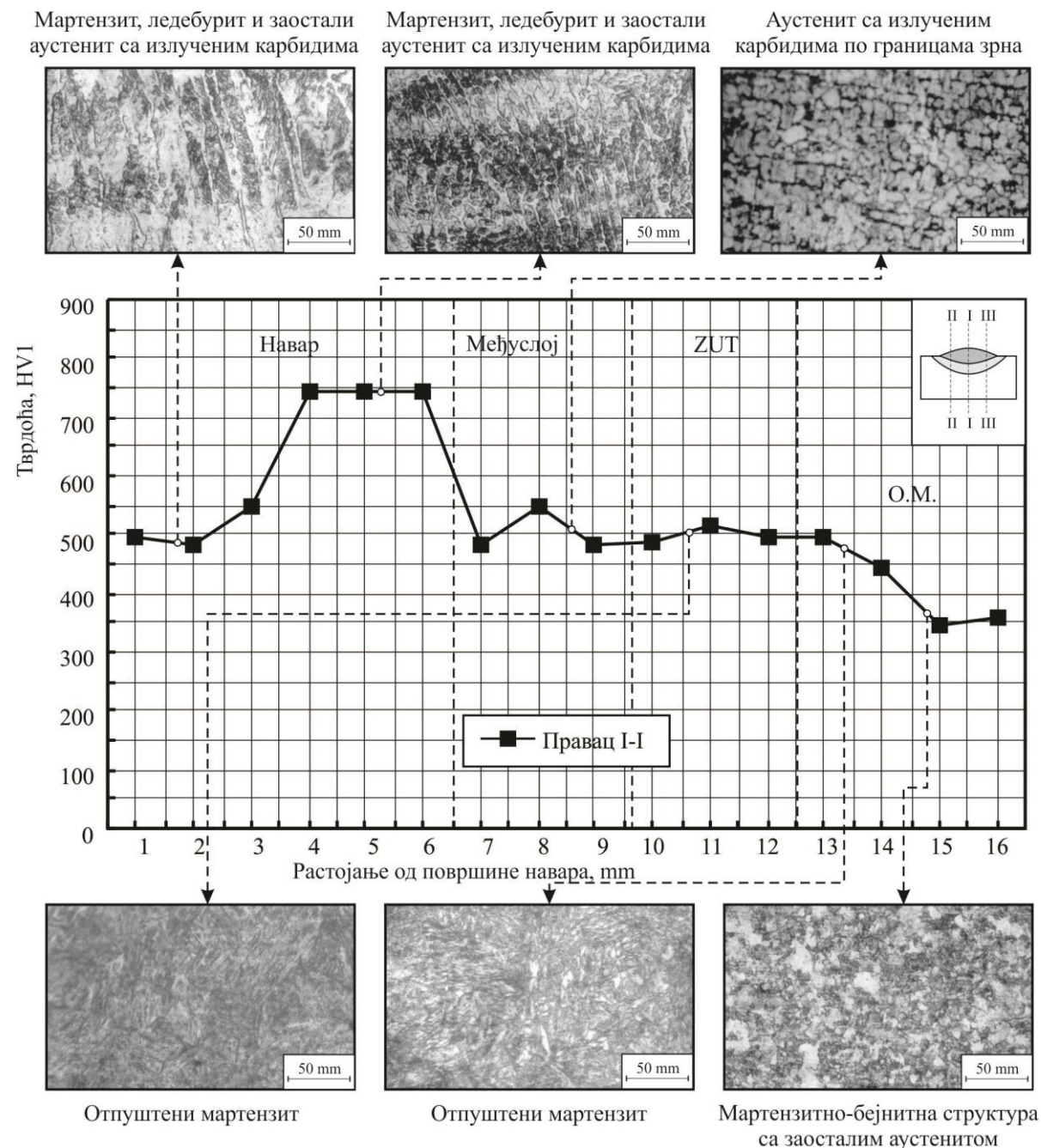


Слика 9.3.15 Распдела тврдоће по пресеку двослојног навара: а) O.M.-Č0363, D.M. наведa - FILTUB DUR 16; б) O.M.-Č0645, D.M. наведa - FILTUB DUR 16

9.3.2.6 Одређивање микроструктуре карактеристичних зона навареног споја

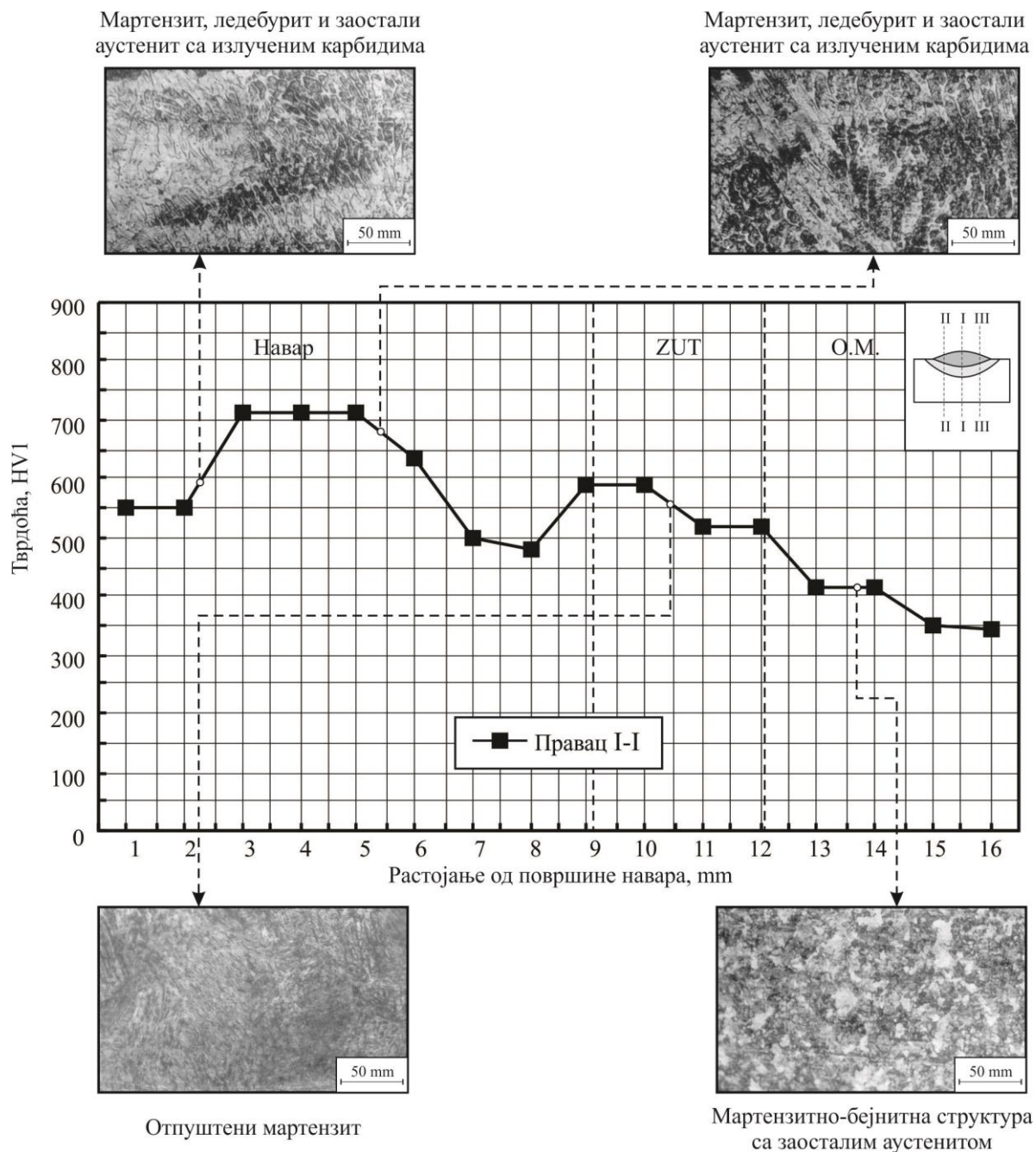
Испитивање микроструктуре изведено је применом електронског микроскопа са могућношћу великог увећања, и до две хиљаде пута, а за оцену микроструктуре коришћена је спектрометријска метода. Оцена микроструктуре појединих зона наварених спојева изведена је по средини наварених спојева од последњег навара па до основног материјала по правцу I-I.

На слици 9.3.16 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом о електроодом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на ČL3134 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено без предгревања наношењем пластичног међуслоја електроодом INOX B 18/8/6 и двослојног навара електроодом ABRADUR 58.



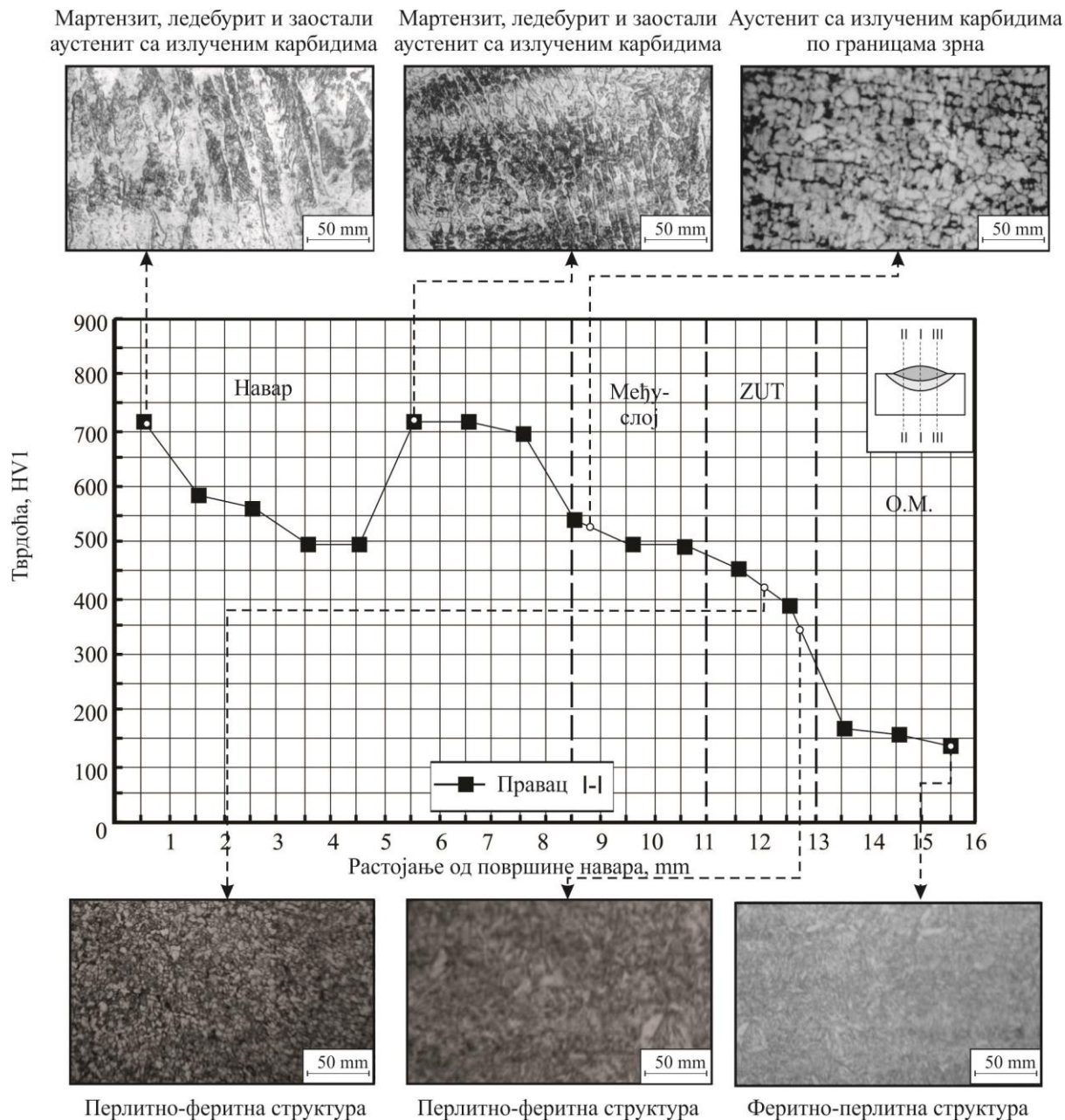
Слика 9.3.16 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – ČL3134 ; D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6; D.M. навара - ABRADUR 58

На слици 9.3.17 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на ČL3134 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 250°C , при чему су нанета два слоја навара електродом ABRADUR 58.



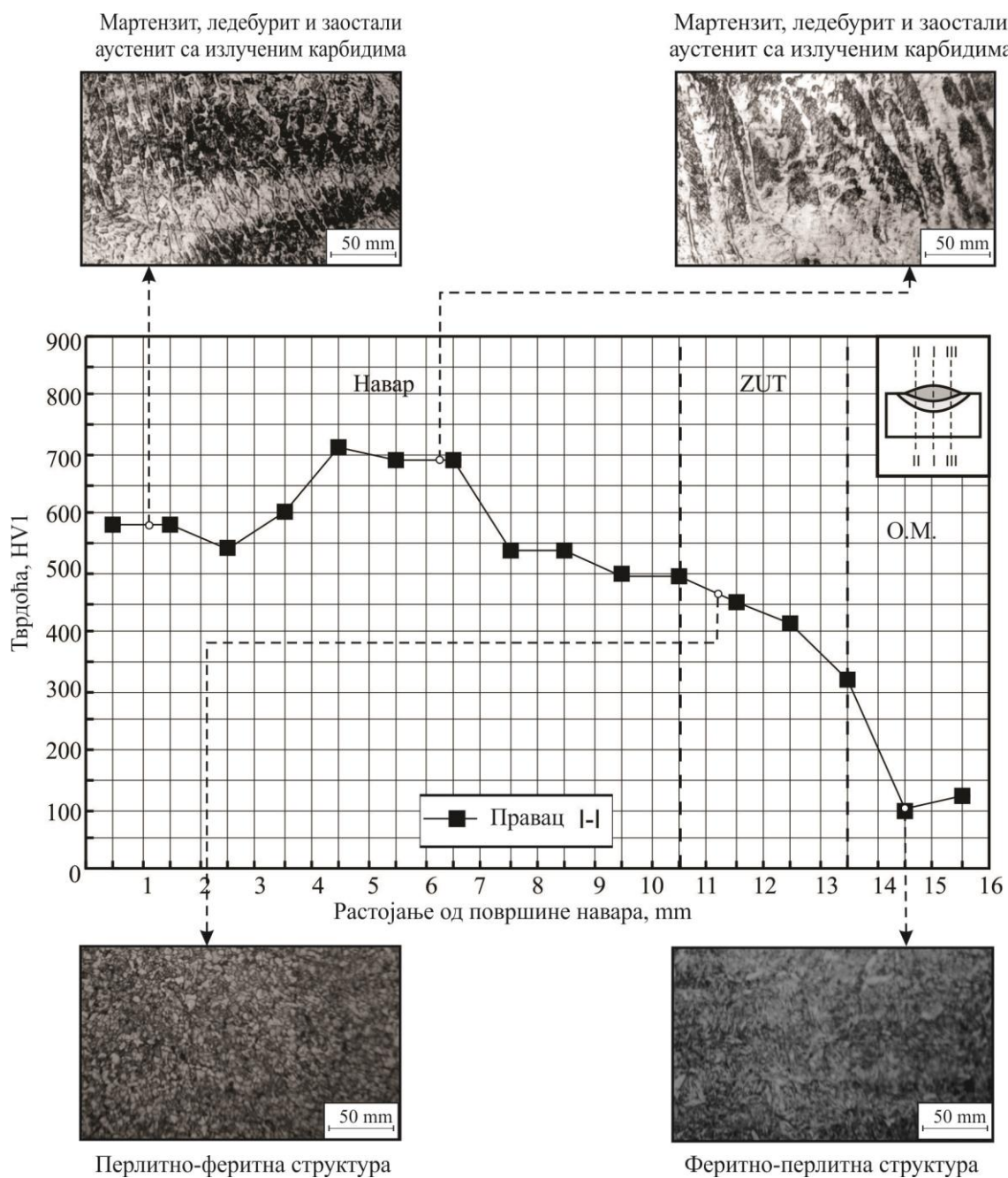
Слика 9.3.17 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – ČL3134; D.M. навара - ABRADUR 58

На слици 9.3.18 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6 и двослојног наvara електродом ABRADUR 58.



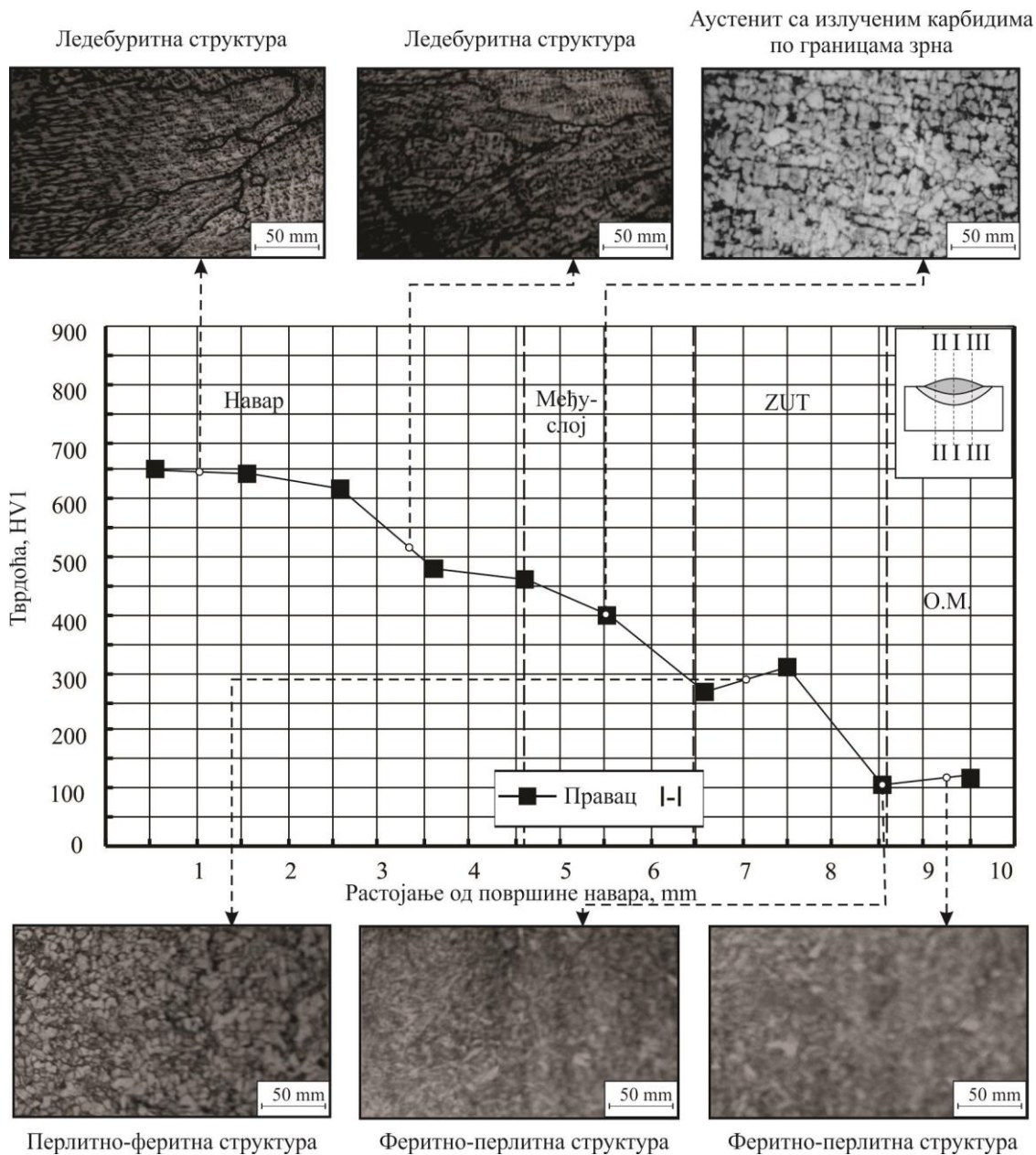
Слика 9.3.18 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – Č363 ; D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6; D.M. наvara - ABRADUR 58

На слици 9.3.19 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{S}0363$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем двослојног навара од електродом ABRADUR 58 без предгревања.



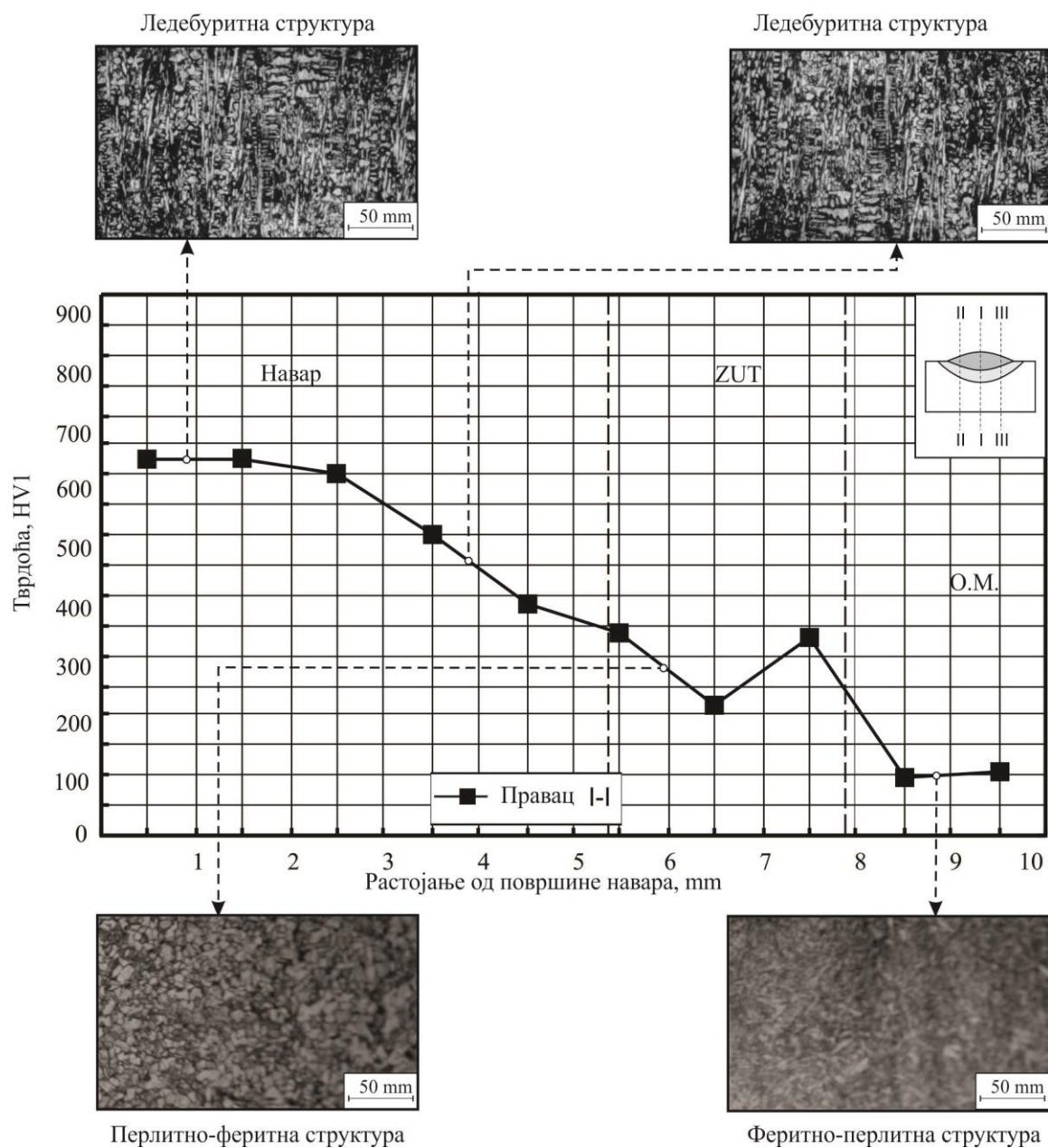
Слика 9.3.19 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – $\check{S}0363$; D.M. навара - ABRADUR 58

На слици 9.3.20 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6 и двослојног навара електродом CrWC 600.



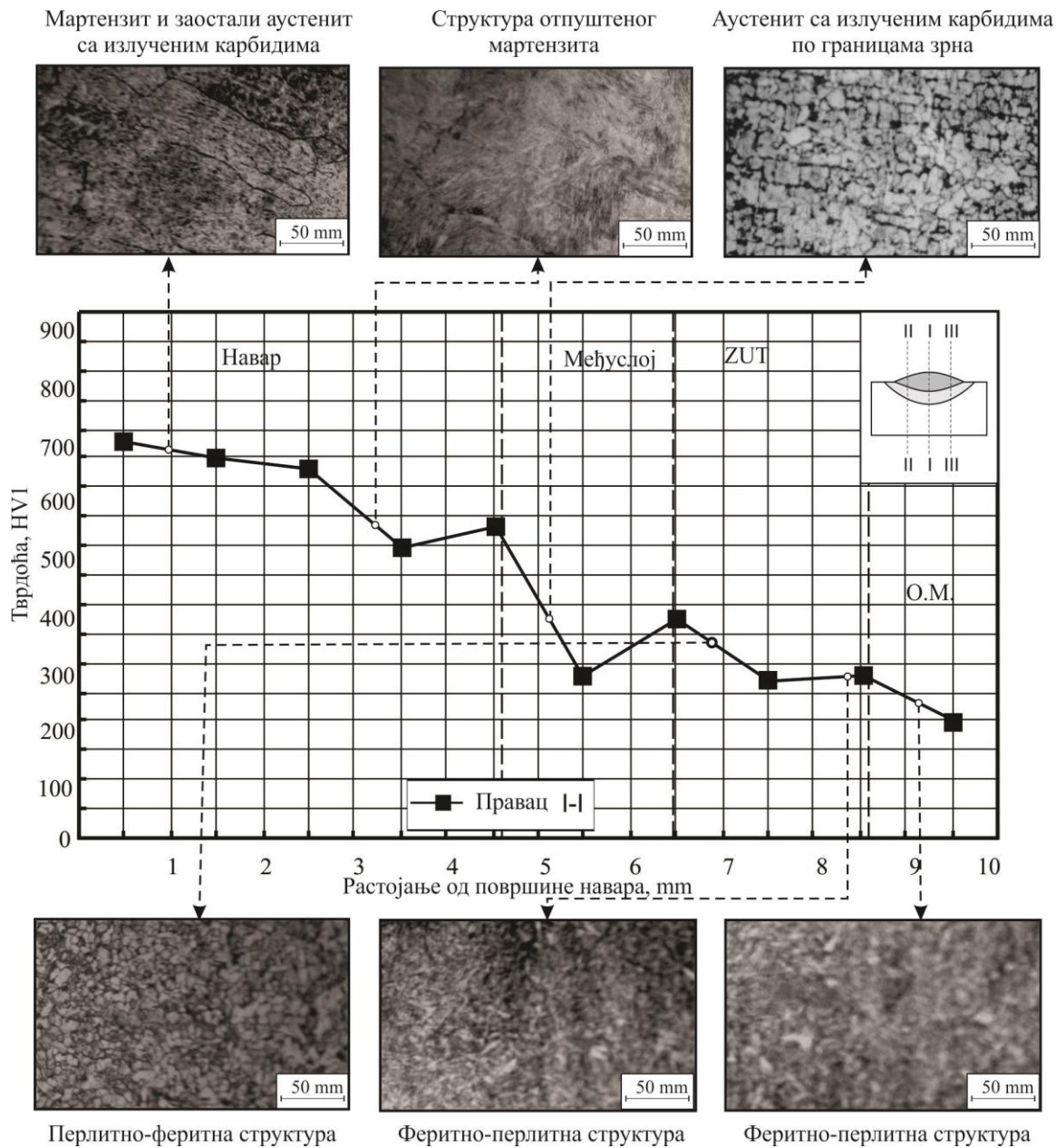
Слика 9.3.20 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – Č0363 ; Д.М. међуслоја - INOX B 18/8/6; Д.М. навара – CrWC 600

На слици 9.3.21 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{C}0363$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем двослојног навара електродом CrWC 600 без предгревања.



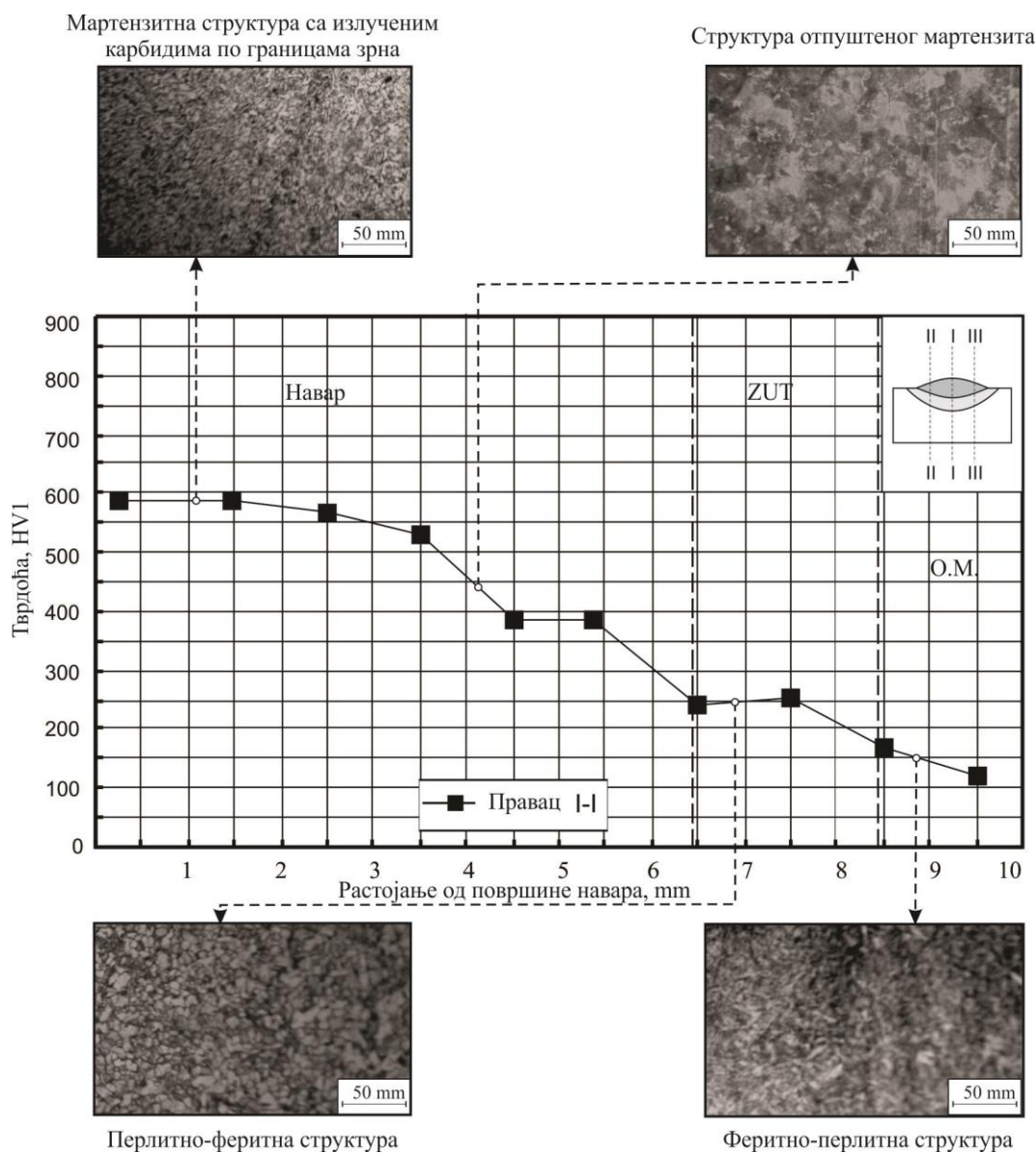
Слика 9.3.21 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – $\check{C}0363$; D.M. навара – CrWC 600

На слици 9.3.22 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем првог пластичног међуслоја електродом INOX В 18/8/6 и двослојног навара електродом E DUR 600.



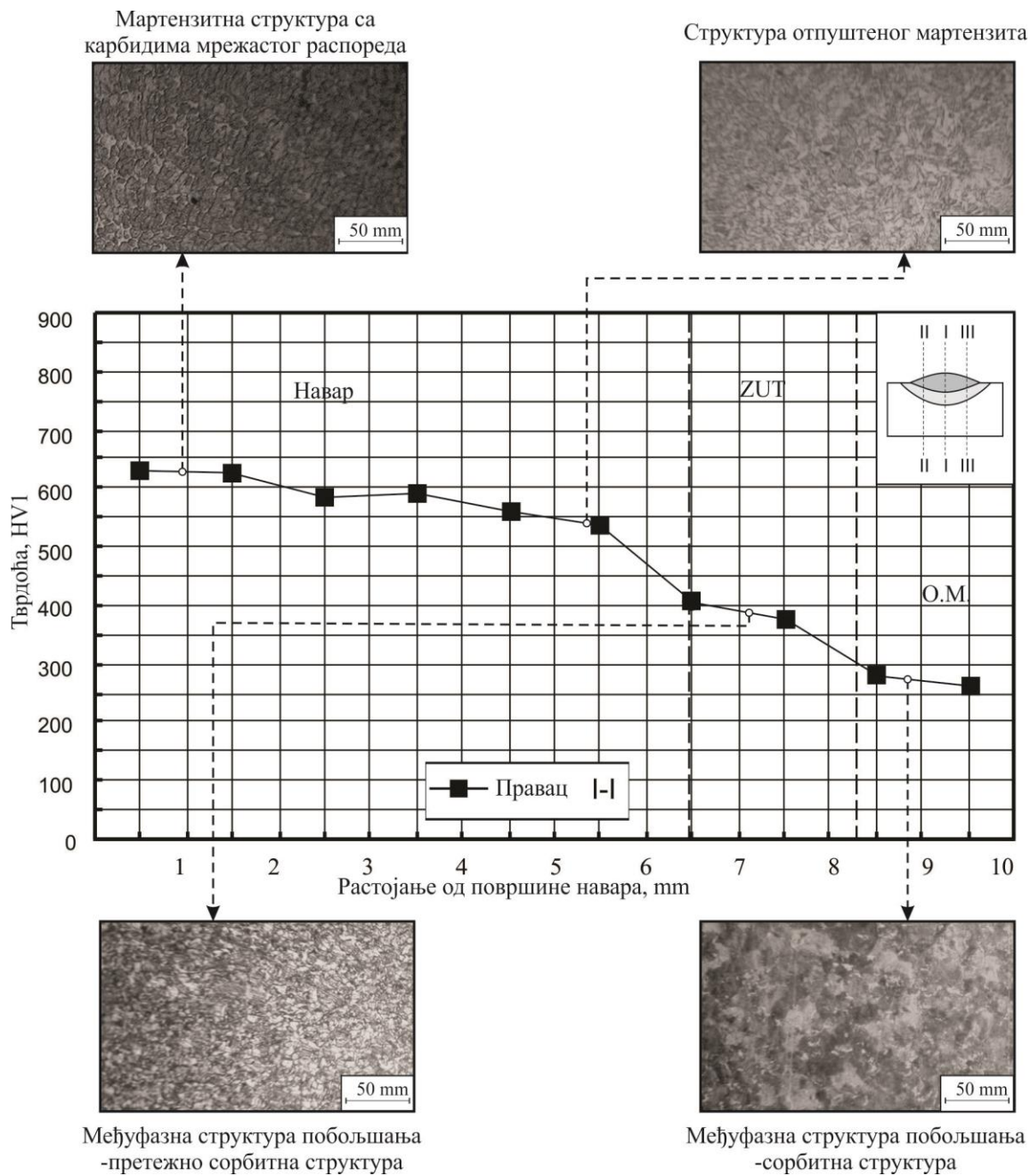
Слика 9.3.22 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – Č0363 ; D.M. међуслоја - INOX В 18/8/6; D.M. навара – E DUR 600

На слици 9.3.23 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на $\check{C}0363$ дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем двослојног навара електродом E DUR 600 без предгревања.



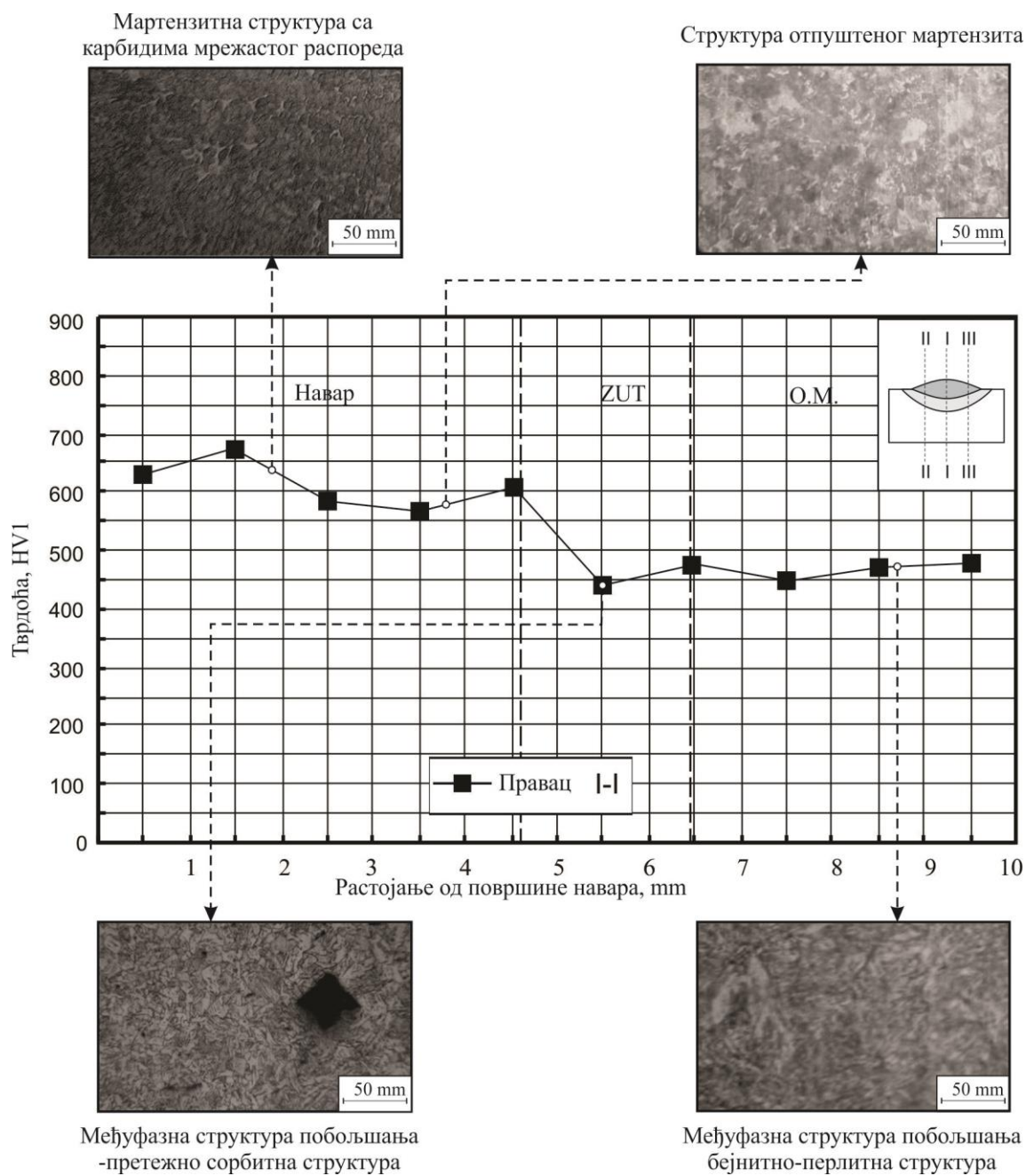
Слика 9.3.23 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – $\check{C}0363$; D.M. навара - E DUR 600

На слици 9.3.24 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č4732 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 300°C наношењем двослојног навара електродом E DUR 600.



Слика 9.3.24 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – Č4732 ; D.M. навара – E DUR 600

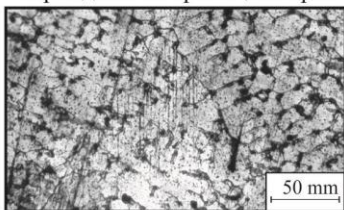
На слици 9.3.25 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č4830 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено после предгревања на 300°C наношењем двослојног навара електродом E DUR 600.



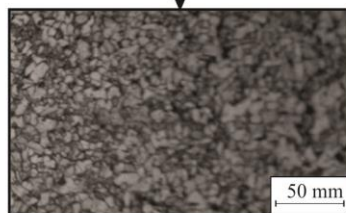
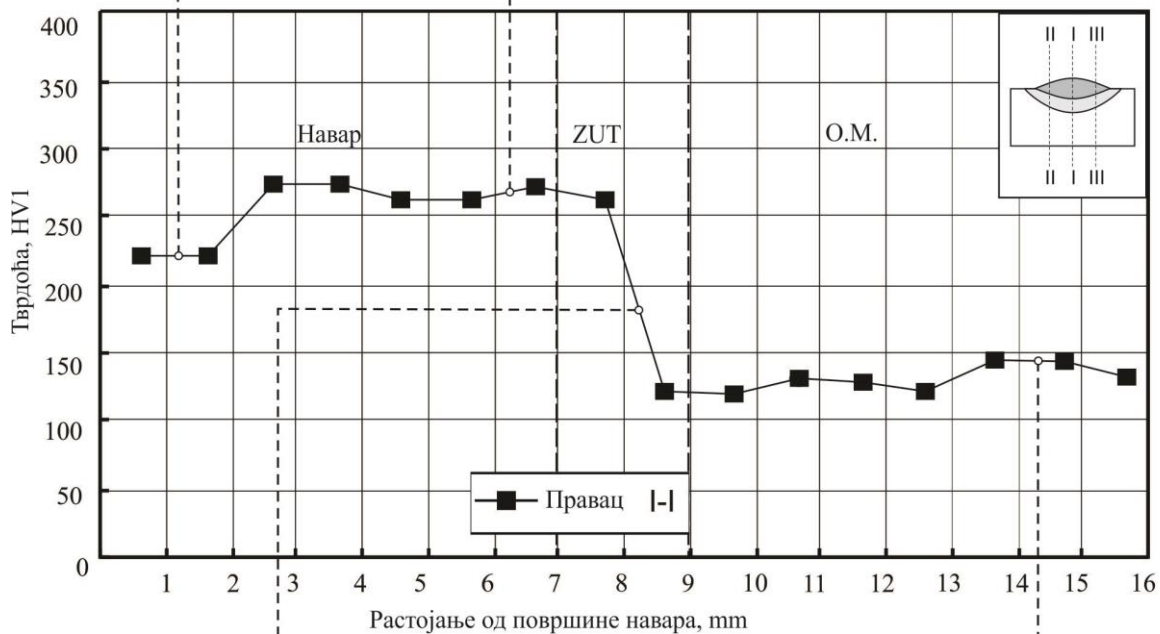
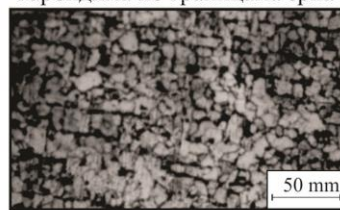
Слика 9.3.25 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – Č4830 ; D.M. навара – E DUR 600

На слици 9.3.26 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено без предгревања наношењем двослојног навара електродом E Mn 14.

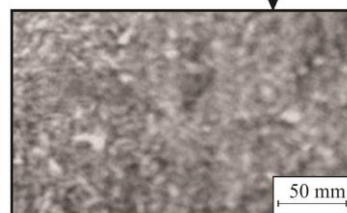
Дендритна аустенитна структура са издвојеним карбидима по границама зрна



Дендритна аустенитна структура са издвојеним карбидима по границама зрна



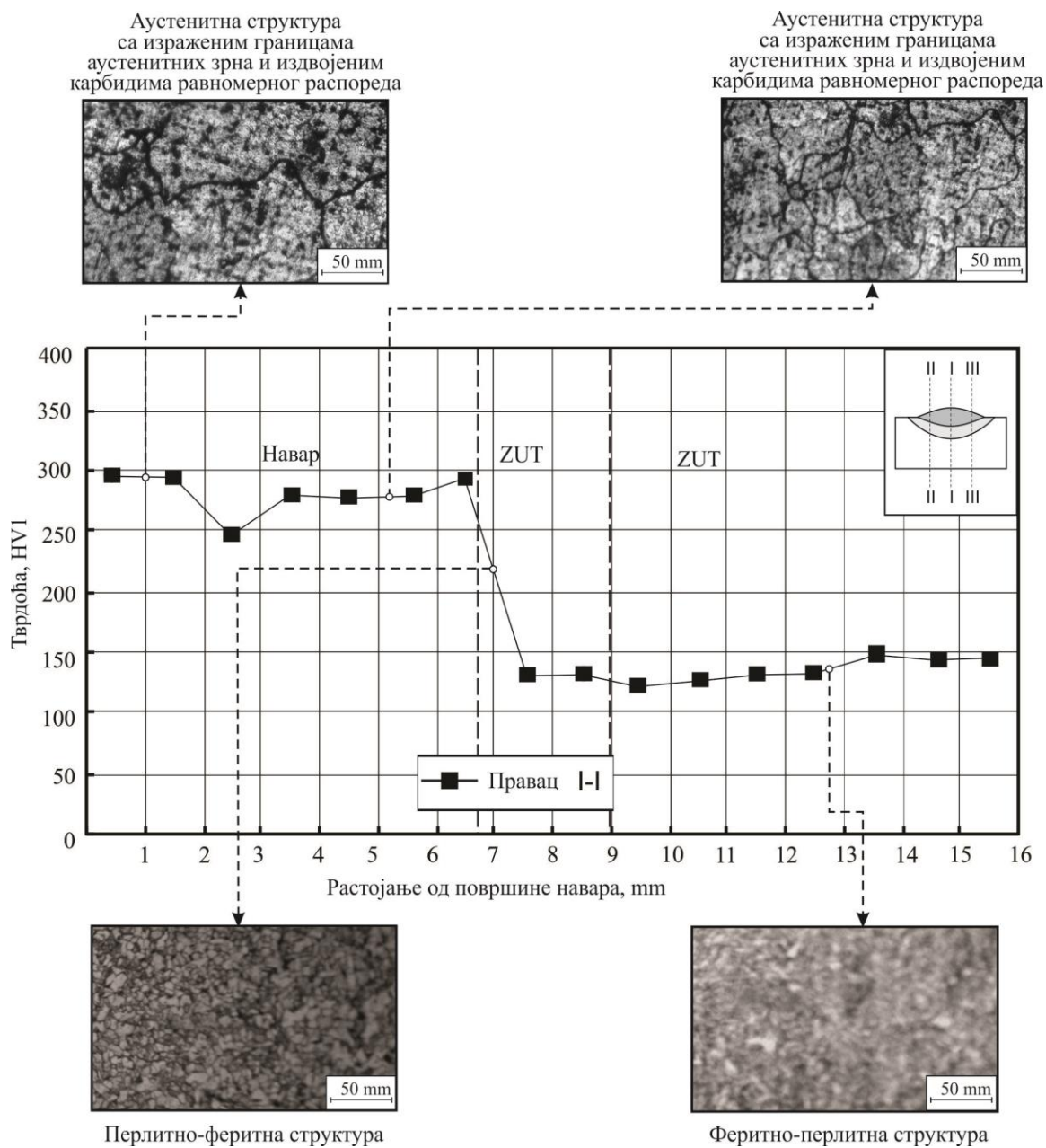
Перлитно-феритна структура



Феритно-перлитна структура

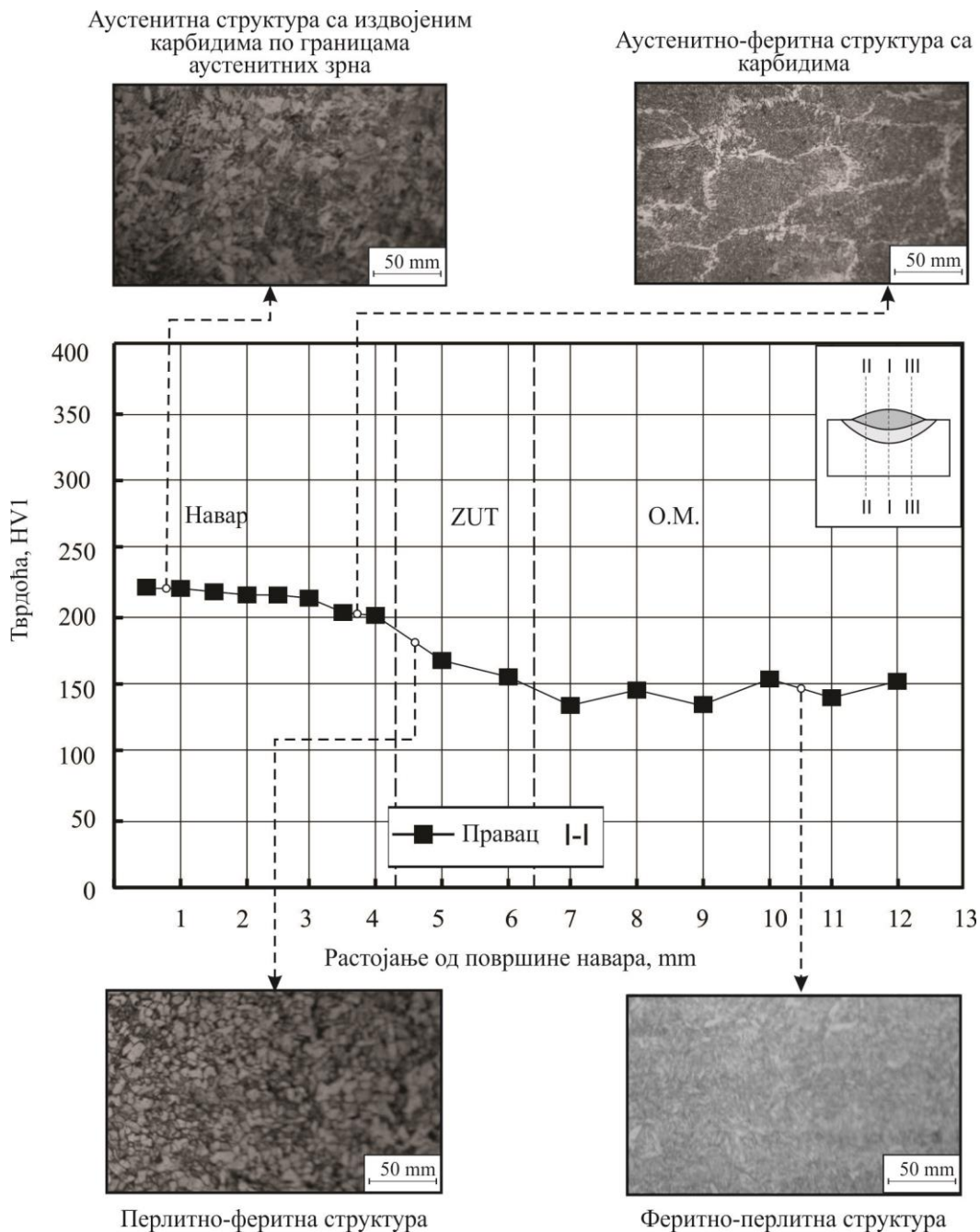
Слика 9.3.26 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – Č0363 ; D.M. навара – E Mn 14

На слици 9.3.27 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног REL-ом електродом пречника $d_e = 3,25 \text{ mm}$ на Š0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено без предгревања наношењем двослојног навара електродом E Mn 17 Cr 13.



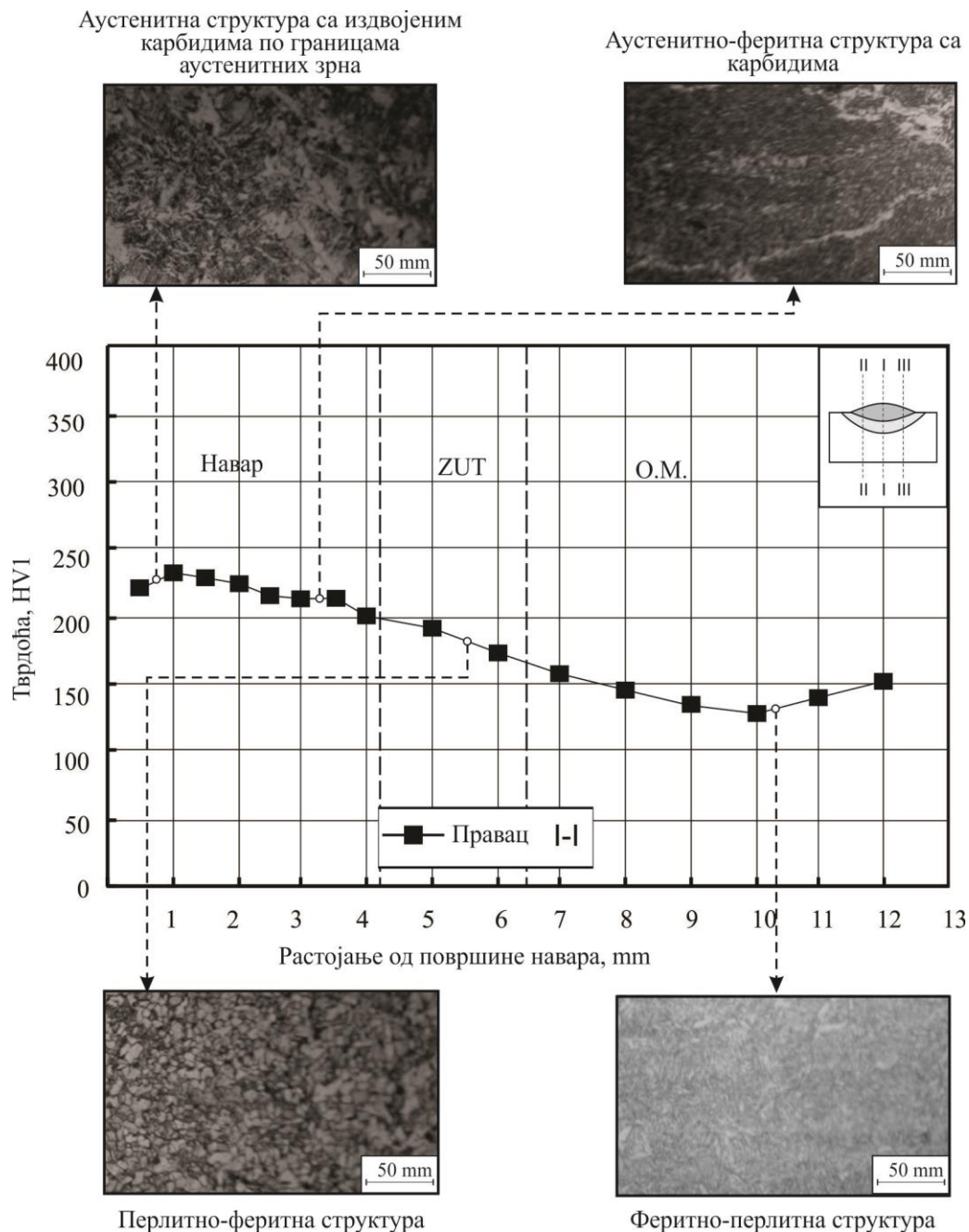
Слика 9.3.27 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – Š0363 ; D.M. навара - E Mn 17 Cr 13

На слици 9.3.28 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем једнослојног навара у једном пролазу пуњеном жицом FILTUB 12 В.



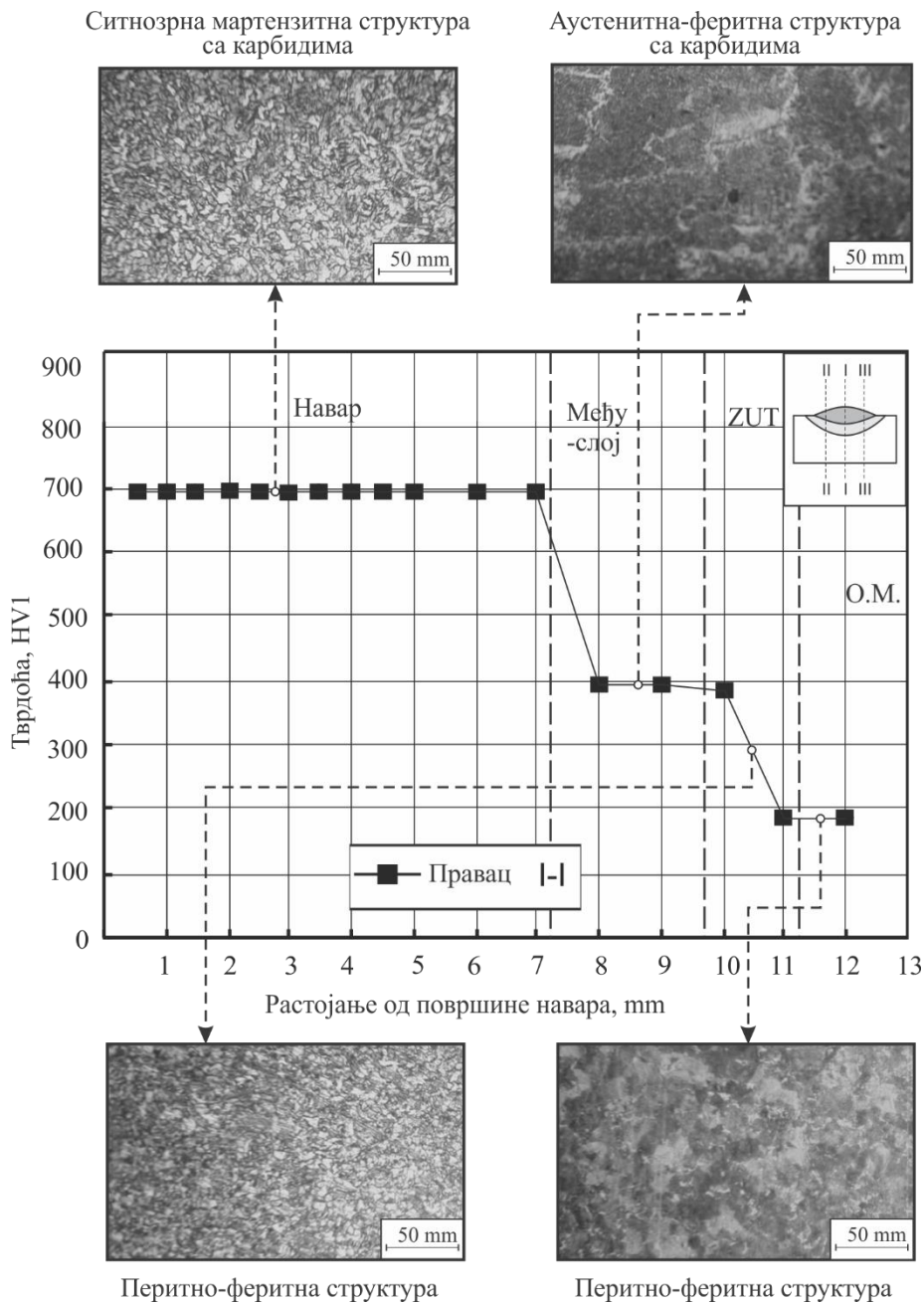
Слика 9.3.28 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – Č0363 ; D.M. навара – FILTUB 12 В

На слици 9.3.29 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Č0363 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем једнослојног навара у три пролаза од пуњеном жицом FILTUB 12 В.



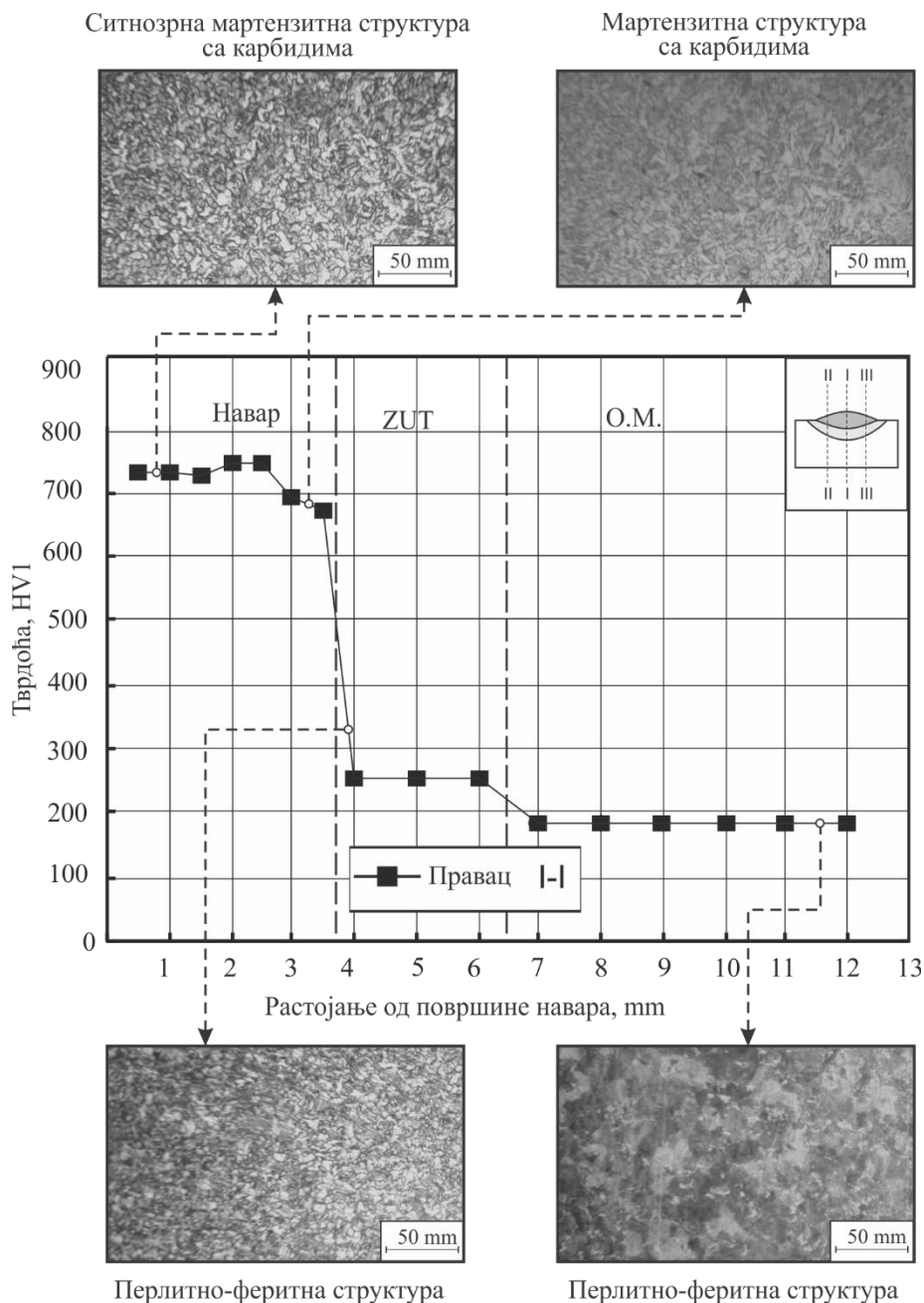
Слика 9.3.29 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – Č0363 ; D.M. навара – FILTUB 12 В

На слици 9.3.30 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Š0645 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено nanoшењем првог пластичног међуслоја пуњеном жицом FILTUB 12 B и двослојног навара пуњеном жицом FILTUB DUR16 .



Слика 9.3.30 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: O.M. – Š0645 ; D.M. међуслоја – FILTUB 12 B ; D.M. навара – FILTUB DUR 16

На слици 9.3.31 приказана је микроструктура карактеристичних зона навареног споја, формираног наваривањем MAG-ом пуњеном жицом пречника $d_z = 1,2 \text{ mm}$ на Š0645 дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Наваривање је изведено наношењем двослојног навара пуњеном жицом FILTUB DUR 16 без предгревања.



Слика 9.3.31 Микроструктура карактеристичних зона навареног споја: О.М. – Š0645 ; D.M. навара - FILTUB DUR 16

9.3.2.в Промене тврдоће и микроструктуре код аустенитних манганских челика

На абразивно хабање *затвореног типа* добру отпорност има аустенитни мангански челик (*Хадфилдгов челик*) који садржи 1,2% C и 13% Mn, а понекад још и 1% Cr. Испоручује се непосредно после пластичне обраде или као одливак. Такође, за ову намену се користи и група аустенитних челика сличног хемијског састава као и *Хадфилдгов челик*, који имају већи напон течења.

Мангански аустенитни челици веома су отпорни према абразивном хабању само у случајевима када се површински слојеви радних делова интензивно деформишу услед високог притиска или под дејством ударног оптерећења. Овде није реч о деформационом ојачању

аустенита, већ о феномену локалне трансформације аустенита у мартензит, која је индукована пластичном деформацијом на хладно. Због тога се ови челици изузетно тешко обрађују резањем.

Навар манганских електрода склон је ка појави прслина, али додатком никла и хрома до око 4% та опасност се умањује. После брзог хлађења са температуре ливење, или пластичне прераде на топло, ови челици задржавају аустенитну структуру са честицама комплексних карбида гвожђа и мангана, излучених по границама аустенитних зрна. При спором хлађењу у структури чистог метала навара појављује се и мартензит. Чисто аустенитна структура високе жилавости добија се растворним жарењем при температури од 1050°C и наглим хлађењем у води (гашењем манганских челика).

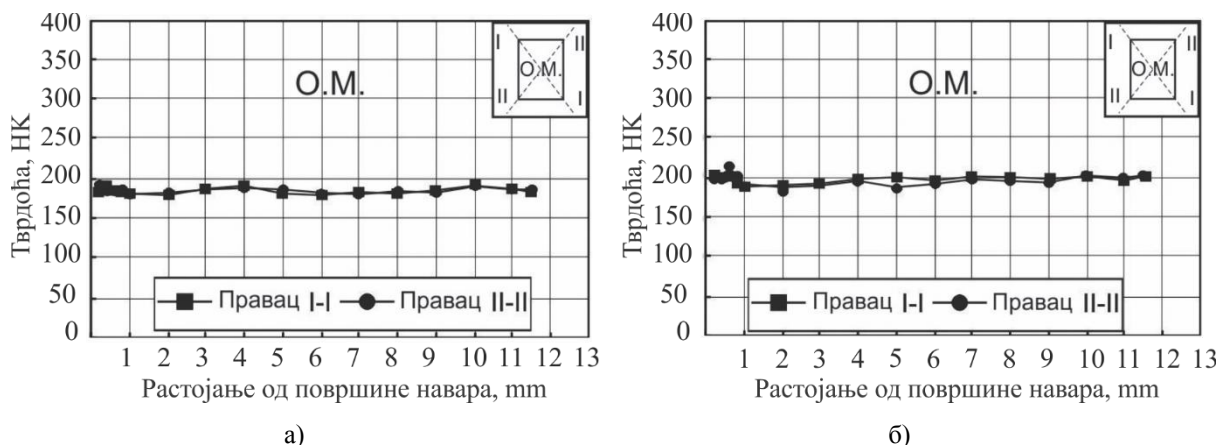
Тврдоћа навара манганских електрода је најчешће 200-220 НВ, али може бити и до 250 НВ, а структура је аустенитна. После локалне трансформације у мартензит постиже се максимална тврдоћа од око 520 НК, углавном у приповршинским слојевима [97,141].

