



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Милан Ђорђевић, мастер. инж. маш.

**МОДЕЛ КЛИЗАЊА ИЗМЕЂУ РАВНИХ
ПОВРШИНА ОБОДА
ПРИ ПРОМЕНЉИВИМ КОНТАКТНИМ
УСЛОВИМА У ПРОЦЕСУ ДУБОКОГ
ИЗВЛАЧЕЊА ТАНКИХ ЛИМОВА**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Ментор: Др Србислав Александровић, ред. проф.

Крагујевац, јуни 2018. године

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА

<i>I Аутор</i>
Име и презиме: Милан Ђорђевић
Датум и место рођења: 25. 12. 1985. године, Алексинац, Р. Србија
Садашње запослење: Факултет техничких наука у Косовској Митровици Универзитета у Приштини, Р. Србија
<i>II Докторска дисертација</i>
Наслов: Модел клизања између равних површина обода при променљивим контактним условима у процесу дубоког извлачења танких лимова
Број страница: 178
Број слика: 206
Број библиографских података: 108
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац
Научна област (УДК): 621.983.3.01./09 Машинско инжењерство, Машинство, Пластично обликовање метала, Пресовање лимова и трака, Дубоко извлачење, основе, алати, методе итд.
Ментор: Др Србислав Александровић, ред. проф.
<i>III Оцена и одбрана</i>
Датум пријаве теме: 06. 03. 2015. године
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: 01-1/2092-11 од 18.06.2015. године и 01-1/2095-27 од 22.06.2017. године
Комисија за оцену подобности теме и кандидата: Др Милентије Стефановић, ред. проф., ФИН, Крагујевац Др Србислав Александровић, ред. проф., ФИН, Крагујевац Др Живко Бабић, ванр. проф., Машински факултет, Бања Лука Др Слободан Митровић, ванр. проф., ФИН, Крагујевац Др Вукић Лазих, ред. проф., ФИН, Крагујевац
Комисија за оцену писменог дела и одбрану докторске дисертације: Др Драгиша Вилотић, ред. проф., ФТН, Нови Сад Др Весна Мандић, ред. проф., ФИН, Крагујевац Др Слободан Митровић, ред. проф., ФИН, Крагујевац Др Вукић Лазих, ред. проф., ФИН, Крагујевац Др Нада Ратковић, доцент, ФИН, Крагујевац

ПРЕДГОВОР

Дубоко извлачење танких лимова спада у значајне технологије савремене индустрије. Томе, пре свега, доприноси интензиван развој аутомобилске индустрије. У примену улазе савремене врсте материјала са измењеним карактеристикама поред нискоугљеничног челичног лима, који је у великој мери сачувао свој значај и данас.

У циљу што успешније израде делова дубоким извлачењем чине се велики напори за потпуно овладавање и управљање обрадним процесом. У том смислу развијени су и реализовани различити системи управљања који у току процеса дубоког извлачења одржавају карактеристичне параметре у одређеним границама. На овај начин се тежи што бољем искоришћавању потенцијала деформабилности материјала у задатим обрадним условима (геометрија комада, алат, машина, триболошки услови).

Савремена технолошка проблематика дубоког извлачења делова сложене геометрије може се успешно експериментално изучавати путем физичког моделирања. Углавном је прихваћен приступ са пет физичких модела. Један од најзначајнијих модела је клизање између равних површина на ободу. Предмет рада ове докторске дисертације, заправо, је истраживање сложених међусобних утицаја у контакту лим-алат на моделу клизања између равних контактних површина. Физички модел контакта између равних површина заузима доминантан простор на ободу комада при дубоком извлачењу танких лимова. Пажња је усмерена ка остваривању нелинеарних зависности контактнoг притиска за време процеса. Истраживања су усмерена ка праћењу и процени ефеката утицаја сложених функција притиска у комбинацији са осталим факторима.

Дисертација је у основи замишљена као експериментално истраживање понашања лима на моделу клизања између равних површина у условима сложених променљивих утицаја за време процеса. Модел је реализован уз подршку оригиналне компјутерски управљане апаратуре, која омогућава остваривање унапред задатих промена параметара у току вучења, при чему је кључна мерена величина била зависност вучне силе од наведених параметара. Основна идеја је задавање сложених функција промене притиска у контакту за време процеса клизања и праћење промене вучне силе, коефицијента трења, стварног притиска у контакту, површинске храпавости лима и алата. Коришћени су челични и алуминијумски танки лимови намењени обради дубоким извлачењем, три врсте мазива и четири варијанте контактних елемената алата. Систематизација међусобних зависности поменутих утицаја даје допринос, с једне стране, разумевању понашања материјала у условима сложених променљивих утицаја на процес дубоког извлачења, а с друге, омогућава прикупљање значајних података употребљивих за управљање тим процесом.

На свестраној помоћи и подршци при изради рада дугујем трајну захвалност ментору овога рада, др Србиславу Александровићу, ред. проф. Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. На корисним сугестијама и подршци при изради рада, велику захвалност дугујем и др Милентију Стефановићу, редовном професору у пензији Факултета инжењерских наука у Крагујевцу. На помоћи при коначном обликовању овог рада, захвалност дугујем и др Вукићу Лазићу ред. проф. Факултета инжењерских наука у Крагујевцу. Експериментална истраживања реализована су у Лабораторији за обраду метала деформисањем и машинске материјале на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу.

На помоћи при реализацији и пуштању у рад експерименталне апаратуре нарочиту захвалност дугујем др Томиславу Вујиновићу дипл. маш. инж., доценту на Универзитету Апеирон у Бања Луци.

На пруженој помоћи при изради механичког дела уређаја посебно се захваљујем фирмама: „Metal sistemi Kragujevac D.O.O.” и “Elkotron рvt-ncobco Užice D.O.O.”. Трајну захвалност дугујем и својој породици која ми је помогла да истрајем у овом послу.

Крагујевац, јуни 2018. године

Аутор

SLIDING MODEL OF FLAT DIE TEST UNDER THE VARIABLE CONTACT CONDITIONS IN THE THIN SHEETS DEEP DRAWING PROCESS

Doctoral dissertation

ABSTRACT

The deep drawing technology has a significant place in the contemporary industry. Intensive development of the automotive industry contributes a lot to that fact. With development of the new materials of the poorer machinability and with increase of the technological requirements to the higher level, the necessity for complete control of the forming process is increasing as well. There are significant difficulties in realizing any action during the process duration. In present conditions, only two possibilities are at hand: the blank holding force of the variable intensity and drawing beads of the variable height. Both actions require complex control systems. Contemporary technological problems in deep drawing of parts of the complex geometry can be successfully studied experimentally by means of the physical modeling. The physical model of the contact between the flat surfaces has the dominant space at the flange during the deep drawing process of thin sheets. The emphasis is on realizing the nonlinear dependencies of the contact pressure during the process, as one of the possibilities for the process control. The forming process is usually realized in such a way that all the process parameters and conditions (the blank holding force, deformation rate, etc.) are being set prior to the sliding path of the machine. The concrete investigation shows what effects are realized due to the variable intensities of the blank holding force during the deep drawing process. In addition, it is important to define the functional dependencies of the blank holding force.

The basic idea is setting the variable pressure in the contact during the sliding process and monitoring the drawing force (the friction force), the friction coefficient, surface roughness of the thin sheet and the tool. Three different materials were applied, two types of lubricants and four versions of the tool's contact elements.

The conducted investigations were of the theoretically-experimental character with focus on the experimental part. In the first part of investigations, the theoretical analysis and critical considerations of existing results were conducted. Then followed forming of the nonlinear and linear functional dependencies of the simultaneous variation of the blank holding force (contact pressure) during the process, depending on the thin sheet sample's path. The specific feature of the test is realization of the nonlinear and linear functions of the contact pressure variation during the process. In the second part of the dissertation is presented the concept and realization of the complex measuring-controlling device. The original experimental tribological test was designed and realized, based on a physical model of the thin sheets strips sliding between the working surfaces, with the objective to enable realization of predefined functions of the contact pressure (the blank holding force). Based on that, the precise quantification of effects of the concrete influences (type of thin sheets, tool parameters and contact conditions) on the drawing force, friction coefficient and variation of the surface roughness of the thin sheet and the tool, was realized. Knowing the nature of the mentioned effects enables improvement of knowledge about different influences of the deep drawing process and provides the possibility for controlling that process.

Systematization of these results, besides the scientific has a significant practical value, especially in the area of the new technologies of the metal plastic forming, particularly in the deep drawing of thin metal sheets.

Key words: deep drawing, flat die test, thin sheet strip sliding, contact pressure, variable contact conditions, process control.

МОДЕЛ КЛИЗАЊА ИЗМЕЂУ РАВНИХ ПОВРШИНА ОБОДА ПРИ ПРОМЕНЉИВИМ КОНТАКТНИМ УСЛОВИМА У ПРОЦЕСУ ДУБОКОГ ИЗВЛАЧЕЊА ТАНКИХ ЛИМОВА

Докторска дисертација

РЕЗИМЕ

Технологија дубоког извлачења заузима значајно место у савременој индустрији. Интензиван развој аутомобилске индустрије томе веома доприноси. Развојем нових материјала лошије обрадивости и повећањем технолошких захтева на виши ниво, расте потреба за потпуним управљањем процесом обликовања. Постоје знатне тешкоће у остваривању било каквих дејстава док процес траје. У садашњим условима то су само две могућности: сила држања променљивог интензитета и затезна ребра променљиве висине. Оба дејства захтевају сложене управљачке системе. Савремена технолошка проблематика дубоког извлачења делова сложене геометрије може се успешно експериментално изучавати путем физичког моделирања. Физички модел контакта између равних површина заузима доминантан простор на ободу комада при дубоком извлачењу танких лимова. Једна од могућности управљања процесом је задавање нелинеарних зависности контактеног притиска за време његовог трајања. Процес обликовања се најчешће реализује тако што се сви параметри и услови процеса (сила држања, брзина деформисања, и др.) подешавају пре почетка радног хода машине. Конкретно истраживање показује какве ефекте остварују променљиви интензитети силе држања за време процеса дубоког извлачења. Такође, од битног значаја је и дефинисање функционалних зависности силе држања.

Основна идеја је задавање променљивог притиска у контакту за време процеса клизања и праћење промене вучне силе (силе трења), коефицијента трења, површинске храпавости лима и алата. Примењена су три различита материјала, две врсте мазива и четири варијанте контактних елемената алата.

Спроведена истраживања су теоријско-експерименталног карактера с тежиштем на експерименту. У првом делу истраживања изводи се теоријска анализа и критичко сагледавање досадашњих резултата. Затим следи формирање нелинеарних и линеарних функционалних зависности симултане промене силе држања (контактеног притиска) током процеса, зависно од хода узорка лима. Особеност теста је остваривање линеарних и нелинеарних функција промене контактеног притиска за време трајања процеса. У другом делу рада, излаже се концепција и реализација сложеног мерно-управљачког уређаја. Пројектован је и реализован оригинални експериментални триболошки тест заснован на физичком моделу клизања трака лима између равних површина, чији је циљ да омогући остваривање претходно дефинисаних функција контактеног притиска (силе држања). На основу тога извршено је прецизно квантификовање ефеката конкретних утицаја (врсте лима, параметара алата и контактних услова) на вучну силу, коефицијент трења и промене храпавости површина лима и алата. Познавање природе наведених ефеката омогућава унапређење знања о утицајима на ток процеса дубоког извлачења, и даје могућности за управљање тим процесом.

Систематизација ових резултата, поред научне, има и значајну практичну вредност у области нових технологија пластичног обликовања метала, посебно у области дубоког извлачења танких лимова.

Кључне речи: дубоко извлачење, клизање траке лима, равне контактне површине, контактни притисак, променљиви контактни услови, управљање процесом.

ПРЕГЛЕД ЗНАЧАЈНИЈИХ ОЗНАКА И СКРАЋЕНИЦА

Ознака	Опис
A, A ₈₀	површина држача, процентуално издужење
B	дужина држача
b	ширина траке, ширина ребра
BHF	сила држања која делује преко затезног ребра
C, C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄	константе материјала
CAE	Computer-Aided Engineering (компјутерски инжењеринг)
CIM	Computer Integrated Manufacturing (компјутерски интегрисана производња)
cl	зazor између ребра и матрице
CNC	Computer Numerical Control (нумеричко управљање рачунаром)
d	пречник извлакача, пречник комада
D, D ₀	пречник развијеног стања
D _{sr}	средњи пречник
DGD, ДГД	дијаграми граничне деформабилности
DVF	дигитализована вредност вучне силе
DVH	дигитализована вредност померања
DVP	дигитализована вредност притиска
E	модул еластичности
EDM	Electric Discharge Machining (обрада електро-ерозијом)
F ₁ , F ₂ , F ₃ , F ₄ , F ₅ , F ₆	силе савијања за одређене тачке
F _{c1} , F _{c2}	силе трења на равним деловима лима
F _D	сила држања
f _D	функција деформабилности
F _{IZ} , F, F _{izv}	сила извлачења
F _{коџ}	сила кочења
F _M	максимална сила извлачења
F _N	нормална сила, нормална сила на држачу, део силе држача којом се остварује притисак по равним површинама
F _{OB} , F _{OBL}	сила која повлачи обод, сила деформисања обода
F _R	сила притиска која делује са стране матрице
f _{ff}	фактор трења
F _S , F _{SAVIS}	силе савијања и исправљања
F _S ^M	сила савијања на ивици матрице
F _S ^R	сила савијања на затезном ребру
F _T '	сила трења на равном делу држача
F _{T1} , F _{T2}	силе трења између површина држача и лима
F _{TRD}	сила трења на држачу
F _e	еластична сила
g, G	масени износ хабања
G _u	гранични услови
h	висина, дубина извлачења, ход алата, висина ребра
h _M , h _m	највећа дубина при разарању
H _M	хемијски састав материјала
k	тачност A/D конверзије
K	деформациони отпор
k _s	смичући деформациони отпор

l, L	дужина клизања
l_0, l_M	мерне дужине узорка за затезање
l_1, l_2	дужине равног дела матрице
m	коэффициент извлачења, напонски коэффициент (однос напона)
N	број битова који одређује резолуцију конвертора
n	експонент деформационог ојачања
n'	корекциони експонент деформационог ојачања
p	појачање, притисак, специфични притисак, средњи специфични притисак
p_{HD}, p_{HS}	динамички притисак, хидростатички притисак
r, r_0, r_{90}	полупречник заобљења ивице ребра, радијус извлакача, коэффициент нормалне анизотропије
R	полупречник ребра
r, r_0, r_{90}	коэффициент нормалне анизотропије
R_a	средње аритметичко одступање профила
R_{eH}, R_P	граница течења, напон течења
R_m	затезна чврстоћа
r_p, r_M, R_s	радијуси извлакача и матрице
R_t	максимална висина неравнина профила храпавости
R_z	средња вредност 5 појединачних вредности R_t на дужини оцењивања
R_p	радијус кривине у меридионалном правцу
R_θ	радијус кривине у тангенцијалном правцу
S	потпуно суве површине
s	дебљина лима
S_M	структурно стање материјала
ТПО	технологија пластичног обликовања
t	температура, деформациони параметар, дебљина лима
T, T_0	температура, температура обраде
t^I и t^{II}	деформациони коэффициент за прву и другу фазу
ТС	триболошки систем
T_σ	напонско стање
U	мерни опсег сигнала
u	напон
$U, U1, U2$	ознаке за подмазивање уљем
$U+F$	ознака за подмазивање фолијом и уљем
v, v_r, v_1, v_2	брзина, релативна брзина клизања, брзине клипа цилиндра за померање ребра
W	ширина ребра
w	ширина траке лима
Z	контракција (сужење) попречног пресека
α	угао обухвата зоне контакта ребра и лима
$\beta, \beta_1, \beta_{gr}, \beta_{gr1}, \beta_{gr2}$	степен извлачења, гранични степен извлачења, напонски показатељ деформабилности
δ	померање
$\Delta\beta$	промена степена извлачења
θ	угао контакта заобљења матрице и лима
μ, μ_1, μ_2	коэффициент трења, коэффициент трења на контактним површинама
μ_D	коэффициент трења на држачу, средњи коэффициент трења
μ_M	коэффициент трења на заобљењу ивице матрице или на затезном ребру
σ_1, σ_2	главни напони у равни лима
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	главни напони
σ_{1a}, σ_{1b}	главни напони при затезању и сабијању, респективно
σ_e	ефективни напон, еквивалентни напон
σ_p	главни нормални напон у меридионалној равни
σ_θ	главни нормални напон у тангенцијалном правцу
τ	тангенцијални напон

φ	логаритамска деформација
φ_1, φ_2	главне деформације у равни лима
φ_3, φ_s	природне деформација дебљине
φ_b	природна деформација ширине
φ_e	еквивалентна деформација, ефективна логаритамска деформација
$\varphi_{ea}, \varphi_{eb}$	ефективна логаритамска деформације при затезању и сабијању
φ_i	главне деформације
φ_1^I	деформација на крају прве фазе
φ_M	природна деформација на почетку неравномерне деформације
$\dot{\varphi}$	брзина деформације

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. ДЕФОРМАБИЛНОСТ И ОБРАДИВОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА	4
2.1. Гранична деформабилност танких лимова	8
2.1.1. Гранична деформабилност у условима монотоног (пропорционалног) деформисања	8
2.1.2. Гранична деформабилност у условима немонотоног деформисања	10
2.2. Обрадивост лимова дубоким извлачењем	12
2.2.1. Методе одређивања обрадивости	13
2.2.2. Параметри обрадивости	13
3. ИЗУЧАВАЊА КОНТАКТНИХ ПРОБЛЕМА У ПРОЦЕСИМА ПЛАСТИЧНОГ ОБЛИКОВАЊА	15
3.1. Специфичности и улога трења у процесима пластичног обликовања	16
3.2. Основни закони трења и њихова примена у процесима пластичног обликовања	18
3.3. Технолошка мазива у технологији пластичног обликовања (ТПО)	20
3.3.1. Улога мазива у процесима пластичног обликовања	20
3.3.2. Класификација и карактеристике мазива која се примењују у ТПО	20
3.3.3. Узајамно деловање мазива са контактним површинама у ТПО	21
3.4. Триболошки параметри при дубоком извлачењу	23
3.4.1. Утицај силе држања на процес дубоког извлачења	25
3.5. Тврде превлаке на алатима	30
3.5.1. Поступци наношења антихабајућих превлака	31
3.5.2. Практични значај превлака	32
3.6. Антикорозивне превлаке на лиму	35
3.6.1. Галванске превлаке	36
3.6.2. Наношење заштитних превлака електрофорезом	37
3.6.3. Превлаке у виду чврстих мазива	38
3.6.4. Неорганске превлаке на лимовима	39
4. КАРАКТЕРИСТИЧНИ МОДЕЛИ КЛИЗАЊА НА ОБОДУ	43
4.1. Избор модела	45
5. ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА МОДЕЛА КЛИЗАЊА	47

5.1. Модел клизања између равних контактних површина	47
5.2. Модел клизања преко затезног ребра	50
5.2.1. Основни утицајни фактори	53
5.3. Модел клизања преко ивице матрице	54
5.3.1. Основни утицајни фактори	56
5.4. Модел двостраног затезања - развлачења	57
5.5. Модел чистог дубоког извлачења	58
5.6. Преглед резултата досадашњих истраживања	61
5.7. Значај променљивости параметара за управљање процесом	67
6. КОНЦЕПЦИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА	70
6.1. Планирање истраживања	70
6.2. Експериментална опрема и уређаји	73
6.2.1. Уређај за провлачење траке лима између равних контактних површина	76
6.2.1.1. Механичко-хидраулични модул	76
6.2.1.2. Хидраулични модул	78
6.2.1.3. Електро-управљачки модул	81
6.2.1.4. Кратак опис управљачког модула уређаја	83
6.2.1.5. Опис поступка рада	83
6.3. Карактеристике мазива	84
7. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА	86
7.1. Карактеристике лимова коришћених у експерименту	86
7.1.1. Основне карактеристике челичних лимова DC04 и DC04+ZE	87
7.1.2. Карактеристике лима од алуминијумске легуре AlMg4.5Mn0.7	89
7.2. Узорци лима и изменљиви контактни елементи	91
7.3. Теоријски дефинисане и експериментално остварене зависности притисака од времена	97
7.3.1. Експерименталне зависности притисака за челични лим без превлаке (DC04)	99
7.3.1.1. Зависности притисака од хода при сувим контактним површинама	100
7.3.1.2. Зависности притисака од хода применом уља за дубоко извлачење	100
7.3.1.3. Зависности притисака од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	102
7.3.2. Експерименталне зависности притисака за поцинковани челични лим (DC04+ZE)	104
7.3.2.1. Зависности притисака од хода при сувим контактним површинама	105
7.3.2.2. Зависности притисака од хода применом уља за дубоко извлачење	105
7.3.2.3. Зависности притисака од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	107
7.3.3. Експерименталне зависности притисака за лим од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)	108
7.3.3.1. Зависности притисака од хода при сувим контактним површинама	108
7.3.3.2. Зависности притисака од хода применом уља за дубоко извлачење	109
7.3.3.3. Зависности притисака од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	111
7.4. Дијаграмске зависности вучних сила од хода	113

7.4.1. Резултати за челични лим без превлаке (DC04)	113
7.4.1.1. Зависности вучних сила од хода при сувим контактним површинама	113
7.4.1.2. Зависности вучних сила од хода применом уља за дубоко извлачење	114
7.4.1.3. Зависности вучних сила од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	117
7.4.2. Резултати за поцинковани челични лим (DC04+ZE)	119
7.4.2.1. Зависности вучних сила од хода при сувим контактним површинама	120
7.4.2.2. Зависности вучних сила од хода применом уља за дубоко извлачење	120
7.4.2.3. Зависности вучних сила од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	123
7.4.3. Резултати за лим од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)	125
7.4.3.1. Зависности вучних сила од хода при сувим контактним површинама	125
7.4.3.2. Зависности вучних сила од хода применом уља за дубоко извлачење	127
7.4.3.3. Зависности вучних сила од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	129
7.5. Дијаграмске зависности коефицијената трења од хода	131
7.5.1. Резултати за челични лим без превлаке (DC04)	133
7.5.1.1. Зависности коефицијената трења од хода при сувим контактним површинама	134
7.5.1.2. Зависности коефицијената трења од хода применом уља за дубоко извлачење	135
7.5.1.3. Зависности коефицијената трења од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	138
7.5.2. Резултати за поцинковани челични лим (DC04+ZE)	140
7.5.2.1. Зависности коефицијената трења од хода при сувим контактним површинама	140
7.5.2.2. Зависности коефицијената трења од хода применом уља за дубоко извлачење	142
7.5.2.3. Зависности коефицијената трења од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	145
7.5.3. Резултати за лим од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)	148
7.5.3.1. Зависности коефицијената трења од хода при сувим контактним површинама	148
7.5.3.2. Зависности коефицијената трења од хода применом уља за дубоко извлачење	150
7.5.3.3. Зависности коефицијената трења од хода применом мазиве масти на бази MoS ₂	153
7.6. Параметри хrapавости и микрофотографије површина лима после провлачења	155
7.6.1. Површинска хrapавост за узорке од челичног лима (DC04)	156
7.6.2. Површинска хrapавост за узорке од поцинкованог челичног лима (DC04+ZE)	160
7.6.3. Површинска хrapавост за узорке лима од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)	162
8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	167
ЛИТЕРАТУРА	171

1. УВОД

Технологија пластичног обликовања (ТПО) заузима све значајније место у савременој индустријској производњи металних производа. Овакав тренд развоја условљен је економским и технолошким предностима које ова технологија у одређеним условима има у односу на друге. Обликовање лима дубоким извлачењем један је од поступака који је највише заступљен код ТПО.

Према подацима World Steel Association (Brussels, Belgium) и других међународних извора, процењена светска производња примарно прерађеног челика у 2003. години износила је 968 256 000 тона. Наредне, 2004. године износила је тада рекордних 1,005 милијарди тона, да би 2017. године достигла 1,6912 милијарди тона. Од тога у Кини, Јапану и Индији преко милијарду тона. Само у Кини производња примарно прерађеног челика у 2017. години износила је 831 700 000 тона, док у Европској унији приближно 169 000 000 тона.

Процењена производња свих врста челичних лимова (хладно ваљаних, топло ваљаних и превучених) на светском нивоу за 2016. годину износила је 146 800 000 тона. Приближно половина од тог броја односи се на производњу хладно ваљаних лимова, док је нерђајућих челичних лимова произведено 45 778 000 тона.

Укупна производња примарно прерађеног алуминијума за 2017. годину у свету, процењује се на 68 960 000 тона.

Аналитичари из ове области процењују да ће до краја прве половине 21. века, и поред често нереалних очекивања, нови неметални материјали заузимати мање од 50% кључних склопова на возилима (каросерија, мотор, мењач, огибљење итд.). Напротив, расте интересовање за примену нових генерација металних материјала, нарочито лимова. Различите су и широке области примене танких лимова. Пре свега, то је индустрија возила, нарочито путничких, чија светска годишња продукција за 2011. годину прелази 80 милиона. Следи индустрија авиона и других летилица, кућних уређаја итд.

Обликовање лима дубоким извлачењем дуги низ година представља предмет изучавања у светским научноистраживачким центрима [1] што је довело до значајних позитивних промена код овог поступка. Подигнут је (и стално се унапређује) ниво аутоматизације у фабрикама, па је традиционална улога човека у опслуживању обрадног система знатно умањена.

Крајем XX века почиње интензивно истраживање једног од кључних триболошких параметара процеса дубоког извлачења – силе држања, односно контактнoг притиска на држачу. До тог времена сила држања се углавном усвајала као константа, или је бирана на основу емпиријских препорука. Постала је предмет детаљних проучавања у циљу изналажења оптималних начина управљања и закона промене током процеса. Променљива сила држања (притисак држача у алату) доводи до променљивих контактних услова на држачу и сагледавање резултујућих ефеката постаје важан задатак. Поред бројних лабораторијских истраживачких уређаја, формирају се и читава истраживачка постројења [2, 3].

Због заступљености, а самим тим и важности обликовања лима дубоким извлачењем, учињени су велики напори да се оствари што потпуније управљање процесом. У том циљу реализовани су бројни компјутерски управљани системи, често веома велике сложености [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

И поред примене неметалних материјала и даље веома доминирају нове врсте челичних лимова и алуминијумских легура које се све више примењују, нарочито у аутомобилској индустрији.