Ако је навар изложен дејству силе притиска на преси од 15-20 kN, или ударном оптерећењу (искивању) може се установити промена микроструктуре и пораст тврдоће у приповршинским слојевима, јер се поред аустенитне појављује и мартензитна структура. И поред присутних тешкоћа при мерењу тврдоће и снимању микроструктуре, успели смо да одредимо ширину трансформисане зоне и снимимо трансформисану структуру (иглице мартензита у аустенитним зрнима). Ови резултати су од посебног значаја при примени аустенитних манганских челика за радне делове грађевинске механизације који раде у условима високих специфичних притисака на радним површинама.

Одређивање тврдоће и микроструктуре, пре и после пластичне деформације на хладно, аустенитних манганских челика, изведено је на припремљеним физичким моделима применом металографске методе. Микроструктура је одређивана слично као у претходним случајевима, а мерење тврдоће је изведено применом Кнупове методе. Ова метода је примењена да би се што прецизније одредила ширина зоне материјала, односно дубина у материјалу, до које је дошло до трансформације аустенитне у мартензитну структуру. За разлику од претходних случајева, мерење тврдоће је изведено на изузетно малим растојањима у два унакрсна правца на металографским узорцима у облику блокова.

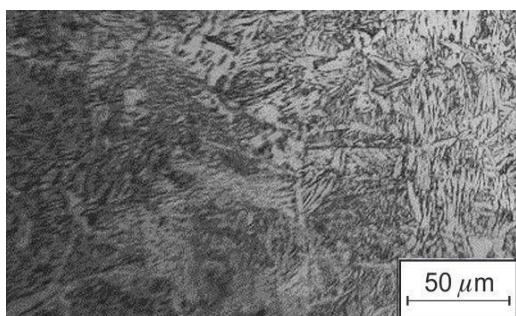
Испитивање тврдоће и микроструктуре, пре и после пластичне деформације на хладно код манганских аустенитних челика изведено је на основним материјалима ČL3160 и ČL3460, као и на металима навара од додатних материјала E Mn 14 и E Mn 17 Cr 13.

На слици 9.3.32 приказана је расподела тврдоће по пресеку узорка пре пластичне деформације на хладно код аустенитних манганских челика ČL3160 и ČL3460.

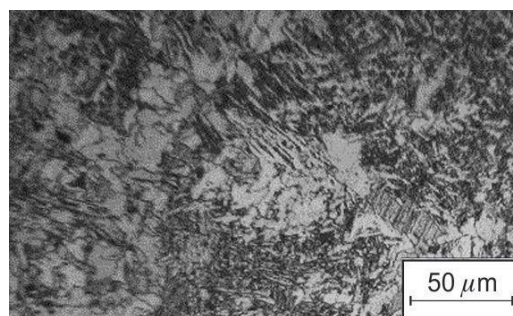


Слика 9.3.32 Расподела тврдоће по пресеку основног материјала пре пластичне деформације:
 а) О.М. - ČL3160; б) О.М. - ČL3460

На слици 9.3.33 приказана је микроструктура пре пластичне деформације на хладно ČL3160 и ČL3460.



Аустенитна структура
а)



Аустенитна структура
б)

Слика 9.3.33 Микроструктура површинског слоја основног материјала пре пластичне деформације:
а) О.М. - ČL3160; б) О.М. - ČL3460

На слици 9.3.34 приказана је расподела тврдоће по пресеку узорка после пластичне деформације на хладно код аустенитних манганских челика ČL3160 и ČL3460.



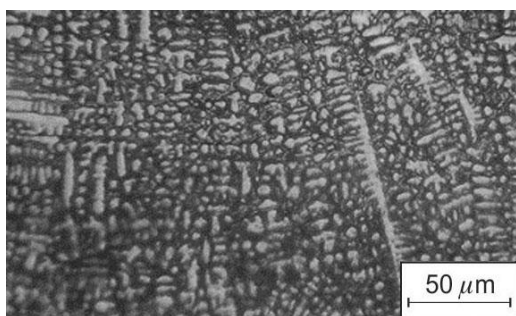
а)



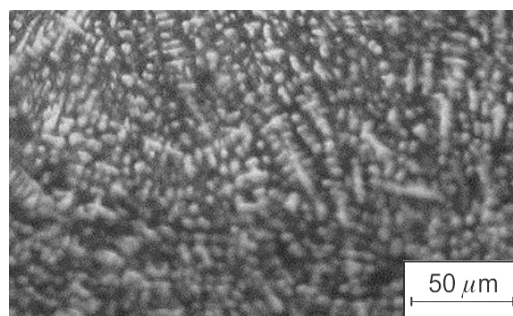
б)

Слика 9.3.34 Расподела тврдоће по пресеку основног материјала после пластичне деформације:
а) О.М. - ČL3160; б) О.М. - ČL3460

На слици 9.3.35 приказана је микроструктура после пластичне деформације на хладно код аустенитних манганских челика ČL3160 и ČL3460.



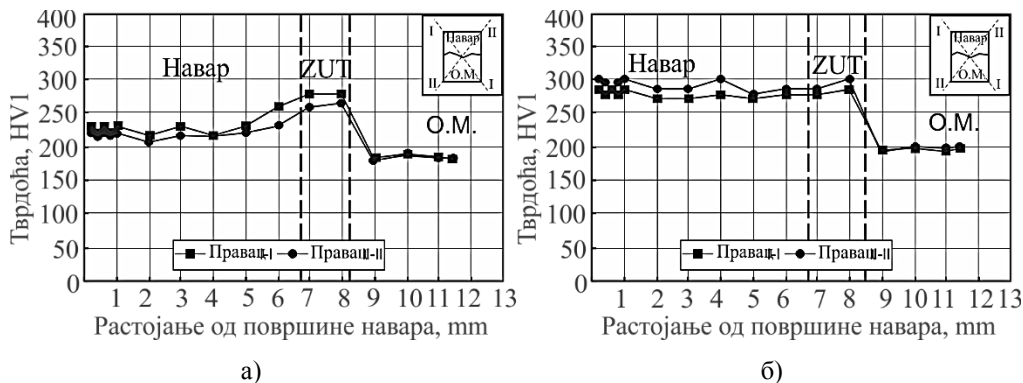
Мартензитна структура
а)



Мартензитна структура
б)

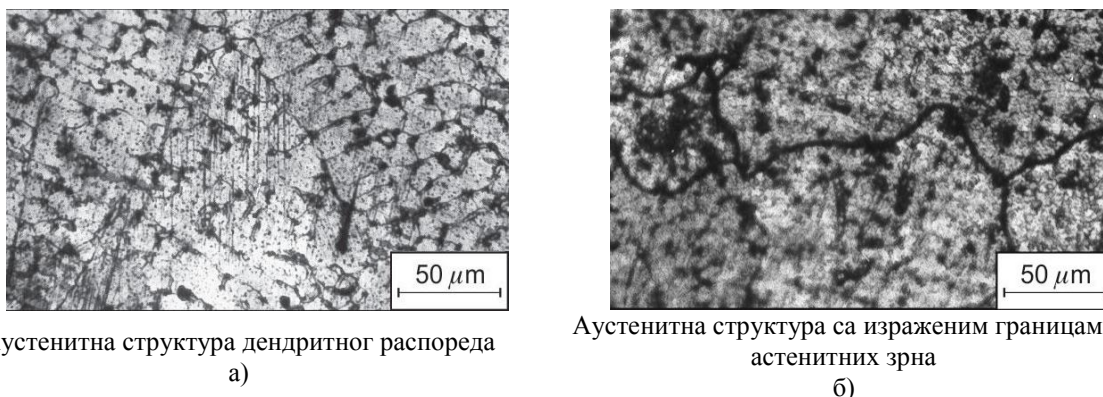
Слика 9.3.35 Микроструктура површинског слоја основног материјала после пластичне деформације:
а) О.М. - ČL3160; б) О.М. - ČL3460

На слици 9.3.36 приказана је расподела тврдоће код навареног споја пре пластичне деформације на хладно, формираног наваривањем двослојног навара REL-ом електродом Е Мп 14 на ČЛ3160 и електродом Е Мп 17 Cr 13 на ČЛ3460.



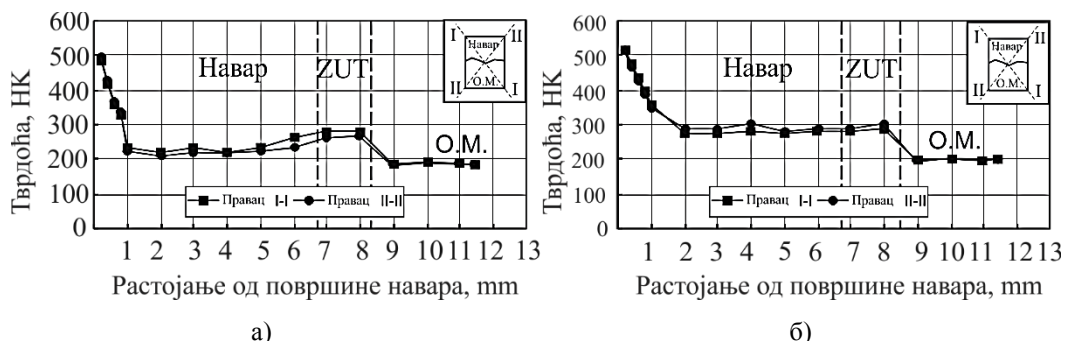
Слика 9.3.36 Расподела тврдоће код двослојног навара пре пластичне деформације: а) О.М. – ČЛ3160, D.M. навара – Е Мп 14; б) О.М. – ČЛ3460, D.M. навара – Е Мп 17 Cr 13

На слици 9.3.37 приказана је микроструктура површинског слоја последњег навара пре пластичне деформације: електрода Е Мп 14 на ČЛ3160 и електрода Е Мп 17 Cr 13 на ČЛ3460.



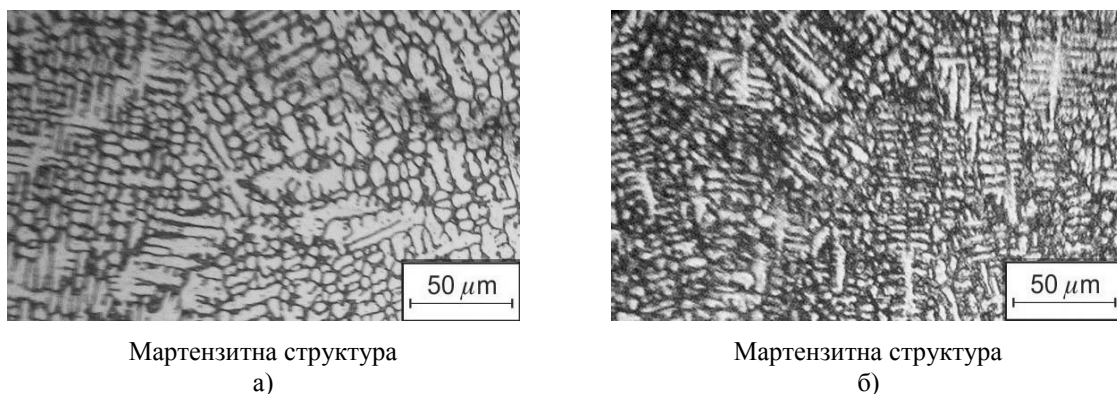
Слика 9.3.37 Микроструктура површинског слоја последњег навара пре пластичне деформације: а) О.М. – ČЛ3160, D.M. навара – Е Мп 14; б) О.М. – ČЛ3460, D.M. навара – Е Мп 17 Cr 13

На слици 9.3.38 приказана је расподела тврдоће код навареног споја после пластичне деформације на хладно, формираног наваривањем двослојног навара REL-ом електродом Е Мп 14 на ČЛ3160 и електродом Е Мп 17 Cr 13 на ČЛ3460.



Слика 9.3.38 Расподела тврдоће код двослојног навара после пластичне деформације: а) О.М. – ČЛ3160, D.M. навара – Е Мп 14; б) О.М. – ČЛ3460, D.M. – Е Мп 17 Cr 13

На слици 9.3.39 приказана је микроструктура површинског слоја последњег навара после пластичне деформације: електрода Е Мн 14 на $\check{C}L3160$ и електрода Е Мн 17 Cr 13 на $\check{C}L3460$.



Слика 9.3.39 Микроструктура површинског слоја последњег навара после пластичне деформације:
а) О.М. – $\check{C}L3160$, D.M. навара – E Mn 14; б) О.М. – $\check{C}L3460$, D.M. – E Mn 17 Cr 13

9.3.3 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА

Сва моделска експериментална истраживања, изведена су на (израђеним) физичким моделима, у лабораторијским условима. Мерење тврдоће појединих зона навара и читавање микроструктуре изведено је на припремљеним металографским избрусцима. Хемијски састав испитиваних материјала одређиван је експериментално спектрографском методом, а тврдоћа применом различитих метода за мерење тврдоће. Механичка својства и хемијски састав за испитиване материјале узимани су из нама доступне литературе укључујући и каталог произвођача.

За израду прве групе физичких модела, углавном су коришћени основни материјали од којих се најчешће израђују радни делови грађевинске механизације, а избор додатних материјала за наваривање је усклађен према радним условима. Израда друге групе физичких модела је изведена наваривањем различитих додатних материјала на исти основни материјал, а циљ је био да се створе услови за поређење својстава наварених спојева формираних у приближно истим условима. За ова истраживања су коришћене две различите технологије наваривања и два метода наваривања. *Прва технологија* наваривања заснива се на наношењу пластичног међуслоја, на основни материјал, па затим полагању одговарајућег броја слојева од испитиваних додатних материјала, без предгревања. *Друга технологија* наваривања је изведена наношењем одговарајућег броја слојева навара од испитиваних додатних материјала на основни материјал применом предгревања, а у неким случајевима и догревањем у току наваривања. Када је реч о додатним материјалима коришћене су по две врсте препоручених материјала из сваке групе радних делова изложених различитим радним условима. Такође, коришћени су за REL наваривање додатни материјали у облику дебелообложених базичних или рутилних електрода, а пуњене електродне жице за MAG наваривање.

Тврдоћа појединих зона навареног споја мерене су по попречном пресеку навара у три правца, као што је приказано на претходним сликама. Мерење је извођено од последњег слоја навара према основном материјалу. При мерењу тврдоће појединих зона навара установљено је да су тврдоће по оси навара нешто ниже од измерених тврдоћа по периферији, а разлог томе је брже хлађење периферних зона од средишне зоне навара. Читавање микроструктуре појединих зона навара изведено је по попречном пресеку навара дуж средишне осе. Том приликом су читане и снимљене микроструктуре појединих зона навара (чистог метала навара, зоне утицаја топлоте и основног материјала) које су настале при формирању навареног споја од различитих врста основног и додатног материјала.

При наваривању основних материјала од угљеничних челика са садржајем угљеника испод 0,25% С нису биле потребне неке додатне мере како би се добио наварени спој захтеваног квалитета, јер је основни материјал добро заварљив. Ово важи и при наношењу различитих додатних материјала, јер најчешће не долази до већег закаљивања материјала у ZUT-у и формирања закаљивих структура. Пораст тврдоће материјала у овој области је у дозвољеним

границама. Микроструктура ових материјала је најчешће перлитно-феритна са мањим или већим учешћем ових фаза. Насупрот томе, при наваривању угљеничних челика са садржајем изнад 0,25% С и легираних челика који у свом саставу имају и карбидотворне легирајуће елементе, неопходна је примена додатних мера како би се побољшала њихова заварљивост, јер они се сврставају у групу условно заварљивих челика. При наваривању ових челика у ZUT-у се добијају продукти каљења, а међуфазне структуре, чија је тврдоћа најчешће изнад дозвољених граница. Бејнитна, ледебуритна и посебно мартензитна структура одликују се високом тврдоћом и нижом жилавошћу, па се процес наваривања мора извести под посебним условима уз примену предгревања и догревања, а често је неопходно извести и неку накнадну термичку обраду (отпуштање, жарење, побољшање). Применом претходне или неке накнадне термичке обраде добијају се повољније међуфазне структуре мање тврдоће, веће жилавости, довољно високе јачине и напона течења, што је праћено смањењем нивоа сопственог напонско-деформацијског стања у материјалу. Потребно је нагласити, да због додатних трошкова при наваривању накнадну термичку обраду, кад год је то могуће, треба избегавати. Експерименталним истраживањима је доказано да је то могуће извести правилним избором параметра наваривања, односно применом оптималне технологије наваривања.

При наваривања и накнадној термичкој обради отпуштања треба водити рачуна да не дође до штетне појаве тзв. *отпусне кртости*, коју карактерише пораст тврдоће и смањење жилавости. Посебан проблем представља појава *неповратне отпусне кртости* када наваривани део практично постаје неупотребљив. Ова појава се јавља код легираних челика, а посебно из групе Cr-Ni или Cr-Mn, који су изузетно склони ка овој штетној појави. При наваривању или отпуштању угљеничних челика најчешће нема опасности од ове појаве, јер се добија тзв. *отпуштени мартензит* која има боља својства од мартензитне структуре.

При ниском отпуштању на температури од 150-250°C, тетрагонални мартензит прелази у кубни, који има нешто бољу пластичност, задржава високу тврдоћу, јачину и напон течења, има и добру отпорност на хабање. Средњим отпуштањем на температури 350-500°C и хлађењем у води у новонасталој структури се појављује труктит, чија јачина и напон течења остају исти, а повећава се граница еластичности, отпорност на релаксацију и динамичка издржљивост. Високим отпуштањем, одмах после каљења, на температури изнад 500°C, а испод критичне температуре A_{C1} , долази до побољшања скоро свих својстава челика, па се ова термичка обрада назива *побољшање*. На овај начин могу се побољшати сва својства код угљеничних челика са садржајем 0,25-0,65% С и неких нисколегираних челика, а сви ови челици се сврставају у групу челика за побољшање. Примарни циљ високог отпуштања челика је да се постигне њихова најбоља пластичност и жилавост. У новонасталој структури се појављује сорбит, који има добру јачину и висок напон течења, а нарочито високу ударну жилавост.

При наваривању аустенитних челика, углавном није потребно примењивати неке посебне додатне мере, јер они имају добру заварљивост и дају наварене спојеве захтеваног квалитета. При наваривању високолегираних аустенитних манганских челика потребно је водити рачуна да не дође до претераног прегревања, услед уноса велике количине топлоте, када долази до пораста аустенитног зрна и погоршања механичких својстава. После брзог хлађења ови челици имају аустенитну структуру са честицама комплексних карбида гвожђа и мангана излучених по границама аустенитних зрна. После спорог хлађења у аустенитној структури појављује се мартензит. Тврдоћа ових челика је најчешће око 200 НВ, а при њиховом наваривању тврдоћа у ZUT-у се повећава, али остаје у дозвољеним границама. Побољшање својстава аустенитних манганских челика се постиже загревањем на температури растворног жарења од 1050°C и наглим хлађењем у води тзв. *гашењем*, при чему се добија чисто аустенитна структура тврдоће око 220 НВ. Навари од аустенитних манганских додатних материјала склони су ка појави прслина, а овај проблем се решава ако им се дода нешто никла и хрома.

Мангански аустенитни челици су веома отпорни према абразивном хабању само у случају када се створе услови за појаву високих специфичних притисака на контактним површинама услед ударног или мирног оптерећења. Овде није реч о деформационом ојачању аустенита, већ о локалној трансформацији аустенита у мартензит индукованој пластичном деформацијом на хладно. То је разлог што се ови материјали изузетно тешко обрађују резањем, јер је трансформисана структура аустенитно-мартензитна доста високе тврдоће. Поред

присутних тешкоћа при мерењу тврдоће, читавању и снимању микроструктуре, код више материјала ове врсте је уочена трансформисана структура игличастог мартензита у аустенитном зрну. Дошло је до великог повећања тврдоће код трансформисаног у односу на непромењени материјал и само до одређене дубине трансформисане зоне.

При овим истраживањима установљено је да се мора нанети пластични међуслој помоћу додатних материјала који дају аустениту, феритну или аустенитно-феритну структуру. На тврдоћу формираних навара не утичу само својства додатних материјала, већ и својства основних материјала, јер при наваривању долази до њиховог мешања и дифузије хемијских елемената из основног материјала у материјал навара. Метал навара често има другачија својства од прописаних. Чист метал навара добија се тек после другог или трећег пролаза, а изузетно ретко већ после првог пролаза.

Значај наношења пластичног међуслоја огледа се првенствено у томе што се побољшава заварљивост основног материјала, и што омогућава спајање чак и међусобно незаварљивих материјала. Смањује се ниво сопствених напона, који се неизбежно јављају при наваривању, а често се избегава претходна термичка обрада. Постиже се да наварени спојеви добијају захтевани квалитет у мањем броју пролаза и др. Исто тако, при овим испитивањима утврђено је да сваки наредни нанети слој навара доводи до отпуштања материјала претходног слоја, што доводи до смањења његове тврдоће и образовања повољније структуре. Последњи нанети слој навара има највећу тврдоћу, па се када је то неопходно, површински део материјала последњег слоја навара одстрањује брушењем или неком другом машинском обрадом, што зависи од његове тврдоће. На овај начин се добија контактна површина навареног дела бољих својстава, без евентуалних површинских прслина и великих заосталих напона. У том смислу, корисно делује и искивање навара, када се довољно охлади да се може додирнути голом руком.

После ових обимних експерименталних испитивања механичких и металографских својстава наварених спојева, формираних од различитих врста основних и додатних материјала, са два начина наваривања и две различите технологије, може се закључити да на квалитет једног навареног споја утиче више различитих фактора. Међутим, на квалитет неког навареног споја највише утиче примена технологија наваривања. Наиме варирањем процесних параметара наваривања, при истим осталим условима, могу се добити наварени спојеви различитих квалитета. Моделирањем процеса наваривања стварају се услови за процесну контролу, и гарантује добијање наварених спојева захтеваног квалитета. Само прописивање и примена оптималне технологије наваривања гарантује успешно наваривање, јер је овде најчешће реч о спајању материјала дијаметрално различитих физичко-хемијских својстава, што се може видети и из ових истраживања.

Овако обимна металографска испитивања материјала наварених спојева, било је неопходно извести да би се на основу добијених резултата могло доћи до оптималне технологије, односно *моделирати процес наваривања* радних делова грађевинске механизације.

9.4 ТРИБОЛОШКА ИСПИТИВАЊА МАТЕРИЈАЛА НАВАРЕНИХ СПОЈЕВА НА ФИЗИЧКИМ МОДЕЛИМА

На триболошке процесе утиче већи број различитих фактора који се могу разврстати на: *геометријске, кинематски, динамичке, физичко-хемијске и енергетске* [14,162,181].

Поред различитих својстава материјала спрегнутих делова, на њихову отпорност према процесима хабања, значајно утичу тврдоћа контактних површина, процес подмазивања и утицај околне средине. Сматра се да материјали веће тврдоће имају и већу отпорност према процесима хабања, али то није увек тако. Неки материјали мање тврдоће могу имати већу отпорност према неким врстама хабања од материјала веће тврдоће. Тако на пример, лежајне бронзе, полимери, аустенитни мангански челици и неки други материјали имају изузетно добру отпорност према неким врстама хабања.

Околна средина има велики утицај на настанак и развој процеса хабања, јер због хемијских реакција може доћи до стварања хемијских једињења различитих физичко-хемијских својстава, која иницирају хабање и његово интензивирање. Карактеристичан пример је утицај

оксида велике тврдоће на процес хабања. Дејством оксида на контактним површинама могу настати два случаја. Када се формира фини, непорозан и компактан оксидни слој, он делује као средство за подмазивање, све док не дође до његовог разарања, па честице оксида делују као абразив. За случај формирања грубог, порозног и некомпактног оксидног слоја, одмах долази до одвајања абразивних оксидних честица које интензивирају процес хабања.

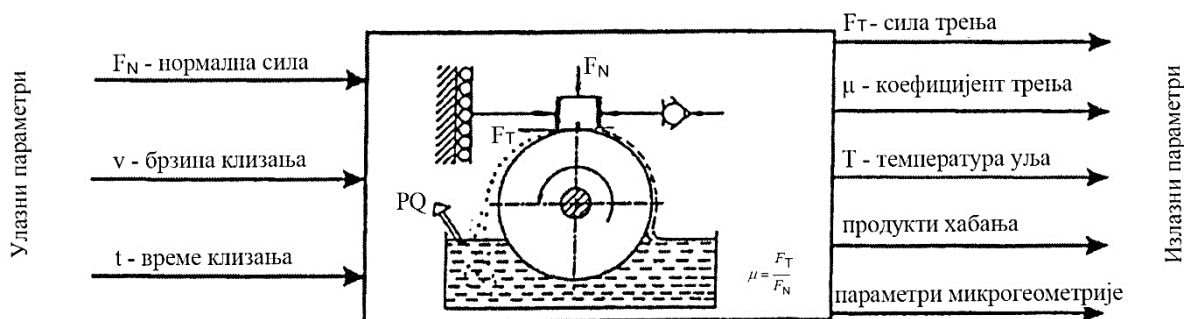
Подмазивање директно утиче на процес трења и интензитет хабања. Средства за подмазивање имају улогу да добрим квашењем контактних површина смање трење, као и да сниже температуру на додирним површинама, односно одведу топлоту и абразивне честице из контактне зоне, чиме се смањује интензитет трења, а самим тим и интензитет хабања. Код затворених трибо-техничких система мазиво спречава контакт са околном средином, и смањује њен утицај на физичко-хемијске процесе, који се одвијају у контактної зони. Посебно значајан утицај на физичко-хемијских процеса у контактної зони спрегнутих елемената трибо-техничког система имају тзв. *лубрикатори* који се додају средствима за подмазивање, да би се спречила њихова разградња (деградација). Због утицаја хемијских процеса у трибо-техничком систему и стварања хемијских једињења, која утичу на триболошке процесе (контактни процеси, трење, подмазивање и хабање), у новије време се у литератури може наћи израз *хемијско трење*, односно *процес хемијског хабања*.

При наваривању различитих радних делова грађевинске механизације, морају се узети у обзир бројни фактори, који утичу на образовање кристалне грађе навара. Избор додатног материјала и методе наваривања, као и технологије наваривања директно утичу на микроструктуру, а самим тим и на триболошка својства навара. Отпорност радних површина делова грађевинске механизације према различитим врстама хабања, корозије и кртом лому, директно утиче на њихов радни век, искоришћење капацитета и степен поузданости.

Триболошка својства материјала навареног споја одређују се на основу различитих параметара, који се разврставају на улазне и излазне. *Улазни параметри* триболошког процеса су: нормална сила од спољашњег оптерећења, брзина клизања и време клизања. *Излазни параметри* триболошког процеса су: сила трења, коефицијент трења, температура средства за подмазивање, продукти хабања и параметри микрогеометрије.

Потребно је истаћи, да је за испитивање триболошких процеса развијена и тзв. радиоактивна метода, која је заснована на мерењу величине радиоактивности пре и после испитивања отпорности на хабање различитих материјала, а интензитет хабања се одређује мерењем смањења радиоактивности испитиваног узорка, или мерењем повећања радиоактивности продукта хабања. Ова метода је развијена у Русији, а доста је коришћена при истраживањима из ове области на Машинском факултету у Крагујевцу.

На слици 9.4.1 приказана је схема једног трибомеханичког система са могућим улазним и излазним параметрима триболошког процеса.



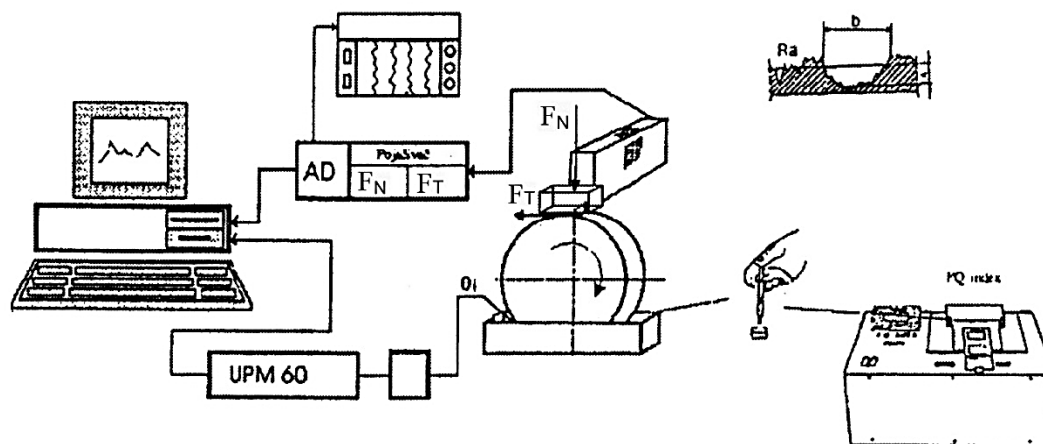
Слика 9.4.1 Трибо-механички систем са могућим улазним и излазним параметрима триболошког процеса [97,141]

9.4.1 МЕРНА И РАЧУНАРСКА ОПРЕМА

За извођење експерименталних истраживања триболошких процеса коришћена је следећа мерна и рачунарска опрема: трибометар TPD-93, РС рачунар 486 LS, четвороканални писач

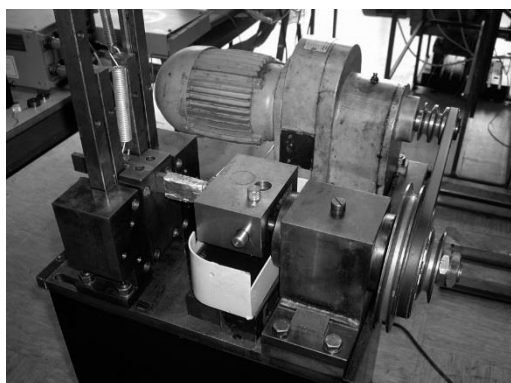
RIKADENKI R-54, термопар 2 АВ АС 15 PHILIPS, Хотингеров мерни мост IBM KWS 3073, софтвер Labtech notebook ver. 7.1.1, динамометар са мерним тракама, UPM-60 појачивачки систем са AD конверзијом, универзални алатни микроскоп UIM-21 и уређај за мерење храпавости TALYSARF 6.

На слици 9.4.2 приказан је начин повезивања коришћене мерне и рачунарске опреме за ова испитивања.



Слика 9.4.2 Схематски приказ мерне и рачунарске опреме за триболошка испитивања [97,141]

- **Трибометар TPD-93** (сл. 9.4.3), развијен је у Центру за ревитализацију индустријских техничких система на Машинском факултету у Крагујевцу. Конструисан је за испитивање триболошких својстава различитих материјала. Омогућава остваривање контакта спрегнутих парова у тачки, по линији и по површини. Могућа су испитивања са средством за подмазивање или без њега. Различити начини остваривања контакта спрегнутих парова добијају се израдом и коришћењем физичких модела различите геометрије (пин-диск, блок-диск, диск-диск).



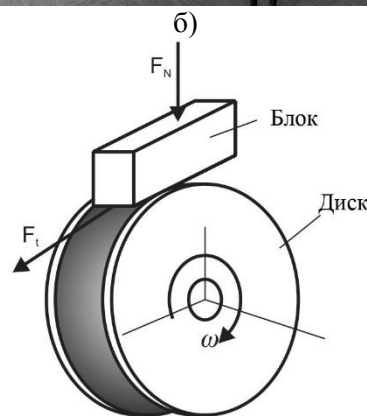
а)



б)



в)



г)

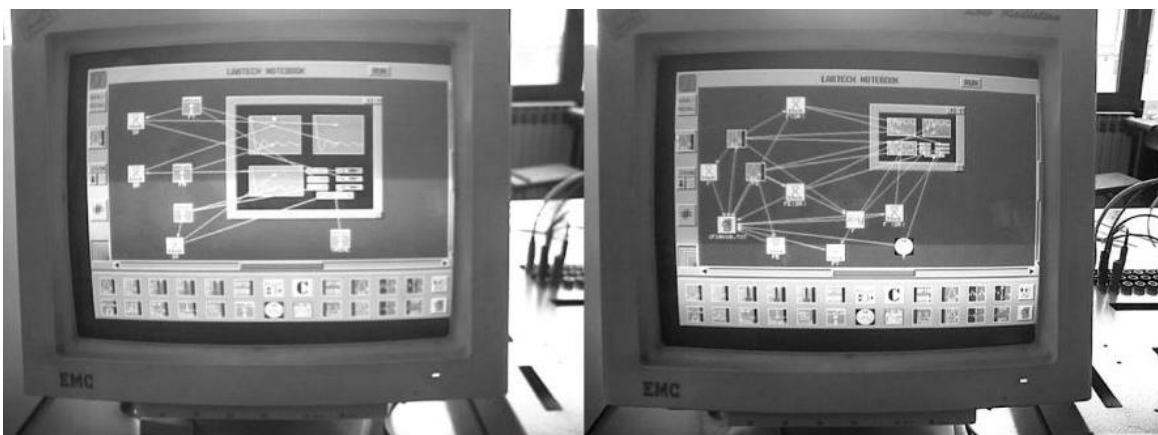
Слика 9.4.3 Трибометар TPD-93: а) изглед трибометра, б) мерна и рачунарска опрема, в) изглед простора где се остварује контакт, г) схема остваривања контакта блок-диск [141]

На трибометру TPD-93, који је коришћен за ова триболошка испитивања, изведена је реконструкција уређаја за прихватање испитиваних физичких модела (узорака), чиме је постигнуто боље и тачније позиционирање пинова, блокова и дискова, као и добра стабилност комплетног система при извођењу испитивања. Такође, уграђен је Хотингеров мерни мост IBM KWS 3073 са појачивачем сигнала и конвертором, а инсталиран је и нов софтвер Labtech notebook ver. 7.1.1, па овако реконструисан трибометар омогућава да резултати триболошких испитивања имају висок степен поузданости.

Димензије физичких модела који се могу испитивати на трибометру TPD-93 су: пин-пречника $d = 8-12 \text{ mm}$ и дужине $l = 25-35 \text{ mm}$; диск-пречника $D = 20-80 \text{ mm}$ и дебљине $s = 8-12 \text{ mm}$; блок-димензија $a = 5-10 \text{ mm}$, $b = 10-20 \text{ mm}$, $c = 10-50 \text{ mm}$. Брзина клизања може се бирати у границама $v_{kl} = 0,1-5 \text{ m/s}$, а величина нормалне силе $F_N = 0,1-1000 \text{ N}$. Димензије трибометра су $600 \times 450 \times 400 \text{ mm}$; маса око 100 kg ; погонска снага мотора $P = 1,5 \text{ kW}$, и има могућност регулисања броја обртаја n преко одговарајућег каишног преносника са клинастим каишевима, тако да се могу добити различити бројеви обртаја диска, а самим тим и различите брзине клизања.

- **Хотингеров мерни мост IBM KWS 3073**, појачивач сигнала UPM-60, РС рачунар 486 LS, четвороканални писач RIKADENKI R-54 уз помоћ софтвера Labtech notebook ver. 7.1.1, омогућавају мерење нормалне силе F_N , силе трења F_T и коефицијента трења μ , њихово регистровање и снимање на хард-диску рачунара са учесталости од сто тачака у једној секунди.

Одговарајуће апликације уређаја помоћу софтвера Labtech notebook ver. 7.1.1 приказане су на сликама 9.4.4. и 9.4.5.



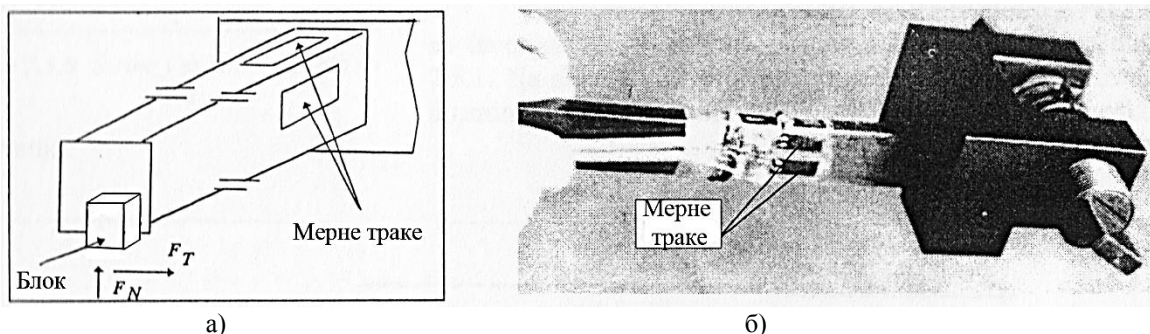
Слика 9.4.4 Изглед прозора апликације Labtech notebook ver. 7.1.1 [97]



Слика 9.4.5 Промена параметара хабања за време испитивања [141]

- **Динамометар** у облику полуге са мерним тракама, које су повезане у пун мост (сл. 9.4.6) служи за мерење нормалне силе од оптерећења F_N и силе трења F_T . Сигнал нормалне силе F_N и силе трења F_T са динамометра, преко мостног појачивача типа TRC SGA-DC/6 и AD конвертера типа TRC A/D 8CH/12B, уводи у рачунар и снима на хард-диску рачунара. Појачивач TRC SGA-DC/6 ради са шестожилном везом, односно додатним електричним водовима, који компензују

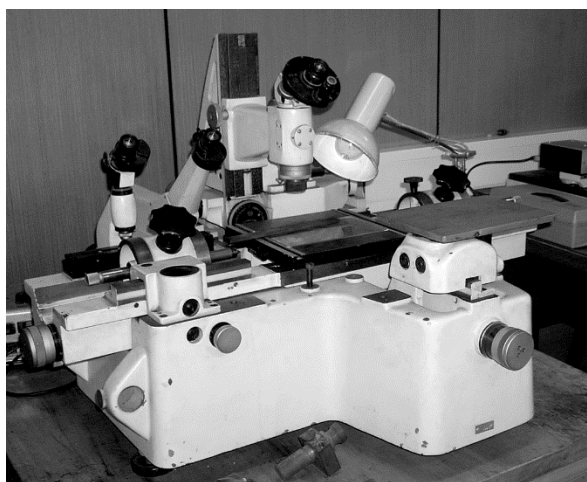
утицај дужине и отпора у кабловима. Грубо подешавање осетљивости појачивача и нултог положаја изводи се екстерним отпорницима, а фино подешавање изводи се помоћу прецизних десетообртних потенциометара, постављеним на предњој плочи уређаја. Појачивач је уграђен у стандардно кућиште које је предвиђено за монтажу на DIN-шине.



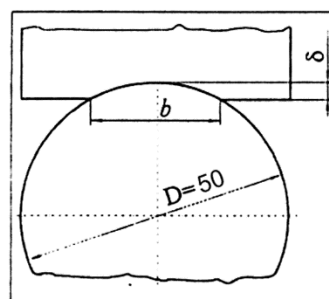
Слика 9.4.6 Динамометар са полупроводничким мерним тракама: а) схема динамометра б) изглед динамометра [97,141]

- **Аналогно дигитални конвертер**, типа TRC A/D 8CH/12В, намењен је за повезивање аналогних сигнала, који представљају процесне величине, са РС-рачунаром или контролером фирме TRC из Новог Сада. Конвертор типа TRC A/D 8CH/12В има осам улазних канала са опсегом 0,5 V и галвански одвојен серијски излаз. Омогућава дислоцирано мерење захваљујући каблу дужине 30 m. Овај метод мерења даје врло прецизне и стабилне резултате, а галванска заштита обезбеђује мерни систем од шума и напонских грешака (осцилација, пада напона и др.) у грубом производном окружењу. Са АД конвертора сигнал се преко RS 232 серијског порта уноси у рачунар снабдевен одговарајућим софтвером за мониторинг процеса. То омогућава надзор триболошког процеса и повремено снимање сигнала на хард-диску рачунара.

- **Универзални микроскоп UIM-21**, са мерним системом, коришћен је за мерење ширине трага хабања на контактним површинама испитиваних модела и анализу добијених резултата. Дубина трага хабања израчунава се на основу израза проистеклог из геометријских односа приказаних на слици 9.4.7. Овај уређај има могућност увећања педесет пута и тачност мерења је реда величине од једног микрометра.

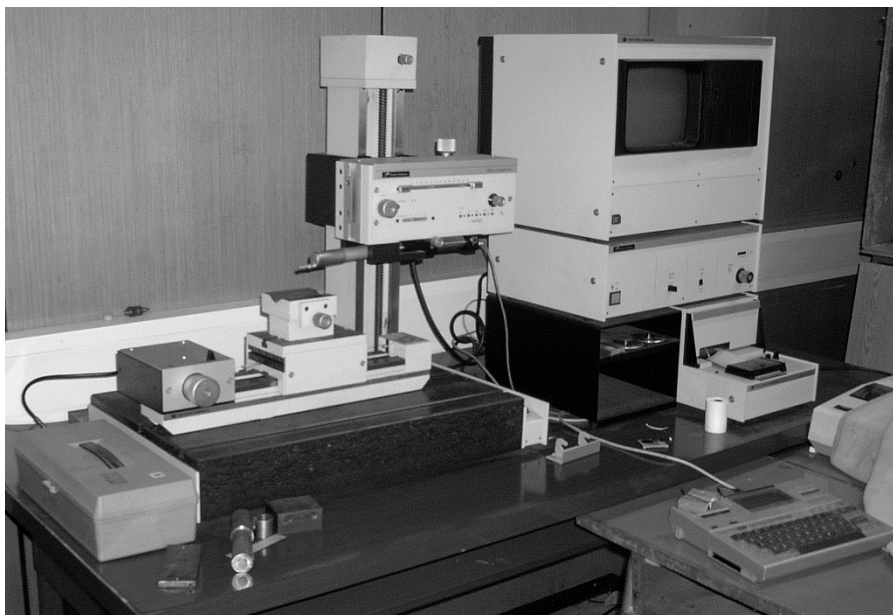


$$\delta = D - \sqrt{D^2 - 4\left(\frac{b}{2}\right)^2} / 2.$$



Слика 9.4.7 Универзални микроскоп UIM-21 и схема одређивања ширине и дубине трага хабања [141]

- **TALYSARF 6** (сл. 9.4.8) је мерни систем који је коришћен за мерење карактеристичних величина микрогеометрије контактних површина испитиваних узорка. Уређај је компјутеризован и има широк спектар могућности мерења основних и допунских параметара хрпавости, приказивања резултата мерења на монитору, меморисање добијених резултата, штампање, цртање и просторно скенирање. Применом овог мерног система прати се промена испитиване површине узорка у простору, тако што се снима микрогеометрија у различитим стадијумима процеса хабања. На овај начин овај уређај се може искористити за идентификацију и квантификацију процеса хабања који прелази ниво микрогеометрије.



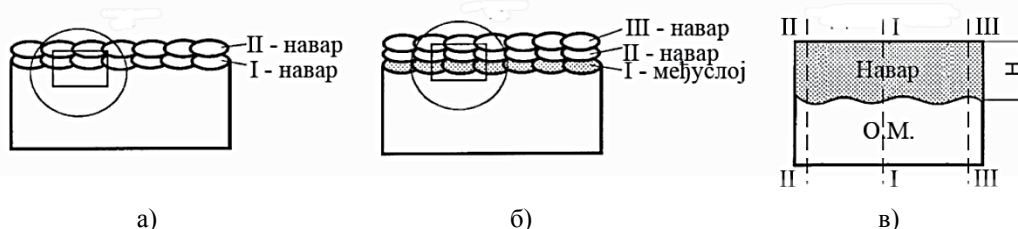
Слика 9.4.8 Уређај за мерење хрпавости површине TALYSARF 6 [141]

- **Термоелемент** типа 2 АВ АС 15 PHILIPS служи за мерење температуре средства за подмазивање (уља). Елементи термопара су жице од NiCr (+) и Ni(-). Регистровани сигнал може да се запише помоћу четвороканалног писача RIKADENKI R-54, или увођењем преко појачивача UPM-60 у рачунар, чиме се омогућава мониторинг триболошког процеса.

9.4.2 ПРИПРЕМА БЛОКОВА И ДИСКОВА

Да би се извела триболошка испитивања основног материјала и материјала наваара неопходно је било припремити физичке моделе (узорке) на којима ће извести експериментална испитивања. За ова испитивања израђен је већи број блокова и дискова. Блокови су израђени од различитих испитиваних основних материјала и материјала наваара.

- **Блокови** су припремани сечењем из наварених модела на исти начин и при истим условима као што су припремани металографски узорци (избрусци) који су коришћени за металографска испитивања (тврдоће и микроструктуре). Сечење материјала за израду блокова је изведено уз интензивно хлађење да не би дошло до промене микроструктуре, а затим су брушени на одговарајуће димензије, такође уз интензивно хлађење. На исти начин су израђени блокови од основних материјала. Сви блокови су обршени на димензије $6,3 \times 15 \times 10 \text{ mm}$, које су прикладне за извођење експерименталних испитивања. Начин припреме блокова исецањем из физичких модела израђених наношењем двослојних и трослојних наваара приказан је на слици 9.4.9а,б, а схема једног готовог блока са правцима мерења тврдоће на слици 9.4.9в.



Слика 9.4.9 Начин припреме блокова за триболошка испитивања: а) сечење блока из двослојног наваара, б) сечење блока из трослојног наваара, в) изглед блока

- **Дискови** за ова триболошка испитивања су израђени од Č5430, термички обрађени и обршени. Припремљено је укупно три диска истих димензија пречника $D = 50 \text{ mm}$ и дебљине $s = 10 \text{ mm}$. Тврдоћа дискова, после термичке обраде, мерена је по њиховом обиму, и то по десет мерења за сваки диск. Вредност измерене тврдоће код сва три диска је 50-55 HRC, односно 525-610 HV. Ова три диска послужила су за испитивања свих материјала наваара и основних материјала. После сваког испитивања изведено је брушење са интензивним хлађењем контактних

површина дискова, са истом брусном плочом, како би се задржала иста храпавост контактних површина, и испитивање за све материјале извело у истим условима.

Технологија припрема узорака (блокова и дискова) за триболошка испитивања приказана је у табелици 9.4.1.

Таблица 9.4.1 Технологија припреме блокова и дискова за триболошка испитивања

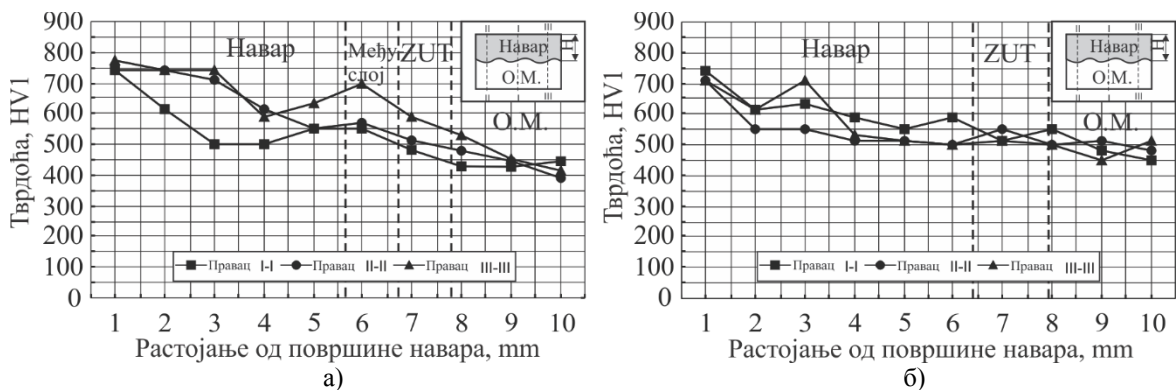
Број узорка	Материјал подлоге	Материјал навара	Број наварених слојева	Висина навара, <i>mm</i>	Изглед блокова и дискова
Блок-1.	ČL3134	INOX B 18/8/6 ABRADUR 58	3*	8,2-9,5	
Блок-2.	ČL3134	ABRADUR 58	2	6,2-6,5	
Блок-3.	ČL3134	-	-	-	
Блок-4.	Č0363	INOX B 18/8/6 CrWC 600	3*	4,5-6,0	
Блок-5.	Č0363	INOX B 18/8/6 E DUR 600	3*	4,2-6,6	
Блок-6.	Č0363	E Mn 14	2	6,0-8,2	
Блок-7.	Č0363	E Mn17Cr13	2	6,2-7,0	
Блок-8.	Č0363	FILTUB 12 B FILTUB DUR 16	3*	6,5-7,2	
Блок-9.	Č0363	FILTUB DUR 16	2	4,8-6,2	
Блок-10.	Č4732	-	-	-	
Блок-11.	Č4830	-	-	-	
Блок-12.	ČL4150	-	-	-	
Блок-13.	ČL3460	-	-	-	
Блок-14.	Č0363	-	-	-	
Блок-15.	Č0645	-	-	-	
Блок-16.	Č2330	-	-	-	
Диск-1.,2.,3.,	Č5430	-	-	-	

*Напомена Први пластични међуслој нанет је од: D.M.-INOX B 18/8/6 или D.M.-FILTUB 12B, а други и трећи слој навара нанети су од: D.M.-ABRADUR 58, D.M.-CrWC 600, D.M.-E DUR 600, D.M.-FILTUB DUR 16 респективно.

9.4.3 РАСПОДЕЛА ТВРДОЋЕ И МИКРОСТРУКТУРА КОНТАКТНИХ ПОВРШИНА БЛОКОВА И ДИСКОВА

На припремљеним блоковима исеченим из навара је мерена тврдоћа изведена у три паралелна правца слично као код мерења тврдоће на металографским избрусцима (шлифовима). Такође, је мерена и тврдоћа у десет тачака на контактної површини последњег слоја блокова од навара, и контактної површини блокова од основних материјала. Мерење тврдоће блокова припремљених из навара изведено је у три паралелна правца по пресеку навара, иако је то већ изведено на шлифовима, јер ови узорци (шлифови и блокови) нису изрезани са истог места из физичког модела. На овај начин су проверени резултати различитих металографских истраживања приказаних у претходном поглављу овог рада.

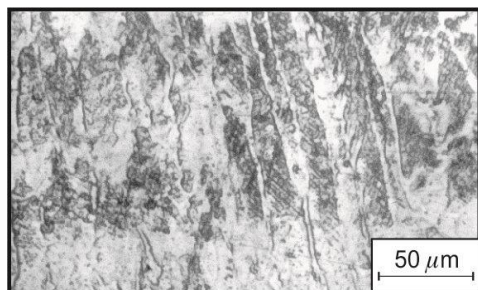
На слици 9.4.10 приказане су измерене тврдоће на блоковима исечених и припремљених из навара нанетог електродом ABRADUR 58 на ČL3134 преко претходно нанетог пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6, и навара нанетог електродом ABRADUR 58 директно на ČL3134 после предгревања на 250°C.



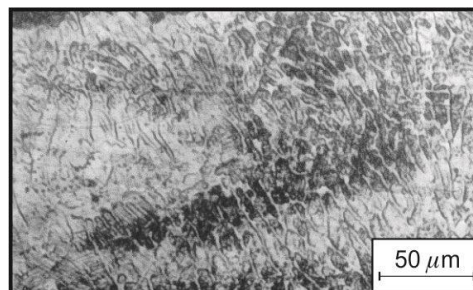
Слика 9.4.10 Распореда тврдоће код блокова припремљених за триболошка испитивања:
 а) О.М. - ČL3134, Д.М. међуслоја - INOX B 18/8/6, Д.М. наvara - ABRADUR 58;
 б) О.М. - ČL3134, Д.М. наvara - ABRADUR 58

Средња вредност измерене тврдоће на контактної површини блокова, односно последњег слоја наvara је 762 HV1 у првом, односно 725 HV1 у другом случају. На разлике у тврдоћама контактних површина код ових припремљених блокова за триболошка испитивања утицала је примена две различите технологије наваривања, иако је реч о истом основном и додатном материјалу, и истим параметрима наваривања. Средња вредност измерене тврдоће блока израђеног од ČL3134, мерених на контактної површини у десет тачака је 455 HV1.

На слици 9.4.11 приказане су микроструктуре контактних површина блокова припремљених из двослојних наvara нанетих електродом ABRADUR 58 са и без пластичног међуслоја.



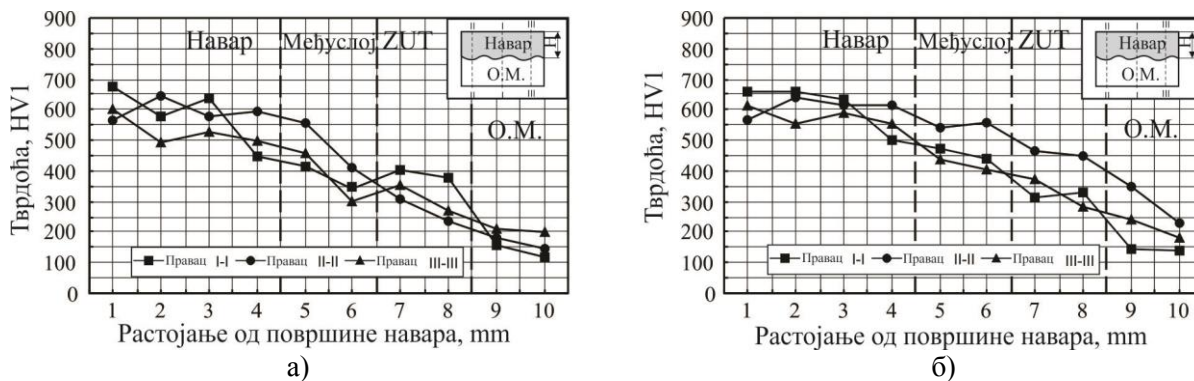
Мартензит, ледебурит и заостали аустенит са излученим карбидима
 а)



Мартензит, ледебурит и заостали аустенит са излученим карбидима
 б)

Слика 9.4.11 Микроструктура контактних површина припремљених узорак за триболошка испитивања: а) блока навареног од Д.М.-ABRADUR 58 са међуслојем, б) блока навареног од Д.М.-ABRADUR 58 без међуслоја

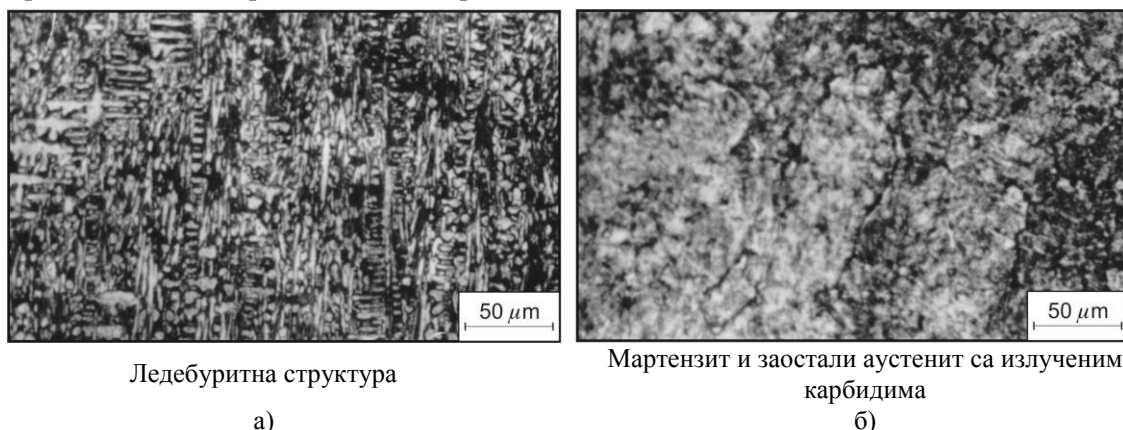
На слици 9.4.12 приказане су измерене тврдоће на блоковима исечених и припремљених из двослојног наvara нанетих електродама CrWC 600 и E DUR 600 преко пластичног међуслоја претходно нанетог електродом INOX B 18/8/6 на Č0363.



Слика 9.4.12 Распореда тврдоће код блокова припремљених за триболошка испитивања: а) О.М.-Č0363, Д.М. међуслоја - INOX B 18/8/6, Д.М. наvara – CrWC 600; б) О.М.-Č0363, Д.М. међуслоја - INOX B 18/8/6, Д.М. - наvara E DUR 600

Средња вредност измерене тврдоће на контактної површини блока навареног електродом CrWC 600 је 660 HV1, а на контактної површини блока навареног електродом E DUR 600 је 600 HV1.

На слици 9.4.13 приказане су микроструктуре контактних површина блокова припремљених из наваара нанетих електродама CrWC 600 и E DUR 600.



Ледобуритна структура

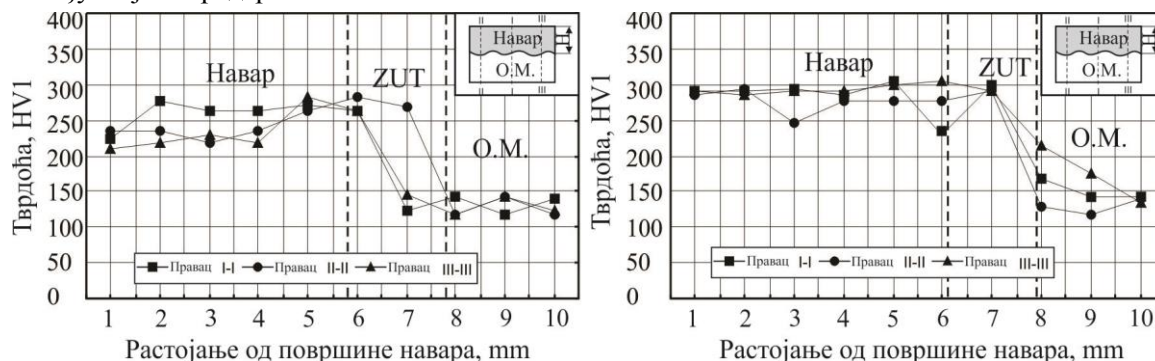
Мартензит и заостали аустенит са излученим карбидима

а)

б)

Слика 9.4.13 Микроструктура контактних површина припремљених узорака за триболошка испитивања: а) блока израђеног од D.M.-CrWC 600 са међуслојем б) блока израђеног од D.M.-E DUR 600 са међуслојем

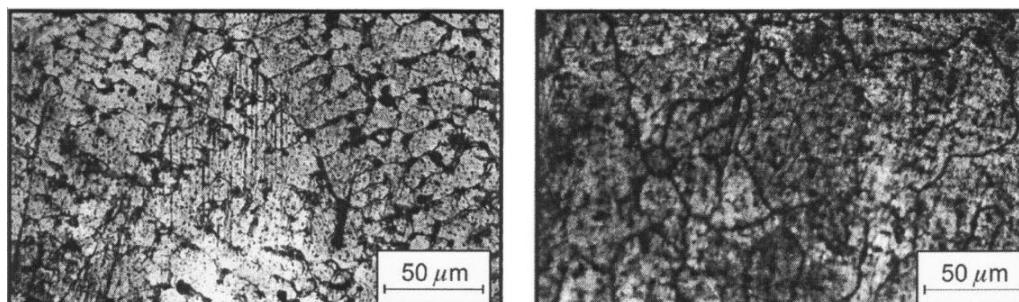
На слици 9.4.14 приказане су измерене тврдоће на блоковима исечених и припремљених из двослојних наваара нанетих електродама E Mn 14 и E Mn 17 Cr 13 нанетих директно на Č0363 без међуслоја и предгревања.



Слика 9.4.14 Расподела тврдоће код блокова припремљених за триболошка испитивања: а) O.M.-Č0363, D.M. наваара – E Mn 14; б) O.M.-Č0363, D.M. наваара – E Mn 17 Cr 13

Средња вредност измерене тврдоће на контактної површини блока навареног електродом E Mn 14 је 234 HV1, а на контактної површини блока навареног електродом E Mn 17 Cr 13 је 290 HV1.

На слици 9.4.15 приказане су микроструктуре контактних површина блокова припремљених из наваара нанетих електродама E Mn 14 и E Mn 17 Cr 13.



Аустенитна структура дендритног распореда са излученим карбидима по границама зрна

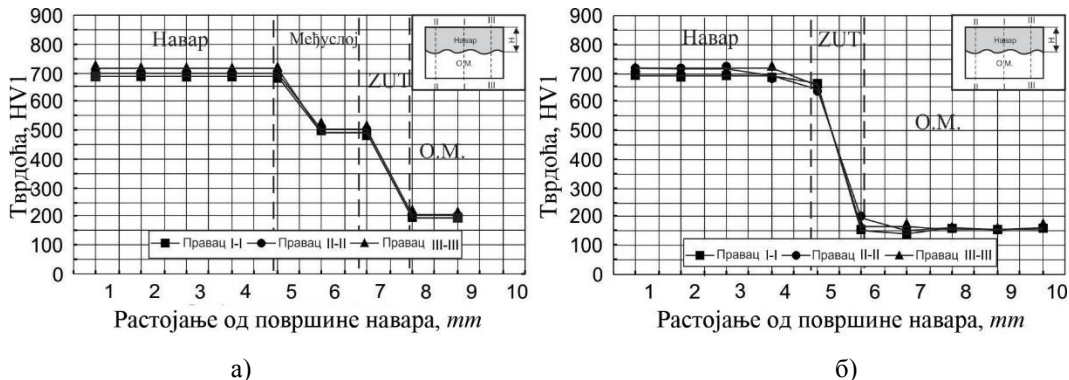
Аустенитна структура са излученим карбидима по границама зрна равномерног распореда

а)

б)

Слика 9.4.15 Микроструктура контактних површина припремљених узорака за триболошка испитивања: а) блока израђеног од D.M.-E Mn 14, б) блока израђеног од D.M.-E Mn 17 Cr 13

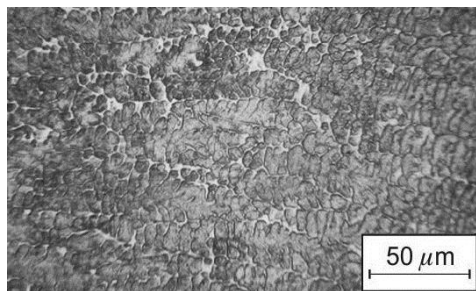
На слици 9.4.16 приказане су измерене тврдоће на блоковима исечених и припремљених из двослојног наваара нанетог електродом FILTUB DUR 16 на Č0363 преко претходно нанетог пластичног међуслоја електродом FILTUB 12 В, и двослојног наваара нанетог електродом FILTUB DUR 16 директно на Č0363 без предгревања.



Слика 9.4.16 Расподела тврдоће код блокава припремљених за триболошка испитивања: а) O.M. - Č0363, D.M. међуслоја - FILTUB 12 В, D.M. наваара - FILTUB DUR 16, б) O.M. – Č0363, D.M. наваара – FILTUB DUR 16

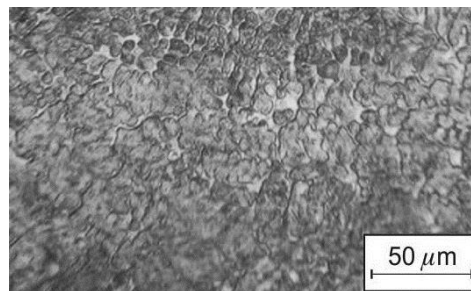
Средња вредност измерене тврдоће на контактної површини блока у првом случају је 686 HV1, а у другом случају је 715 HV1. На разлику у тврдоћи контактних површина код ових блокава припремљених за триболошка испитивања утицала је примена две различите технологије наваривања, иако је реч о истом основном и додатном материјалу, и истим параметрима наваривања.

На слици 9.4.17 приказане су микроструктуре контактних површина блокава припремљених из наваара нанетих електродом FILTUB DUR 16 са и без пластичног међуслоја.



Ситноигличаста мартензитна структура са излученим карбидима

а)



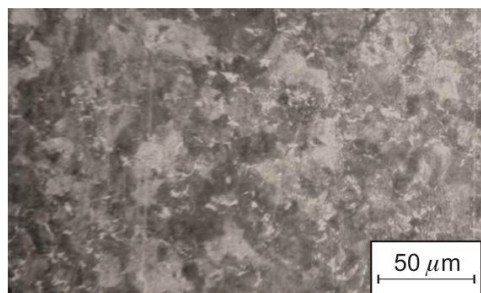
Ситноигличаста мартензитна структура са излученим карбидима

б)

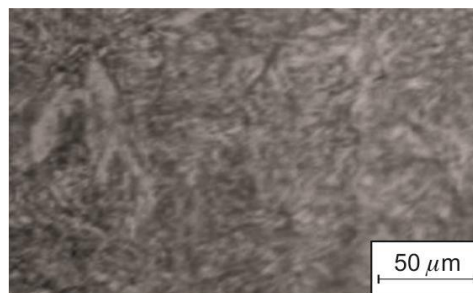
Слика 9.4.17 Микроструктура контактних површина припремљених узорак за триболошка испитивања: а) блока израђеног од D.M. - FILTUB DUR 16 са међуслојем, б) блока израђеног од D.M. - FILTUB DUR 16 без међуслоја

Средње вредности измерених тврдоћа на контактним површинама блокава израђених од основних материјала су: Č4732 је 315 HV1, Č4830 је 515 HV; ČL3460 је 205 HV1, Č0363 је 150 HV1, ČL4150 је 620 HV1, ČL3134 је 455 HV1, Č0645 је 185 HV1, Č2330 је 305 HV1.

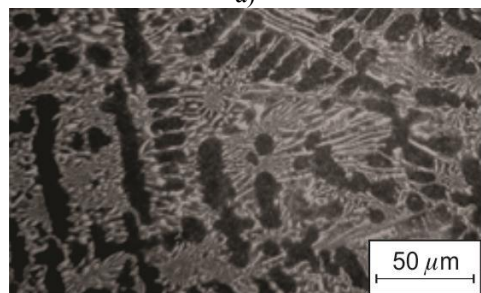
На слици 9.4.18 приказане су микроструктуре контактних површина испитиваних блокова припремљених исецањем из основних материјала, од којих су углавном израђени радни делови грађевинске механизације, који су предмет ових истраживања.