Ову констатацију на најбољи начин потврђују подаци о годишњем порасту производње и потрошње челичних и алуминијумских материјала на глобалном нивоу (*International Iron and Steel Institute IISI, Brussels, Belgium* - [w1], [w2], [w3], [w4], [w5], [w6], [w7]).

Сви ови подаци говоре да је обликовање лима дубоким извлачењем у савременој индустрији металних делова од челика и алуминијумских легура (што је предмет изучавања и овог рада) доминантна. Истраживања и практична искуства показали су да се технолошка знања пластичног обликовања нискоугљеничног челика не могу подједнако примењивати код обликовања челика повишене јачине (готово у свим случајевима имају лошију обрадивост) и алуминијумских легура. Зато су потребна нова знања и искуства (због специфичних карактеристика тих материјала) често са потпуно новим приступом.

У циљу усавршавања и бољег управљања сложеним процесима пластичног обликовања, развио се читав низ техника нумеричке симулације, поткрепљених комерцијалним софтверима, у којима су

улазне величине механичке карактеристике, карактеристике пластичности лима и величине које могу да обухвате и опишу утицај трења (најчешће коефицијент трења). Међутим, резултати нумеричких симулација нису валидни ако нису проверени тј. доказани реалним процесом – експериментом. Из више разлога (оквирног плана, рационалности, економичности итд.) симулација обично претходи експерименту, тако да је неопходна сарадња свих истраживача на овим пољима.

У свим овим системима управљачка дејства изводе се само на два начина: преко трења на ободу и преко управљања клизањем лима на ободу. У првом случају кључни параметар представља сила држања, тј. специфични контактни притисак држача, а у другом висина утискујућих затезних ребара. То су једина два фактора којима је могуће управљати (мењати их по жељеним законима) симултано током процеса дубоког извлачења. Утицај променљиве силе држања је, поред осталог, предмет изучавања и у овом раду.

Код експерименталних истраживања дубоког извлачења (пре свега из триболошког аспекта) примењују се два приступа. Први је парцијално моделирање процеса тестовима трења где је резултат углавном коефицијент трења (најчешће његова промена тј. функција расподеле) при датим условима. Други приступ подразумева коришћење тестова дубоког извлачења где се комплетан процес детаљно прати на предметима једноставне геометрије (цилиндрични и призматични делови квадратног пресека).

Основни циљ процеса дубоког извлачења јесте добијање делова жељеног облика и димензија са што мање операција, без нежељених дефеката. У пракси се, релативно често, тај циљ остварује уз знатне потешкоће. Појава разарања у критичној зони и настајање набора на ободу уз површинска оштећења (трагови клизања, огреботине и тсл.) су три најважнија дефекта код овог процеса обликовања. Решавање површинских дефеката је углавном једноставније од спречавања набора и разарања. Сложено нехомогено и често неповољно напонско-деформационо поље основни је узрок појаве набора и разарања. Оно је сложеније уколико је сложенија геометрија комада. Различити утицаји на процес немају једнозначно дејство. На пример, трење у једној зони може деловати неповољно, а у другој повољно.

Оваква истраживања су сложена и могу обухватити:

- локалну зону,
- неколико локалних зона и
- комплетан комад.

При изучавању процеса на ободу и заобљењу матрице углавном се користи физичко моделирање карактеристичних зона (парцијални приступ), које се на одговарајући начин може прихватити и као основа за потпуно физичко моделирање [12, 13]. Затезна ребра која се постављају на ободу код извлачења сложених комада, у пракси имају значајну улогу и предмет су изучавања великог броја истраживача [14, 15].

Развој и примена сложених лабораторијских уређаја са компјутерским управљањем, довело је до битних промена у изучавању понашања лима на ободу при дубоком извлачењу. Поред сложених експерименталних истраживања, настављају се и теоријска, која се свде на дефинисање успешних математичких модела и зависности. Најчешће се одређују деформациона сила, коефицијент трења (или његова расподела), храпавост површина [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Исто тако, у широку употребу улазе све моћнији софтвери за нумеричке симулације, процеса обликовања, који омогућавају све боља предвиђања ефеката процеса пластичног обликовања на реалним материјалима [26, 27, 28, 29, 30, 31, 32].

Делови сложене геометрије добијају се извлачењем на пресама двоструког дејства, при чему је развијено стање лима, при постављању на матрицу, правилног геометријског облика или контура сложеног облика. Сложеност услова обраде и мноштво параметара релевантних за поступак извлачења, чине овај процес једним од најкомплекснијих у технологији пластичног обликовања лима. Изучавање односа на површинама држача и матрице (утицај облика површине, геометрије затезних ребара, специфичног притиска држача на силу трења) представља основу за управљање процесом, конструисање алата, концепцију и реализацију производних система [33, 34, 35, 36].

Овај рад је и наставак истраживања у области дубоког извлачења која се већ више година обављају на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (раније Машинског факултета у Крагујевцу) [нпр. 12, 13, 14, 15, 29, 33, 34, 37, 38]. Проширење базе научноистраживачких резултата (података) би требало да допуни знања и искуства у овој области којима ће се моћи унапредити управљање процесом обликовања.

Дисертација је у основи замишљена као експериментално истраживање понашања лима на моделу клизања између равних контактних површина у условима сложених променљивих утицаја за

време процеса дубоког извлачења. Основна идеја је задавање променљивог притиска у контакту током процеса клизања и праћење промене вучне силе, коефицијента трења, површинске храпавости лима и алата. Примењена су три различита материјала, две врсте мазива и четири варијанте контактних елемената алата. Систематизација међусобних зависности поменутих утицаја даје допринос, с једне стране, разумевању понашања материјала у условима сложених променљивих утицаја на процес дубоког извлачења, а с друге, омогућава прикупљање значајних података употребљивих за управљање тим процесом.

У ту сврху реализован је оригинални уређај који омогућава симултано задавање силе држања у току процеса према претходно дефинисаним зависностима, као и потпуно праћење параметара процеса, тј. величина које су регистроване и записане у облику дијаграмских зависности. Једноставном заменом основних елемената уређај омогућава реализацију различитих тестова клизања. Исто тако на овом уређају (овом и сличном методологијом) могу да се испитују тј. оцењују мазива која се користе при пластичном обликовању.

2. ДЕФОРМАБИЛНОСТ И ОБРАДИВОСТ ТАНКИХ ЛИМОВА

Деформабилност је веома важна област у теорији и пракси обликовања материјала пластичним деформисањем. У теорији се често користе термини деформабилност, пластичност и обрадивост. Сва три термина се, у суштини, односе на способност материјала да се пластично (трајно) обликује у датим условима. Посматрајући само значење речи, деформабилност представља најопштију способност материјала да се деформише, било еластичном било пластичном деформацијом, док пластичност представља способност материјала да се трајно (пластично) деформише. Обрадивост упућује на одређене технолошке поступке (нпр. дубоко извлачење, савијање, истискивање, ковање итд.) и представља способност материјала да се обликује управо у тим технолошким поступцима [39].

Комплексна проблематика деформабилности захтева сложен приступ, укључујући анализу свих фактора и сагледавање карактера њиховог утицаја, као и груписање фактора сродне природе утицаја. На основу тога је могуће поставити функцију деформабилности у имплицитном облику [40]:

$$f_D = f_D(H_M, S_M, \varphi, \dot{\varphi}, T_o, T_\sigma, G_u) \quad (2.1)$$

где је:

f_D - функција деформабилности која се квантитативно изражава величином деформације,

H_M - хемијски састав материјала,

S_M - структурно стање материјала,

φ - логаритамска деформација,

$\dot{\varphi}$ - брзина деформације,

T_o - температура обраде,

T_σ - напонско стање,

G_u - гранични услови.

Фактори H_M и S_M су фактори који зависе од материјала па се могу назвати **факторима материјала**. Остали фактори су најчешће условљени обрадним системом па се називају **факторима услова обраде**. На основу ове поделе утицајних фактора може се закључити да се функција деформабилности састоји из два дела, при чему један део феномена деформабилности зависи од материјала, због чега се у поједностављеним приступима назива сопствена деформабилност или пластичност материјала, а други део овог феномена се добија у зависности од услова обраде.

а) Фактори материјала

У факторе материјала спадају врста материјала, односно хемијски састав и стање материјала. Уопште, утицај хемијског састава и стања материјала на деформабилност, тј. пластичност веома је сложен. Због тога је о сваком конкретном материјалу тачну процену могуће дати тек после детаљног испитивања.

Пошто је реч о металним материјалима намењеним пластичном обликовању, с једне стране у употреби су разне врсте челика, а са друге обојени метали и њихове легуре. Разматрање деформабилности се обично подразумева при обликовању у хладном стању, с обзиром на то да је у топлотном стању пластичност знатно побољшана.

Познато је да обојени метали и легуре углавном имају повољнију деформабилност, односно пластичност у односу на челике. То је посебно изражено код поступака запреминског обликовања, нпр. хладно истискивање челика је веома отежано, а обојених метала знатно олакшано. Овакву констатацију треба прихватити условно, јер нпр. месингу нагло опада пластичност са порастом процента цинка изнад 30%. Тако и каросеријски лим од алуминијумске легуре из тзв. серије 5000; AlMg4,5Mn0,7 (EN AW – 5083), коришћен у експерименталном делу овог рада, има знатно слабију пластичност у односу на нискоугљенични челични лим.

Код челика се уопштено може рећи да пластичност опада са повећањем садржаја легирајућих

елемената. Нискоугљенични челични лим Š0148 (DC04 према европском стандарду EN 10027) има мали проценат угљеника (0,05% - 0,1%) и феритну структуру. Има веома добре особине пластичности и погодан је за дубоко извлачење делова сложене геометрије.

Легирани челици имају готово увек мању пластичност са повећањем садржаја легирајућих елемената. При пластичном обликовању, легирани челици се загревају на температуру изнад температуре рекристализације и обликују у топлом стању.

И поред сложености утицаја појединих елемената у хемијском саставу, треба напоменути неке од систематизованих утицаја на пластичност челика. Структура највеће пластичности код челика је аустенит. Легирајући елементи који утичу на проширење аустенитне области на дијаграмима стања називају се аустенитотворни или аустенитизатори. Са повећањем њиховог садржаја опада и температура рекристализације. У одговарајућим случајевима и у хладном стању присутна је аустенитна структура. Један од таквих челика је нерђајући челик CrNi1810 (EN 10027), који се веома често користи код лимова намењених за пластично обликовање. Главни елементи који проширују γ -област (аустенитотворни елементи) су: Ni, N, Mn, C и Cu. Супротно, постоје елементи који затварају аустенитну област и називају се феритизаторима или феритотворним елементима. У ту групу спадају: Cr, Mo, Si, Nb, V, W, Ti итд. При довољном садржају одговарајућег елемента овог типа, структура ће бити феритна на свим температурама по завршеном очвршћавању. Ферит настаје фазном променом при хлађењу аустенита, за разлику од δ -ферита који настаје из растопа. Утицај феритотворних елемената на пластичност је неповољан [41].

Код челика са већим садржајем угљеника и легирајућих елемената значајан утицај имају карбиди. Као тврде и крте фазе неповољно утичу на пластичност, а повећавају тврдоћу, крост, отпорност на хабање итд. Такви челици се ређе пластично обликују, а ако је то нужно, изводи се загревање на температурама изнад температуре рекристализације (обрада у топлом стању).

Највећу склоност ка формирању карбида има Ti, па следе V, Cr, Mn и тек онда Fe. То значи да челик легиран, са Cr и V уопште неће садржати карбиде гвожђа, већ хрома и ванадијума [41].

Ради повећања пластичности понекад се изводи тзв. сфероидизација, односно меко жарење, с циљем да се ламеле цементита (карбида гвожђа или другог елемента) преведу у ситније зрнасте, сфероидалне форме. Таква структура има бољу пластичност [40]. Уопштено, жарење је термичка обрада код челика којом се побољшавају својства пластичности. Већина челика се испоручује у жареном стању, али је често потребно за време даље пластичне прераде изводити међуоперационо жарење.

б) Фактори услова обраде:

Температура обраде има утицај на деформационо ојачање, аналогно утицају на деформабилност. При температурама вишим од температуре рекристализације ефекат ојачања је отклоњен, а интензитет деформационог отпора знатно смањен. Истовремено, деформабилност је веома побољшана.

Брзина деформисања показује значајан утицај на ојачање, а самим тим и на деформабилност. Посебно је то изражено при топлој обради и великим брзинама, када ефекат брзинског ојачања може да умањи деформабилност. Пошто су брзине код класичних процеса обликовања у хладном стању мале, практично нема битније промене деформабилности.

Напонско стање има веома велики утицај на деформабилност. Тај утицај се може објаснити деловањем напона на микроструктурне грешке у материјалу које резултира макро ефектима. Затежући напони повећавају грешке у структури, тако да се у критичном моменту структура разара, што резултира малим деформацијама тј. ниском деформабилности. Када преовладавају притисни напони долази до супротног ефекта односно до тзв. "лечења" микродефеката структуре. Резултат је дуже трајање процеса обликовања и достизање, често и вишеструко већих деформација у односу на случај доминације затезућих напона.

За илустрацију утицаја напонског стања на деформабилност, може да послужи поређење неких познатих процеса деформисања. Тако су на слици 2.1 [40] приказани поступци:

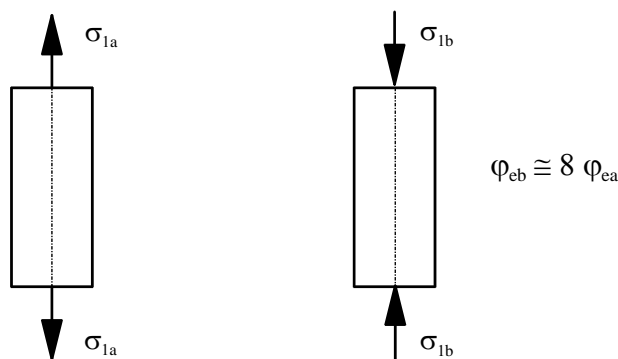
- аксијалног затезања, код кога важе услови: $\sigma_{1a} = \sigma_1 = \sigma_e$ и $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ и
- аксијалног сабијања, код кога важе услови: $-\sigma_{1b} = -\sigma_1 = \sigma_e$ и $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,

где су: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главни напони, а σ_e – ефективни напон,

при чему се индекс а односи на затезање, а индекс b на притискивање.

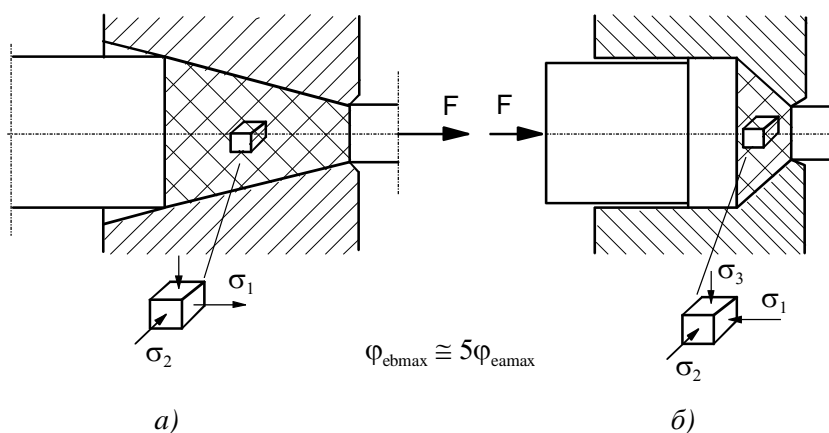
Ова два процеса, из механичког аспекта, разликују се само по томе што је у првом случају у питању једносно затезуће оптерећење, услед чега настају затезући напони у материјалу, а у

другом случају је у питању једноосно притискујуће оптерећење, због чега у материјалу настају притисни напони. Због различитог смера оптерећења настају и различити смерови напона. Ако су узорци у оба случаја израђени од истог материјала, треба уочити, какве последице, с обзиром на испољавање деформабилности, има промена смера оптерећења. Експерименталним истраживањима утврђено је да се код нискоугљеничних челика, код случаја сабијања, остварује око осам пута већа ефективна деформација него у првом случају затезања. То значи да исти материјал у условима аксијалног затезања испољава осам пута мању деформабилност него у условима аксијалног притиска.



Слика 2.1 Поређење процеса аксијалног затезања и сабијања

Други пример илустрације процеса деформисања из аспекта деформабилности материјала, шематски је приказан на слици 2.2. У питању су шеме процеса вучења и истискивања, у пракси често примењиваних поступака [40]: У приказу под а) дата је шема вучења, при чему је присутно троосно разнородно напонско стање, тј. један напон је затежући, а два су притискујућа. У приказу под б) дата је истискивање, код кога је присутно истородно троосно (просторно) притисно напонско стање.



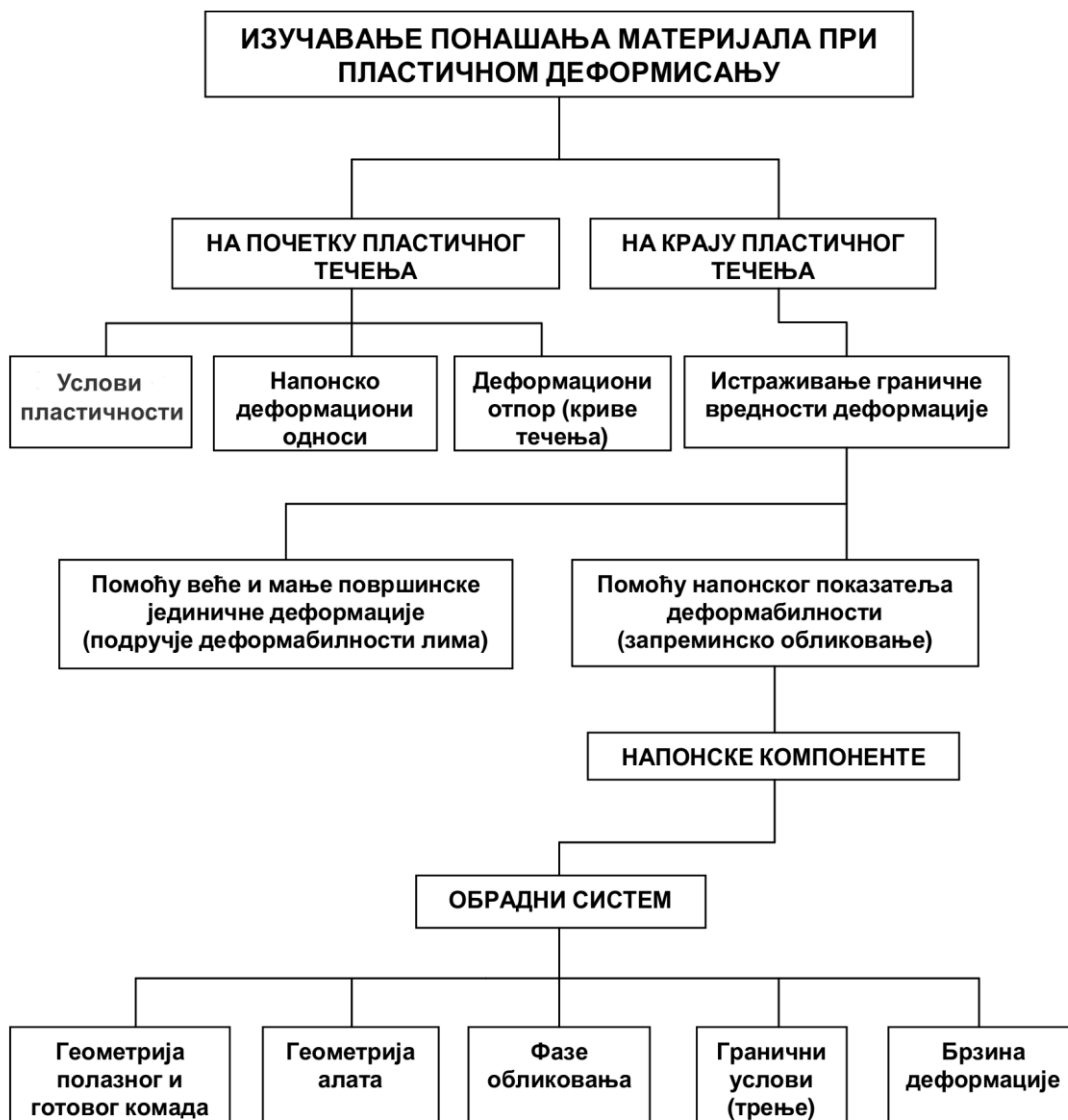
Слика 2.2 Упоредни приказ процеса вучења (а) и истискивања (б)

Механички и геометријски посматрано, наведена два процеса деформисања су веома слична. Ако се процеси анализирају са становишта дејства спољашњег оптерећења, односно деформационе силе, онда постоји разлика само у положају нападне тачке оптерећења. Код вучења она је са излазне стране алата, чиме у зони деформисања производи затежуће напоне, а због дејства матрице настају и притискујући напони. Код истискивања дејство оптерећења је са улазне стране алата, при чему се реализује притисно напонско стање у зони деформисања. Експериментално је утврђено да се за исти материјал при истискивању остварује приближно пет пута већа гранична деформација, него при вучењу $\varphi_{eb\max} = 5 \cdot \varphi_{ea\max}$ [40].

Из наведених примера произлази чињеница да напонско стање у зони деформисања има одлучујући утицај на понашање материјала у процесу пластичног обликовања у односу на испољавање деформабилности. Ова констатација се може објаснити тиме да врста напонског стања утиче на појаву микропрелина у материјалу, из разлога што затежуће напонско стање поспешује ширење микропрелина, а притисно напонско стање не, па се чак сматра, у извесној мери, да се притисним напонским стањем могу смањивати постојеће микропрелине.

Напонско стање је последица читавог низа утицајних фактора: начин уношења енергије – преношење спољашњег оптерећења, геометрија зоне деформисања, геометрија радног комада, геометрија алата, стање контактних површина и тсл. На основу тога се одговарајућим управљањем ових фактора може утицати и на напонско стање, па према томе и на понашање материјала у односу на испољавање феномена деформабилности из механичког аспекта [40].

Изучавање понашања материјала из механичког аспекта посебно истиче значај изучавања почетка и краја пластичног течења (сл. 2.3). Изучавање на почетку процеса пластичног течења базира се на постављању и одређивању критеријума течења метала, напонско–деформационих односа и криве течења као карактеристике материјала.



Слика 2.3 Шематски приказ изучавања понашања материјала са механичког аспекта [40]

Одређивање граничних деформација, тј. граничне деформабилности, код обликовања лимова одвија се помоћу површинских јединичних деформација, а код запреминског обликовања помоћу напонског показатеља деформабилности β .

Сложеност утицаја напонског стања приказује се преко елемената обрадног система. Напонске компоненте, као последица реализованог напонског стања, у великој мери зависе од геометрије полазног и готовог комада, геометрије алата, брзине деформације, граничних услова и фаза обликовања. Зависност напонског стања од фактора обрадног система представља комплексно подручје обрадивости метала пластичном деформацијом са бројним утицајима.

При пројектовању технологија у ТПО од великог значаја је познавање граничне деформабилности (најчешће је критеријум разарање или локализовано деформисање), која се може

дефинисати као способност остваривања максимално могуће деформације у одређеним обрадним условима.

Систематизован приступ проблематици деформабилности, посебно у условима запреминског обликовања, дат је у монографији [40], док су резултати изучавања обрадивости танких лимова дубоким извлачењем, са разматрањима која обухватају значај параметара обрадивости, дефинисање и коришћење дијаграма граничне деформабилности, утицај тзв. историје деформисања и тсл. изложени у радовима [12, 13, 37, 42, 43, 44].

2.1. Гранична деформабилност танких лимова

Познавање граничне деформабилности танких лимова једно је од важних питања за истраживаче и инжењере који се баве обликовањем лима. Гранична деформабилност код лимова дефинише се као способност материјала за постизање максимално могуће деформације у одређеним обрадним условима без појаве лома и осталих дефеката. Најбољи начин изражавања граничне деформабилности су тзв. дијаграми граничне деформабилности (ДГД).

Без обзира што је гранична деформабилност универзалан феномен који је везан за пластично обликовање метала, код лимова није могуће подједнако успешно одредити ДГД као код запреминског обликовања. Гранични износи деформација не зависе само од напонског стања, већ и од историје деформисања (монотоности процеса).

2.1.1. Гранична деформабилност у условима монотоног (пропорционалног) деформисања

Пропорционално деформисање остварује се у случају када спољне силе које делују на посматрани елемент, расту од почетка деформисања пропорционално општем константном параметру, а правци главних деформација се не померају и не мењају по знаку.

Монотонно деформисање је присутно при следећим условима:

1. главне осе брзина деформација треба да се поклапају са истим влакнима материјала и
2. однос између главних компонената брзине деформације мора се држати сталним.

С обзиром на то да су наведени услови потпуно еквивалентни, испуњење услова за пропорционално напрезање води ка монотонном деформисању. Код сложенијих случајева деформисања најчешће нису испуњени услови пропорционалног деформисања, али се готово увек читав процес може разложити у више фаза у оквиру којих ће то бити потпуно или делимично. За овај тип напрезања и раванско напонско стање [37] важе односи:

$$m = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \text{const.}; \quad (2.2)$$

$$t = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \text{const.} \quad (2.3)$$

при чему је: m – напонски коефицијент (однос напона),

t – деформациони параметар.