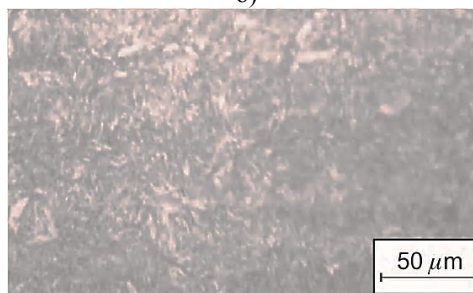
Међуфазна структура побољшања – претежно сорбитна
а)



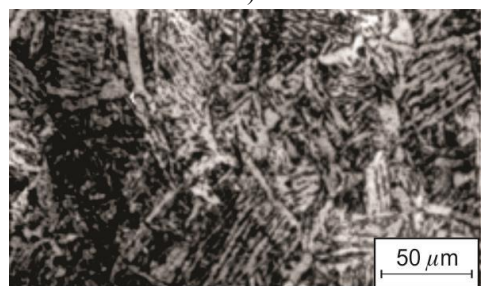
Међуфазна структура побољшања – претежно труститна
б)



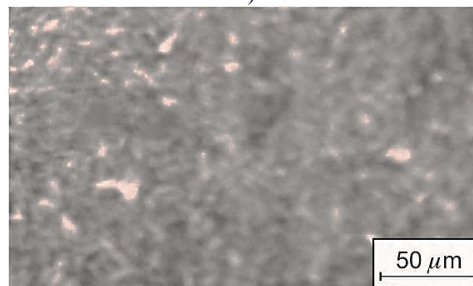
Ледебуритна структура
в)



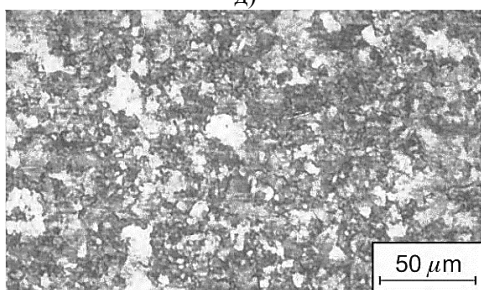
Перлитно - феритна структура
г)



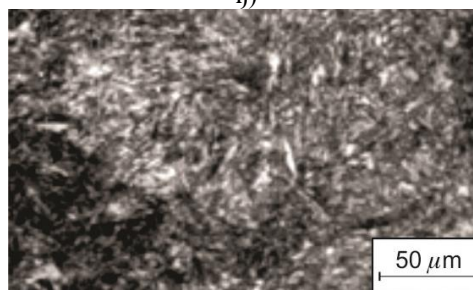
Аустенитна структура
д)



Феритно - перлитна структура
ђ)



Међуфазна структура побољшања – претежно бејнитна
е)



Међуфазна структура побољшања – претежно сорбитна
ж)

Слика 9.4.18 Микроструктура контактних површина припремљених узорака за триболошка испитивања: а) блок израђен од Č4732; б) блок израђен од Č4830; в) блок израђен од ČL4150; г) блок израђен од Č0645; д) блок израђен од ČL3460; њ) блок израђен од Č0363; е) блок израђен од ČL3134; ж) блок израђен од Č2330

9.4.4 ТРИБОЛОШКА ИСПИТИВАЊА НАВАРА И ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА

Пре почетка експерименталних испитивања изведена су мерења храпавости контактних површина свих блокова (16 ком.), док је мерење храпавости контактних површина дискова (3 ком.), израђених од Č5430, изведено увек пре и после контакта при испитивању са одговарајућим блоком. Контактне површине дискова се после сваког испитивања и мерења карактеристичних величина храпавости морају поново обрусити, на брусници за округло брушење уз интензивно хлађење, да би се добила контактна површина са сличним параметрима храпавости, при свим триболошким испитивањима. Топографија контактних површина блокова и дискова мерена је на компјутерском мерном систему TALYSARF 6 при чему је уочено да су храпавости контактних површина блока бр. 1, блока бр. 2 и блока бр. 3 скоро идентичног профила.

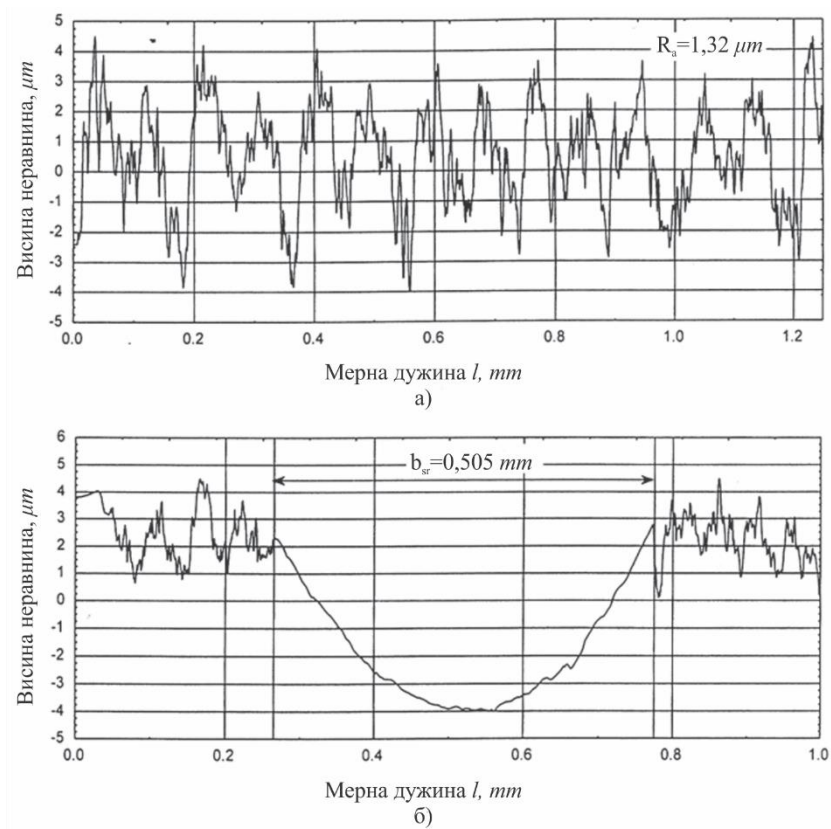
Циљ ових испитивања је одређивање триболошких својстава, односно отпорности на хабање основних материјала и материјала навара по убрзаном поступку. Услови при лабораторијским испитивањима на моделима никад нису исти, већ само могу бити донекле слични реалним радним условима при експлоатацији грађевинске механизације. Анализом добијених резултата може се донети само оријентациона оцена о погодности испитиваних материјала за израду или наваривање радних делова грађевинске механизације. Коначна оцена отпорности према абразивном хабању, коме су ови делови најчешће изложени за време експлоатације, може се донети тек после испитивања радних делова монтираних на грађевинске машине.

Просечна брзина кретања радних делова при експлоатацији грађевинске механизације износи око 1 m/s . Пошто је преносни однос броја обртаја на трибометру TBD-93 који је коришћен за ова испитивања $i=0,424$ и пречник дискова $D=50 \text{ mm}$, да би се добила просечна брзина клизања прорачуном је одређен број обртаја $n=900 \text{ min}^{-1}$. Одабрани и усвојени улазни параметри свих ових триболошких испитивања су: нормална сила $F_N=300 \text{ N}$, брзина клизања $v_{kl}=1 \text{ m/s}$ и време испитивања $t=60 \text{ min}$. Улазни параметри ових триболошких испитивања нису варирани, да би се добили резултати при истим условима испитивања за све испитиване материјале, с циљем њиховог једноставнијег поређења.

При испитивању је коришћено средство за хлађење и подмазивање (SHP) мултиградно моторно уље GLX 2 SAE 15 W-40 произвођача НИС рафинерија нафте Београд. Ово уље је наменски одабрано, јер има изузетно добро својство хлађења, а нешто лошије својство подмазивања. Радни делови грађевинске механизације, који су предмет истраживања у овом раду, при експлоатацији се не подмазују већ су у директном контакту са различитим грађевинским материјалима, па је зато ово уље коришћено за ова испитивања.

Подмазивање контактних површина испитиваних узорака блокова и дискова остварено је захватањем одређене количине уља из посуде са доњим делом диска, који је делимично потопљен, и његовим преношењем у зону контакта. На овај начин је обезбеђено само гранично подмазивање, па је испитивање донекле изведено у сличним условима као при експлоатацији. У почетној фази испитивања, контакт између блока и диска био је линијски, а даље у току испитивања контакт се остварује по граничним површинама.

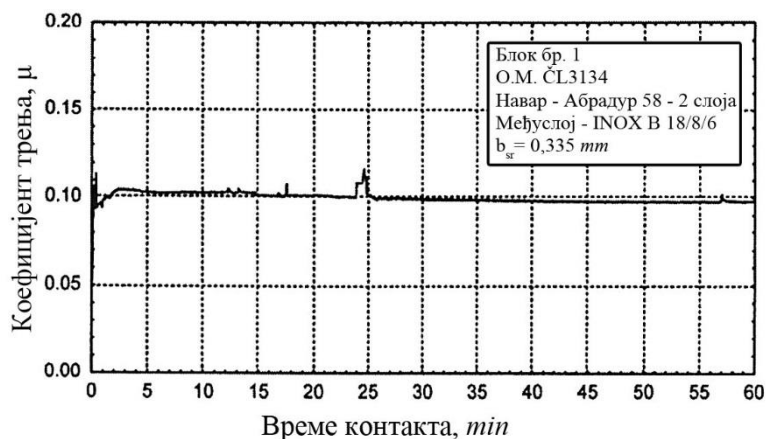
На слици 9.4.19 приказана је храпавост контактне површине блока бр. 3, пре и после триболошких испитивања у трајању од 60 min са трагом хабања, односно појасом хабања, који се у литератури понекад назива и кратером хабања.



Слика 9.4.19 Храпавост контактне површине блока бр. 3: а) пре триболошких испитивања; б) после триболошких испитивања

Од излазних параметара током триболошког процеса, мерени су и праћени: сила трења (F_T), коефицијент трења (μ) и параметри микрогеометрије. Од параметара микрогеометрије праћена је промена храпавости контактних површина и траг хабања, односно ширина и дубина трага хабања. Овде ће бити приказана промена силе трења, односно коефицијента трења за време контакта од 60 *min*, и трагови хабања на испитиваним блоковима. То значи, да ће се одређивање отпорности према хабањима испитиваних основних и додатних материјала извести према два критеријума. При одређивању коефицијента трења, процес хабања се прати према енергетском критеријуму, а величина трага хабања према геометријском критеријуму. Оцене отпорности према процесу хабања испитиваних материјала доношене су на основу измерених вредности коефицијента трења и средње вредности ширине трага хабања.

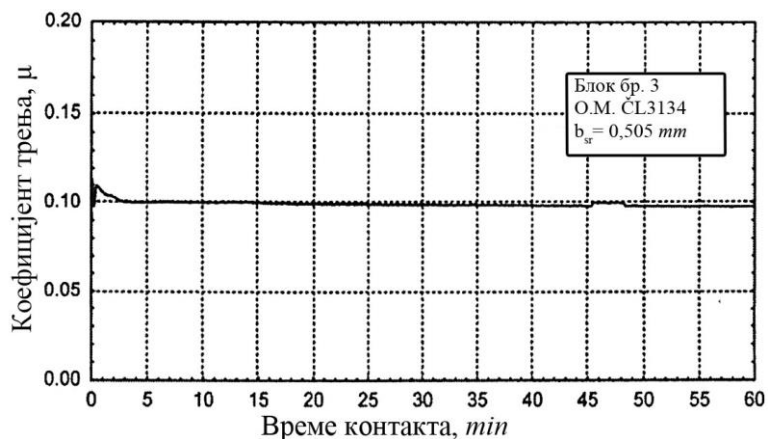
При овим испитивањима најпре је одређен коефицијент трења на свим блоковима (сл. 9.4.20 до сл. 9.4.35), који је регистрован и мерен за време испитивања од 60 *min*.



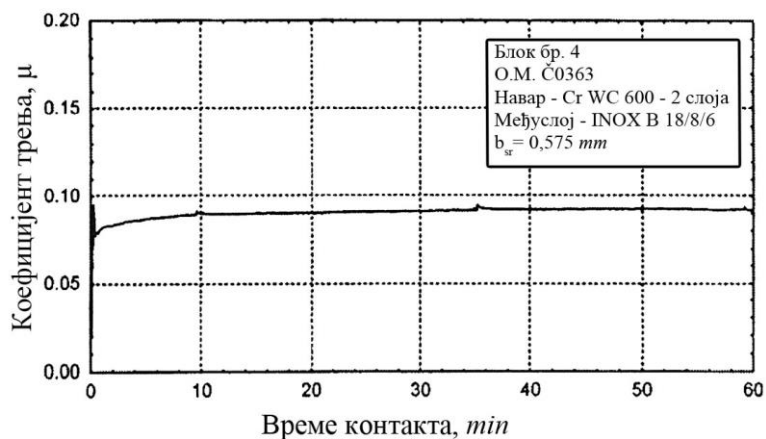
Слика 9.4.20 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 *min* код блока бр. 1 (О.М. - $\dot{C}L3134$, D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6, D.M. навара - ABRADUR 58-2 слоја)



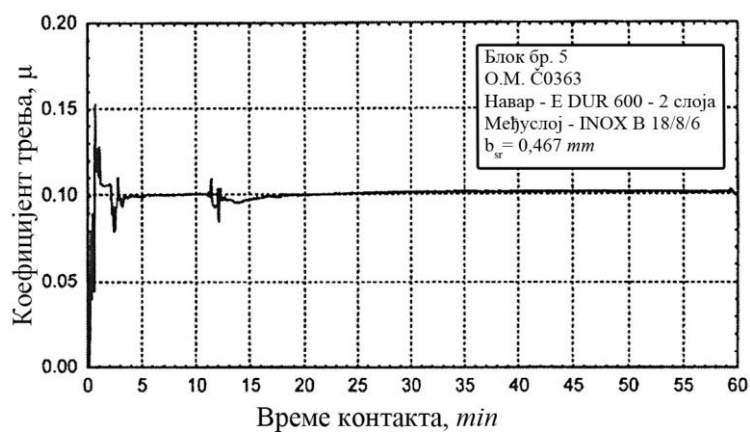
Слика 9.4.21 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 2 (О.М. - ČL3134, D.M. навара - ABRADUR 58-2 слоја)



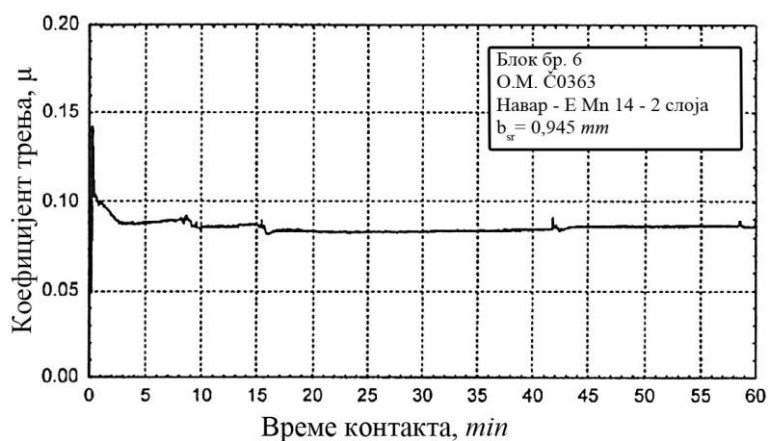
Слика 9.4.22 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 3 (О.М. - ČL3134)



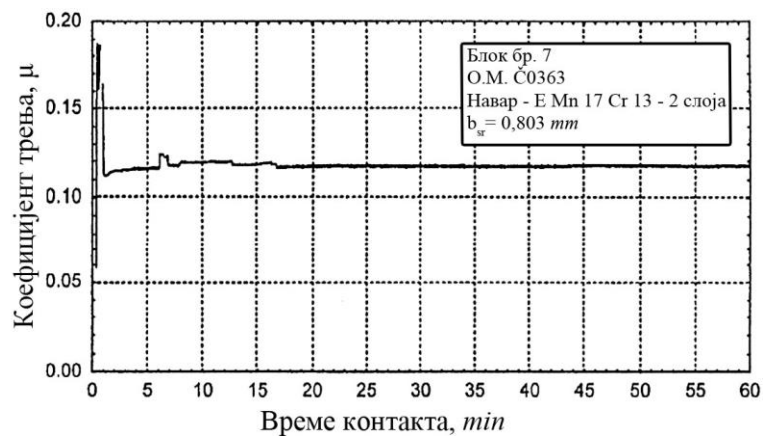
Слика 9.4.23 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 4 (О.М. - Č0363, D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6, D.M. навара - CrWC 600-2 слоја)



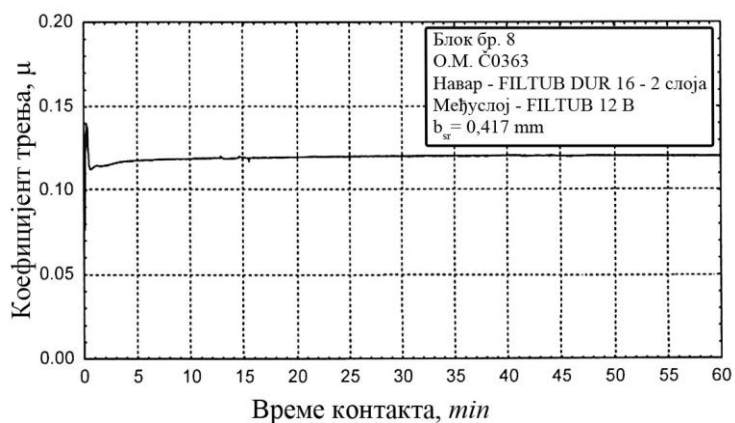
Слика 9.4.24 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр.5 (О.М.- Č0363, D.M. међуслоја - INOX B 18/8/6, D.M. навара – E DUR 600-2 слоја)



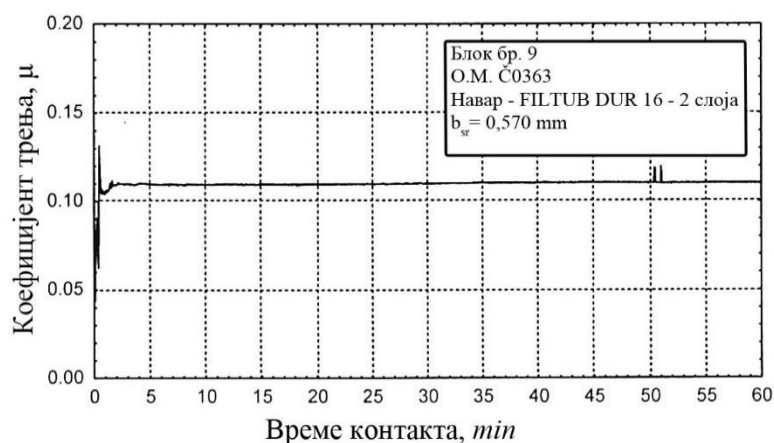
Слика 9.4.25 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 6 (О.М.- Č0363, D.M. навара – E Mn 14-2 слоја)



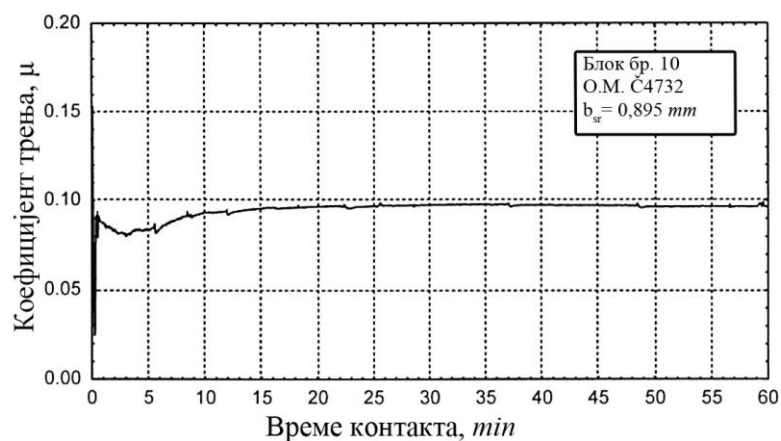
Слика 9.4.26 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр.7(О.М.- Č0363, D.M. навара – E Mn 17 Cr 13-2 слоја)



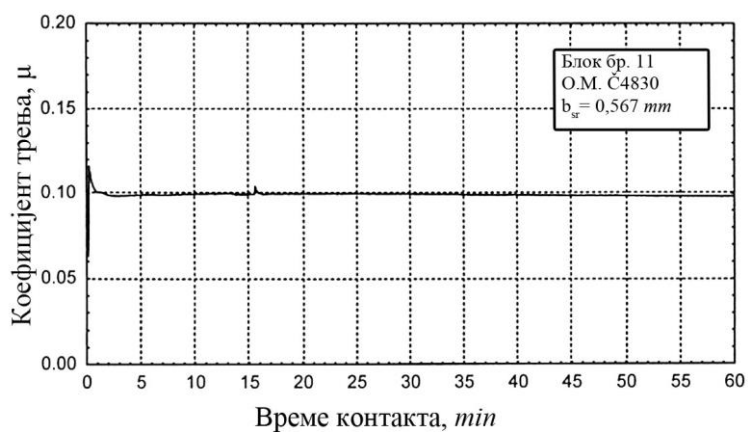
Слика 9.4.27 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 8 (О.М.- Č0363, D.M. међуслоја - FILTUB 12 В, D.M. навара - FILTUB DUR 16-2 слоја)



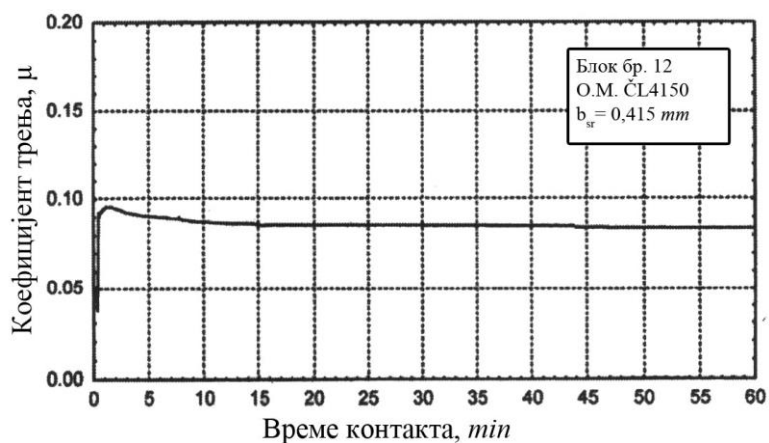
Слика 9.4.28 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 9 (О.М.- Č0363, D.M. навара - FILTUB DUR 16-2 слоја)



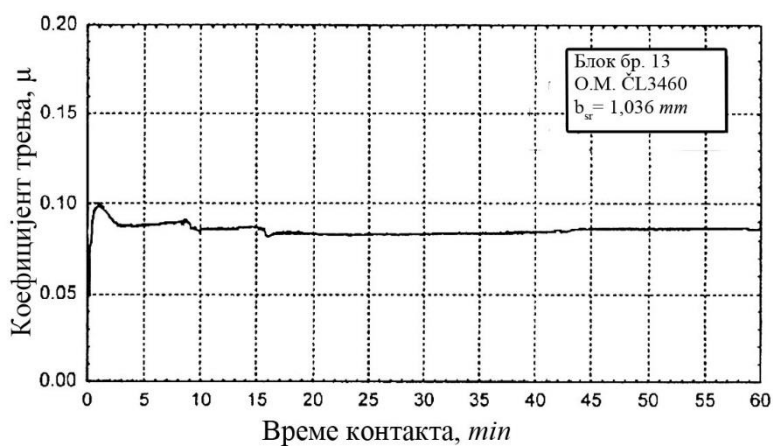
Слика 9.4.29 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 10 (О.М.- Č4732)



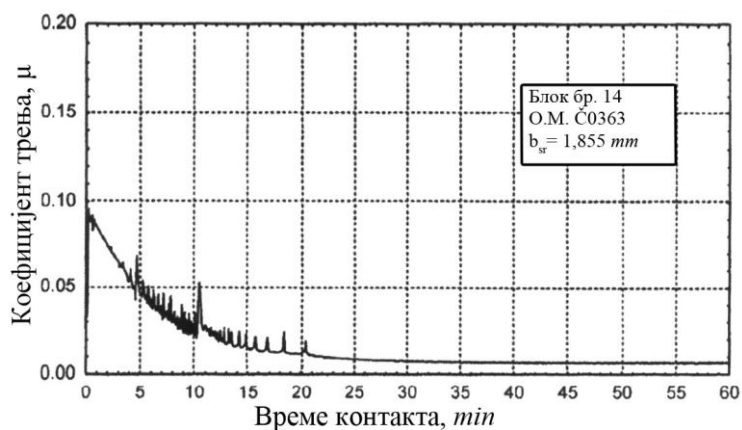
Слика 9.4.30 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 11 (О.М.- Č4830)



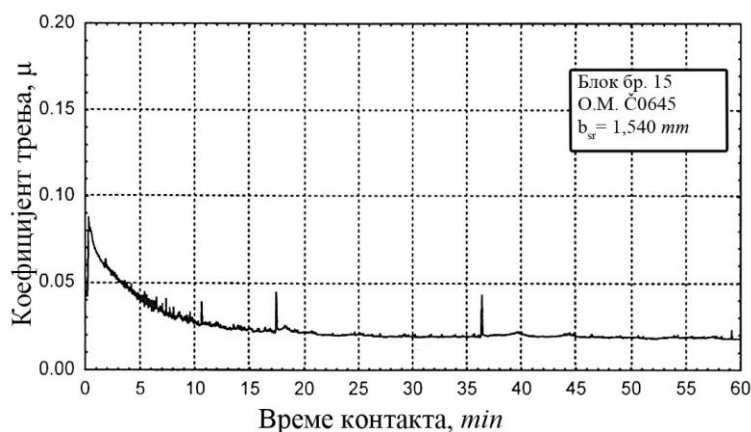
Слика 9.4.31 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 12 (О.М.- ČL4150)



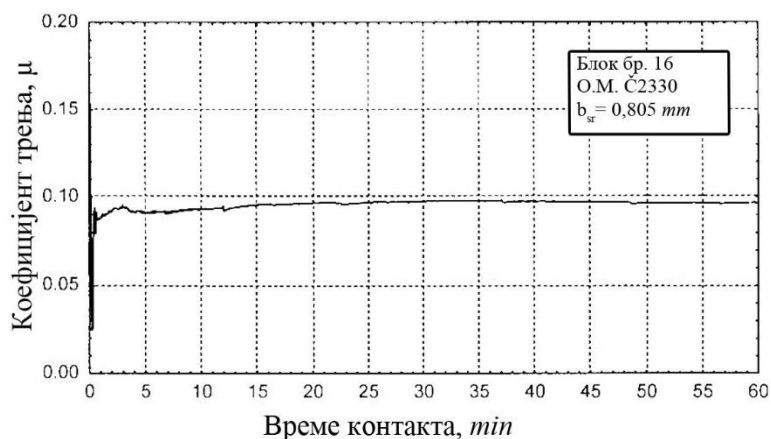
Слика 9.4.32 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 13 (О.М.- ČL3460)



Слика 9.4.33 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 14 (О.М. - Ć0363)



Слика 9.4.34 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 15 (О.М. - Ć0645)



Слика 9.4.35 Промена коефицијента трења за време контакта од 60 min код блока бр. 16 (О.М. - Ć2330)

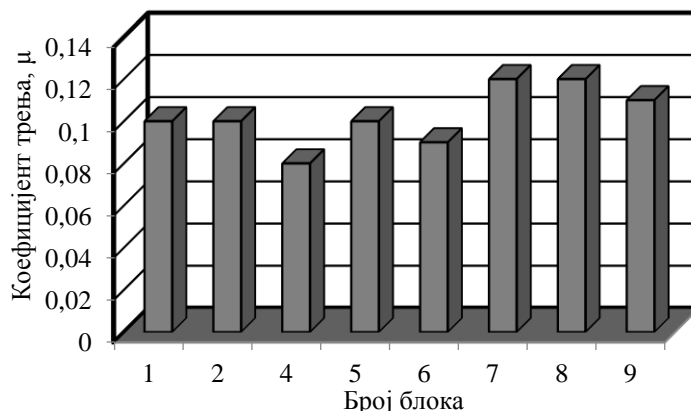
Са претходних слика јасно се види да се величина коефицијента трења устали после 5 min испитивања, а касније је углавном доста равномерна до краја испитивања, осим код блока бр. 14 и 15 где се величина коефицијента трења устали тек после 20 min испитивања.

Измерене вредности коефицијента трења за време триболошких испитивања, код блокова израђених од различитих врста додатних материјала за наваривање, мењали су се у одређеним границама, а измерене вредности дате су у табелици 9.4.2.

Таблица 9.4.2 Вредности коефицијента трења код блокова навара

Број блока	Блок-1.	Блок-2.	Блок-4.	Блок-5.	Блок-6.	Блок-7.	Блок-8.	Блок-9.
Коефицијент трења, μ	0,09 до 0,11	0,09 до 0,11	0,07 до 0,09	0,05 до 0,15	0,08 до 0,10	0,11 до 0,13	0,11 до 0,13	0,10 до 0,12
Средња вредност, μ	0,100	0,100	0,080	0,100	0,090	0,120	0,120	0,110

На слици 9.4.36 дат је графички приказ средњих вредности коефицијената трења измерених код блокова навара израђених од различитих врста додатних материјала.



Слика 9.4.36 Графички приказ средњих вредности коефицијента трења код навара после контакта од 60 min

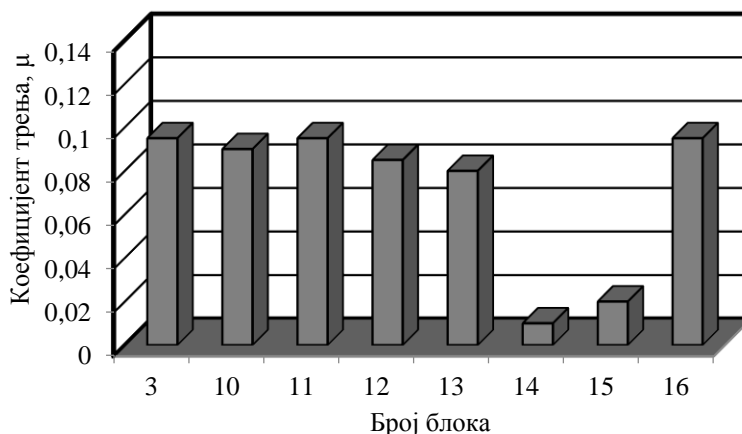
Измерене вредности коефицијента трења за време триболошких испитивања, код блокова израђених од различитих врста основних материјала, мењали су се у одређеним границама, а измерене вредности дате су у табlici 9.4.3.

Таблица 9.4.3 Вредности коефицијента трења код блокова основних материјала

Број блока	Блок-3.	Блок-10.	Блок-11.	Блок-12.	Блок-13.	Блок-14.	Блок-15.	Блок-16.
Коефицијент трења, μ	0,09 до 0,10	0,08 до 0,10	0,09 до 0,10	0,08 до 0,09	0,07 до 0,09	0,09 до 0,01	0,09 до 0,02	0,09 до 0,10
Средња вредност, μ	0,095	0,090	0,095	0,085	0,080	0,010	0,020	0,095

Пошто код блокова бр. 14 и бр. 15, (Џ0363 и Џ0645) вредност коефицијената трења варира првих 20 min испитивања, у табlici 9.4.3 уместо средњих вредности узете су као реалне вредности коефицијента трења измерене када се процес испитивања усталио.

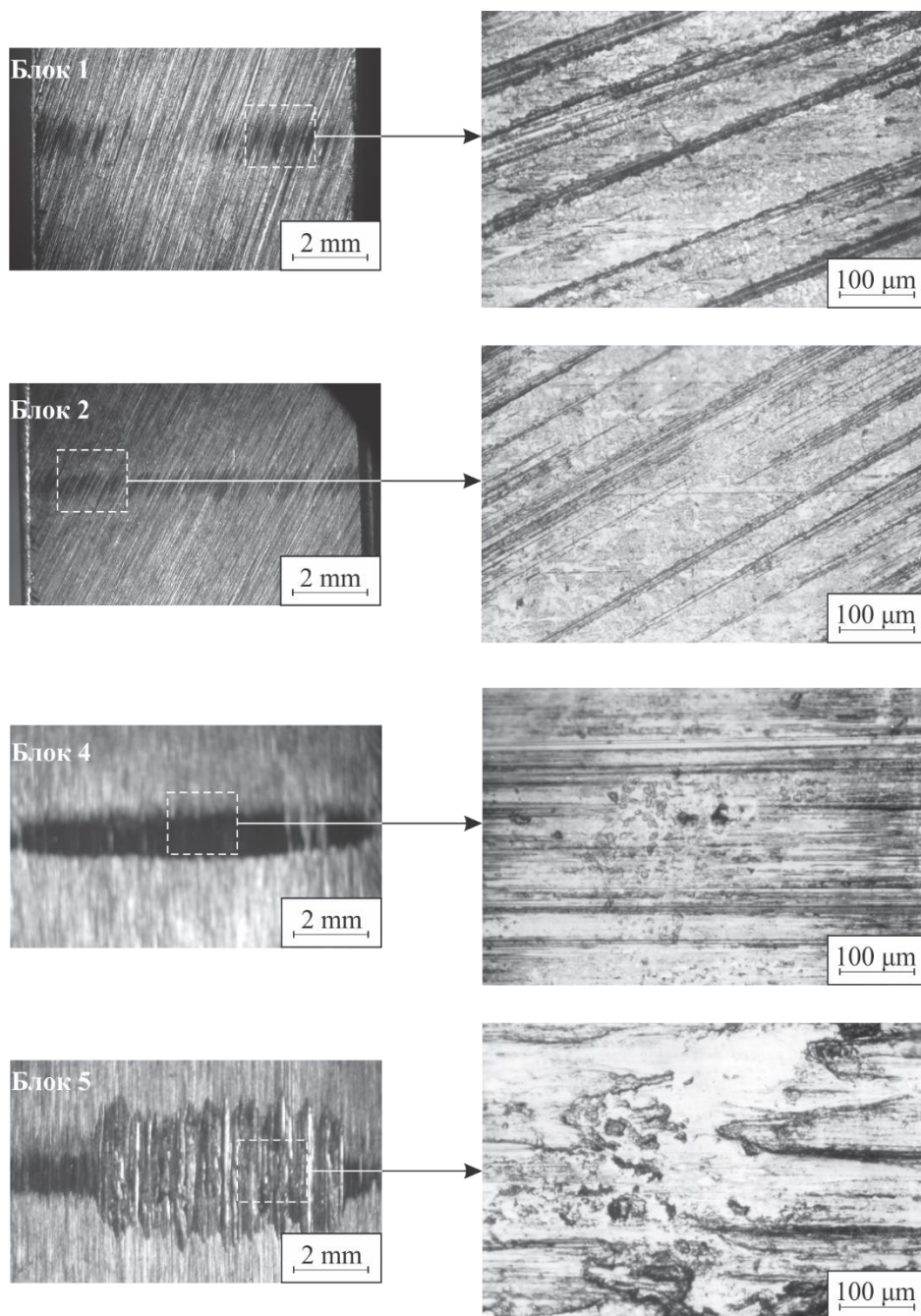
На слици 9.4.37 дат је графички приказ средњих вредности коефицијената трења измерених код блокова испитиваних различитих основних материјала.



Слика 9.4.37 Графички приказ средњих вредности коефицијента трења код основних материјала после контакта од 60 min

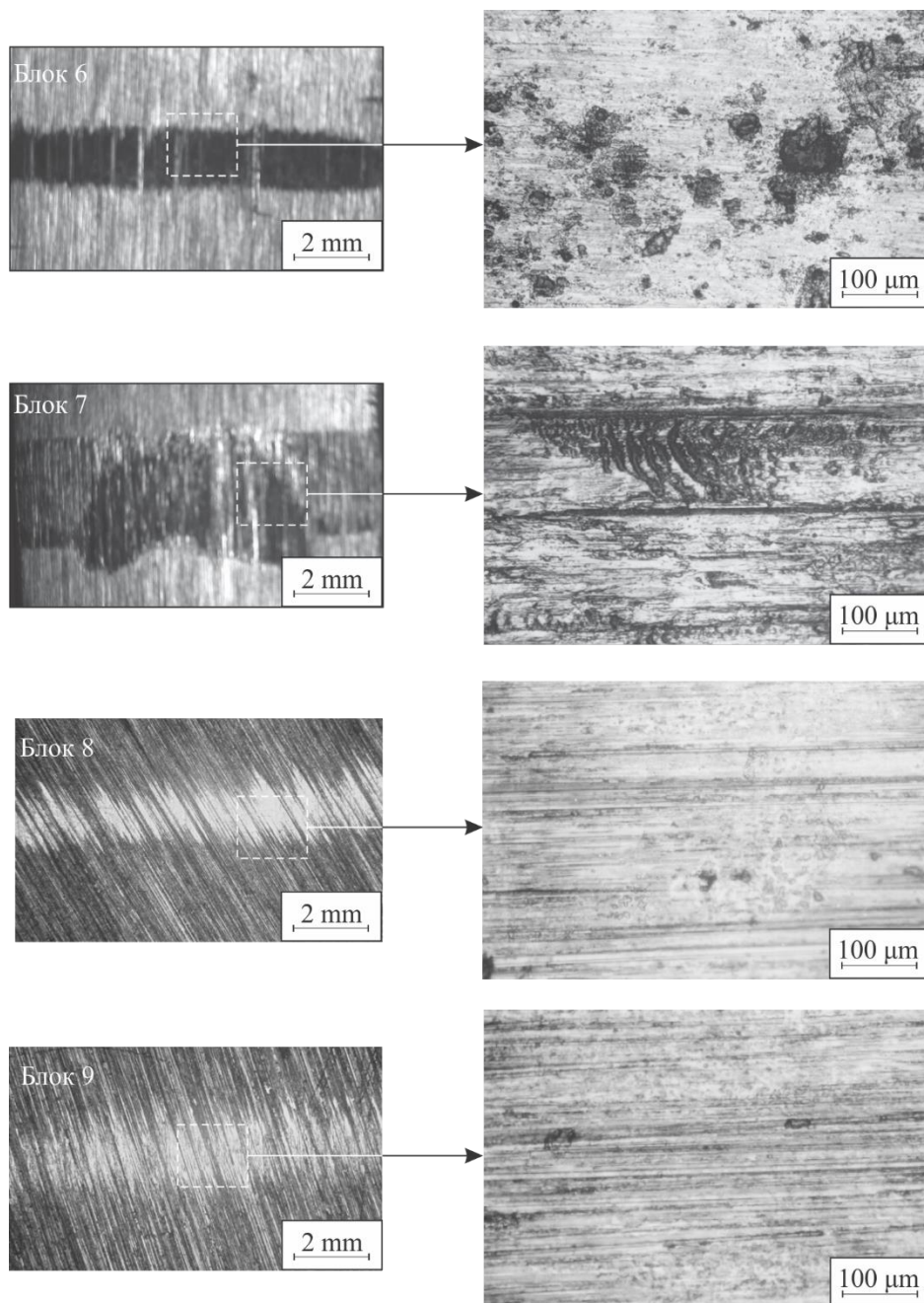
После одређивања коефицијената трења, измерене су топографије контактних површина испитиваних узорака, и одређена средња ширина трага хабања (кратера). Ова мерења су изведена на уређају TALYSARF 6.

На слици 9.4.38 приказани су макроскопски и микроскопски изгледи трагова хабања на испитиваним контактним површинама блокова навара бр. 1, 2, 4 и 5.



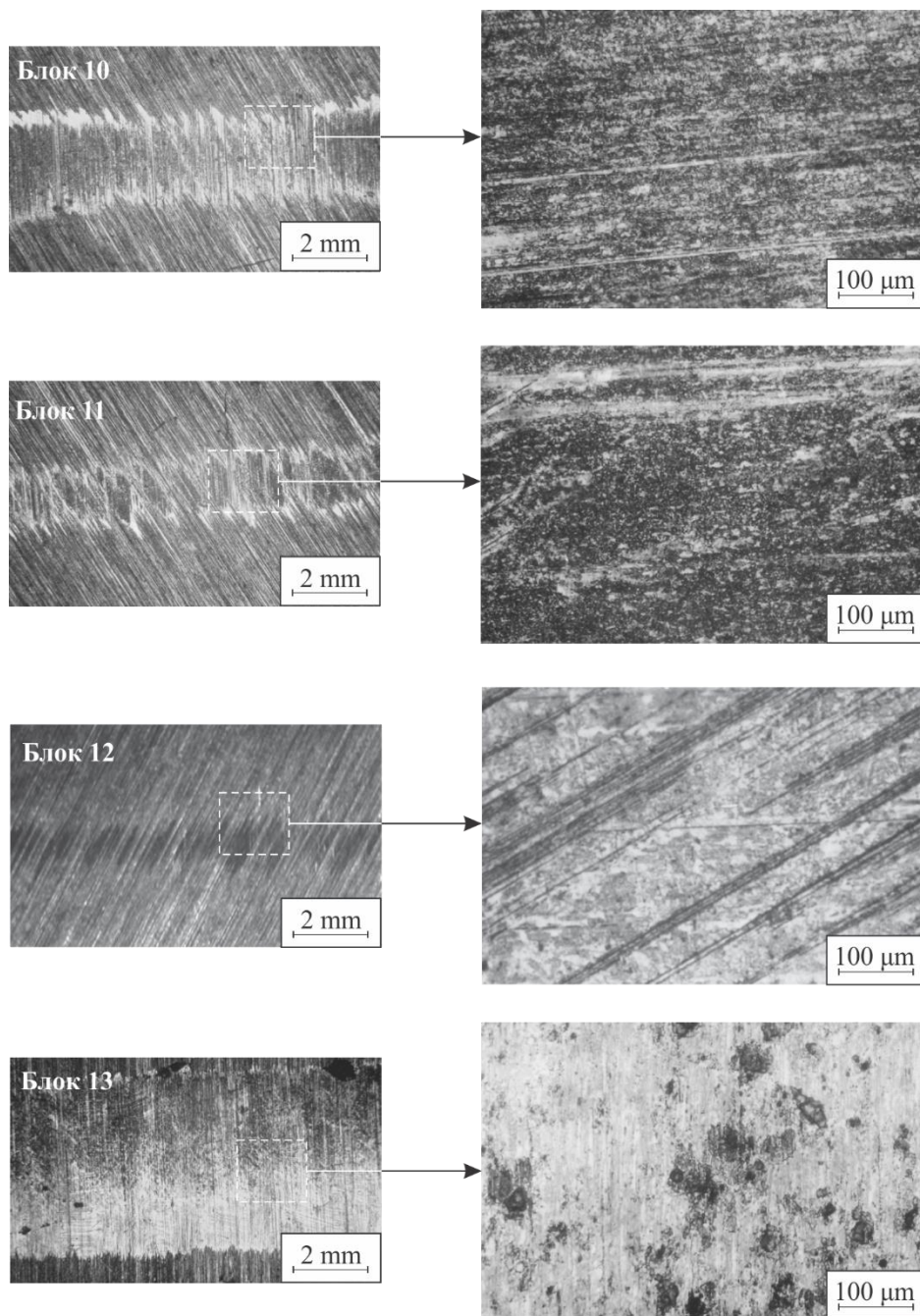
Слика 9.4.38 Макроскопски и микроскопски изглед трагова хабања код навара после контакта од 60 min

На слици 9.4.39 приказани су макроскопски и микроскопски изгледи трагова хабања на испитиваним контактним површинама блокова навара бр. 6, 7, 8 и 9.



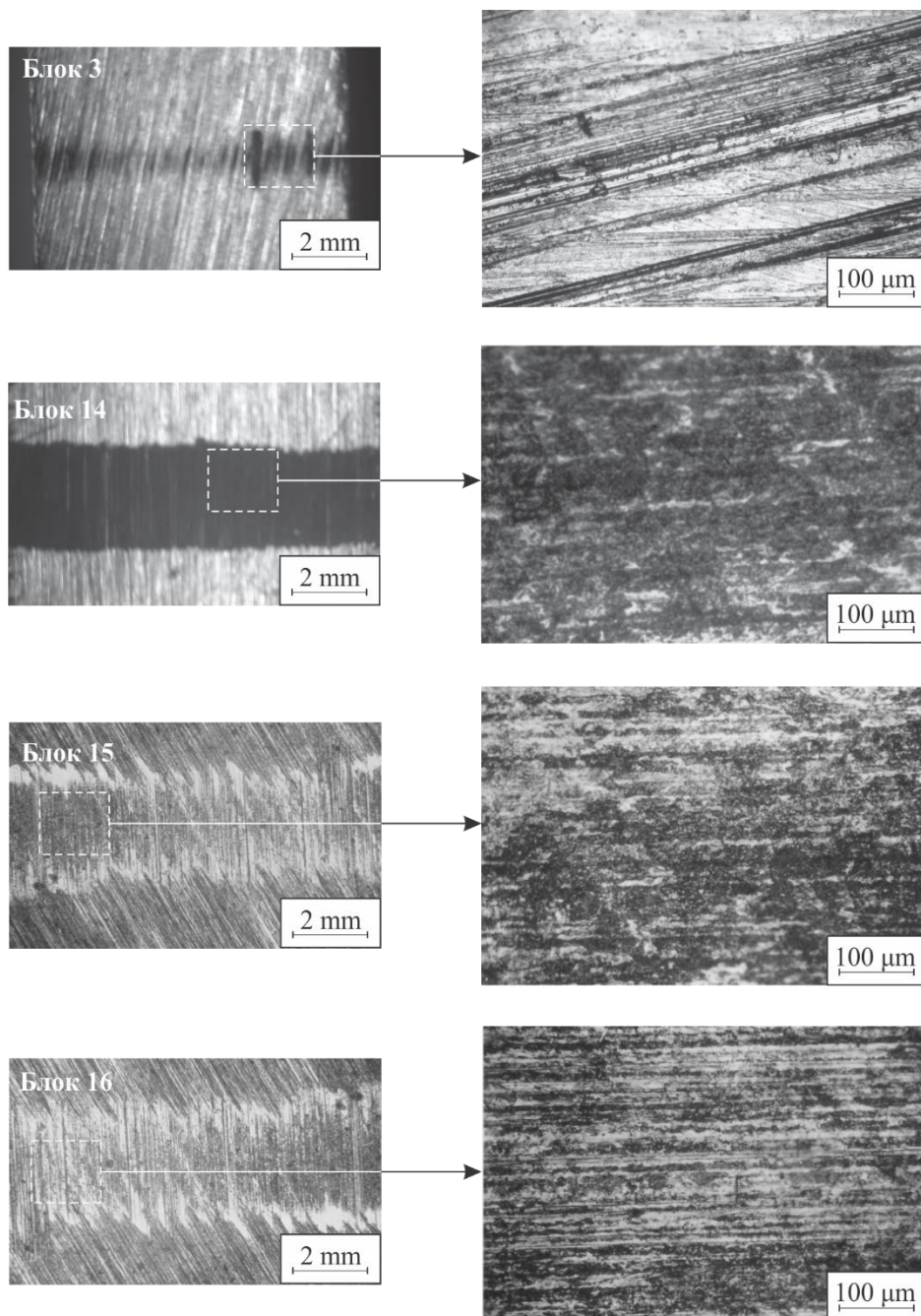
Слика 9.4.39 Макроскопски и микроскопски изглед трагова хабања код навара после контакта од 60 min

На слици 9.4.40 приказани су макроскопски и микроскопски изгледи трагова хабања на испитиваним контактним површинама блокова основних материјала бр. 10, 11, 12 и 13.



Слика 9.4.40 Макроскопски и микроскопски изглед трагова хабања код навара после контакта од 60 min

На слици 9.4.41 приказани су макроскопски и микроскопски изгледи трагова хабања на испитиваним контактним површинама блокова основног материјала бр. 3, 14, 15 и 16.



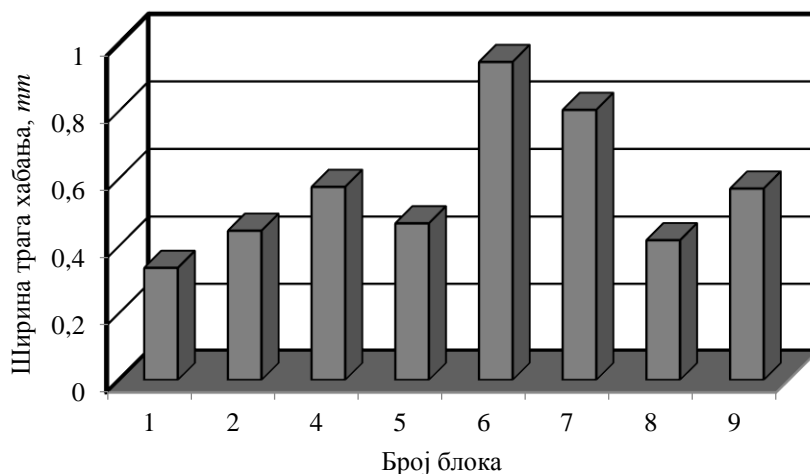
Слика 9.4.41 Макроскопски и микроскопски изглед трагова хабања код навара после контакта од 60 min

Измерене средње вредности ширине трага хабања после триболошких испитивања код блокова наvara израђених од различитих додатних материјала дате су табlici 9.4.4.

Таблица 9.4.4 Средње вредности ширине трага хабања код блокова наvara

Број блока	Блок-1.	Блок-2.	Блок-4.	Блок-5.	Блок-6.	Блок-7.	Блок-8.	Блок-9.
Средња ширина трага хабања b_{sr}, mm	0,335	0,445	0,575	0,467	0,945	0,803	0,417	0,570

На слици 9.4.42 дат је графички приказ средње ширине трагова хабања код блокова урађених од наvara.



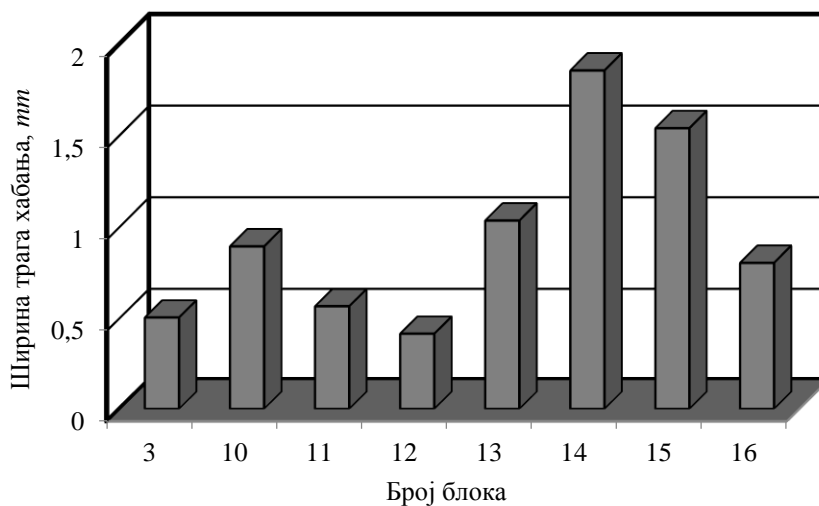
Слика 9.4.42 Графички приказ средњих вредности измерених ширина трагова хабања код наvara после контакта од 60 min

Измерене средње вредности ширине трага хабања после триболошких испитивања код блокова израђених од основних материјала дате су у табlici 9.4.5.

Таблица 9.4.5 Средње вредности ширине трага хабања код блокова основних материјала

Број блока	Блок-3.	Блок-10.	Блок-11.	Блок-12.	Блок-13.	Блок-14.	Блок-15.	Блок-16.
Средња ширина трага хабања b_{sr}, mm	0,505	0,895	0,567	0,415	1,036	1,855	1,540	0,805

На слици 9.4.43 дат је графички приказ средње ширине трагова хабања код блокова израђених од основних материјала.

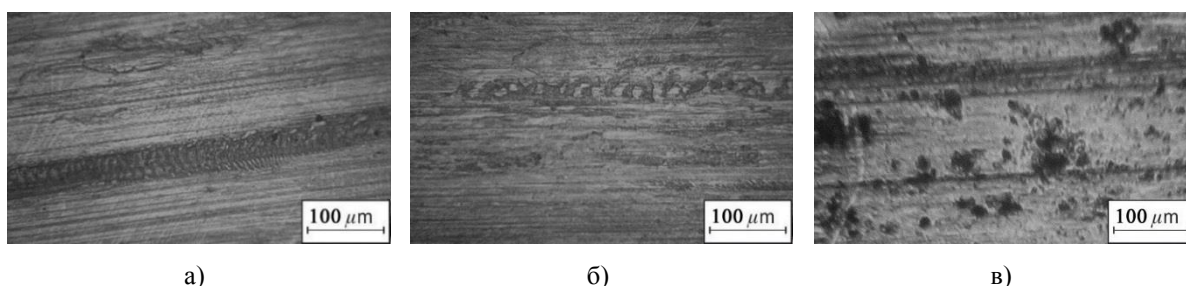


Слика 9.4.43 Графички приказ средњих вредности измерених ширина трагова хабања код основних материјала после контакта од 60 min

У току испитивања триболошких својстава ових материјала, око 50 min од почетка испитивања, код два материјала навара изведених електродама E DUR 600 и E Mn 17 Cr 13 дошло је до нагле промене коефицијента трења и повећања ширине трага хабања на једном делу испитиваних узорака. Измерена средња ширина трага хабања код навара нанетог електродом E DUR 600 је износила $b_{sr}= 1,480 \text{ mm}$, а код навара нанетог електродом E Mn 17 Cr 13 је износила $b_{sr}= 1,773 \text{ mm}$. Ово се десило и када је процес испитивања поновљен на истим узорцима (блоковима) готово исто време од почетка испитивања.

Ова појава је највероватније настала услед недовољне количине средства за подмазивање на контактним површинама, наглог повећања температуре у зони контакта и сличности микроструктура испитиваних материјала блокова и материјала диска када су створени услови за настајање и кидање микрозавара формираних између микронеравнина на контактним површинама ових материјала. Код ова два испитивана материјала до ове појаве долази после готово истог времена од почетка испитивања, а манифестује се слично као и на почетку свих ових испитивања, док не дође до поравнавања микронеравнина, после чега се процес устаљује.

На слици 9.4.44 приказан је изглед похабаних површина дискова израђених од челика Č5430 (три комада).



Слика 9.4.44 Изглед похабаних површина дискова – О.М. Č5430: а) диск бр. 1. б) диск бр. 2. в) диск бр. 3.

Отпорност материјала навара и основних материјала одређиван је према два критеријума. Према енергетском критеријуму (коефицијент трења), већу отпорност на хабање има материјал код кога је измерен већи коефицијент трења. Према геометријском критеријуму (ширина трага хабања), већу отпорност на хабање има материјал са мањом ширином трага хабања и обрнуто.

9.4.5 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА

Испитивање триболошких својстава већег броја основних материјала и материјала навара изведено је на физичким моделима (блоковима и дисковима), са циљем одређивања њихове отпорности на хабање и међусобног упоређивања добијених резултата. Сви материјали су испитивани при истим условима, односно по истом режиму како би се могли упоређивати добијени резултати. Отпорност на хабање свих материјала процењује се на основу: величине коефицијента трења и величине ширине трага хабања. Коефицијент трења је мерен у току целог процеса испитивања, а ширина трага хабања је мерена после завршетка процеса. Одређиване су средње вредности коефицијента трења и ширине трага хабања. Већи коефицијент трења и мања ширина трага хабања подразумевају и већу отпорност на хабање испитиваних материјала. У већини случајева, код материјала веће тврдоће установљен је већи коефицијент трења и мања ширина трага хабања, али то није увек тако. У неким случајевима, код једног истог материјала применом ова два критеријума, долази до извесног неслагања резултата. Ово се дешава из разлога што на процес хабања утиче већи број фактора (геометријски, кинематски, физичко-хемијски, енергетски), и што један исти материјал има већу отпорност према једној, а мању према другој врсти хабања.

Може се рећи, да геометријски и физичко-хемијски фактори дефинишу основна својства материјала спрегнутих парова и индиректно утичу на процес хабања. Кинематски, динамички и енергетски фактори дефинишу основне параметре процеса трења и директно утичу на хабање. Бројним истраживањима физичко-хемијских фактора утврђено је да хемијски афинитет материјала спрегнутих парова може битно утицати на процесе трења и хабања. Кристална грађа материјала спрегнутих парова значајно утиче на ове процесе и одређује њихову отпорност на различите врсте хабања.

При испитивањима која су изведена у овом раду уочено је да код спрегнутих материјала чија је иста или слична кристална грађа долази до варирања вредности коефицијента трења и повећања ширине трага хабања, што се десило и при поновљеним испитивањима и то после приближно истог временског интервала. Ова појава се објашњава тиме, што су се у току испитивања створили услови за формирање и кидање фрикционих веза, односно микрозавара на контактним површинама, што је карактеристика адхезионог хабања. Крајњи резултат ове појаве је хаваријско оштећење контактних површина што се јасно види на траговима хабања испитиваних материјала на вара приказаних на слици 9.4.38 (блок бр. 5) и слици 9.4.39 (блок бр. 7).

После ових експерименталних испитивања триболошких својстава већег броја различитих основних материјала и материјала на вара, могу се одабрати материјали за израду, а посебно за репаратуру, оштећених радних делова грађевинске механизације који су у директном контакту са различитим грађевинским материјалима. Овако обимна металографска и триболошка испитивања на физичким моделима наварених спојева, била су неопходна да би се на основу добијених резултата, могла што боље прописати оптимална технологија наваривања радних делова грађевинске механизације.

Предност експерименталних лабораторијских испитивања на физичким моделима, је што се за релативно кратко време може одредити отпорност на хабање неког материјала, али се често поставља питање поузданости добијених резултата. Недостатак експерименталних испитивања на стварним радним деловима у условима експлоатације је што су ова испитивања дуготрајна, али се добијају поузданији резултати отпорности на хабање. Основни разлог што долази до несагласности између експерименталних истраживања у лабораторијским и радним условима јесте, што услови испитивања нису исти, већ у најбољем случају слични. То је разлог што се стварна отпорност на хабање материјала може одредити тек после провере у стварним радним условима. Овако добијени резултати служе за корекцију резултата добијених лабораторијским испитивањима на моделима, односно за њихову верификацију или одбацивање.

9.5 ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ТЕМПЕРАТУРСКОГ ЦИКЛУСА ПРИ НАВАРИВАЊУ РАЗЛИЧИТИХ ВРСТА ЧЕЛИКА

За одређивање температурског циклуса у тачкама испод на вара, као и температурског циклуса за поједине тачке на вара користе се различите аналитичке, аналогне, нумеричке и експерименталне методе [81,93,94,97].

- **Аналитичким методама** могу се решити једноставнији проблем провођења топлоте, уз увођење одговарајућих претпоставки и упрошћења.

- **Аналогним методама** процес провођења, односно простирања топлоте описује се једначинама извођењем за различите физичке појаве. Може се успоставити корелација између топлотних и електричних величина, али и ове методе имају ограничења при решавању сложенијих проблема провођења топлоте.

- **Нумеричке методе** су нашле значајну примену за прорачун температурских поља, напона, деформација и др., а највећу примену имају тзв. *итеративне инжењерске методе*, али и ове методе имају својих предности и недостатака. Недостаци нумеричких метода су: дуго време припреме програма и уноса података, дуго време прорачуна, потреба да рачунари имају велику меморију, тешкоће да се постигне довољна тачност и неопходност да се добијени резултати верификују експериментално. Предности ових метода су: добијање оријентационих резултата, могућност израде универзалних програма, формирање тзв. *идеалног модела* који се може кориговати коришћењем експерименталних резултата.

- **Експерименталне методе** се заснивају на мерење температуре у карактеристичним тачкама или појединим областима навареног споја. За одређивање расподеле температура у зони утицаја топлоте користе се термопарови који мере температуре у појединим тачкама, или оптичке камере које мере температуре у појединим областима на бази инфрацрвеног зрачења, а емитује га свако тело које одаје топлоту. Резултати експерименталног одређивања

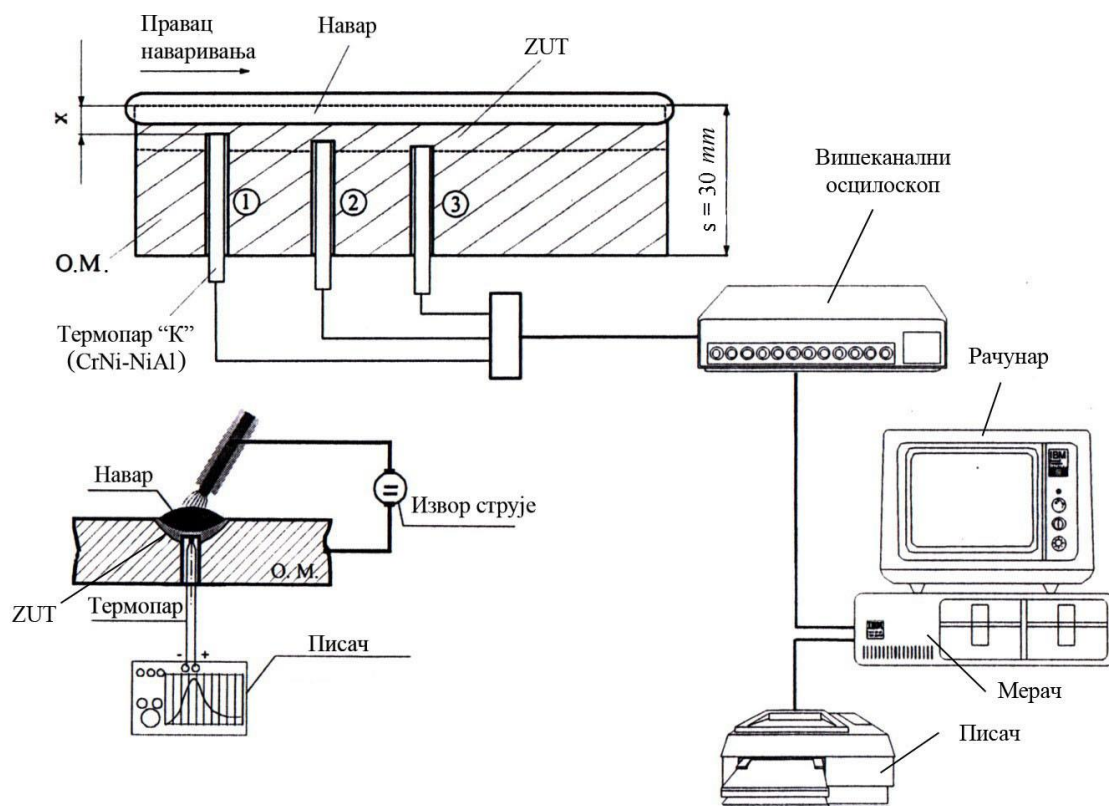
температурског поља служе за проверу резултата добијених другим методама и њихову верификацију [93,95,97].

Од већег броја развијених метода за прорачун топлотног биланса при наваривању највише су у примени емпиријске формуле Рикалина, формуле на бази граничне дебљине материјала и формула јапанских аутора. За одређивање температурског поља при наваривању често се користе нумеричке итеративне методе [87,170]. За мерење температуре у ZUT-у углавном се користе термопарови који се повезују на вишеканални осцилоскоп. Рачунар са писачем омогућава регистровање, мерење и меморисање континуалне промене температура у току одређеног времена. За експериментална испитивања у овом раду је коришћен мерни ланац са термопаровима, и упоређивани добијени резултати времена хлађења са резултатима добијеним другим методама. При томе су варирани параметри наваривања, а процес наваривања је изведен на више различитих нелегираних и легираних челика.

9.5.1 ОДРЕЂИВАЊЕ ТЕМПЕРАТУРСКИХ ЦИКЛУСА КОД НЕЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА

Овде се детаљније разматра експериментално одређивање температурског циклуса помоћу термопарова.

При овим истраживањима коришћени су оклопљени термопарови из класе типа „К” (*Chromel-Alumel NiCr – NiAl*) пречника од 1,5 mm, произвођача PHILIPS. Испитивани узорак, и мерна места схематски су приказана на слици 9.5.1.

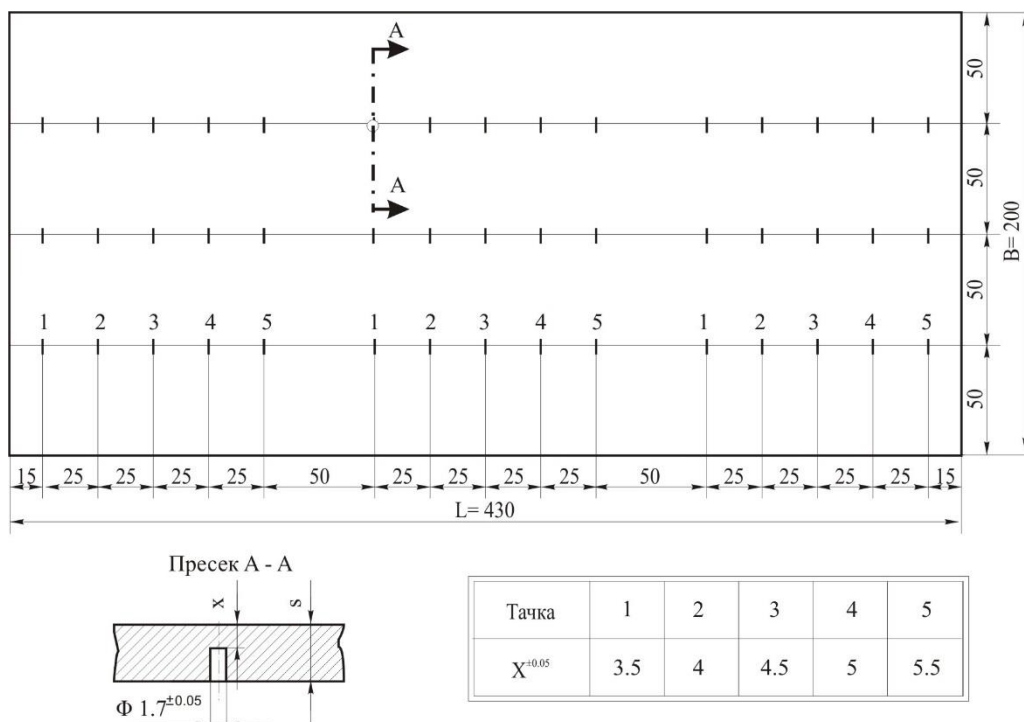


Слика 9.5.1 Схема мерења температура при наваривању одабраних узорака [97]

9.5.1.а Избор материјала и припрема узорака за мерење температура при наваривању

Узорци за мерење температура при наваривању израђени су у облику плоча различитих дебљина, у којима су на одређеним растојањима избушена места за постављање термопарова. Мерна места истог пречника од 1,7 mm избушена су на различитим дубинама од навариване површине, да би могла да се измери температура по целој ширини ZUT-а. На тако припремљеним мерним местима убацивани су и причвршћивани оклопљени термопарови пречника од 1,5 mm. На слици 9.5.2 приказан је узорак са распоредом мерних места на навариваним плочама.

За израду узорка на којима су изведена мерења и снимања температурских циклуса, коришћени су нелегирани челици Š0561, Š1220, Š1430 и Š1531. Одабране су различите дебљине плоча ($s = 10, 20$ и 30 mm). Сагласно различитим основним материјалима и њиховој дебљини, варирани су и дебљине навара, као и параметри наваривања. Коришћено је више врста електрода пречника $d_e = 4$ и 5 mm . Брзина наваривања одређивана је мерењем дужине навара и времена сваког пролаза. Температура претходног слоја мерена је директно помоћу дигиталног уређаја (мерача) типа „TASTOTHERM D 1200“ и контролисана индиректно са температурског циклуса тј. T-t дијаграма (температура-време).



Слика 9.5.2 Схематски приказ распореда мерних места температуре на припремљеном узорку [97]

9.5.1.6 Експериментални резултати снимљених температурских циклуса при наваривању нелегираних челика

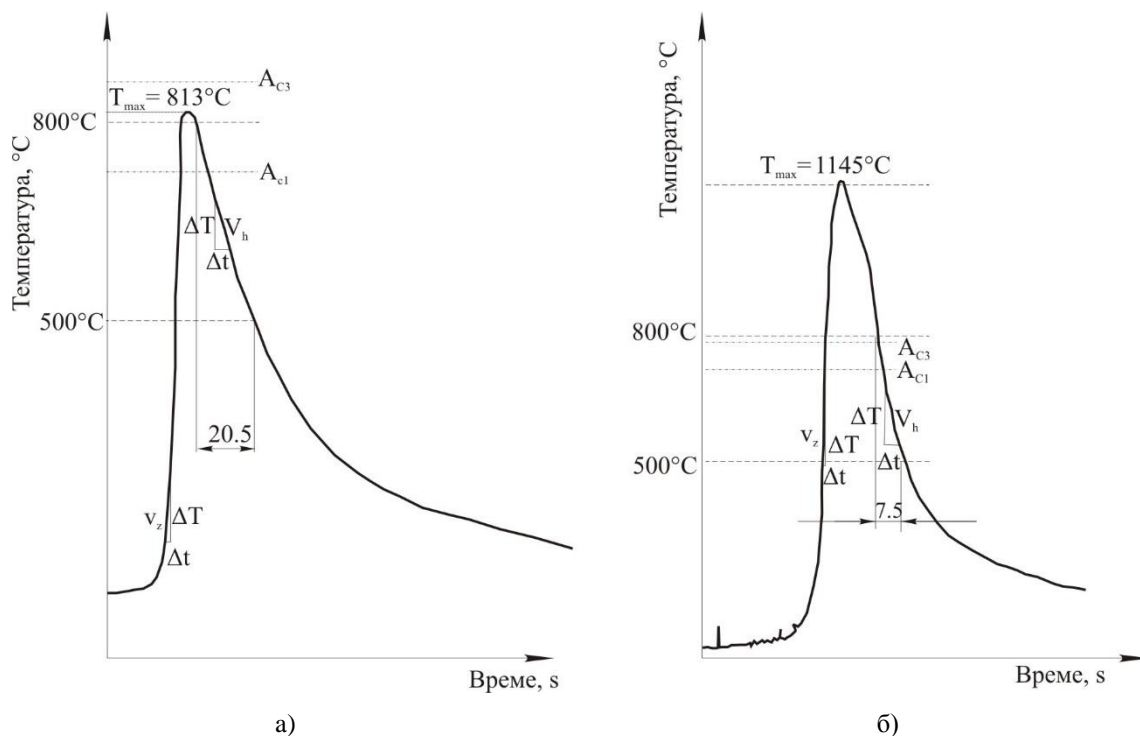
Мерење температура, и снимање температурског циклуса у ZUT-у изведено је помоћу писача “SERVEGOR SRE 541” који омогућава континуално регистровање промене температуре у току времена. Најповољнија размера ординате (T) и апсцисе (t), добија се подешавањем типа скале, опсега скале, брзине кретања папира на писачу и др.

Променом процесних параметара REL наваривања (d_e, I, U, v_z, T_p) мења се и унос топлоте у основним материјалима. Параметри наваривања и погонска енергија (унос топлоте) дати су у таблици 9.5.1.

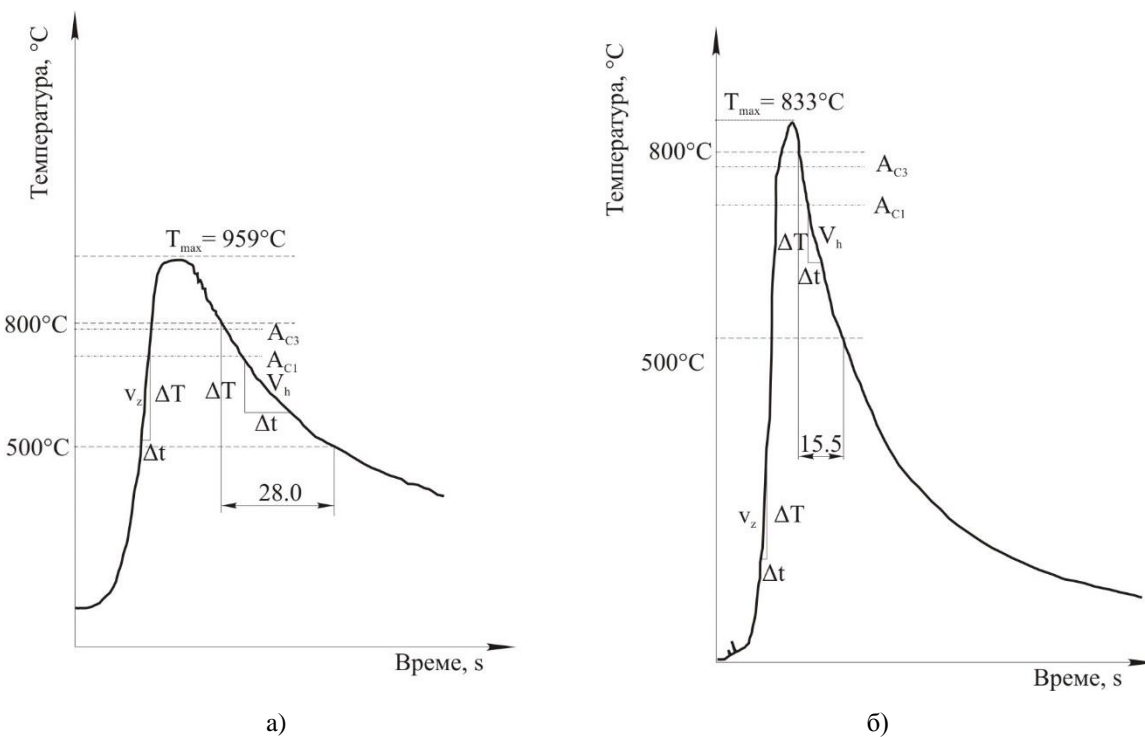
Таблица 9.5.1 Параметри наваривања при одређивању температурских циклуса [97]

Дебљина О.М. s, mm	Пречник електроде d_e, mm	Струја наваривања I, A	Радни напон U, V	Брзина наваривања $v_z, \text{cm/s}$	Погонска енергија $q_i = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i, \text{J/cm}$
10	4	140	25,6	0,136-0,162	17650 - 21100
20					
30	5	210	28,5	0,098-0,286	16730 - 48600

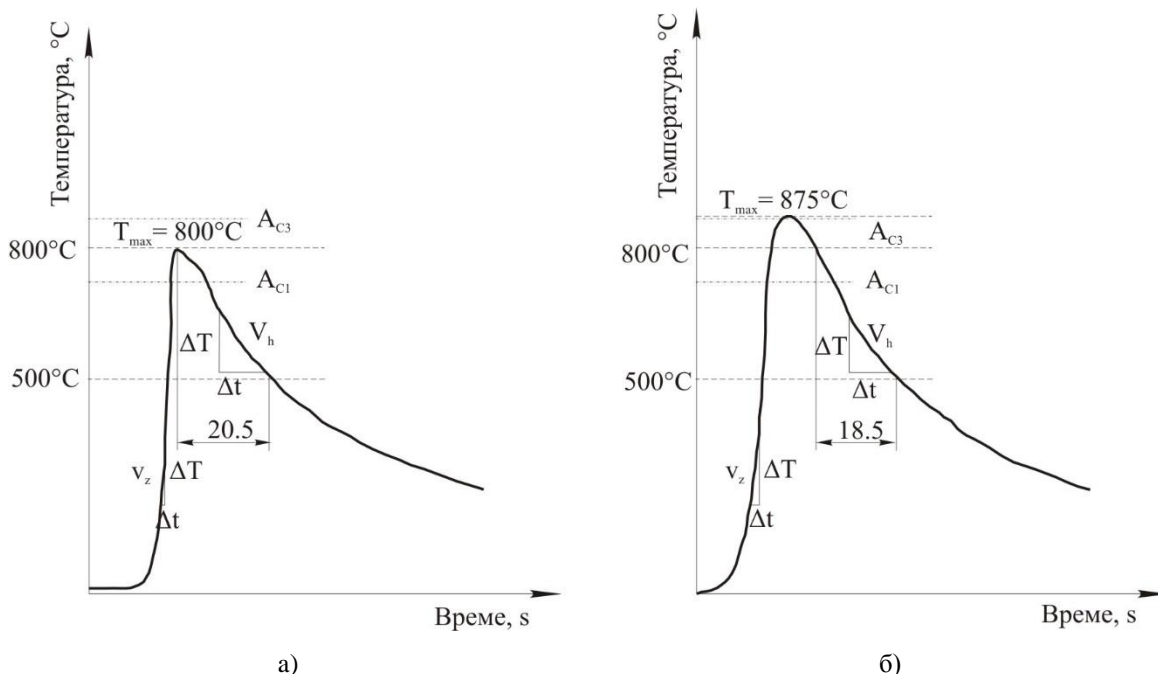
На сликама 9.5.3 до 9.5.7 приказани су само неки карактеристични температурски циклуси добијени снимањем помоћу оклопљених термопарова за различите врсте основних материјала. При извођењу ових експеримената варирани су следећи параметри: дебљина основног материјала (s), растојања мерних тачака навариване површине плоче (x), пречник електроде (d_e), температура предгревања (T_p) и погонска енергија наваривања (q_i).



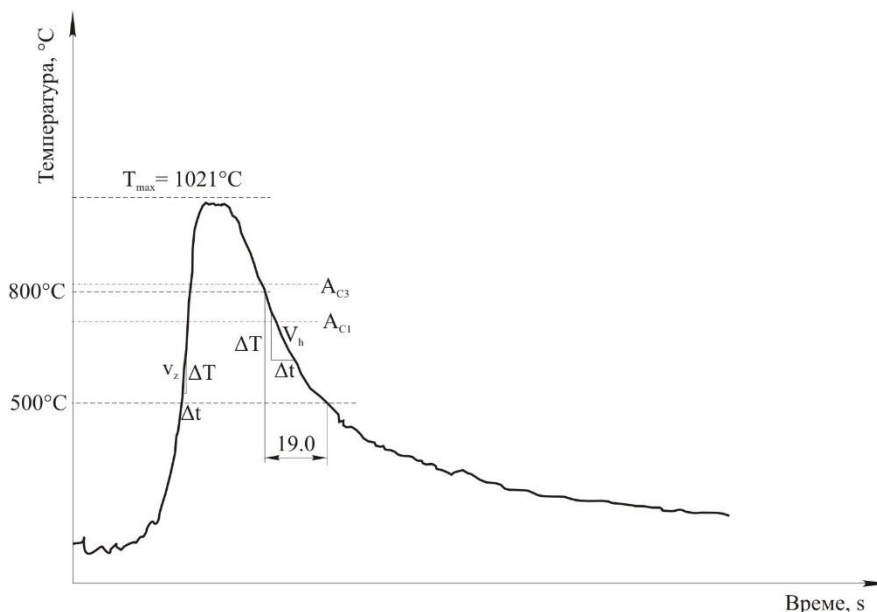
Слика 9.5.3 Температурски циклус ZUT-а при наваривању: а) Č0561 ($s=10\text{ mm}$, $x=3,5\text{ mm}$, $d_e=5\text{ mm}$, $T_p=96^{\circ}\text{C}$, $q_l=16700\text{ J/cm}$); б) Č1530 ($s=20\text{ mm}$, $x=4\text{ mm}$, $d_e=4\text{ mm}$, $T_p=50^{\circ}\text{C}$, $q_l=17900\text{ J/cm}$) [97]



Слика 9.5.4 Температурски циклус ZUT-а при наваривању: а) Č1530 ($s=20\text{ mm}$, $x=4\text{ mm}$, $d_e=5\text{ mm}$, $T_p=100^{\circ}\text{C}$, $q_l=35800\text{ J/cm}$); б) Č1531 ($s=10\text{ mm}$, $x=4\text{ mm}$, $d_e=4\text{ mm}$, $T_p=20^{\circ}\text{C}$, $q_l=18200\text{ J/cm}$) [97]



Слика 9.5.5 Температурски циклус ZUT-а при наваривању: а) Č1220 ($s = 10 \text{ mm}$, $x = 3,5 \text{ mm}$, $d_e = 4 \text{ mm}$, $T_p = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_l = 20000 \text{ J/cm}$); б) Č122 ($s = 10 \text{ mm}$, $x = 4 \text{ mm}$, $d_e = 4 \text{ mm}$, $T_p = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_l = 17600 \text{ J/cm}$) [97]



Слика 9.5.6 Температурски циклус ZUT-а при наваривању Č1430 ($s = 30 \text{ mm}$, $x = 4 \text{ mm}$, $d_e = 5 \text{ mm}$, $T_p = 97 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_l = 38700 \text{ J/cm}$) [97]

При вишеслојном наваривању добија се сложен температурски циклус код кога се достигнуте максималне температуре при наношењу сваког слоја разликују, иако су коришћени исти параметри наваривања. Примена неког параметара може знатно да утиче на температурски циклус, односно температурско поље око навара, а највећи утицај има погонска енергија наваривања [97].

9.5.1.в Одређивање времена хлађења $t_{8/5}$ добијеног различитим методама

Експериментална испитивања температурских поља око навара, и температурских циклуса појединих тачака испод навара, између осталог служе и за релативно тачно одређивање времена хлађења $t_{8/5}$ у температурском интервалу најмање стабилности аустенита, које има пресудан утицај на својства ZUT-а. Време $t_{8/5}$ очитано са температурских циклуса може

послужити за проверу тачности најчешће примењиваних аналитичких, нумеричких и емпиријских формула, и за њихово рангирање, чиме се избегава дуг и сложен процес експерименталног одређивања. Овде је упоређивано време хлађења $t_{8/5}$ добијено путем експеримената са добијеним временима хлађења $t_{8/5}$ израчунатим помоћу формуле јапанских аутора, формула на бази граничне дебљине и формула Рикалина добијених преко температурских циклуса. Термофизичке константе и остале податке за прорачун времена хлађења по наведеним методама, усвојене су из одговарајуће литературе [20,36,50,63,91,166]. Иако су ове величине зависне од температуре и координата тачака у којима се одређује температура, овде су усвајане као константне вредности. У таблицама 9.5.2., 9.5.3. и 9.5.4., прегледно су приказане упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ добијене експериментално и другим рачунским методама за различите режиме наваривања.

Таблица 9.5.2 Упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ за различите врсте основних материјала дебљине $s=10\text{ mm}$ [97]

Врста основног материјала	Температура предгревања $T_o - T_p, ^\circ\text{C}$	Пречник електроде d_e, mm	Погонска енергија наваривања $q_l, \text{J/cm}$	Време хлађења $t_{8/5}, \text{s}$			
				$(t_{8/5})^J$	$(t_{8/5})^{Sgr}$	$(t_{8/5})^{EXP}$	$(t_{8/5})^R$
Č1220	20	4	20082	19,6	57,7	20,5	31,0
	20	4	17650	16,1	44,6	18,5	25,5
	138	5	29400	54,6	245,4	44,5	79,0
	36	5	24758	28,3	95,3	29,0	44,0
Č1531	20	4	18200	16,9	47,4	15,5	26,8
	36	4	19413	19,6	58,6	20,0	31,5
Č0561	96	5	16736	19,7	61,1	20,5	34,0
	80	5	40551	69,8	326,3	57,5	84,0
	62	5	34087	50,3	208,2	47,5	68,0
	20	5	34588	44,2	171,2	40,0	60,0

Напомена: $(t_{8/5})^J$ – формула јапанских аутора; $(t_{8/5})^{Sgr}$ – формула на бази граничне дебљине материјала; $(t_{8/5})^{EXP}$ – експеримент; $(t_{8/5})^R$ – формула Рикалина.

Таблица 9.5.3. Упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ за Č1530 дебљине $s=20\text{ mm}$ [97]

Врста основног материјала	Температура предгревања $T_o - T_p, ^\circ\text{C}$	Пречник електроде d_e, mm	Погонска енергија наваривања $q_l, \text{J/cm}$	Време хлађења $t_{8/5}, \text{s}$			
				$(t_{8/5})^J$	$(t_{8/5})^{Sgr}$	$(t_{8/5})^{EXP}$	$(t_{8/5})^R$
Č1530	20	4	19809	7,6	14,0	8,5	10,0
	50	4	17975	7,3	13,5	7,5	10,1
	20	4	21101	8,4	15,9	9,5	12,1
	20	5	37807	19,4	46,4	23,5	33,0
	20	5	48610	28,3	76,7	28,0	49,5
	20	5	45533	23,1	58,7	18,0	40,0
	20	5	35692	17,8	41,3	16,0	30,0
	100	5	35817	24,1	65,0	28,0	45,0

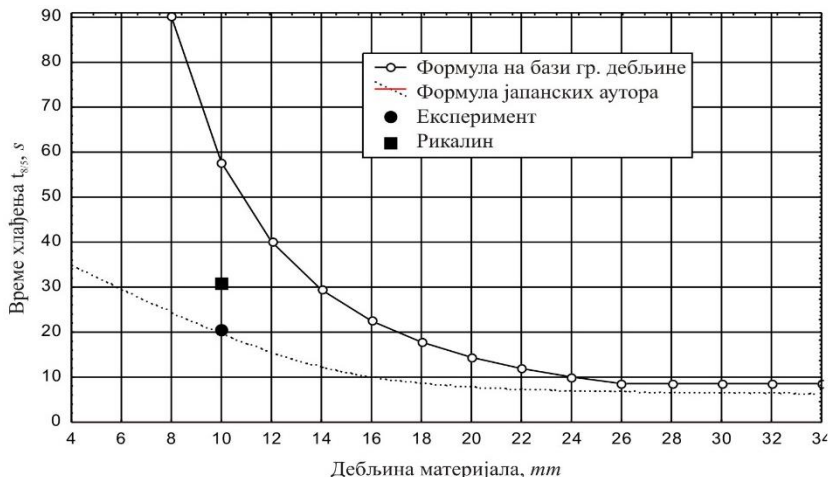
Напомена: $(t_{8/5})^J$ – формула јапанских аутора; $(t_{8/5})^{Sgr}$ – формула на бази граничне дебљине материјала; $(t_{8/5})^{EXP}$ – експеримент; $(t_{8/5})^R$ – формула Рикалина.

Таблица 9.5.4. Упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ за $\check{C}1430$ дебљине $s=30\text{ mm}$ [97]

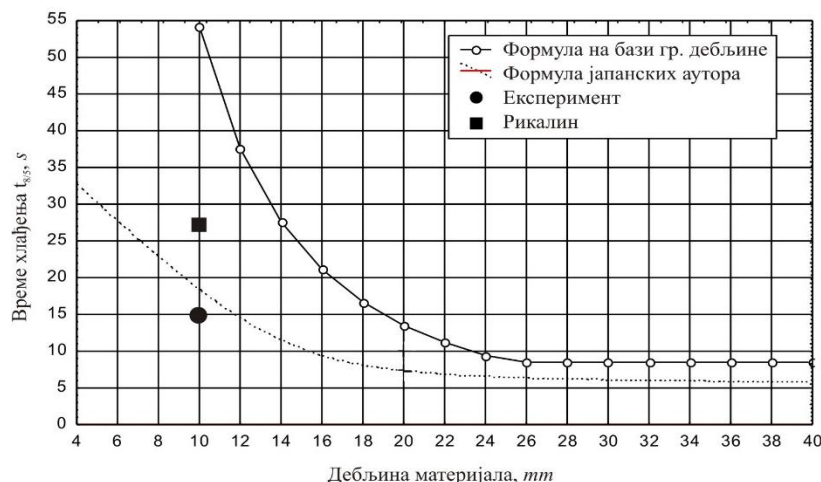
Врста основног материјала	Температура предгревања $T_o - T_p, ^\circ\text{C}$	Пречник електроде d_e, mm	Погонска енергија наваривања $q_l, \text{J/cm}$	Време хлађења $t_{8/5}, \text{s}$			
				$(t_{8/5})^J$	$(t_{8/5})^{Sgr}$	$(t_{8/5})^{EXP}$	$(t_{8/5})^R$
$\check{C}1430$	71	5	28356	13,1	16,1	12,5	11,5
	97	5	38667	23,0	36,4	19,0	16,2
	20	5	34027	14,3	18,4	14,7	11,2
	20	5	34255	14,4	18,7	17,5	11,5
	20	5	26863	10,0	11,5	10,3	9,0

Напомена: $(t_{8/5})^J$ – формула јапанских аутора; $(t_{8/5})^{Sgr}$ – формула на бази граничне дебљине материјала; $(t_{8/5})^{EXP}$ – експеримент; $(t_{8/5})^R$ - формула Рикалина.

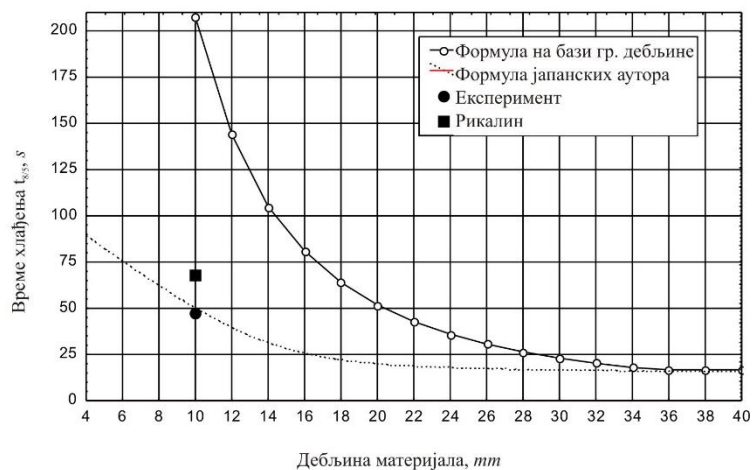
На сликама 9.5.7 до 9.5.11 дати су графички неки резултати времена хлађења $t_{8/5}$ добијени експериментално и различитим рачунским методама.



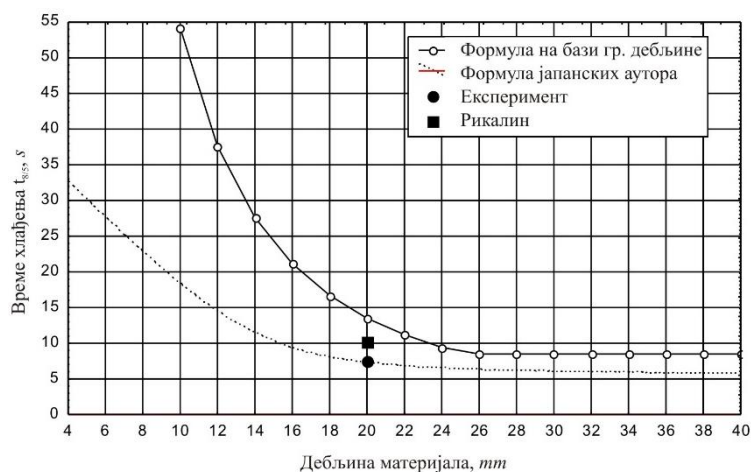
Слика 9.5.7 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за $\check{C}1220$ дебљине $s=10\text{ mm}$, са параметрима наваривања: $T_p = 20^\circ\text{C}$, $d_e = 4\text{ mm}$, $q_l = 20082\text{ J/cm}$ [97]



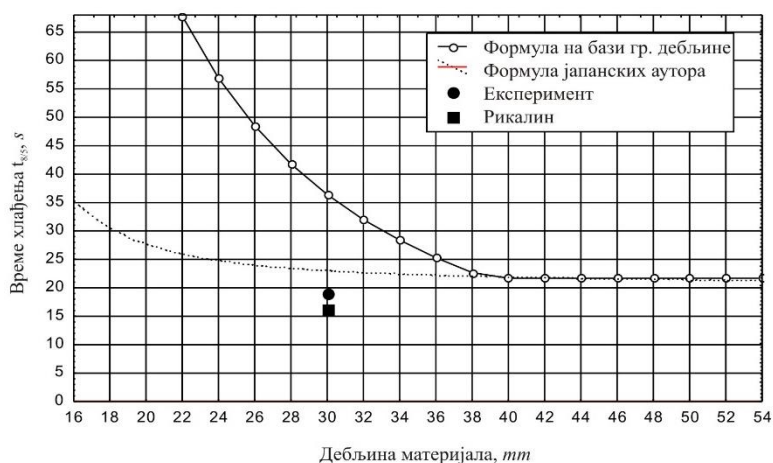
Слика 9.5.8 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за $\check{C}1531$ дебљине $s=10\text{ mm}$, при наваривању: $T_p = 36^\circ\text{C}$, $d_e = 4\text{ mm}$, $q_l = 19413\text{ J/cm}$ [97]



Слика 9.5.9 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за Ć0561 дебљине $s = 10$ mm, при наваривању: $T_p = 62$ °C, $d_e = 5$ mm, $q_l = 34017$ J/cm [97]



Слика 9.5.10 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за Ć1530 дебљине $s = 20$ mm, при наваривању: $T_p = 50$ °C, $d_e = 4$ mm, $q_l = 17975$ J/cm [97]



Слика 9.5.11 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за Ć1430 дебљине $s = 30$ mm, при наваривању: $T_p = 97$ °C, $d_e = 5$ mm, $q_l = 38667$ J/cm [97]

Анализом резултата на претходним сликама 9.5.7 до 9.5.11 јасно се види да су резултати времена хлађења $t_{8/5}$ добијени израчунавањем помоћу формуле јапанских аутора, најприближнији резултатима добијеним експерименталним испитивањима. У нама доступној литератури [36,50,166] постоје дијаграми температурских циклуса добијени рачунским методама, са којима смо упоређивали наше експериментално снимане дијаграме.

9.5.2 ОДРЕЂИВАЊЕ ТЕМПЕРАТУРСКИХ ЦИКЛУСА КОД ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА

Као и при одређивању температурских циклуса код угљеничних, односно нелегираних челика, и код легираних челика, коришћене су исте рачунске методе и експериментална испитивања. Коришћена је иста опрема, и температурски дијаграми су одређивани помоћу термопарова. Такође, као и у претходном случају, температуре претходних слојева мерене су директно помоћу дигиталног мерача температуре, док је време $t_{8/5}$ читавано са T-t дијаграма (температура-време).

9.5.2.а Избор материјала и припрема узорка за мерење температура при наваривању

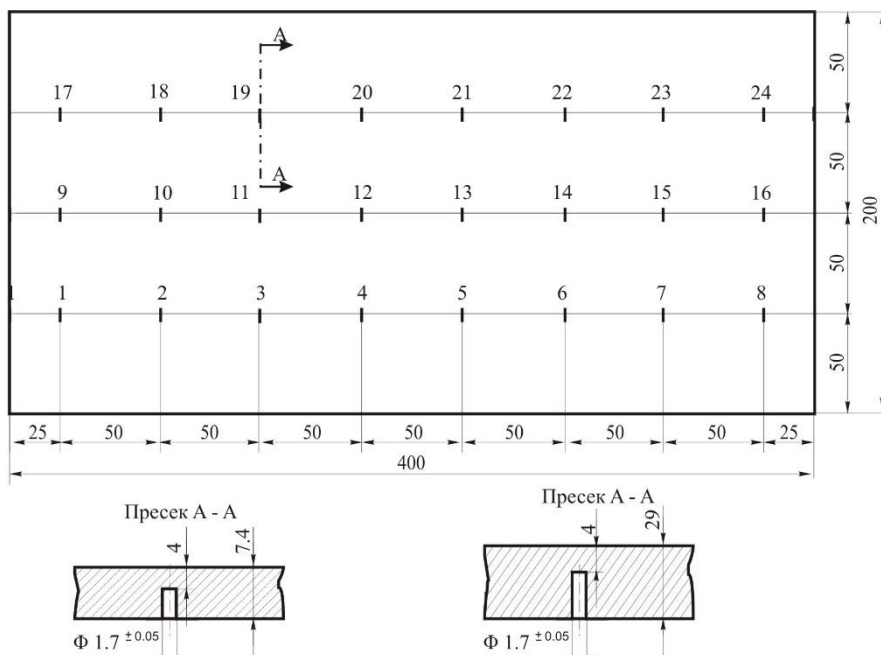
Узорци за мерење температура при наваривању су израђени у облику плоча од две врсте легираних челика $\check{C}4751$ и $\check{C}5742$, а плоче су биле различите дебљине $s = 7,4$ и 29 mm . Сходно врсти и дебљини основног материјала, бирани су и параметри REL наваривања. Променом процесних параметара наваривања (d_e, I, U, v_z, T_p) мењао се и унос топлоте у основном материјалу. Параметри наваривања приказани су у табlici 9.5.5.

Таблица 9.5.5. Параметри наваривања при снимању температурских циклуса [97]

Дебљина О.М. $s, \text{ mm}$	Пречник електроде $d_e, \text{ mm}$	Струја наваривања $I, \text{ A}$	Радни напон $U, \text{ V}$	Брзина наваривања $v_z, \text{ cm/s}$	Погонска енергија $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i, \text{ J / cm}$
7,4	3,25	115	25	0,136-0,241	9543 - 16911
29	5,0	190	28	0,130-0,258	16500 - 32738

Електроде за наваривање, пречника $d_e = 3,25$ и 5 mm , су од материјала сличних основном материјалу. Температура предгревања, $T_p = 20 - 290^\circ\text{C}$ при наваривању узорка дебљине $s = 7,4\text{ mm}$, односно $T_p = 20 - 355^\circ\text{C}$ за узорке дебљине $s = 29\text{ mm}$.

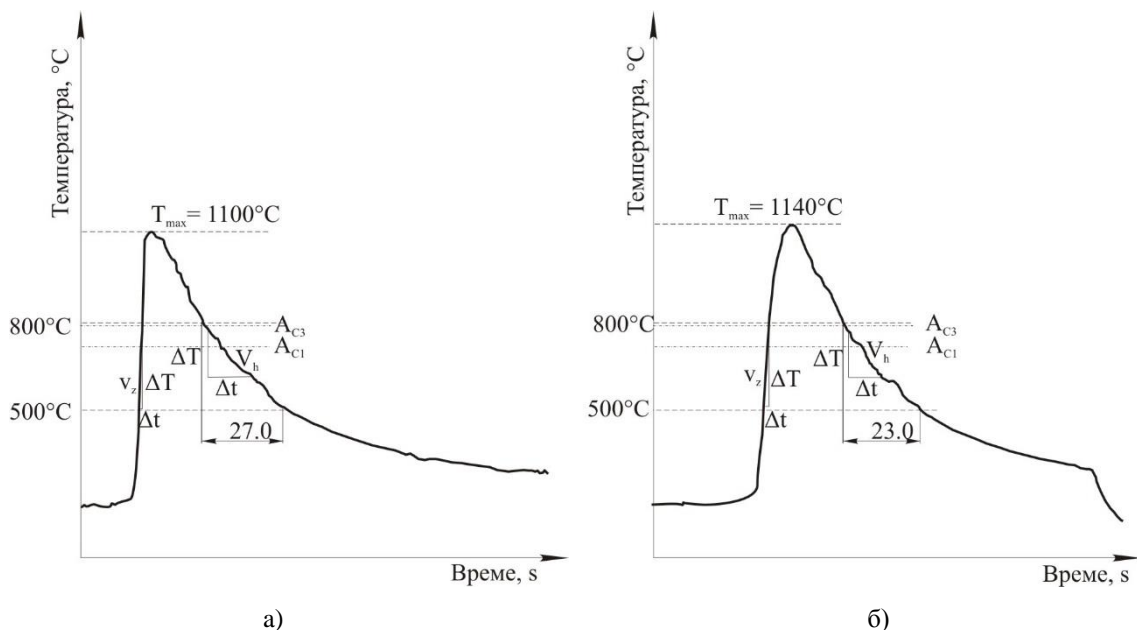
На слици 9.5.12. приказана је схема припремљеног узорка плоче са распоредом и растојањем мерних места од навариване површине, где се види да је мерење температуре код свих припремљених узорка изведено на дубини $x = 4\text{ mm}$ од навариване површине.



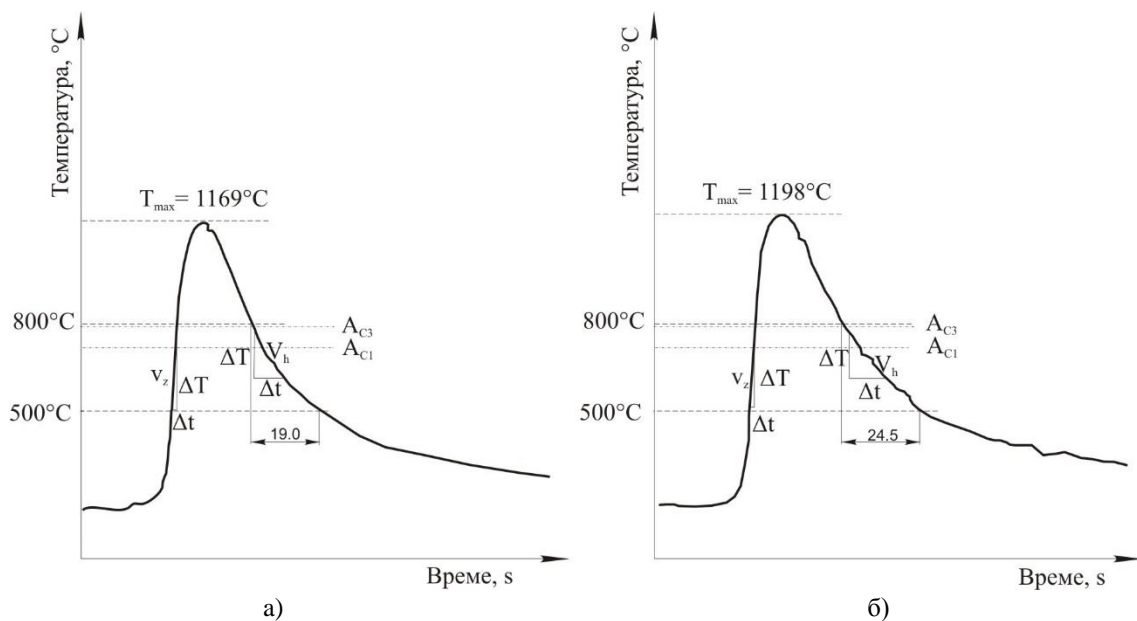
Слика 9.5.12 Схематски приказ распореда мерних места температуре на припремљеним узорцима [97]

9.5.2.6 Експериментални резултати снимљених температурских циклуса при наваривању легираних челика

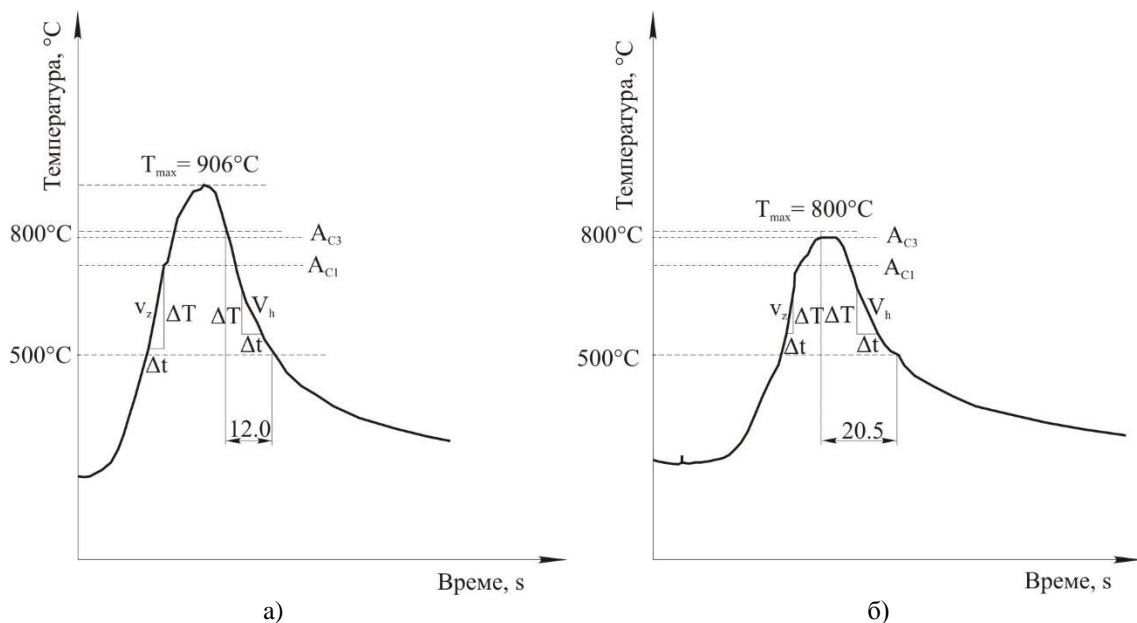
Температурски циклуси ZUT-а за обе врсте испитиваних основних материјала су слични, па ће на овом месту бити приказани резултати мерења промене температуре само за неке карактеристичне тачке. Ови температурски циклуси су приказани на сликама 9.5.13 до 9.5.16 за Č5742 различитих дебљина ($s = 7,4$ и 29 mm). Испитивани узорци наваривани су REL-ом поступком електродама $d_e = 3,25$ и 5 mm, при различитим брзинама наваривања.



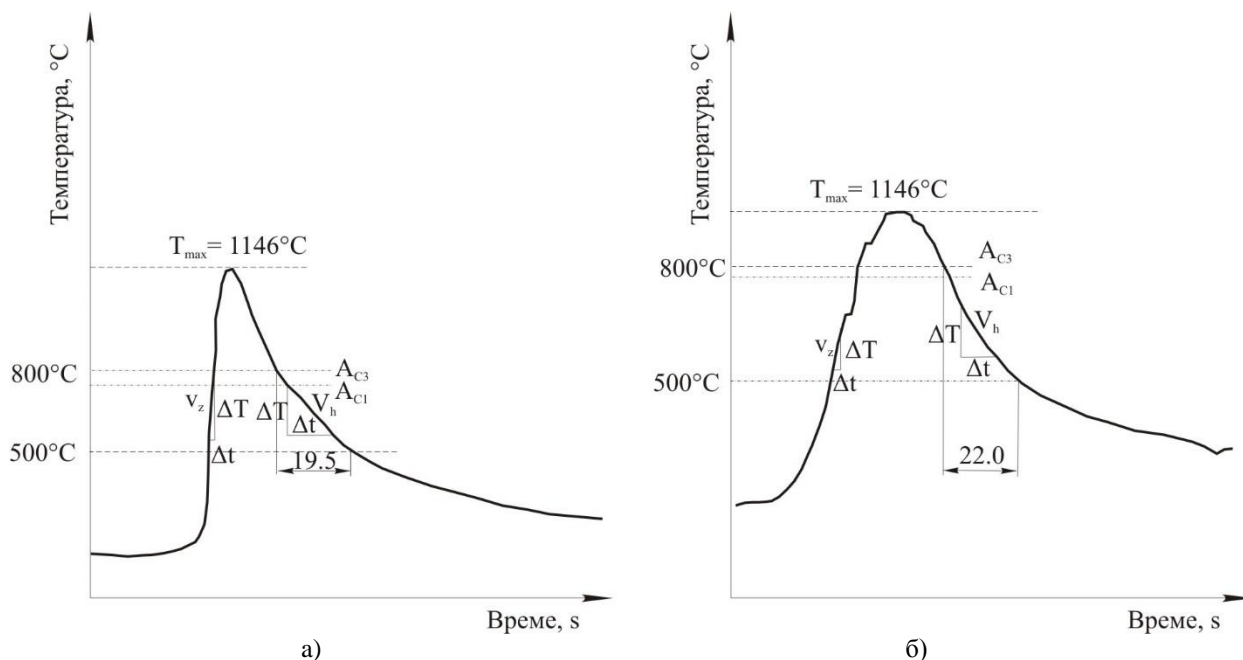
Слика 9.5.13 Температурски циклус ZUT-а при наваривању Č5742 дебљине $s = 7,4$ mm, електродом пречника $d_e = 3,25$ mm: а) наваривање ($T_p = 180^\circ\text{C}$, $v_z = 0,208$ cm/s, $q_l = 11058$ J/cm); б) наваривање ($T_p = 178^\circ\text{C}$, $v_z = 0,190$ cm/s, $q_l = 12105$ J/cm) [97]



Слика 9.5.14 Температурски циклус ZUT-а при наваривању Č5742 дебљине $s = 7,4$ mm; електродом пречника $d_e = 3,25$ mm: а) наваривање ($T_p = 178^\circ\text{C}$, $v_z = 0,183$ cm/s, $q_l = 12568$ J/cm); б) наваривање ($T_p = 180^\circ\text{C}$, $v_z = 0,150$ cm/s, $q_l = 15333$ J/cm) [97]



Слика 9.5.15 Температурски циклус ZUT-а при наваривању Č5742 дебљине $s = 29$ mm, електродом пречника $d_e = 5$ mm: а) наваривање ($T_p = 204^{\circ}\text{C}$, $v_z = 0,258$ cm/s, $q_l = 16500$ J/cm); б) наваривање ($T_p = 235^{\circ}\text{C}$, $v_z = 0,185$ cm/s, $q_l = 23000$ J/cm) [97]



Слика 9.5.16 Температурски циклус ZUT-а при наваривању Č5742 различитих: дебљина и параметара наваривања: а) дебљина материјала $s = 7.4$ mm и наваривање ($d_e = 3,25$ mm, $T_p = 169^{\circ}\text{C}$, $v_z = 0,215$ cm/s, $q_l = 10698$ J/cm); б) дебљина материјала $s = 29$ mm и наваривање ($d_e = 5$ mm, $T_p = 218^{\circ}\text{C}$, $v_z = 0,152$ cm/s, $q_l = 28049$ J/cm) [97]

9.5.2.в Упоредни преглед времена хлађења $t_{8/5}$ добијено различитим методама

Слично као и при одређивању температурских циклуса при наваривању нелегираних, односно угљеничних челика, и овде су коришћене различите аналитичке методе и експериментална метода одређивања температурских циклуса применом термпарова. Одређивањем температурских циклуса добијени су његови параметри, а један од најбитнијих параметара је време хлађења $t_{8/5}$. Његовим варирањем и познавањем може да се регулисати процес наваривања да се добије навар захтеваног квалитета, при наваривању различитих врста челика. У таблицама 9.5.6 и 9.5.7 дати су упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за Č5742 добијених различитим аналитичким методама, и експерименталном методом варирањем различитих параметара наваривања.

Таблица 9.5.6 Упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ ($s = 7,4 \text{ mm}$, $I = 115 \text{ A}$, $U = 25 \text{ V}$, $q_{ef} = 2300 \text{ W}$) [97]

Тачка / Слој	Температура предгревања $T_0 (T_p)$, °C	Брзина наваривања v_z , cm/s	Погонска енергија наваривања q_b , J/cm	Време хлађења $t_{8/5}$, s			
				$(t_{8/5})^J$	$(t_{8/5})^{Sgr}$	$(t_{8/5})^{EXP}$	$(t_{8/5})^R$
1/1	20	0,238	9663	8,62	24,00	14,50	16,5-20,0
2/1	180	0,150	15333	32,90	163,20	24,50	59-68
2/2	290	0,158	14557	55,80	386,70	31,00	104-113
3/1	169	0,215	10698	18,19	73,40	19,50	36-43
9/1	185	0,136	16911	39,00	206,00	23,50	70-76
10/1	280	0,169	13609	47,35	304,50	34,00	94-98
11/1	178	0,190	12105	22,80	100,30	23,00	48-54
17/1	273	0,172	13372	44,20	273,90	28,00	88-90
18/1	180	0,208	11058	20,10	84,90	27,00	42-50
18/2	240	0,175	13142	35,50	194,20	30,50	71-78
19/1	178	0,183	12568	24,05	107,30	19,00	48,5-57
21/1	20	0,186	12192	13,34	43,63	16,00	24-26
21/2	70	0,241	9543	10,14	31,17	16,50	20,5-23,5
24/1	20	0,220	10560	9,85	29,00	17,00	20-21

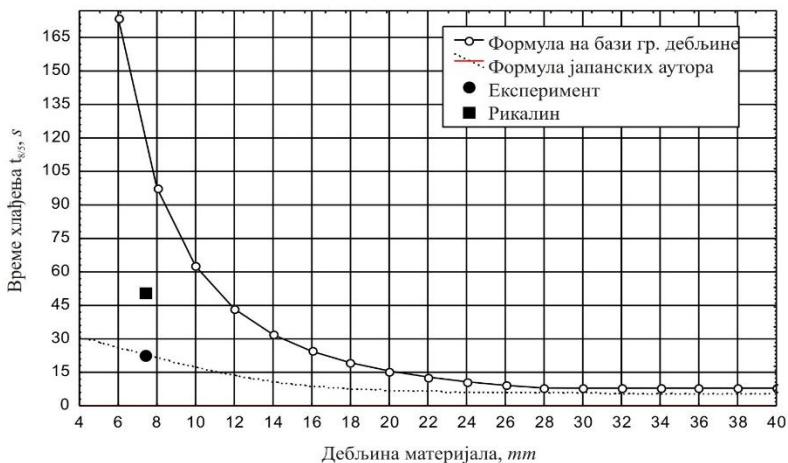
Напомена: $(t_{8/5})^J$ – формула јапанских аутора; $(t_{8/5})^{Sgr}$ – формула на бази граничне дебљине материјала ; $(t_{8/5})^{EXP}$ – експеримент; $(t_{8/5})^R$ - формула Рикалина.

Таблица 9.5.7 Упоредне вредности времена хлађења $t_{8/5}$ ($s = 29 \text{ mm}$, $I = 190 \text{ A}$, $U = 28 \text{ V}$, $q_{ef} = 4256 \text{ W}$) [97]

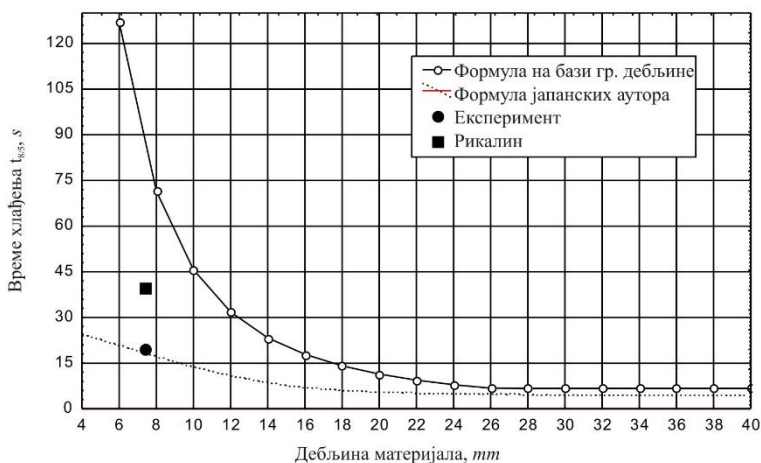
Тачка / Слој	Температура предгревања $T_0 (T_p)$, °C	Брзина наваривања v_z , cm/s	Погонска енергија наваривања q_b , J/cm	Време хлађења $t_{8/5}$, s			
				$(t_{8/5})^J$	$(t_{8/5})^{Sgr}$	$(t_{8/5})^{EXP}$	$(t_{8/5})^R$
1/1	20	0,148	28757	11,20	14,10	16,00	10,8-12,5
6/1	204	0,258	16500	10,43	14,89	12,00	13,5-14,5
6/2	204	0,257	16912	10,83	15,52	12,00	13,6-14,7
7/1	218	0,152	28049	24,80	47,80	22,00	23,2-25,5
7/2	231	0,142	29870	29,30	60,40	24,00	27,0-29,6
13/1	178	0,167	25414	17,60	28,80	16,00	18,0-20,0
14/1	231	0,161	26436	24,36	47,30	25,00	20,0-27,0
16/1	355	0,130	32738	76,17	287,50	78,00	70,5-74,5
19/2	271	0,163	26136	30,12	66,80	23,00	30,0-32,0
21/1	235	0,185	23000	20,20	37,10	20,50	21,0-23,5

Напомена: $(t_{8/5})^J$ – формула јапанских аутора; $(t_{8/5})^{Sgr}$ – формула на бази граничне дебљине материјала ; $(t_{8/5})^{EXP}$ – експеримент; $(t_{8/5})^R$ - формула Рикалина.

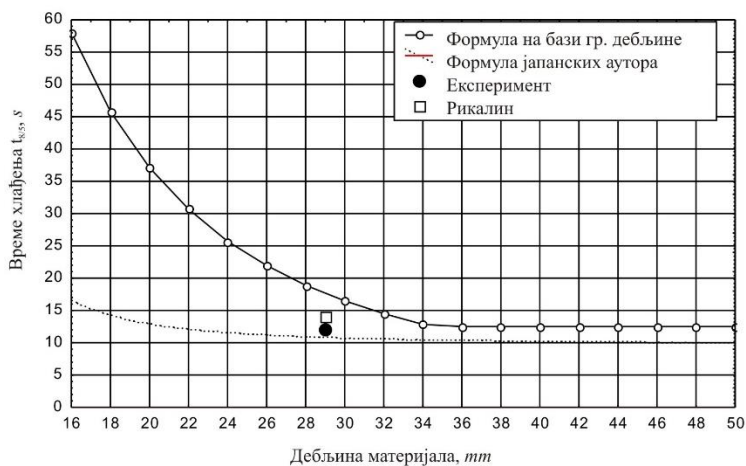
На сликама 9.5.17 до 9.5.20 дат је графички приказ карактеристичних упоредних резултата времена хлађења $t_{8/5}$ добијеног различитим рачунским и експерименталном методом.



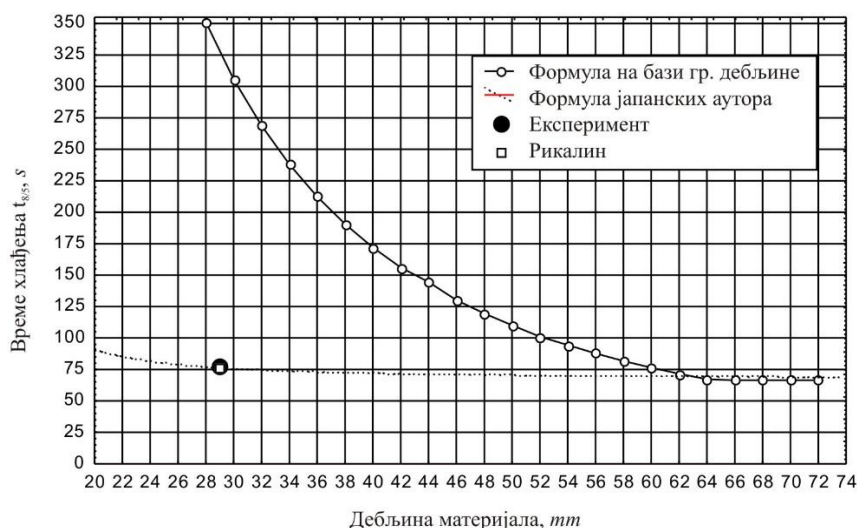
Слика 9.5.17 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за О.М.-Č5742 дебљине $s=7,4$ mm са параметрима наваривања: $T_p = 178$ °C, $d_e = 3,25$ mm, $q_l = 12105$ J/cm [97]



Слика 9.5.18 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за О.М.-Č5742 дебљине $s=7,4$ mm, са параметрима наваривања: $T_p = 169$ °C, $d_e = 3,25$ mm, $q_l = 10698$ J/cm [97]



Слика 9.5.19 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за О.М.-Č5742 дебљине $s=29$ mm, са параметрима наваривања: $T_p = 204$ °C, $d_e = 5$ mm, $q_l = 16912$ J/cm [97]



Слика 9.5.20 Упоредни резултати времена хлађења $t_{8/5}$ за Č572 дебелине $s = 29$ mm, при наваривању: $T_p = 355^\circ\text{C}$, $d_e = 5$ mm, $q_l = 32738$ J/cm [97]

Са претходних слика јасно се види да се најбоља сагласност добија између експерименталних резултата и резултата прорачуна помоћу формуле јапанских аутора.

За примењени метод наваривања, познату дебелину основног материјала и одговарајући одабрани режим наваривања, једноставно се може одредити време хлађења $t_{8/5}$ и упоредити са нумеричким или експериментално одређеним временом хлађења $t_{8/5}$. То нам омогућавају дијаграми зависности времена хлађења $t_{8/5}$ од погонске енергије наваривања, дебелине основног материјала и температуре прегревања. Коришћењем ових дијаграма изводи се оцена тачности аналитичких израза за прорачун времена хлађења $t_{8/5}$ [36,50,97].

9.5.3 ПРАКТИЧНА ПРИМЕНА КН – ДИЈАГРАМА И ВРЕМЕНА ХЛАЂЕЊА $t_{8/5}$

Познавање температурских циклуса при наваривању различитих врста челика, а посебно високоугљеничних и легираних изузетно је важно да се добије навар захтеваног квалитета. Управљање током температурских циклуса при наваривању могуће је променом енергетских параметара наваривања. Од свих параметара температурског циклуса највећи значај има познавање брзине хлађења, односно времена хлађења $t_{8/5}$, јер се помоћу њега и одговарајућих КН-дијаграма могу оценити новонастале микроструктуре у појединим зонама навара. Време хлађења директно утиче на својства материјала испод зона навара, који је при наваривању био изложен различитим температурским циклусима, који доводе до већих или мањих структурних промена у материјалу. Успостављањем везе између улазних параметара наваривања и излазних својстава навара, стварају се услови за управљање процесом наваривања. Најбитније је одредити време хлађења $t_{8/5}$ у карактеристичним тачкама материјала испод навара, које су се током процеса наваривања нашле у зони утицаја топлоте. Усвајањем и применом оптималних процесних параметара наваривања може се избећи стварање тврдих и кртих закаљивих структура ZUT-a, које директно утичу на квалитет навареног споја. Помоћу времена хлађења $t_{8/5}$ може се донети и оцена о заварљивости или условној заварљивости појединих врста челика.

У каталозима произвођача челика, и у другим литературним изворима [83,54,85,86] могу се за велики број различитих врста челика наћи IRA и ARA дијаграми, који приказују ток промене потхлађеног аустенита и дају утицај температуре и времена на ток промена у материјалу. Иако су ови дијаграми конструисани за челик тачно одређеног састава и за тачно одређене услове аустенитизације, тј. у условима друкчијим од наваривања, они корисно могу послужити при процени излазних својстава материјала појединих зона навара.

Значај времена хлађења $t_{8/5}$ и КН-дијаграма при наваривању, биће анализиран на примеру легираног челика 56NiCrMoV7, који је по хемијском саставу најприближнији челику Č572 . Овде је реч о легираном челику са повећаним садржајем угљеника. Карбидотворни легирајући хемијски елементи Cr, Mo и V, раздвајају области перлитне и бејнитне трансформације

аустенита, проширују област стабилности аустенита и снижавају му температуру почетка мартензитне трансформације.

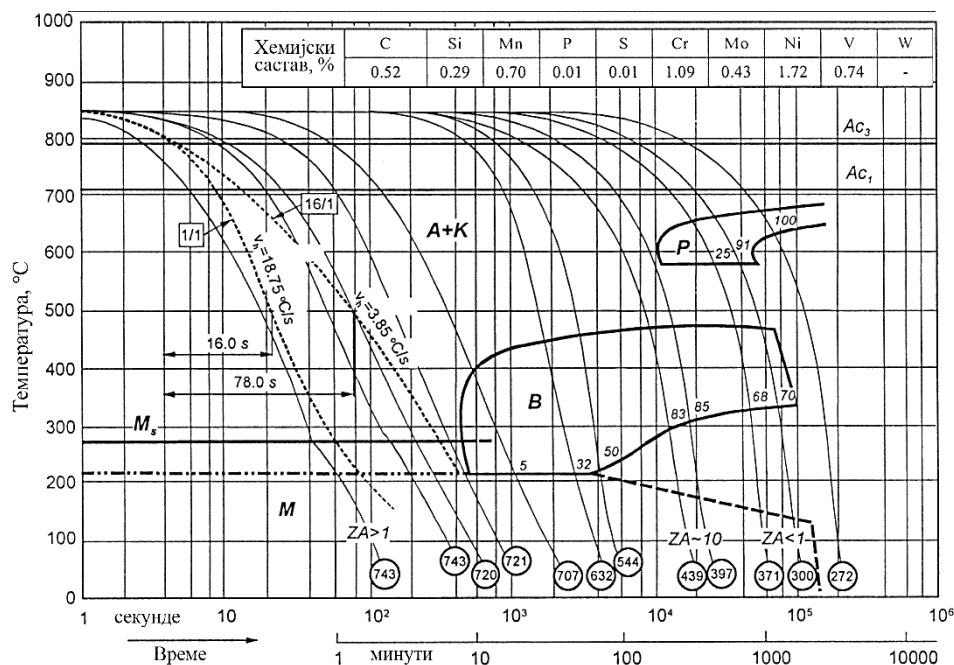
Неке најбитније карактеристике коришћених дијаграма зависе од температуре аустенитизације, времена загревања и задржавања на одређеној температури, величине аустенитног зрна и хомогености аустенита, услова хлађења, димензија испитиваних епрувета и др. У табlici 9.5.8 за овај челик дати су услови аустенитизације, критичне трансформационе температуре, карактеристична времена и максимална тврдоћа из више литературних извора.

Таблица 9.5.8 Услови аустенитизације, критичне температуре трансформације, критична времена и максимална тврдоћа [97]

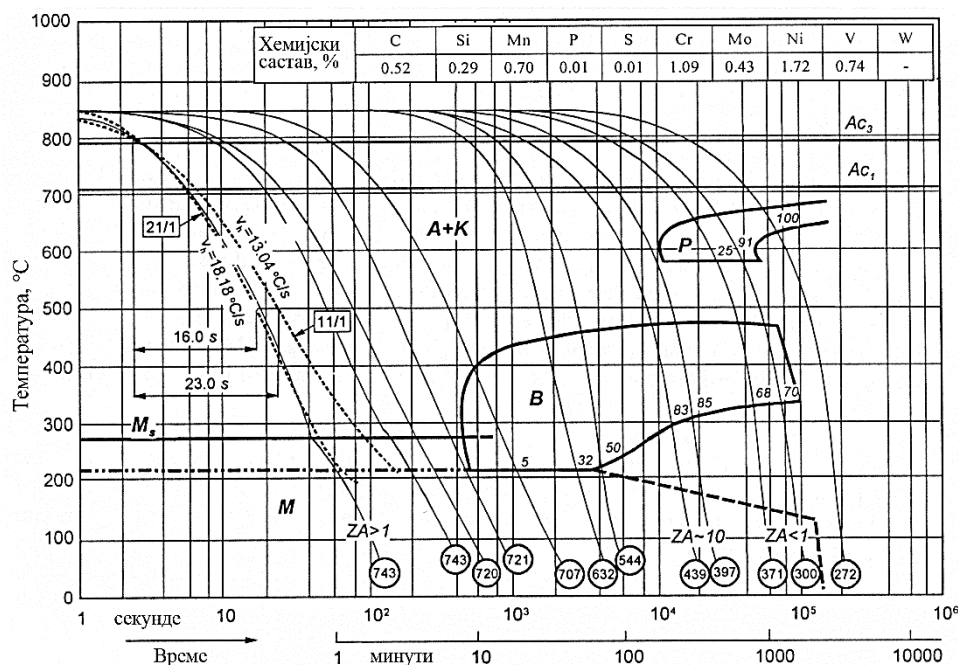
Литературни извор	$T_{\text{аустенитизације}}/t_{\text{задржавања}}$, °C/min	A_{C1} , °C	A_{C3} , °C	M_s , °C	t_{100} , s	t_p , s	HV _{max}
[Atlas zur warmebehandlung der stahle...]	880/15	740	780	250	1050	8000	760
[Železarna Ravne]	880/10	713	798	275	1500	6000	708
[Thussen Marathon Edelsthal]	850/5	715	785	275	500	10000	743

Напомена: t_{100} - гранично време које одговара крају чисто мартензитне структуре, које важи за свако $t_{8/5} \leq t_{100}$; t_p - време које одговара почетку настанка перлитне структуре

На слици 9.5.21 приказана је оцена новонастале структуре ZUT-а на основу експериментално одређеног времена хлађења $t_{8/5}$ у две мерне тачке, при наваривању челика дебљине $s = 29 \text{ mm}$ (таб. 9.5.7), а на слици 9.5.22 оцена новонастале структуре ZUT-а, при наваривању истог челика дебљине $s = 7,4 \text{ mm}$, на основу експериментално одређеног времена хлађења $t_{8/5}$ такође у две мерне тачке (таб. 9.5.6). У првом случају време хлађења $t_{8/5} = 16\text{s}$ за мерну тачку 1/1 и $t_{8/5} = 78\text{s}$ за мерну тачку 16/1. У другом случају време хлађења $t_{8/5} = 16\text{s}$ за мерну тачку 21/1 и $t_{8/5} = 23\text{s}$ за мерну тачку 11/1. У све четири мерне тачке, структура је мартензитна са заосталим аустенитом и карбидима у металној основи, тврдоће око 743 HV1.



Слика 9.5.21 КН-дијаграм за челик 56NiCrMoV7 дебљине $s = 29 \text{ mm}$ [84,97]



Слика 9.5.22 КН-дијаграм за челик 56NiCrMoV7 $s = 7,4 \text{ mm}$ [84,97]

За ова истраживања коришћени су КН-дијаграми из различитих литературних извора, код којих се могу уочити карактеристичне температуре и времена почетка и завршетка појединих фазних промена [83,54,85,86]. У зависности од времена хлађења $t_{8/5}$, са ових дијаграма може се проценити новонастала структура ZUT-а и одредити њена тврдоћа. Такође, на основу унапред одабране структуре ZUT-а, са КН-дијаграма, може се одредити време хлађења $t_{8/5}$ и израчунати унос топлоте којим ће се добити захтевана структура и тврдоћа навара.

Уношењем времена хлађења $t_{8/5}$ у КН-дијаграм за овај челик процењује се новонастала структура и тврдоћа ZUT-а. На основу познатих кривих хлађења неких карактеристичних температурских циклуса за одређене тачке ZUT-а, упоређиване су структуре очитане из КН-дијаграма и структуре добијене металографским испитивањима. Из претходно датих дијаграма и из таблице 9.5.8, може се уочити да се гранично време хлађења $t_{8/5} = t_{100}$ креће од 500-1500 s. Гранично време $t_{8/5} = t_{100}$ од приближно 500 s уз предгревање на $T_p = 300^\circ\text{C}$, може се постићи са погонској енергији наваривања $q_1 = 60 \text{ kJ/cm}$ за основни материјал дебљине $s = 7,4 \text{ mm}$, односно са $q_1 = 150 \text{ kJ/cm}$ за овај основни материјал дебљине $s = 29 \text{ mm}$. Ове енергије није могуће постићи REL-ом, што значи да се без обзира на улазне параметре наваривања увек добија мартензитна структура ZUT-а са карбидима распоређеним у металној основи, чија је тврдоћа између 700 HV1 и 743 HV1. Због тога је неопходно после наваривања овог челика извести накнадну термичку обраду отпуштања, пре свега због снижења заосталих напона, смањења тврдоће ZUT-а и повећања пластичности појединих зона навара.

Упоређивањем резултата добијених путем експеримента и КН-дијаграма, запажа се велика корелација између улазних параметара наваривања и својстава материјала ZUT-а, а извесна одступања проистекла су због неминовних разлика при извођењу наших експеримената и експеримената при добијању КН-дијаграма.

9.5.4 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА

При прорачуну времена хлађења $t_{8/5}$ намеће се дилема по којој формули то извести, јер се без експерименталног одређивања температурских циклуса не може проценити тачност. Аналитички изрази који се користе за израчунавање времена хлађења $t_{8/5}$, а односе се на материјале мање и веће дебљине, а поред термофизичких константи материјала, погонске енергије и почетне температуре, садрже и факторе облика споја, који нису довољно прецизно дефинисани, па то може довести до релативно великих одступања код добијених резултата [81,94,97,108,109,113].

Најбољу сагласност резултата времена хлађења $t_{8/5}$ са експерименталним резултатима показала је формула јапанских аутора. Изведени закључак односи се на наваривање равних плоча различите дебљине израђених од различитих материјала, док за наваривање површина других облика нису извођена експериментална истраживања [97,108,109].

Помоћу емпиријске формуле јапанских аутора, може се са довољном тачношћу одредити време хлађења $t_{8/5}$, које је основа за избор оптималних параметара процеса наваривања, и може корисно послужити за брзу процену излазних својстава навара ако се располаже КН-дијаграмом за дати челик. Осим тога, ова формула је далеко једноставнија за прорачун, посебно при заваривању, јер не садржи арбитрарне константе које се често усвајају према личној процени онога ко изводи прорачун. Додатна погодност је што применом ове формуле при прорачуну није потребно раздвајање материјала на танке и дебеле плоче, што прорачун значајно поједностављује.

Такође, потребно је указати и на различите облике добијених температурских циклуса при наваривању плоча мање и веће дебљине. Код танких плоча део температурског циклуса који приказује загревање материјала, увек је готово линеаран, и потребно је знатно краће време за постизање максималне температуре, док код плоча веће дебљине то није случај. Ова разлика се може објаснити знатно сложенијим начином одвођења топлоте при наваривања дебелих плоча. Код њих се топлота од извора топлоте највише одводи кондукцијом, а знатно мање конвекцијом и зрачењем, док код плоча мале дебљине то није случај. Такође, код дебелих плоча настаје тродимензионално провођење топлоте, а код дводимензионалних танких плоча у два правца. Овде је реч о различитим схемама одвођења топлоте од концентрисаног извора топлоте, од којих зависи облик температурског циклуса.

Управљање процесом наваривања остварује се различитим температурским циклусима, што се понекад постиже правилним избором параметра наваривања. При томе је неопходно утврдити ток температурског циклуса у одређеним тачкама испод навара у функцији параметара наваривања, и проценити утицај температурског циклуса на структуру материјала ZUT-а. Смањење брзине хлађења испод критичне брзине, спречава се добијање чисто мартензитне структуре ZUT-а. Ово се може постићи повећањем температуре предгревања, повећањем погонске енергије наваривања на рачун пораста струје и напона у електричном луку, или смањењем брзине наваривања различитим техникама наваривања (кратким наварима, дугим наварима, вишепролазним и вишеслојним наварима и др.). За случај да се на ове начине не може добити одговарајућа структура појединих зона навареног споја, посебно ZUT-а, неопходно је извести неку накнадну термичку обраду навареног споја, најчешће жарење или отпуштање. На тај начин се смањује ниво заосталих напона и тврдоћа, а повећава дуктилност материјала. Отпуштање наварених делова по правилу се изводи са температуре која је виша од њихове радне температуре [83,97,195].