Везе између напонског (m) и деформационог (t) параметра, за изотропан материјал, су:

$$m = \frac{2t+1}{2+t} = \frac{2\varphi_2 + \varphi_1}{2\varphi_1 + \varphi_2}; \quad (2.4)$$

$$t = \frac{2m-1}{2-m}. \quad (2.5)$$

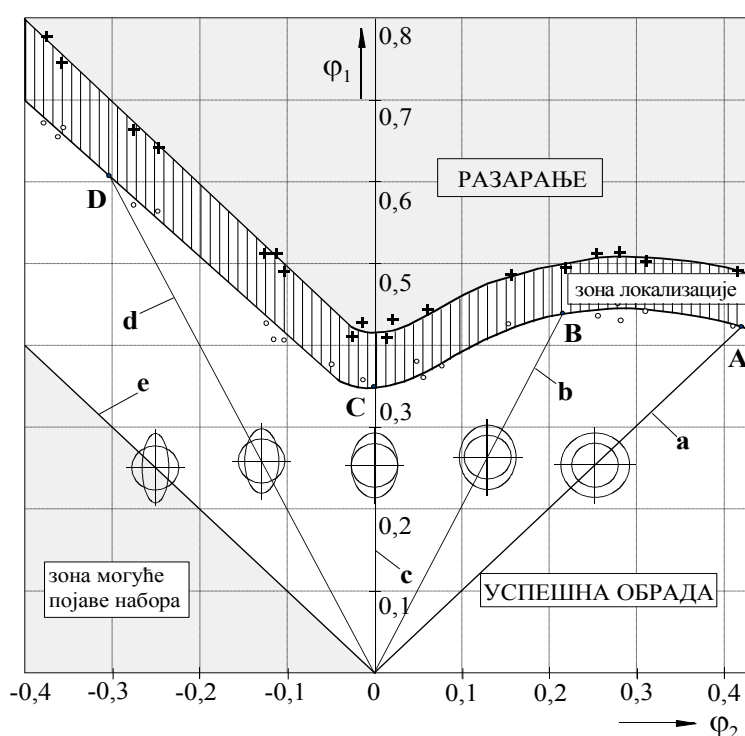
За анизотропан материјал:

$$m = \frac{\left(\frac{1}{r_0} + 1\right) \cdot t + 1}{\frac{1}{r_{90}} + t + 1} = \frac{\left(\frac{1}{r_0} + 1\right) \cdot \varphi_2 + \varphi_1}{\left(\frac{1}{r_{90}} + 1\right) \cdot \varphi_1 + \varphi_2} ; \quad (2.6)$$

$$t = \frac{\left(\frac{1}{r_{90}} + 1\right) \cdot m - 1}{\frac{1}{r_0} - m + 1}, \quad (2.7)$$

при чему је r_0 , r_{90} коефицијент нормалне анизотропије за правац ваљања и њему управан правац, респективно.

Гранична деформабилност лимова углавном се посматра у деформационој равни главних (природних) деформација (φ_1 и φ_2) тј. преко ДГД (сл. 2.4).



Слика 2.4 Дијаграм граничне деформабилности (ДГД)

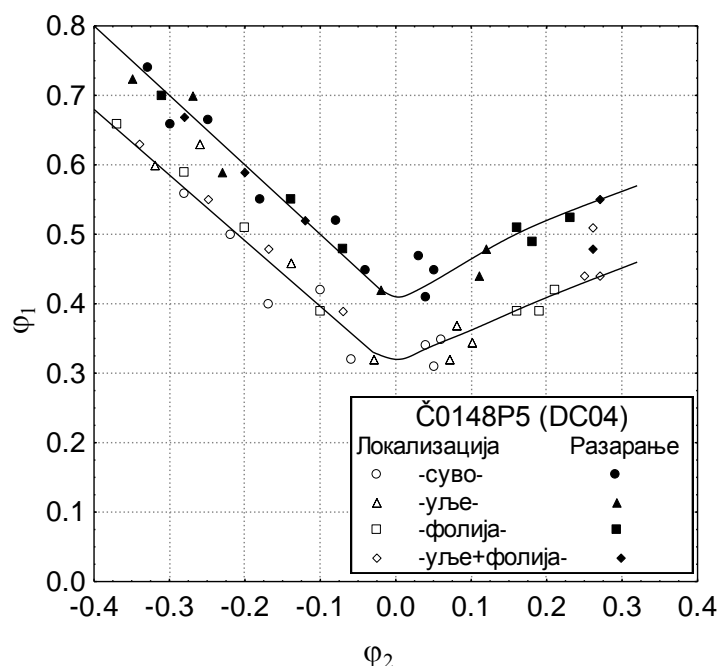
Ови дијаграми се експериментално одређују различитим поступцима, који се разликују по облику узорка лима (спрувете), геометрији алата и начину остваривања деформационе силе [12, 33, 42]. Графометријска техника мерних мрежа представља основу за одређивање ДГД, коришћењем полусферног извлакача, пречника 50-100 mm и узорака различитих ширина (поступак *Nakazima*) [33, 39].

На дијаграму 2.4 приказане су четири карактеристичне зоне и пет карактеристичних линија са кружићима мерне мреже пре и после деформисања. Леви део ДГД представља односе који постоје код делова који се добијају дубоким извлачењем, док је десни део карактеристичан за разне типове двоосног затезања (развлачења). Код зона могуће појаве набора напонско стање није једино пресудно за ту појаву јер утичу и други фактори.

Најзначајнији утицај на положај граничних кривих имају следећи фактори:

- материјал (врста и дебљина),
- експериментална методологија одређивања,
- крупноћа мерне мреже и
- историја деформисања.

Утицај трења на положај граничних кривих ДГД дат је на слици 2.5, на којој се види да услови трења не утичу значајније на померање граничних кривих. Већем трењу одговарају лоши услови течења што резултира мањим деформацијама. Мањем трењу одговарају равномерније деформације. Промену деформације φ_2 прати одговарајућа промена φ_1 , па се добија ефекат кретања тачака по граничној кривој.



Слика 2.5 ДГД добијен при различитим условима трења

Из свега наведеног произлази да код упоређивања резултата различитих истраживања треба водити рачуна о методологији и критеријумима одређивања, условима испитивања, мерној мрежи итд.

2.1.2. Гранична деформабилност у условима немонотоног деформисања

Реални процеси у ТПО углавном се одвијају у условима који се разликују (одступају) од пропорционалног деформисања. Такав вид деформисања назива се немонотонно или непропорционално деформисање за које се често користи илустративнији термин променљива или сложена историја деформисања. Нарочито је изражено код вишефазних (вишеоперационих) поступака обликовања лима. Опсежна истраживања [33, 37] су показала да постојање сложене историје деформисања суштински и значајно утиче на промену облика и положаја кривих ДГД, односно уопште на граничну деформабилност лимова. Историја деформисања [45] код вишефазног дубоког извлачења (полазни комад претходно деформисан развлачењем) је показала позитиван утицај који се манифестује повећаном дужином извлачења у другој операцији.

Историја процеса пластичног обликовања геометријски се најсликовитије изражава преко тзв. путања или трајекторија деформисања. То су линије које графички представљају начин промене односа главних деформација φ_1 и φ_2 , све до разарања (током једне или више фаза деформисања). На слици 2.6, приказане су, појединачно, најчешће коришћене линеарне путање деформисања за двофазни процес [33].

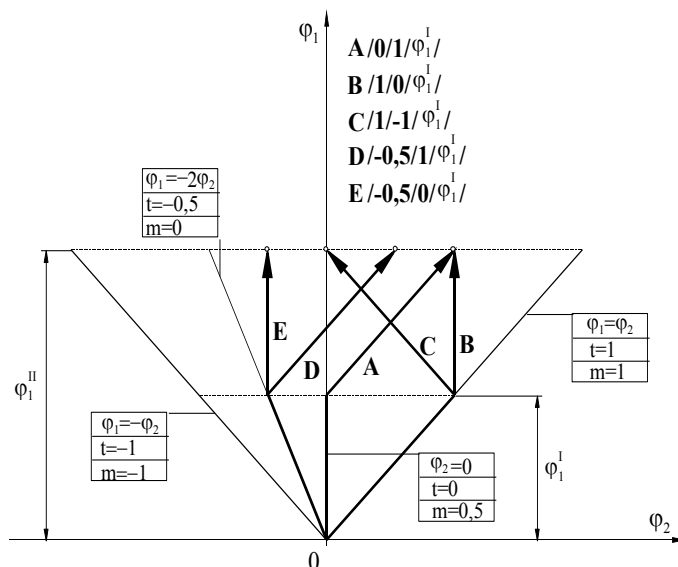
Аналитичко изражавање путања најједноставније је преко деформационог фактора t , који је у директној вези са напонским коефицијентом m (изрази 2.2 до 2.8) и који одређује правац путање. Двофазне линеарне путање могу се описати на следећи начин [33]:

$$\varphi_2 = \begin{cases} t^I \cdot \varphi_1 & ; \quad \varphi_1 \leq \varphi_1^I \\ t^I \cdot \varphi_1^I + t^{II} (\varphi_1 - \varphi_1^I) & ; \quad \varphi_1 > \varphi_1^I \end{cases} \quad (2.8)$$

где су:

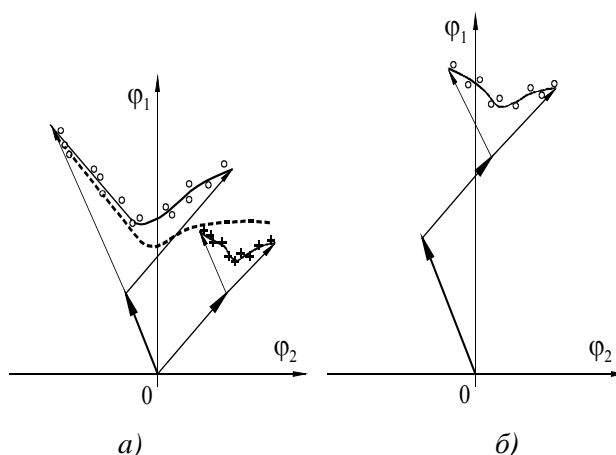
- t^I и t^{II} - деформациони коефицијенти за прву и другу фазу,

- φ_1^I - деформација на крају прве фазе и
- φ_1 - тренутна деформација у другој фази (независно променљива).



Слика 2.6 Могући облици историје деформисања при двофазном деформисању [33]

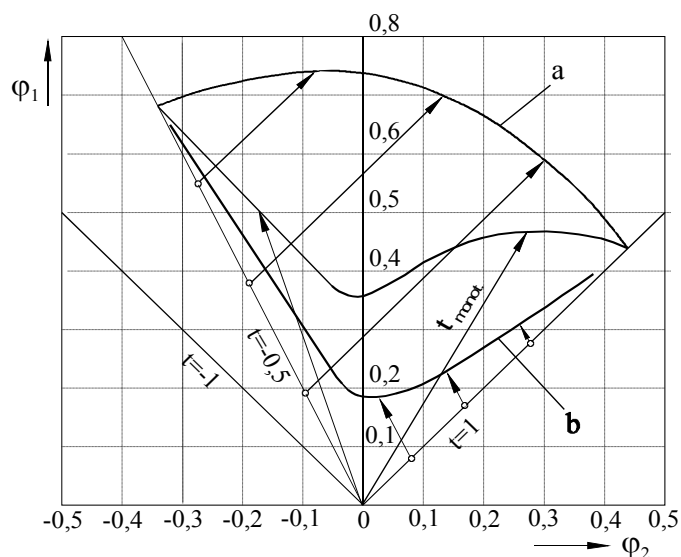
Израз (2.8) може се приказати у форми: $(t^I, t^{II}, \varphi_1^I)$, чиме се у одговарајућем облику потпуно описује путања. На слици 2.7 приказан је двофазни (а) и трофазни (б) процес, где се граничне деформације постижу на крају друге тј. треће фазе.



Слика 2.7 Сложене историје деформисања са константним деформацијама на крају претходних фаза [33]

До граничне деформације могуће је доћи различитим комбинацијама праваца путања и износа деформација. Најповољнији облик историје деформисања, с обзиром на реализацију максималних главних деформација, приказан је на слици 2.6, путањом “D”, или на слици 2.8 кривом “а”. Познавање потпуне историје деформисања омогућава избегавање критичних вредности деформација, с обзиром на накнадне операције извлачења, савијања, повијања рубова и тсл.

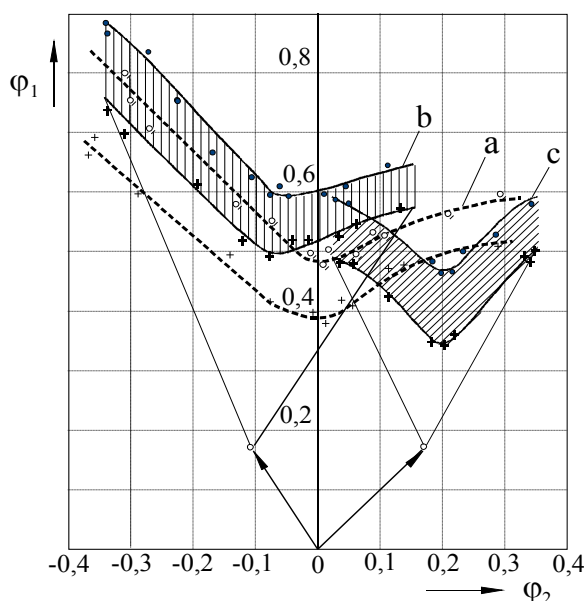
Користећи локалну деформациону анализу (којом се подразумева уношење вредности деформација у одређеном пресеку комада, у ДГД) и интегралну деформациону анализу, којом се сагледава природа деформисања ширих зона (понекад и комплетног отпреска), може се указати на технолоичност отпреска, реконструисати алат, извршити измена геометријског облика комада, прилагодити средство за подмазивање и тсл. [37]. Оваква анализа се може реализовати ако се за одређивање трајекторије деформација уради више узастопних извлачења до различитих дубина, како би се поуздано одредиле границе поља у којима су задовољени услови (изрази 2.2 и 2.3).



Слика 2.8 Утицај историје деформисања на ДГД [33]

На слици 2.9 показан је утицај сложене историје деформисања на ДГД [33].

- “а“ - ДГД добијен у условима једнофазног монотоног деформисања,
- “б“ - ДГД добијен са претходним једноосним затезањем и
- “с“ - ДГД добијен са претходним развлачењем.



Слика 2.9 Сложене двофазне историје са константним деформацијама на крају прве фазе

Немонотонно деформисање (сложена историја деформисања), најчешће се изучава на примерима вишефазних поступака обраде лима при праволинијским путањама у свакој фази, тј. са очуваним монотоним деформисањем за време сваке фазе. Код коришћења ДГД који су добијени у условима немонотонног деформисања, битно је нагласити да процеси експерименталног одређивања у потпуности одговарају посматраним реалним процесима.

2.2. Обрадивост лимова дубоким извлачењем

Термин обрадивост везан је директно за врсту обраде (обликовања). Код обликовања лима карактеристични су поступци: дубоко извлачење, развлачење, савијање, пробијање и просецање. Свака од ових обрада има своје специфичности и услове у којима се одвија. Те специфичности су напонско-деформационо стање процеса, облик и врста алата, захтеви везани за тачност облика, димензија и површина, улогу триболошких услова и тсл. У пракси је уобичајено да се за лим код

дубоког извлачења степен извлачења или коефицијент извлачења сматрају главним параметрима обрадивости, код савијања минимални радијус савијања (r_{\min}), развлачења максимални степен развлачења, пробијања и просецања квалитет површине отвора итд.

Међутим, појам обрадивости за све поступке је знатно шири, комплекснији и захтева посебне методе одређивања.

2.2.1. Методе одређивања обрадивости

Одређивање обрадивости представља процену способности тј. понашања материјала у конкретном процесу обликовања. Параметри обрадивости добијају се одговарајућим експерименталним испитивањима и приказују се у облику бројних вредности, табеларних података или графичких зависности на основу којих је могуће стећи реалну представу о могућностима обликовања.

Методе испитивања могуће је систематизовати [33]:

- основна (фундаментална) испитивања: испитивање једноосним затезањем, испитивање тврдоће, металграфска испитивања, одређивање хемијског састава, испитивање корозивне способности итд.,
- технолошка (“симулативна“) испитивања (тзв. “cupping“ тестови): *Erichsen, Swift, AEG, Fukui, Engelhardt* итд.,
- одређивање карактеристика деформационог ојачања,
- испитивање својстава анизотропије,
- триболошка испитивања,
- одређивање граничне деформабилности и деформациона анализа,
- истраживања везана за специфичне показатеље обрадивости (дефлексионе појаве и тсл.) и
- нумеричке симулације процеса дубоког извлачења.

2.2.2. Параметри обрадивости

Параметри обрадивости су карактеристике које имају константну вредност за одређени материјал и углавном се брзо и лако се одређују.

Једноосним затезањем добијају се следећи показатељи:

- напон течења (R_p , МПа),
- затезна чврстоћа (R_m , МПа),
- процентуално издужење при разарању (A , %) и
- контракција (сужење) попречног пресека (Z , %).

Ове величине, и поред зависности од услова испитивања, успешно се користе као индиректни показатељи обрадивости.

Тестом једноосног затезања одређују се криве ојачања, експонент деформационог ојачања (n) и својства анизотропије.

Феномен деформационог ојачања најбоље се изражава преко кривих ојачања (зависност еквивалентног напона - деформационог отпора, од еквивалентне пластичне деформације), при чему је врло значајно бројно квантитативно илустровање ојачања преко експонента деформационог ојачања – “ n “ фактора. Овај експонент је узет као показатељ обрадивости јер директно дефинише нагиб криве односно интензитет ојачања, и једнак је:

$$n = \varphi_M = \frac{l_M}{l_0}, \quad (2.9)$$

при чему је: φ_M – природна деформација на крају области хомогеног деформисања при једноосном затезању, а

l_0 и l_M – укупна и мерна дужина узорка лима (епрувете) за затезање,

Утицај “ n “ фактора на обрадивост посебно долази до изражаја у условима нехомогених деформационих поља, тако што већа вредност значи интензивније ојачавање и тежњу ка хомогенијем деформационом пољу. Ефекти ојачавања посебно су значајни у условима напонско-деформационе шеме развлачења.

Анизотропија материјала (различите особине материјала у зависности од правца по запремини) утиче на обрадивост материјала. Коефицијент нормалне анизотропије, који се одређује једноосним затезањем у области хомогеног пластичног деформисања, један је од важних параметара обрадивости танких лимова. Дефинише се на следећи начин:

$$r = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (2.10)$$

где је: φ_b , φ_s – природна деформација по ширини и дебљини лима, респективно.

Код изотропних материјала ($r=1$), једнаке су деформације у равни лима и по дебљини. За $r>1$ деформација дебљине лима је мања од деформације у равни, што значи да лим показује отпорност према стањању и склоност према повећању деформација у равни. Код обраде таквих лимова постоји мања вероватноћа настанка локализованог деформисања. Испитивања у овој области [46] показују везу између граничног (максималног) степена извлачења и r -фактора. Материјали са већим r -фактором могу поднети веће оптерећење (носећи попречни пресек се мало смањује) независно од интензитета ојачања. Коефицијент нормалне анизотропије, поред практичног значаја има велику важност и у теорији анизотропне пластичности [33].

Триболошким испитивањима (реализација различитих трибо модела) могу се одредити различити параметри, али углавном је реч о коефицијенту трења и сили трења [13]. У поменутој монографији је, кроз посебан истраживачки приступ, показана декомпозиција сложених облика извлачења на једноставније физичко-триболошке моделе. Дате су бројне илустрације зависности трибо-показатеља од услова испитивања, при чему је наглашена веза са граничним могућностима обликовања. Анализиран је утицај геометрије алата, утицај историје деформисања, дефинисани поједини поступци за оцену технолошких и триболошких својстава мазива и тсл. Тема овог рада наслања се у одређеној мери на истраживања у монографији. Један од триболошких модела (клизање лима између равних контактних површина), изнетих у монографији, примењен је у овом истраживању, при чему се уместо константног притиска на држачу примењују променљиве зависности притиска од хода, који се задаје симултано за време процеса, уз помоћ оригиналне експерименталне апаратуре у потпуно реалним условима (реални материјали, алат, мазива, различита стања контактних површина, и тсл.).

За посебне врсте лимова (челични лимови повишене јачине и лимови од алуминијумских легура), као и за посебне услове обликовања, реализовани су тестови чији су резултати параметри који карактеришу склоност тих материјала ка дефектним и сличним појавама (*Yoshida* тест - дијагонално једноосно затезање квадратне епрувете, “*hat*” – тест [47]).

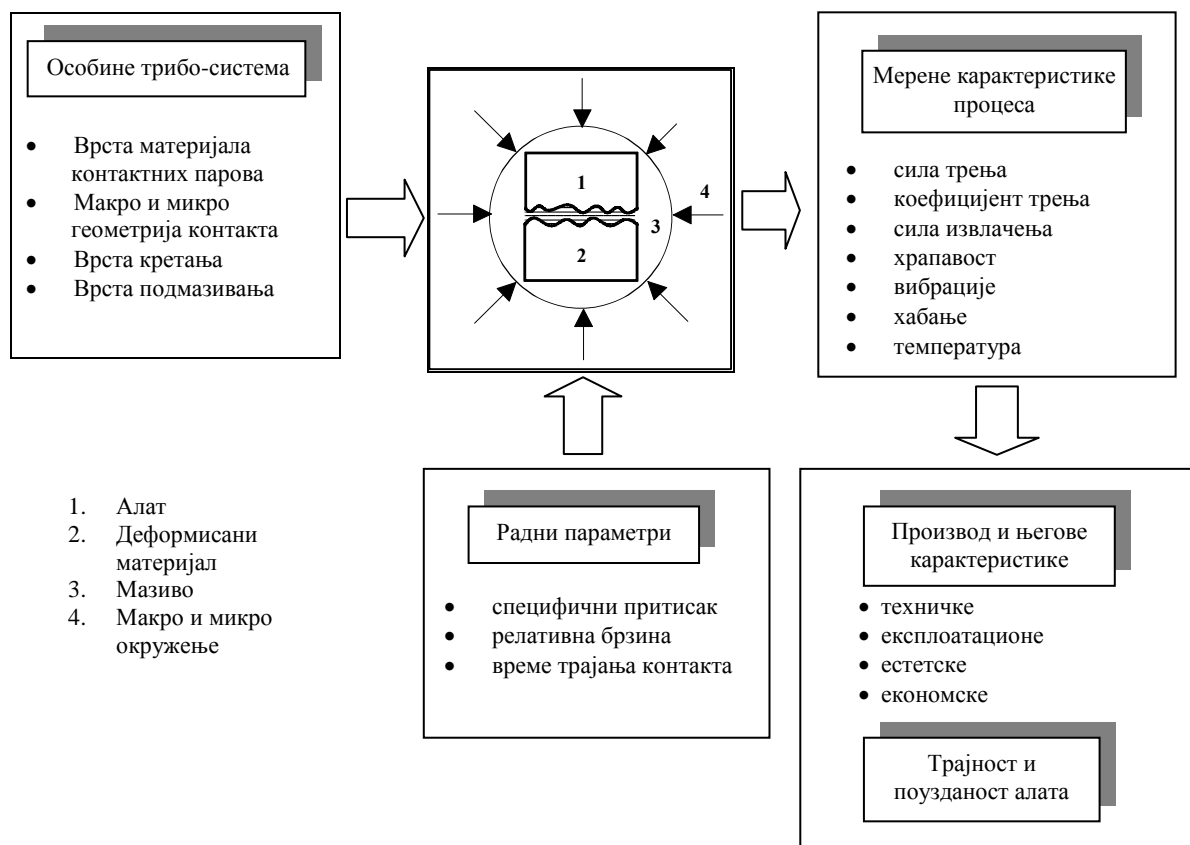
3. ИЗУЧАВАЊА КОНТАКТНИХ ПРОБЛЕМА У ПРОЦЕСИМА ПЛАСТИЧНОГ ОБЛИКОВАЊА

У свим физичким процесима, у којима настаје релативно кретање два елемента у контакту, присутно је трење. Код технологије пластичног обликовања (ТПО), триболошки услови значајно утичу на процес пластичног течења материјала, потребну деформациону силу и енергију (извршени рад), као и на квалитет површина и геометријску тачност добијених делова.

Трибо-механички систем, у процесима ТПО, састоји се из следећих елемената [13]:

- контактнoг пара кога чине алат и материјал који се пластично деформише,
- елемената који раздвајају контактне површине: мазиво, превлака и тсл.,
- макро и микро околине тј. машине на којој се реализује процес, средине и услова који владају, као што су: влажност, температура, вибрације, садржај прашине и др.,
- управљачког система.

Шема трибо-механичког система (ТМС) у процесима пластичног обликовања, представљена је на слици 3.1 [14].



Слика 3.1 Шема трибо-механичког система у процесима пластичног обликовања

На основу дате шеме, особине трибо-система могу се описати помоћу следећих карактеристика:

- врсте материјала контактних парова,
- макро и микрогеометрије контакта,
- врсте кретања (клизање, котрљање, ротација, осцилације, итд.),
- врсте подмазивања (без мазива, са мазивом: течним, получврстим, чврстим).

На контактне услове и излазне параметре процеса у трибо-механичком систему утичу следећи фактори:

- специфични притисак,
- релативна брзина (брзина померања деформисаног материјала по површини алата),

- температура у зони контакта деформисаног метала са алатом,
- време трајања контакта,
- карактер контакта.

Конечан ефекат процеса пластичног обликовања са уделом силе трења зависи од удруженог утицаја одређених карактеристика:

- техничких (површине, геометријских димензија, својстава отпорности итд.),
- експлоатационих (трајност, повољност коришћења итд.),
- естетских (спољни изглед, завршна обрада и др.),
- економских (продајна цена, амортизација и тсл.).

Наведене одлике углавном одређују квалитет производа. Осим квалитета производа, веома је важна трајност и поузданост рада алата. Хабање алата погоршава особине добијених делова, што се манифестује погоршањем квалитета димензија и облика, грубљом површином итд.

Применом одговарајућих мазива, увођењем превлака на алатима, избором погодних врста алатних материјала, може се значајно смањити коефицијент трења, а тиме смањити хабање алата.

За познавање карактера трења у процесу пластичног обликовања, није довољно познавати само вредност силе трења, односно коефицијент трења, већ је потребно описати триболошки систем, што омогућава да се предвиди какве ће бити крајње особине добијених делова. У складу с тим, формиран је и приступ у овом истраживању.

Тема овог рада је у основи замишљена као експериментално истраживање понашања лима на моделу клизања између равних површина у условима сложених променљивих утицаја за време процеса дубоког извлачења. Идеја је базирана на задавању променљивог притиска у контакту током процеса клизања и праћењу промене вучне силе, коефицијента трења, површинске храпавости лима и алата.

Систематизација међусобних зависности поменутих утицаја даје допринос, с једне стране, разумевању понашања материјала у условима сложених променљивих утицаја на процес дубоког извлачења, а с друге, омогућава прикупљање значајних података употребљивих за управљање тим процесом.

3.1. Специфичности и улога трења у процесима пластичног обликовања

Трење које настаје између контактних површина алата и материјала радног комада утиче на ток пластичног деформисања (успешност процеса), као и на особине производа и трајност алата. Сила трења утиче на напонско–деформационо стање у пластично деформисаном материјалу, а нарочито у његовим спољним слојевима који су у контакту са радним површинама алата. Отпори трења могу представљати ограничење за примену већих брзина обликовања (вучења, извлачења итд.).