На основу ових истраживања, посебно после експерименталних испитивања, утврђено је да се време хлађења у критичном температурском интервалу може рачунски најтачније одредити по формули јапанских аутора. Тиме је главни циљ ових истраживања постигнут, јер је показано како се довољно тачно и брзо може одредити брзина хлађења при наношењу појединих навара, а да се при томе не користи компликована, дуготрајна и скупа експериментална процедура. Брзина хлађења, одређена са довољном тачношћу, омогућава да се из КН-дијаграма прочита структура и тврдоћа ZUT-а. Познавањем брзина хлађења и одговарајућих IRA и ARA трансформационих дијаграма за различите врсте челика може се приближно дефинисати оптимална технологија наваривања делова израђених од одређеног челика.

9.6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА НА РЕАЛНИМ РАДНИМ ДЕЛОВИМА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ

У току експлоатације грађевинске механизације, која се користи у грађевинарству и у другим привредним гранама, њени радни делови су изложени различитим узрочницима који доводе до њиховог оштећења. Од свих узрочника, на оштећење делова грађевинске механизације, највише утичу различите врсте триболошких процеса. Због велике тврдоће, стенских материјала и одсуства средства за хлађење и подмазивање, процесима хабања највише су изложени радни делови који су у директном контакту са разним грађевинским материјалима. То су углавном стенски материјали формирани од различитих минерала као што су: силикати, оксиди, карбонати, хидроксиди, сулфати, сулфиди, хлориди и др. Минерали који формирају стенске материјале су изузетно високе тврдоће, и то су већина силиката и готово сви оксиди [56,133,141].

Основни задаци ових истраживања на реалним радним деловима, у теренским условима, су: провера добијених резултата испитивања на физичким моделима у лабораторијским условима; провера квалитета наварених спојева формираних од различитих основних и додатних материјала, испитивање више различитих додатних материјала при истим условима експлоатације и одабир најбољег материјала; стварање основа за формирање базе података резултата ових истраживања; пројектовања оптималне технологије (модела) репаратурног или производног наваривања; испитивања ефективности примењеног процеса репаратуре у односу на замену оштећених новим деловима и др.

Производно или репаратурно наваривање радних делова [112,97,141], изведено је најчешће применом скоро исте технологије наваривања, као и при наваривању на физичким моделима. Примењена је тзв. „*пренета технологија*“, али су када је било неопходно, изведене и неке корекције, које битније не утичу на резултате. Ове минималне корекције су се односиле само на број нанетих слојева навара и на температуру предгревања, у циљу обезбеђивања што боље заварљивости, због разлике у дебљини материјала код физичких модела и реалних радних делова. Заварљивост основних материјала радних делова одређивана је применом више метода, ради одређивања параметара наваривања који омогућавају управљање процесом наваривања, и добијања структуре навареног споја одговарајућих својстава за конкретне радне услове. У том циљу, коришћени су и КН-дијаграми [83,84,85,86] за различите режиме наваривања, да би се што тачније одредило време хлађења $t_{8/5}$ и проценила новонастала структура ZUT-а и својства дата у КН-дијаграму.

У овом делу рада биће приказани резултати испитивања процеса репаратурног или производног наваривања само неких репрезентативних узорака реалних радних делова. Основни критеријум је отпорност на хабање ових узорака. Истраживан је утицај на хабање технике ношења навара. Такође, испитивана је могућност вишеструког наваривања реалних радних делова грађевинске механизације, и оцењена оправданост понављаног наваривања.

Отпорност према хабању оцењивана је на основу губитка масе у одређеном временским интервалима у току процеса експлоатације, прецизним мерењем масе, како код наварених тако и код нових ненаварених делова. Међусобно упоређивање отпорности на хабање наварених делова са различитим додатним материјалима и нових ненаварених делова израђених од различитих основних материјала, изведено је на основу количине масе изгубљеног материјала у истом посматраном временском периоду, при истим радним условима у току експлоатације.

9.6.1 НАВАРИВАЊЕ ЗУБА УТОВАРНЕ КАШИКЕ УТОВАРИВАЧА

У групу радних делова грађевинске механизације, који су за време експлоатације изложени абразивном хабању јаког интензитета и повременим ударима средњег интензитета, могу се разврстати: зуби утоварних кашика утоваривача, ровокопача и багера; ножеви булдозера, грејдера и плугова; рипери и наглавци булдозера и грејдера, и већи број других радних делова машина и уређаја. Међутим, од свих делова грађевинске механизације, овој врсти хабања су најизложенији зуби утоварних кашика, посебно зуби утоваривача, као и предњи део утоварне

кашике на коју се монтирају зуби. То је био главни разлог што је донета одлука да се теренска експериментална истраживања изведу на зубима утоварне кашике утоваривача типа ULT-160 В.

9.6.1.а Грађевинска машина, функција испитиваног дела и уочени недостаци

На слици 9.6.1 приказана је фотографија утоваривача, код којег су зуби утоварне кашике и сама утоварна кашика највише изложени хабању, будући да је кашика у директном контакту са стенским материјалима.



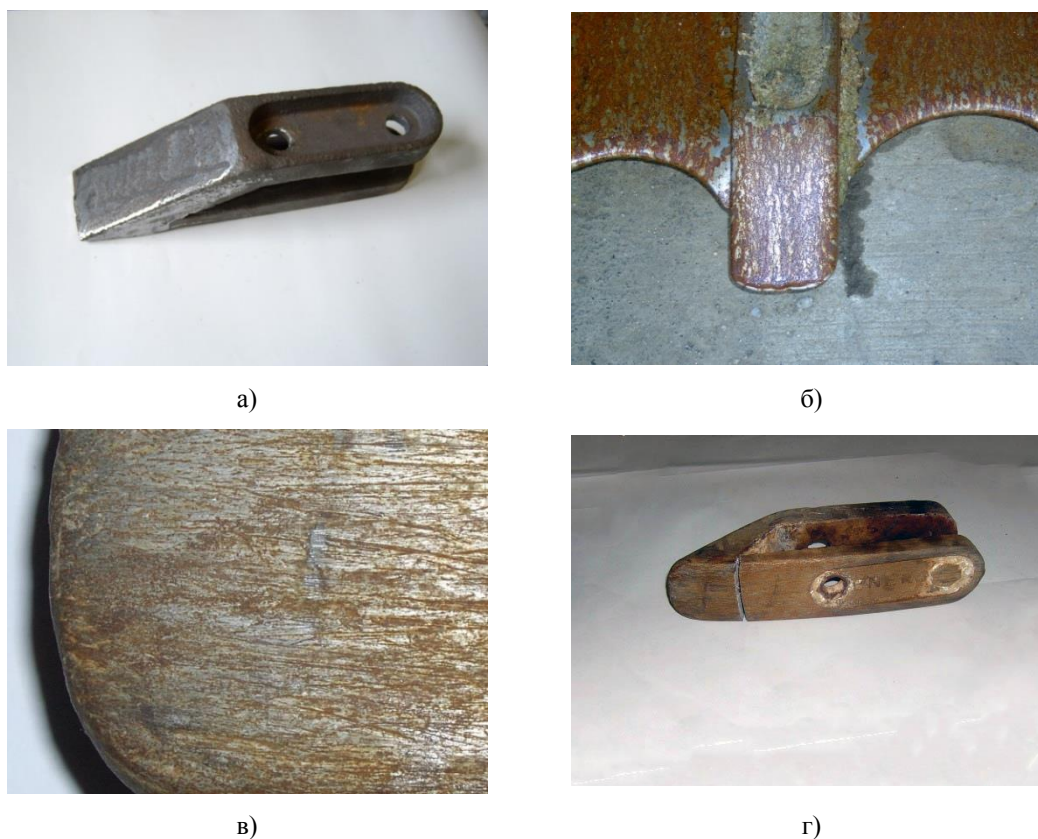
Слика 9.6.1 Изглед грађевинске машине-утоваривача ULT-160 В

Саставни делови који су најизложенији процесима хабања код утоварне кашике су: зуби утоварне кашике, предњи део утоварне кашике на коме су монтирани зуби, бочне вертикалне ивице кашике, унутрашња доња површина кашике и спољашња доња површина кашике. Поред процеса хабања зуби утоварне кашике као и цела кашика изложени су и корозији. Сви ови делови утоварне кашике су у директном контакту са грађевинским материјалима и изложени су првенствено абразивном хабању јаког интензитета. Поред делова утоварне кашике, процесу хабања су изложени и клизни лежачеви на механизму за покретање кашике, који се налазе на раму и полугама. Код њих је нижи интензитет хабања него код напред поменутих радних делова, јер механизам за покретање има уграђено аутоматско централно подмазивање.

- **Утоваривачи** су грађевинске машине које се првенствено користе за утовар, транспорт и истовар различитих врста грађевинског материјала. Поред тога, користе се за скидање површинских слојева земље (хумуса) и грубо равнање терена. Величина и капацитет утоваривача се крећу од мањих до изузетно великих, какви се употребљавају на површинским коповима камена, угља, руде, песка и других материјала.

- **Зуби утоварних кашика** имају задатак да одвајају, уситњавају и растресају грађевински материјал, а главни њихов задатак је да штите утоварну кашику од већег оштећења. Број, величина и облик зуба зависи од намене (копање канала, вађење шљунка, утовар материјала и др.), и капацитета утоварне кашике. Најчешће се израђују ливењем од легираних манганских челика који су условно заварљиви. Њихова маса се креће од неколико килограма до неколико десетина килограма. Зуби директно утичу на степен искоришћења пројектованог капацитета машине, као и на радни век система за управљање, система за кочење и хидрауличког система за манипулацију утоварном кашиком. Зуби се на кашику монтирају на два начина: директно помоћу завртњева и навртки, или индиректно на носач који је претходно заварен за кашику.

О оштећењу и абразивном хабању радних делова утоваривача, посебно зуба, најбоље показује слици 9.6.2.



Слика 9.6.2 Изглед зуба утоваривача: а) нов зуб, б) похабан зуб са похабаним делом утоварне кашике, в) изглед похабане доње површине зуба, г) изглед поломљеног зуба

- **Уочени проблеми при експлоатацији** су још један од разлога што је одлучено да се истражи хабање зуба. Има више проблема, али два су најизраженија, јер доводе до знатног смањења степен искоришћења капацитета ових и других грађевинских машина и хаваријских оштећења. Први проблем се јавља када су зуби израђени од жилавих материјала мање тврдоће контактних површина, јер тада долази до њихове деформације, интензивног хабања и кратког радног века, односно до честе замене оштећених зуба новим зубима. Други проблем се јавља када су зуби израђени од кртих материјала веће тврдоће, јер тада долази до њиховог лома, чак и на почетку експлоатације, тј. при првом ударном оптерећењу. У оба случаја долази до смањења искоришћења капацитета машине и повећања трошкова одржавања.

Посебно велики проблеми могу настати при експлоатацији ових грађевинских машина у каменоломима и на површинским коповима руда и угља, јер ако поломљени метални делови утоваривача доспеју у дробилична постројења, мешалице за производњу асфалта или постројења за припрему других грађевинских материјала, настаће хаваријска оштећења дробилица, млинова и мешалица, што изазива застоје у производњи и накнадне непланиране трошкове. Зато је неопходно да ови делови имају добру жилавост, као и довољно високу тврдоћу радних површина.

9.6.1.6 Технологија наваривања зуба утоварне кашике

Успех репаратурног или производног наваривања зависи од више утицајних фактора. Први корак је да се установи хемијски састав као и физичка и механичка својства основног материјала. Ово су полазни подаци за процену његове заварљивости. Даље следује избор додатног материјала, методе наваривања, технологије наваривања која укључује претходну, текућу и накнадну термичку обраду. Својства додатног материјала су пресудна за добијање наварених површина захтеваног квалитета и потребне отпорности на хабање, корозију и појаву лома. Правилно одређена и примењена технологија наваривања гарантује техно-економску

оправданост примене наваривања, наравно уз услов да наваривање изводе вешти и атестирани заваривачи.

Најпре смо се одлучили за производно наваривање, наношењем делимичних навара, различитим техникама. Наваривање је изведено REL-ом наношењем уздужних, попречних и унакрсних делимичних навара.

- **Основни материјал** је ČL3134 који припада групи С-Мп челика условне заварљивости. Дебљина материјала на радним површинама зуба је $s = 42 \text{ mm}$ на горњој (грудној), односно $s = 24 \text{ mm}$ на доњој (леђној) површини клина. Температура предгревања пре наваривања радних површина зуба одређена је по методи Сеферијана, а резултати су приказани у табlici 9.6.1.

Таблица 9.6.1 Одређивање температуре предгревања за ČL 3134

Начин одређивања T_p	Модификована формула Сеферијана	Дебљина О.М. $s, \text{ mm}$	Температура предгревања $T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	
			Рачунска	Усвојена
Метода Сеферијана	$CE = CE_h + CE_s = CE_h (1 + 0.005 \cdot s), \%$	24	215,75	250
	$CE_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{18}, \%$ $T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0,25}, \text{ }^\circ\text{C}$	42	229,51	250

Усвојена температура предгревања је $T_p = 250^\circ\text{C}$, и нешто је виша од израчунате вредности, што обезбеђује бољу заварљивост основног материјала.

- **Додатни материјал** је ABRADUR 58, иначе намењен за наваре велике тврдоће, отпорне према абразивном хабању *отвореног типа*, коме су најчешће изложени зуби кашике током експлоатације.

Припрема узорка (зуба) за наваривање састојала се из чишћења и унакрсног браздања радних површина. Наваривање је изведено на горњој (грудној) и доњој (леђној) радној површини зуба. Такође, припреман је и додатни материјал, тј. његово сушење, како би се избегла појава хладних прслина због присуства водоника, у пећи на температури $350\text{--}400^\circ\text{C} / 2 \text{ h}$. Наваривање свих узорка је изведено REL-ом наношењем вишеслојних делимичних навара различитим техникама (попречно, унакрсно и уздужно). Грудне радне површине сва три зуба су наварене после предгревања на 250°C , а леђне радне површине после наношења пластичног (буфорног) слоја електродом INOX В 18/8/6 без предгревања. Наваривање узорка изведено је у хоризонталном положају, са процесним параметрима датим у табlici 9.6.2.

Таблица 9.6.2 Процесни параметри наваривања REL – ом зуба кашике утоваривача

Дебљина О.М. $s, \text{ mm}$	Ознака електроде SŽ-Elektroda Jesenice	Пречник језгра електроде $d_e, \text{ mm}$	Струја наваривања $I, \text{ A}$	Радни напон $U, \text{ V}$	Брзина наваривања $v_z, \text{ cm/s}$	Погонска енергија наваривања $q_i = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta, \text{ J/cm}$
24-40	ABRADUR 58	3,25	130	25	0,124	20968
	ABRADUR 58	5,00	160	26	0,145	22952
	INOX В 18/8/6	3,25	100	24	0,136	14118
	INOX В 18/8/6	5,00	140	26	0,178	16360

На овим деловима наношени су двослојни навари. Накнадна термичка и механичка обрада нису потребне, шта више настале би структуре промене метала навара, па не би могли да се упоређују различити додатни материјали и начини наваривања, јер би термичка обрада прекрила њихове разлике.

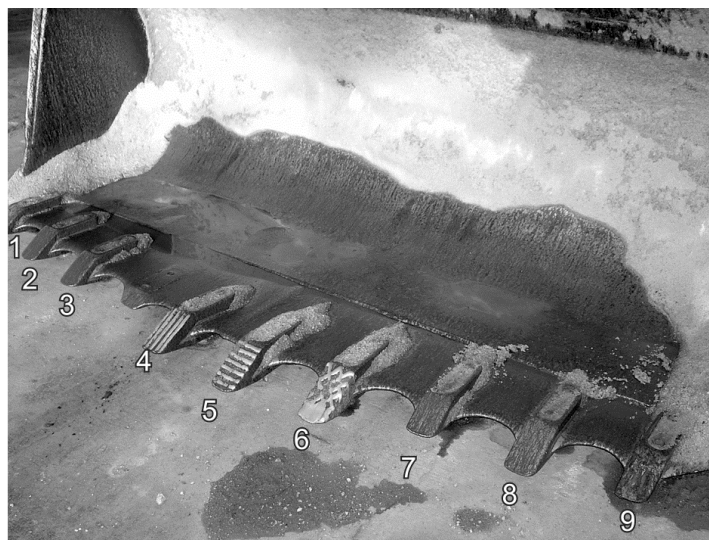
На слици 9.6.3 приказани су припремљени нови зуби за наваривање и изглед наварених зуба, са различитим техникама наношења навара (попечно, унакрсно и уздужно).



Слика 9.6.3 Изглед нових ненаварених и наварених зуба: а) нови ненаварени зуби, б) наварени зуби

9.6.1.в Одређивање отпорности на хабање

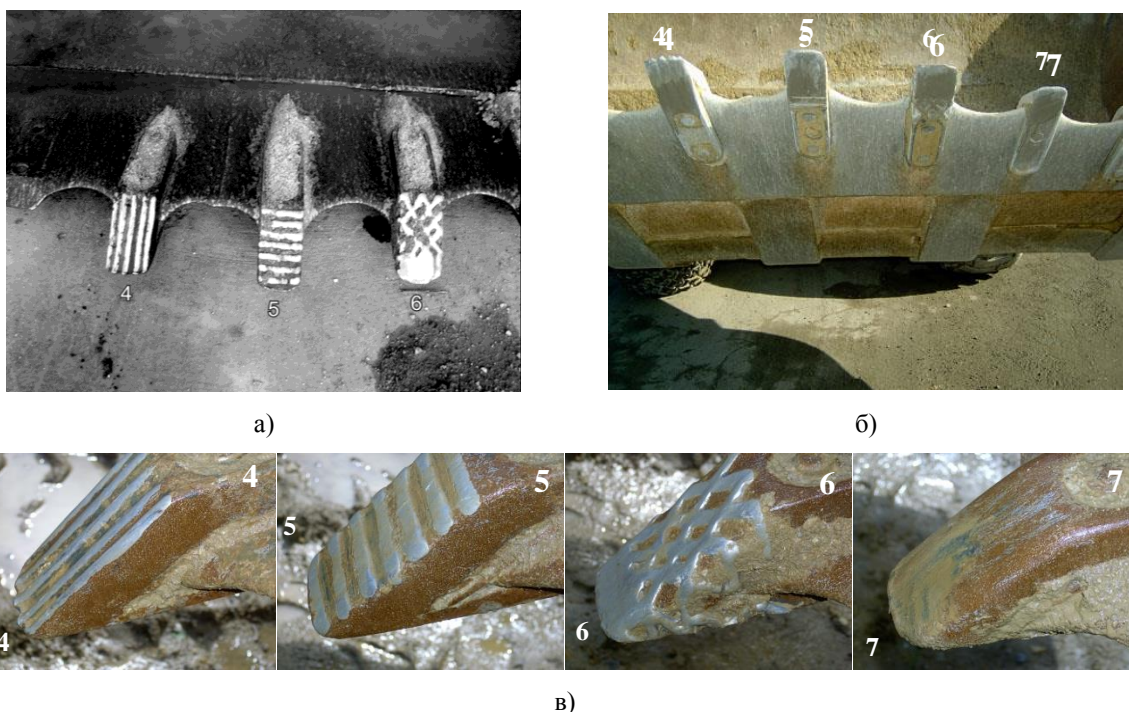
Наварени зуби на утоварну кашику монтирани су на њеном средњем делу, где је абразивно хабање највећег интензитета, и највероватнија могућност појаве ударног оптерећења. Укупан број нових ненаварених зуба је био седам комада, а наварених зуба три комада. На слици 9.6.4 приказан је распоред нових и наварених зуба на утоварној кашици утоваривача, а укупан број испитиваних узорака је десет комада, с тим што је у овој фази испитивања одмах на почетку дошло до лома једног новог зуба.



Слика 9.6.4 Начин монтаже испитиваних узорака зуба на утоварну кашику

Позитивни ефекти наваривања показали су се већ после око 360 h рада, јер се на клину навареног зуба формирао тестераст профил са испупчењима на наварима и удубљењима на основном материјалу. Повременом визуелном контролом јасно се уочавала разлика интензитета хабања наварених и ненаварених нових зуба. Такође, на самом почетку испитивања на терену дошло је до јаког удара зуба у велику стену, па се поломио један нови ненаварени зуб, док су наварени зуби остали неоштећени. На слици 9.6.4 види се празно место где је био монтиран нов зуб чија контрола је изостала у овој фази испитивања. Време трајања процеса хабања је мерено помоћу бројача ефективних радних сати који је фабрички уграђен и баждарен, тако да је било једноставно пратити процес хабања у току усвојеног временског интервала.

Испитивани узорци зуба монтирани су на утоваривачу који је искључиво радио на утовару камена и његових агрегата, чиме су створени услови за праћење интензитета абразивног хабања у најнеповољнијим радним условима. Испитивање на хабање трајало је 1200 h рада, а за то време су нови ненаварени зуби похабани до те мере да их је убрзо требало заменити. Хабање наварених зуба са горње површине било је равномерно и то само материјала навара. Доње површине наварених зуба такође су похабане на наварима неравномерно и знатно више од горње површине. Уочено је да се зуби више хабају при врху клина, код свих испитиваних узорака, и то нарочито на доњој радној површини. На слици 9.6.5 приказан је изглед похабаних зуба са горње и доње радне површине које су биле изложене интензивном хабању у току прве фазе испитивања.



Слика 9.6.5 Изглед похабаних наварених зуба после 1200 h рада: а) изглед горње наварене површине, б) изглед доње наварене површине, в) бочни изглед зуба

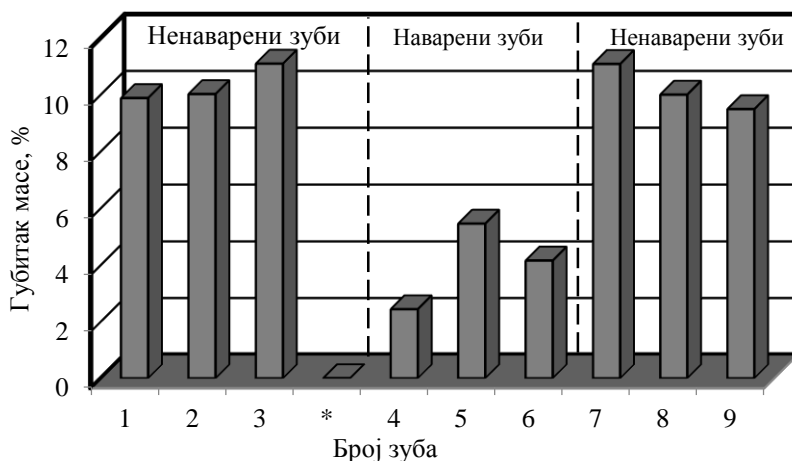
Отпорност на хабање наварених и нових ненаварених зуба додатно се процењује мерењем њихових маса пре и после испитивања. Резултати измерених маса, односно запреминског хабања испитиваних узорака дати су у табlici 9.6.3 после 1200 h рада у реалним радним условима.

Таблица 9.6.3 Резултати експерименталних испитивања отпорности на хабање наварених и ненаварених зуба после 1200 h рада

Маса испитиваних узорака (зуба)	Ненаварени узорци				Наварени узорци			Ненаварени узорци		
	1	2	3	*	4	5	6	7	8	9
На почетку испитивања, kg	8,600	8,580	8,620	8,600	9,020	9,050	9,620	8,670	8,600	8,640
На крају испитивања, kg	7,750	7,720	7,840	-	8,800	8,650	9,220	7,620	7,740	7,820
Губитак масе, kg	0,850	0,860	0,780	-	0,220	0,500	0,400	0,950	0,860	0,820
Губитак масе, %	9,88	10,02	11,09	-	2,44	5,46	4,16	11,08	10,00	9,49

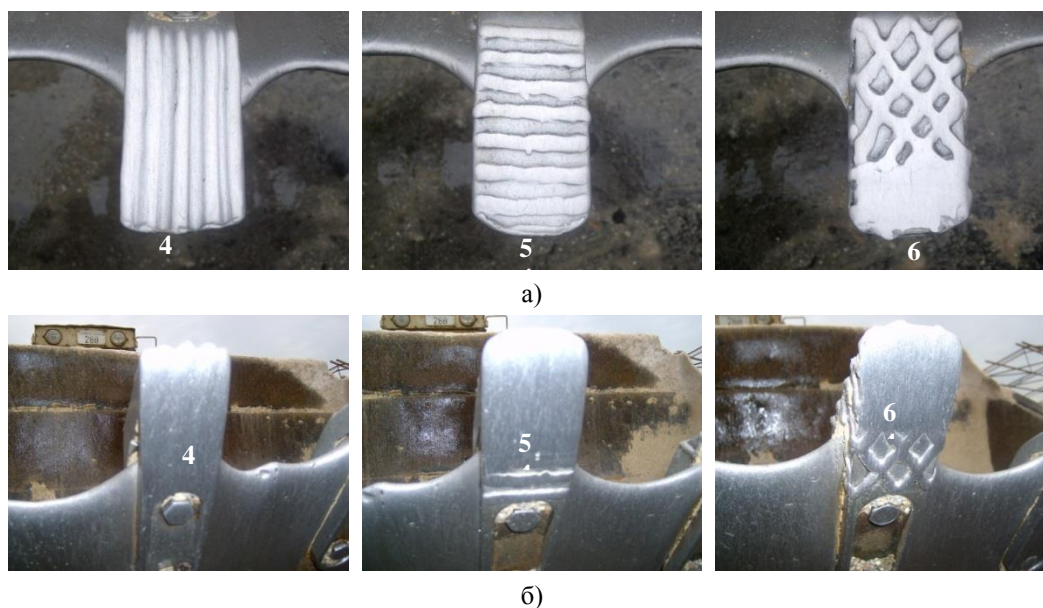
*Напомена: На овом месту је био монтиран нов ненаварен зуб, који је због лома на самом почетку испитивања демонтиран и није укључен у ову фазу испитивања.

На слици 9.6.6 дат је графички приказ процентуалног губитка масе материјала испитиваних узорака после 1200 h рада у реалним радним условима.



Слика 9.6.6 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних узорака зуба после 1200 h

После мерења масе контролисаних узорака, монтирани су нови ненаварени зуби и већ наварени зуби на истим местима као и у првој фази испитивања. Машина је сада ангажована на утовару, транспорту и истовару само земље. После 2600 h рада поново је контролисан визуелни изглед радних површина монтираних узорака. На слици 9.6.7 приказан је изглед горње и доње радне површине наварених зуба који су били изложени хабању у другој фази испитивања.



б)

Слика 9.6.7 Изглед похабаних наварених зуба после 2600 h рада: а) изглед горње наварене површине, б) изглед доње наварене површине

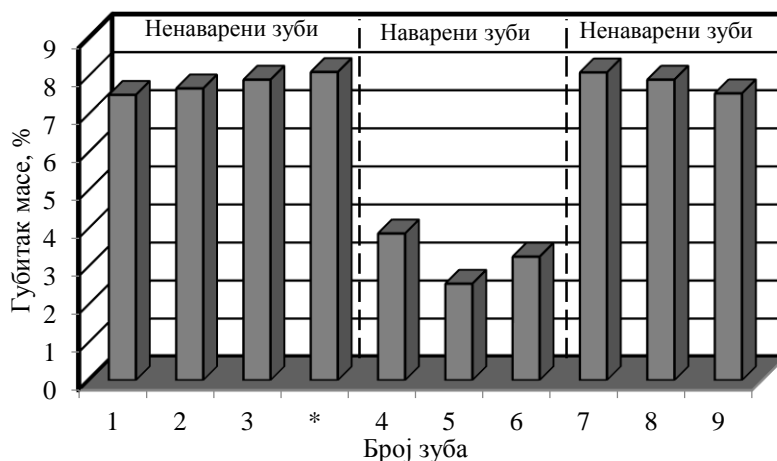
Горње наварене радне површине зуба још имају наваре знатне дебљине, док је на доњим навареним површинама зуба та дебљина знатно мања. Похабаност доње радне површине нових ненаварених зуба је толика да се морају занемарити. После демонтаже ових зуба поново су измерене њихове масе, а резултати мерења њихове масе пре и после ове контроле приказани су у табелици 9.6.4.

Таблица 9.6.4 Резултати експерименталних испитивања отпорности на хабање наварених зуба после 2600 h рада и 1400 h рада ненаварених нових зуба

Маса испитиваних узорака (зуба)	Ненаварени узорци				Наварени узорци			Ненаварени узорци		
	1	2	3	*	4	5	6	7	8	9
На почетку испитивања, kg	8,620	8,600	8,580	8,600	8,800	8,650	9,220	8,650	8,600	8,620
На крају испитивања, kg	7,970	7,940	7,900	7,900	8,460	8,430	8,920	7,950	7,920	7,970
Губитак масе, kg	0,650	0,660	0,680	0,700	0,340	0,220	0,300	0,700	0,680	0,650
Губитак масе, %	7,50	7,67	7,90	8,10	3,86	2,54	3,25	8,09	7,90	7,54

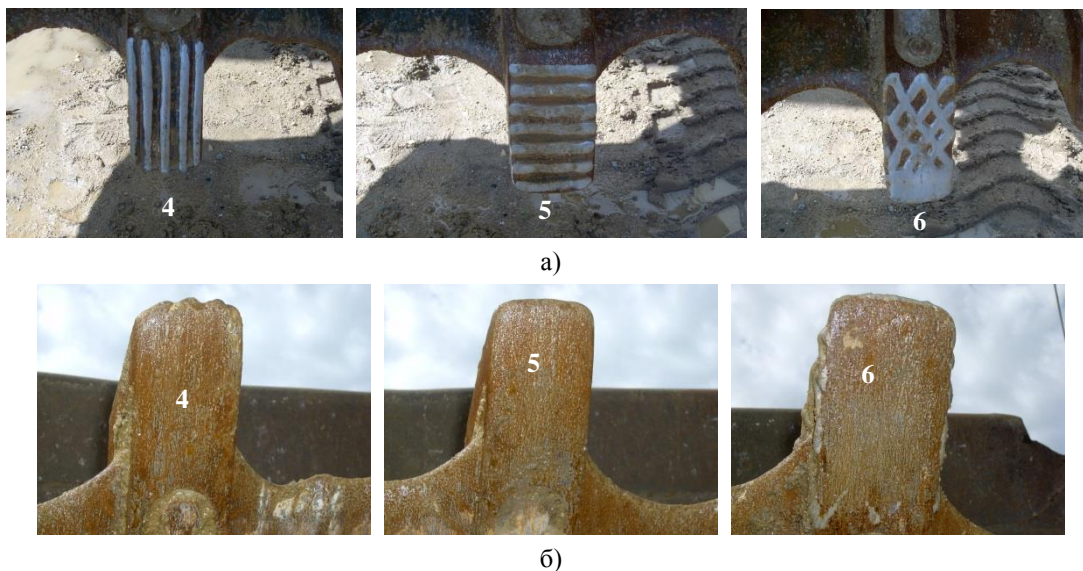
*Напомена: На овом месту је монтиран нов ненаварени зуб који је учествовао у овој фази испитивања.

На слици 9.6.8 дат је графички приказ процентуалног губитка масе материјала испитиваних узорака после 2600 h рада код наварених узорака и 1400 h рада код нових ненаварених узорака.



Слика 9.6.8 Графички приказ процентуалног губитка масе материјала испитиваних наварених узорака зуба после 2600 h рада, и нових ненаварених узорака зуба после 1400 h рада

После мерења масе испитиваних узорака монтирани су већ испитивани наварени и нови ненаварени зуби на истим местима као код прве и друге фазе испитивања. Контрола је сада изведена после 3200 h рада, кад је поново вршено мерење масе и визуелан изглед радних површина испитиваних узорака. На слици 9.6.9 приказан је изглед горње и доње радне површине зуба који су били изложени хабању у трећој фази испитивања.



Слика 9.6.9 Изглед похабаних наварених зуба после 3200 h рада: а) изглед горње наварене површине, б) изглед доње наварене површине

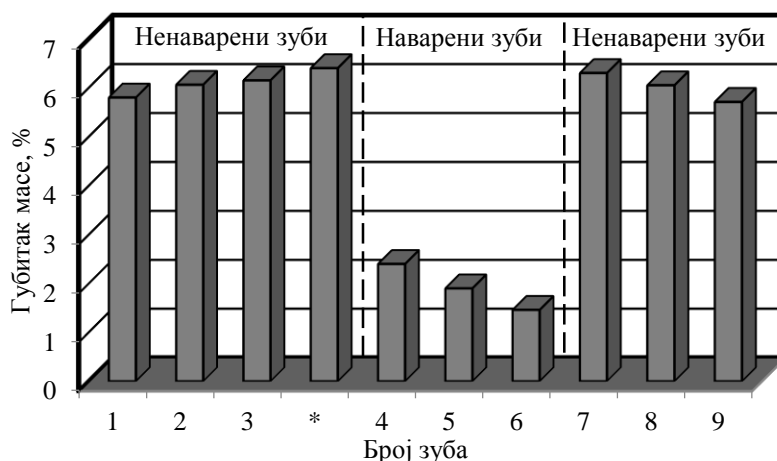
Горње наварене радне површине зуба још имају наваре, док на доњим радним површинама готово да нема више навара, јер су похабани. Нови ненаварени зуби су похабани у већем обиму, али не толико да би се одмах морали заменити. Резултати мерења масе испитиваних зуба приказани су у табlici 9.6.5.

Таблица 9.6.5 Резултати експерименталних испитивања отпорности на хабање наварених зуба после 3200 h рада и 600 h рада ненаварених нових зуба

Маса испитиваних узорака (зуба)	Ненаварени узорци				Наварени узорци			Ненаварени узорци		
	1	2	3	*	4	5	6	7	8	9
На почетку испитивања, kg	8,600	8,580	8,620	8,600	8,370	8,430	8,920	8,600	8,600	8,580
На крају испитивања, kg	8,100	8,530	8,090	8,050	8,170	8,270	8,790	8,060	8,080	8,090
Губитак масе, kg	0,500	0,520	0,530	0,550	0,200	0,160	0,130	0,540	0,520	0,49
Губитак масе, %	5,80	6,06	6,15	6,40	2,40	1,90	1,46	6,30	6,05	5,71

*Напомена: На овом месту монтиран је нов ненаварен зуб као и у другој фази испитивања.

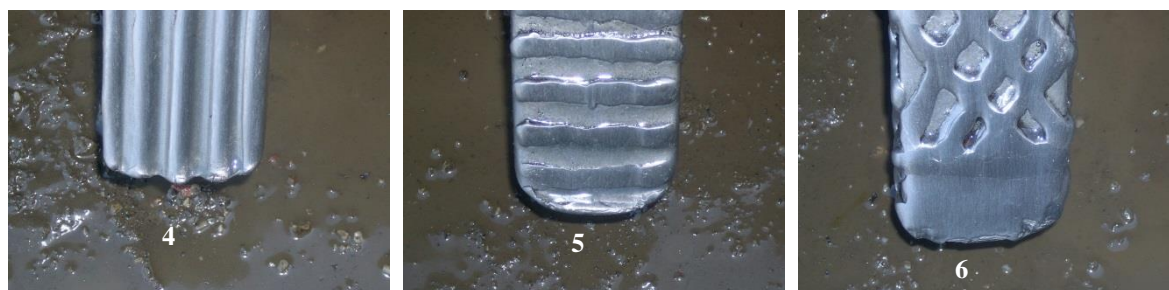
На слици 9.6.10 дат је графички приказ процентуалног губитка масе материјала испитиваних узорака после 3200 h рада код наварених узорака и 600 h рада код нових ненаварених узорака.



Слика 9.6.10 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних наварених зуба после 3200 h рада и нових ненаварених зуба после 600 h рада

Процес испитивања није завршен у претходно наведене три фазе, већ је настављен и у четвртој фази. После мерења маса зуба сви наварени и ненаварени узорци, чије је хабање праћено у трећој фази, монтирани су на утоварну кашику. Кашика је радила у сличним условима као и у трећој фази. Процес хабања зуба је праћен до тренутка када је била нужна наредна замена ненаварених зуба због похабаности њихове доње радне површине, а то је било после 3800 h рада од почетка испитивања наварених зуба. Тада је процењено, да су на горњој радној површини наварених зуба остали непохабани навари и да у овим условима могу да раде још око 1000 h, односно за још једну измену нових ненаварених зуба. На навареним зубима није било више материјала наvara на доњој радној површини, а на горњој радној површини остало је још материјала наvara, што се види на слици 9.6.11.

Из резултата наших истраживања [68,75,119,141] може се закључити да у првој фази испитивања, када су узорци били у контакту са каменом, најбољу отпорност показали су зуби са уздужно нанетим наварима. У другој фази испитивања, када су испитивани узорци били у директном контакту са земљом, најбољу отпорност показали су зуби са попречно нанетим наварима. У трећој фази испитивања, када су испитивани узорци били у контакту са каменом и земљом, најбољу отпорност показали су зуби са унакрсно (саћасто) нанетим наварима. Може се рећи, да су ова испитивања помогла да се радни век наварених зуба у односу на нове ненаварене зубе знатно повећа, и то најмање три до четири пута у свим условима експлоатације.



Слика 9.6.11 Изглед горње стране наварених узорака зуба после 3800 h рада

9.6.2 НАВАРИВАЊЕ ЛОПАТИЦА МЕШАЛИЦЕ ПОСТРОЈЕЊА ЗА ПРОИЗВОДЊУ АСФАЛТА

У групу радних делова грађевинске механизације, који су за време експлоатације изложени абразивном хабању јаког интензитета и корозији, али код којих нема ударних оптерећења јачег интензитета, могу се разврстати: лопатице мешалица за производњу асфалта, лопатице мешалица за производњу бетона, тракасти транспортери грађевинског материјала, регулатор протока материјала на асфалтној бази, кофице транспортера грађевинског материјала, пужни транспортери за уградњу асфалта на финишеру и други радни делови грађевинских машина који су у контакту са влажним грађевинским материјалима, као што су на пример, делови мешача грађевинског материјала у сушарама.

Од свих радних делова грађевинске механизације, који су у току рада истовремено изложени абразивном хабању и корозији, највише су оптерећене лопатице мешалица за бетон, мешачи материјала у сушарама и лопатице мешалица за асфалт. Лопатице и други делови у бубњу мешалице за бетон изложени су абразивном хабању и корозији од воде. Мешачи материјала у сушарама изложени су абразивном хабању и корозији од влажног материјала и високих температура. Лопатице и други делови у бубњу мешалице за асфалт изложени су абразивном хабању и корозији од битумена при температури до 200°C. Због уочених проблема при производњи асфалта одлучено је да се експериментална истраживања усмере на лопатице мешалица за производњу асфалта.

9.6.2.а Постројење, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци

Постројење за производњу асфалта, познато као асфалтна база се састоји из више целина: контејнера (бункера) за прихват различитих фракција агрегата, тракасти транспортера за транспорт агрегата од бункера до сушаре, сушаре за сушење агрегата, транспортера материјала од сушаре до отпрашивача, ланчастог транспортера (конвејера) за додавање агрегата високе финоће тзв. *филера* (испуне), посуда (цистерни) за битумен, ланчастог транспортера са посудама за асфалт, уређаја за отпрашивање са филтер врећама, компресорске станице са пнеуматским водовима и деловима за аутоматски рад, командног центра са рачунарским системом и др. Асфалтне базе, бетонске базе и дробилична постројења су посебна тзв. *стабилна постројења*, која представљају *фабрике у малом*, и захтевају специјално обучено људство за производњу, руковање и одржавање.

На слици 9.6.12 приказан је изглед асфалтне базе капацитета 120 t/h са свим неопходним процесним јединицама.



Слика 9.6.12 Изглед асфалтне базе капацитета 120 t/h

- **Асфалтне базе** су постројења за производњу различитих врста асфалта. Могу бити различитих капацитета, од мањих које су покретне и могу да се преносе на различите локације, до изузетно великих база које су стационарне на једном месту. Капацитет асфалтних базе креће се од неколико десетина до неколико стотина тона на сат произведене асфалтне масе.

- **Мешалице за асфалт** су уређаји који су саставни делови асфалтних база, а могу бити различитих величина у зависности од капацитета асфалтне базе. Мешалице служе за мешање сувог каменог материјала и битумена као везивног средства ситног камена, и у њима се израђује прави асфалтна мешавина тј. асфалт. Састоји се од два обртна дела, на којима су причвршћени држачи „руке“ на којима се монтирају лопатице, и непокретног дела тела на чијој унутрашњости су постављене облоге (плоче различитог облика) израђене од челика отпорних на абразивно хабање. За погон ротора користи трофазни електромотор одговарајуће снаге и каишни преносник са више трапезних каишева. Капацитет мешалица одређује и капацитет асфалтне базе.

На слици 9.6.13 приказана је унутрашњост мешалице са држачима (носачима) лопатица. На оба обртна дела (вратила), на држачима се монтира одређен број лопатица, а држачи се подешавају аксијално и радијално пре фиксирања, како би се заузео положај за најбоље мешање, да се избегне међусобни додир лопатица при раду. Ротори се обрћу у супротним смеровима. Похабане лопатице изгледају тако као да су монтиране две различите врсте, иако то није случај, јер су све нове лопатице истог облика.



а)



б)

Слика 9.6.13 Изглед унутрашњости мешалице постројење за производњу асфалта са распоредом лопатица: а) поглед одоздо, б) поглед одозго

- **Лопатице и сегменти облоге** су радни делови мешалице, чији је задатак да се добро измеша суви млевени камен са битуменом, како би се добила добро измешана асфалтна мешавина (асфалт). На оба ротора монтирано је укупно 64 комада лопатица (по 32 комада на сваком вратилу). Маса једне лопатице је нешто виша од 3 kg. Код мешалица различитог

капацитета број лопатица се разликује, а најчешће имају исти облик и масу. Израђују се ливењем од челика отпорних на абразивно хабање и корозију. На слици 9.6.14 приказан је изглед једне нове и једне похабане лопатице мешалице за асфалт.



Слика 9.6.14 Изглед лопатица мешалице: а) нова лопатица, б) похабана лопатица

- **Уочени проблеми при експлоатацији** проистичу услед велике кртости материјала од којег су изливане лопатице, неравномерног хабања, релативно кратког радног века, релативно дужег времена замене оштећених лопатица, губитка због застоја и повремене појаве асфалта лошег квалитета. Приликом саме монтаже често долази до лома кртих лопатица, што доводи до додатних производних трошкова. До лома лопатица може доћи и у току рада мешалице и при производњи асфалта. Када дође до лома једне лопатице могу се оштетити или поломити и други делови мешалице лопатице. Ако поломљена лопатица доспе у челични део екструдер (FINISERA), то изазива хаварију и застој у производњи уз велике производне трошкове. Повремена појава лошег квалитета асфалта и кратак радни век су основни разлози што смо донели одлуку да и радне делове мешалице за асфалт подвргнемо експерименталном истраживању.

9.6.2.6 Технологија наваривања лопатица мешалице за асфалт

Лопатице мешалице постројења за асфалт наваривали смо као нове (производно наваривање) тако што смо наносили делимичне наваре на различите начине. Наваривање је изведено REL-ом коришћењем више врста додатних материјала, да би се упоредила њихова отпорност на хабање условима експлоатације, и да би се изабрао најбољи додатни материјал. Такође, ова испитивања су послужила да се поред својства отпорности на хабање додатних материјала, испита отпорност на хабање и основног материјала. Добијени резултати истовремено служе да их упоредимо са претходним лабораторијским триболошким испитивањима.

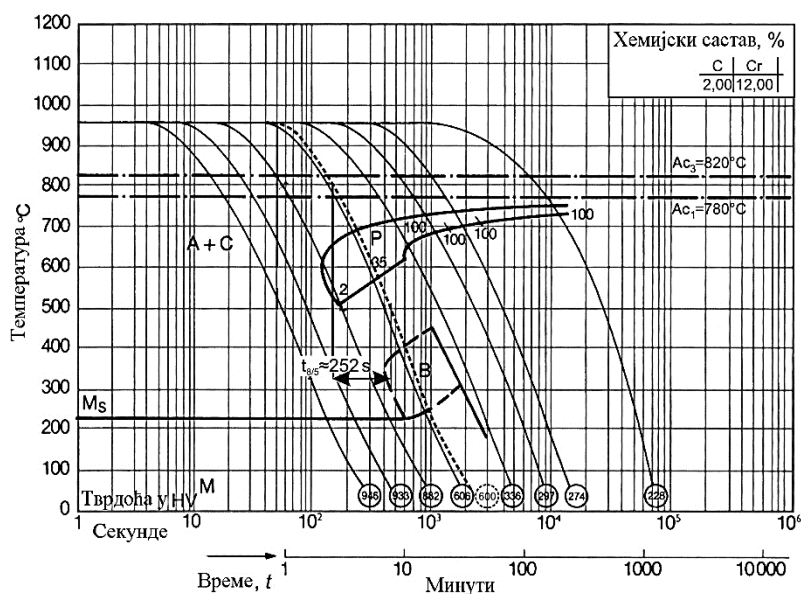
- **Основни материјал** је ČL4150, припада групи челичних ливова са високим садржајем угљеника и хрома, а сврстава се у групу условно, односно тешкозаварљивих челика. Ова врста челика је изузетно закаљива, па зато захтева пажљив избор посебне технологије наваривања уз неке додатне мере. Дебљина основног материјала ČL4150 од којег су израђене лопатице је $s = 25 \text{ mm}$. Оцена заварљивости, и температура предгревања одређена је по методи Сеферијана, што је дато у табlici 9.6.6.

Таблица 9.6.6 Одређивање температуре предгревања за ČL 4150

Начин одређивања T_p	Модификована формула Сеферијана	Дебљина О.М. $s, \text{ mm}$	Температура предгревања $T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	
			Рачунска	Усвојена
Метода Сеферијана	$CE = CE_n + CE_s = CE_n (1 + 0.005 \cdot s), \%$ $CE_n = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{18}, \%$ $T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0,25}, \text{ }^\circ\text{C}$	25	658.52	660

Пошто је овде реч о челику изузетно лоше заварљивости и велике склоности ка закаљивању, нисмо се могли ослонити само на температуру предгревања по Сеферијану, већ и време хлађења $t_{8/5}$ и КН-дијаграм.

Основни материјал (ČL4150) има сличан хемијски састав као челик G-X 210 Cr 12 за кога се у литературним изворима могу наћи одговарајући IRA и ARA дијаграми који приказују ток промене потхлађеног аустенита, и дају утицај температуре и времена хлађења на излазну структуру. Применом КН-дијаграма могу се уочити карактеристичне температуре, време почетка и завршетка формирања појединих фазних структура у зависности од брзине хлађења тј., времена континуалног хлађења из аустенитног подручја. На слици 9.6.15 приказан је КН-дијаграм за челик G-X 210 Cr 12 који има сличан хемијски састав као ČL4150 од којег су израђене лопатице мешалице постројења за производњу асфалта. У горњем десном углу уписан је хемијски састав челика, тј. садржаја A_{C3} и C_r , као и криве хлађења различитим брзинама са температуре 967°C . При највећој брзини хлађења добија се структура тврдоће 946 HV, а при најмањој 228 HV.



Слика 9.6.15 Дијаграм континуалног хлађења (КН-дијаграм) за челик G-X 210 Cr 12 \approx ČL4150 [141]

Овај челик има висок садржај угљеника и легиран је са карбидотворним елементом хромом, који при одређеним условима формира веома тврде карбиде што погоршава његову жилавост. Хром као легирајући елемент утиче на раздвајање области перлитног и бејнитног преображаја аустенита, проширује области стабилности аустенита и снижава температуру почетка мартензитне трансформације аустенита до $M_s = 220^\circ\text{C}$

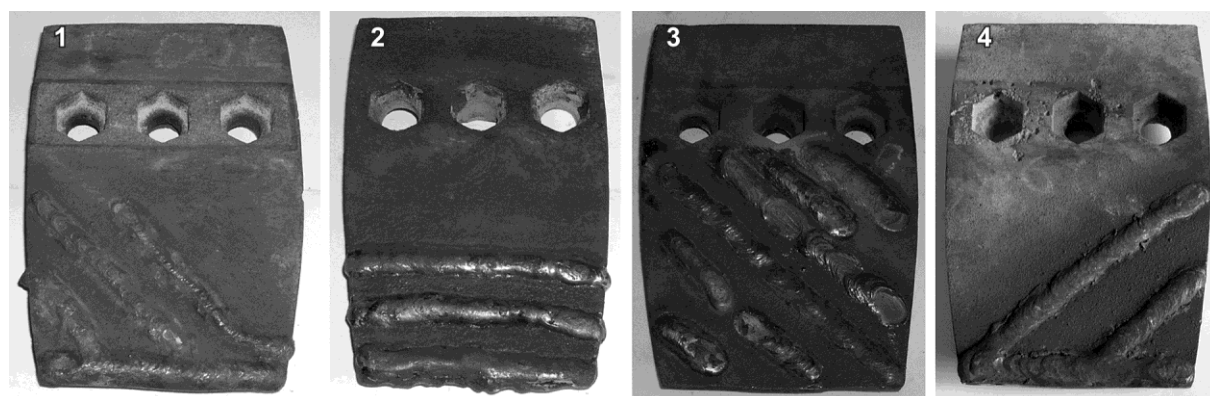
Време континуалног хлађења $t_{8/5}$ одређено је по формули јапанских аутора, будући да су наша претходна истраживања показала да се најбоља сагласност са експерименталним резултатима постиже применом ове формуле. Коришћењем неопходних величина (параметара наваривања) и одговарајућих константи, дошло се до времена хлађења $t_{8/5} = 252 \text{ s}$. Уношењем овог времена хлађења, у горњи дијаграм може се проценити новонастала структура и тврдоћа ZUT-а. Структура је мешовита: перлит са карбидима, аустенит, бејнит и мартензит, тј. међуфазна структура, чија је тврдоћа мања од 600 HV. Да би се добила оваква међуфазна структура при наваривању овог челичног лива, неопходно је да параметри наваривања буду приближно: $T_p \approx 500^\circ\text{C}$, $v_z \approx 0,120 \text{ cm/s}$ и $q_1 \approx 20170 \text{ J/cm}$. Очигледно је да је температура предгревања доста нижа него по методи Сеферијана. Мањим или већим варирањем параметара наваривање може да се побољша заварљивост и добије структура ZUT-а која обезбеђује наварени спој задовољавајућег квалитета. Да би се добила још повољнија структура ZUT-а, и повећала жилавост појединих зона навара као и смањено ниво заосталих напона, после наваривања препоручује се накнадна термичка обрада отпуштање, при чему треба пазити да не дође до великог омекшавања навара и смањивања отпорности на хабање.

• **Додатни материјали** коришћени за наваривање су: за међуслој електрода – INOX В 18/8/6; за навар електроде – ABRADUR 58; E DUR 600 и CrWC 600. Наваривање је изведено са REL–ом уз предгревање и наношење пластичног међуслоја, догревањем и полагањем двослојног навара од одговарајућег додатног материјала. Наваривање је изведено у лабораторијским условима, наношењем навара у хоризонталном положају, а процесни параметри наваривања испитиваних узорака дати су табелици 9.6.7.

Таблица 9.6.7 Процесни параметри наваривања REL–ом лопатица мешалице

Дебљина О.М. s, mm	Ознака електроде SŽ- Elektroda Jesenice	Пречник језгра електроде d _e , mm	Струја наваривања I, A	Радни напон U, V	Брзина наваривања v _z , cm/s	Погонска енергија наваривања $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta$, J/cm
25	INOX В 18/8/6	3,25	100	24	0,136	14118
	ABRADUR 58	3,25	130	25	0,124	20968
	E DUR 600	3,25	120	25	0,119	20168
	CrWC 600	3,25	125	25	0,116	21552

Наваривање лопатица мешалице је изведено после чишћења и браздања радних површина и сушења електрода по режиму 350°C/2 h. Наваривање је изведено после предгревања на 500°C, а после наваривања није била потребна накнадна термичка нити механичка обрада. На слици 9.6.16 приказан је изглед наварених лопатица на којима су изведена даља испитивања.



Слика 9.6.16 Изглед наварених узорака лопатица: 1-навар од D.M.-E DUR 600; 2,3-навар од D.M.-ABRADUR 58; 4-навар од D.M.-CrWC 600

Потребно је истаћи, да је пробним наваривањима утврђено да се успешно наваривање ČL4150 може извести само после предгревања на 500°C или нешто вишој температури, догревањем током наваривања и спорим хлађењем у пећи за прогревање. Штавише мора се нанети и пластични међуслој електродом INOX В 18/8/6 тек после предгревања, иако произвођач овог додатног материјала тврди да се она на сваки материјал може депоновати без предгревања. Сваки покушај наваривања на неки други начин доводи до појаве *хладних прслина* које почињу из ZUT-а попречно на осу навара, па се онда распростиру скоро паралелно уздужној оси навара. При појави и ширењу прслине јавља се карактеристичан и резак звук, сличан као при сечењу и ломљењу стакла. Прслине уз карактеристичан звук могу се појавити чак и до тридесет минута после наваривања чак и при хлађењу на мирном ваздуху.

9.6.2.в Одређивање отпорности лопатица на хабање

Наварене лопатице монтиране су у мешалицу за асфалт на крајевима ротора и то по два комада, једна на једном, а друга на другом крају уз равну облогу мешалице. На једном вратилу монтиране су наварене лопатице електродама E DUR 600 и ABRADUR 58 наношењем делимичних навара укоса, а на другом крају лопатице наварене електродама ABRADUR 58 наношењем делимичних навара попреко и електродом CrWC 600 наношењем делимичних навара укоса. Наварене лопатицама су монтиране на овим местима, јер је искуство показало, да је ту

највећи интензитет хабања, како лопатица тако и равних облога мешалице. На осталим местима на оба вратила монтиране су нове наварене лопатице, укупно шездесет комада.

Праћење ефективних радних сати мешалице било је доста једноставно, јер постоји баждарен уређај за мерење стварног радног времена. Процес хабања лопатица мешалице у току производног процеса, праћен је само визуелно за време застоја асфалтне базе, кад се може творити горњим поклопац мешалице. Очигледни позитивни ефекти наваривања лопатица уочени су после 240 h рада, односно после произведених 25 000 t асфалта. Позитивни učinак наваривања било је могуће уочити по карактеристичном начину хабања лопатица.

Испитивање хабања производно наварених и нових ненаварених лопатица, при радним условима изведено је после 720 h рада. У овом временском периоду произведено је укупно 86 000 t асфалта. На слици 9.6.17 приказан је изглед наварених лопатица после 720 h рада.



Слика 9.6.17 Изглед радних површина лопатица после 720 h рада: 1-навар од D.M.-E DUR 600; 2,3-навар од D.M.-ABRADUR 58; 4-навар од D.M.-CrWC 600

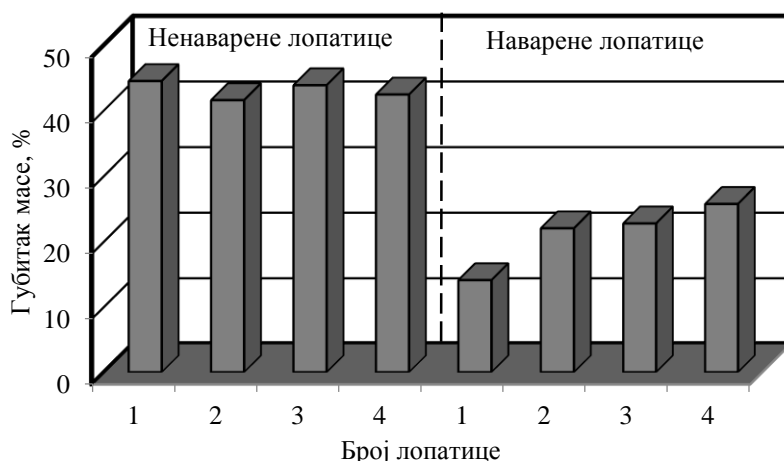
Отпорност лопатица на хабање одређивана је на основу губитка масе материјала, мерењем на баждареној електронској ваги пре и после процеса експлоатације. У процес испитивања укључене су све нове ненаварене и наварене лопатице. Резултати испитивања отпорности на хабање узорака лопатица приказани су у табlici 9.6.8.

Таблица 9.6.8 Резултати експерименталних испитивања отпорности на хабање лопатица мешалице после 720 h рада

Маса испитиваних узорака (лопат.)	Ненаварени узорци				Наварени узорци			
	1*	2*	3*	4*	1*	2*	3*	4*
На почетку испитивања, kg	3,350	3,320	3,330	3,300	3,630	3,630	3,600	3,650
На крају испитивања, kg	1,860	1,940	1,870	1,900	3,160	2,850	2,780	2,710
Губитак масе, kg	1,490	1,380	1,460	1,400	0,520	0,800	0,820	0,940
Губитак масе, %	44,48	41,57	43,84	42,42	14,13	22,04	22,78	25,75

*Напомена: Ово су средње вредности измерених маса са три ненаварена узорака нових лопатица које су монтиране на држачима на приближно истим местима у мешалици као и наварене лопатице.

Пре и после испитивања измерене су масе свих ненаварених и наварених лопатица, а у табlici 9.6.8 дате су само одабране вредности. Просечна маса ових шездесет ненаварених нових лопатица пре испитивања је била тачно 3,3 kg, а дванаест лопатица са највећом измереном масом је одвојено и монтирано на истим местима где и наварене, тј. на местима на вратилима уз равне делове мешалице. Ради боље прегледности, на слици 9.6.18, дат је графички приказ отпорности на хабање ненаварених нових и наварених лопатица на основу процентуалног губитка масе после 720 h рада.



Слика 9.6.18 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних узорака лопатица после 720 h рада

Из наших истраживања [79,104,106,141] може се закључити да је за посматрани временски период од 720 h рада процентуални губитак масе материјала ненаварених лопатица око 43%, док је код наварених лопатица за све случајеве наваривања око 21%. То значи да је радни век наварених лопатица најмање два пута дужи од ненаварених нових лопатица.

Потребно је напоменути да се са слике 9.6.17 не може јасно сагледати величина губитка материјала са похабаних лопатица због специфичног начина хабања. Радни део лопатица, нарочито предњи део испод завртњева за везивање за носач, после хабања има изглед оштрице сечива. Најбољу отпорност према овој врсти абразивног хабања показала је наварена лопатица са електродом Е DUR 600, затим наварене лопатице електродом АBRADUR 58 за оба начина наваривања, па наварена лопатица електродом CrWC 600. Уочено је да су ненаварене нове лопатице, идући према средини мешалице, претрпеле мањи губитак масе, а најмањи губитак претрпеле су лопатице у средини мешалице. Губитак масе материјала код ових лопатица је мањи од 40%. Овај податак је потврдило искуствено сазнање да је најинтензивнији процес хабања на крајевима мешалице уз равне облоге, а идући према средини мешалице губици масе се смањују.

9.6.3 НАВАРИВАЊЕ УДАРНИХ ГРЕДА ДРОБИЛИЦЕ ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДРОБЉЕНОГ КАМЕНА

Процесима абразивног хабања високог интензитета истовремено праћен јаким ударним оптерећењима, највише су изложени делови дробилица који су у директном контакту са стенским материјалима, а то су ударне греде и облоге дробилица. Сличним радним условима при експлоатацији изложени су и радни делови неких других машина и уређаја. Радни делови који су изложени абразивном хабању високог интензитета са повременим или сталним ударима су: делови различитих врста млинова; бургије за бушење камена; секачи, шпигеви и лопатице уређаја за разбијање асфалта и бетона; делови хидрауличних чекића за разбијање камена и др.

Радни век ових делова зависи од врста челика од којих су израђени као и од особина обрађиваних материјала. Стенски материјали који се користе у грађевинарству најчешће имају велику тврдоћу и добру отпорност на хабање, па је неопходно да се за радне делове грађевинске механизације, користе материјали који имају добру отпорност на абразивно хабање оба типа, и потребну жилавост да издрже ударна оптерећења.

Доминантан механизам хабања радних делова дробилица и млинова различитих конструкционих решења је абразивно хабање *затвореног типа*. Материјал који се дробити (уситњава) доводи се у радни простор између покретних и непокретних делова дробилице или меље, где се механичка енергија претвара у рад, који се троши на кидање кохезионих или адхезионих веза обрађиваног материјала. Процес обраде стенских материјала праћен је високим специфичним притисцима на контактним површинама радних делова. Зато ови делови морају да буду израђени од специјалних материјала, да би се стенски материјали уопште могли обрађивати.

9.6.3.a Постројење, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци

Постројење за производњу различитих фракција стенских (камених) материјала састоји се из више целина: примарне решетке која служи да пропусти камен одређених димензија, примарних дробилица, секундарних дробилица, примарног вибрационог сита, секундарног вибрационог сита, тракастих транспортера за одвођење уситњеног камена одређених фракција до депоније, компресорске станице и др. Погон дробиличног постројења остварује се трофазним електромоторима одговарајуће снаге и каишника са трапезним каишевима. Регулација рада постројења изводи се пнеуматским елементима слично као и код постројења за производњу асфалта.

Потребно је истаћи, да се пре дробљења или мљења камена врши његова припрема: скида се хумус булдожером; буше се рупе у камену и убацује експлозив; после повлачења машина и људства у заклон активира се експлозив; камен већих димензија се уситњава (разбија) хидрауличким чекићем и на крају се овако припремљен камен транспортује до примарне решетке дробилачког постројења или постројења за мљење.

- **Дробилична постројења** се израђују као стационарна или покретна и различитог су капацитета, слично као и асфалтне базе, односно бетонске базе. Покретна постројења имају ту предност што могу да се доста брзо инсталирају на различите локације где је и градилиште, чиме се знатно смањују трошкови транспорта. Стационарна дробилична постројења су већег капацитета, јер су код њих активне најчешће две али и више примарних и секундарних дробилица, док се код покретних дробиличних постројења најчешће користи само једна дробилица са ударним гредама, која одређује и капацитет постројења. Експериментална испитивања у овом раду су изведена на покретном дробиличном постројењу са сопственим погоном на гусеницама, са уграђеном ротационом дробилицом капацитета $350 \text{ m}^3/\text{h}$, сл. 9.6.19.

- **Дробилице и млинови** су уређаји који служе за уситњавање (дробљење или мљење) различитих материјала (камена, руда угља и др.), а различитих су конструкција и капацитета. Капацитет дробилице или млина одређује и капацитет постројења за производњу камених материјала. Дробилице се израђују као примарне и секундарне, и служе за производњу крупнијих фракција (гранулација), док млинови служе за ситно мљење материјала. Примарне дробилице служе за грубље дробљење материјала, а секундарне за финије уситњавање материјала. Камени материјал различите крупноће користе се за директну уградњу при изради грађевинских објеката, или за даљу производњу грађевинских материјала (цемент, креч, гипс и др.).



Слика 9.6.19 Изглед покретног дробиличног постројења капацитета $350 \text{ m}^3/\text{h}$

Најчешће се израђују дробилице следећих конструкција: ротациона дробилица са ударним гредама, ротациона дробилица са ударним чекићима, дробилица са чељустима и конусна вертикална ротациона дробилица. Ротациона дробилица са ударним гредама најчешће се састоји од: ротора; држача ударних греда; ударних греда; сегмената за причвршћивање ударних греда за носач, односно ротор; ваљкасто котрљајних радио-аксијалних лежајева великих димензија; тела дробилице са равним и полукружним облогама; покретног дела (груди) са фиксираном ударном гредом и механизмом за подешавање зазора, од којег зависи гранулација дробљеног камена; ланаца за успоравање камена при улазу у дробилицу из уводника материјала и др. Погон дробилице се остварује трофазним електромотором преко каишног преносника са клинастим каишевима, што омогућава проклизавање преко каишника у случају преоптерећења услед заглављивања камена између ротора и облоге. На тај начин заштићују се делови дробилице од хаваријског оштећења, мада овај начин заштите није увек и довољан, па може доћи до лома и великих хаваријских оштећења. Ова испитивања су изведена на радним деловима ротационе дробилице са ударним гредама, а изглед ове дробилице је приказан на слици 9.6.20.

- **Ударне греде** су заједно са облогама и стабилном гредом радни делови дробилице који су у директном контакту са каменом, а њихов задатак је да разбију и издробе камен на одговарајуће димензије (фракције). Ударне греде дробилице на којима су изведена испитивања израђене су ливењем од аустенитног манганског челика. У дробилицу се монтирају четири ударне греде димензија $300 \times 120 \times 1200 \text{ mm}$ чија је измерена маса по једном комаду тачно 300 kg . Израђују се у више специфичних облика који омогућавају причвршћивање за ротор дробилице помоћу држача и других елемената за фиксирање, јер се у току рада греде не смеју померати у односу на ротор ни у аксијалном ни радијалном правцу.

Потребно је истаћи, да се ротор дробилице после израде уравнотежава (балансира) одстрањивањем одређене масе материјала на тачно одређеним местима, да не би дошло до дебаланса приликом рада. Исто тако, ударне греде се израђују тачно одређене масе из истог разлога. Ударне греде имају две радне површине, тако да се после хабања једне стране, греда демонтира и окреће поново монтира и ради све док се не похаба и друга страна. Због велике масе, за монтажу и демонтажу ударних греда, користи се стубна дизалица уграђена на дробилично постројење, или утоваривач, виљушкар и др.



Слика 9.6.20 Унутрашњи изглед ротационе дробилице са ударним гредама капацитета $350 \text{ m}^3/\text{h}$

- **Облога дробилице** се састоји из сегмената (ливених равних и сферних плоча), које се за тело дробилице причвршћују завртњевима са унутрашње стране. Материјал сегмената облоге за конкретан случај је ČL3160, дебљине $s = 30 \text{ mm}$. Маса појединих сегмената облоге дробилице је различита, јер зависи од облика и димензија дробилице, а облоге су од манганског челичног лива.

Ради визуелне представе о интензитету хабања при експлоатацији у реалним радним условима, на слици 9.6.21 приказан је изглед нових и оштећених ударних греда, са које се види да су ударне греде изложене изузетно тешким радним условима, и да велика маса њиховог материјала остаје неискоришћена.



а)



б)

Слика 9.6.21 Изглед нових и похабаних ударних греда дробилице капацитета од $350 \text{ m}^3/\text{h}$: а) нове ударне греде, б) похабане ударне греде

Неопходно је нагласити, да је за несметано одвијање процеса производње и одржавање дробиличних постројења, неопходно ангажовање стручних људи специјализованих за овај посао, јер је реч о *фабрици у малом*, и они најчешће морају самостално да извршавају своје радне обавезе.

- **Уочени проблеми при експлоатацији** дробиличног постројења су: кратак радни век ударних греда, дуго време набавке, висока набавна цена, релативно дуго време потребно за замену оштећених делова, велики губици због застоја у производњи и појава хаваријских оштећења дробилице, велика количина скупог манганског аустенитног челика се одбацује као отпад и др. Основни разлози што се приступило овим испитивањима је да се истражи могућност продужења радног века ударних греда, да се смање трошкови производње каменог агрегата и да се отклоне узроци хаваријских оштећења дробилице услед лома њених саставних делова.