Суво и гранично трење имају битан утицај на површине производа и алата. Површине алата које су у контакту са радним комадом углавном су веће тврдоће од радног комада, тако да се у процесу обраде на алату остварују само еластичне деформације, док су код радног комада деформације пластичне. С обзиром на чињеницу да у површинском слоју настаје највећи градијент напона, особине спољашњих слојева, како производа тако и алата, битно се разликују од осталих по запремини предмета. Деловање силе трења повезано је и са губитком енергије. Енергија изгубљена на рад трења у процесу пластичног обликовања је значајна (понекад је чак и већа од вредности рада пластичног деформисања), што за последицу има неопходност ангажовања енергије за савладавање тих сила.

У процесима пластичног обликовања смањење непожељног отпора трења, изводи се применом одговарајућег мазива и метода подмазивања, као и полирањем радних површина алата итд.

У одређеним случајевима дејство силе трења може бити позитивно (корисно). Један од примера позитивног утицаја трења на процес пластичног обликовања присутан је код дубоког извлачења са стањењем (зона извлакача). Такође, остали примери позитивног утицаја трења су код поступка дубоког извлачења танких лимова, ваљања, супротносмерног истискивања и др.

Трење у процесима пластичног обликовања битно се разликује од трења које настаје у механичким везама, а с обзиром на утицајне чиниоце, као што су:

- високи специфични притисци (који надмашују напон течења једног од материјала контактног пара),
- велика деформација и разлика у односу на механизме карактера контакта,

- непрекидна промена површина у контакту,
- функција мазива и др.

Код пластичног обликовања са високим специфичним притисцима (100-3000 МПа), настају битне промене услова трења. Смањује се ефикасност подмазивања (настаје прекидање слоја мазива и долази до директног контакта површина) при чему је и хабање интензивније. Код екстремно високих притисака једини начин раздвајања контактних површина је наношење електрохемијских превлака (на бази цинк-фосфата или фери-оксалата). Врста и карактер деформација утичу на појаву трења у процесу. Обликовани елемент достиже трајне деформације, а као резултат тога мењају се услови који владају на површини контакта. У процесу пластичног обликовања долази до контакта површина алата са већим бројем зона деформисаног метала. При томе се непрекидно мењају микрогеометрија и карактер контакта, а такође и величина стварне површине контакта. Због тога је, у овом случају, класична теорија *Amonton-a* од мале користи јер се она заснива на тврђењу да отпори трења настају узајамним захватањем микронеравнина површина.

У зависности од технолошког поступка пластичног обликовања, остварују се и различите брзине деформисања, што за последицу има врло различите и сложене процесе трења и течења.

С обзиром на сложеност и специфичност трења које се јавља у процесима пластичног обликовања, не може се при анализи ових проблема употребити упрошћен модел трења, ни потпуно применити закони трења који важе у класичним механичким склоповима са крутим или еластичним елементима.

Већ је наведен позитивни утицај трења на ток неких процеса (код поступака обликовања ваљањем, извлачењем, истискивањем). За познавање и управљање појавама трења потребно је познавати карактер и специфичности које постоје за конкретан процес. Да би се анализирали процеси у ТПО из аспекта утицаја трења неопходно је одговорити на следећа питања:

1. На који начин треба изводити процесе обликовања да би се у одређеној мери смањио штетан утицај трења (нпр. путем регулисања и правилног избора опсега радне брзине алата, температуре деформисаног метала, врсте мазива и начина подмазивања, као и других параметара процеса)?
2. Како поставити и изабрати отпоре трења да би извођење процеса било најекономичније (избором одговарајућих контактних парова, неадхезионих превлака и подмазивањем)?
3. У којим случајевима и на који начин искористити додатни утицај отпора трења за постизање жељених особина готовог дела циљним обликовањем особина површинских слојева?

Налажење једнозначног и најопштијег одговора на та питања веома је тешко, с обзиром на сложеност појава које прате процесе пластичног обликовања:

- разнородни механизми деформисања,
- различита деформациона стања,
- ефекат деформационог ојачања итд.

Као резултат тих појава, у току процеса обраде истог комада, могу се појавити зоне различитих типова деформација као и различитих услова трења. Позитиван или негативан утицај трења, треба разматрати у складу са подацима технолошког процеса. Зато, приликом израде конструкције и технолошке документације треба узети у обзир наведене утицаје у циљу добијања готовог дела следећих особина:

- одговарајућа отпорност на механичка оптерећења,
- одговарајућа тачност димензија и облика,
- отпорност на корозију, као и
- естетски изглед готовог дела.

Фактори који утичу на квалитет површине комада су:

- услови трења,
- параметри процеса обликовања (специфични притисак, брзина деформисања, температура материјала радног комада итд.).

Триболошке појаве у зони контакта деформисаног метала и алата, одређују како стање спољашњих слојева радног комада, тако и промену стања површинских слојева алата.

Код триболошких процеса присутни су:

- механичко дејство контактних површина,
- адхезионо дејство контактних површина,

- физичко-хемијске реакције као резултат деловања трећег тела – мазива.

То сведочи о сложенем утицају ових чинилаца и тешкоћи предвиђања коначних резултата. Због оваквих разлога је врло тешко дефинисати везу између услова трења и особина спољашњих слојева радног комада, без обзира на бројна практична искуства и многа експериментална испитивања.

Спољашње трење утиче како на особине спољашњих слојева комада (храпавост, носивост, валовитост), тако и на механичке особине, тј. на расподелу и величину сопствених напона, степен ојачања, текстуру, структурне грешке итд. Један од начина којим се може смањити трење (тимае и утицај трења на квалитет готовог дела) јесте избор особина контактних површина алата. Као резултат експлоатације, у спољашњим слојевима површина алата настају нежељене промене, углавном због:

- механичког дејства (промена површинске храпавости, промена напонског поља, ојачање, размена и кретање продуката хабања и др.),
- термичког дејства (промена температурског поља, оксидација, фазне промене итд.),
- физичко-хемијског дејства (адхезија, адсорпција, дифузија).

Као последица деловања наведених процеса, током времена, алат губи првобитна својства, а постепени процес хабања алата утиче на квалитет готовог дела (промена димензијске тачности, геометрије, квалитета површине итд.).

Већина процеса у ТПО имају заједничке особине (један од контактних парова се пластично деформише, алат је стално у контакту са новим површинама итд.). Међутим, поједини процеси се разликују међусобно, како по геометрији контакта, тако и по вредностима радних параметара (опсега брзина, специфичних притисака, радних температура и др.).

Велики утицај на коначно стање површинских слојева радног комада показују и параметри обликовања. Особине површинских слојева пластично обликованих комада на хладно другачије су од особина комада добијених на топло, а нарочито се разликују степен ојачања, величина сопствених напона итд. Због тога квалитет готовог комада треба разматрати повезано са примењеном техником обликовања (главним параметрима процеса пластичног обликовања), као и особинама површина алата који утичу на услове трења.

Стање контактне површине алата мора бити тако прилагођено да поседује постојаност у сваком погледу, у што дужем временском периоду. На тај начин могу се обезбедити тражене особине готовог комада у смислу тачности димензија, геометријског облика и стања површине, и других особина.

3.2. Основни закони трења и њихова примена у процесима пластичног обликовања

Познате теорије трења условно се могу поделити у четири групе [13]:

1. Геометријска теорија, која у основи има чисто геометријску представу о природи трења (захватање неравна контактних парова). Према *G. Amonton*-у, сила трења је једнака:

$$F_T = \mu \cdot F_N, \quad (3.1)$$

где су: μ - коефицијент трења и

F_N - нормална сила.

Трење не зависи од површине клизања, а сила трења је пропорционална нормалној сили. Ова теорија није могла објаснити зависност коефицијента трења од механичких својстава тела у контакту, која је касније установљена.

2. Теорије друге групе објашњавају трење као резултат међумолекуларног дејства два тела у контакту. Према *F. Bowden*-у при овоме настају микроставарене зоне као последица међуатомског дејства. Развоју ове теорије значајан допринос дао је *Б. В. Дерягин*.

3. Деформациона теорија дефинише трење преко рада, утрошеног на поравнање неравна у контакту.

4. Ова група обједињује више теорија, које се могу назвати комбинованим. Прва од њих је *Coulomb*-ова:

$$F_T = F_A + \mu^* \cdot F_N, \quad (3.2)$$

где су: F_A - компонента приањања,

$\mu^* \cdot F_N$ - сила задирања, зависи од нормалног притиска.

Данас је најшире прихваћена теорија о двојној природи трења, тзв. молекуларно-механичка, или адхезионо-деформациона теорија трења (*Л. В. Крагельски*). Према овој теорији, укупна сила трења једнака је збиру елементарних сила, које делују у јединичном контакту:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i = \sum_{i=1}^n (F_D + F_A)_i \quad (3.3)$$

где су: F_D – отпор условљен деформисањем танког контактнег слоја материјала и n - број пикова неравнина у контакту.

Основна карактеристика трења при пластичном деформисању садржана је у чињеници да силе трења настају као резултат пластичног течења метала у запремини предмета који се обликује, при напонима (притисцима) који су знатно изнад границе течења. При томе расте однос површине контакта према запремини тела. Порастом контактне површине повећава се и вероватноћа разарања оксидних слојева и изласка "свежих" честица метала. Ова појава доприноси јачању међуатомског везивања у контакту; деформација површинских слојева може бити интензивнија од опште деформације тела (ојачање једнозначно прати износ деформације).

За различите тачке контактне површине специфична сила трења, односно смичући напон, може се изразити:

$$\tau = \alpha \cdot \tau_T, \quad (3.4)$$

где су: α - функција координата, која зависи од физичко-хемијских и механичких фактора ($\alpha = 0-1$) и τ_T - напон течења при смицању.

Величина смичућег напона зависи од:

- механичких услова на површини,
- реолошких својстава деформисаног материјала и
- стања контактних површина.

У општем облику, ова зависност се може изразити:

$$\tau = f(u, p, m, \mu), \quad (3.5)$$

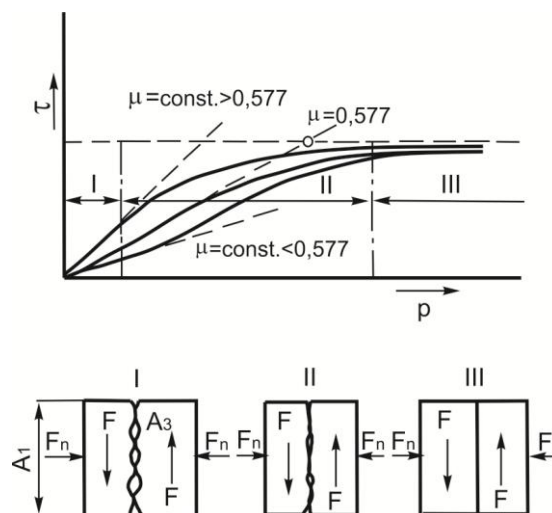
где су: u - фактор који узима у обзир клизање и деформације у контакту,

p - величина нормалног притиска у посматраној зони,

m - фактор, који узима у обзир зависност механичких својстава деформисаног метала од температуре, брзине и степена деформације и

μ - карактеристика физичко-хемијског и механичког стања површине.

У зависности од вредности контактнег притиска и других триболошких услова, карактеристичне области трења се могу приказати на слици 3.2:



Слика 3.2 Карактеристичне области трења [14]

- Област I: пластично се деформишу само неравнине. Важи *Coulomb/Amonton*-ов закон, $\mu < 0.577$ и зависи од карактера површине и примењеног мазива.

- Област II: прелазна зона; може доћи до пластичног течења у маси метала истовремено са разарањем заварених микроспојева (могу се појавити откинуте честице метала).
- Област III: пластично течење ($\tau = \tau_{\max} = \text{const}$). Коефицијент трења опада [13].

3.3. Технолошка мазива у технологији пластичног обликовања (ТПО)

3.3.1. Улога мазива у процесима пластичног обликовања

Мазива имају све значајнију улогу, како у индустрији машиноградње, тако и у производњи. У ТПО мазива имају незаменљиву улогу, углавном код свих поступака пластичног обликовања. Различити поступци обликовања условили су примену и развој различитих врста мазива, тако да данас постоји велики број (наменских) врста технолошких мазива. Поред тога, постоји и још увек се развија велики број метода и система за подмазивање. Мазива која се примењују у поступцима пластичног обликовања треба да ефикасно раздвоје контактне површине, спрече директни контакт деформисаног метала и алата, заштите алат од прекомерног хабања, итд. Такође морају поседовати могућност лаког довођења и лаког уклањања, нарочито ако се радни комад даље површински обрађује (бојење, наносење галванских превлака итд.). Нарочито је битна отпорност мазива на нормална оптерећења и олакшана течљивост у правцу контакта.

Мазива за процесе пластичног обликовања на топло (ковање или истискивање) морају бити отпорна на дејство високих температура (често и до 1100°C) и да не губе мазива својства на тим температурама. Такође, њиховом применом треба избећи прекомерно загревање алата и олакшати вађење готовог дела из алата (нпр. отковка).

С обзиром на различите услове реализације процеса пластичног обликовања, као и на велики избор деформабилних - пластичних материјала, при избору технолошких мазива треба узети у обзир: врсту деформисаног материјала, брзину деформисања, контактни притисак, температуру деформисаног материјала, склоност ка корозији, конструкцију алата и степен сложености радног комада.

3.3.2. Класификација и карактеристике мазива која се примењују у ТПО

Велики број различитих процеса и услова у оквиру истих процеса и поступака, довео је до развоја и производње великог броја различитих технолошких мазива. Примена нових, пре свега теже обрадивих материјала, условила је и примену нових средстава за подмазивање. У последње време нарочити нагласак се ставља на очување здравља људи и заштиту животне средине, па се у том смислу, развијају нова еколошки прихватљива мазива [48, 49].

Мазива која се примењују у процесима пластичног обликовања могу се поделити према:

- конзистенцији,
- пореклу (органско, минерално) и
- намени.

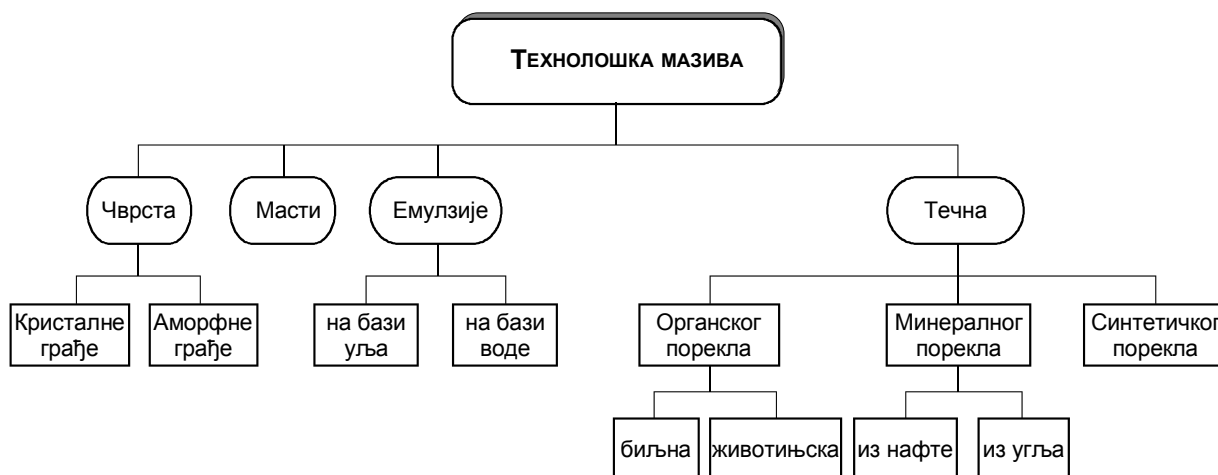
С обзиром на конзистенцију разликују се следеће групе мазива:

- течна мазива,
- емулзиона,
- мазива у облику пасте и масти и
- чврста мазива.

Према намени мазива се могу поделити:

- за процес извлачења,
- за процес вучења (жица, цев),
- за процес ваљања,
- за процес истискивања,
- за процес ковања итд.

Блок шема поделе мазива према конзистенцији и намени приказана је на слици 3.3.



Слика 3.3 Подела мазива према конзистенцији и пореклу

Произвођачи мазива све више теже остварењу захтева за еколошки здраву радну средину, а пре свега за очување здравља на раду. Ови захтеви су условили развој и примену нових, еколошких врста мазива.

Побољшања у примени мазива подразумевају уклањање опасних хемикалија (хлорисани адитиви или фосфати са металним укључцима) у циљу продужења века алатима, примене минималне количине мазива, прописаног одлагања употребљеног мазива, рециклаже и поновне употребе мазива.

Поједина истраживања [48, 49], спроведена су у циљу проналажења нових врста мазива као замена за постојећа мазива на бази уља. Таква испитивања спроводе се углавном као лабораторијски тестови, а ти резултати се могу применити за различите практичне услове. Неки тестови који се могу спровести у циљу испитивања нових врста мазива су: поновљено дубоко извлачење, дубоко извлачење са стањењем, савијање под притиском, комбиновани поступци и др.

Нова еколошка мазива у последње време увелико замењују традиционалне видове подмазивања, чак у одређеним случајевима (поступак ковања) веома успешно замењују превлаке наносене уобичајеним поступком фосфатирања. У ту сврху најчешће се користе електролитичке фосфатне превлаке, микропорозне превлаке, једнослојна и двослојна мазива. Двослојни систем подмазивања заснован је на наносењу мазива, раствореног у топлој деминерализованој води и сушењу на прописаној температури. Осушени слој мазива добро приања на површину радног комада, смањујући трење у знатној мери.

Мазиво које је испитивано у истраживању [48] припада групи двослојних, топло-растворљивих мазива. Испитивања су вршена на хидрауличној преси у процесу дубоког извлачења са стањењем. Поменуто мазиво састоји се од течног раствора на бази воде, беле боје, није реактивно и у потпуности безбедно за употребу. Хемијски састав мазива чине: емулзија која садржи 28% воска, метални сапун и неорганска једињења. Суви остаци у мазиву су 21-23%. Мазиво је намењено пластичном обликовању делова од нерђајућег челика, челика повишене јачине и обојених метала у хладном стању. Примена овог мазива у потпуности може потиснути наносење фосфатног слоја на површину радног комада. Припрема и наносење мазива су знатно једноставнији у поређењу са фосфатирањем. Наносење мазива састоји се од песарења, потапања у загрејану деминерализовану воду (60°C), наносења мазива температуре од 50-70°C и сушења на топлом ваздуху у пећи при 100°C.

3.3.3. Узајамно деловање мазива са контактним површинама у ТПО

У зависности од врсте процеса пластичног обликовања, као и од параметара процеса, присутне су различите врсте трења, почев од технички сувог па до трења са потпуним подмазивањем. Ефикасност подмазивања зависи од:

- јединичних притисака који делују у зони контакта деформисаног материјала са алатом,
- релативне брзине премештања површина деформисаног материјала по алату и
- температуре у зони контакта.

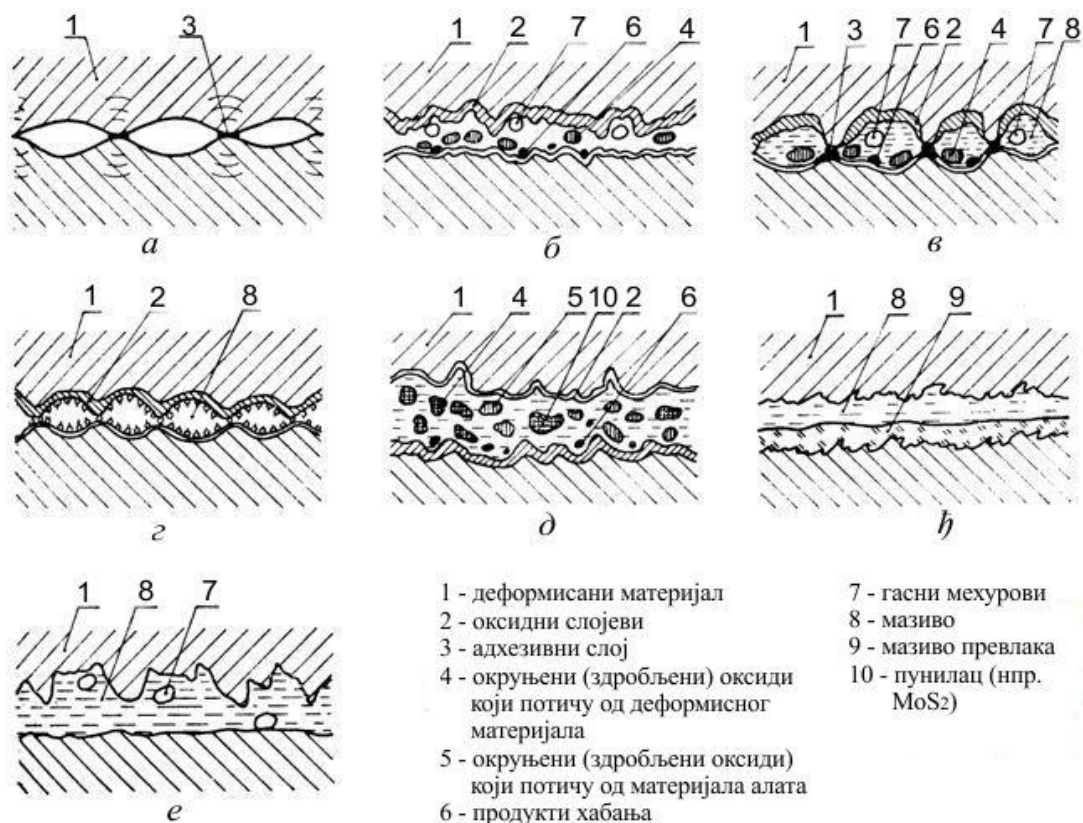
У процесу дубоког извлачења обично су присутна три режима трења и подмазивања: гранично, мешовито и потпуно.

Поред поменутих режима опширнија подела, према [12, 13, 50], обухвата:

- *Идеално суво трење* (сл. 3.4а) настаје у контактима при идеално чистим површинама без оксида, масти и свих врста нечистоћа (водене паре, гасова итд.). У тачкама контакта (на врховима микронеравнина површине) настају спојеви који се у процесу премештања разарају, а продукти хабања се нагомилавају у удубљењима површинских микронеравнина.
- *Технички суво трење* (сл. 3.4б) често се среће у пракси. Хемијски састав и структура контактне зоне знатно су сложенији у односу на идеално суво трење. Контактне површине су одвојене оксидним слојевима, при чему је присутан другачији састав и грађа оксида који се јављају у спољашњим слојевима алата (легирани челици), а другачији састав и грађа деформисаног материјала (угљенични челици или обојени метали). Дебљина оксидних слојева, којим је покривен деформисани материјал, је много већа од дебљине оксида који настаје на алату. У простору између контактних површина (у удубљењима површинских микронеравнина) могу се наћи гасни мехурови, разорени оксиди који потичу од обе контактне површине као и настали продукти хабања. Као последица померања контактних површина настају сложени процеси пластичног деформисања површинских микронеравнина: смицање приварених спојева, секундарно абразивно дејство продуката хабања и оксида, а такође и промена притиска гасних мехурова који се налазе у зони контакта.
- *Полусуво или мешовито трење* (сл. 3.4в) представља један од сложенијих случајева трења. Поред директног дејства контактних површина, на местима стварног контакта, наступа дејство мазиве супстанце као и утицај гасовите средине која садржи углавном водену пару. На микро површинама настаје метални контакт (врхови површинских микронеравнина се додирују), док се истовремено у удубљењима микро неравнина налазе мазива супстанца, гасни мехурови, као и продукти хабања у облику окруњених оксида и разорених честица са контактним површинама.
- *Гранично трење* (сл. 3.4г) настаје када су контактне површине одвојене веома танким слојем мазива (дебљине око 0.5 μm) које може образовати довољно трајне адсорпционе слојеве. Гранични слојеви могу бити састављени од водене паре, оксида, сулфата и уља која садрже масне киселине (нпр. олеинску, палмитинску или стеаринску киселину). При томе је дејство масних киселина нарочито изражено када спољашњи слојеви метала учествују у хемијској реакцији са киселином.
- *Суспензионо течностно трење* (сл. 3.4д) је доста распрострањено у практичним условима. У мазива овог типа спадају: графитно-уљне и водено-уљне суспензије са пуниоцима као што су: MoS_2 , графит, талк итд. Шема суспензионо течностног подмазивања, дата је на слици 3.4д, где се запажа сложени процес деловања контактних површина, дисперзионе фазе (чврстих честица) суспензије и дисперзионог средства (растварача). Резултат те интеракције представља сложени хидродинамички процес у целој запремини мазива, и у самом мазивом слоју (суспензији).
- *Течно трење у чврстој фази* (сл. 3.4ђ) остварује се помоћу превлаке (са мазивом и без њега). Ова врста подмазивања је, у извесном смислу, варијанта суспензионог подмазивања где честице дисперзионе фазе образују континуални слој који добро приања на контактне површине. Тој групи мазива припадају: лакови, фолије од синтетичких материјала, фосфатне и оксидне превлаке. Превлаке спречавају директан контакт метала, али не смањују увек трење.
- *Течно трење у течностној фази* (сл. 3.4е) настаје код потпуног или хидростатичког подмазивања. У циљу добијања ових типова подмазивања примењују се специјално конструисани алати, при чему се мазиво доводи под одговарајућим притиском између контактних површина.

У већини поступака пластичног обликовања режим трења је гранични, при чему у макро размерама могу настати комбинације различитих режима трења. Овакав приступ је потврђен у истраживањима [13, 14, 39]. Потешкоће које, том приликом, настају односе се на тачно одређивање површина које су у директном контакту, односно површина које су раздвојене (нпр. методама интерференције и тсл.).

У зависности од дебљине слоја мазива при граничном трењу, развијене су и теорије које се на такве случајеве односе. При трењу прве врсте [13, 39], када је слој мазива веома танак (нпр. 0.5 μm) од пресудног су утицаја адсорпциона својства контактних површина. При граничном трењу друге врсте, са релативно великом дебљином слоја мазива, важна су механичка својства мазива и вискозност.



Слика 3.4 Модел интеракције контактеног пара са мазивом: а) идеално суво трење, б) технички суво трење, в) мешовито трење, г) гранично трење, д) течно трење (суспензионо,) е) течно трење (са чврстим мазивим слојем), е) течно трење у течној фази [39, 50]

У експерименталном делу овог рада (провлачење траке лима између равних контактних површина), контактни пар чине површине алата (матрица и држач лима) веће тврдоће, с једне стране, и површина траке лима, с друге стране. Лим има израженију површинску храпавост у односу на храпавост површина алата. Хемијски састав и механичке карактеристике материјала контактеног пара (алата и трака лима) се разликују. На овом моделу клизања између равних контактних површина карактеристичне су две зоне: зона клизних елемената (држача и матрице) и зона клизања траке лима.