9.6.3.6 Технологија наваривања ударних греда дробилице

Наваривању ударних греда приступили смо применом сличне технологије као и при наваривању физичких модела [66,67,99,141], с тим што је наваривање изведено у реалним радним условима, што значи у најнеповољнијим техничким условима, па добијени резултати имају посебан значај, јер је очигледно да се наваривањем у радионици могу постићи бољи резултати.

Испитивање је изведено наваривањем осам ударних греда, односно на два сета ових делова, јер се због што боље уравнотежености ротора дробилице морају истовремено заменити све четири ударне греде. Испитивања су изведена за случај репаратурног наваривања и за случај производног наваривања ударних греда. За репаратурно и производно наваривање одабрани су исти процесни параметри наваривања REL-ом са обложеном електродама. Припрема подлоге, односно основног и додатног материјала је изведена идентично као код претходних примера. Процесни параметри репаратурног и производног наваривања греда дати су у табlici 9.6.9.

Таблица 9.6.9 Процесни параметри репаратурног и производног наваривања REL-ом ударних греда дробилице за камен

Дебљина О.М.- ЏЛ3460, s, mm	Ознака електроде SŽ-Elektrode Jesenice	Пречник језгра електроде d _e , mm	Струја наваривања I, A	Радни напон U, V	Брзина наваривања v _z , cm/s	Погонска енергија наваривања $q_t = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta$, J/cm
120	INOX B 18/8/6	5	160	26	0,178	18697
	ABRADUR 58	5	160	26	0,145	22952
	E DUR 600	5	200	28	0,220	25455
	E Mn 14	5	180	27	0,162	24000
	E Mn 17 Cr 13	5	200	28	0,168	26667

• **Производно наваривање** је изведено тако што су наварене две нове ударне греде, полагањем делимичних попречних вишеслојних једнопролазних навара електродом ABRADUR 58 на једној радној површини прве ударне греде, и електродом E DUR 600 на једној радној површини друге ударне греде [114,118,141]. Растојање делимично нанетих навара је било око 100 mm. Наваривање по једне радне површине следеће две ударне греде изведено је полагањем делимичних вишеслојних једнопролазних саћастих навара, тако што је једна ударна греда наварена електродом E Mn 14, а друга електродом E Mn 17 Cr 13. Код прве две ударне греде најпре је нанесен пластични међуслој електродом INOX B 18/8/6, па затим по два слоја електродама ABRADUR 58 и E DUR 600. Код друге две ударне греде наваривање је изведено директно на ЏЛ3460 nanoшењем по три слоја навара електродама E Mn 14 и E Mn 17 Cr 13. Дебљина и ширина овако нанетих навара била је приближно око 10 mm, због сигурности да ударне греде због висине навара, не би приликом обртања на почетку испитивања, удариле у непокретну масивну греду, која се налази на дну уводника материјала. Nanoшење пластичног међуслоја електродом INOX B 18/8/6 није изведено да би се побољшала заварљивост основног материјала, јер је овде реч о манганском аустенитном челику добре заварљивости, већ да би овај пластични међуслој спречио велико мешање и основног и додатног материјала.

• **Репаратурно су наваривање** све четири ударне греде, и то nanoшењем навара од различитих додатних материјала. Навари су нанети на једној похабаној радној површини, а друга радна површина која није учествовала у производном процесу остала је непохабана [132,134,135,141]. Ово је урађено због уравнотежавања дебаланса ротора дробилице, а и зато да се још једном провере резултати отпорности на хабање ЏЛ3460, односно потврде претходна испитивања.

Наваривани су исти материјали као и код производног наваривања, и то на једној похабаној површини на сва четири испитивана узорка. Свака ударна греда је наварена са различитим електродама: ABRADUR 58, E DUR 600, E Mn14 и E Mn 17 Cr 13. Навари су на радне површине намерно nanoшени уздужно од средине према крајевима, а не попречно, иако је ово лошија технолошка варијанта, због веће дужине навара и самим тим већег уноса топлоте, односно прегревања манганских аустенитних челика. Намера је била да се виде резултати примене неповољније технологије наваривања, и испита јачина везе између основног и додатног материјала. Из истог разлога је наваривање изведено обложеним електродама већег пречника од препоручених.

Потребна дебљина навара, да би се добила иста ширина као код нових ударних греда од 120 mm, постигнута је вишеслојним наваривањема. Дебљина навара се кретала од 10 mm на крајевима до 35 mm на средини ударних греда. Због специфичног начина хабања ударне греде се неколико пута више хабају у средини него на крајевима. Разлог за то је што материјал из уводника директно пада прво на средину ударних греда.

Потребно је истаћи, да је потом извођено репаратурно и производно наваривање обе радне површине ударних греда са истим додатним материјалом. На тај начин је проверена отпорност на хабање свих испитиваних материјала више пута, како основног тако и додатних материјала. На слици 9.6.22 приказан је изглед максимално похабане и репаратурно наварене ударне греде.



а)



б)

Слика 9.6.22 Изглед ударних греда дробилице капацитета $350 \text{ m}^3/\text{h}$: а) максимално похабана ударна греда, б) репаратурно наварена ударна греда

Праћењем већег броја производно и репаратурно наварених ударних греда нису уочене грешке типа прслина, иако су наносени навари релативно велике дебљине, поготово при репаратурном наваривању. Пре, у току и после наваривања није примењиван ниједан вид термичке обраде, већ су навари само брушени ручном брусилцом, да би били једнаке масе свих греда пре сваког испитивања као и због уравнотежавања ротора дробилице. Тада је на конкретним примерима уочено, да се мангански аустенитни челици изузетно тешко обрађују резањем, због трансформације аустенита у мартензит.

9.6.3.в Одређивање отпорности на хабање

Ненаварене и наварене ударне греде уграђене су у дробилицу тако што се водило рачуна о распореду масе (уравнотежењу), јер би неуравнотеженост ротора довела до хаварије дробилице. При монтажи производно наварених ударних греда једна насупрот друге су монтиране греде са попречно наносеним делимичним наварима, а исто тако су монтиране греде са сањасто нанетим наварима. Исти је био случај и са репаратурно навареним гредама.

Ефективни радни сати дробиличног постројења су једноставно контролисани помоћу баждареног уређаја за мерење времена рада у сатима. Отпорност на хабање процењивана је праћењем губитка материјала са радних површина. При праћењу хабања ударних греда већи проблеми су се јавили при одређивању губитка материјала него код зуба и лопатица. Наиме ударне греде имају велику масу па их је теже демонтирати, пренети и прецизно измерити.

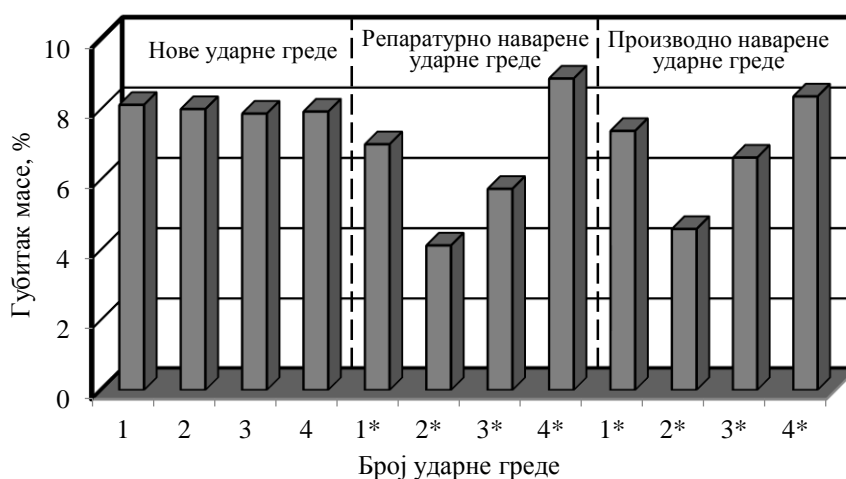
На основу искуства, као и изведених испитивања на новим ударним гредама, дошло се до податка да се једна радна површина ударне греде после око 70 h рада толико похаба да није могуће наставити процес производње, већ се оне морају окренути да би се искористила друга радна површина. Одређивање отпорности на хабање нових ненаварених и наварених (производно и репаратурно) ударних греда праћено је за исто ефективно радно време од 60 h по једној радној површини. Резултати наших испитивања приказани су у табlici 9.6.10, а отпорност на хабање је одређивана на основу масе изгубљеног материјала у посматраном временском интервалу [135,137,139,141]

Таблица 9.6.10 Резултати експерименталних испитивања отпорности на хабање ударних греда после 60 h рада

Маса испитиваних ударних греда	Нове ненаварене ударне греде				Репаратурно наварене ударне греде				Производно наварене ударне греде			
	1	2	3	4	1*	2*	3*	4*	1*	2*	3*	4*
На почетку испит., kg	300	300	300	300	300	300	300	300	305	305	305	305
На крају испит., kg	275,6	276,0	276,4	276,2	279	287,6	282,8	273,4	282,2	291,0	284,8	279,5
Губитак масе, kg	24,4	24,0	23,6	23,8	21,0	12,4	17,2	26,6	22,5	14,0	20,2	25,5
Губитак масе, %	8,12	8,00	7,87	7,93	7,00	4,12	5,73	8,87	7,38	4,59	6,62	8,36

*Напомена: 1 - D.M.-E Mn 14; 2 - D.M.-E Mn 17 Cr 13; 3 - D.M.-E DUR 600; 4 - D.M.-ABRADUR 58.

На слици 9.6.23 графички су приказани процентуални губици масе испитиваних узорака ударних греда, како ненаварених нових, тако и производно или репаратурно наварених, после 60 h рада.



Слика 9.6.23 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних узорака ударних греда после 60 h рада

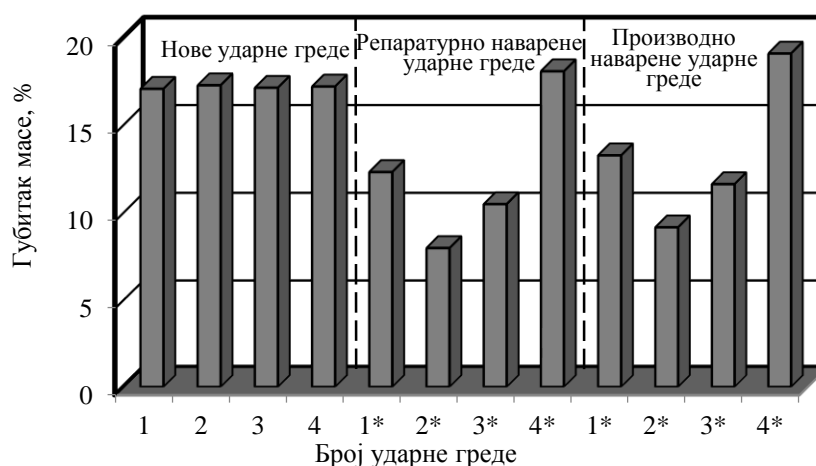
Испитивања на узорцима ударних греда дробилице су после прве фазе настављена и у другој фази, а резултати су упоређивани, да би се одредила њихова отпорност на хабање за време целог процеса експлоатације, односно до краја радног века. Изведено је производно или репаратурно наваривање на обе радне површине, а процес хабања је испитиван за све време производног процеса од 120 h рада. Начин испитивања је истоветан као и у првој фази. У табlici 9.6.11 приказани су резултати ових испитивања.

Таблица 9.6.11 Резултати експерименталних испитивања отпорности на хабање узорака греда после 120 h рада

Маса испитиваних ударних греда	Нове ненаварене ударне греде				Репаратурно наварене ударне греде				Производно наварене ударне греде			
	1	2	3	4	1*	2*	3*	4*	1*	2*	3*	4*
На почетку испит., kg	300	300	300	300	300	300	300	300	305	305	305	305
На крају испит., kg	248,8	248,2	248,6	248,4	263,0	276,0	268,5	245,8	264,5	277,0	270,5	249,0
Губитак масе, kg	51,2	51,8	51,4	51,6	37,0	24,0	31,5	54,2	40,5	28,0	35,5	58,2
Губитак масе, %	17,07	17,27	17,13	17,20	12,33	8,00	10,50	18,07	13,28	9,18	11,64	19,08

*Напомена: 1 - D.M.-E Mn 14; 2 - D.M.-E Mn 17 Cr 13; 3 - D.M.-E DUR 600; 4 - D.M.-ABRADUR 58.

На слици 9.6.24 дат је графички приказ процентуалног губитка масе испитиваних ударних греда, како нових ненаварених, тако производно или репаратурно наварених после 120 h рада.



Слика 9.6.24 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних ударних греда после 120 h рада

После прве и друге фазе испитивања ударних греда, при реалним радним условима у току експлоатације, добијени су слични резултати. Разлика је у изгубљеној маси материјала, јер је у првој фази испитивања хабања изложена само једна, а у другој фази испитивања обе радне површине ударних греда. Губитак масе са обе радне површине нешто је већи од два пута у односу на губитак масе са једне радне површине, највероватније због тога што су у првом случају радне површине два пута изложене хабању већег интензитета које се јавља на почетку процеса, док у другом случају оне су изложене само једанпут.

Према добијеним резултатима испитивања у обе фазе најбољу отпорност према овој врсти абразивног хабања показали су навари од електроде E Mn 17 Cr 13. Добру отпорност на хабање су показали и навари од електрода E Mn 14 и E DUR 600, док су најмању отпорност од свих навара па и од ČL3460 показали навари од електроде ABRADUR 58. На овакве резултате одлучујући утицај имали су: жилавост, односно кртост појединих структура испитиваних материјала; врста, облик, величина и распоред формираних карбида у металној основи; степен преображаја аустенитне у мартензитну структуру под дејством ударних оптерећења и високих локалних специфичних притисака и др.

Када се упореде резултати добијени испитивањима на физичким моделима у лабораторијским условима, и резултати добијени испитивањима на реалним радним деловима у условима експлоатације, уочена су велика одступања код појединих навара од истих материјала

у погледу отпорности на хабање. Ово се посебно односи на наваре од манганских аустенитних електрода, зато што услови испитивања на физичким моделима нису били исти као у радним условима при експлоатацији. Овим испитивањима на узорцима нових ударних греда дошло се до значајног податка, да се у процесу производње похаба максимално 20% њиховог материјала, а више од 80% остаје неискоришћено па се одбацује у отпад, што ствара велике производне трошкове.

Да би се боље сагледао интензитет хабања у дробиличним постројењима при производњи дробљеног камена, у овом случају од калцитско-доломитског кречњака, на слици 9.6.25 приказан је изглед репаратурно наварене ударне греде пре њене уградње у дробилицу и на крају експлоатације када је контролисан губитак масе.



а)



б)

Слика 9.6.25 Изглед испитиваног узорка ударне греде: а) наварена ударна греда пре испитивања, б) похабана ударна греда после испитивања

Најбољи пример, шта се дешава када радни делови грађевинске механизације нису израђени од одговарајућих материјала, јесте хаваријско оштећење њихових виталних склопова. На слици 9.6.26 приказана су хаваријска оштећења ударних греда дробиличног постројења, када је дошло до њеног лома.



а)



б)

Слика 9.6.26 Хаваријско оштећење ударне греде: а) делимично поломљена ударна греда (одломљен један део), б) потпуно поломљена ударна греда (по попречном пресеку)

Код овог конкретног случаја, до застоја услед хаваријског оштећења дробилице дошло је због уградње ударних греда израђених од материјала који није предвиђен за ову намену, а последица је одвајање дела материјала са једне ударне греде. То је довело до лома свих ударних греда, лома скоро свих држача ударних греда, који се налазе на ротору дробилице, делимичног лома (појава прелина) на ротору дробилице (носачима ударних греда) и оштећења котрљајних радиоаксијалних лежајева ротора.

9.6.4 НАВАРИВАЊЕ НОЖЕВА УРЕЂАЈА ЗА УКЛАЊАЊЕ РАСТИЊА И НОЖЕВА УРЕЂАЈА ЗА ПОВРШИНСКО РАВНАЊЕ ТЕРЕНА

Радни делови ових уређаја су у току процеса експлоатације најчешће истовремено изложени различитим врстама хабања, тзв. *комбинованом хабању*. Реч је о две или три врсте хабања и то на начин да процес хабања почиње по механизму једне врсте хабања, а у току процеса хабања се наставља по механизму друге врсте хабања. Најбољи пример је комбиновано хабање које почиње по механизму адхезионога, а даље се наставља по механизму абразивног хабања. Такође, добар пример је када процес хабања почиње по механизму корозионог хабања, а даље се наставља по механизму абразивног хабања. Процеси хабања се ради лакшег проучавања разврставају по доминантним механизмима настајања и одвијања процеса. Они се настављају један на други или чешће преклапају делимично или у потпуности. Уопштено посматрано, скоро сваки процес хабања почиње и завршава се по механизму заморног хабања који настаје када у материјалу после еластичних наступају пластичне деформације, а када се исцрпи могућност пластичног деформисања материјала формирају се врхови прслина, који даље расту и изазивају лом. Између околне средине и контактних површина увек долази до физичко-хемијских реакција па је сваки процес праћен тзв. *хемијским*, односно *корозионим хабањем* [14,40,162].

Делови грађевинске механизације су за време експлоатације изложени најразличитијим врстама хабања. Код неких делова могуће је одредити доминантни механизам хабања, па се интензитет хабања одређује по емпиријским формулама за ту врсту хабања. Међутим, већи број радних делова ради у таквим условима где је немогуће одредити доминантну врсту хабања, па се одређује укупни интензитет хабања помоћу одговарајућих емпиријских формула [52,161,162].

Типичан пример комбинованог процеса хабања одвија се код ножева за уклањање растиња, ножева за површинско равнање терена, ножева за ископ канала, бургија за бушење стенских материјала, радних делова алата за разбијање материјала, радних делова фреза за љуштење слојева асфалта и бетона, радних делова пумпи за транспорт бетона, ситног песка, цемента, малтера и др. Већина ових радних делова истовремено је изложена абразивном, корозионом, заморном, кавитационом и другим врстама хабања, уз повремена или стална ударна оптерећења различитог интензитета. Овде је испитиван процес хабања код ножева за чишћење растиња и ножева за површинско равнање терена.

9.6.4.a Грађевинска машина, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци

- **Машина** на коју су инсталирани (монтирани) уређаји за време испитивања је UNIMAG-640, немачке производње израђена у фабрици „MERCEDEC“. Ова радна машина има могућност да се на њу може прикључити 32 различита уређаја: плуг за чишћење снега, уређај за равнање терена, уређај за посипање расутих материјала, уређај за сечење стабала дрвећа, уређај за ископ уских канала при полагању каблова, цевовода и др., уређај за подизање терета, уређај за сабијање подлоге (виброконпактор), уређај за бушење рупа у земљишту, уређај за разбијање асфалта и бетона, уређај за одбацивање снега са пута (ролба), кашика за утовар расутог материјала, кашика за ископ ширих канала, уређаја за побијање стубова, уређаја за монтирање одбојних ограда, уређај за извлачење и др.

Погон прикључених уређаја може се остварити преко хидрауличног система, и преко једног или два излазна вратила са спољашњим озубљењем на која се монтирају кардански преносници. На излазним ожлебљеним вратилима може се остварити број обртаја $n = 540 \text{ min}^{-1}$ и $n = 1000 \text{ min}^{-1}$. По потреби, може истовремено да ради са два па чак и три уређаја истовремено. Ово је спороходна машина и максимална брзина кретања је 60 km/h . Ову машину опслужују два радника, један управља машином, а други уређајем преко хидрауличних команди. Реч је о изузетно моћној универзалној машини, велике инсталиране снаге са погоном на сва четири точка, а на слици 9.6.27 приказана је ова машина при раду.



Слика 9.6.27 Изглед радне машине типа UNIMAG-640 за време рада

- **Уређај за чишћење растиња** (траве, младара дрвећа и др.) погон добија од радне машине, преко ожлебљеног излазног вратила и карданског преносника на ожлебљено вратило хидрауличне пумпе. Даље се погон преноси од хидрауличне пумпе преко разводника и црева високог притиска до хидромотора. На вратилу овог мотора налази се каишник са којег се преко трапезних каишева погон преноси на ротор уређаја. Каишни преносник служи за заштиту уређаја, јер када дође до преоптерећења каишеви проклизају преко каишника. На самом уређају се налази мерач ефективних радних сати који се читавају помоћу индикатора инсталиран на ротору уређаја. На слици 9.6.28 приказан је уређај за чишћење растиња.

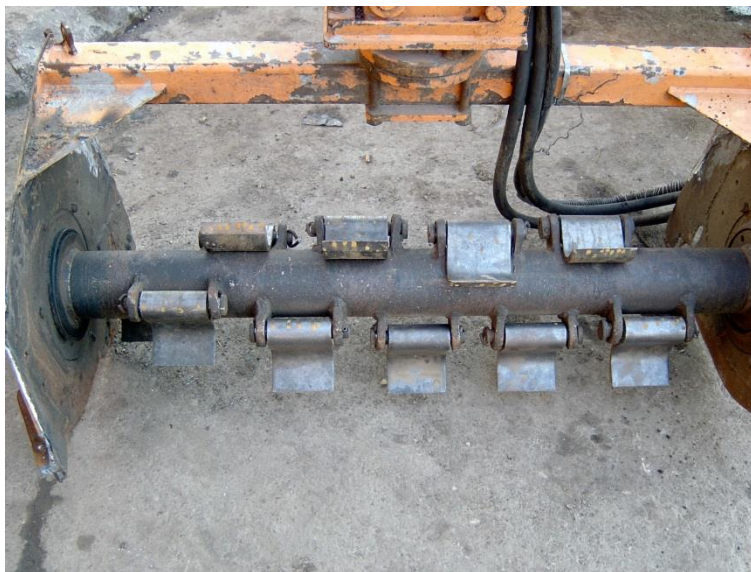


Слика 9.6.28 Изглед радног простора уређаја за чишћење растиња

На ротору су уграђени држачи за ножеве, тако што су заварени по обиму ротора наизменично у четири реда. У зависности од капацитета разликују се и димензије радног дела уређаја, а у конкретном случају на ротору овог уређаја постоје држачи за монтажу 40 ножева специфичног облика, који су за носаче везани преко специјалних држача завртњевима и наврткама. Ови држачи су наменски обликовани тако да пролазе кроз отворе на ножевима, чиме је омогућено да ножеви за време окретања ротора заузимају различите положаје. Испред ножева,

уграђен је обртни ваљак, који додатно штити ножеве. На задњем делу уређаја намонтирана је трака од тврде гуме, изрезане као перле, која служи за заштиту људи, машине и уређаја од одбаченог камена, земље и исечених делова растиња. Заштита може бити израђена и од ситних ланаца међусобно повезаних алкама.

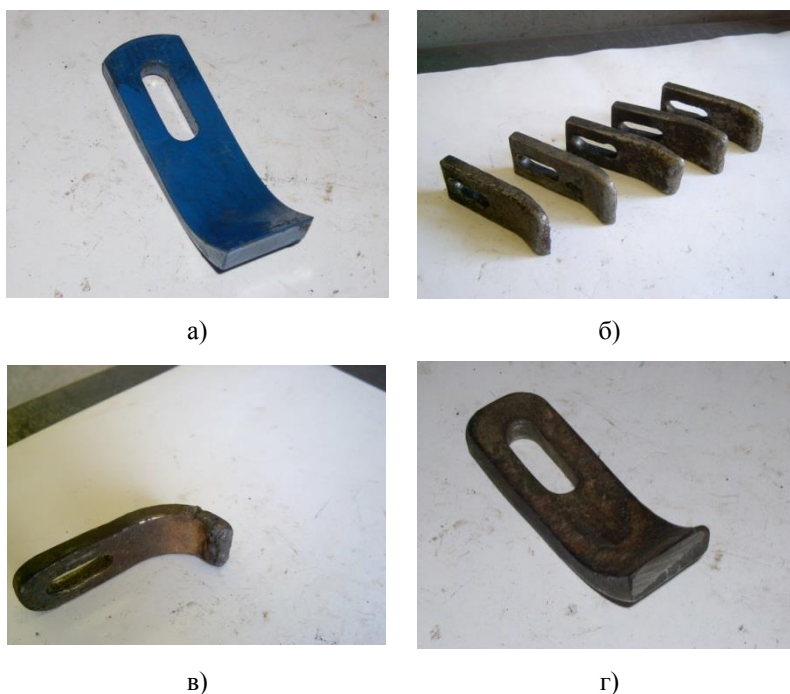
- **Уређај за површинско равнање терена** је сличан као и претходни уређај, стим што је већих димензија, а конструкција је веће крутости. На слици 9.6.29 приказан је изглед радног простора овог уређаја.



Слика 9.6.29 Изглед радног простора уређаја за равнање терена

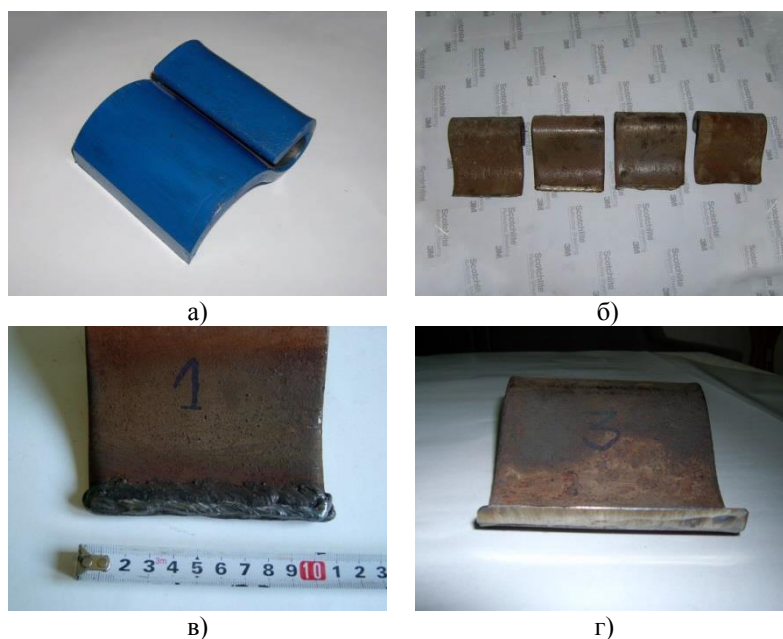
Овај уређај погон добија на исти начин као и претходни. На ротору, по његовом обиму наизменично су заварена по два носача за ножеве. Предвиђена је монтажа укупно 14 ножева у четири реда наизменично по обиму ротора. Ножеви су специјалног облика и за носаче на ротору уређаја монтирају се помоћу завртњева и навртки, који пролазе кроз посебно израђен отвор на ножу и кроз отворе оба држача. Ножеви слободно могу да се померају око осовине (завртња) све док не дође до већег оптерећења када се задњим делом ослањају на предвиђена места на ротору уређаја, под углом од 90° , и тада изводе резање земље, корења и другог материјала и њихово растресање, слично као фреза за обраду земље. Може да служи као и претходни уређај, за чишћење терена, али његова намена је првенствено за површинско равнање терена, јер поред чишћења (кошења) растиња служи за сечење корења траве и младара дрвећа, површинску обраду земље и другог расутог материјала при обради канала, косина, јаркова и банкина. Испред ножева уграђен је ваљак који штити ножеве и одређује дубину задирања у земљу, а са задње стране монтирани су заштитни ланци, слично као код претходног уређаја.

- **Ножеви уређаја за чишћење растиња** су специјалног облика и служе за сечење растиња. Код уређаја за чишћење растиња на коме је изведено испитивање, има места за монтажу 40 ножева постављених у четири реда наизменично дуж осе ротора. Носачи ножева су заварени за ротор у четири реда по 10 ножева под углом од 90° , а распоређени су тако да покрију целу радну ширину од 1000 *mm*. На слици 9.6.30 приказан је изглед нових и похабаних ножева за чишћење терена, који су израђени од Č4732, а њихова маса је 0,3 *kg* по једном комаду.



Слика 9.6.30 Изглед ножева уређаја за чишћење растиња: а) нов нож, б) похабани ножеви, в) наварен нож, г) наоштрени нож

• **Ножеви уређаја за равнање терена** су специјалног облика и могу да служе за сечење растиња и њиховог корења, мада им је основна намена обрада површинских слојева земље. Код уређаја на коме је изведено испитивање има места за монтажу 14 комада ножева постављених наизменично у четири реда на ротор уређаја под углом од 90° . У два супротна реда монтирано је по 4 ножа, а у два друга реда, постављена такође са супротних страна ротора, монтирано је по 3 ножа. Ножеви су постављени тако да покрију комплетну радну ширину уређаја од 1200 mm. На слици 9.6.31 приказан је изглед нових и похабаних ножева уређаја за равнање терена, који су израђени од Č4830, а њихова маса је 1,7 kg по једном комаду.



Слика 9.6.31 Изглед ножева уређаја за равнање терена: а) нов нож, б) похабани ножеви, в) наварени нож, г) наоштрени нож

• **Уочени проблеми при експлоатацији** код оба уређаја су: изузетно кратак радни век ножева; релативно дуги застоји због оштећења, оштрења и замене ножева; честа оштећења комплетног радног дела уређаја, недовољно искоришћење капацитета уређаја и радне машине.

Поред тога, на ножевима уређаја за чишћење растиња примећено је неравномерно хабање резне ивице по целој ширини ножа од 35 mm, и делимично исправљање повијеног дела ножа по резној ивици. Код ножева уређаја за равнање терена уочено је неравномерно хабање резне ивице, тако да је она много више похабана по средини ножа, него на крајевима.

- **Основни материјали** од којих су израђени једна и друга врста ножева разликују се по свом хемијском саставу. Како је већ истакнуто, ножеви уређаја за чишћење растиња израђени су од Č4732, а ножеви уређаја за равнање терена од Č4830. Оба ова челика сврставају се у групу челика за побољшање. Иако се налазе у истој групи, њихов хемијски састав се донекле разликује, како по садржају угљеника тако и по садржају легирајућих елемената. Због високог садржаја угљеника и легирајућих елемената, припадају групи условно заварљивих челика, код којих је потребно предузети додатне мере при наваривању.

Сви испитивани узорци су репаратурно наваривани, са предгревањем или наношењем пластичног међуслоја [107,114,115]. У табlici 9.6.12 дате су температуре предгревања одређене за оба основна материјала по модификованој формули Сеферијана. Дебљина обе врсте ових ножева је $s = 10 \text{ mm}$.

Таблица 9.6.12 Одређивање температуре предгревања за Č4732 и Č4830

Начин одређивања T_p	Модификована формула Сеферијана	Врста О.М. $s=10 \text{ mm}$	Температура предгревања $T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	
			Рачунска	Усвојена
Метода Сеферијана	$CE = CE_h + CE_s = CE_h (1 + 0.005 \cdot s), \%$	Č4732	266	300
	$CE_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{18}, \%$ $T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0,25}, \text{ }^\circ\text{C}$	Č4830	271	300

Располагали смо и дијаграмима континуалног хлађења (КН-дијаграми) за горе навариване челике па смо њихову заварљивост проверавали и на основу времена хлађења $t_{8/5}$, што омогућава процену структуре ZUT-а за различите процесне параметаре наваривања. Брзина хлађења, односно време хлађења $t_{8/5}$ одређено је по формули јапанских аутора и одговарајућих КН-дијаграма. За оцену новонастале структуре у ZUT-у код Č4732, коришћен је КН-дијаграм за челик са ознаком 42CrMo4, а за оцену новонастале структуре у ZUT-у код Č4830, коришћен је КН-дијаграм за челик са ознаком 50CrV4. Ови челици имају приближно исти хемијски састав као и челици навариваних ножева.

- **Додатни материјали** који су коришћени за репаратурно наваривање код обе врсте ножева су електроде: INOX В 18/8/6; ABRADUR 58; Е DUR 600; Cr WC 600; Е Mn 14 и Е Mn 17 Cr 13. Електрода INOX В 18/8/6 је коришћена за наношење пластичног међуслоја, а остале електроде за полагање навара на ножеве с циљем одређивања њихове отпорности на комбиновано хабање у радним условима. У табlici 9.6.13 дати су процесни параметри наваривања ножева свих испитиваних узорака, а наваривање је изведено REL-ом.

Таблица 9.6.13 Процесни параметри наваривања REL – ом ножева уређаја за чишћење и равнање терена

Дебљина О.М. $s, \text{ mm}$	Ознака електроде SŽ-Elektrode Jesenice	Пречник језгра електроде $d_e, \text{ mm}$	Струја наваривања $I, \text{ A}$	Радни напон $U, \text{ V}$	Брзина наваривања $v_z, \text{ cm/s}$	Погонска енергија наваривања $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta, \text{ J/cm}$
10	INOX В 18/8/6	3,25	100	24	0,136	14118
	ABRADUR 58	3,25	100	24	0,124	17420
	Cr WC 600	3,25	100	24	0,116	16552
	Е DUR 600	3,25	100	24	0,119	16134
	Е Mn 14	3,25	100	24	0,148	12973
	Е Mn 17 Cr 13	3,25	100	24	0,152	14211

Наваривање је изведено са струјом нешто мање јачине него при заваривању, јер је при наваривању потребан мањи унос топлоте. Наваривање ножева електродама ABRADUR 58, E DUR 600 и Cr WC 600 изведено је преко претходно нанетог пластичног међуслоја електродом INOX В 18/8/6, док се електродама E Mn 14 и E Mn 17 Cr 13 навари полажу директно на основни материјал Č4732 или Č4830. Припрема узорка за наваривање и додатног материјала изведена је на исти начин као при наваривању код претходних примера, тј. одмашћивањем и браздањем навариваних површина ножева, и сушењем обложених електрода по устаљеној процедури.

Репаратурно наваривање ножева уређаја за чишћење растиња изведено је на укупно десет узорка, тако што су навари по два узорка електродама E DUR 600 и E Mn 17 Cr 13, а по три узорка електродама ABRADUR 58 и Cr WC 600 [116,117]. Сви узорци су обележени на супротном делу од сечива да би се разликовали од ненаварених нових ножева и међусобно. На слици 9.6.32 приказани су навари ножеви уређаја за чишћење растиња.



Слика 9.6.32 Изглед наварених и наоштрених ножева уређаја за чишћење растиња

Репаратурно наваривање ножева уређаја за равњање терена изведено је на укупно четири узорка, тако што су навари по један узорак електродама ABRADUR 58, E DUR 600, E Mn 17 Cr 13 и E Mn 14 [67,69,115,116]. Сви узорци су обележени на супротном делу од сечива ножа да се при испитивању не помешају са ненавареним новим ножевима и међусобно. На слици 9.6.33 приказани су навари ножеви уређаја за равњање терена.



Слика 9.6.33 Изглед наварених и наоштрених ножева уређаја за равњање терена

После наваривања ивице ножева брушењем су наоштрене под истим углом као и код нових ненаварених ножева. Одстрањивање вишка навареног материјала приликом оштрења извођено је све док наварени ножеви не дођу на исту масу као и нови ножеви. Сви ножеви су оштрени под углом од 30° , тако да је висина наоштреног резног клина око 15 mm, колика је приближно и дебелина нанетих навара на похабаним ножевима. На овај начин су припремљени репаратурно навари ножеви за оба уређаја на којима је одређивана отпорност на хабање у реалним радним условима.

9.6.4.6 Одређивање отпорности на хабање

За одређивање отпорности на хабање нових и репаратурно наварених ножева уређаја за чишћење растиња коришћено је укупно 40 узорака (један сет), при чему су 10 ножева били репаратурно наварени са четири врсте различитих додатних материјала. Одређивање отпорности на хабање нових и репаратурно наварених ножева уређаја за равнање терена изведено је на укупно 14 узорака (један сет), при чему су 4 ножа били репаратурно наварени са четири различита додатна материјала. Ефективни радни сати праћени су на баждареном уређају за мерење времена рада, који су фабрички уграђени како на уређају за чишћење растиња тако и уређају за равнање терена.

- **Праћење процеса хабања на ножевима уређаја за чишћење растиња** изведено је тако, што је на предвиђеним местима за монтажу ножева уграђено 30 ненаварених нових ножева и 10 репаратурно наварених ножева са различитим додатним материјалима. Наварени ножеви су монтирани у четири реда на средини ротора, јер је искуствено познато да је ту највећи интензитет хабања. Маса свих нових и репаратурно наварених ножева је пре монтаже оштрењем била доведена на масу од 0,3 kg. Број обртаја ротора био је подешен на $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ за све време испитивања отпорности ножева на хабање. После 12 h рада, визуелно је контролисано стање испитиваних узорака, и тада нису уочена никаква оштећења у виду прлина, крзања и др., мада је уочен почетак хабања резних ивица ножева. Време ефективног рада испитиваних узорака претходно је одређено на основу искуства стеченог при коришћењу нових ножева. Губитак материјала, као мера похабаност комплетне резне ивице, без накнадног оштрења, износи око 120 h рада, па је стога ово време узето као време испитивања.

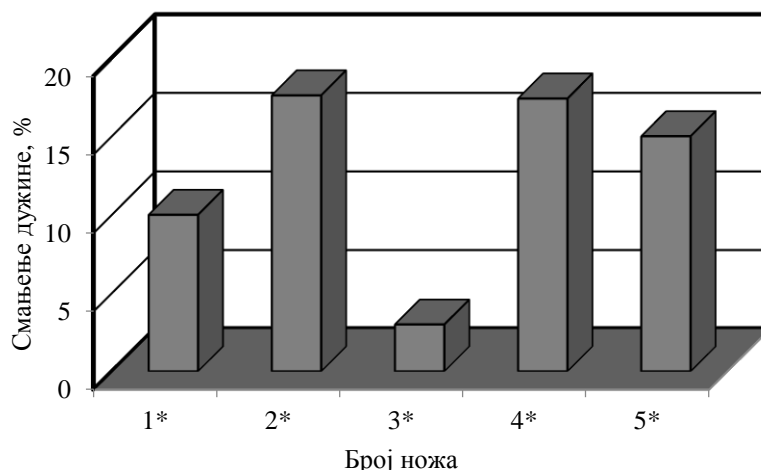
После 120 h рада скинути су сви испитивани узорци, затим су очишћени и опрани од наслага нечистоћа, и најзад измерени на дигиталној ваги велике тачности. Иако су мерења била прецизна, због релативно мале масе узорака, и мале разлике у масама после испитивања, довело је до тога да ови резултати нису били довољно поуздани да би се оценила отпорност на хабање. Зато смо приступили мерењу дужине испитиваних узорака, односно одређивању линијске похабаности. У табlici 9.6.14 приказани су добијени резултати, при чему су дате средње дужине за наварене ножеве са истим додатним материјалом, и све ненаварене ножеве који су од истог основног материјала.

Таблица 9.6.14 Резултати мерења линијске похабаности испитиваних узорака ножева после 120 h рада

Дужина испитиваних узорака, mm	Репаратурно наварени ножеви (10 комада)										Нови ненаварени ножеви (30 комада)
	1*		2*		3*			4*			
На почетку испитивања	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
На крају испитивања	89,8	90,2	82,3	82,5	97,0	96,8	97,2	82,4	82,8	82,6	84,8-85,2
Средња вредност	90,0		82,4		97,0			82,6			85,0
Смањење дужине, %	10,0		17,6		3,0			17,4			15,0

*Напомена: 1-D.M.-ABRADUR 58; 2-D.M.-Cr WC 600; 3-D.M.-E DUR 600; 4-D.M.-E Mn 17 Cr 13; 5-O.M.-Č4732.

Ради бољег прегледности ових резултата, на слици 9.6.34 дат је графички приказ процентуалног смањења дужине ножева изазваног хабањем, после 120 h рада.



Слика 9.6.34 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних узорка ножева после 120 h рада

На основу добијених резултата види се да су већу отпорност на комбиновано хабање у овом случају показали репаратурно наварени ножеви електродама E DUR 600 и ABRADUR 58, а мању отпорност наварени ножеви електродама E Mn 17 Cr 13 и Cr WC 600 код којег је уочено крзање навара. У овом случају отпорност на хабање навара је нешто мања и од отпорности на хабање основног материјала Č4732 [116,117].

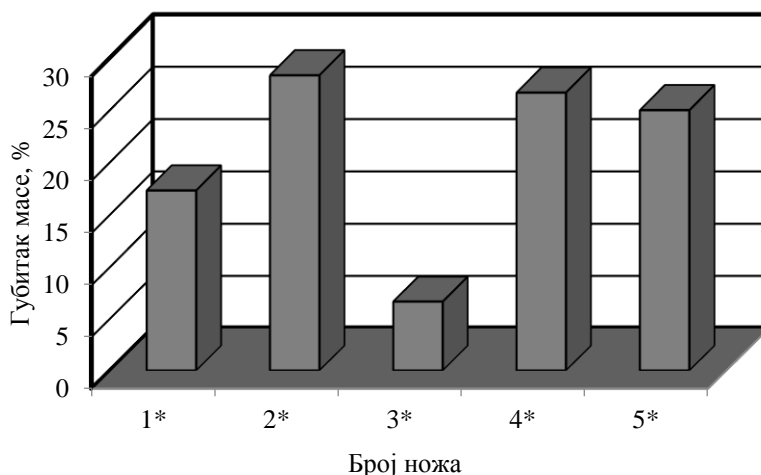
Због провере поузданости добијених резултата похабани ножеви су без накнадног оштрења поново монтирани на иста места на ротору, и продужено је испитивање у другој фази још 120 h рада, што је укупно 240 h рада. После овог времена, ножеви су скинути, очишћени и измерене њихове масе. Добијени резултати испитивања приказани су у табlici 9.6.15 и на слици 9.6.35.

Таблица 9.6.15 Отпорност на хабање испитиваних узорка ножева уређаја за чишћење растиња после 240 h рада

Маса испитиваних узорка, g	Репаратурно наварени ножеви (10 комада)										Нови ненаварени ножеви (30 комада)
	1*		2*		3*			4*			
На почетку испитивања	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
На крају испитивања	250	246	212	218	274	286	280	216	224	220	225
Средња вредност губитка масе	52,0		85,0		20,0			80,0			75,0
Губитак масе, %	17,33		28,33		6,67			26,67			25,00

*Напомена: 1-D.M.-ABRADUR 58; 2-D.M.-Cr WC 600; 3-D.M.-E DUR 600; 4-D.M.-E Mn 17 Cr 13; 5-O.M.-Č4732.

На основу резултата из таблице 9.6.15 дат је графички приказ процентуалног губитка масе материјала испитиваних ножева на слици 9.6.35.



Слика 9.6.35 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних узорка ножева на основу процентуалног губитка масе после 240 h рада

На основу добијених резултата у првој фази испитивања, не може се поуздано закључити о стварном губитку материјала навара услед хабања, будући да се после губитка материјала навара даље хаба само основни материјал. Међутим после друге фазе испитивања добија се јасна слика у којој мери су навари од различитих додатних материјала, допринели смањењу интензитета хабања репаратурно наварених ножева.

Најбољи показатељ утицаја појединих додатних материјала на смањење интензитета хабања ножева, јесу преостале дужине ножева после 240 h рада, где се види очигледна разлика. Мерењем масе ножева после 240 h рада утврђено је да су добијени резултати прве и друге фазе ових испитивања поуздани и међусобно сагласни. Најмања преостала дужина ножева је код оних који су наварени електродама Cr WC 600 и E Mn 17 Cr 13, а највећа преостала дужина је код ножева који су наварени електродом E DUR 600, јер само код њих су остали непохабани делови навара, док код осталих репаратурно наварених ножева није било ни трага од навареног материјала [116,117].

- **Праћење процеса хабања на ножевима уређаја за равнање терена** изведено је тако, што су на предвиђеним местима за монтажу монтирани 10 ненаварених ножева, и 4 репаратурно наварена ножа са различитим додатним материјалима. Монтажа наварених ножева је изведена тако, што су они монтирани у сва четири реда на средини ротора, где је највећи интензитет хабања. Маса сваког новог и репаратурно навареног ножа је пре монтаже, оштрењем доведена на масу од 1,7 kg. Број обртаја ротора уређаја је подешен на $n = 540 \text{ min}^{-1}$ за све време испитивања отпорности на хабање ножева.

После 60 h рада, визуелно је испитивано стање узорка, и тада нису уочена оштећења у виду прлина, крзања и др., али је уочено хабање резних ивица ножева. Испитивање хабања је изведено после 240 h рада, што је просечан радни век нових ножева. До овог податка се дошло искусно, после дужег периода експлоатације уређаја и хабања нових ненавариваних ножева.

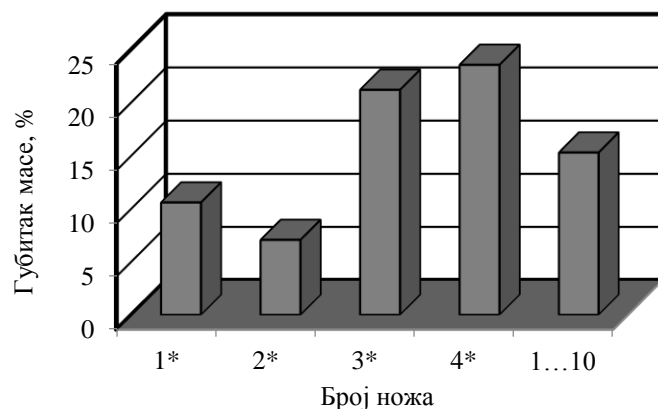
После 240 h рада ножеви су скинути, очишћени и опрани, од наслага земље, па је измерена маса свих ножева на дигиталној ваги велике тачности. Пре почетка мерења, визуелном контролом, могло се утврдити да на ножевима навареним електродама ABRADUR 58 и E DUR 600 још увек има материјала навара, док на ножевима навареним електродама E Mn 17 Cr 13 и E Mn 14 материјала навара није било, јер је дошло до његовог потпуног губитка услед хабања [69,107]. У табlici 9.6.16 приказани су резултати мерења маса ножева пре испитивања, и губитак њихове масе услед хабања при реалним радним условима после 240 h рада.

Таблица 9.6.16 Отпорност на хабање испитиваних узорака ножева уређаја за равнање терена после 240 h рада

Маса испитиваних ножева	Репаратурно наварени ножеви (4 комада)				Нови ненаварени ножеви (10 комада)									
	1*	2*	3*	4*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
На почетку испитивања, kg	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
На крају испитивања, kg	0,18	0,12	0,36	0,40	0,25	0,28	0,27	0,24	0,26	0,25	0,27	0,26	0,24	0,28
Средња вредност губитка масе, kg	0,18	0,12	0,36	0,40	0,26									
Губитак масе, %	10,59	7,06	21,18	23,53	15,29									

*Напомена: 1-D.M.-ABRADUR 58; 2-D.M.-E DUR 600; 3-D.M.-E Mn 17 Cr 13; 4-D.M.-E Mn 14; 1÷10-O.M.-Č4830.

На основу резултата из претходне таблице 9.6.16 дат је графички приказ процентуалног губитка масе испитиваних ножева на слици 9.6.36.



Слика 9.6.36 Графички приказ отпорности на хабање испитиваних узорака ножева на основу процентуалног губитка масе после 240 h рада

Очигледно је да ножеви наварени електродама ABRADUR 58 и E DUR 600 имају већу отпорност на ову врсту хабања од основног материјала (Č4830), док ножеви наварени електродама E Mn 17 Cr 13 и E Mn 14 имају мању отпорност и од основног материјала [67,138,139]. Добијени резултати показују да навари веће тврдоће и добре жилавости у разматраном случају при комбинованом хабању, имају бољу отпорност на хабање. Додатни материјали од манганских аустенитних челика су у овом случају показали мању отпорност на хабање због тога што при испитивању нису створени услови за трансформацију аустенита у мартензит, чиме би се повећала њихова тврдоћа, која би уз њихову одличну жилавост дала много боље резултате отпорности на ударно хабање.

9.6.5 НАВАРИВАЊЕ НОЖЕВА УРЕЂАЈА ЗА ИСКОП КАНАЛА

У групу радних делова грађевинске механизације, који су током експлоатације изложени абразивном хабању јаког интензитета и корозији, а истовремено и повременим ударним оптерећењима јаког интензитета, могу се сврстати: ножеви уређаја за ископ канала за подземне инсталације; ножеви и рипери грејдера; ножеви и рипери булдозера, и ивични (крајњи) сегменти ножева; ножеви плугова за чишћење снега и др.

Ножеви уређаја за ископ канала при експлоатацији су изложени највише абразивном хабању отвореног типа и корозији, али и повременим ударним оптерећењима јаког интензитета при наиласку на камен, бетон или неки други материјал који се налази у земљишту. Уочени проблеми при експлоатацији су кратак радни век ових ножева и честа хаваријска оштећења због хабања и јаких ударних оптерећења. Ови разлози су допринели да се експериментална истраживања изведу и на овим деловима.

9.6.5.а Грађевинска машина, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци

- **Машина** на коју је монтиран уређај за ископ канала је, као и у претходном случају, универзална радна машина UNIMAG-640 немачке производње. Овај уређај може се једноставно монтирати на трактору или некој другој радној машини која има ожлебљено излазно вратило, којим се може остварити погон овог уређаја.

- **Уређај за ископ канала** при постављању подземних инсталација, састоји се из хидрауличног система са хидрауличним инсталацијама, два ланчаника и ланца на коме се на предвиђеним местима монтирају ножеви, затезач ланца и усмеривач ископане земље.

Пренос снаге и обртног момента остварује се на исти начин као и код претходно већ описаних уређаја за чишћење растиња и равнање терена. На самом уређају инсталиран је мерач за читавање ефективног времена рада. Број обртаја ланчаног преносника при раду је $n = 540 \text{ min}^{-1}$. Ножеви се монтирају на носаче ланца помоћу завртњева и навртки. Принцип рада овог уређаја је сличан као код ручне монтиране тестере за сечење дрва, а ножеви за ископ земље монтирају се на сличан начин на ланац као и зуби за резање на моторној тестери.

- **Ножеви уређаја за копање канала** су специјалног облика, а израђују се најчешће обликовањем на топло или ливењем. Служе за резање земље и чишћење ископаног канала од земље. Транспорт ископане земље од усмеривача изводи се тако да се она одлаже поред ископаног канала лево и десно. Ширина ископаног канала дефинисана је ширином резне ивице једног или два ножа и приближно је једнака ширини резне ивице једног или два ножа, који се најчешће паралелно монтирају на ланац, а могу се монтирати и наизменично смакнуто најчешће за једну дужину ножа. Ови ножеви се израђују у више различитих димензија, у зависности од ширине канала и капацитета уређаја. Израђују се две врсте ових ножева тзв. леви и десни, чије резне ивице копају земљу лево и десно од уздужне осе ланца. На конкретном уређају предвиђена је монтажа укупно 24 ножа. Зато што служе за ископ земље, ови ножеви се условно могу назвати и мотичице. На слици 9.6.37 приказан је изглед новог и похабаног ножа уређаја за ископ канала где се са ове слике јасно види начин губитка материјала радног дела ножа, услед интензивног абразивног хабања.



а)



б)

Слика 9.6.37 Изглед ножева уређаја за ископ канала: а) нов нож б) хаваријски похабан нож

- **Уочени проблеми при експлоатацији** код овог уређаја су: кратак радни век ножева; релативно дуг застоји због оштећења, оштрења и замене ножева и недовољно искоришћење капацитета радне машине. Поред тога, уочено је неравномерно хабање, јер је оно по средини резне ивице много веће, него на крајевима. Такође, од укупне масе материјала ножева при раду се искористи максимално до 40%, а најмање 60% материјала се одбацује као отпад.

9.6.5.6 Технологија наваривања ножева за ископ канала

• **Основни материјал** ножева за ископ канала је Č2330, који припада групи челика за побољшање. Због високог садржаја угљеника припада групи условно заварљивих челика, па је неопходно предузети додатне мере при извођењу процеса наваривања, да му се побољша заварљивост.

Репаратурно наваривање испитиваних узорак дебљине $s = 20 \text{ mm}$, изведено је после предгревања на температури од 300°C [100,101]. У табlici 9.6.17 дата је модификована формула Сеферијана за одређивање температуре предгревања челика Č2330.

Таблица 9.6.17 Одређивање температуре предгревања за Č2330

Начин одређивања T_p	Модификована формула Сеферијана	Врста О.М. $s=20 \text{ mm}$	Температура предгревања $T_p, ^\circ\text{C}$	
			Рачунска	Усвојена
Метода Сеферијана	$CE = CE_h + CE_s = CE_h (1 + 0.005 \cdot s), \%$ $CE_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{18}, \%$ $T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0,25}, ^\circ\text{C}$	Č2330	286	300

Допунска оцена заварљивости, односно процена новонастале структуре ZUT-а, за Č2330 могућа је израчунавањем времена хлађења $t_{8/5}$ применом формуле јапанских аутора и коришћењем КН-дијаграма за челик са ознаком 60SiMn5, који има сличан хемијски састав. На овај начин је, варирањем различитих параметара наваривања, оцењивана новонастала структура у ZUT-у код Č2330, и процењена могућност добијања најповољније структуре за реалне услове рада ових ножева.

• **Додатни материјал** за наваривање свих испитиваних узорак је E DUR 600, који је изабран на основу најбољих показаних резултата при испитивању ножева уређаја за чишћење растиња и ножева уређаја за равнање терена. Овај додатни материјал је полаган REL-ом после предгревања на 300°C , тако што су полагани вишеслојни навари на грудној и леђној површни резне ивице ножева, а ширина навара је износила око 30 mm . При извођењу репаратурног наваривања варирани су параметри наваривања, а процесни параметри наваривања дати су у табlici 9.6.18.

Таблица 9.6.18 Процесни параметри наваривања REL-ом ножева (мотичица) уређаја за ископ канала

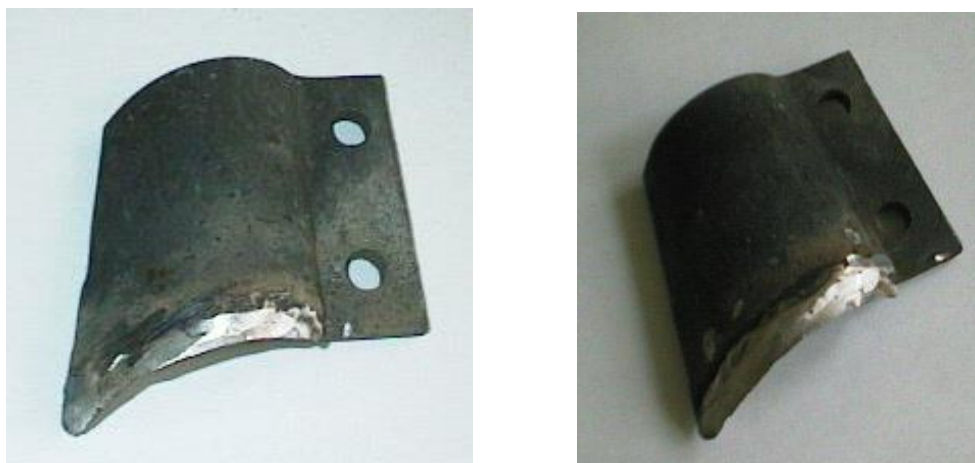
Дебљина О.М., $s, \text{ mm}$	Ознака електроде SŽ -Elektrode Jesenice	Пречник језгра електроде $d_e, \text{ mm}$	Струја наваривања $I, \text{ A}$	Радни напон $U, \text{ V}$	Брзина наваривања $v_z, \text{ cm/s}$	Погонска енергија наваривања $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta, \text{ J/cm}$
20	E DUR 600	3,25	100-135	24-26	0,20	9600-14040

Применом ове технологије укупно је репаратурно наварено шест ножева, односно сваки четврти од укупног броја од 24 ножа. На слици 9.6.38 приказан је изглед репаратурно наварених ножева.



Слика 9.6.38 Изглед репаратурно наварених ножева уређаја за ископ канала

После наваривања, сви наварени ножеви су наоштрени брушењем леђне површине под истим углом као код нових ненаварених ножева. На слици 9.6.39 приказани су наварени ножеви после оштрења брушењем. Напомиње се да после наваривања није извођена накнадна термичка обрада.



Слика 9.6.39 Изглед репаратурно наварених ножева уређаја за ископ канала после оштрења

9.6.5.в Одређивање отпорности на хабање

Праћење процеса хабања једног сета ножева изведено је тако, што су на предвиђеним местима за монтажу (држачима) на ланцу са по два завртња и навртке причвршћени репаратурно наварени и нови ненаварени ножеви. Монтажа је изведена на тај начин што је сваки четврти нож био репаратурно наварен, а између су монтирана узастопно по три нова ножа. Такође, ножеви су наизменично постављани тако да се резне ивице окрећу улево (тзв. леви ножеви) и удесно од осе ланца (тзв. десни ножеви), чиме се постиже равномерно оптерећење уређаја за копање канала. На тај начин су створени услови да сви испитивани узорци раде у сличним радним условима. Укупно је испитивано двадесет и четири ножа (један сет), којима је пре монтаже прецизно појединачно измерена маса. Наварени узорци су пре монтаже видно обележени како би се у току испитивања могли препознати. Ефективно радно време одређује се мерењем времена на мерачу уграђеном на самом уређају.

Искусствено је утврђено да радни век нових ножева израђених од горе наведеног основног материјала не прелази 300 h ефективног рада, после којег може настати хаваријско оштећење. Стога је овај временски период послужио да се одреди време праћења процеса хабања

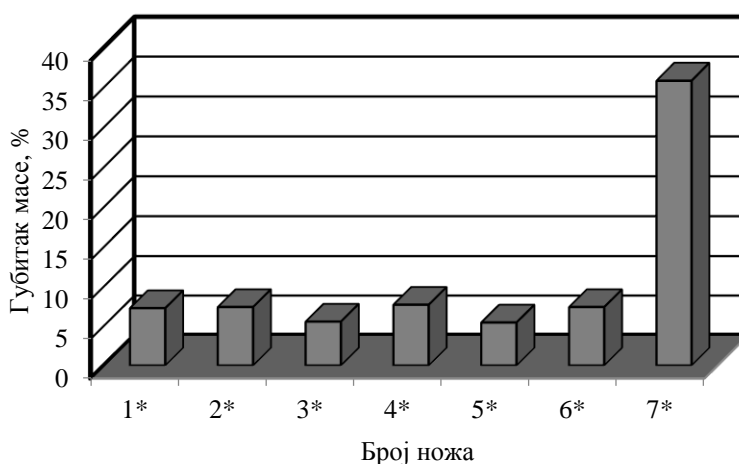
испитиваних узорака. У табелици 9.6.19 приказани су резултати ових испитивања, а отпорност на хабање је одређивана на основу губитка масе испитиваних ножева.

Таблица 9.6.19 Отпорност на хабање испитиваних ножева (мотичица) после 300 h рада.

Маса испитиваних ножева	Репаратурно наварени ножеви (6 комада)						Нови ненаварени ножеви (18 комада)
	1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*
На почетку испитивања, kg	11,00	10,80	10,80	11,00	11,00	10,80	10,60
На крају испитивања, kg	10,20	10,00	10,20	10,30	10,40	10,00	6,80
Губитак масе, kg	0,80	0,80	0,60	0,70	0,60	0,80	3,80
Губитак масе, %	7,27	7,41	5,56	7,70	5,45	7,41	35,85

*Напомена: 1-6 – узорци наварених ножева са D.M. - E DUR 600, 7 - просечне вредности масе свих испитиваних ненаварених узорака од O.M. - Č2330.

Ради бољег прегледа добијених резултата, на слици 9.6.40 дат је графички приказ процентуалног губитка масе испитиваних узорака.



Слика 9.6.40 Графички приказ отпорности на хабање при испитивању ножева после 300 h рада

На основу добијених резултата испитивања, може се закључити да је отпорност на хабање репаратурно наварених ножева вишеструко већа од отпорности на хабање ненаварених нових ножева. До овог закључка се могло доћи визуелно, у току праћења рада уређаја, и пре краја истека планираног времена за испитивање. На крају испитивања јасно су се видели позитивни ефекти процеса наваривања и без одређивања губитка масе испитиваних узорака, јер је код ненаварених узорака дошло до хаваријског оштећења, док код репаратурно наварених узорака то није био случај. Све ово наводи на закључак, да је структура материјала навара електроде E DUR 600 много отпорнија од структуре Č2330 према изразито абразивном хабању, које се јавља при овим радним условима, првенствено због знатно веће тврдоће и добре жилавости овог додатног материјала.

9.6.6 НАВАРИВАЊЕ НОЖЕВА ПЛУГА ЗА ЧИШЋЕЊЕ СНЕГА

Ножеви плугова за чишћење снега могу се сврстати у групу радних делова грађевинске механизације који су за време експлоатације изложени истовремено абразивном хабању, корозији и повременим ударним оптерећењима јаког интензитета. При чишћењу снега ови радни делови су у директном контакту са путном подлогом, а највећи интензитет њиховог хабања јавља се при чишћењу снега са асфалтне или бетонске подлоге, јер су у директном контакту са стенским минералима који су саставни део асфалта или бетона. Они на путну подлогу налажу услед велике масе плуга на коме су монтирани. Често се дешава да у раду, при великој брзини радне машине,

или возила на коме су монтирани плугови ударе у ивичњаке или стенске материјале већег габарита који се налазе поред пута. Такође, није редак случај да дође до изненадног удара на неко испупчење на путу заостало из више разлога, када заштитни хидраулични систем, због брзине, не може да одреагује иако је подешен на радни тзв. пливајући положај. Све напред речено утиче да ови ножеви имају изузетно кратак радни век, углавном због изузетно високог абразивног хабања, што доводи до честе замене ових делова.

9.6.6.а Грађевинска машина, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци

- **Машина** на коју је монтиран плуг са ножевима за чишћење снега је, као и у претходна три случаја, универзална радна машина UNIMAG-640. Плуг за чишћење снега најчешће се монтира на камионе који се надограђују са носачем плуга и хидрауличним системом, који омогућава манипулацију са плугом, и даје погон посипачу мешавине индустријске соли и стенског агрегата, како би се пут истовремено посипао. Када се изведе надоградња, и монтажа плуга и посипача, камион који је превозно средство фактички постаје радна машина. На слици 9.6.41 приказан је изглед радне машине UNIMAG-640 са плугом за чишћење снега и посипачем.



Слика 9.6.41 Изглед радне машине UNIMAG-640 са уређајима за чишћење снега

- **Плуг за чишћење снега** монтира се на предњи крај радне машине или возила, а снег се са коловоза склања механички. Хидраулични систем омогућава руковање (манипулацију) овим уређајем и служи за његово подизање, спуштање и закошење под одговарајућим углом. Систем заштите омогућава да се при изненадном удару у неку препреку на путу плуг подигне или закрене под одређеним углом. То омогућава хидраулични систем, или механички систем помоћу опруга. На слици 9.6.42 приказан је изглед једног плуга (предња и задња страна) са ножевима за чишћење снега. На задњој страни плуга се види, конструкција плуга са елементима за прикључак на машину или возило, и хидрауличним системом. На предњој страни плуга се јасно види расподела интензитета хабања по читавој његовој ширини, и карактеристичан начин хабања.



а)



б)

Слика 9.6.42 Изглед плуга са ножевима који се монтирају на радне машине или возила:
а) предња страна, б) задња страна

Плугови за чишћење снега се израђују у више различитих варијанти и различитих су величина, а могу бити једноделни или вишеделни (дводелни, троделни или четвороделни). Најчешће су у примени вишеделни плугови са посебно монтираним ножевима на сваком делу засебно, због бољег налегања на површину пута.

- **Ножеви плугова за чишћење снега** израђују се најчешће сечењем из челичних плоча затим се механички обрађују на одређене димензије, а ређе се израђују ливењем. На овим деловима буше се отвори одређеног пречника сходно већ постојећим отворима на плуговима, да би могли да се на њих причврсте. Исто тако, механичком обрадом се формира оштрица ножа. Ножеви се причвршћују за плугове помоћу завртњева и навртки чиме се добија раздвојива веза, која је неопходна због честе замене похабаних ножева. Димензије испитиваних узорака ножева су 1600x200x20 mm, а радна ширина ножа је 150 mm.

Ножеви су првенствено намењени да штите плуг од процеса хабања при чишћењу снега, јер су они у директном контакту са коловозом и расутим ситним каменом. Основни недостатак коришћених ножева израђених од Č1530 је изузетно кратак радни век, чиме се смањује искоришћење капацитета радне машине или возила услед честих застоја због замене похабаних ножева новим. Ова истраживања су изведена првенствено зато да би се испитала могућност продужења радног века ножева применом технологије наваривања. Из истих разлога, као у претходном примеру, за наваривање је коришћена електрода E DUR 600, која даје наваре велике тврдоће, а истовремено има и добру жилавост.

9.6.6.6 Технологија наваривања ножева плугова

- **Основни материјал** ножева плугова за чишћење снега је Č1530, који припада групи челика за побољшање. Због високог садржаја угљеника сврстава се у групу условно заварљивих челика, па је неопходно предузети додатне мере при извођењу процеса наваривања, да би му се побољшала заварљивост.

За ова испитивања наварена су укупно три ножа, при чему је наваривана радна површина димензија 1600x20 mm. Наваривање свих испитиваних узорака дебљине $s = 20$ mm изведено је после предгревања на температури од 300°C. У табlici 9.6.20 приказана је температура предгревања одређена модификованом формулом Сеферијана.

Таблица 9.6.20 Температура предгревања челика Č1530

Начин одређивања T_p	Модификована формула Сеферијана	Врста О.М. $s = 20$ mm	Температура предгревања $T_p, ^\circ\text{C}$	
			Рачунска	Усвојена
Метода Сеферијана	$CE = CE_h + CE_s = CE_h (1 + 0.005 \cdot s), \%$ $CE_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni + 7 \cdot Mo}{18}, \%$ $T_p = 350 \cdot \sqrt{CE - 0.25}, ^\circ\text{C}$	Č1530	221	300

Додатна оцена заварљивости, односно процена новонастале структуре ZUT-а, за Č1530, изведена је израчунавањем времена хлађења $t_{8/5}$ применом формуле јапанских аутора и коришћењем КН-дијаграма за челик са ознаком С45 који има приближно исти хемијски састав. Као и код претходних примера, варирани су параметри наваривања, процењиван је њихов утицај на новонастале структуре ZUT-а, и одређени су услови за добијање структуре са најбољим својствима.

- **Додатни материјал** за наваривање сва три ножа је E DUR 600, који је за овај случај изабран због најбољих показаних резултата при претходним испитивањима на више врста радних делова. Наваривање овим додатним материјалом је изведено REL-ом после предгревања на 300°C, наношењем вишеслојних навара, који су полагани уздужно на радну површину ножа. При наношењу навара варирани су неки параметри наваривања, а процесни параметри наваривања дати су у табlici 9.6.21.