Примена мазива код оваквих контактних парова са израженом храпавошћу површине лима, при клизању, може довести до затварања мазива у тзв. “цепове“ неравнина и стварања услова за мешовито трење у тим зонама. Важан утицај на стварање услова за мешовито режим трења у реализованом експерименту, има и симултана промена контактеног притиска за време трајања процеса, која је предвиђена планом експеримента.

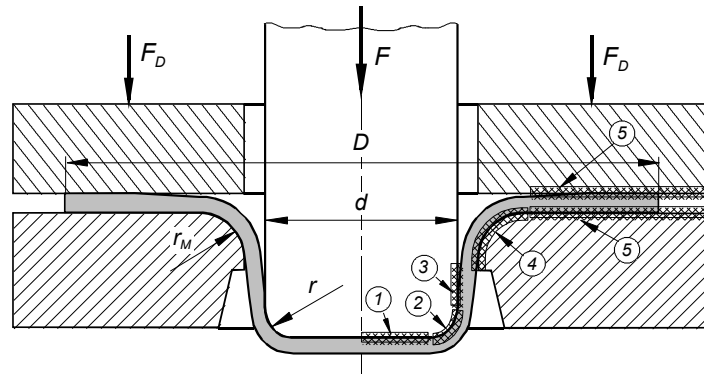
3.4. Триболошки параметри при дубоком извлачењу

Дубоко извлачење је поступак обраде танких лимова којим се од равног лима са приближно димензионалним полазним обликом, добија просторни тродимензионални комад компактне конфигурације. Основу алата чине три радна елемента: извлакач, матрица и држач (сл. 3.5).

Држач лима има важну улогу код овог поступка обликовања лима, по чему се битно разликује од осталих поступака. За време обликовања извлакач, одговарајућег облика и димензија, континуално повлачи лим из обода и формира задати геометријски облик тј. радни комад.

На успешност обраде дубоким извлачењем, осим осталих утицајних параметара, највише утиче контрола и управљање клизањем лима на ободу, што је предмет многих истраживача из ове области [1, 4, 6, 7, 9, 14, 15, 33, 39]. Код извлачења осносиметричних цилиндричних комада (чисто дубоко извлачење), вредности сила држања су кључне за карактер течења лима на ободу.

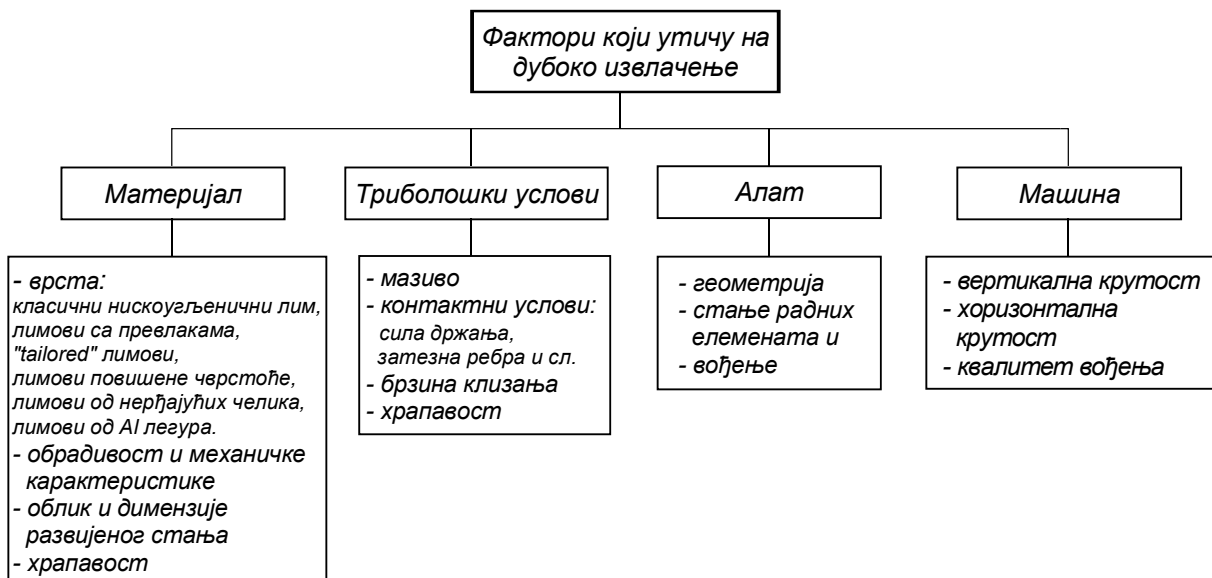
Код извлачења осносиметричних нецилиндричних и сложених облика за контролу клизања лима на ободу примењују се тзв. затезна ребра [14, 15, 51].



Слика 3.5 Основна шема дубоког извлачења

Обраду дубоким извлачењем одликује врло сложено и нестационарно напонско-деформационо стање, како код извлачења осносиметричних, тако и код извлачења сложених комада, што је последица постојања више различитих зона трења (сл. 3.5). У зонама 1, 2 и 3 код нормалног одвијања процеса присутно је веома мало клизање које је у условима интензивног трења готово занемарљиво. Зоне 1, 2 и 3 представљају зоне пожељног утицаја трења (позитивно трење) [13]. У зонама 4 и 5, присуство већег трења није пожељно. Код извлачења нецилиндричних осносиметричних комада, као и сложених геометрија, осим ових зона, присутна је и зона у којој је постављено затезно ребро у циљу повећања отпора течења лима. Триболошки модел вучења траке преко затезног ребра је нешто раније истраживан [14, 51].

Интензитет и расподела контактних напона утичу на напонско-деформационо стање, могућност обликовања и параметре процеса (деформациона сила и рад). Радни комади жељеног квалитета (без пукотина, прслина, набора, зона великог стањења, површинских огреботина и оштећења) могу се добити само потпуним управљањем и контролом поступка дубоког извлачења. Тиме се подразумева да су сви фактори који директно и индиректно утичу на процес контролисани (сл. 3.6). Утицај триболошких фактора равноправан је са утицајем осталих главних фактора на процес дубоког извлачења [15].



Слика 3.6 Шема утицајних фактора на дубоко извлачење

За разлику од осталих утицајних фактора на процес дубоког извлачења, триболошким факторима је знатно лакше утицати на успешност одвијања процеса (промена мазива, шеме подмазивања, промена силе држања и висине затезног ребра). Наведене предности усмериле су велики број истраживача на праћење утицаја променљиве силе држања (притиска држача) и висине затезног ребра на успешност процеса дубоког извлачења. Као што је наведено, утицајима на ободу

може се управљати променљивом силом држања и променом висине затезног ребра. Утицај променљиве силе држања на ободу применом различитих врста материјала радног комада, превлака на алатима и мазива представља предмет изучавања овог рада. Примењен је триболошки модел клизања између равних контактних површина клизних елемената који симулирају држач и матрицу [13].

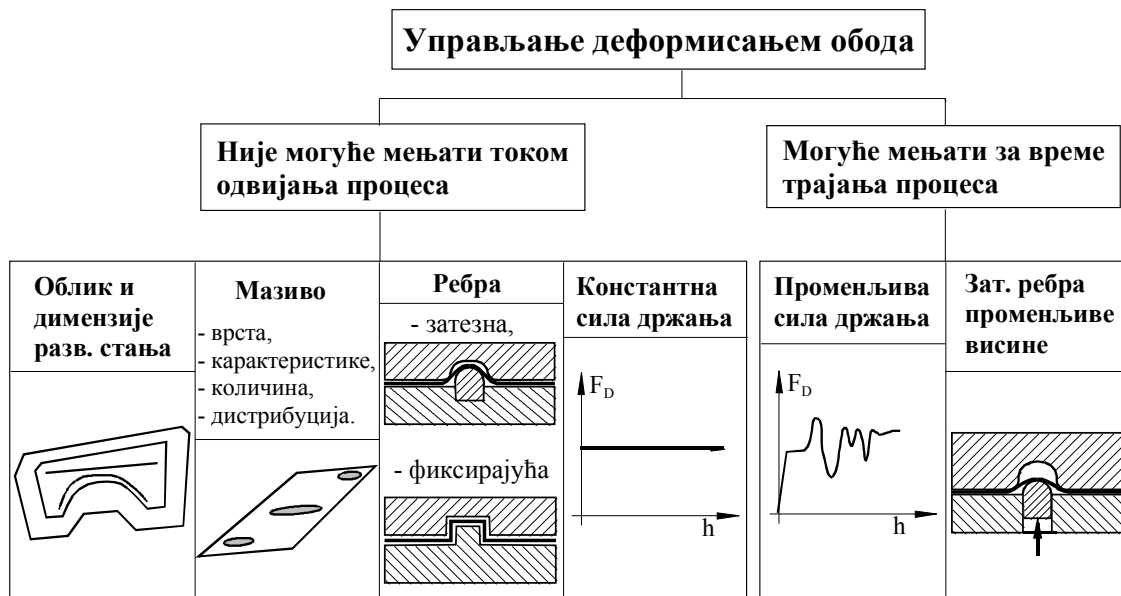
3.4.1. Утицај силе држања на процес дубоког извлачења

Специфични контактни притисак тј. сила држања у процесу дубоког извлачења има велики значај. Смањењем контактнoг трења у одређеним зонама, тј. на матрици и држачу, укупна сила извлачења (деформациона сила) може се смањити и преко 50%. Интензитетом силе држања је могуће релативно једноставно управљати. Тиме, сила држања постаје управљајућа величина (поред тога што је управљана) за процес обликовања (трење на ободу) што има крајњи циљ - комад без дефеката, одговарајућег квалитета. На слици 3.7 приказани су начини управљања клизањем (течењем) лима на ободу [33].

Важно је нагласити да се за време трајања процеса дубоког извлачења, једино променљива сила држања и висина покретних затезних ребара могу мењати. Према томе, ова два фактора постају једине управљајуће величине у процесу обликовања лима дубоким извлачењем. Процес дубоког извлачења је јако осетљив на промене трења на ободу, тако да и мале неконтролисане промене могу процес усмерити у негативном правцу тј. у правцу нестабилности и неуспешног краја.

Локално повећање развијеног стања повећава силу извлачења и трење, и тиме отежава клизање лима. Обрнуто, локално смањење развијеног стања олакшава клизање лима на ободу.

У овом раду, уз помоћ оригиналног експерименталног уређаја биће реализовани експерименти процеса вучења траке између равних контактних површина са константном силом држања, променљивом силом држања и применом више типова превлака на алатима, различитих врста лимова и мазива.

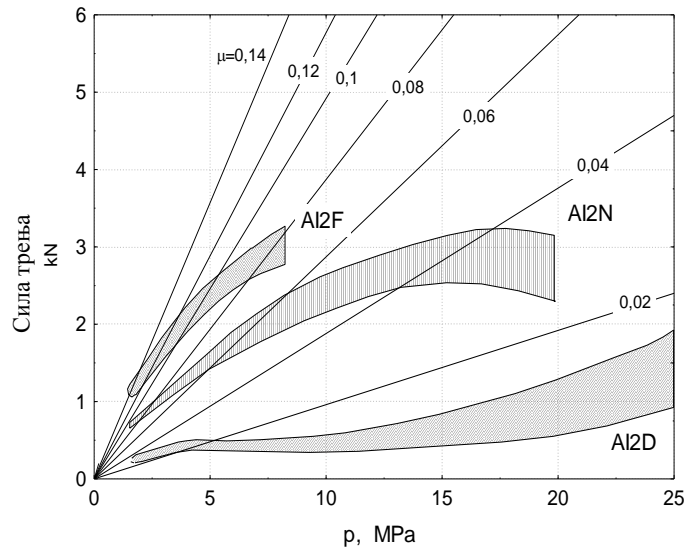


Слика 3.7 Начини за управљање деформисањем на ободу лима

У зависности од густине, вискозности и промене коефицијента трења од притиска, нису сва мазива погодна за процес вучења са променљивом силом држања. Због линеарне везе силе држања и силе трења [33], за управљање процесом са променљивом силом држања тј. контактнoг притиска, погоднија су мазива која имају мањи вискозитет (сл. 3.8). Мазива са већим вискозитетом су погоднија за примену када је приоритет смањење коефицијента трења, тј. када се контактни притисак не користи за управљање процесом.

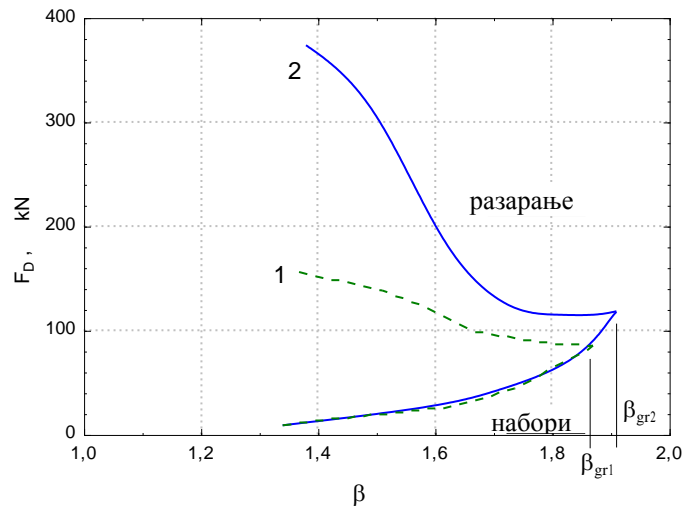
Код обликовања лима дубоким извлачењем појава набора на ободу и појава пукотине тј. лома на критичном месту, су два најважнија дефекта. Поред тога, могу настати и други дефекти: абразивна оштећења-бразде, огреботине, адхезивна оштећења-прилепљени остаци превлаке лима,

повећање храпавости и слично, као и места са стањењем лима, која углавном зависе од стања површине.



Слика 3.8 Зависност силе трења од притиска [33]

На слици 3.9 приказана је зависност силе држања F_D од степена извлачења β (за 2 материјала). Сила држања утиче на спречавање набора, одлагање и избегавање разарања [33, 52]. Интензитет силе држања треба бити тако одређен да се обезбеди успешно одвијање процеса између појаве набора (доња крива) и настанка лома (горња крива). На дијаграму се јасно види да је при већим степенима извлачења растојање између ових кривих све мање што процес чини непозданијим.

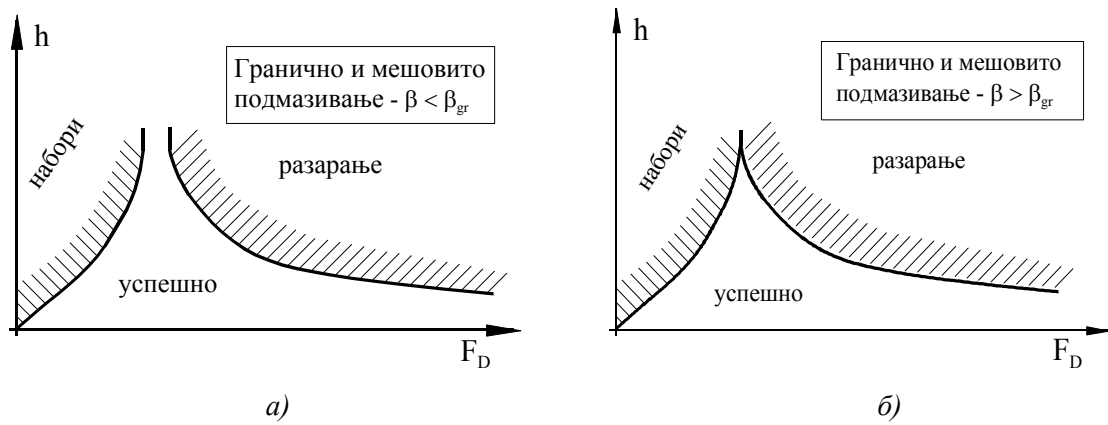


Слика 3.9 Зависност силе држања од степена извлачења

На дијаграмима (слике 3.10 и 3.11) приказане су зависности дубине извлачења h (хода извлакача) од силе држања F_D , на којима је приказан однос поља набора, разарања и успешне обраде за једну вредност (β). За добијање граничне криве потребно је извлачити серију комада једнаке геометрије, уз постепени пораст силе држања. На датим дијаграмима су јасно уочљиве разлике при промени типа подмазивања, односно режима трења и степена извлачења (β). Ове криве имају практични значај, јер се на основу тих зависности може оптимизовати сила држања према критеријуму максималне дубине извлачења.

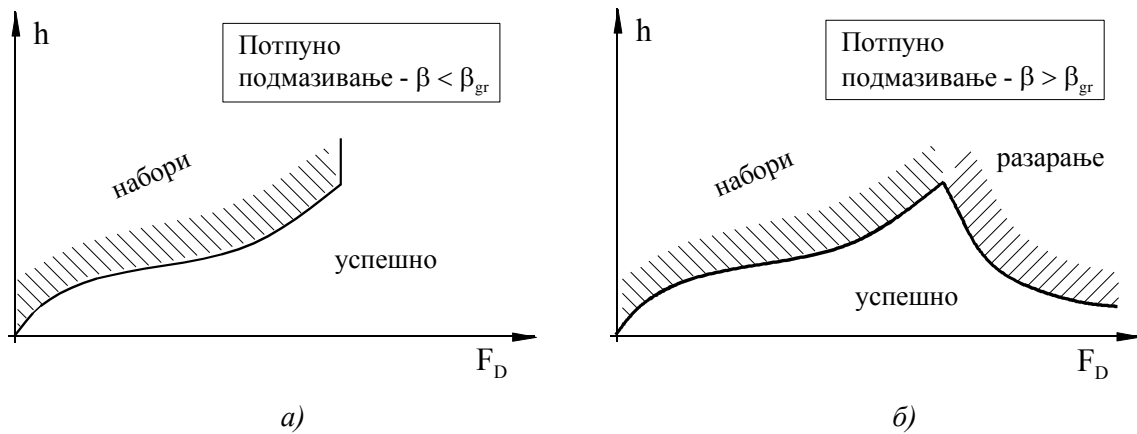
Код степена извлачења мањег од граничног (сл. 3.10а), види се карактеристичан пролаз тј. растојање између кривих набора и разарања, које представља сигурносну зону, односно вредности оптималне силе држања F_D за успешну обраду.

На слици 3.10б јасно се види да није могуће добити радни комад без дефеката, јер нема сигурносне зоне, тј. растојања (пролаз је затворен) који гарантује сигурну обраду.



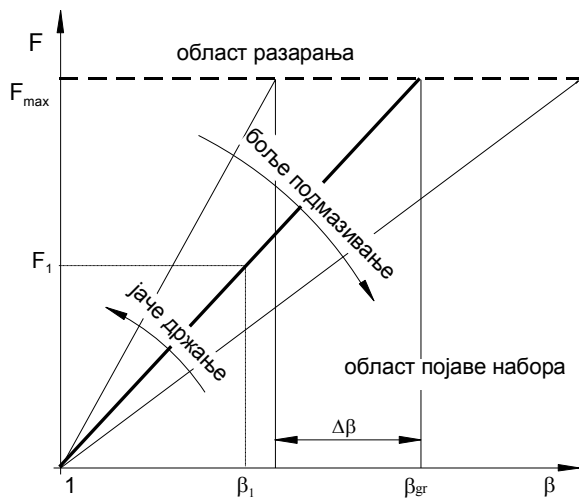
Слика 3.10 Зависност дубине извлачења од силе држања при граничном и мешовитом подмазивању: а) $\beta < \beta_{gr}$, б) $\beta > \beta_{gr}$

Ако је степен извлачења мањи од граничног, у случају потпуног подмазивања, порастом силе држања није могуће остварити разарање радног комада (сл. 3.11а). Када је степен извлачења већи од граничног (сл. 3.11б) тренд кривих је сличан као на сл. 3.10.

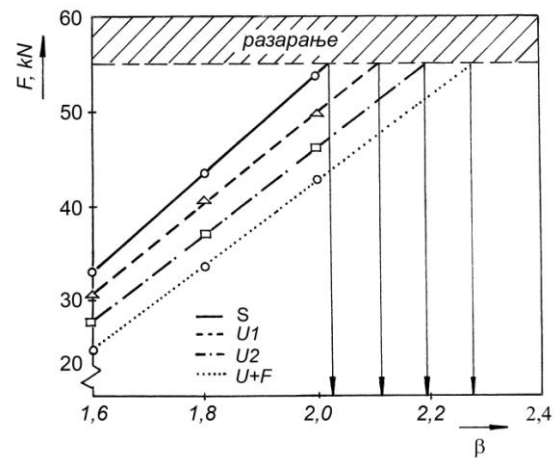


Слика 3.11 Зависност дубине извлачења од силе држања при потпуном подмазивању: а) $\beta < \beta_{gr}$, б) $\beta > \beta_{gr}$

Зависност силе извлачења (F) од степена извлачења β дата је на сликама 3.12 и 3.13 [15]. На слици 3.12 може се видети да већи интензитет силе држања смањује гранични степен извлачења β_{gr} , али да сужава поље могућих набора.



Слика 3.12 Зависност силе од степена извлачења

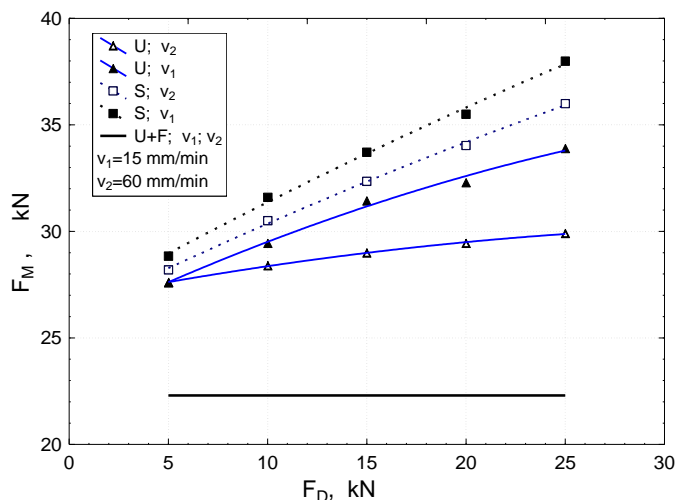


Слика 3.13 Зависност силе од степена извлачења (експерименталне вредности)

Слика 3.13 приказује резултате конкретног истраживања где су варирани услови подмазивања (S-потпуно суве површине, U1 и U2 - примена два различита уља за дубоко извлачење и U+F примена уља и полиетиленске фолије). Смањењем контактнoг трења тј. бољим подмазивањем повећава се степен извлачења, а разарање се одлаже до већих вредности v .

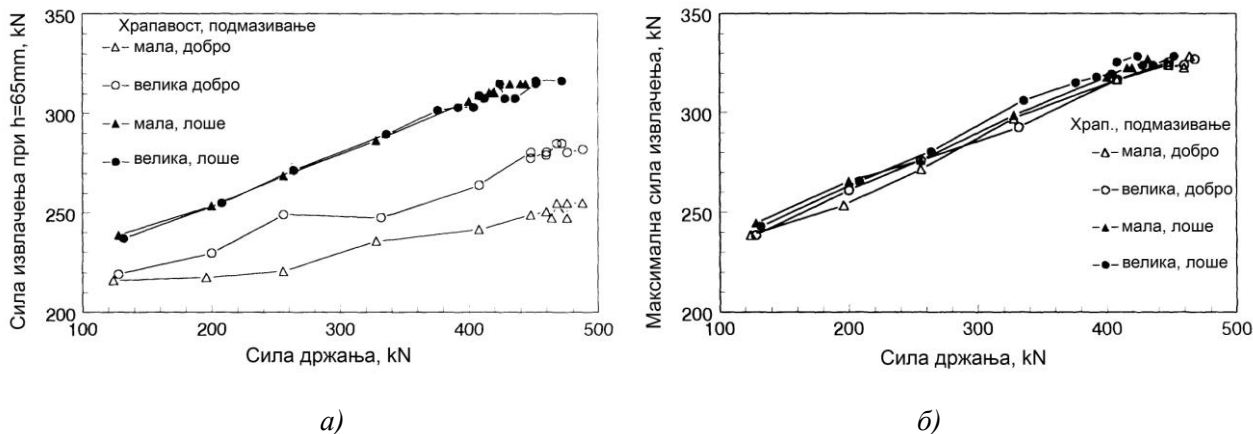
Зависности силе извлачења од силе држања при различитим контактним условима (слике 3.14, 3.15 и 3.16), могу бити корисне при изучавању и реализовању управљања трењем на ободу.

Дијаграм на слици 3.14 показује да сила држања и брзина, код потпуног подмазивања (уље и полиетиленска фолија – U+F), немају утицаја на силу извлачења (јер практично нема трења на ободу). Исто тако повећање контактнoг трења утиче на повећање највеће силе извлачења, док повећање брзине доводи до њеног смањења.



Слика 3.14 Зависност највеће силе извлачења од силе држања (експериментални резултати) [12]

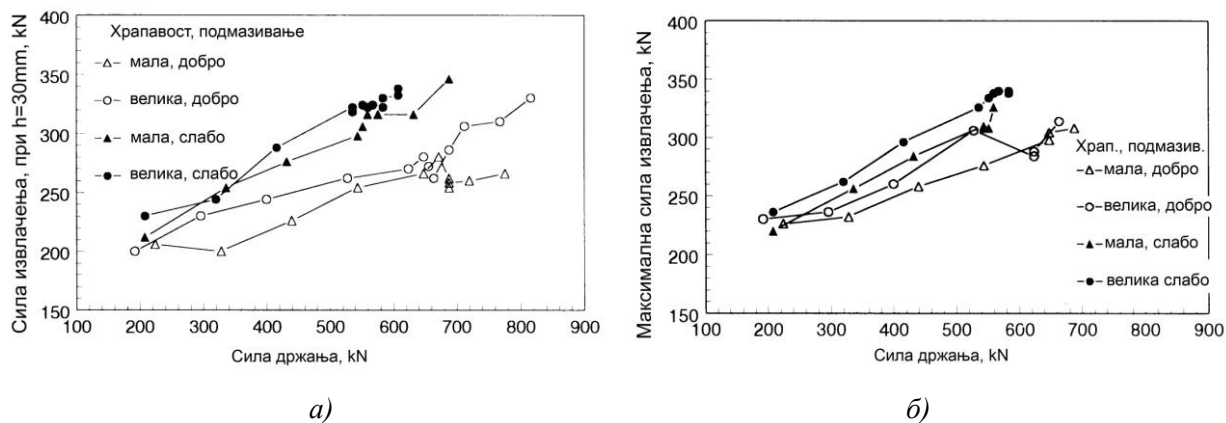
Слични резултати приказани су на сликама 3.15 и 3.16 [1]. На слици 3.15 се потврђује линеарност силе извлачења од силе држања ($F-F_D$) као и мали утицај храпавости у оба случаја подмазивања. Дијаграми су добијени при извлачењу цилиндричних комада ($D_0 = 520 \text{ mm}$, $d = 293 \text{ mm}$) од челичног лима.