Таблица 9.6.21 Процесни параметри наваривања REL-ом ножева плуга за чишћење снега

Дебљина О.М. s, mm	Ознака електроде SŽ - Elektrode Jesenice	Пречник језгра електроде d _e , mm	Струја наваривања I, A	Радни напон U, V	Брзина наваривања v _z , cm/s	Погонска енергија наваривања $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta$, J/cm
200	E DUR 600	5,00	120-200	25-28	0,20	12000-22400

После наваривања сва три ножа са истим параметрима, један нож је наоштрено брушењем под истим углом као и ненаварен нов нож, а преостала два ножа нису оштрена. После наваривања није извођена накнадна термичка обрада. Дебљина навареног слоја додатног материјала на грудној површини наоштреног ножа је била $s = 20 \text{ mm}$, односно десети део од укупне ширине ножа $s = 200 \text{ mm}$. Да би се добиле димензије наварених ножева као код нових, вишак навареног материјала је уклоњен брушењем по дељини дужини и ширини ножева, тако да је дебљина навареног материјала износила 20 mm .

9.6.6.в Одређивање отпорности на хабање

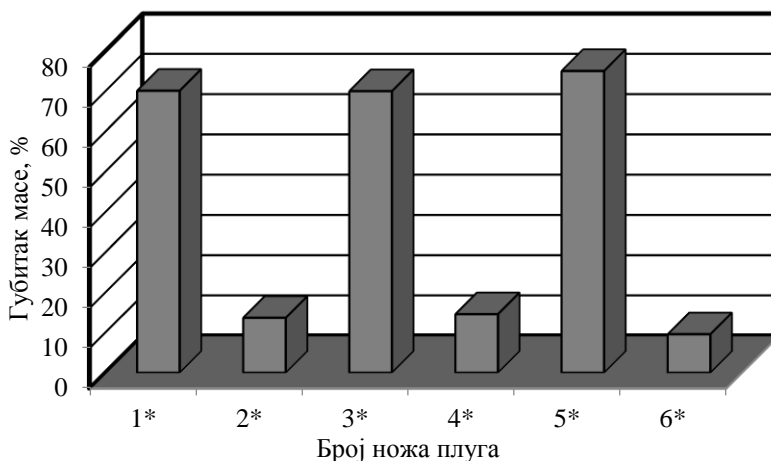
Праћење хабања ножева плуга за чишћење снега изведено је доста једноставно, и то за три случаја. У првом случају праћено је хабање на наоштреном новом и навареном ножу. Наварен нож на плуг је причвршћен помоћу завртњева и навртки на десни сегмент плуга, а ненаварен нож је на исти начин причвршћен на левом сегменту плуга. Разлог за ово је искуствени податак да је нож који чисти ивицу пута изложен интензивнијем хабању, па се више хаба, па смо намерно наварени нож изложили ригорознијој провери отпорности на хабање у радним условима. Такође је на основу искуства утврђено да радни век ненаварених ножева израђених од С1530 износи 150 h ефективног рада. У другом случају испитивани су ненаоштрени један наварен и један ненаварен нож који су монтирани на исти начин као у првом случају. У трећем случају замењена су места монтаже навареног и ненавареног ножа, тако да ненаварен нож чисти ивицу, а наварен нож средину пута.

Отпорност на хабање је одређивана на основу губитка масе материјала испитиваних ножева после 140 h ефективног рада. Визуелно је било могуће уочити велику разлику у ширини ножева после испитивања, па се мерењем линијске похабаности дошло до сазнања о вишеструко већој отпорности на хабање наварених од ненаварених ножева. Међутим, због неуједначеног хабања контактне површине по читавој дужини ножева, отпорност на хабање испитиваних ножева одређивана је мерењем масе пре и после испитивања. Резултати ових истраживања су дати у табелици 9.6.22 и на слици 9.6.43.

Таблица 9.6.22 Отпорност на хабање ножева плуга за чишћење снега после 140 h рада

Маса испитиваних ножева	Репаратурно наварени и ненаварени нови ножеви (6 комада)					
	1*	2*	3*	4*	5*	6*
На почетку испитивања, kg	46,80	46,80	48,00	48,00	48,00	48,00
На крају испитивања, kg	14,00	40,40	14,40	41,00	12,00	43,40
Похабана маса материјала, kg	32,80	6,40	33,60	7,00	36,00	4,60
Процент похабане масе материјала, %	70,10	13,68	70,00	14,58	75,00	9,58

*Напомена: бројевима 1 и 2 означени су наоштрени ножеви, а бројевима 3, 4, 5 и 6 ненаоштрени ножеви, при чему су непарним бројевима (1, 3 и 5) означени ненаварени, а парним бројевима (2, 4 и 6) наварени ножеви.



Слика 9.6.43 Графички приказ отпорности на хабање ножева плуга за чишћење снега после 140 h рада

Позитивни ефекти примењене технологије наваривања ових ножева најбоље се виде на слици 9.6.44 где су приказана два суседна сегмента ножева који су у току испитивања изложени готово истим условима рада.



а)

б)

Слика 9.6.44 Похабаност ненаварених и наварених ножева плуга за чишћење снега: а) похабаност предње стране ножева, б) похабаност задње стране ножева

Максимална ширина ножа која се у току експлоатације може похабати, а да не дође до оштећења носача ножева је око 150 mm. На крају испитивања могло се утврдити да је губитак материјала код ненаварених ножева по ширини у просеку око 120 mm, а код наварених ножева похабана ширина је око 20 mm, што је приближно једнако дебљини навареног материјала. То наводи на закључак да је отпорност на хабање навара овог додатног материјала, при овим радним условима, најмање пет пута већа од отпорности на хабање основног материјала, за све случајеве изведених испитивања. Применом производног наваривања радни век ових ножева може се вишеструко продужити. Такође, похабани ножеви се могу и обновити репаратурним наваривањем, чиме се њихов радни век додатно може продужити, али се због техноекономске исплативости препоручују благовремена репаратура, односно док њихова похабаност по ширини не пређе 20 mm.

На овом примеру се можда најбоље могу сагледати предности примене технологија производног и репаратурног наваривања радних делова грађевинске механизације. Правилном и благовременом репаратуром могу се готово елиминисати трошкови набавке или израде нових ножева.

9.6.7 НАВАРИВАЊЕ ЧЕКИЋА СЕКУНДАРНЕ ДРОБИЛИЦЕ ЗА ДРОБЉЕЊЕ КАМЕНА

Стационарна дробилична постројења се сврставају у групу процесне опреме, чија је намена производња дробљеног камена, који се користи за производњу различитих грађевинских материјала (асфалта, бетона, цемента, креча и др.). Стенски агрегати се користе и директно при изради грађевинских објеката (путева, насипа, брана и др.). Да би се смањили трошкови производње због транспорта најчешће се на истој локацији, где се налазе стационарна дробилична постројења инсталирају и асфалтне базе, бетонске базе, постројења, за производњу креча, цемента и др. По самој природи посла, стационарна постројења за дробљење камена, постављају се у каменоломима, чиме је заокружена производња грађевинских материјала. Стационарна дробилична постројења се такође користе на површинским коповима при производњи угља и дробљењу руда, од којих се даљом прерадом добијају метални или неметални материјали, који се користе у различитим привредним гранама.

9.6.7.a Постројење, уређај, функција испитиваног дела и уочени недостаци

Стационарна дробилична постројења се састоје из више целина, које су међусобно повезане и зависне, тако да заокружују читав процес производње дробљеног камена и других материјала различитих фракција.

- **Стационарно дробилично постројење**, о коме је овде реч, има капацитет од $120 \text{ m}^3/\text{h}$. То је у ствари капацитет примарне дробилице која је инсталирана одмах иза примарне решетке. На овом дробиличном постројењу су инсталиране укупно три дробилице, једна примарна чељусна дробилица и две секундарне дробилице са чекићима. Примарна дробилица има задатак да грубо уситњава камен, а секундарне дробилице даље завршно уситњавају комаде камена који су већ обрађени у примарној дробилици. Овако уситњен камен преноси се тракастим транспортером до ситаре где се просејава и одвајају различите фракције камена. Треба истаћи, транспорт материјала од примарне дробилице до секундарних дробилица, а од њих до ситара и даље до депоније одвија тракастим транспортерима погоњеним електромоторима. На слици 9.6.45 приказано је једно стабилно дробилично постројење које је инсталирано у каменолому.

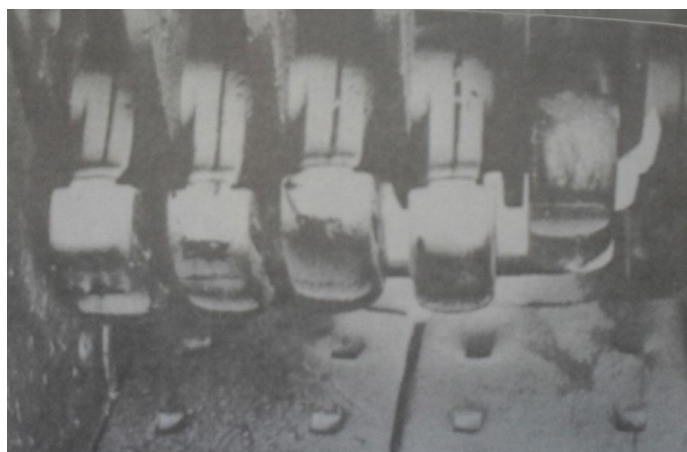


Слика 9.6.45 Изглед једног стабилног дробиличног постројења у каменолому

- **Дробилице** које су инсталиране на овде разматраном дробиличном постројењу представљају један сет међусобно зависних јединица, које су укључене у производњу дробљеног кречњачког камена. Пројектовани капацитет примарне чељусне дробилице је $120 \text{ m}^3/\text{h}$, укупни пројектован капацитет секундарних дробилица је $150 \text{ m}^3/\text{h}$, односно од $75 \text{ m}^3/\text{h}$ по једној дробилици. Погон добијају од електромотора преко каишног преносника.

- **Ударни чекићи (батови)** и облоге су радни делови секундарне дробилице који су у директном контакту са каменом, а задатак им је да разбију и уситне камен до одређене величине. Ударни чекићи најчешће се израђују ливењем од манганског челичног лива CL3160 у облику квадрa димензије $100 \times 100 \times 200 \text{ mm}$ са отворима на средини који служе за фиксирање на носаче,

који су везани за вратило дробилице, па цео склоп представља ротор дробилице. Маса једног чекића је тачно 16 kg, а један сет чекића за једну дробилицу је 36 комада. При експлоатацији се користе обе површине, слично као код ударних греда ротационе дробилице. На слици 9.6.46 приказан је радни простор унутрашњег дела дробилице са вратилом, носачима, чекићима, њиховим држачима и сегментима облоге.



Слика 9.6.46 Изглед унутрашњег дела секундарне дробилице са похабаним чекићима

Унутрашњи делови дробилице се изложени првенствено абразивном хабању затвореног типа, корозији и сталним ударним оптерећењима јаког интензитета. Хабање радних површина чекића је неравномерно и одвија се на специфичан начин (сл. 9.6.46). Максимално искоришћење материјала чекића је 50% од укупне масе, тако да се најмање 50% материјала одбацује као отпад.

- **Уочени проблеми при експлоатацији** овог стационарног дробиличног постројења су били различити, а један од највећих је недовољна искоришћеност секундарних дробилица, иако је њихов капацитет већи од капацитета примарне чељусне дробилице. Основни разлози су кратак радни век чекића (батова), већа маса неискоришћеног материјала, застој у производњи због замене похабаних делова и издвајање значајних новчаних средстава за набавку нових резервних делова.

9.6.7.6 Технологија наваривања чекића секундарне дробилице

И у овом случају репаратурно наваривање чекића изведено је REL–ом. Репаратура је изведена применом различитих врста електрода Е DUR 600, Е Mn 14 и Е Mn 17 Cr 13. Ови додатни материјали дају наварене површине изузетно добре жилавости. Припрема навариваних радних површина, примењена технологија репаратуре и само њено извођење урађено је слично као при репаратурном наваривању ударних греда [134,137,141]. Процесни параметри репаратурног наваривања (ударних чекића) дати су у табlici 9.6.23.

Таблица 9.6.23 Процесни параметри репаратурног наваривања REL–ом ударних чекића секундарне дробилице

Дебљина О.М. s, mm	Ознака електроде SŽ -Elektrode Jesenice	Пречник језгра електроде d _e , mm	Струја наваривања I, A	Радни напон U, V	Брзина наваривања v _z , cm/s	Погонска енергија наваривања $q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta$, J/cm
180	Е DUR 600	3,25	120	25	0,119	20168
	Е Mn 14	3,25	120	25	0,148	16216
	Е Mn 17 Cr 13	3,25	130	25	0,152	17105

Полагање навара изведено је без предгревања и наношења пластичног међуслоја, тј. директно на ČL3160. После наваривања није извођена накнадна термичка обрада, већ само механичка обрада брушењем навара обе радне површине да би се маса чекића свела на 16 kg.

Дебљина навареног слоја код свих репарираних чекића била је око 20 mm на обе радне површине. На овај начин је репаратурно наварено укупно 12 чекића, с тим што су по четири чекића наварена једном од три коришћене врсте електрода.

9.6.7.в Одређивање отпорности на хабање

Монтажа репаратурно наварених ударних чекића изведена је у обе секундарне дробилице и то тако што је 6 чекића (по два наварена истим додатним материјалом) монтирано у првој дробилици у једном реду, а 6 чекића монтирано је у другој дробилици у сваком реду по један, и то у оба случаја на средини један иза другог. На преостала места, постављени су нови ударни чекићи, и то по 30 у свакој дробилици.

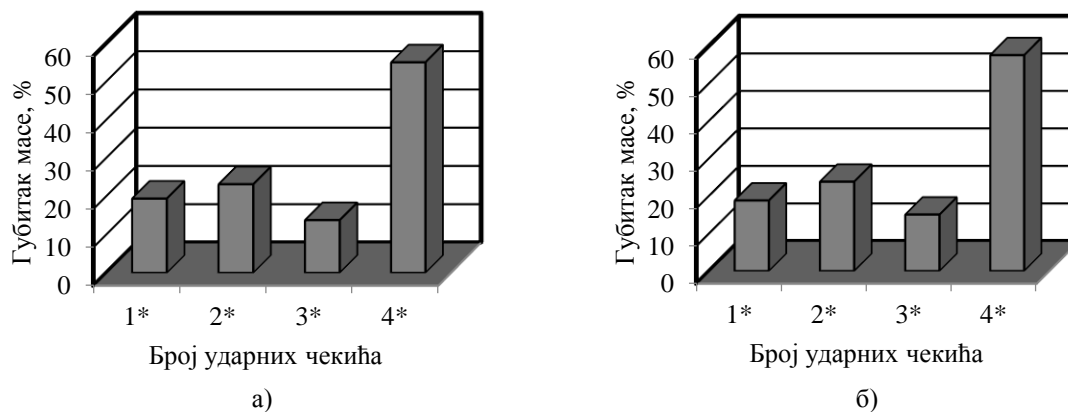
На основу праћења рада нових ненаварених ударних чекића дошло се до податка да је максимални радни век, при коришћењу обе радне површине и дробљењу органогеног кречњака, око 320 h ефикасног рада. Отпорност на хабање ударних чекића је контролисана у више фаза мерењем њихових маса пре и после одређеног времена експлоатације. Губитак масе испитиваних материјала је у свим фазама испитивања био готово пропорционалан времену рада, па се стога резултати ових истраживања дају као средње вредности по групама испитиваних чекића. У табели 9.6.24 приказане су средње вредности отпорности на хабање испитиваних материјала ударних чекића, и то на крају испитивања после 320 h ефикасног рада.

Таблица 9.6.24 Резултати експерименталних испитивања отпорности на хабање ударних чекића после 320 h рада

Маса испитиваних узорка (ударни чекићи)	Дробилица број 1				Дробилица број 2			
	1*	2*	3*	4*	1*	2*	3*	4*
На почетку испитивања, kg	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
На крају испитивања, kg	12,90	12,30	13,80	7,20	13,00	12,20	13,60	6,80
Губитак масе, kg	3,10	3,70	2,20	8,80	3,00	3,80	2,40	9,20
Губитак масе, %	19,38	23,13	13,75	55,00	18,75	23,75	15,00	57,50

*Напомена: 1-D.M.- E DUR 600; 2-D.M.- E Mn 14; 3-D.M.- E Mn 17 Cr 13; 4-O.M.-ČL3160.

На слици 9.6.47 дат је графички приказ процентуалног губитка масе материјала репаратурно наварених и нових ненаварених ударних чекића секундарних дробилица стационарног дробиличног постројења, после 320 h ефикасног рада.



Слика 9.6.47 Графички приказ отпорности на хабање при испитивању ударних чекића после 320 h ефикасног рада: а) секундарна дробилица бр. 1, б) секундарна дробилица бр. 2

После анализе резултата испитивања на узорцима ударних чекића секундарних дробилица, може се закључити да најбољу отпорност на хабање имају репаратурно наварени узорци електродом Е Мп 17 Сr 13 (скоро 4 пута бољу од основног материјала), затим репаратурно наварени узорци електродом Е DUR 600 (скоро 3 пута бољу од основног материјала), и на крају репаратурно наварени узорци електродом Е Мп 14 (скоро 2,5 пута бољу од основног материјала). Иако је ČL3160 предвиђен за израду радних делова изложених абразивном хабању, где се јављају и ударна оптерећења, испитивани додатни материјали у овом случају су показали знатно бољу отпорност на ову врсту хабања.

Поређењем ових резултата и резултата на ударним гредама ротационе дробилице [137,141,143], уочава се да су они међусобно доста сагласни. Показало се да је отпорност на хабање наvara од материјала Е DUR 600, Е Мп 14 и Е Мп 17 Сr 13 у оба случаја репаратурног наваривања ових радних делова слична, а разлика је у томе што испитивани материјали на овом примеру имају око два пута већу отпорност на исту врсту абразивног хабања. Постоји неколико разлога који су довели до добијања оваквих резултата. Први разлог је што су обрађивани стенски материјали, односно кречњачки камен различитих својстава (органогени кречњак и калцитско-доломитски кречњак) и различити материјали од којих су израђени испитивани узорци (ČL3160 и ČL3460). Други разлог је што су у овом примеру дробилице биле секундарне које су обрађивале већ уситњен камен а код првог примера дробилица је примарна и дробила камен знатно већих димензија. Трећи разлог је тај што се абразивно хабање одвија према механизмима који се донекле разликују, иако је реч о истој врсти абразивног хабања.

На ова два примера је показано да успешна обрада стенских материјала може да се изведе само коришћењем механизације чији су радни делови израђени или репарирани погодним додатним материјалима, а најбољу отпорност су показали аустенитни мангански челици добре жилавости са равномерно распоређеним сложеним карбидима у мекој металној основи. Грађевинску механизацију чине моћном квалитетни радни делови или склопови који су у току експлоатације у директном контакту са грађевинским материјалима, а посебно са стенским материјалима (каменом). На слици 9.6.48 приказан је део гарнитура потребне грађевинске механизације за рад у каменолому на обради стенских материјала и производњи њихових фракција.



Слика 9.6.48 Гарнитура моћне грађевинске механизације неопходне за рад у каменолому

Комплетна механизација (гарнитура) за рад у каменолому састоји се од: булдозера, утоваривача, ровокопача, багера, дробиличног постројења (стационарног или мобилног), машине за сејање и одвајање фракција различите гранулације и транспортних возила (камиона) велике носивости, као и самоходне машине за бушење рупа у камену које служе за постављање експлозива при минирању.

9.6.8 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА

Ова наша истраживања су изведена на већем броју различитих радних делова грађевинске механизације који су у току рада у директном контакту са грађевинским материјалима. Ови делови грађевинске механизације су изложени комбинованом хабању са доминантним учешћем абразивног хабања. Испитивања су изведена на одређеном броју наварених и нових ненаварених радних делова, а основни критеријум за оцену оправданости наваривања је отпорност на хабање, односно радни век испитиваних делова.

Репаратурно и производно наваривање испитиваних делова је углавном изведено применом технологија наваривања које су коришћене и при испитивањима на моделима уз неопходне минималне корекције с циљем побољшања заварљивости основних материјала од којих су израђени испитивани делови. Основни циљ ових истраживања на реалним радним деловима при раду у стварним условима је провера резултата лабораторијских испитивања на моделима, односно провера ваљаности примењених технологија наваривања, првенствено из техничко-технолошког аспекта. Испитивања су изведена на групама, односно сетовима карактеристичних делова који су у току рада изложени различитим врстама оптерећења, различитим врстама хабања и различитим утицајима околне средине. Циљ је био да се испитивања изведу на најоптерећенијим деловима грађевинске механизације изложених хабању високог интензитета. Истраживања су изведена на више врста основних и додатних материјала, применом различитих технологија наваривања, техника наношења навара и др., да би се испитала могућност примене наваривања и на друге делове грађевинске механизације, који су израђени од истих или сличних материјала, а раде у сличним или друкчијим срединама. Циљ ових истраживања није био само да се верификују примењене технологије наваривања на моделима, већ да се предложи оптимална технологија наваривања које ће наћи ширу примену.

• **Испитивања на зубима утоварне кашике утоваривача** имала су за циљ проверу отпорности на хабање, при реалним радним условима, једне врсте основног и једне врсте додатног материјала навареног различитих технологијама, и разним техникама наношења навара.

Иако је ČL3134, од којег су израђени зуби утоваривача, показао доста добру отпорност на абразивно хабање, вишеструко бољу отпорност је показао навар АBRADUR 58 у свим случајевима. Радни век наварених зуба је око четири пута дужи од радног века нових ненаварених зуба. Боље резултате смо добијали применом технологије наваривања са наношењем пластичног међуслоја него технологије са предгревањем. Такође, при производном или репаратурном наваривању ових делова није неопходно наношење навара на целим радним површинама, већ само наношење делимичних навара, чиме се постиже знатна уштеда у времену и скупом додатном материјалу.

После наших истраживања [23,68,141] може се закључити, да производно или репаратурно наваривања зуба утоварних кашика грађевинских машина, има потпуну оправданост, јер тако продужава њихов радни век, расте степен искоришћења капацитета радних машина, што снижава трошкове одржавања, а самим тим и трошкове производње.

• **Испитивања на лопатицама мешалице за производњу асфалта** су послужила за одређивање отпорности на хабање једног основног и три врсте додатних материјала у циљу доношења оцене о погодности њихове примене за реалне услове производње асфалта. На испитиваним узорцима лопатица израђеним од ČL4150 изведено је производно наваривање наношењем делимичних навара од три врсте додатних материјала, Е DUR 600, АBRADUR 58 (нанет попречно и укосом на лопатице) и CrWC 600. Наваривање испитиваних узорака изведено је применом исте технологије наваривања, а мењана је само техника наношења навара, како би се одредио најпогоднији додатни материјал и најбоља техника полагања навара. Отпорност на хабање навара, формираног од сва три додатна материјала, знатно је боља од отпорности на хабање основног материјала. Најотпорнији на хабање показао се Е DUR 600, чији је навар око три пута отпорнији од ČL4150.

После наших истраживања [26,106,141] може се закључити, да је применом посебне технологије могуће успешно извести наваривање на ČL4150, чија је заварљивост изузетно лоша.

Овај материјал има добру отпорност према корозионим процесима и процесима хабања где се не јављају ударна оптерећења, али је изузетно крт и има лошу заварљивост, па је непогодан за наваривање. Обавезна је примена претходне, текуће и накнадне термичке обраде, како би се извело репаратурно или производно наваривање, што у великој мери поскупљује процес репаратуре па се поставља питање да ли је то економски исплативо. Ова детаљна експериментална истраживања, уз сагледавање свих релевантних параметара, дају нам за право да донесемо закључак, да је примена овог материјала за израду лопатица мешалица за производњу асфалта и лопатица мешалица за производњу бетона нецелисходно решење, јер је он непогодан за ове услове рада, првенствено због своје кртости. Много бољи резултати се могу постићи ако се за израду ових делова користи неки конструкциони челик веће жилавости и добре заварљивости, а повећање отпорности на хабање и корозију радних површина обезбеди производним наваривањем наношењем навара од одговарајућих додатних материјала.

• **Испитивања на ударним гредама и облогама дробилице за производњу дробљеног камена** су послужила за одређивање отпорности на хабање два основна материјала сличних својстава од којих се израђују ударне греде и облоге дробилица и четири врсте додатних материјала за њихово наваривање. Циљ ових истраживања је био, да се у радним условима на реалним деловима испита отпорност на хабање свих материјала, и предложи најпогоднији додатни материјал за репаратурно или производно наваривање ових делова.

На испитиваним узорцима изведено је како репаратурно, тако и производно наваривање, да би се одредили ефекти ове две технологије. Испитивани основни материјали су ČL3160 за облоге дробилице и ČL3460 за ударне греде дробилице. Испитивани додатни материјали су: E Mn 14, E Mn 17 Cr 13, E DUR 600 и ABRADUR 58. При репаратурном наваривању навари су наношени уздужно на ударне греде, а при производном наваривању наношени су делимични навари попречно на уздужну осу ударне греде, као и унакрсни (саћасти) навари, како би се сагледали ефекти и ове две технике наношења навара. Најбољу отпорност на хабање показали су навари добијени електроодом E Mn 17 Cr 13, било да је реч о репаратурном или производном наваривању.

После наших истраживања [134,137,141,143] може се закључити да за израду или репаратуру ударних греда и облога дробилица за дробљење камена треба користити материјале велике жилавости са комплексним карбидима у металној основи. Најбоље резултате су показали аустенитни мангански челици са великим бројем равномерно распоређених комплексних карбида утиснутих у аустенитну металну основу велике жилавости, која се услед високог локалног притиска у површинским слојевима трансформише у мартензит. После ових истраживања, може се са великом сигурношћу закључити, да постоји реална могућност израде ударних греда од неког јефтинијег конструкционог челика, одговарајуће јачине и жилавости, а њихове радне површине формирати производним наваривањем наношењем одговарајућег додатног материјала, чиме би се постигли бољи ефекти. На овај начин би се произвеле ударне греде најмање истог или бољег квалитета уз мање трошкове производње. Овакво предложено решење може се прихватити тек после детаљних експерименталних испитивања на радним деловима изложеним најтежим радним условима.

• **Испитивања на ножевима уређаја за чишћење растиња и равнање терена** послужила су за одређивање отпорности на хабање два основна материјала различитих својстава и више врста различитих додатних материјала, који су већ раније испитивани, али на другим радним деловима при другачијим радним условима.

Испитивани узорци ножева уређаја за чишћење растиња израђени су од Č4732, а ножеви уређаја за равнање терена израђени су од Č4830. Обе врсте ножева су репаратурно наварене коришћењем различитих врста додатних материјала: ABRADUR 58, CrWC 600, E DUR 600, E Mn 17 Cr 13, E Mn 14 и INOX B 18/8/6 који је коришћен за наношење пластичног међуслоја.

Основни материјали од којих су израђени ножеви ових уређаја се сврставају у групу условно заварљивих челика, па је њихово репаратурно наваривање изведено наношењем пластичног међуслоја електроодом INOX B 18/8/6, а затим су наваривани различитим додатним материјалима у неколико слојева, све до постизања пројектоване геометрије нових ножева. Наношење пластичног међуслоја имало је за циљ не само побољшање заварљивости основних

материјала, повећање отпорности на корозију, спречавање великог мешања основних и додатних материјала, већ и смањење нивоа заосталих напона, који би за случај суперпонирања са напонима од ударних оптерећења, убрзано довели до лома ножева. Најбољу отпорност на хабање показали су навари формиран електродом E DUR 600, и то за око три до пет пута бољу од свих испитиваних материјала [69,116,117,141].

- **Испитивање на ножевима уређаја за копање канала** имала су за циљ изналажење могућности продужења радног века, који су при експлоатацији изложени интензивном хабању са повременим ударним оптерећењима јаког интензитета. Ови ножеви су израђени од Č2330, који није показао довољно добру отпорност на хабање, па се приступило репаратурном наваривању резаног дела електродом E DUR 600, чији навари су показали добру отпорност на хабање при претходним истраживањима. На овај начин је истражена могућност да се применом наваривања продужи радни век ових ножева. Наношењем навара електродом E DUR 600, у зони резне ивице, њихов радни век може се продужити за најмање пет пута, јер је губитак материјала код ненаварених ножева пет до шест пута већи од губитка материјала код наварених ножева [100,1007,111,141].

После ових истраживања може се закључити, да репаратурно и производно наваривање ножева уређаја за копање канала, коришћењем електроде E DUR 600, има своје пуно оправдање, јер се њихов радни век сигурно може продужити најмање пет пута, а применом вишеструког репаратурног наваривања истих ножева могу се постићи и додатни економски ефекти. Применом репаратурног наваривања ових ножева смањила би се велика количина одбаченог материјала, и знатно смањено број ножева који се на лагеру држе као резервни делови.

- **Испитивање на ножевима плугова за чишћење снега** имала су за циљ да се продужи њихов радни век наваривањем радних површина. Они раде у доста сличним условима као и ножеви у претходном случају, а израђени су од Č1530, који се није показао довољно отпоран на хабање у овим радним условима. Као и у претходном случају, радне површине ових ножева наварене су електродом E DUR 600, из истих разлога као и у претходном примеру.

После ових истраживања може се закључити, да је потпуно оправдано репаратурно и производно наваривање ножева плугова за чишћење снега електродом E DUR 600, чиме им се радни век продужава најмање шест пута, а вишеструким репаратурним наваривањем истих ножева могу се постићи и додатни економски ефекти. Репаратурно наваривање ових ножева доводи до знатног смањења велике количине одбаченог материјала од којег се ови ножеви израђују, и смањује се набавка материјала за њихову израду. Када је реч о готовим новим ножевима, куповина је неопходна после дугог временског периода, што опет додатно смањује трошкове.

- **Испитивање на ударним чекићима секундарних дробилица за дробљење камена** у радним условима је послужило за одређивање отпорности на хабање челичног лива ČL3160 од којег су израђени нови ударни чекићи, и три додатна материјала (E DUR 600, E Mn 14 и E Mn 17 Cr 13) који су коришћени при репаратурном наваривању оштећених ударних чекића. Сви испитивани додатни материјали имају бољу отпорност на ову врсту хабања од основног материјала два до четири пута. Најбољу отпорност на хабање, слично као при испитивању на узорцима ударних греда, има навар електроде E Mn 17 Cr 13, чија је отпорност на хабање у овом случају скоро четири пута већа од отпорности на хабање ČL3160. Применом оптималне технологије репаратурног наваривања могуће је радни век ударних чекића знатно продужити, а вишеструким наваривањем реално се могу трошкови њихове набавке и замене свести на минимум.

Истраживања на реалним радним деловима грађевинске механизације, при раду у различитим радним условима, имају велики значај, јер поред провере резултата добијених испитивањима на моделима дају више података о примени разних врста челика за израду ових делова, а посебно за њихову репаратуру после оштећења услед хабања, корозије или лома. После ових истраживања поуздано се може дефинисати погодност неких додатних материјала за репаратурно или производно наваривање. То даје основу да се размотри могућност репаратуре и других радних делова грађевинске механизације, који су у току рада изложени сличним радним условима. За репаратуру радних делова грађевинске механизације могуће је користити и друге

додатне материјале, али је неопходно водити рачуна о захтеваним својствима њихових радних површина.

У овом поглављу осврнули смо се само на неке примере успешно изведене репаратуре карактеристичних радних делова грађевинске механизације, који су у директном контакту са грађевинским материјалима. У неким нашим радовима [71,80,103,110,116,124] приказани су и други примери успешно изведене репаратуре делова других техничких система. Поред успешно изведене репаратуре радних делова грађевинске механизације, ова истраживања су била основа да се успостави процедура избора оптималне технологије, при репаратури оштећених сложених склопова и уређаја грађевинских и других машина.

Неки примери успешно изведене репаратуре оштећених уређаја грађевинске механизације као што су: репаратура рипера грејдера, репаратура зупчастог преносника средњег ножа грејдера, репаратура комплетне утоварне кашике утоваривача, репаратура комплетне кашике ровокопача, репаратура ротора дробилице са ударним гредама, репаратура тела и бата хидрауличног чекића за разбијање камена и бетона. Такође, неопходно је поменути да овде нису детаљно приказане успешно изведене репаратуре и други делови и склопови грађевинске механизације: комплетне сушаре асфалтне базе; комплетног погонског дела, ножа и рипера булдожера; комплетног сандука (платформе) камиона; делова финишера, грејдера, ровокопача и других машина и уређаја.

Ова обимна истраживања су омогућила моделирање процеса репаратуре оштећених делова грађевинске механизације применом технологија заваривања и наваривања. Мишљења смо да ова истраживања могу корисно послужити као основа, за моделирање процеса репаратуре делова или групе делова (сетова) других техничких система, који раде у другим привредним гранама, и на тај начин могу се значајно смањити трошкови њиховог одржавања.

9.7 ОПРАВДАНОСТ ПРИМЕНЕ РЕПАРАТУРНОГ И ПРОИЗВОДНОГ НАВАРИВАЊА РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ

Основни циљ овог рада је био, да се на научно заснованим основама докаже могућност извођења и оправданост примене технологије репаратурног или производног наваривања, при обнављању оштећених, или изради нових делова грађевинских машина. При доношењу одлуке о начину обнављања оштећених делова нису довољни само техничко-технолошки показатељи, већ треба узети у обзир и економске показатеље.

При обнављању оштећених делова најпре се мора одговорити на питање да ли је оправдано применити наваривање. Истраживања у овом раду омогућавају доношење одлуке да ли је оправдано применити репаратурно наваривање оштећених већ коришћених делова или задржати устаљену праксу замене оштећених делова новим резервним деловима. Да би се ова одлука донела, неопходно је да се истовремено анализирају како технички проблеми, тако и економска исплативост.

Доношење одлуке о репаратурном наваривању оштећених делова техничких система је одговоран и сложен посао, па је неопходно систематски и стручно приступити овом послу, који захтева решавање већег броја сложених проблема. Стога се намеће потреба извођења техно-економске анализе (ТЕА) за сваки конкретан случај, да би се донела ваљана одлука, коју је методу оправдано применити, како би се постигли што бољи техно-економски ефекти. Технологија наваривања прописује начин спајања материјала најчешће дијаметрално различитих својстава, а наука о материјалима је сама по себи мултидисциплинарна наука. При проучавању различитих хемијских, физичких и технолошких својстава материјала потребна су основна знања из више фундаменталних наука, као што су хемија, физика, термодинамика, металургија и др. Стога је и техно-економска анализа која претходи примени репаратурног и производног наваривања (RPN) у суштини мултидисциплинарна. Економска анализа систематски истражује, упоређује и повезује све неизбежне трошкове и добити у току једног радног циклуса, одакле произлази и коначна одлука.

Код економског проблема, да ли набавити нови радни део грађевинске механизације и заменити оштећени део, или оштећени део обновити применом репаратурног наваривања, неопходно је дефинисати циљ и задатке у техно-економској анализи. Такође, неопходно је изабрати одговарајуће методе, усклађене са предметом истраживања у техно-економској анализи. Изабране методе и критеријуми могу допринети систематским образложењима за оцену и избор најповољнијег решења. Од више расположивих метода треба се одредити за ону која даје могућност да се изведе:

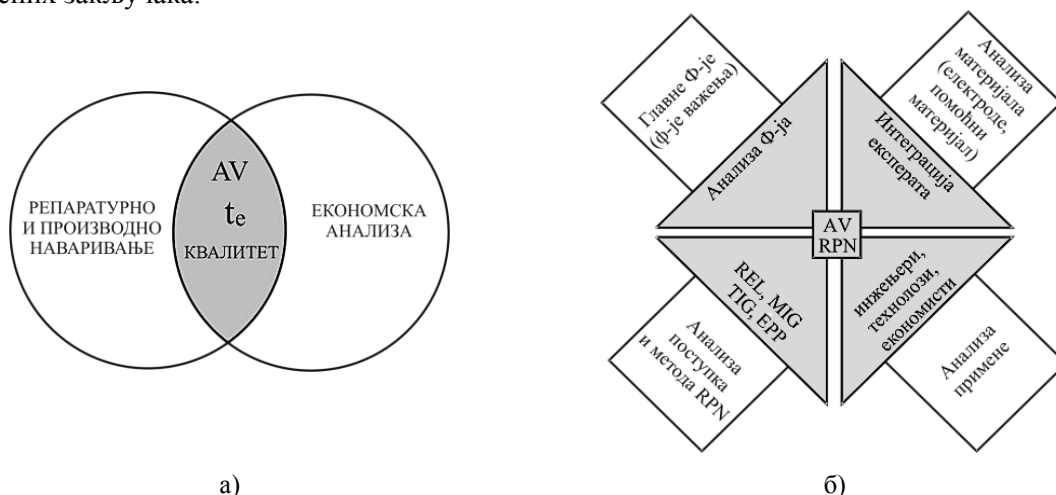
- *Компаративна анализа међусобно искључивих решења;*
- *Парцијална економска анализа процеса на нивоу производног система или конкретног радног места;*
- *Рангирање и избор бољег решења у условима када најчешће постоје само подаци о трошковима њихове примене.*

У стручној литератури за економску анализу неког пројекта прихваћена је синтаagma *Cost-Benefit*, која представља системски приступ како користити основне ресурсе да би се постигли пројектовани циљеви на најрационалнији начин. Она је аналитички алат којим се фактори, који утичу на доношење одлуке, могу квалификовати и квантификовати, у циљу доношења правилне одлуке [22,23,24].

Избором погодне технологије RPN-a, могу се створити услови за поуздан рад грађевинске механизације, који се процењује помоћу параметара битних за економску анализу: *квалитет радног дела и анализе вредности*.

- *Квалитет радног дела* у економској анализи се третира као укупан *примарни* и *секундарни* квалитет новог и репаратурно навареног дела грађевинске механизације, и битно утиче на закључке техно-економске анализе. На основу оптимизације технологије RPN-a, и експерименталних истраживања у лабораторијским и реалним радним условима, одређује се *очекивано ефективно радно време* (t_e), за које ће испитивани радни део испуњавати пројектоване захтеве.

- *Анализа вредности (AV)*, као универзална метода за утврђивање трошкова, при набавци, изради или репаратури оштећеног дела, може да да одговор о економској рационалности примењеног технолошког поступка. На слици 9.7.1 дат је схематски приказ техно-економске анализе и анализе вредности којом се процењује економска рационалност примењене технологије RPN-a, и даје основу за квалитетан процес економске анализе и потребну поузданост изведених закључака.



Слика 9.7.1 Схематски приказ: а) техно-економска анализа технологије RPN-a ; б) анализа вредности технологије RPN-a [22]

Примена методе анализе вредности (AV) је комплексна, али омогућава сагледавање и обједињавање свих трошкова при набавци, изради или репаратури неког радног дела, и елиминисање неких непотребних трошкова. Примена ове методе омогућава најмање три пута веће уштеде од трошкова њене примене. Довољно је анализирати методе и поступке, да би се добио производ са најмањом ценом, који има захтевани квалитет и задовољава пројектовану

функцију. Ова метода се разликује од већине инжењерских метода, јер поред техничко-технолошких захтева укључује и економски биланс о трошковима и ценама. Најделотворнија техника за одговор на економску исплативост су тзв. *тестови вредности*, који су прилагођени моделу и предмету истраживања у конкретној научној области.

Економска наука је, уз коришћење знања из других научних области, допринела развоју већег броја различитих метода и критеријума за оцену техно-економске оправданости примене различитих технологија при изради или обнављању различитих техничких система. Све ове методе су засноване на економским критеријумима и категоријама: *економичност*, *продуктивност*, *профитабилност (рентабилност)* и др. Међутим, све се углавном своди на одређивање трошкова и добити (профита), односно користи од примене конкретне технологије, а основни циљ је добијање производа захтеваног квалитета уз минималне трошкове израде.

Одређивање трошкова и добити је само један од више корака при квалитативној економској анализи, а при томе је неопходно узети у обзир све утицајне факторе. Трошкови се израчунавају на основу финансијске документације, а процена трошкова у будућем временском периоду доноси се на основу већ насталих сличних трошкова у претходном периоду. Добит, на основу производног подсистема, по правилу се тешко може тачно одредити, а још теже пројектовати у будућем временском периоду. И поред овог временског ограничења, постоје неке могућности квалитативне процене добити, упоређивањем са алтернативним решењем парцијално по фазама и укупно. Неопходно је истражити посебно сваку примењену технологију, како би се проценили и упоредили трошкови и добит, који настају за време целокупног радног циклуса (радног века) разматраних радних делова. Трошкови и добит се најчешће одређују на временски период од једне године (годишњи ниво). Ваљаност техно-економске анализе највише зависи од улазних података, па је најбитније располагати проценама експерата (инжењера, технолога, економиста и др.), заснованим на њиховом вишегодишњем искуству при раду на овим пословима.

За техно-економску анализу економске оправданости примене технологије RPN-а радних делова грађевинске механизације неопходно је извести више различитих, али међусобно зависних активности: одредити узроке и обим насталих оштећења, донети оцену о заварљивости основних материјала радних делова, проценити могућност и начин извођења технологије репаратуре, проценити квалитет репарираних делова, као и трошкове извођења репаратуре, одредити трошкове моделских испитивања и др. Иако је примена технологије RPN-а изузетно сложен и одговоран посао неопходно је дефинисати најповољнија техничко-технолошка решења, чиме се процес репаратуре доводи до нивоа када је могуће спровести економску анализу. На основу ове економске анализе доноси се коначна одлука, набавити или израдити нов резервни део и заменити оштећени део новим, или репарирати оштећени већ коришћени радни део.

Поред наведених тешкоћа, које отежавају доношење одлуке о оправданости примене технологије RPN-а, у неким нашим ранијим радовима изведена је детаљна техно-економска анализа, применом више економских метода и параметара за већи број карактеристичних примера [23,24,71]. Резултати ових истраживања довели су до закључка да је примена оптималне технологије RPN-а оправдана из техно-економског аспекта. Такође, дошло се до закључка да је могуће формирати најповољнији техно-економски модел обнављања оштећених радних делова грађевинске механизације, па и радних делова неких других техничких система, применом оптималне технологије RPN-а [22,25,71].

9.7.1 МЕТОДЕ И КРИТЕРИЈУМИ ЗА ОЦЕНУ ОПРАВДАНОСТИ ПРИМЕНЕ RPN-а

Избор технологије обнављања оштећених елемената техничких система зависи од њихових конструкционих, технолошких и експлоатационих карактеристика [22,26,27]. На избор одговарајуће технологије обнављања утиче већи број фактора: димензије и маса елемената, сложеност облика, својстава материјала од којих су израђени, примењене технологије израде, врсте примењене термичке обраде, квалитета, механичке обраде, услова рада до отказа, величине оштећења услед процеса хабања и корозије, обима оштећења услед лома, техничких могућности за извођење одговарајуће технологије обнављања, броја оштећених елемената предвиђених за

обнављање, димензија оштећених површина и врсте хабања које је довело до оштећења, трошкова извођења одређене технологије и др.

Избор најповољније технологије обнављања оштећених делова треба извести у три етапе према дефинисаним критеријумима:

- *Претходни избор технолошких варијанти*, које обезбеђују потпуно обнављање оштећеног дела до пројектованих димензија и захтеваног квалитета, који испуњава услове при експлоатацији-*техничко-технолошки критеријум*;
- *Избора најекономичније од свих одговарајућих технологија обнављања*, којима се постиже захтевани квалитет, поштујући економске параметре-*економски критеријум*;
- *Коначан избор оптималне технологије обнављања*, која истовремено обезбеђује захтевани квалитет уз минималне трошкове - *техно-економски критеријум*.

Техничко-технолошки критеријум дефинише могућност примене неке од расположивих технологија обнављања из аспекта техничко-технолошких могућности, и омогућава да се направи преглед свих одговарајућих технологија за обнављање сваког радног дела грађевинске механизације.

Економски критеријум дефинише оправданост примене неке технологије обнављања радних делова грађевинске механизације из економског аспекта, и избор најекономичније технологије према критеријуму најмањих трошкова.

Техно-економски критеријум дефинише оптималну технологију обнављања оштећених радних делова грађевинске механизације, из аспекта техничко-технолошке и економске оправданости. Овај критеријум односи се истовремено на задовољавајући квалитет репарираних делова уз што ниже трошкове.

За оцену техно-економске оправданости постоје више метода [22]: *метода економичности* (МЕК), *PIA (Profitability Improvement Analysis) метода*, *MAPI (Machinery and Allied Predmets Institute) метода*, *LCC метода* и *метода нето садашње вредности* (MNSV).

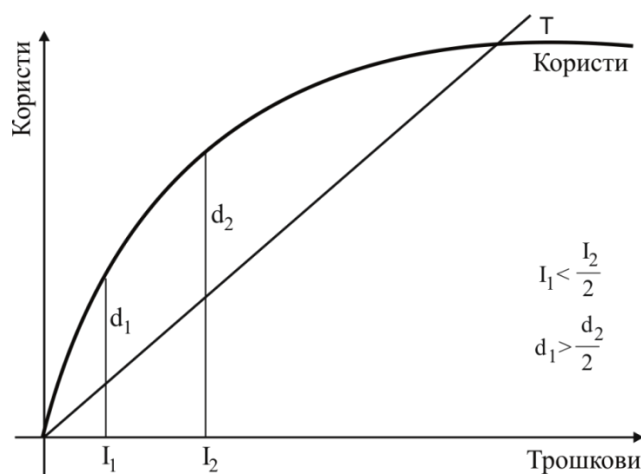
Свака од ових метода има и своје критеријуме за оцену о техно-економској оправданости и доношењу одлука о примени најповољније технологије обнављања оштећених елемената техничких система. Ове методе и критеријуми могу се користити, не само за избор најповољније репаратурне технологије, већ и при примени најповољније технологије за израду нових радних делова. Могу се рангирати одговарајуће репаратурне и производне технологије, и донети одлука о избору и примени оптималног решења. Избор најекономичније варијанте се изводи на основу одговарајућих *показатеља економске оправданости*.

У овом раду су одређивани економски ефекти два начина обнављања и оспособљавања за рад грађевинске механизације:

- *Заменом оштећених делова новим резервним деловима,*
- *Репаратурним наваривањем (заваривањем) оштећених већ коришћених делова.*

Прилаз економичности и рентабилности у примени ова два начина обнављања оштећених радних делова може бити са становишта: *расположивих технологија* и *расположивих новчаних средстава* [22]. Са становишта *расположивих технологија* бира се једна алтернатива: набавити нови резервни део или репарирати оштећени стари радни део. Са становишта *расположивих новчаних средстава* поступа се поштујући критеријум максималне рационалности.

Пошто је предмет истраживања анализа две расположиве могућности предност у анализи се даје технологији која обезбеђује боље техно-економске ефекте. Као критеријум за оцену улагања у ове две алтернативне технологије, односно квантитативно одређивање износа новчаних средстава, користе се параметри *већа економичност* и *апсолутна рентабилност*. Разлози за анализу апсолутних и релативних показатеља приказани су на општем дијаграму *Cost-Benefit анализе* (сл. 9.7.2)



Слика 9.7.2 Проблем избора критеријума за оцену техно-економских ефеката за случај неједнаке добити (d) и инвестиционог улагања (I) [22]

Посматрано у апсолутним категоријама, инвестиција у технологију (I_2) има предност у односу на инвестицију у технологију (I_1). Међутим, према односима на слици 9.7.2, ако се расположе средствима за технологију (I_2), очигледно је да је најмање два пута рационалније инвестирати у технологију (I_1). На дужи временски период, релативни односи морају да имају приоритет код оцена алтернатива. Постоји и минимум економских захтева код инвестирања у технологију RPN-а коју треба усвојити [22].

9.7.1.а Метода економичности (МЕК)

Код методе економичности, као мере оправданости примене одређене технологије да би се изразило опште начело рационалности, најчешће се користе три поступка: *упоређивање економичности као односа прихода и трошкова*, *упоређивање трошкова и остварене уштеде ако се они смање и повећање прихода услед смањења трошкова*. При квалитативној економској анализи процењује се директна (нето) корист, али и непредвиђени трошкови, интерни ефекти, екстерни ефекти и мултипликациони ефекти [22].

Ограничења у примени ове методе, за парцијални ниво пословања, јесте у томе што није могуће јасно изразити операционалне варијабле као што су приход, финансијски резултат и др., при коришћењу првог и трећег начина. Зато се при анализи економичности и компарацији алтернатива најчешће користи други поступак, за који је потребно што боље дефинисати релевантне трошкове, а критеријум је упоређивање укупних трошкова ($T_{rd} < T_{nd}$).

При избору најјекономичније варијанте применом методе економичности често се као показатељ користи *коэффициент економске оправданости* (k_e) који се одређује из израза:

$$k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}, \tag{9.1}$$

где T_{nd} представља укупан трошак набавке или израде новог резервног дела, а T_{rd} представља укупан трошак репаратуре старог дела, изражених у новчаним јединицама.

Трошкови набавке новог дела (T_{nd}) представљају збир свих трошкова који прате набавку (трошак за куповину новог дела, трошак његовог транспорта, трошак царинења ако се део увози, трошак плаћања пореза, трошак чувања и складиштења и др.). Овај трошак се умањује за вредност продаје оштећеног дела (T_{lo}), а увећава за додатне трошкове (T_d) који настају због застоја у производњи, губитка посла због отказивања уговора, плаћања казних поена (пенала) због прекорачења уговореног рока и др. Трошкови набавке новог дела се дефинишу на основу финансијске документације, а могу се одредити помоћу израза:

$$T_1 = T_{nd} + T_d - T_{lo}, \tag{9.2}$$

где T_1 – представља укупне трошкове набавке и замене оштећеног дела новим резервним делом изражен у новчаним јединицама.

Укупни трошкови репаратуре наваривањем или заваривањем оштећеног дела могу се одредити помоћу израза:

$$T_2 = T_{rd} + T_d, \quad (9.3)$$

где додатни трошкови (T_d) имају нешто дуготрајнију структуру од ових трошкова према (9.2).

Трошкови репаратурног наваривања или заваривања могу се одредити помоћу израза:

$$T_{rd} = T_{dm} + T_{dr} + T_e + T_{pu} + T_{pz}, \quad (9.4)$$

где је T_{dm} - трошак набавке додатног материјала, T_{dr} - трошак директног рада (радне снаге), T_e - трошак енергије, T_{pu} - трошак производних услуга, T_{pm} - трошак помоћног материјала и T_{pz} - трошкови припремно-завршних радова.

Трошкови припремно-завршних активности сумирају више врста трошкова и могу се одредити помоћу израза:

$$T_{pz} = T_{io} + T_{pt} + T_{ni} + T_d, \quad (9.5)$$

где је T_{io} - трошак идентификације оштећења (дефектација), T_{pt} - трошак пројектовања технологије репаратуре, T_{mi} - трошак моделских испитивања и T_d - додатни трошкови (демонтажа и монтажа делова, чишћење делова, припрема делова за репаратуру и др.).

Укупни трошкови производног наваривања имају нешто другачију структуру, и могу се одредити из израза:

$$T_3 = T_{nd} + T_{pn} + T_d, \quad (9.6)$$

где T_{nd} - трошак набавке или израде новог радног дела, T_{pn} - трошак производног наваривања који има сличну структуру као трошак репаратурног наваривања и T_d - додатни трошак који има сличну структуру као додатни трошак репаратурног наваривања.

Укупни трошкови израде новог радног дела се разликују од укупних трошкова набавке новог радног дела и могу се одредити из израза:

$$T_4 = T_{om} + T_{dr} + T_e + T_{pu} + T_{pm} + T_a + T_{pz}, \quad (9.7)$$

где је T_{om} - трошак набавке основног материјала, T_a - трошак коришћеног алата, а остали трошкови су слични као и трошкови дати према (9.4).

При дефинисању структуре трошкова појединих алтернативних технологија неопходно је добро сагледати и дефинисати све трошкове који чине структуру укупних трошкова, јер добро дефинисање укупних трошкова директно утиче на квалитет доношења одлуке о избору најповољније технологије. У том циљу, никако не треба заборавити на трошкове режијске радне снаге који су најчешће три пута већи од трошкова производне радне снаге, односно од трошкова директног рада, јер основни критеријум за одлучивање при примени методе економичности (МЕК) је минимални трошак анализираних технологија ($T_{A \min}$).

Трошкове набавке или израде нових резервних делова није неопходно детаљно израчунати, већ се једноставно сабирају трошкови по више основа и на ове трошкове се не може битније утицати, па се могу сматрати приближно истим [59,124,200]. Међутим, на трошкове репаратуре може се значајно утицати прописивањем оптималне технологије. Упоређивањем трошкова набавке или израде новог резервног дела и трошкова његовог складиштења, са трошковима репаратуре оштећеног дела, долази се најчешће до *економског показатеља оправданости*. Ово често није довољно за доношење коначне одлуке о примени технологије RPN-а, већ је неопходно одредити *техно-економски показатељ оправданости*. У том циљу треба одредити и проверити *техничко-технолошке показатеље оправданости*.

Основни показатељ техничко-технолошке оправданости примене технологије RPN-а је коефицијент експлоатационе поузданости (k_{ep}) који се израчунава помоћу израза:

$$k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}, \quad (9.8)$$

где је t_{erd} - ефективно време рада репарираниог радног дела до степена граничног хабања када губи пројектовану радну способност, t_{end} - ефективно време рада новог радног дела до степена граничног хабања када губи пројектовану радну способност.

Очигледно је да ће бити донета одлука о примени технологије RPN-а оштећеног дела ако на основу коефицијента k_e и k_{ep} постоји техно-економска оправданост. На основу ових техно-економских показатеља се може донети оцена и о најјекономичној технологији репаратуре, односно изабрати оптимална технологија репаратуре оштећених делова.

Поред економских показатеља k_e и k_{ep} , при избору најјекономичније технологије обнављања потребно је одредити и показатељ економске рационалности (k_{er}). Показатељ економске рационалности (k_{er}) се одређује помоћу израза за времена ефективног рада новог радног дела (t_{end}), и ефективног рада репарираниог оштећеног радног дела (t_{erd}):

$$t_{end} = \frac{I_{hnd}}{i_{hnd}}, \quad (9.9)$$

$$t_{erd} = \frac{I_{hrd}}{i_{hrd}}, \quad (9.10)$$

где је I_{hnd} - гранично хабање новог радног дела, I_{hrd} - гранично хабање репарираниог радног дела, i_{hnd} - брзина хабања новог радног дела, i_{hrd} - брзина хабања репарираниог радног дела.

Као услов економске рационалности репаратуре узима се однос:

$$\frac{T_{rd}}{t_{erd}} \leq \frac{T_{nd}}{t_{end}}. \quad (9.11)$$

Када се једначине (9.9) и (9.10) уврсте у неједначину (9.11), добија се следећи израз:

$$\frac{T_{rd} \cdot i_{hrd}}{I_{hrd}} \leq \frac{T_{nd} \cdot i_{hnd}}{I_{hnd}}. \quad (9.12)$$

Када се један исти радни део, при његовој репаратури, враћа на његове *првобитне пројектоване-номиналне димензије*, важи једнакост $I_{hrd}=I_{hnd}$, а услов рационалности репаратуре може се одредити помоћу израза:

$$T_{rd} \cdot i_{hrd} \leq T_{nd} \cdot i_{hnd} \quad (9.13)$$

То значи, ако се брзина хабања репарираниог радног дела i_{hrd} смањује, целисходно је применити скупљу технологију репаратуре. Једнакост $I_{hrd}=I_{hnd}$ не важи за репаратуру оштећеног радног дела када се не враћа на *пројектоване-номиналне димензије*, већ на неке друге тзв. *ремонтне димензије*.

Бројну вредност услова економске рационалности репаратуре оштећеног радног дела могуће је одредити из израза:

$$k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{hnd}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}. \quad (9.14)$$

Репаратура оштећеног радног дела је економски оправдана у свим случајевима када је испуњен услов $k_{er} \geq 1$. Ако се репарирају оба спрегнута оштећена радна дела једначина (9.14) има нешто сложенији облик [59,124,200].

Потребно је истаћи да је понекад целисходно репарирати оштећени радни део и онда када су трошкови репаратуре (T_{rd}) већи од трошкова набавке новог радног дела (T_{nd}). То се односи на случај када би набавка или израда новог радног дела изазвала дуг застој и прекид у раду, што би проузроковало велике губитке у производњи често веће и од трошкова репаратуре. Тада се репаратура изводи без обзира на трошкове.

Радне делове изложене хабању високог интензитета треба тако репарирати да се обезбеди принцип узајамне заменљивости. При избору технологије репаратуре полази се од експлоатационих услова у којима ради оштећени радни део. Практични примери показују да процеси хабања, корозије и лома знатно смањују радни век и поузданост радних делова грађевинске механизације. Стога је при доношењу одлуке о њиховој репаратури неопходно добро сагледати техно-економску оправданост њене примене. Позитивни резултати се могу очекивати само применом оптималне технологије репаратуре, односно прописаног модела репаратуре усвојеног после сложених теоријско-експерименталних истраживања.

9.7.1.6 Улазни параметри МЕК за оцену оправданости примене RPN-а

У овом раду изведена је техно-економска анализа оправданости примене репаратуре радних делова грађевинске механизације у односу на устаљену праксу замене оштећених делова новим резервним деловима. Иако постоји већи број метода и критеријума за доношење оцене о техно-економској оправданости примене RPN-а, у овом раду је коришћена метода економичности и њени критеријуми. Одређивање економских ефеката изведено је на основу три главна показатеља:

- *Трошкова набавке новог резервног радног дела и трошкова репаратуре оштећеног радног дела;*
- *Дужине радног века новог радног дела и дужине радног века репарираног радног дела;*
- *Насталих губитака у производњи због отказа и застоја, на основу потребног времена да се грађевинска машина или уређај доведу у радно стање.*

Ови показатељи, уз примену методе економичности и њених параметара, стварају услове за извођење детаљне анализе и доношење оцене о техно-економској оправданости примене репаратуре оштећених радних делова грађевинске механизације. Међутим, да би се извела ваљана техно-економска анализа неопходно је било процес репаратуре довести до нивоа када је могуће спровести техно-економску анализу, на основу које се коначно доноси одлука, набавити нов радни део или постојећи радни део репарирати.

Теоријско-експериментална истраживања неких аутора и наша истраживања, на већем броју примера репаратуре оштећених радних делова грађевинске механизације, довела су до неопходног нивоа, када се могу поуздано одредити техно-економски ефекти примене репаратуре и упоредити са устаљеном праксом замене оштећених делова новим резервним деловима [97,124,141].

Улазни параметри за техно-економску анализу технологије репаратуре оштећених радних делова грађевинске механизације, коришћењем методе економичности и њених критеријума, пресудно утичу на доношење одлуке о оправданости примене наваривања. Зато је неопходно да се ови параметри одреде што тачније.

Због обимности овог рада, приказани су само крајњи резултати излазних параметара техно-економске анализе применом методе економичности, а не и детаљни поступци прорачуна. Дат је табеларни приказ излазних параметара неопходних за упоређивање устаљене технологије замене оштећених радних делова грађевинске механизације новим резервним деловима и технологије репаратуре оштећених старих делова. Такође, из истих разлога нису приказани резултати техно-економске анализе производног наваривања неких радних делова грађевинске механизације, иако имамо резултате ових истраживања.

9.7.2 ТЕХНО-ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ РЕПАРАТУРЕ ОШТЕЋЕНИХ РАДНИХ ДЕЛОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ

Применом методе економичности одређена је техно-економска оправданост промене репарираних карактеристичних радних делова грађевинске механизације у поређењу са устаљеном праксом замене оштећених радних делова новим резервним деловима. Ови радни делови се по правилу набављају и складиште у одржавању као резервни делови, и када дође до оштећења радних делова, изводи се њихова замена новим резервним деловима, а оштећени радни делови се отписују и одбацују.

Техно-економска анализа је изведена под претпоставком да је организација функције одржавања на изузетно високом нивоу, и да је на време обављена набавка нових резервних делова изведена репаратура оштећених делова, тако да у сваком тренутку у магацину има на стању неопходан број радних делова спремних за замену. Овај идеализован приступ условљава добијање најмањих економских ефеката примене репаратуре, а у сваком другом случају економски ефекти могу да буду знатно већи.

Техно-економску анализу потребно је извршити за једна комплет (сет) радних делова за време једног експлоатационог циклуса, а најбоље је пројектовати трошкове на годишњи ниво. За менаџере тзв. *експерименталне економије* најбољи пресек економске анализе јесте да се прикажу резултати на нивоу целог предузећа за све машине истог типа на годишњем нивоу, при чему се узима реалан податак степена искоришћења капацитета [22]. У таблицама 9.7.1 до 9.7.8 приказани су излазни параметри упоредне техно-економске анализе за неке радне делове грађевинских машина.

Таблица 9.7.1 Упоредна техно-економска анализа обнављања оштећених зуба утоваривача

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , din	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, din
Технологија замене (10 ком.)	145 260	0,735	3,500	13,226	722 520
Технологија репаратуре (10 ком.)	38 440				127 220
Директна уштеда	106 820 din (73,50%)		Уштеда на годишњем нивоу	595 300 din (82,40%)	

Таблица 9.7.2 Упоредна техно-економска анализа обнављања оштећених лопатица мешалице асфалтне базе

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , din	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, din
Технологија замене (64 ком.)	334 720	0,609	3,000	7,677	67 240 320
Технологија репаратуре (64 ком.)	130 800				22 077 600
Директна уштеда	203 920 din (60,90%)		Уштеда на годишњем нивоу	45 162 720 din (67,17%)	

Таблица 9.7.3 Упоредна техно-економска анализа обнављања оштећених ударних греда дробилнице постројења за производњу стенских материјала

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (4 ком.)	1 050 000	0,767	2,133	9,149	36 472 800
Технологија репаратуре (4 ком.)	244 800				5 600 000
Директна уштеда	805 200 <i>din</i> (76,70%)		Уштеда на годишњем нивоу	30 872 800 <i>din</i> (84,65%)	

Таблица 9.7.4 Упоредна техно-економска анализа обнављања оштећених ножева уређаја за уклањање (чишћење) растиња

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (40 ком.)	114 800	0,665	5,000	15,735	2 104 500
Технологија репаратуре (40 ком.)	38 480				185 940
Директна уштеда	76 320 <i>din</i> (66,50%)		Уштеда на годишњем нивоу	1 918 560 <i>din</i> (91,16%)	

Таблица 9.7.5 Упоредна техно-економска анализа обнављања оштећених ножева уређаја за равнање терена

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (14 ком.)	188 500	0,729	2,167	8,460	1 941 300
Технологија репаратуре (14 ком.)	51 100				260 200
Директна уштеда	137 400 <i>din</i> (72,90%)		Уштеда на годишњем нивоу	1 681 100 <i>din</i> (86,60%)	

Таблица 9.7.6 Упоредна техно-економска анализа обнављања оштећених **ножева уређаја за ископ канала**

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (24 ком.)	369 600	0,685	5,333	16,934	3 528 000
Технологија репаратуре (24 ком.)	116 400				250 800
Директна уштеда	253 200 <i>din</i> (68,50%)		Уштеда на годишњем нивоу	3 277 200 <i>din</i> (92,89%)	

Таблица 9.7.7 Упоредна техно-економска анализа обнављања оштећених **ножева плугова за чишћење снега**

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (2 ком.)	97 200	0,667	6,000	18,000	2 736 000
Технологија репаратуре (2 ком.)	32 400				196 800
Директна уштеда	64 800 <i>din</i> (66,70%)		Уштеда на годишњем нивоу	2 539 200 <i>din</i> (92,81%)	

Таблица 9.7.8 Упоредна техно-економска анализа обнављања **оштећених чекића дробилнице**

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (72 ком.)	1 209 600	0,630	3,750	10,160	12 432 000
Технологија репаратуре (72 ком.)	446 400				2 025 600
Директна уштеда	763 200 <i>din</i> (63,00%)		Уштеда на годишњем нивоу	10 406 400 <i>din</i> (83,71%)	

Ово су карактеристични примери, где се применом репаратурног наваривања могу постићи бољи економски ефекти од поступка замене оштећених радних делова новим деловима. Знатно је дужи радни век репарираних од нових делова, иако су они израђени од висококвалитетних материјала предвиђених за ову намену. Наварене радне површине су бољег квалитета од радних површина нових радних делова, јер је додатни материјал од кога су оне формиране, неколико пута отпорнији на ову врсту абразивног хабања, при условима у току експлоатације. Ова чињеница подстиче на даља истраживања на изналажењу нових врста додатних материјала, који ће имати бољу отпорност на хабање и корозију, од до сада познатих и коришћених додатних материјала. Такође код свих примера постоји потпуна оправданост примене репаратуре наваривањем у односу на замену.

9.7.3 ТЕХНО-ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ РЕПАРАТУРЕ ОШТЕЋЕНИХ СКЛОПОВА ГРАЂЕВИНСКЕ МЕХАНИЗАЦИЈЕ

За разлику од претходних примера, где се за радне делове грађевинске механизације може оријентационо предвидети радни век, који се по правилу набављају и складиште, склопови уређаја грађевинске механизације се не држе у резерви, већ се по правилу набављају када дође до њиховог хаваријског оштећења. Најчешће се у овим случајевима не може предвидети њихов радни век и долази до изненадних отказа и застоја. Набавка комплетних уређаја и склопова, њихово складиштење и чување би довело до високих додатних трошкова, и директно утицало на укупне економске ефекте пословања предузећа.

За неколико карактеристичних примера дата је техно-економска анализа и одређена оправданост примене заваривачких технологија. При извођењу техно-економске анализе морали су да се узму у обзир трошкови набавке нових уређаја, трошкови репаратуре ових уређаја, али и додатни трошкови услед дужег застоја због времена потребног за набавку, које је у садашњим условима пословања по правилу неколико пута дуже од времена потребног за репаратуру. Пошто су ово примери код којих је изведена успешна репаратура и још су у експлоатацији, економски ефекти су одређивани под претпоставком да ће дужина њиховог радног века бити најмање једнака времену док није дошло до њихове хаварије. Ово је био један од основних критеријума за доношење одлуке о њиховој репаратури применом технологија заваривања и наваривања. У таблицама 9.7.9 до 9.7.14 приказани су излазни параметри ударне техно-економске анализе за неке уређаје грађевинских машина.