Слика 3.15 Зависност силе извлачења од силе држања за цилиндричне комаде: а) при ходу $h = 65 \text{ mm}$ и б) при максималној вредности силе извлачења

На слици 3.16 нема већих разлика у зависностима, осим веће осетљивости на мање промене трења код извлачења кутијастих комада ($808 \times 198 \text{ mm}$), у односу на извлачење цилиндричних комада.

У прилог тумачењу зависности на дијаграмима (слике 3.15 и 3.16) дато је поједностављено аналитичко разматрање везе између силе извлачења и силе држања. На илустративан и практичан начин описују се односи основних фактора у процесу дубоког извлачења и као резултат даје се веза силе држања и силе извлачења [1].



Слика 3.16 Зависност силе извлачења од силе држања за кутијасте комаде: а) при ходу $h = 30 \text{ mm}$, б) при максималној вредности силе извлачења

Израз за укупну силу извлачења F_{IZ} може се написати у облику [14, 44]:

$$F_{IZ} = (F_{OBL} + F_{TRD}) \cdot E^{\frac{\pi}{2} \mu_M} + F_{SAVIS}, \quad (3.6)$$

где су: F_{OBL} - сила деформисања обода;

F_{TRD} - сила трења на држачу;

F_{SAVIS} - сила савијања и исправљања преко заобљења ивице матрице;

μ_M - коефицијент трења на заобљењу ивице матрице.

Ако се занемаре сви напони савијања, лим се понаша као деформабилна мембрана која трпи пластично деформисање на ободу и изложена је трењу услед силе држања и услед клизања преко заобљења ивице матрице. У таквим условима може се сматрати да се активна деформациона сила на извлакачу преноси на обод, где делује као "вучна сила". Са претходним претпоставкама, израз за силу извлачења цилиндричног комада (3.6), могуће је написати као:

$$F_{IZ} = (F_{OBL} + 2 \cdot \mu_D \cdot F_D) \cdot e^{\frac{\pi}{2} \mu_M}, \quad (3.7)$$

где су: μ_D - коефицијент трења на држачу и

F_D - сила држања.

Међутим, постоји разлика у брзинама кретања извлакача и клизања обода. Чело извлакача има ход једнак укупној дубини комада h , што је из услова једнакости почетне и крајње површине комада, приближно једнако:

$$h \approx \frac{D_0^2 - d^2}{4 \cdot d}, \quad (3.8)$$

где су: D_0 - пречник развијеног стања лима, а

d - пречник извлакача.

Ивица обода, за исто време, пређе растојање $\frac{D_0 - d}{2}$. Деформациони рад силе извлакача (F_{IZ}),

на растојању h , мора да буде једнак деформационом раду силе која увлачи обод (F_{OB}), на растојању које пређе ивица обода, односно:

$$F_{IZ} \cdot h = F_{OB} \cdot \frac{D_0 - d}{2}, \quad (3.9)$$

при чему се добија:

$$F_{IZ} = F_{OB} \cdot \frac{d}{D_{sr}}, \quad (3.10)$$

где је: $D_{sr} = \frac{D_0 + d}{2}$.

Коначно, коригована сила на извлакачу износи:

$$F_{IZ} = \frac{d}{D} \cdot (F_{OBL} + 2 \cdot \mu_D \cdot F_D) \cdot e^{\frac{\pi}{2} \cdot \mu_M} \quad (3.11)$$

Ако се претпостави да сила деформисања обода (F_{OBL}) не зависи од силе држања (F_D), први извод силе извлакача по сили држања је:

$$\frac{dF_{IZ}}{dF_D} = 2 \cdot \mu_D \cdot \frac{d}{D_{sr}} \cdot e^{\frac{\pi}{2} \cdot \mu_M} \quad (3.12)$$

Уколико се узму уобичајене вредности коефицијента трења и односа пречника: $\mu_M = 0.15$
 $\frac{d}{D_{sr}} = 0.6 - 0.9$; у првој апроксимацији биће: $\frac{d}{D_{sr}} \cdot e^{\frac{\pi}{2} \cdot \mu_M} \approx 1$. На основу овог може да се дефинише тзв. фактор трења који је једнак половини првог извода F_{IZ} по F_D (једначина 3.12), односно половини коефицијента правца тангенте у посматраној тачки криве зависности $F_{IZ}-F_D$:

$$f_{\text{тр}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dF_{IZ}}{dF_D} \approx \mu_D \quad (3.13)$$

Приметно је да је фактор трења у блиској вези са коефицијентом трења на држачу.

Врло је погодно изводити студијска разматрања утицаја трења преко дијаграма зависности $F_{IZ}-F_D$ уз одређивање фактора трења. Ако је зависност $F_{IZ}-F_D$ линеарна (као што је случај на претходним сликама), веома је једноставно приближно одредити коефицијент трења на држачу (једнак је половини коефицијента правца праве).

3.5. Тврде превлаке на алатима

Трење и хабање елемената у контакту, као и агресивно физичко-хемијско дејство околине, одвија се на ограниченим површинама реалних трибо-механичких система. У технологији пластичног обликовања често су присутни високи радни напони и оптерећења алата, изложеност високим температурама (топло ковање), па је неопходно наношење превлака на површини алата у циљу очувања постојаности алата и отпорности на разне утицаје. Веома мали део запремине контактних елемената, у танким слојевима материјала, изложен је високим оптерећењима и неповољним дејствима окружења, тако да постоји очигледна потреба за различитим карактеристикама материјала по дебљини. Карактеристике материјала изражене преко коефицијента трења, отпорности на хабање, заморне чврстоће, отпорности на корозију и тсл. условљене су физичко-механичким својствима материјала у танким површинским слојевима. Микроструктура (заостали напони, напрезања и тсл.), макрогеометрија (неуравњеност, овалност и др.) и микрогеометрија (валовитост и храпавост) површина формирају се за време технолошког процеса обраде уз преношење својстава из претходних на завршне операције обраде. Оптимални избор је наношење површинског слоја бољих карактеристика од основног материјала, веома исплатив из енергетског и економског аспекта.

Карактеристике и отпорност на хабање површинских слојева алата за дубоко извлачење зависе искључиво од њихових физичко-хемијских особина. Један од начина за побољшање квалитета површина је наношење превлака на основни материјал.

Превлаке се могу поделити према различитим критеријумима. Према тврдоћи деле се на „тврде“ и „меке“, а према намени на [53]:

- антихабајуће превлаке,
- заштитне и декоративне превлаке,
- термичке баријере („ТВС“ превлаке),
- оптичке превлаке и
- регенеративне превлаке.

Код технологије дубоког извлачења највише се примењују антихабајуће превлаке на појединим деловима алата, јер испуњавају следеће захтеве:

- имају низак коефицијент трења,

- поседују отпорност на хабање (*механичко*: абразивно и микрорезање; *физичко-хемијско*: трибо-хемијско, адхезионо, дифузионо, оксидационо и хабање услед замора),
- поседују отпорност на оптерећења (статичко, динамичко, ударно).

Наведене захтеве најбоље испуњавају карбиди, нитриди и бориди прелазних метала. Материјали тврдих превлака могу се груписати према заступљености јаким примарним хемијских веза на:

- металне тврде материјале са металном везом и
- неметалне материјале (нпр. дијамант) са ковалентном или јонском везом.

Ове две групе материјала имају релативно високу тврдоћу, да би могли поднети механичка оптерећења. Материјали који се најчешће користе за превлаке поседују три типа веза: металне, ковалентне и јонске.

Најчешће коришћени материјали за тврде антихабајуће превлаке су:

- карбиди прелазних метала IV групе (TiC, ZrC), V групе (VC, NbC, TaC) и VI групе (ZrC, MoC, WC),
- нитриди прелазних метала IV и V групе: TiN, ZrN, VN, TaN.
- боридне превлаке: TiB₂, CrB₂ и TaB₂,
- оксидне превлаке међу којима је најпознатији Al₂O₃ (најчешће у оквиру вишеслојних структура са TiN и TiC,
- супертврде превлаке: дијамантске и дијаманту сличне превлаке-DLC (енг. *diamond like carbon*) и кубни бор нитрид,
- вишекомпонентне тврде превлаке.

3.5.1. Поступци наношења антихабајућих превлака

Савремени поступци наношења тврдих антихабајућих превлака могу се разврстати у четири основне групе:

1. CVD поступци (енг. *Chemical vapor deposition*) или хемијско наношење из гасовите фазе;
2. PVD поступци (енг. *Physical vapor deposition*) или физичко наношење из гасовите фазе;
3. TD поступци (енг. *Toyota Diffusion*) или дифузиони поступци наношења карбида;
4. Термички поступци (гасни, електролучни, плазма и ласерски).

Хемијско наношење превлака из гасовите фазе је процес познат у свету као *CVD поступак*. Одвија се наношењем у гасовитој фази под одређеним притиском (вакуумом). CVD поступак има дугу историју примене. Први пут је примењен код превлачења жице за сијалице, једињењима чистих метала (W, Ti, Ta, Cr, Zr, Hf) и неметала (B, Si и др.). Због недостатка техничких услова (адекватне вакуум пумпе, мерних инструмената, итд.) поступак није индустријски реализован све до краја педесетих година прошлог века. Тада започиње интензивни развој и примена, пре свега, у индустрији полупроводника.

CVD поступак карактеришу високе температуре процеса (900 – 1000°C), тако да се углавном користи за превлачење тврдог метала. Наношење TiN превлака CVD поступком је класична метода, са доста расположивих литературних података [53], дефинисаном зависношћу брзине наношења титан-нитрида од температуре и објашњењем утицаја састава и протока гасне средине, итд. Најважнији утицајни фактори којима се може деловати на побољшање адхезије превлаке и основног материјала (подлоге) су: квалитет подлоге, начин припреме основног материјала, технолошки параметри процеса, физичке особине депонованог слоја, термички третман радног комада после наношења. За време процеса наношења превлаке могу настати и одређени негативни ефекти у структури основног материјала, углавном због високе радне температуре (око 1000°C). Најчешће настају: разугљенисавање, образовање међуслоја богатог карбидима, пораст кртости основног материјала услед излучивања карбида по границама металних зрна, пораст величине зрна на високим температурама наношења и други неповољни утицаји. Наведени негативни ефекти се углавном отклањају променом параметара процеса наношења превлака, повећањем топлотног флукса са енергијом испод критичног прага појаве оштећења у решетки депонованог слоја.

PVD поступци су засновани на наношењу тврдих превлака путем физичког наношења из гасовите фазе. Поступак обухвата следеће фазе:

- *превођење материјала* који се депонује на подлогу, из чврстог у гасовито стање,

- *трансфер материјала* превлаке до подлоге, уз активирање реактивног и носећег гаса,
- *депоновање материјала* на подлогу, при чему се одвијају термохемијске реакције.

С обзиром на процес који се користи за превођење материјала из чврстог у стање паре могу се издвојити три основна поступка: вакуумско испаравање, распршивање и јонско прекривање (реактивно и нереактивно).

Наведени поступци омогућавају превлачење било ког основног материјала неорганским превлакама свих врста. За добијање неких врста превлака испарени материјал ступа у реакцију са реактивним гасом формирајући материјал превлаке (реактивно распршивање и реактивно јонско прекривање). Код реактивног распршивања хемијске реакције се одигравају на површини подлоге, на којој долази до формирања слоја превлаке. У случају наношења распршивањем материјал за депоновање се преводи из чврстог у стање гасне плазме. Код пражњења у инертном гасу честице распршеног материјала не реагују са честицама гаса, па је тај процес познат као нереактивни.

Јонско прекривање је процес у коме се формирање и раст танког слоја на површини одвија у условима бомбардовања честицама плазме. Бомбардовање основног материјала, за време раста дебљине слоја, остварује се његовим довођењем на негативан потенцијал у односу на плазму.

TD (Toyota Diffusion) процес спада у најједноставније и најјефтиније поступке наношења антихабајућих превлака. Реч је о дифузионом поступку обогаћивања и прекривања површине карбидима. У поређењу са CVD и PVD процесима, примењује се једноставнија опрема тако да су трошкови процеса минимални. Поступак је развила и патентирала, под називом *TD process*, Тојотина централна лабораторија за истраживање и развој [53]. TD процесом се добијају глатке и танке карбидне превлаке од WC, NbC или Cr₇C₃. Овако нанета превлака поседује велику тврдоћу, високу отпорност на хабање и хемијску отпорност (оксидација, корозија). Процес је заснован на једноставним операцијама загревања и потапања челичног комада у соно купатило са раствором боракса и елемената који са угљеником формирају карбиде волфрама, ниобијума, хрома. Наношење превлаке се лако остварује, јефтино је, нема загађења околине и не захтева заштитну атмосферу. Процес није условљен сложеном опремом.

Реагенси који се налазе у купатилу су јефтине и трајност купатила је велика. Превлака се може селективно наносити, а постоји могућност и поновног наношења превлаке на већ постојећу превлаку. Квалитет превлаке остаје непромењен за време процеса тако да је накнадна обрада непотребна. Температура соног купатила је у интервалу од 80-1250°C, а дебљина карбидног слоја се подешава са дужином трајања процеса, температуром купатила и саставом основног материјала. Време од 30 минута до 10 часова обезбеђује оптималну дебљину подлоге 5-10 μm. Овај поступак наношења превлаке се може применити на скоро све врсте челика, никл и кобалт ниске чврстоће, метале који садрже угљеник, ливено гвожђе итд. Радни век третираних делова се продужава и по неколико пута.

Термички поступци наношења превлаке заснивају се на топљењу материјала превлаке и његовом стапању са основним материјалом, топлотним дејством гасног пламена, електричног лука, плазме, ласера или њиховом комбинацијом. Сви термички „спреј“ поступци заснивају се на истом принципу. Дејством неког од поменутих топлотних извора топи се материјал превлаке, доведен у зону стапања у виду жице, траке или праха. Потом се растопљени материјал убрзава до формирања млаза честица велике брзине. Млаз честица удара у површину основног материјала, честице се деформишу, нагло хладе и спајају са основним материјалом. Превлака се формира од великог броја ситних честица наношених слојевито.

Овим поступцима се могу наносити превлаке велике дебљине (неколико милиметара) које поседују чврсту везу са основним материјалом. Стога су нарочито погодни за репаратуру похабаних или оштећених делова алата за обраду лима, а посебно алата за топло ковање. Већина похабаних и оштећених делова алата за пластично обликовање може се успешно и поуздано обновити наношењем превлака које замењују похабани или оштећени слој, најчешће технологијом репаратурног наваривања. Резултати праћења понашања регенерисаних алата у експлоатацији показују да је њихов радни век чак и дужи од нових алата. При томе цена репаратуре износи тек 10-20% цене новог алата [54, 55].

3.5.2. Практични значај превлака

Као што је већ наведено, антихабајуће превлаке налазе примену и код алата за поступке дубоког извлачења, поред примене у различитим областима технике. Иако се превлаке углавном

испитују познатим триболошким тестовима “*ball-on-disc*” и “*pin-on-disc*”, њихова практична примена и постојаност најбоље се процењују симулаторима заснованим на триболошким моделима конкретног поступка пластичног обликовања. У раду [56] истраживана су триболошка својства супертврдих, тзв. DLC превлака (енг. *Diamond-like carbon coating*) уз помоћ апаратуре (симулатора) за дубоко извлачење са стањењем. Без обзира на познате триболошке тестове превлака, у овом раду се вршило испитивање превлака из аспекта примене у поступку дубоког извлачења. Стварање налепнина¹ на равним површинама држача и матрице услед клизања обода лима је проблем који је дуги низ година присутан у технологији дубоког извлачења. Превлачењем тих површина одговарајућим превлакама могуће је значајно смањити коефицијент трења, побољшати антихабајућа својства и појаву налепнина свести на минимум. У поменутом раду [56] испитиване су две врсте супертврдих DLC превлака: на бази силицијума (Si-DLC) и нано-ламинарна превлака (n-DLC). Превлака n-DLC је ламинирана у веома танким слојевима, дебљине свега неколико нанометара. Наношене су на површинама модела држача и матрице алата за дубоко извлачење са стањењем. Као мазиво је коришћено познато минерално уље, у једном случају, а у другом радне површине нису подмазиване. Узорци лима су били дебљине 1.2 mm. Коефицијент трења је мерен на дужини вучења од 200 mm. Примењен је поступак стањења у три фазе, са редукцијама дебљине лима 5%, 10% и 20%. Упоредо је коришћен класичан алат без превлака, при истим условима. Код стањења од 5% коефицијент трења није битно промењен у сва три случаја (без превлаке 0.13, Si-DLC 0.12, n-DLC 0.12), Међутим, код већих степена стањења 10% и 20%, коефицијент трења има знатно већу вредност код површина без превлака (чак 0.42 при 20% стањења). Код превучених површина промена коефицијента трења се може сматрати занемарљивом и не зависи од процента редукције дебљине лима (Si-DLC 0.14 и n-DLC 0.13 при 20% стањења). С друге стране, праћена је појава налепнина на алатима. Код површина без превлака, налепнине су биле веома изражене, што је коначно и довело до пораста коефицијента трења, док су површине са превлакама биле у стању као пре почетка експеримента.

У опсежној докторској дисертацији [57] испитиван је утицај микроструктуре на триболошка својства алатног челика са TiAlN превлаком добијеном технологијом металургије праха. Различите микроструктуре овог челика добијене су термичком обрадом на два начина: а) каљењем у вакууму са три третмана високог отпуштања и б) дубоким замрзавањем (каљење у вакууму, дубоко замрзавање у криогеном апарату и високо отпуштање). Код појединих структура спроведено је нитрирање у плазми јонизујућих гасова. На тако припремљену подлогу нанета је TiAlN превлака PVD поступком. Микроструктура је испитивана помоћу SEM и TEM електронских микроскопа и рендгенском дифракцијом (XRD). Истраживана је отпорност на адхезивно хабање одређивањем критичних сила методом растућег оптерећења. Превлаке су испитиване непрекидним хабањем при стругању. Резултати су показали да хлађење на ниским температурама и нитрирање утичу на побољшање адхезивне везе брзорезног челика и TiAlN превлаке, чиме се остварује већа отпорност на хабање нарочито у условима абразивног хабања.

У раду [58] истраживане су карактеристике превлаке добијене наношењем слоја CrAlSiN на већ нанети слој DLC превлаке. Као основни материјал коришћен је високолегирани алатни челик X40CrMoV5-1. Примењени су поступци PVD и PACVD са ротирајућом катодом. Истраживања су спроведена у циљу повећања тврдоће превлаке, постизања боље адхезивне везе превлаке са основним материјалом и смањења коефицијента трења на најмању могућу меру. Микроструктурна анализа је спроведена помоћу SEM микроскопа, при чему су уочени кристали CrAlSiN величине 10 nm. Такође је регистрована веома јака адхезивна веза између свих слојева. Коефицијент трења је мерен у условима сувог трења и регистроване су веома ниске вредности у опсегу од 0.05 до 0.07, што раније није идентификовано код класичних DLC превлака. Примењен је и “*ball-on-disc*” тест хабања, при чему су продукти хабања значајно мањи од очекиваних.

Група аутора у раду [59] истраживала је хабање и трајну деформацију DLC превлаке и основног материјала под дејством наизменичног (цикличног) ударног оптерећења. DLC слој превлаке нанет је PVD поступком на основни материјал (хром-молибденски челик). Истраживање је засновано на примени уређаја за тестирање ударних цикличних оптерећења. Примењен је широк опсег поменутих оптерећења са одговарајућом периодиком понављања као и нормална оптерећења. Циљ испитивања је регистровање почетка процеса трајних деформација и хабање превлака при

¹ Налепнине = налепљени слојеви метала, налепљене честице; продукти настали на контактним површинама услед сложених процеса трења и хабања

одређеном броју понављања оптерећења, као и деградација превлаке са пропагацијом прслина. Рад има нарочити практични значај код ротационих делова где су присутна променљива циклична оптерећења и код којих се интензитет хабања може умањити применом одговарајуће превлаке.

У раду [60] аутори су базирали своја истраживања на повећању радног века покретних делова мотора са унутрашњим сагоревањем, испитивањем клипних прстенова са DLC превлаком. Коришћен је трибометар („ball-on-disc“ тест) у циљу процене хабања. Мерен је и коефицијент трења. Упоредо са DLC превлаком коришћен је и челик од кога се израђују клипни прстенови. Коришћена су два типа мазива: комерцијално синтетичко уље (SAE 40) и ново уље развијено за потребе експеримента, под ознаком у раду “Jathropa oil”. Карактеристике оба мазива су дате табеларно. Вредности коефицијента трења појединих комбинација контактеног пара и мазива су: DLC/DLC контактни пар – 0.065; челик/челик контактни пар – 0.12 и челик/DLC контактни пар са мазивом “Jathropa oil” – 0.075. Комбинација контактеног пара DLC/DLC и мазива “Jathropa oil” даје најнижу вредност коефицијента трења – 0.045. Ови подаци су веома значајни из аспекта дуготрајности клипних прстенова и њиховог хабања, и указују на будућност примене превлака код покретних делова мотора и осталих трансмисионих делова у аутомобилској индустрији. Томе додатно доприноси и развој нових врста уља за подмазивање.

Триболошке карактеристике супертврдих DLC превлака у комбинацији са новом врстом уља, биле су предмет истраживања и у раду [61] Технолошког института из Токија. Циљ истраживања је максимално смањење контактеног трења и хабања коришћењем мазива са адитивима молибден-дитио-карбаматом (MoDTC) и цинк-дитио-карбаматом (ZnDTC). Коришћене су три врсте супертврдих превлака, чији су хемијски састави и технологија добијања детаљно изложени у раду. Тестови трења и хабања су спроведени на трибометру. После триболошких испитивања, површине превлака детаљно су анализирани фотоелектричном спектроскопијом, помоћу \times зрака. Општи закључак је да нова врста адитива у мазиву значајно смањује интензитет хабања превлаке, чак и при нешто већим брзинама кретања површина у релативном контакту.

Сличном тематиком бавили су се истраживачи у радовима [62] и [63]. У раду [62] је истраживано више супертврдих превлака. Варирањем њиховог хемијског састава и технологије наношења на основни материјал добио се широки дијапазон превлака различитих састава и триболошких карактеристика. Свака од добијених превлака је испитивана познатим тестовима хабања, мерени су коефицијенти трења и резултати су међусобно упоређивани. У раду [63] су упоређиване супертврде DLC превлаке са превлакама на бази легура титана. Пре триболошких тестова, поменуте превлаке су загреване у различитим температурским интервалима и при тим условима је праћен њихов интензитет хабања, коефицијент трења и постојаност адхезивних веза са основним материјалом.

Рад јапанских аутора из 2011. године [64] базиран је на утицају дебљине DLC превлаке на њена триболошка својства. У овом случају утицај дебљине превлаке (3 и 10 μm) на коефицијент трења и интензитет хабања испитиван је у практичним условима, на зупчастом пару. Пре наношења DLC превлаке на зубе зупчаника, у једном случају вршен је термички третман нитрирањем, а у другом случају није било нитрирања. Тиме се додатно истраживао утицај претходног термичког третмана на постојаност и век превлаке. Зупчаници су тестирани познатим тестовима хабања на собној температури и вакууму. Боља отпорност на хабање и нижи коефицијент трења запажени су код дебље превлаке, нарочито у случају претходне припреме површина третманом нитрирања.

У раду [65] приказани су резултати микроструктуре и карактеристике нове превлаке добијене наношењем танког слоја титана и азота на DLC превлаку. Као основни материјал коришћена је магнезијумова легура. Рад је више базиран на истраживању хемијске постојаности превлаке, адхезивне везе и њене отпорности на корозију. Примећено је да танак слој TiN превлаке значајно побољшава отпорност на хабање и даје бољу корозивну отпорност превлаци, као и бољу повезаност превлаке са површином основног материјала.

Отпорност на механичка оштећења, хабање и остале триболошке карактеристике супертврдих DLC превлака, у условима са и без подмазивања, биле су предмет истраживања рада [66]. Примењена су два типа DLC превлака, хидрогенизована (добијена методом магнетронског распршивања) и нехидрогенизована. Подмазивање је вршено слојевима олеинске и линолеинске киселине. У другом случају није било подмазивања, површине превлаке су биле суве. Примењен је тест испитивања површинске хрупавости помоћу наноинденторског уређаја. Занимљиво је да је коефицијент трења имао мање вредности у условима без подмазивања, него применом поменутих мазивих филмова киселина при нормалном оптерећењу. Међутим, већу отпорност на хабање су показале превлаке премазиване олеинском киселином. Такође је примећено да је вредност

кофицијента трења у условима подмазивања олеинском киселином била мања него код подмазивања линолеинском киселином.

Отпорност DLC и TiN превлака на ударно-клизна оптерећења истраживана је у раду [67]. Превлаке имају намену у биомедицини, код израде вештачких имплантата. У таквим условима су заступљена ударна оптерећења и узајамно клизање једне површине по другој. Испитивања су се одвијала у условима без подмазивања. Такође је испитивана отпорност на корозију. Оптерећења су циклично понављања све до појаве првих оштећења превлаке. Превлаке су задовољиле очекивања по питању корозивне стабилности, као и отпорности на хабање.

У раду [68] истраживана је технологија добијања широко распрострањених DLC превлака. Циљ је добијање одговарајуће боје превлаке, која пре свега има декоративну намену. Коришћен је биполарни плазма поступак депозиције DLC превлаке на бази силицијума. Овај поступак омогућава добијање различитих боја превлака: црвене, жуте, зелене, љубичасте, променом дебљине превлаке и захваљујући светлосној интерференцији површине превлаке и метала на који се превлака наноси. Овим је показано да превлаке, поред основне намене, могу бити израђене и у декоративне сврхе.

3.6. Антикоровивне превлаке на лиму

Један од највише коришћених материјала за пластично обликовање лимова, у прошлости, а и данас, је нискоугљенични челични лим, умирен алуминијумом, ознаке Č0148.P5 (DC04 према EN 10027-1). Одликују га веома добре карактеристике пластичности, због чега је дуги низ година коришћен у аутомобилској индустрији. Међутим, у данашње време, све су више присутне нове генерације лимова од тзв. челика повишене јачине, затим TWB – лимови и др. У експерименталном делу овог рада поред трака лима од алуминијумске легуре, коришћени су узорци од наведеног нискоугљеничног челичног лима. Разлог томе је, што је овај материјал и даље у највећој мери заступљен у технологији обликовања лима дубоким извлачењем.

Због неопходних антикоровивних својстава, у примени су и лимови са превлакама, најчешће на бази цинка, које се наносе са једне или обе стране (електролитичким поступком). Веома се користи и превлака на бази цинк-хрома, адхезивно нестабилнија и тсл. Из аспекта трења, антикоровивне превлаке се могу третирати и као чврсти мазиви филмови. Сложенији приказ фактора који утичу на обрадивост лимова са превлакама дат је на слици 3.17.



Слика 3.17 Триболошки и други фактори који утичу на стабилност и вид разарања превлаке [13]

Триболошки утицаји су уско повезани са карактеристикама које описују деформабилност основног материјала и заједничким дејством могу довести до неког од наведених облика нарушавања стабилности превлаке.

За наведени нискоугљенични челични лим (DC04) доступне су механичке карактеристике узимајући у обзир поларну анизотропију, тј. разлику измерених величина у правцу 0°, 45° и 90° у односу на правац ваљања. Углавном их даје произвођач, а такође неке од њих је могуће прецизно

одредити тестом једноосног затезања. Детаљан табеларни приказ основних карактеристика коришћених материјала лимова биће дат у експерименталном делу рада.

С обзиром на дефинисану намену лимова који су коришћени у испитивањима (за извлачење делова каросерије аутомобила) прописане су прецизно и карактеристике површина ових лимова, узимајући у обзир накнадну обраду у процесу антикорозивне заштите и бојења. Савременије боје за аутомобиле на бази акрилата, захтевају квалитетну спољашњу површину, без видљивих дефеката и строго прописаних особина. Сваки од критеријума храпавости описује површине узимајући у обзир њен геометријски облик. Условно се ови критеријуми могу поделити на физичке и статичке [13]. Главни недостатак стандардних параметара храпавости је занемаривање хоризонталних мера профила, па се при подједнаким вредностима параметара храпавости реални профили могу суштински разликовати.

Стандардни показатељи – параметри топографије површина су, према SRPS M.A1.020:

R_a , μm – средње аритметичко одступање од средње линије профила и

R_z , μm – средња висина неравнина.

Релевантни су и параметри:

R_t , μm – највећа висина неравнина и

R_p , μm – највеће растојање од врха до средње линије профила (дубина изравњања).

Величине R_a и R_p су статичког, а R_z и R_t физичког карактера. Важни су и односи:

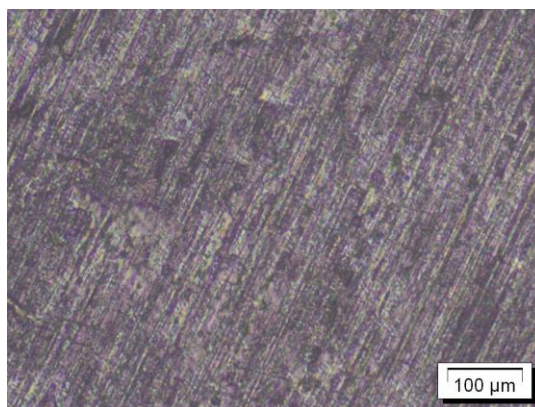
$K_p = R_p / R_t$ – коефицијент празнине профила,

$K_h = R_h / R_t = (R_t - R_p) / R_t$ – коефицијент испуне профила.

Показатељи K_p и K_h описују погодност профила за бојење, али и за задржавање мазива при дубоком извлачењу [13, 69, 70]. Директна веза статичких и геометријских параметара може се успоставити преко криве ношења, која представља важан параметар микропрофила, с обзиром на то да се при томе укључује и изравнавање врхова неравнина. Утицај хоризонталних мера профила најпотпуније се узима у обзир преко броја врхова неравнина на јединици дужине посматраног појаса површине (средњи корак неравнина S_m).

За површине мање храпавости потребна је мања дужина испитивања и обрнуто. Недостатак мањих референтних дужина огледа се у томе, што коришћени електрични филтер уређаја за мерење храпавости задржава неравнине веће фреквенције (које се могу превазићи бојењем), а елиминише оне са нижом фреквенцијом (дуго таласи), које боја не може да покрије. Због тога се као допунски параметар предлаже разлика параметара R_a при мерењу на референтним дужинама од 2.5 и 0.25 mm [13]. Ова препорука узета је у обзир при експерименталном мерењу површинске храпавости после процеса вучења између равних контактних површина.

На слици 3.18 приказан је увећани изглед површине лима од Č0148 (DC04).



Слика 3.18 Изглед површине нискоугљеничног челичног лима DC04

3.6.1. Галванске превлаке

Процес галванизације представља електролитичко наношење честица метала на катоди. Металне превлаке добијене овим путем су кристалне структуре, па се због тога процес електролитичког таложења метала назива електрокристализацијом. Карактер превлаке (структура: ситнозрнаста, крупнозрнаста, тврдоћа, унутрашња напрезања) зависи од великог броја фактора:

густине струје, концентрације електролита, природе електролита, температуре, степена мешања и присуства површински активних супстанци у електролиту и др.

Механизам раста кристала, као и структура превлаке зависе од густине струје. При малој густини струје брзина електрохемијске промене је мања од брзине површинске дифузије атома, тако да атоми имају довољно времена за заузимање погодног места на површини метала. Добијена превлака има крупна зрна и добро дефинисану кристалну решетку. Повећањем густине струје таложена убрзава се електрохемијска промена, па је површинска дифузија атома спорија. Том приликом кристална решетка превлаке је мање уређена и формирају се неравномерно распоређене површине превлаке веће храпавости. Знатно повећање густине струје таложена доводи до формирања превлака од игличастих и разгранатих кристала или чак до таложена у облику праха. Код пластичног обликовања потребно је да превлака има што мању храпавост, као и што мањи коефицијент трења због услова клизања на ободу, тако да се подешавањем густине струје таложена, за време галванизације, тај захтев може остварити.

Превлаке добијене галванским методама деле се према намени на [53]:

- **Заштитне превлаке** од: цинка, кадмијума, олова, калаја и никла; превлаке легура: кадмијум – цинк, калај – цинк, олово – калај, бакар – цинк, цинк – никл; заштитни слојеви добијени фосфатирањем, оксидацијом и др.
- **Заштитно – декоративне превлаке** од: бакра са допунском обрадом (оксидација, итд.), превлаке никла, хрома, кобалта, сребра, злата, родијума; превлаке легура: бакар – калај, калај – никл, никл – кобалт, злато – бакар, итд.
- **Превлаке за повећање отпорности на хабање и површинске тврдоће** од: хрома, гвожђа и никла.
- **Превлаке са повећањем димензија делова** од: хрома (димензионално хромирање са накнадним глачањем), гвожђа, бакра.

Превлаке добијене галванизацијом се одликују високом чистоћом и хемијском стабилношћу, а недостатак им је нехомогеност и порозност. Дебљина галванских превлака код лимова обично износи 3-5 μm . Квалитет превлаке одређује се мерењем дебљине, шупљикавости, механичких особина, чврстоће приањања и корозивне стабилности превлака. За превлаке повећане отпорности на хабање, испитују се површинска тврдоћа и примењују познати триболошки тестови „ball-on-disc”, „pin-on-disc“. У неким случајевима превлаке се испитују на моћ рефлексије, термостабилност и др. Антикорозивне особине лимова са галванском превлаком испитују се методом убрзаних испитивања у вештачки створеним агресивним срединама и на основу података о издржљивости у стварним условима експлоатације. Убрзана испитивања корозивне постојаности одвијају се у магли раствора натријум – хлорида, у засебној комори. У зависности од природе и намене превлаке, примењују се испитивања у атмосфери засићеној агресивним гасовима или у течной средини, која, по саставу, одговара условима експлоатације делова.

Један од бројних недостатака ове методе наношења превлака односи се на еколошки аспект. Штетно дејство хемикалија представља велику опасност уколико се не предузму мере заштите здравља људи и околине. Потребно је прилагодити просторије за галванизацију (висока таваница, природно осветљење, пространост). У циљу еколошке заштите околине углавном се изводи неутрализација отпадних вода из галванског одељења погона (нпр. цијанидни раствори неутралишу се хлорним једињењима, хромна киселина неутралише се раствором баријум хлорида итд.).

3.6.2. Наношење заштитних превлака електрофорезом

За наношење органских превлака лакирањем на лимовима, примењују се поступци електрофорезе. Процес електрофорезе представља преношење органских честица под дејством електричног поља и њихово наношење на предмету, уз коагулацију везивног средства и образовање нерастворљиве превлаке. Добијени слој органске превлаке (боје) веома је компактан, има добру отпорност на механичка оштећења и могуће је испирати га водом. Овај поступак карактерише истовремено одвијање три процеса: електрофорезе, електролизе и електроосмозе.

Процес електролизе се одвија у присуству примеса које проводе електричну струју и тече паралелно са електрофорезом. Не сме се дозволити да се концентрација примеса, које проводе струју у купатилима за електрофорезу, повећа до те мере да процес електролизе постане примаран.

Ако је овај процес заступљен у већој мери, формира се неквалитетна превлака, која у екстремном случају има сунђерасту структуру, а може доћи и до издвајања гасова на електродама.

Процес електроосмозе се одвија у издвојеном слоју и тече веома брзо, али знатно спорије од процеса електрофорезе. Последица процеса електроосмозе је исушивање издвојеног слоја боје, тако да на крају процеса у слоју остане свега 5% воде. Због тога се скраћује време сушења, умањује трошак енергије за сушење, а повећава приањање боје.

С обзиром на начин издвајања разликују се два електрофорезна поступка: *анафореза* (анодно издвајање) и *катафореза* (катодно издвајање).

Поступак анафорезе примењује се дуги низ година. Одвија се тако што се у кади за анафорезу уноси лак у виду водене суспензије са око 10% чврстих честица. Честице имају негативно наелектрисање, условљено хемијским саставом. Између предмета, прикљученог на позитиван пол исправљача, и зида каде ствара се електрично поље које активира електрохемијске процесе: електролизу воде, електрофорезу честица над којима су извршене суспензија и емулзија, електрокоагулацију смоле и електроосмозу воде. Честице лака крећу се ка лиму који се превлачи и приањају на његову површину. Дебљина слоја превлаке се повећава све док се не попуне све празнине и поре на лиму. На тај начин се добија равномерна, хомогена превлака. Дебљина превлаке зависи од јачине струје, времена трајања процеса, концентрације чврстих честица и температуре раствора. Дебљина превлаке може бити између 15 и 40 μm . Карактеристично је да су превлаке најдебље на крајевима и у угловима радног комада. После извлачења лима из каде, неопходно је испирање, како би се уклониле капи воденог лака. Данас се углавном, у ту сврху, примењује ултрафилтрирање, које омогућава испирање у затвореном кругу. На тај начин нема отпадних вода и целокупна количина лака, која се испере са делова, враћа се у каду. Поступак анафорезе економски је оправдан искључиво ако се ради о великим серијама, јер су инвестициони трошкови високи. За сваку боју треба имати одвојену каду са ултрафилтрирањем и зоном испирања. Раствор за анафорезу састоји се од 90% воде и само 10% чврстих честица, није запаљив, па нису потребне нарочите мере заштите од пожара и експлозије, као код класичних поступака.

Поступак катафорезе је у ствари техника наношења заштитних превлака где се користе слабе органске киселине (сирћетна, карбоксилна, итд.) у комбинацији са раствореним полимерним базама (епоксидна смола са азотним једињењима), које се под утицајем хидроксилних јона издвајају на катоди. Поступак се одликује квалитетнијом заштитом од корозије од анафорезе и бољом заштитом удубљења и шупљих делова. Катафорезни лак састоји се од приближно 20% чврстих честица које се издвајају на катоди (радном предмету-лиму). Позитиван пол није везан за посуду (каду), већ на додатне аноде, убачене у ћелије за катафорезу. Размена полова даје катафорези предност у односу на анафорезу, јер се у кади не стварају метални јони и јони киселина у граничном слоју.

3.6.3. Превлаке у виду чврстих мазива

Превлаке у виду чврстих мазива веома су заступљене код обликовања лимова дубоким извлачењем. Разлози су добра одрживост слоја мазиве превлаке при вишим вредностима радних притисака, нешто нижи коефицијент трења у контакту и постојаност слоја мазива, како при ниским тако и високим температурама. При ниским температурама најчешће не долази до стврдњавања састојака мазива, а при високим је искључена појава разлагања и испаравања. У почетку је примена неких врста превлака у виду чврстих мазива била ограничена на војну и ваздухопловну индустрију, као и свемирски програм. Разлози су повољна погодност рада у агресивним срединама, добра постојаност на високим температурама и притисцима, као и могућност тзв. трајног подмазивања. У новије време област примене је проширена на металопрерађивачку, аутомобилску и остале гране индустрије.

Превлаке у виду чврстих мазива или мазиве масти израђују се углавном на бази:

- молибден – дисулфида (MoS_2),
- волфрам – дисулфида (WS_2),
- политетра-флуоретилена и
- графита.

Основне специфичности чврстих мазива односе се на високе температуре оксидације на ваздуху (397°C за MoS_2 и 1397°C за WS_2) и изузетно стабилне особине на веома ниским температурама [53].

Триболошке карактеристике чврстих мазива дефинисане су малим трењем између кристалних решетки које чине структуру мазива, добром апсорпционом способношћу на металним површинама

(лимовима), одличном хемијском стабилношћу на високим температурама и добром апсорпцијом динамичког оптерећења у зони контакта. Бек трајања слоја чврстог мазива зависи од степена адхезије и тврдоће основног материјала. Код чврстих мазива доминантна је молекуларна компонента силе трења. Она је неупоредиво већа у односу на механичку.

Мазива маст на бази молибден-дисулфида (MoS_2) поседује добра апсорпциона својства на металним површинама и задовољавајућа подмазујућа својства, настала слојевитом кристалном структуром њених атома. Ниска смицајна чврстоћа објашњава се кристалном грађом молибден-дисулфида. Кристална решетка је формирана тако да је базни слој у коме се налазе атоми молибдена окружен слојевима атома сумпора. Растојање између атома сумпора, који се налазе у различитим слојевима кристала, је четири пута веће од међусобног растојања атома унутар једног слоја. Везе у једном слоју су знатно јаче од *van der Valsovih* веза између суседних слојева. Због тога, молибден-дисулфид представља врло чврсту структуру у две димензије, али врло слабу у трећој [41].

Кристал MoS_2 на ваздуху има коефицијент трења у контакту са каљеном површином челика 0.1, а за ивице кристала ова вредност достиже и 0.26. За разлику од графита, при повећању оптерећења и температуре, коефицијент трења опада и средња вредност износи 0.05 до 0.095. Молибден-дисулфид у виду мазиве масти је веома коришћен при обликовању лима дубоким извлачењем због својих повољних триболошких карактеристика. Поседује велику отпорност, како на високим, тако и на ниским температурама. Носећа способност граничног подмазујућег слоја MoS_2 је већа од било које друге мазиве масти. На температурама до 480°C оксидише незнатно, док на вишим температурама долази до издвајања сумпор-диоксида. Међутим, овај податак није значајан за примену при дубоком извлачењу лимова, јер се процес одвија на собној температури. Основни недостатак молибден-дисулфида јесте велика хемијска реактивност са кисеоником и влагом из ваздуха, па је примена у том смислу ограничена. У зависности од начина наношења постоје полирани филмови MoS_2 и филмови MoS_2 нанети распршивањем.

Полирани филмови MoS_2 поседују, у већини радних услова на ваздуху коефицијент трења 0.08. На влажном и сувом ваздуху, MoS_2 филм, нанет на одговарајућу металну подлогу, полирањем мења изглед од континуалног филма светле металне боје у прекидан филм тамно црне боје. Интензитет и брзина ове трансформације зависе од времена клизања и садржаја воде у околини. Са порастом брзине трансформације носивост нанетог слоја опада. У експлоатацији, после фазе уходавања, долази до дужег периода стабилног рада.

Филмови MoS_2 нанети распршивањем представљају најпогоднији, али и најскупљи, начин наношења превлака у виду чврстог мазива. На овај начин се обезбеђују мазиви филмови изванредних триболошких карактеристика, добијају се добре адхезивне способности, добра отпорност на оксидацију и хабање и екстремно низак коефицијент трења. Превлаке имају тамно црну боју и веома танак филм (око $2 \mu\text{m}$). Структура мазивог филма је ситнозрнаста, са високом густином и без микродубљења [53].

3.6.4. Неорганске превлаке на лимовима

Процес наношења неорганских антикорозивних превлака идентичан је процесу оксидације, односно корозије. У новије време формирање заштитних неорганских превлака тумачи се електрохемијским појавама преласка електрона са спољашње површине метала на површински слој средства за израду превлаке.

Постоје три основна поступка наношења неорганских превлака:

- термички,
- хемијски и
- електрохемијски.

Неорганске антикорозивне превлаке настају реакцијом метала и хемијског средства у релативно кратком временском периоду. Прекривају површину метала у виду танког оксида или соли. Равномеран, једноличан слој, уједначене храпавости са мат изгледом, добија се одговарајућом припремом површина и обезбеђењем погодних услова за формирање fine кристалне структуре веома мале порозности.

Заштитна моћ превлаке заснована је на пасивизирању металне површине племенитим слојем и изолацији метала од агресивног дејства спољашње средине. Површине имају нешто повишену храпавост у односу на друге превлаке и микропорозне су. То омогућава накнадну обраду (дубоко извлачење) и бојење органским или неорганским бојама. Такође, на површинама неорганских превлака је могуће наносити различите премазе: уља (нпр. за дубоко извлачење), мазива, воскове,

лакове и др. Неорганске антикорозивне превлаке представљају добру заштиту у одређеним условима. Нису отпорне на концентроване растворе киселина и база. Зато имају ограничену примену на неутралне, слабо киселе и базне растворе и благо корозивну средину. Основни недостаци неорганских превлака су отежано накнадно спајање електролучним поступцима заваривања и лемљењем.

а) Оксидне превлаке

Комбинованим дејством кисеоника и влаге, из ваздуха, или на повишеној температури, долази до формирања оксидне или хидроксидне превлаке на површини. Превлака, као производ корозивног дејства, смањује даље корозивно деловање спољашњих утицаја пасивизирањем површине метала и изоловањем од спољашње средине. Да би се добила квалитетна, хомогена и што мање порозна превлака, формирање оксидног слоја изводи се хемијским путем (раствором оксидационих средстава) и електрохемијским путем (анодном оксидацијом). Оксидне превлаке се широко примењују при заштити челика, алуминијума, магнезијума, обојених метала, као и њихових легура.

Хемијске превлаке на алуминијуму се углавном образују потапањем у водене растворе благо нагривајућег средства са додатком оксидног средства, док се електрохемијске превлаке добијају анодном оксидацијом алуминијума у растворима сумпора, оксалне или хромне киселине. Добра хемијска постојаност алуминијума постиже се захваљујући великом афинитету алуминијума према кисеонику и великој брзини формирања оксидног слоја. Природни оксидни слој је дебљине 0.001 μm . Слој оксида, иако мале дебљине, је мало порозан и веома је компактан. Хемијским поступцима образују се превлаке дебљине од 1 до 4 μm , а електрохемијским поступцима максимално и до 40 μm [41].

Када су челици у питању, њихова слаба хемијска постојаност потиче од особина гвожђа, као основне компоненте свих челика. Чак и слабо агресивна средина изазива промене на површини, при чему настаје танка превлака састављена од ферооксида и ферохиоксида. Слој има лоше карактеристике, растресит је, порозан, слабо приања на основну површину и лако апсорбује влагу, агресивне гасове и соли, чиме се повећава интензитет корозије. То значи да природни оксидни слојеви на челику (хидроксидни слојеви) не пружају никакву заштиту од корозије, напротив поспешују је. За формирање оксидних превлака на челику користе се термички, хемијски и електрохемијски поступци.

Термички поступци су најстарији поступци формирања веома дебелих и постојаних оксидних превлака на челику. Поступак тзв. „иноксирања“ се састоји у томе да се потпуно очишћени и одмашћени челични делови загревају на температуру од 700 до 900°C, најпре у благо оксидној (15-20 min), а затим у редуцидној атмосфери (20-30 min) генераторског гаса, у присуству угљендиоксида одређене концентрације. У зависности од састава челика, температуре и времена загревања, на површини се формира тамно плава тврда превлака дебљине од 20 μm до 1 mm. Превлаке, по саставу ферооксида (магнетити), су постојане у води и на влажном ваздуху, имају већу жилавост од емајлираних површина и користе се код посуда добијених дубоким извлачењем, намењених загревању. Недостатак је знатно виша цена од осталих оксидних превлака на челику.

Хемијски поступци наношења оксидних превлака на челику изводе се у алкалним и киселим купатилима или растворима соли. То су поступци тзв. брунирања. Основни захтев пре овог хемијског нагривања односи се на темељно чишћење и одмашћивање радне површине челичног дела. Превлаке су дебљина од 1 до 2 μm . Ова врста оксидних превлака наноси се најчешће у декоративне сврхе. Одликује их веома ниска отпорност на механичка оштећења и хабање. Због тога се, у последње време, поступци брунирања често комбинују са фосфатирањем, додавањем натријум-фосфата у раствор. У тим условима образује се оксидно-фосфатна превлака, неколико пута отпорнија на корозију и хабање. Побољшање корозивне отпорности се постиже и накнадним третманом раствора хрома. Понекад, после брунирања, потребно је накнадно науљивање у циљу повећања отпорности на корозију.

б) Фосфатне превлаке

Фосфатирање је поступак формирања фосфатног слоја на челику, дужим третирањем у разблаженој фосфорној киселини, високе температуре. Фосфатне превлаке дуги низ година имају практичну примену у технологији дубоког извлачења лимова, због ниског коефицијента трења и веома добрих карактеристика подмазивања, па се често користе засебно као чврсто мазиво, као и у

комбинацији са различитим врстама уља за подмазивање. Основна улога је заштита од корозије, а негативан аспект примене ове превлаке односи се на загађење животне средине и испаравање токсичних супстанци приликом процеса фосфатирања, опасних по човекову околину. Зато се у новије време, развијају све више тзв. „зелена мазива“, односно еколошки прихватљива мазива, што је био предмет истраживања у раду [48].

Фосфатна превлака на челичној површини лима настаје када се радни комад потопи у разблажену фосфорну киселину или кисели раствор фосфата. При томе се гвожђе, најпре, раствара као примарни фосфат, а затим, са повећањем концентрације гвожђа, долази до издвајања нерастворљивог секундарног и терцијарног гвожђе-фосфата и водоника. На површини метала формира се нови површински слој фосфатне превлаке.

Фосфатне превлаке на челику су ситнозрнасте структуре. Величина и облик кристала се мења у зависности од намене. За превлаке које се премазују уљима, кристали су крупнији, а за вишефазне поступке извлачења ситнији. Кристали могу бити плочасти, игличасти, ромбоидни итд. Њихова величина и дебљина превлаке се крећу од неколико микрометара (финозрнаста структура), до неколико десетина микрометара (10-20 μm код крупнозрнасте структуре). Дебљина превлаке се подешава избором састава купатила и временом фосфатирања.

Фосфатне превлаке имају малу порозност (необрађене површине до 1%), а после обраде порозност се може смањити до 0.1%. Због порозности, фосфатне превлаке не поседују довољну отпорност на корозивно дејство влаге, нарочито после дужег излагања. Зато се премазују мастима, уљима или лаковима. Обрађене фосфатирани површине, замашћене или науљене, представљају одличну заштиту од корозије у влажној и сланој средини. Науљене манган-фосфатне превлаке имају већу корозивну отпорност од танких галванских превлака цинка или никла.

Фосфатне превлаке нису отпорне на киселине и базе. У разблаженим киселинама и базама дебљина фосфатне превлаке се нагло смањује, па може доћи и до љуштења лака или боје којима је фосфатна превлака подлога.

Моћ упијања фосфатних превлака је велика и на томе се заснива њихова широка примена. Упијање уља је 2-3 пута веће него код нефосфатираних површина. Та особина искоришћена је у техници подмазивања, наношења боја и лакова и у технологији пластичног обликовања (дубоко извлачење, пресовање, ваљање и др.). Фосфатни слој, услед доброг приањања, спречава стварање локалних оштећења површине и смањује могућност одлепљивања лака или боја са површине. Фосфатне превлаке су меке и имају малу отпорност на хабање. Постојаност на високим температурама је мања од оксидних превлака, али ипак могу да издрже температуре до 500°C, а оксидно-фосфатне и до 600°C.

Два основна поступка фосфатирања су хемијски и електрохемијски. Електрохемијски поступци фосфатирања челика немају већу примену, јер захтевају већа инвестициона улагања, уз добијање истог квалитета превлаке као код чисто хемијског поступка.

Хемијски поступци се изводе потапањем у купатила различитих састава или прскањем. Купатила могу бити са или без додатака који убрзавају процес фосфатирања. Основни поступци (подела према типу раствора) хемијског фосфатирања су:

- раствори са цинк-фосфатом,
- раствори са манган-фосфатом,
- купатила са оксидационим средством,
- фосфатирање прскањем,
- разлагање рђе и
- реактивне боје.

Раствори са цинк-фосфатом се формирају растварањем цинка, цинк-оксида, карбоната или терцијарног фосфата у фосфорној киселини. Добијени раствор се меша и кристалише, тако да се испоручује у чврстом стању. Припремљени раствор има око 3% примарног цинк-фосфата. Фосфатирање се изводи на температури 95-99°C, у времену од 30-45 min.

Раствори са манган-фосфатом се добијају растварањем манган-карбоната или феро-мангана у фосфорној киселини. Ова купатила садрже мање слободне киселине од цинк-фосфатних купатила. Раде на истој температури (око 98°C), али процес траје дуже. Превлаке су, у антикорозивном погледу, боље од гвожђе-фосфатних и цинк-фосфатних.