Таблица 9.7.9 Упоредна техно-економска анализа набавке и репаратуре уређаја рипера грејдера

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (1 ком.)	480 250	0,932	3,000	44,20	780 250
Технологија репаратуре (1 ком.)	32 600				68 600
Директна уштеда	447 650 <i>din</i> (93,20%)		Уштеда на годишњем нивоу	711 650 <i>din</i> (91,20%)	

Таблица 9.7.10 Упоредна техно-економска анализа набавке и репаратуре зупчастог пара уређаја за позиционирање средњег ножа грејдера

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (1 комплет)	2 191 200	0,914	2,692	31,190	2 911 200
Технологија репаратуре (1 комплет)	189 120				297 120
Директна уштеда	2 002 080 <i>din</i> (91,40%)		Уштеда на годишњем нивоу	2 614 080 <i>din</i> (89,80%)	

Таблица 9.7.11 Упоредна техно-економска анализа набавке и репаратуре **утоварне кашике утоваривача**

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (1 ком.)	880 750	0,860	2,556	18,331	1 120 750
Технологија репаратуре (1 ком.)	123 000				199 800
Директна уштеда	757 750 <i>din</i> (86,00%)		Уштеда на годишњем нивоу	920 950 <i>din</i> (82,17%)	

Таблица 9.7.12 Упоредна техно-економска анализа набавке и репаратуре **кашике ровокопача**

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (1 ком.)	586 500	0,877	2,250	18,227	794 500
Технологија репаратуре (1 ком.)	72 400				134 800
Директна уштеда	514 100 <i>din</i> (87,70%)		Уштеда на годишњем нивоу	659 700 <i>din</i> (83,03%)	

Таблица 9.7.13 Упоредна техно-економска анализа набавке и репаратуре **ротора дробилнице**

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (1 ком.)	2 860 000	0,880	2,060	17,167	17 980 000
Технологија репаратуре (1 ком.)	343 200				790 320
Директна уштеда	2 516 800 <i>din</i> (88,00%)		Уштеда на годишњем нивоу	17 189 680 <i>din</i> (95,60%)	

Таблица 9.7.14 Упоредна техно-економска анализа набавке и репаратуре **хидрауличког чекића**

Примењена технологија	Директни трошкови алтернативних технологија T_{nd} и T_{rd} , <i>din</i>	Коефицијент економичности $k_e = \frac{T_{nd} - T_{rd}}{T_{nd}}$	Коефицијент експлоатационе поузданости $k_{ep} = \frac{t_{erd}}{t_{end}}$	Коефицијент економске рационалности $k_{er} = \frac{T_{nd} \cdot i_{ind}}{T_{rd} \cdot i_{hrd}}$	Укупни трошкови на годишњем нивоу, <i>din</i>
Технологија замене (1 ком.)	3 125 000	0,912	4,800	54,20	37 250 000
Технологија репаратуре (1 ком.)	276 800				526 800
Директна уштеда	2 848 200 <i>din</i> (91,20%)		Уштеда на годишњем нивоу	36 723 200 <i>din</i> (98,59%)	

Овде су приказани само неки карактеристични примери обнављања оштећених радних делова и склопова грађевинске механизације, где је изведена успешна репаратура и остварени значајни техно-економски ефекти. Вишегодишње искуство аутора овог рада на одржавању и обнављању ових делова и склопова грађевинске механизације и бројна истраживања из ове области, довели су до већег броја успешно обављених репаратура, и оправданости примене заваривачких метода, не само из техничко-технолошког већ и из техно-економског аспекта.

9.7.4 КОМЕНТАР ИСТРАЖИВАЊА

Аутор овог рада је заједно са својим сарадницима, више од десет година радио на пословима одржавања опреме у индустрији и најмање још толико на пословима одржавања грађевинске механизације, и у току свог рада сретао се са великим бројем проблема везаних за обнављање оштећених радних делова различитих техничких система. Да би изузетно скупа грађевинска механизација, углавном набављена и увожена из иностранства, била што више времена радно способна за извођење различитих врста грађевинских радова, скоро увек везаних за нереално кратак рок њиховог завршетка, неопходно је било „у ходу“ решавати доста сложених проблема. За то време изведен је велики број репаратурних радова различитих радних делова грађевинске механизације, израђених од разних врста квалитетних челика, и увек се постављало питање, да ли оштећене радне делове заменити новим резервним деловима, или извести репаратурно наваривање. Набавком нових резервних делова проблем се увек могао лако решити, али то је прескупо и прође доста времена док се набави и угради нови део, што знатно продужава време застоја механизације, и ствара велике губитке при извођењу грађевинских радова. За решавање ових проблема применом репаратуре, било је потребно издвојити знатно мање новчаних средстава, и додатно ангажовати атестиране завариваче. Тиме се знатно смањило време застоја и боље је искоришћено радно време радника и механизације. При доношењу одлуке о извођењу репаратуре оштећених радних делова грађевинске механизације увек је присутно најтеже питање, шта ако се не постигну очекивани резултати, па се проблем мора решити, набавком или израдом нових делова.

У експерименталном делу овог рада приказана су истраживања на моделима и реалним радним деловима. Истраживања на моделима су изведена у лабораторијским условима, а на реалним радним деловима у условима експлоатације, где су сви радови везани за рокове. Резултати експерименталних истраживања на моделима у лабораторијским условима су послужили за оцену и верификацију полазних технологија, а резултати испитивања на реалним радним деловима за оцену и верификацију предложених технологија, из техничко-технолошког аспекта.

Резултати истраживања на терену, углавном су имала за циљ да се провери и предложи репаратурно или производно наваривање, која ће омогућити, да се израде радни делови захтеваног квалитета. Међутим, за предлагање оптималне технологије репаратуре оштећених радних делова, ово није довољно, већ је неопходно било истражити и техно-економске ефекте примењеног поступка, односно технологије. Тек на основу ове провере стварају се услови за верификацију и усвајање оптималне технологије репаратуре, односно модела репаратуре за конкретан случај. Сличан је поступак при усвајању општег модела репаратуре групе сличних радних делова, или различитих радних делова који раде у сличним радним условима при експлоатацији. Једино на овај начин могу се моделирати процеси репаратуре који дају позитивне техно-економске ефекте.

На основу свега наведеног може се доћи до следећих закључака:

- Готово сви оштећени радни делови грађевинске механизације могу се репарирати заваривањем или наваривањем;
- Из техно-економског аспекта оправдано је репарирати више од седамдесет процената од укупног броја оштећених радних делова;
- Позитивни техно-економски ефекти се постижу и при репаратури мањих радних делова чија набавка не изискује велике трошкове;

- Репаратуру радних делова грађевинске механизације великог габарита и сложеног облика увек треба изводити, иако нема одмах директних уштеда, јер се позитивни економски ефекти исказују у току експлоатације;
- Радне делове грађевинске механизације, који су тзв. „уско грло“ у процесу производње, треба увек репарирати, јер се тако избегавају велики трошкови због прекида рада;
- Применом оптималне технологије репаратуре могуће је успешно обновити и хаваријски оштећене радне делове грађевинске механизације;
- У великом броју случајева, примењена технологија репаратуре оштећених делова даје боље техно-економске ефекте од замене оштећених делова новим резервним деловима;
- Репаратуру радних делова грађевинске механизације треба извести на време, тј. док не дође до великог губитка материјала услед хабања;
- Бољи техно-економски ефекти се постижу при организованој репаратури већег броја оштећених радних делова грађевинске механизације због смањења припремно-завршних радова;
- Различити методи заваривања и наваривања показали су се успешнијим од других методе репаратуре;
- Заваривањем и наваривањем могуће је извести више пута репаратуру једних те истих делова што додатно повећава економске ефекте;
- Заваривачке технологије често омогућавају репаратуру оштећених делова без демонтаже на терену, што је изузетно важно када је реч о грађевинској механизацији, чиме се постижу додатни економски ефекти.

У литератури [22,97,194] на конкретним примерима заваривања и наваривања, при репаратури оштећених делова грађевинске механизације и других техничких система, приказани су техно-економски ефекти и предности њихове примене. У неким нашим радовима [26,27,71], детаљно су дате технологије извођења успешне репаратуре оштећених делова различитих техничких система, и детаљна техно-економска анализа коришћењем већег броја признатих економских метода. У овом раду је коришћена само метода економичности, а добијени резултати су довољно поуздани за доношење одлуке о оправданости репаратурног заваривања и наваривања при обнављању оштећених радних делова грађевинске механизације, јер је техно-економска анализа изведена тек после успешно изведене репаратуре. При примени ове методе изузетно је битно да се што тачније одреде улазни параметри неопходни за економска израчунавања, што је овде учињено, јер су коришћени актуелни подаци из документације која се практично примењује.

Данас се у развијеним земљама придаје велики значај смањењу трошкова при изради и одржавања техничких система. Изводе се озбиљне студије и анализе узрока сваког застоја при производњи или пружању услуга. Неке детаљне анализе указују да би цена аутомобила, када би се склапао од резервних делова, била већа два до три пута од цене новог аутомобила у продаји. Трошкови набавке и складиштења нових резервних делова износе више од тридесет процената њихове набавне цене за период од једне године, на шта одлази око десет процената од годишњег профита, због смањења обртних новчаних средстава, која би могла корисније да се употребе. Ово су само неки примери који могу дати одговор на питање, да ли набавити нове резервне делове, или репарирати похабане већ коришћене делове. Такође, се репаратуром оштећених делова, поред директних уштеда могу остварити и индиректне уштеде. Колики значај се придаје овој проблематици најбоље говоре подаци дати у литератури [194], где се применом репаратурног наваривања и заваривања великог броја оштећених делова различитих техничких система, у свим привредним гранама могу уштедети значајна новчана средства, која се у овој економској кризи могу много боље употребити на решавању многих других проблема.

10. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Теоријским и експерименталним истраживањима, приказаним у овом раду, створени су услови за успешно моделирање репаратурног или производног наваривања радних површина делова грађевинске механизације, а слични методи се могу применити за моделирање репаратурног или производног наваривања различитих делова других техничких система. Све већа примена савремених технологија наваривања и метализације захтева извођење бројних сложених теоријских и експерименталних истраживања из више различитих научних области, како би се дошло до нових сазнања неопходних за решавање изузетно сложених техничко-технолошких проблема, које треба решити пре примене ових савремених технологија. Овај рад је пре свега имао за циљ да се уоче, дефинишу и предложи решења главних проблема, који прате процес наваривања. Укратко су наведене и анализе економских ефеката, како би се сагледала укупна техно-економска оправданост репаратурног или производног наваривања, уместо куповине нових резервних делова грађевинских машина.

Теоријски део овог рада обухвата општа, а где је било неопходно и детаљна објашњења појединих појава које прате процес наваривања. Општа објашњења су била потребна да би се разумела суштина процеса наваривања, а детаљна објашњења појединих пратећих појава и феномена су послужила за боље разумевање физичко-хемијских промена материјала при наваривању, као и боље разумевање при анализи резултата експерименталних истраживања.

Значај теоријског дела овог рада огледа се у следећем:

- Приказан је преглед сазнања из више научних области неопходних за разумевање ове проблематике и преглед најновијих сазнања из ове области;
- Детаљно су описане физичко-хемијске појаве и основни узрочници који доводе до оштећења појединих делова техничких система;
- Систематизовано су приказани поступци наваривања и термичке метализације, њихова примена при формирању металних превлака, као и предности и недостаци појединих метода наваривања;
- Објашњено је комплексно својство заварљивости и кртости различитих врста челика, начини одређивања заварљивости појединих врста челика, појаве заосталих напона, појава разних врста прелина и мере да се њихово настајање спречи;
- Објашњен је поступак правилног избора додатних материјала за наваривање из аспекта њихове отпорности на поједине врсте хабања, поједине врсте корозије и појаву кртог лома, као и утицај различитих врста карбида на својства челика;
- Приказано је рачунско и аналитичко одређивање температурског циклуса и температурских поља при наваривању;
- Објашњене су фазне промене у чврстом стању при наваривању челика, дати и објашњени трансформациони дијаграми за неке челике, указано на значај њиховог познавања и њихове практичне примене за оцену заварљивости;
- Указано је на значај примене претходне, текуће и накнадне термичке обраде при наваривању челика, а посебно њен утицај на побољшање жилавости навара од легираних челика да би се избегла појава отпусне кртости;
- Описана је појава прелазног и заосталог напонско-деформацијског стања при наваривању, описан математички модел за њихово одређивање и дате препоруке да се сопствени напони сведу на најмању могућу меру;
- Поред рачунских метода, описане су неке експерименталне методе и практичне пробе, које су коришћене за експериментална истраживања у овом раду.

Овде разматрани теоријски основи из термодинамике, физичке хемије и металургије заваривања, послужили су за боље разумевање формирања навара и пратећих појава при наваривању. Као допуна за боље разумевање теоријских основа извођена су и нека експериментална испитивања. Поред разјашњења неких феномена, који неизоставно прате процес наваривања, значај теоријског дела овог рада је што обухвата и нека најновија сазнања из ове области, која још нису публикована у нашој стручној и научној литератури.

Детаљно су разматрани триболошки процеси на радним деловима грађевинске механизације као једног од елемената трибо-техничког система при обради, транспорту и уградњи грађевинског материјала. Стенски материјали, радни делови грађевинске механизације који су у директном контакту и околна средина у којој се остварује међусобни контакт, јесу елементи трибо-техничких система. Зато је било неопходно експериментална истраживања извести на реалним узорцима радних делова грађевинске механизације који су у контакту са различитим стенским материјалима. Експериментално одређивање и провера, физичко-механичких својстава, неких стенских материјала послужили су за правилан избор додатних материјала, при репаратурном или производном наваривању радних делова, а исто тако и за проверу да ли су основни материјали правилно изабрани. Својстава стенских материјала испитивана су на узорцима четири врсте стена које се најчешће користе се за грађевинске радове на путевима.

На основу добијених резултата експерименталних испитивања стенских материјала дошло се до више корисних закључака:

- Код стенских материјала који имају технички значај, петрографска својства (минерални састав, структура, текстура) готово увек имају пресудан утицај на њихова физичка, механичка и технолошка својства;
- Познавање запреминске масе стена је веома важно при пројектовању и изградњи грађевинских објеката, али исто тако и при експлоатацији грађевинске механизације, нарочито при утовару, транспорту и истовару ових материјала, а према резултатима испитивања запреминске масе ових стена, оне се сврставају у групу масивних стена;
- Порозност стена је једно од најважнијих својстава, јер директно утиче на њихова физичка, механичка и технолошка својства, а према резултатима испитивања порозности ових стена, оне припадају слабо или умерено порозним стенама;
- На основу тврдоће и петролошко-минеролошке анализе ове стене се сврставају у групу стена средње или велике тврдоће;
- Одређивањем модула еластичности код узорака од органогеног кречњака, потврђено је да је модул еластичности највећи у правцу управном на правац слојевитости, односно нехомогености, а вредност параметара еластичности је у оквирним границама за стенске материјале, с тим што су нешто веће од уобичајених вредности;
- На ударну жилавост стена највише утиче њихова структура, а знатно и порозност као и свежина минерала, а код већине стена ударна жилавост је много мања од њихове јачине на притисак;
- Јачина стена на различите врсте, оптерећења је од изузетног значаја за њихову примену, а директно утиче на технолошка својства, што је значајно при њиховој обради;
- Код готово свих врста стена влажност смањује њихову јачину, а однос јачине на притисак водом засићених узорака и узорака суве стене изражава се тзв. *коэффицијентом омекшања*, који је најчешће мањи од један, па су за техничку употребу најповољније стене код којих је овај коефицијент од 0,6-0,9, док се стене са коефицијентом мањим од 0,6 не препоручују;
- Одређивањем запреминске масе и испитивањем јачине на притисак узорака стена од органогеног кречњака, дошло се до закључка да оне имају довољно велику јачину на притисак, која незнатно опада код водом засићених узорака и после дејства ниских температура, односно после двадесет и пет циклуса замрзавања и одмрзавања;
- Параметри јачине стена на смицање су кохезиона јачина и угао унутрашњег трења, који у великој мери зависе од влажности, што посебно важи за угао унутрашњег трења;
- На основу резултата испитивања јачине на затезање, јачине на савијање и јачине на смицање, може се закључити да овде испитиване стене углавном припадају групи стена средње јачине;
- Анализом бројних резултата експерименталних испитивања јачина на различите врсте оптерећења код великог броја стенских материјала, произлази да је јачина на притисак најчешће двадесет до четрдесет пута већа од јачине на затезање, двадесет до тридесет пута већа од јачине

на увијање и смицање, и десет до двадесет пута већа од јачине на савијање, што је потврђено и нашим испитивања;

- Резултати испитивања отпорности на хабање, по методи Бомеа и Лос Ангелес методи показују, да узорци кречњака имају средњу или добру отпорност на хабање, а узорци андезита изузетно добру отпорност на хабање, па се из тог разлога андезит најчешће употребљава за завршни хабајући слој асфалтираних саобраћајница;

- Познавање физичких, механичких и технолошких својстава стенских материјала је изузетно важно да би се, при изради нових или репаратури оштећених радних делова грађевинске механизације, правилно изабрали материјали који би истовремено требало да поседују отпорност на хабање и корозију, као и добру жилавост да не би дошло до појаве кртог лома.

Како би се камен успешно обрадио, транспортовао и уградио у путеве, неопходно је да радни делови грађевинске механизације, који су у току експлоатације у директном контакту са различитим врстама камена буду израђени од одговарајућих специјалних челика или ливених гвожђа. Такође, при производном или репаратурном наваривању радних делова неопходно је користити додатне материјале посебне намене, који могу да обезбеде потребну тврдоћу и жилавост наварених спојева, да не би дошло до њиховог изненадног лома услед повремених или сталних ударних оптерећења различитог интензитета.

Највећи део овог рада односи се на истраживање проблематике репаратурног или производног наваривања радних делова грађевинске механизације, који су при експлоатацији у директном контакту са различитим материјалима, а најчешће са стенским материјалима. Ови делови су при експлоатацији најчешће истовремено изложени хабању, корозији и ударним оптерећењима различитог интензитета. Зато се за њихову израду углавном користе легирани челици и ливена гвожђа, који најчешће припадају групи условно заварљивих материјала, што додатно отежава њихову израду или репаратуру заваривањем и наваривањем. Зато свако производно или репаратурно наваривање представља уникатан посао и захтева избор одговарајуће технологије прилагођене сваком радном делу посебно. И поред тога, могуће је пројектовати оптималну технологију, односно моделирати општу процедуру процеса наваривања за групу радних делова израђених од материјала сличних својстава, који су изложени сличним радним условима у току експлоатације. Моделирање опште процедуре репаратурног или производног наваривања делова грађевинске механизације захтевало је извођење бројних експерименталних испитивања на физичким моделима у лабораторијским условима, и стварним деловима при реалним радним условима у току експлоатације.

За пројектовање оптималне технологије наваривања, тј. *моделирање процеса наваривања*, неопходна су комплексна и дуготрајна истраживања, због различитих сложених физичко-хемијских појава, које настају при топљењу и кристализацији легура у заваривачкој купки. Неке од тих појава су: дифузија хемијских елемената, металуршке реакције растопа основног и додатног материјала, појава прелазних и заосталих структурних и термичких напона, мешање основног и додатног материјала, структурне промене у појединим зонама навареног споја, грешке у материјалу навареног споја, разлика коефицијента ширења основног материјала и материјала навара и др.

При оптимизацији процеса репаратурног или производног наваривања полази се од својстава основног материјала, а затим следи избор одговарајућег метода наваривања и избор погодног додатног материјала у зависности од захтеваних својстава навара. Потом се бирају оптимални параметри наваривања као и претходна, текућа и накнадна термичка обрада. Најзад се прописује техника наношења навара и методе процесне и завршне контроле. Када је то неопходно предвиђа се и завршна машинска обрада.

Да би се установила веза између улазних параметара наваривања и излазних својстава навара, била су неопходна бројна пробна наваривања у лабораторијским условима са варирањем процесних параметара у одређеним границама, праћење утицаја енергетских параметара на количину унете топлоте у наваривани материјал и утицај унете топлоте на својства навареног споја. Критеријуми за оцену квалитета навара произлазе из захтеваних својстава наварених површина. Сва експериментална испитивања изведена су по плану (алгоритму), који јасно дефинише начин и редослед извођења појединих истраживања од улазних података (својстава

основних материјала и захтеваних својстава навара) до излазних података (оптималне технологије, односно модела репаратурног или производног наваривања).

Лабораторијска експериментална истраживања у овом раду су углавном изведена по следећем редоследу:

- Идентификација главних узрочника оштећења појединих радних делова грађевинске механизације;
- Одређивање хемијског састава, физичких и механичких својстава основног материјала оштећених делова;
- Оцена заварљивости основног материјала оштећених радних делова;
- Пројектовање полазне технологије наваривања;
- Израда физичких модела намењених за експериментална лабораторијска испитивања;
- Испитивање и контрола наварених модела применом одговарајуће мерно-регулационе технике према стандардним процедурама;
- Сређивање, анализа и обрада добијених резултата, као и верификовање лабораторијских испитивања.

Истраживања на физичким моделима су била неопходна да се дође до полазне, односно почетне технологије наваривања, која се даље може кориговати при наваривању радних делова. Коначна одлука о прихватању предложене технологије наваривања, доноси се тек после анализе резултата експерименталних истраживања на радним деловима у условима експлоатације, и потврде економске оправданости предложене технологије наваривања. Ово је једини исправан начин за верификовање предложене технологије. Најзад се усваја модел наваривања радних делова грађевинске механизације који корисно може послужити и при наваривању делова других техничких система.

После обимних експерименталних истраживања на физичким моделима у лабораторијским условима, и радним деловима грађевинске механизације у условима експлоатације, детаљном анализом добијених резултата дошло се до већег броја нових сазнања и значајних закључака, а неки од њих су:

- Могућа је оптимизација процеса наваривања, односно моделирања репаратурног или производног наваривања радних делова грађевинске механизације;
- Бољи квалитет наварених спојева се постиже коришћењем процесних параметра који дају мањи унос топлоте у основни материјал;
- На тврдоћу навара, поред примењене технологије наваривања и својстава додатног материјала, утичу и својства основног материјала, а тај утицај зависи од степена мешања;
- Мерењем тврдоће вишеслојних навара утврђено је да тврдоћа последњег слоја надмашује тврдоћу претходно нанетих слојева, код којих настаје спонтано отпуштање услед уноса топлоте при наношењу наредних слојева;
- При наваривању угљеничних челика са већим садржајем угљеника и легираних челика тврдоћа у зони утицаја топлоте је знатно већа него при наваривању нискоугљеничних челика;
- Температурски циклус при наваривању директно утиче на излазна својства навара;
- Утврђено је да радни делови грађевинске механизације, који долазе у директни контакт са грађевинским материјалима, у највећој мери су изложени процесима абразивног хабања затвореног и отвореног типа;
- На основу резултата триболошких испитивања, произлази да чак и делови грађевинске механизације израђени од специјалних легираних челика, немају бољу отпорност на поједине врсте хабања, него наварени радни делови;
- На конкретним примерима се показало да је интензитет абразивног хабања по затвореном моделу најмање три пута већи од интензитета абразивног хабања по отвореном моделу;
- Бољу отпорност на абразивно хабање по затвореном моделу показали су материјали аустенитне структуре са равномерно утиснутим карбидима у меку металну основу, него додатни материјали који дају наваре мартензитне структуре са утиснутим карбидима, а разлог за то треба тражити у већој јачини адхезионих веза карбида са аустенитном него са мартензитном основом;

- Бољу отпорност на абразивно хабање по отвореном моделу показали су додатни материјали који дају наваре велике тврдоће као и довољно добре жилавости;
- Наношење пластичног међуслоја од аустенитних додатних материјала показало је своју пуну оправданост, јер се поред побољшања заварљивости спајаних материјала, умањује степен мешање основног и додатног материјала, смањује ниво заосталих напона, умањује корозија на граници основног и додатног материјала, што додатно доприноси економској исплативости примене наваривања;
- Анализом добијених резултата, утврђена је техно-економска предност примене репаратурног или производног наваривања радних делова грађевинске механизације, уместо устаљене праксе замене оштећених радних делова новим деловима;
- На већем броју примера, показано је да квалитет наварених радних делова грађевинске механизације не заостаје за квалитетом ненаварених нових радних делова, што се огледа у нижој цени и дужем радном веку наварених него нових делова;
- Смањени су трошкови набавке и складиштења нових резервних делова, смањени застоји услед отказа и повећана је продуктивност рада грађевинске механизације;
- У неким случајевима пожељно је и извести наваривање са делимично нанетим наварима, чиме се постижу не само економски, већ и техничко-технолошки ефекти;
- На једним те истим оштећеним радним деловима грађевинске механизације, могуће је извести вишеструку репаратуру наваривањем, јер нема потребе да се набављају и складиште скупи резервни делови;
- Изузетно је битно да се репаратурно наваривање неког радног дела грађевинске механизације изведе на време, тј. када је губитак материјала услед триболошких процеса у дозвољеним границама, јер се само тада постижу позитивни економски ефекти;
- Репаратурно наваривање уникатних радних делова грађевинске механизације, а то су најчешће делови веће масе, оправдано је извести и када цена репаратуре надмашује цену набавке новог дела, јер се економски ефект накнадно постижу због брзог активирања грађевинске машине.

Иако наваривање радних делова грађевинске механизације није нимало једноставан посао, резултати ових истраживања дају нам за право да закључимо, да у великом броју случајева постоји потпуна оправданост за њихово репаратурно или производно наваривање. При анализи оправданости примене репаратурног или производног наваривања, није довољно узети у обзир само техничко-технолошке показатеље, већ и економске показатеље. Неопходно је да се пројектована технологија и економија паралелно анализирају као серија парцијалних оптимума. Стога, се при истраживању репаратурног или производног наваривања радних делова грађевинске механизације увек морају размотрити и економски ефекти.

Полазна подаци да се предложи репаратура уместо набавке нових радних делова су да квалитет репаратурних не заостаје за квалитетом нових делова, и да су трошкови репаратуре нижи од трошкова набавке. На овај начин се добија директна уштеда за најнеповољнији случај, а економисти познају различите методе за одређивање и индиректних користи. Само мерљиви техно-економски ефекти доступни јавности могу допринети да нове технологије, као што су технологије наношења металних превлака, нађу и своју практичну примену, што је један од циљева ових истраживања. Приказана истраживања у овом раду и нека друга истраживања, указују на то да више од седамдесет процената од свих радних делова грађевинске механизације има смисла репаратурно или производно наваривати. Показало се, да радни век репаратурно или производно наварених делова достиже или надмашује радни век нових ненаварених делова. Трошкови наваривања су мањи од трошкова набавке и складиштења нових резервних делова. Време застоја машина је знатно смањено, што умањује губитке у производњи и повећава продуктивност рада, а све то додатно повећава економске ефекте.

Основни циљ овог рада је био да се применом научно потврђених и предложених теоријско-експерименталних метода истражи техно-економска оправданост усвојеног репаратурног наваривања радних делова грађевинске механизације, уместо опште прихваћене и устаљене праксе набавке и замене оштећених делова новим деловима. Ако се прихвати обнављање оштећених радних делова репаратурним наваривањем уместо израде или набавке

нових, мора се детаљно проучити и прописати процедура наваривања, како би се постигли позитивни техно-економски ефекти.

У овом раду моделирање процеса репаратурног или производног наваривања изведено је на већем броју радних делова грађевинске механизације изложених различитим условима експлоатације, као и на сетовима радних делова који раде у сличним условима. Правовременом применом правилно пројектованих оптималних технологија наваривања смањиће се репаратурно наваривање наметнуто силом прилика, које тада по правилу даје лоше резултате. После добијених и анализираних резултата истраживања у овом раду може се закључити да се позитивни ефекти наваривања могу остварити само када се овој проблематици благовремени приступи систематски и студиозно, како при пројектовању тако и извођењу процеса наваривања, а сваки другачији приступ сигурно доноси више штете него користи.

Ова теоријско-експериментална истраживања несумњиво ће допринети бољем одржавању грађевинске механизације, као и проширењу већ постојећих сазнања о наваривању, које је за разлику од заваривања, остало још недовољно истражено. Примени савремених технологија доношења металних превлака, методама метализације и наваривања, у привредно развијеним земљама придаје се посебна пажња. Значај ових истраживања огледа се и у томе, што су неки од ових резултата већ нашли практичну примену, и објављени у домаћим и страним научно-стручним публикацијама.

Обимним теоријско-експерименталним истраживањима при изради овог рада дошло се до тога да су:

- Идентификоване и систематизоване најчешће врсте оштећења радних делова грађевинске механизације;
- Одређена механичка и физичко-хемијских својстава неких основних материјала, и створена база података;
- Дефинисани узроци негативних појава при наваривању и одређене одговарајуће превентивне мере за отклањање или смањење тих појава;
- Процењени неповољни ефекти прекомерног или недовољног уноса топлоте у основни материјал при извођењу репаратурног или производног наваривања;
- Успостављене везе између улазних процесних параметара наваривања и излазних својстава навареног споја;
- Објашњене предности коришења трансформационих дијаграма за оцену заварљивости челика, односно начин процене неких својстава новонасталих структура ZUT-а, као најосетљивије области навареног споја;
- Применом формуле јапанских аутора добијени најтачнији резултати при прорачуну времена хлађења - $t_{8/5}$ у критичној зони најмање стабилности аустенита, и да се њеним коришћењем могу избећи скупа и дуготрајна експериментална истраживања неопходна за добијање дијаграма температурских циклуса, односно времена $t_{8/5}$;
- Дефинисани најважнији критеријуми битни за оцену квалитета навареног споја, а тиме и за општу оцену о квалитету репарираних или производно навареног радног дела грађевинске механизације;
- Прописане процедуре за пројектовање оптималне технологије (моделирање) процеса наваривања карактеристичних радних делова грађевинске механизације, и прописане све фазе пројектовања и верификације оптималне технологије наваривања;
- Дате детаљне смернице за избор метода наваривања и правилан избор додатног материјала, за већи број радних делова грађевинске механизације;
- Дате детаљне смернице за правилан избор врсте термичке обраде и битних критеријума када је она неопходна као саставни део технологије репаратурног или производног наваривања;
- Формирани општи модели наваривања група (сетова) већег броја радних делова грађевинске механизације;
- Експериментална истраживања и добијени резултати при наваривању ових радних делова су довољно поуздани, па могу послужити за израду и проверу нумеричких програма намењених за репаратурно или производно наваривање;

- Формирана база података и усвојени модели наваривања, нису корисни само при пројектовању технологија репаратурног и производног наваривања делова грађевинске механизације, већ и делова других техничких система;
- Утврђени парцијални показатељи позитивних економских ефеката репаратурног или производног наваривања;
- Производна наваривања, са одликама иновационе делатности, од вишеструког значај и за макроекономски развој;
- Резултати техно-економске анализе показали да репаратурно или производно наваривање има пуно оправдање, будући да показују значајне техно-економске предности у односу на досадашњи уобичајен приступ замене оштећених делова новим резервним деловима;
- Правилним пројектовањем и извођењем репаратурног наваривања (моделирањем процеса репаратуре) обезбеђени услови за дужи рад без већих застоја машина, уз пораст поузданости и продуктивности, што директно утиче на смањење трошкова при експлоатацији и одржавању, чиме се директно утиче на ефикасност функције одржавања.

Ова преобимна истраживања су била неопходна да би се дошло до: јединствене методологије репаратурног или производног наваривања различитих делова грађевинске механизације, побољшања већ постојећих технологија, правилног избора и провере квалитета препоручених основних и додатних материјала, уочавања и елиминисања неких негативних појава које увек прате процес наваривања, скраћивања времена застоја услед отказа, подизања степена поузданости и продуктивности, бољих економских ефеката при одржавању машина за време експлоатације и сагледавања могућности примене наваривања при изradi или репаратури других техничких система.

После обимних експерименталних истраживања процеса наваривања на моделима и радним деловима грађевинске механизације, може се закључити, да се дошло до значајних оригиналних резултата и техничких решења, која се могу применити не само на путарским машинама, већ и на техничким системима који раде у другим условима, уз поштовање неких специфичности. Међутим, да би репаратурно наваривање оштећених делова техничких система било успешно, мора се прописати и поштовати прецизна процедура (модел репаратуре), јер само тада се могу очекивати позитивни техно-економски ефекти. Да би се то постигло неопходно је да се овом проблематиком баве стручњаци техничке и економске струке, којима је ово главно, а никако не успутно занимање. Такође, неопходне су и специјализоване радионице са заваривачким уређајима, квалитетним материјалима и пратећом опремом. Сваки други приступ овој проблематици, неће довести до жељених позитивних техно-економских ефеката, већ може само створити додатне проблеме и непотребне трошкове који прате сваку импровизацију.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Adamiec, P., Dziubinski, J.:** *Influence of Mikrostructure and Properties of Hard - Faced Layers on their Wear*, 10th International Colloguium, Tribology – Solving Friction and Wear Problems, Vol. 3, 09. -11. January 1996., Technische Akademie Esslingen, pp. 1873 - 1883.
2. **Адамовић, Ж.:** *Техничка дијагностика у машинству*, Привредни преглед, Београд, 1986.
3. **Адамовић, О., Гајић, Б., Дрндаревић, С., Калезић, С., Рак, И.:** *Експерименталне вежбе из физике - II издање*, ИРО „Грађевинска књига“ Београд, 1986.
4. **Althouse, D. A., Carl, H. T., Bowditch, A. W., Bowditch, E. K.; Bowditch, A. M.:** *Modern welding*, Goodheart-Willcox Publisher, Tinley Park, Illionis, 2013.
5. **An American National Standard ANSI/AWS A5. 13 - 80R:** *Specification for Solid Surfacing - Welding Rods and Electrodes*, American Welding Society, October 30, 1989.
6. **An American National Standard ANSI/AWS A5. 21 - 80R:** *Specification for Solid Composite Surfacing - Welding Rods and Electrodes*, American Welding Society, October 30, 1989.
7. **Askeland D., R., Phule, P., P.:** *The science and engineering of materials*, Fifth edition, Thomson, U.S.A., 2008.
8. **Бабић, М.:** *Маšине за механичке операције*, YUTRIB, Крагујевац, 1994.
9. **Бајић, Б.:** *Електролучно заваривање у заштити инертног и активног гаса, MIG - MAG, технолошке и металуршке основе*, Горење - Варстрој, Лендава, 1982.
10. **Беатовић, Б., Кузмановић, С.:** *Истраживање настајања, утицаја, мерења и релаксације заосталих напона*, Механика лома заварених спојева - монографија, Београд, 1985., стр. 265 - 280.
11. **Beljski, E., I.:** *Stoikost kuznečenih štapov*, Izdatelstvo „ Nauka i tehnika“, Minsk. 1975.
12. **Veneš, V., Macek, K., Zilvar, V., Zuna, P.:** *Nauka o materijalu II*, Edični stredisko ČVUT, Praha 6, 1989.
13. **Берковић, М., Максимовић, С., Седмак, А.:** *Анализа заварених спојева применом методе коначних елемената*, Механика лома заварених спојева - монографија, Београд, 1985., стр. 111 - 127.
14. **Vlašковић, P., Balla, J., Dzimko, M.:** *Tribológia*, Vydavateľstvo ALFA, Bratislava, 1990.
15. **Vlažewski, S., Mikoszewski, J.:** *Pomiary twardosci metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1981.
16. **Божич, Б.:** *Физичка металургија*, Научна књига, Београд, 1964.
17. **Божич, Б.:** *Хемијска металургија гвожђа и челика*, Научна књига, Београд, 1967.
18. **Брдаревић, С.:** *Успешност одржавања*, ОМО, Београд, 1988.
19. **Брчић, В., Чукић, Р.:** *Експерименталне методе у пројектовању конструкција*, ИРО „Грађевинска књига“, Београд, 1989.
20. **Brozda, J., Pilarczyk, J., Zeman, M.:** *Sprawalnizce wukrewsy przemian austenity СТРС-S*, Wydawnictwo „Slask“, Katowice, 1983.
21. **Butnicki, S.:** *Sprawalność i kruchość stali*, WNT. Warszawa, 1979.
22. **Чукић, Р.:** *Техно-економска анализа производног и репаратурног заваривања и наваривања различитих делова техничких система*, докторска дисертација, Универзитет у Београду, Београд, 2010.
23. **Чукић, Р., Лазич, В., Јовановић, М., Мутавцић, М., Ракић, С.:** *Процена техно-економских ефеката остварених применом репаратурног и производног наваривања машинских делова*, СЕРБИЈА ТРИБ '07, Крагујевац, Зборник радова, стр. 289-296.
24. **Чукић, Р., Лазич, В., Јовановић, М., Мутавцић, М., Ракић, С.:** *Техно-економска оправданост репаратурног заваривања и наваривања различитих делова техничких система*, XII Научно-стручна конференције о железници са међународним учешћем - ЖЕЛКОН '06, Ниш, Зборник радова, стр. 325-328.
25. **Чукић, Р., Лазич, В., Јовановић, М., Мутавцић, М., Ратковић, Н.:** *Техно-економски ефекти примене пуњених жица при наваривању делова железничке опреме*, XIII Научно-стручна конференција са међународним учешћем, ЖЕЛКОН '08, Ниш, Зборник радова, стр. 323-326.

26. **Чукић, Р., Мутавцић, М., Лазић, В., Јовановић, М., Ратковић, Н.:** *Техно-економски ефекти репаратурног и производног наваривања делова грађевинске механизације*, "Заваривање 2006", 26-29.04.2006., Златибор, (рад усмено изложен на скупу-15 страница и објављен на CD-у).
27. **Чукић, Р., Мутавцић, М., Лазић, В., Јовановић, М., Ратковић, Н.:** *Техно-економска оправданост репаратурног и производног наваривања делова велике масе*, 32 Саветовање производног машинства Србије 2008. са међународним учешћем, 18-20 септембар 2008, Нови Сад, Зборник радова, стр. 225-229.
28. **Davies, A., C.:** *The science and practice of welding*, Cambridge university press, 1963.
29. **Dorazil, E.:** *Nauka o materialu (vybrane state)*, Edični stredisko ČVUT, Praha 6, 1988.
30. **Dzubinski, J., Klimpel, A.:** *Narawanie i natryskiwanie cieplne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.
31. **Ђорђевић, В., Брекић, М.:** *Материјали у машинству*, Инжењерско-технички приручник I - II издање, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 1992.
32. **Ђорђевић, В.:** *Машински материјали - први део*, Машински факултет Београд, 1999.
33. **Ђорђевић, Б., Валент, В., Шербановић, С.:** *Термодинамика и термотехника - друго допуњено издање*, ДИП „Грађевинска књига", Београд, 1990.
34. **Flinn, A., R., Trojjan, K., P.:** *Engineering Materials and Their applications*, 1995. by John Wiley & Sons, Inc.
35. **Fridman, J., B.:** *Mehaničeskie svojstva metalov*, Mašinstroenie, Moskva, 1974.
36. **Frolov, V., V., i dr.:** *Teoretičeskie osnovi svarki*, Izdatelstvo "Visšaja škola", Moskva, 1970.
37. **Фурунцић, В.:** *Основи теорије и технологије бетона*, Грађевинска књига, Београд, 1978.
38. **Gierzynska, M.:** *Tarcie zużycie i smarowanie w obrobce plastycznej metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1983.
39. **Глигорић, Б.:** *Теорија и техника мерења I*, Научна књига, Београд, 1984.
40. **Gösta, W.:** *Podstawy korozji i ochrony metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.
41. **Група аутора:** *Хемијски и физички подаци и величине*, ИРО „Рад", Београд, 1987.
42. **Група аутора:** *Encyklopedia techniki - Metalurgia*, Wydawnictwo „Slask", Katowice, 1978.
43. **Група аутора:** *Poradnik inżyniera - Spawalnictwo I*, WNT, Warszawa, 1983.
44. **Група аутора:** *Poradnik inżyniera - Spawalnictwo II*, WNT, Warszawa, 1983.
45. **Група аутора:** *Заваривање I, 2, 3, 4*, „Рад Београд", Београд, 1980.
46. **Guy, A., Hren, J.:** *Physical metallurgy*, Third Edition, Addison-wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts (1974) 367-399.
47. **Hillar, J., Jarmoszuk, S.:** *Pracownia techniczna - Spawalnictwo*, WSP, Warszawa, 1984.
48. **Horn, V.:** *Schweißtechnischer Gefügeatlas*, Verlag Technik, Berlin, 1974.
49. **Хривњак, И.:** *Заварљивост челика*, превод, Љ. Недељковић, ИРО „Грађевинска књига", Београд, 1982.
50. **Ito, Y., Bessyo, K.:** *Weld crackability formula of high strenght steels*, J. Iron and Steel Ins., Јар., No.13, 1972.
51. **Ивановић, Д., Вучић, В.:** *Атомска и нуклеарна физика - физика III*, Научна књига, Београд, 1970.
52. **Ивковић, Б., Рац, А.:** *Трибологија*, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995.
53. **Ивковић, Б.:** *Продуктивност у индустрији*, Међународна менаџерска академија, Нови Сад, 2006.
54. **Ивковић, С.:** *Откази елемената рударских машина*, Универзитет у Београду, Београд, 1997.
55. **Jakubiec, M., Lesinski, K., Czajkowski, H.:** *Technologia konstrukcji spawanych*, WNT, Warszawa, 1987.
56. **Јањић, М.:** *Инжењерска геологија са основама геологије*, Научна књига, Београд, 1982.
57. **Jasinski, J. et al:** *Ochrona przed korozja - poradnik*, Wydawnictwa Komunikacji i Łaczności, Warszawa, 1986.
58. **Jeffus, L.:** *Welding - Principles and Applications*, Sixth Edition, THOMSON, U.S.A., 2008.
59. **Јеремиић, Б.:** *Технологија одржавања техничких система*, Ескод, Крагујевац, 1992.

60. **Јосифовић, Д.:** *Испитивање машинских конструкција I*, Машински факултет, Крагујевац, 2000.
61. **Јовановић, М., Божовић, М., Стојановић, О.:** *Гасно и ручно електролучно заваривање*, Грађевинска књига, Београд, 1979.
62. **Јовановић, М.:** *Заваривање*, Научна књига, Београд, 1983.
63. **Јовановић, М., Адамовић, Д., Лазић, В.:** *Технологија заваривања - приручник*, Самостално ауторско издање, Крагујевац, 1996.
64. **Јовановић, М., Лазић, В., Адамовић, Д.:** *Практикум МАG заваривања*, СИМ центар, Крагујевац, 1997.
65. **Јовановић, М., Адамовић, Д., Лазић, В., Ратковић, Н.:** *Машински материјали*, Машински факултет, Крагујевац, 2003.
66. **Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Адамовић, Д., Мутавдџић, М.:** *Estimate of wear resistance of the hard-faced layers made by manganese electrode*, 11th International Scientific Conference 17-19.09.2003., University of Žilina, Slovak Republic, pp. 105-108.
67. **Јовановић, М., Лазић, В., Мутавцић, М., Ратковић, Н., Адамовић, Д.:** *Избор оптималне технологије репаратурног наваривања радних делова грађевинске механизације изложених интензивном абразивном хабању*, YUTRIB 05, Крагујевац, стр. 810-819.
68. **Јовановић, М., Лазић, В., Мутавцић, М., Адамовић, Д.:** *Избор оптималне технологије репаратуре зуба кашике*, Заваривање и заварене конструкције, Оригинални научни рад, година L, Vol. 50, No. 1-66, 2005., стр. 11-20.
69. **Јовановић, М., Лазић, В., Мутавцић, М., Недић, Б., Адамовић, Д.:** *Репаратурно заваривање ножева ротационог уређаја за равнање терена*, Заваривање 2006., 26-29.04.2006., Златибор, (рад од тринаест страница у целини презентован на скупу и објављен на CD-у).
70. **Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Адамовић, Д.:** *REL заваривање - приручник*, Универзитетски уџбеник, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
71. **Јовановић, М., Чукић, Р., Лазић, В., Мутавцић, М., Ратковић, Н.:** *Техно-економска анализа репаратурног заваривања и наваривања оштећених зуба зупчаника*, Производно машинство, 2006. Крагујевац, Зборник радова, стр. 217-224.
72. **Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Адамовић, Д.:** *TIG заваривање - приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
73. **Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Адамовић, Д.:** *Гасно заваривање - приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
74. **Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Адамовић, Д.:** *МАG/MIG заваривање - приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
75. **Јовановић, М., Мутавцић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Чукић, Р.:** *Триболошка испитивања наварених спојева радних делова грађевинске механизације*, SERBIATRIB 07, Крагујевац, Зборник радова, стр. 281-288.
76. **Јовановић, М., Лазић, В.:** *Практикум REL и МАG/MIG заваривања*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
77. **Јовановић, М., Лазић, В.:** *Практикум гасног (GPZ) и аргонског (TIG) заваривања*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
78. **Јовановић, М., Лазић, В., Адамовић, Д.:** *Технологија заваривања – приручник друго издање*, Самостално-ауторско издање, Крагујевац, 2011.
79. **Јовановић, М., Лазић, В., Недић, Б., Адамовић, Д., Мутавцић, М.:** *Производно наваривање лопатица мешалица асфалтних база*, “Заваривање 2006”, Златибор, (рад од седамнаест страна презентован на скупу и објављен на CD-у).
80. **Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Мутавцић, М.:** *Примена напредних технологија наваривања при репаратуру различитих делова машинских система*, Конференција одржавања “КОД-2007”, 27-30 Јун 2007., Тиват, Црна Гора, (рад од осам страница објављен на CD-у).
81. **Јовановић, М., Лазић, В., Николић, Р., Александровић, С., Крстић, Б., Мутавцић, М.:** *Теоријско-експериментално одређивање брзине хлађења при наваривању ковачких алата и утицај те брзине на корисне особине навариваних алата*,

26. Саветовање са међународним учешћем “ЗАВАРИВАЊЕ 2010”, Тара, (рад од једанаест страница објављен на CD-у под ред. бр. 54), Зборник резимеа радова, стр.81.
82. **Katalozi i prospekti proizvođača elektrodnog materijala: SŽ - Elektrode Jesenice d.o.o., Elektroda - Zagreb, Elvaco - Bijeljina, FEP - Plužine, Weldsteel - Wien, Böhler - Kapfenberg, Esab-Göteborg, Messer Griesheim - Frankfurt am Main, Lincoln Electric, ...**
83. **Каталог фирме Железарна Равне: Алатни челици за рад у врућем стању**, Равне на Короскем, Словенија.
84. **Katalog: Atlas zur Wärmebehandlung der stähle**, Verlag stahleisen M. B. H. Düsseldorf, 1961.
85. **Katalog firme Fortuna: Baustähle, Stahlwerke Südstfalen AG**, Düsseldorf, 1969.
86. **Katalog firme Fortuna: Stähle, Rost-und saurebestandige**, Düsseldorf, 1969.
87. **Кирић, М., Седмак, А., Ацијев, Т.: Одређивање температурских поља и заосталих напона у процесу заваривања методом коначних елемената**, Зборник радова - Међународно саветовање -Заваривање '94, Нови Сад, 1994., стр. 230 - 236.
88. **Kittel, Ch.: Uvod u fiziku čvrstog stanja**, Savremena administracija, Beograd, 1970.
89. **Кнежевић, Ј.: Управљање процесима одржавања и обнављања техничких система на основу теорије поузданости**, ОМО, Београд, 1988.
90. **Комарица, Н.: Нестационарно температурско поље и напони у еласто-пластичном подручју код тренутног деловања извора топлоте**, Међународно саветовање - Заваривање '94, Нови Сад, 1994, Зборник радова, стр. 211 - 214.
91. **Kuncipal, J.: Specialni tehnologije i svaravani**, Edični sredisko VŠSE, Plzen, 1988.
92. **Lakhtin, M.: Engineering physical metallurgy and heat-treatment**, Mir publishers, Moscow, 1979.
93. **Лазих, В.: Прилог прорачуну температурских поља при тачкастом заваривању**, Магистарска теза, Машински факултет, Крагујевац, 1991.
94. **Лазих, В., Јосифовић, Д., Јовановић, М.: Оцена тачности емпиријских израза за прорачун времена хлађења при заваривању**, Међународно саветовање - Заваривање '94, Нови Сад, 1994., Зборник радова, стр. 59 - 60.
95. **Лазих, В., Адамовић, Д., Јосифовић, Д., Јовановић, М.: Прилог дефинисању граничних прорачуна заваривања конструкционих челика повишене јачине**, Зборник Машинског факултета, Крагујевац, 1995., стр. 133 - 140.
96. **Lazić, V., Josifović, D., Jovanović, M.: Validity of some formulae for calculation of cooling time during welding**, Zavarivač, Originalni naučni rad, Vol. 40 (2), Beograd, 1995., pp. 89-94.
97. **Лазих, В.: Оптимизација процеса наваривања са аспекта триболошких карактеристика навара и заосталих напона**, докторска дисертација, Машински факултет, Крагујевац, 2001.
98. **Лазих, В., Јовановић, М., Ристовић, Ј., Недељковић, Б., Јосифовић, Д., Адамовић, Д.: Утицај термичке обраде после наваривања на радне карактеристике наварених ковачких алата**, Заваривање и заварене конструкције, Оригинални научни рад, 46(1-2), Београд, Југославија, 2001., стр. 5-11.
99. **Лазих, В., Јовановић, М., Ратковић, Н., Адамовић, Д., Вуловић, Р.: Процена отпорности на хабање наварених слојева изведених манганском електродом**, Трибологија у индустрији, Оригинални научни рад, год. XXII, бр. 3&4, 2002., стр. 10-17.
100. **Лазих, В., Јовановић, М., Адамовић, Д., Мугавцић, М.: Репаратурно наваривање алата за обраду земље изложених абразионом хабању**, Међународно саветовање - Заваривање '03, Београд, 2003. (рад од дванаест страница усмено изложен).
101. **Lazić, V., Jovanović, M., Adamović, D., Mutavdžić, M.: Influence of the carbide type on tribological properties of the hard-faced layer**, 8th International Tribology Conference, Beograd, 2003., Proceedings, pp. 111-121.
102. **Лазих, В., Јовановић, М., Ратковић, Н., Адамовић, Д.: Процена отпорности на смицање модела наварених ковачких алата**, Заваривање и заварене конструкције, Оригинални научни рад, година XLIX, 49(1), 2004., стр. 3-9.
103. **Лазих, В., Јовановић, М., Адамовић, Д., Ратковић, Н., Недељковић, Б.: Репаратурно наваривање оштећених зуба главчине ковачке пресе**, Одржавање у функцији заштите животне средине, "КОД 2005", Бар, (рад од осам страница објављен на CD-у и у Зборнику апстраката).

104. **Lazić, V., Jovanović, M., Adamović, D., Ratković, N.:** *Selection of the optimum technology of the forging dies reparation from the aspect of tribological characteristics*, TRIBOLOGIA – TEORIA I PRAKTIKA, ROK XXXVI, NR 2/2005 (200), pp. 11-31.
105. **Lazić, V., Jovanović, M., Adamović, D., Josifović, D., Ratković, N.:** *Development and application of welding technologies for regeneration of damaged working parts of forging presses and hammers*, Welding and Joining Technologies for a Sustainable Development and Environment, 2006., Timisoara, Romania, pp. 341-346.
106. **Лазих, В., Мутавчић, М., Јовановић, М., Адамовић, Д., Недић, Б.:** *Производно наваривање лопатица мешалица асфалтне базе*, “Заваривање 2006”, 26-29.04.2006., Златибор, (рад од седамнаест страница презентираан на скупу и објављен на CD-у).
107. **Лазих, В., Јовановић, М., Мутавчић, М., Ратковић, Н., Чукић, Р.:** *Избор најповољнијег додатног материјала за репаратурно и производно наваривање делова грађевинске механизације изложених јаком ударном абразивном хабању*, SERBIATRIB '07, Крагујевац, Зборник радова, стр. 273-280.
108. **Lazić, V., Živković, M., Nikolić, R., Jovanović, M.:** *Theoretical-experimental determining of cooling time ($t_{8/5}$) in hard facing of steels for forging dies. Part I: Determination of the cooling time ($t_{8/5}$) based on the theoretical temperature cycles and empirical expressions*, Materials Engineering Journal, Vol. IX, 2007, No. 1, pp. 18-22.
109. **Lazić, V., Živković, M., Nikolić, R., Jovanović, M.:** *Theoretical-experimental determining of cooling time ($t_{8/5}$) in hard facing of steels for forging dies. Part II: Experimental and numerical determination of the cooling time ($t_{8/5}$) in hard facing of steels for forging dies*, Materials Engineering Journal, Vol. IX, 2007, No. 4, pp. 1-7.
110. **Лазих, В., Јовановић, М., Ратковић, Н., Мутавчић, М.:** *Примена напредних технологија наваривања при репаратури различитих делова машинских система*, Конференција одржавања “КОД-2007”, 27-30 Јун 2007., Тиват, Црна Гора (рад од осам страница објављен на CD-у).
111. **Lazić, V., Jovanović, M., Milosavljević, D., Mutavdžić, M., Čukić, R.:** *Choosing of the most suitable technology of hard facing of mixer blades used in asphalt bases*, Tribology in Industry, Vol. 30, No. 1&2, 2008., pp. 3-10.
112. **Лазих, В.:** *Регенерација површина*, Монографија, Машински факултет у Крагујевцу, (у рукопису - на рецензији), Крагујевац, 2014.
113. **Лазих, В., Јовановић, М., Николић, Р., Александровић, С., Крстић, Б., Мутавчић, М.:** *Теоријско - експериментално одређивање брзине хлађења при наваривању ковачких алата и утицај те брзине на корисне особине навариваних алата*, 26 Саветовање са међународним учешћем ЗАВАРИВАЊЕ 2010, Тара, (рад од осам страница објављен на CD-у под ред. бр. 54), Зборник резимеа радова, стр. 81.
114. **Лазих, В., Мутавчић, М., Николић, Р., Александровић, С., Милосављевић, Д.:** *Теоријско-експериментална процена радног века наварених слојева изведених аустенитним манганским електродама*, XIV Научно-стручна конференција, ЖЕЛКОН 2010, Зборник радова, стр. 317-320.
115. **Lazić, V., Milosavljević, D., Aleksandrović, S., Marinković, P., Bogdanović, G., Nedeljković, B., Mutavdžić, M.:** *Tribological investigations of hard-faced layers and base materials of forging dies with different kinds of lubricants applied*, Tribology in Industry, Vol. 32, No. 4, 2010., pp. 36-44.
116. **Lazić, V., Mutavdžić, M., Milosavljević, D., Aleksandrović, S., Nedeljković, B., Marinković, P., Čukić, R.:** *Selection of the most appropriate technology of reparatory hard-facing of working parts on universal construction machinery*, SERBIATRIB 11, Kragujevac, Serbia, Proceedings, pp. 240-249.
117. **Lazić, V., Mutavdžić, M., Milosavljević, D., Aleksandrović, S., Nedeljković, B., Marinković, P., Čukić, R.:** *Selection of the most appropriate technology of reparatory hard-facing of working parts on universal construction machinery*, Tribology in Industry, Vol. 33, No. 1, 2011., pp. 18-27.
118. **Lazić V., Mutavdžić, M., Nikolić R., Aleksandrović S., Milosavljević, D., Krstić, B., Čukić, R.:** *Influence of various types of rock aggregates on selection of the working parts material in civil engineering*, 13th International conference on tribology, SERBIATRIB '2013, Kragujevac, pp. 275-280.

119. **Lazić, V., Sedmak, A., Nikolić R., Mutavdžić, M., Aleksandrović S., Krstić, B., Milosavljević, D.:** *Selection of the most appropriate welding technology for hardfacing of bucket teeth*, Materials and Tecnology, Vol. 49, No. 1, pp. 165-172, 2015.
120. **Leszek, A.:** *Metaloznawstwo i obrovka cieplna*, Wydawnictwa Szkolne i pedagogiczne, Warszawa, 1986.
121. **Лучић, Р.:** *Машински материјали*, Научно инжењерство - II издање, „Вук Караџић“, Параћин, 1995.
122. **Мајсторовић, А., Јовановић, М.:** *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1991.
123. **Мајсторовић, А., Ђукић, В.:** *Испитивање машинских материјала*, Научна књига, Београд, 1991.
124. **Марковић, С., Јосифовић, Д.:** *Регенерација зупчаника - монографија*, Југословенско друштво за трибологију, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1998.
125. **Metals Handbook: Heat treating, cleaning and finishing**, ASM, Vol. 2, Metals Park Ohio, U.S.A., 1964.
126. **Metals Handbook: Welding and brazing**, ASM, Vol. 6, Metals Park Ohio, U.S.A., 1971.
127. **Metals Handbook: Metallography, structures and phase diagrams**, ASM, Vol. 8, Metals Park Ohio, U.S.A., 1973.
128. **Милосављевић, М., Радојковић, М., Кузмановић, Б.:** *Основи челичних конструкција - седмо издање*, Грађевинска књига, Београд, 1986.
129. **Mistur, L.:** *Technologia sprajania i ciecia żeliwa*, WNT, Warszawa, 1976.
130. **Мурављов, М.:** *Основи технологије бетона*, Грађевинска књига, Београд, 1991.
131. **Мурављов, М.:** *Грађевински материјали*, Грађевинска књига, Београд, 2002.
132. **Мутавцић, М., Јовановић, М., Лазић, В., Ратковић, Н., Адамовић, Д.:** *Избор оптималне технологије репаратуре делова изложених хабању*, XI Научно-стручна конференција о железници са међународним учешћем - ЖЕЛКОН 04, Ниш, Зборник радова, стр. 277-282.
133. **Мутавцић, М., Лазић, В., Јовановић, М., Адамовић, Д., Ратковић, Н.:** *Утицај различитих врста стенских минерала на избор материјала радних делова грађевинске механизације*, YUTRIB 05, Крагујевац, стр. 820-833.
134. **Мутавцић, М., Лазић, В., Јовановић, М., Јосифовић, Д., Крстић, Б.:** *Избор оптималне технологије репаратурног наваривања ударних греда ротационих дробилица*, Заваривање 2006, 26-29, Златибор, (рад од осмнаест страница презентован на скупу и објављен на CD-у).
135. **Мутавцић, М., Лазић, В., Јовановић, М., Чукић, Р., Ракић, С.:** *Производно и репаратурно наваривање делова грађевинске механизације*, Производно машинство, 2006, Крагујевац, Зборник радова, стр. 225-234.
136. **Мутавцић, М., Јовановић, М., Лазић, В., Недић, Б., Ракић, С.:** *Моделска испитивања додатних материјала намењених регенерацији оштећених делова железничке опреме*, XII Научно-стручна конференција о железници са међународним учешћем – Желкон 06, Ниш, Зборник радова, стр. 321-324.
137. **Мутавцић, М., Лазић, В., Јовановић, М., Јосифовић, Д., Крстић, Б.:** *Избор оптималне технологије репаратурног наваривања ударних греда ротационих дробилица*, Заваривање и заварене конструкције, Оригинални научни рад, (2/2007), стр. 55-67.
138. **Мутавцић, М., Чукић, Р., Јовановић, М., Лазић, В., Ђорђевић, Д.:** *Моделска испитивања додатних материјала намењених регенерацији оштећених делова грађевинских машина*, 25. Саветовање са међународним учешћем ЗАВАРИВАЊЕ 2008, Суботица, (рад од тринаест страница усмено изложен и објављен на CD-у под ред. бр. 97), Зборник резимеа радова, стр. 130.
139. **Mutavdžić, M., Ćukić, R., Jovanović, M., Milosavljević, D., Lazić, V.:** *Model investigations of the filler materials for regeneration of the damaged parts of the construction mechanization*, Tribology in Industry, Vol. 30, No. 3 & 4, pp. 3-9.
140. **Mutavdžić, M., Lazić, V., Milosavljević, D., Aleksandrović, S., Nikolić, R., Ćukić, R., Bogdanović, G.:** *Determination of the optimal tempering temperature in hard facing of the forging dies*, Materials Engineering, Vol. 19, 2012., No. 3, pp. 95-103.

141. **Мутавчић, М.:** *Репаратурно наваривање делова машина и уређаја грађевинске механизације*, магистарска теза, Машински факултет, Крагујевац, 2007.
142. **Наерловић - Вељковић, Н.:** *Увод у термоеластичност*, Научна књига, Београд, 1977.
143. **Nedeljković, B., Babić, M., Mutavdžić, M., Ratković, N., Aleksandrović, S., Nikolić, R., Lazić, V.:** *Reparatory hard facing of the rotational device knives for terrain leveling*, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 16, No. 1, 2010, pp. 46-57.
144. **Nedeljković, B., Lazić, V., Aleksandrović, S., Krstić, B., Mutavdžić, M., Milosavljević, D., Đorđević, M.:** *Influence of the carbide type on tribological properties of the hard-faced layers*, Metalurgija-Journal of Metallurgy, Vol. 16, No.2, 2010, pp. 77-90.
145. **Lazić, V., Sedmak, A., Mutavdžić, M., Nedeljković, B. Nikolić, R., Aleksandrović, S., Nikolić, I.:** *Theoretical and experimental estimation of the working life of machine parts hard faced with austenite-manganese electrodes*, Materials and Technology, Vol. 46, No. 5, pp. 547-554, 2012.
146. **Nikolić, R., Veljković, J.:** *The two methods for dimensioning the pressure vessels*, Materials Engineering, Vol. 14, No. 4, pp. 8-12, 2007.
147. **Nikolić, R., Veljković, J.:** *Some Aspects o Limiting Design*, 11th International Scientific Conference, Žilina, 2003.
148. **Огњановић, М., Милтеновић, В.:** *Машински елементи - машински спојеви*, Грађевинска књига, Београд, 1983.
149. **Острић, Д.:** *Металне конструкције*, Машински факултет, Београд, 1988.
150. **Pałasz, J.:** *Poradnik sprawacza gazowego*, WNT, Warszawa, 1986.
151. **Палић, В.:** *Заваривање*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1989.
152. **Pasierb, R.:** *Spawanie żarowytrzymałych stali chromowo-molibdenowo-wanadowych*, WNT, Warszawa, 1982.
153. **Petrunin, I, Petrunin, E.:** *Spravočnik po pajke*, Машиностроение, Москва, 1984.
154. **Pierozek, B, Lassocinski, J.:** *Spawanie lukowe stali w oslonach gazowych*, WNT, Warszawa, 1985.
155. **Pilarczyk, J.:** *Metaloznawstwo spawalnicze*, WPW, Warszawa, 1977.
156. **Pilarczyk, J.:** *Spawanie i naprawianie elektryczne metali*, Wydawnictwo „Slask”, Katowice, 1979.
157. **Pollack, H.:** *Materials Science and Metallurgy 4th Edition*, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
158. **Procházka, J., Zahradník, M., Němec, M., Novotný, J.:** *Technologie slévání, tváření a svařování*, Ediční středisko ČVUT, Praha, 1989.
159. **Прокић-Цветковић, Р., Поповић, О.:** *Заваривање и сродни поступци*, Завод за уџбенике Београд, Београд, 2011.
160. **Prowans, S.:** *Materialoznawstwo*, Wydanie drugie, PWN, Warszawa - Poznan, 1980.
161. **Рац, А.:** *Трибологија - инжењерско машински приручник 1 (друго издање)*, Београд, 1992.
162. **Рац, А.:** *Трибологија*, Научна књига, Београд, 1991.
163. **Рак, И.:** *Склоност зоне утицаја топлоте ка појави прслина у току жарења ради отпуштања заосталих напона у завареним спојевима*, Механика лома заварених спојева - монографија, Београд, 1985. стр. 247 - 263.
164. **Радојевић, З.:** *Организација и економика заваривачких радова*, Друштво за унапређење заваривања у Србији, Београд, 2008.
165. **Reif, P.:** *Teplotni napeti*, Ediční středisko ČVUT, Praha I, 1982.
166. **Rikalín, N. N.:** *Rasčeti teplovih processov pri svarke*, М., Маšgiz, Москва, 1951.
167. **Сарван, М.:** *Технологија заваривања*, Машински факултет, Приштина, 1996.
168. **Schumann, H.:** *Metallographie*, превод на српски Н. Видојевић и др., Завод за издавање уџбеника СРС, Београд, 1965.
169. **Sedmak, A., Sedmak, S., Milović, Lj.:** *Pressure Equipment Integrity Assessment by Elastic-Plastic Fracture Mechanics Methods*, Monograph, Faculty of Technology and Metallurgy (Research and Development, Centre of printing Technology), Society for Structural Integrity and Life (DIVK), Belgrade, 2011.
170. **Седмак, А.:** *Нумеричка симулација процеса заваривања - I део: Температурна поља*, Заваривање и заварене конструкције, 41(1), 1996., стр. 5-12.

171. Седмак, А.: *Нумеричка симулација процеса заваривања - II део: Заостали напони, Заваривање и заварене конструкције*, 41(2), 1996., стр. 131-138.
172. Седмак, А. и др.: *Машински материјали - други део*, Машински факултет, Београд, 2000.
173. Седмак, С. (уредник): *Механика лома заварених спојева – монографија*, Београд, 1985.
174. Сеферијан, Д.: *Металургија заваривања*, Грађевинска књига, Београд, 1969.
175. Seyffarth, P., Kuscher, G.: *Schweiß - ZTU - Schaubilder*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1982.
176. Смиљанић, М., и др.: *Термичка обрада заварених спојева*, Друштво за унапређење заваривања у Србији, Београд, 1995.
177. Smith, D.: *Veštine i tehnologija zavarivanja*, New York 1984., превод др. Патко Лучић, Београд, 1994.
178. Smith, L., J., Keith, M., R., Stephens, W., S.: *Accounting Principles*, New York, Me Graw-Hill, 1989.
179. Smith, W., F.: *Principles of materials and engineering*, Copyright 1996, 1990, 1986, Graw-Hill, Inc.
180. Standardi: JUS, DIN, SRPS, UNI, GOST, ASTM, ANSI, EN, i dr.
181. Stolarski, A. T.: *Tribology in Machine Design*, London, First published 1990, reprinted 2000.
182. Сурутка, Ј.: *Основи електротехнике - трећи део (електромагнетизам)*, Београд, 1986.
183. Szustakowski, J.: *Poradnik sprawacza elektrycznego*, WNT, Warszawa, 1985.
184. Шел, Ј.: *Наука о топлоти - извод из предавања*, Машински факултет, Београд, 1973.
185. Шијачки - Жеравчић, В., Милосављевић, А., Седмак, А.: *Приручник за машинске материјале - заваривање, лемљење и ливење*, Машински факултет, Београд, 1996.
186. Шумарац, Д., Крајчиновић, Д.: *Основи механике лома*, Научна књига, Грађевински факултет, Београд, 1990.
187. Танасијевић, С.: *Основи трибологије машинских елемената*, Научна књига, Београд, 1989.
188. Терзић, П.: *Испитивање метала - део I, Механичка испитивања*, Београд, 1972.
189. Томић, Б.: *Основе електротехнике - I део*, Школска књига, Загреб, 1980.
190. Туфегчић, В.: *Грађевински материјали (познавање и испитивање) - IV издање*, Научна књига, Београд, 1979.
191. Видојевић, Н.: *Термичка обрада метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1973.
192. Вукадиновић, С.: *Теорија вероватноће са математичком статистиком*, Саобраћајни факултет, Београд, 1985.
193. Вукотић, Р.: *Испитивање конструкција - треће издање*, Грађевински факултет, Научна књига, Београд, 1989.
194. Waserman, R.: *Како се штеде милиони репаратурним заваривањем у машинском одржавању*, превод доц. др Бранислав Остојић, Бор, 2003.
195. Wernoski, A.: *Zmęczenie cieplne metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1985.
196. Wesolowski, K.: *Metaloznawstwo i obróbka cieplna z ćwiczeniami*, Wroclawskie Zakłady Graficzne, Wrocław, 1997.
197. Yang, J., H.: *K/Na-treated Fe-Cr-C hardfacing alloys with high-impact-abrasion resistance*, *Welding Journal*, 74(3), 1995., pp. 183-188.
198. Затукa, Н.: *Spawanie i nitowanie*, Wydawnictwa szkolne i pedagogiczne, Katowice, 1975.
199. Зеленовић, Д., Станивуковић, Д.: *Поузданост система*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1979.
200. Зеленовић, Д., Станивуковић, Д.: *Одржавање техничких система*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 1984.