Купатила са оксидационим средством настају додавањем цинк-фосфата у растворе, односно манган-фосфата разних активних материја, у циљу убрзавања или појединачења процеса фосфатирања. Тиме се повећава радни век купатила, смањује време трајања процеса, смањује потрошња хемикалија и смањује пад квалитета фосфатних превлака.

Фосфатирање прскањем компримованим ваздухом се примењује код великих површина и предмета где није могуће потапање у кадама. За формирање квалитетне фосфатне превлаке користи се обично цинк-фосфатни раствор загрејан на температуру од 80°C. Процес траје од 30 s до 2 min. Новији поступци омогућавају фосфатирање прскањем незагрејаним растворима.

Хладно фосфатирање се изводи на собној или нешто вишој температури (20-35°C). Код овог поступка смањена је потрошња енергије услед загревања и одржавања радне температуре. Нема испаравања, а радни век опреме је дужи. Поред потапања делова, може се користити прскање или премазивање површина и ван радног простора. Овакве превлаке имају фину ситнозрнасту структуру и светлије су од површина добијених у загрејаним купатилима. Дебљина превлаке зависи од намене. Ако се на превлаци наносе боје и лакови, дебљина од 3 μm се формира потпањем у раствор и држањем у времену од 3 min. За превлаке дебљине од 6 μm време фосфатирања износи 10 min.

Претварање рђе је поступак хладног фосфатирања који се доста примењује, јер омогућава знатне уштеде настале елиминисањем продуката корозије са челичних површина. Раствори за претварање рђе, поред фосфорне киселине, садрже површински активне материје (за олакшавање квашења и продирања кроз корозивни слој), инхибиторе и раствараче масноће. У току процеса порозни и прашкасти оксиди и хидроксиди гвожђа претварају се у стабилне фосфате који се везују за основни материјал. Превлаке су тање и неуједначеног су изгледа. Превлака је погодна за премазе, боје и лакове и има одличну корозивну отпорност.

Реактивне боје (енг. *Wash primer*), такође, представљају средство за фосфатирање иако припадају премазима. Састоје се од две компоненте од којих је једна раствор синтетичке смоле поливинил-бутирала у пропанолу и бутанолу, уз додатак активних пигмената. Друга компонента је раствор фосфорне киселине у води и алкохолу. Компоненте се мешају непосредно пре наношења четком или прскањем. У међусобној реакцији долази до редукције шестовалентног хрома у тровалентни, уз ослобађање кисеоника који формира оксидну превлаку. Истовремено долази до дејства фосфорне киселине и формирања фосфатне превлаке. Поливинил-бутирал се даље полимеризује и формира веома добру подлогу – слој за наношење боја и премаза.

4. КАРАКТЕРИСТИЧНИ МОДЕЛИ КЛИЗАЊА НА ОБОДУ

Обликовање лима дубоким извлачењем (а углавном и остале поступке у технологији пластичног обликовања) карактерише скуп параметара који одређују стање система у оквиру кога се одвија процес. Да би се користили математички модели при изучавању физичких процеса мора се познавати математички опис закона промене параметара, а нарочито њихова међусобна повезаност.

Описивање процеса математичким моделирањем не може се егзактно применити за дефинисање триболошких процеса (стања) дубоког извлачења, јер недостају аналитички изрази који дефинишу све утицајне параметре као и њихово сложено међудејство.

Отежано изучавање и моделирање трења при дубоком извлачењу (нарочито код делова сложене геометрије) условљава постојање великог броја локалних шема деформисања, које се поред разлика у напонско-деформационом односима, одликују и разликама у утицају трења (позитивни и негативни утицај трења) [69].

Физичко моделирање је најчешће основа сваког триболошког истраживања. Подразумева изучавање реалног процеса у лабораторијским условима уз модификовање услова реализације, геометријских величина и врсте материјала који се обликује, у складу са законима сличности.

При сличним условима пластичног деформисања два тела различитих димензија, која су деформисана до истог степена, специфични притисци су међусобно једнаки [13]. Однос деформационих сила једнак је квадрату, а однос утрошених радова једнак је кубу односа линеарних димензија тела. Овако постављени услови треба да одређују: геометријску, механичку и физичку сличност процеса којима су подвргнути оригинал и модел.

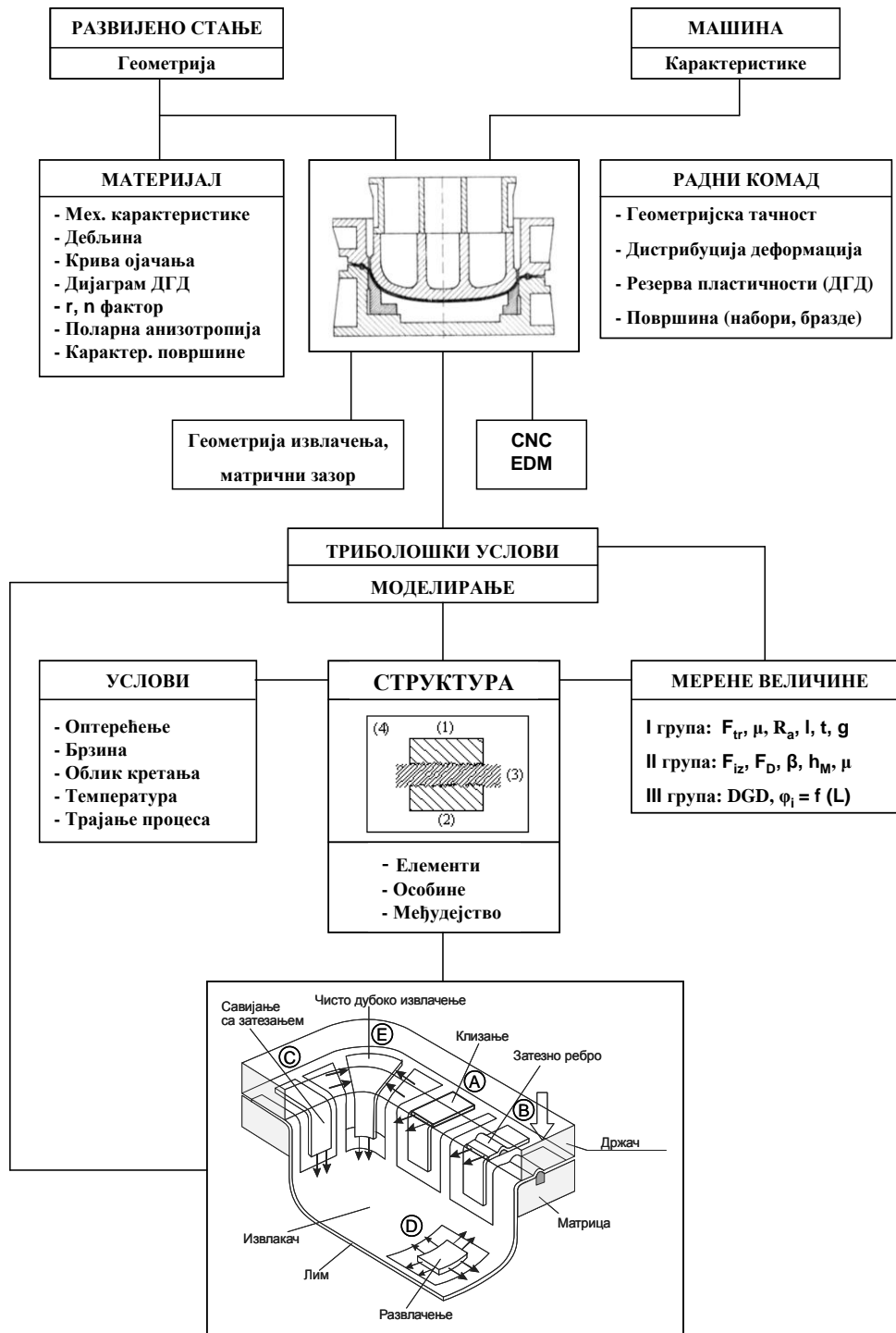
Из досадашњих искустава (при изучавању обрадивости лима) познато је да се симулационим тестовима не могу у потпуности задовољити услови физичког моделирања. Уз помоћ димензионе анализе и теорије сличности могу се добити критеријуми сличности који на познат начин одређују коефицијенте размере карактеристичних величина модела и оригинала [12, 13]. Код обликовања лима дубоким извлачењем то су: карактеристике материјала алата и комада, геометрија алата, брзина деформације и тсл. [70]. За задовољавање ових услова неопходно је коришћење материјала оригиналног дела и модела, различитих дебљина, а истих карактеристика деформационог ојачања (n-фактора и анизотропије), као и идентичних карактеристика површине. Код радних комада већих димензија практично је немогуће испунити овај услов.

Појавом савременије рачунарске опреме као и метода нумеричког моделирања (нпр. метод коначних елемената) створиле су се нове могућности. Код оваквог типа моделирања користи се поједностављено описивање триболошких услова. Функција расподеле коефицијента трења на контактним површинама задаје се у фази дефинисања улазних величина, и формирања модела дистрибуције деформација. Друга фаза подразумева истраживање граничних односа при потпуном развоју процеса [29, 71].

Делови сложене геометрије се добијају извлачењем на пресама двоструког или вишеструког дејства, где су утицаји на ободу лима сведени на утицај силе држања на држачу или применом затезних ребара на површинама држача, односно матрице. При томе је развијено стање лима, равна или закривљена површина. Извлачење делова сложене геометрије се одвија у веома сложеним условима које прати мноштво параметара релевантних за поступак извлачења. Због тога је овај процес један од најкомплекснијих у области пластичног обликовања метала. Изучавање односа на површинама држача и матрице (утицај облика површине, геометрија затезних ребара и тсл. на силу трења) представља основу за конструисање алата за дубоко извлачење сложених делова.

Физичко моделирање карактеристичних зона при извлачењу елемената сложеног геометријског облика најчешће се користи као основа за потпуно триболошко моделирање. При томе приступ у изучавању може бити различит и укључује [13]:

- локалну зону, у којој деформисање зависи од њеног облика и карактеристика пластичности метала (добијени елементи представљају основу за тзв. локалну деформациону анализу),
- неколико локалних зона, које чине област у којој услови обраде зависе од облика области и вида деформације (акумулирана деформација, релаксација, асиметрична појава набора) и
- комплетан комад, који се може посматрати кроз осредњавање карактеристика различитих области са њиховим међусобним утицајем (формира се основа за тзв. интегралну деформациону анализу).



Слика 4.1 Трибо-моделирање у општој структури САЕ система при дубоком извлачењу [13]

Нови концепти пројектовања технологије дубоког извлачења и увођења елемената СИМ стратегије подразумева и системски приступ у изучавању триболошке проблематике. На слици 4.1 приказан је концепт САЕ система, који укључује и триболошко моделирање [12, 69, 72]. Приказане релације на слици представљају синтезу класичног пројектовања, структуре трибо-система и видова елементарних и сложених модела.

Услови моделирања подразумевају следеће елементе (сл. 4.1):

- оптерећење, које одговара специфичним силама на извлакачу и држачу,
- брзину клизања у контакту, као и одговарајућу расподелу брзине по површини контакта,
- облик кретања, сличан главним кретањима алата и материјала у процесу обраде,
- радну температуру, која одговара температури околине, осим у зонама које генеришу топлоту,
- трајање процеса, условљено општим геометријским и брзинским ограничењима модела.

Структуру моделног (радног) система чине:

а) Елементи система

- радни комад (1),
- алат кога чине држач или матрица (2),
- мазиво (3) и
- окружење-атмосфера (4)

б) Особине елемената

- радни комад (материјал са особинама, геометрија и димензије, састав и претходни третман), (сл. 4.1),
- алат кога чине држач или матрица (материјал, геометрија и димензије, састав, тврдоћа, квалитет површине тј. превлаке и храпавост),
- мазиво (тип, хемијски састав, динамичка и кинематска вискозност и зависност од промене температуре) и
- окружење-атмосфера (састав и загађење).

в) Међудејство (триболошки процеси у контакту)

- процес деформисања у контакту (тип, напонско и деформационо стање),
- адхезиони и трибо-хемијски процеси,
- процеси трења и хабања и
- режим подмазивања.

Природни редослед изучавања поменутих процеса код обликовања делова сложеног геометријског облика је избор зоне (области), идентификација шеме деформисања (узимање неке од познатих напонско-деформационих шема), формирање одговарајућег триболошког модела, реализација поступка симулације, параметарска, локална или интегрална деформациона анализа и интервенција у елементима система обраде.

4.1. Избор модела

У складу са природом параметара који представљају мерене величине при реализацији одговарајућег модела („А“; „В“; „С“; „D“ и „Е“), резултате триболошких испитивања (сл. 4.1), могуће је поделити у три групе [13].

Прву групу параметара чине физичке величине често дате у облику дијаграма у функцији притиска, брзине, температуре и тсл.:

- F_{tr} - сила трења,
- μ - коефицијент трења,
- R_a, R_z - параметри храпавости,
- L - дужина клизања,
- T - температура и
- G - тежински износ хабања.

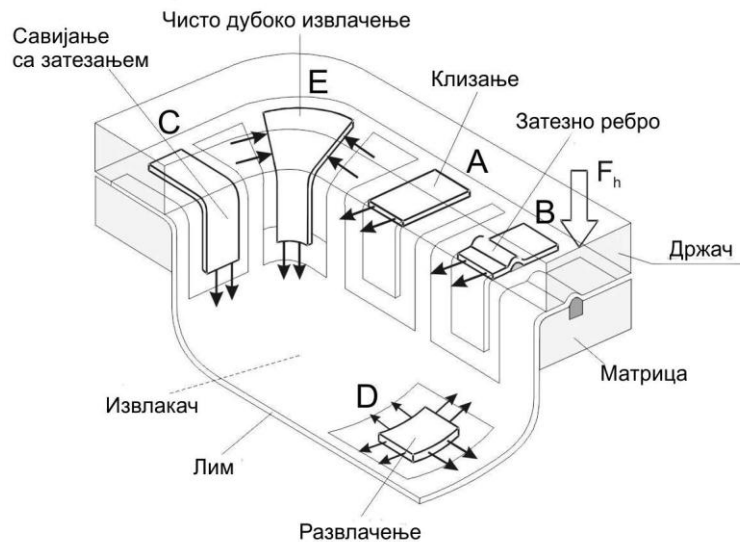
Друга група параметара обухвата тзв. “спољашње показатеље“ процеса обликовања, најчешће за читав комад:

- F_{iz} - укупна сила извлачења,
- F_D - сила на држачу,
- β - гранични степен извлачења,
- h_M - највећа дубина при разарању и
- μ - расподела коефицијента трења.

Параметри ове групе често имају сложен карактер, нпр. зависност дубине извлачења од силе држача при променљивим контактним условима, или расподела коефицијента трења у главном пресеку комада за поједине фазе извлачења и тсл.

Трећу групу параметара представљају “унутрашњи“ показатељи процеса обликовања и при њиховом одређивању захтева се познавање критичне зоне деформисања. Параметри ове групе се одређују графометријски (сложен експериментални приступ и комплексна анализа), а они су:

- дистрибуција деформација у облику $\varphi_{i(i=1,2,3)} = F$ (локација) са показатељима равномерности расподеле, градијентом деформација и тсл.
- дистрибуција деформација у дијаграму граничне деформабилности (резерва пластичности, зоне локализованог деформисања) и
- елементи историје деформација, нагиби трајекторија и тсл.



Слика 4.2 Шема триболошких модела при дубоком извлачењу [13]

Код сложеног извлачења, према општој шеми трибо-моделирања (сл. 4.2), клизање лима између равних површина држача и матрице одговара оним зонама комада, које нису изложене тангенцијалном сабијању, већ само затезању у радијалном правцу („А“). Под дејством извлакача, сила затезања се преноси преко заобљења матрице на зоне испод држача. Управо овај триболошки модел доминира на површинама обода комада и представља предмет изучавања овог рада и у том смислу биће реализована експериментална истраживања применом оригиналне апаратуре.

Клизање лима преко заобљења матрице и површине држача при одсуству тангенцијалних напона у материјалу, у потпуности се може симулирати савијањем са затезањем (модел „С“, сл. 4.2). Код овог модела остварује се трајна деформација (савијање), што није случај код модела „А“.

Нешто сложенији модел од претходних је клизање лима преко затезног ребра, (модел „В“). Примена затезних ребара је једна од могућности за управљање утицајима на ободу лима. Теоријска разматрања овог модела, поред осталих, биће изложена у поглављу 5.

На слици 4.2 приказан је концепт САЕ система, који укључује и триболошко моделирање [13]. Помоћу ових модела могућа су изучавања на ободу и заобљењу ивице матрице. Они се могу третирати као затворени трибо-систем, што при реализацији експеримената подразумева одговарајући план и методологију [14, 15]. Док су за класичну трибometriју уобичајени излази из мерног система величине које описују карактер трења (трансфер маса, понашање контактних слојева, хабање, вибрације и тсл.), у овом случају се описани модели користе првенствено за одређивање деформационе силе и коефицијента трења, а у случају овог рада се прати и промена површинске хрпавости. Овако конципирани модели могу послужити и за потпунија изучавања поменутих процеса, као што је нпр. поступак дубоког извлачења са стањењем [48, 73, 74, 75, 76]. Међутим, таква мерења захтевају посебан приступ и изучавање.

Уз претпоставку да су сва кретања при испитивању униформна, и да не долази до значајније промене температуре (сва топлота се због спорог одвијања процеса предаје околини), основни утицајни фактори на коефицијент трења су нормални притисак у контакту, брзина и мазиво (унутрашња карактеристика трибо-система).

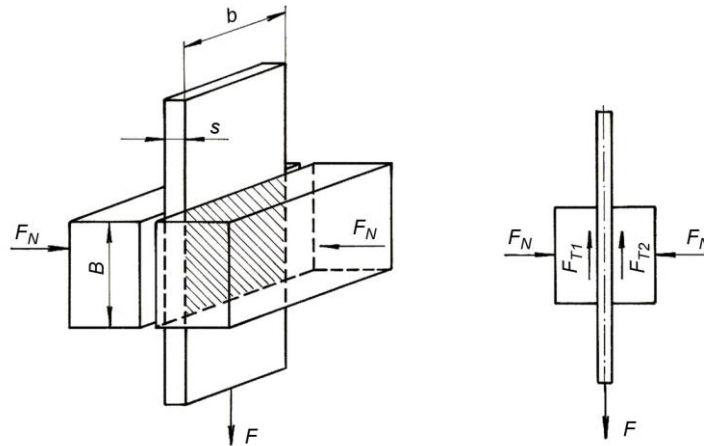
Преостали модели: двострано затезање-развлачење (модел „D“) и чисто дубоко извлачење (модел „E“), захтевају другачији приступ и детаљно су изучавани и експериментално истраживани у раду [12].

5. ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА МОДЕЛА КЛИЗАЊА

5.1. Модел клизања између равних контактних површина

Као што је било говора у поглављу 4, клизање лима између равних површина држача и матрице одговара зонама комада које нису изложене тангенцијалном (бочном) сабијању, већ само затезању у радијалном правцу.

Под дејством извлакача сила затезања се преноси преко заобљења ивице матрице на зоне испод држача.



Слика 5.1 Шема модела клизања између равних контактних површина [12, 13]

У овом моделу на триболошка испитивања углавном утичу стање на контактним површинама, притисак и брзина клизања. Вредности површинског контактног притиска при клизању су знатно ниже од напона на граници течења, и одговарају вредностима које постоје испод држача при извлачењу (1-10 МПа). Овај модел је најједноставнији и базиран је на клизању лима између равних контактних површина. Карактеристичан је по еластичном деформисању, јер је интензитет уздужног напона испод границе течења. Шема овог модела приказана је на слици 5.1.

За општи случај клизања између равних површина, при различитим коефицијентима трења на контактним површинама (μ_1 и μ_2), вучна сила се израчунава према обрасцу:

$$F = F_{T1} + F_{T2} = (\mu_1 + \mu_2) \cdot F_N, \quad (5.1)$$

при чему су:

F_{T1}, F_{T2} – силе трења између површина држача и лима,
 μ_1, μ_2 – коефицијенти трења на контактним површинама и
 F_N – нормална сила на држачу.

Нормална сила једнака је производу средњег специфичног притиска (p) и реалне контактне површине клизних елемената (A):

$$F = (\mu_1 + \mu_2) \cdot p \cdot A, \quad (5.2)$$

при чему су:

p – средњи специфични притисак,
 A – површина држача,
 b – ширина траке лима и
 B – дужина држача.

За $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, може се одредити коефицијент трења (уколико се познаје вредност нормалне силе):

$$\mu = \frac{F}{2 \cdot F_N} = \frac{F}{2p \cdot A}. \quad (5.3)$$

Израз 5.3 представља једноставан начин за израчунавање коефицијента трења који може послужити и за тестирање, тј. селекцију мазива као и за изучавање губитка енергије у процесима пластичног обликовања [20, 77]. Модел клизања између равних контактних површина (модел „А“, слике 4.2 и 5.1) је убедљиво најпогоднији модел за праћење утицаја трења код различитих врста челичних лимова (лимови са превлакама, лимови повишене јачине и тсл.) као и код лимова од лаких легура [1, 17, 78, 79]. Код осталих типова триболошких модела (сл. 4.2) истраживање трења је веома сложено (често уз велике тешкоће) и захтева анализу бројних утицаја. Илустрације ради, у истраживању [71] спроведена је експериментално-нумеричка анализа утицаја контактних услова у поступку дубоког извлачења са стањењем. Реч је о веома сложеној шеми деловања сила између закошених површина контактних елемената и лима. Код тако сложене шеме деловања сила постоји опасност од изостављања појединих компонената и довођења у питање валидности постављеног модела.

Имајући у виду наведено, основни разлог избора модела клизања између равних контактних површина је веома једноставно праћење утицаја трења на ободу лима. У овом раду модел „А“ је коришћен у циљу изучавања утицаја променљивог притиска држача (силе држања) који се задаје симултано за време процеса, при чему се прате промене деформационе силе, коефицијента трења и храпавост површина лима.

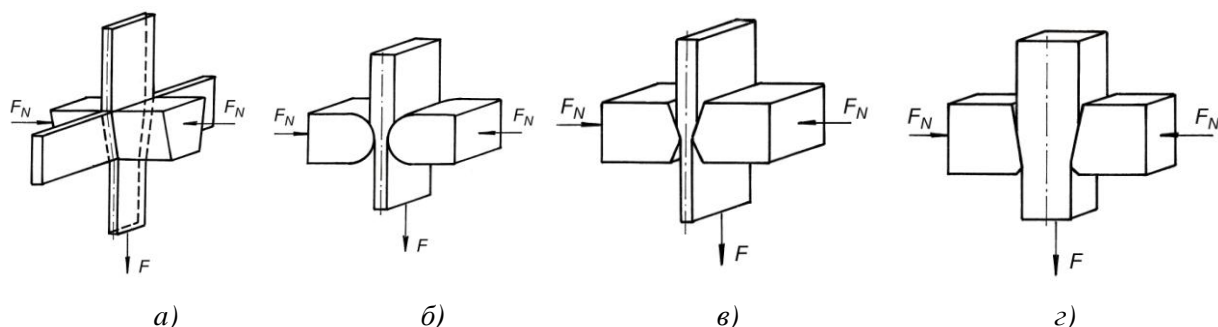
Иако код делова сложене геометрије овај модел доминира на ободу, он ипак не може да омогући добијање комплетне слике триболошких појава за време процеса обликовања. Извесни недостаци модела клизања између равних контактних површина се огледају у следећем:

- укупан износ контактеног притиска остварује се спољашњом силом, за разлику од стварног извлачења, код кога је притисак последица напрезања у материјалу које се преноси преко ивице матрице,
- мазиво се другачије понаша у граничном слоју, пошто је и природа деформисања површинског слоја различита.

Кључни недостатак овакве симулације је немогућност остваривања пластичних деформација, с обзиром на опонашање зоне затегнуте радијално под дејством држача (извлакача).

Овај недостатак може да се отклони претходним затезањем узорка (траке) лима до износа који обезбеђује трајне пластичне деформације [13], које ће значајно утицати на природу измене топографије површина током провлачења у односу на провлачење оригинала. Треба напоменути да истраживање пластичних деформација није предмет овог рада, већ праћење промена деформационе силе, коефицијента трења и храпавости површина из аспекта симултаног задавања променљивог притиска држача (силе држања).

Код моделирања зона у којима постоји и тангенцијално сабијање, користи се модел провлачења клинастих узорака лима, по *Sach*-у и др. [13], (сл. 5.2а). Такође, у протеклим годинама, развијено је више поступака испитивања, којима се реализују изузетно високи контактни притисци [12, 13], (сл. 5.2б, в, и г). Ови модели се могу успешно користити код изучавања процеса хабања алата, оптимизације триболошких услова обраде и тсл. (нпр. код извлачења са променом дебљине лима - стањењем, при обликовању нерђајућих челика).



Слика 5.2 Реализација теста клизања применом различитих типова контактних елемената

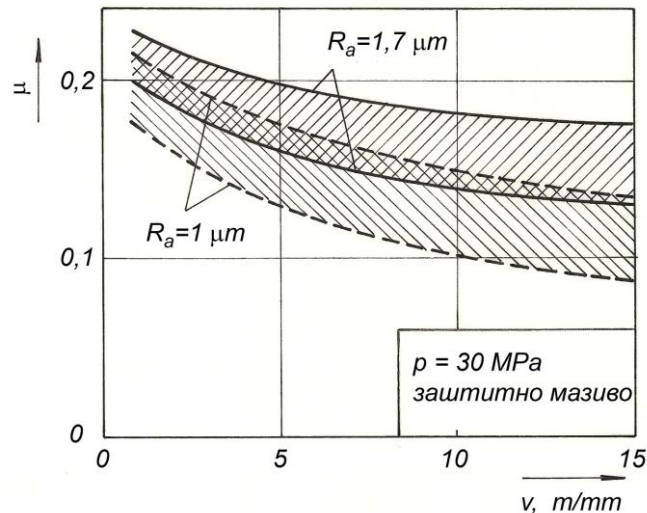
Од основног значаја при овом испитивању јесте дефинисање зависности силе трења (коефицијента трења) у функцији утицајних фактора, које могу послужити као основа при разматрању сложенијих форми деформисања, при истим притисно-температурским и брзинским условима.

За одређени материјал (лим) улазне величине су:

- специфични притисак (p),

- брзина (v) и
 - стање контактних површина.
- Излазне величине су:
- сила трења (смицајни напон),
 - нормални напон у узорку лима,
 - коефицијент трења и
 - параметри храпавости површина.

Према ранијем истраживању [80], повећањем брзине и порастом температуре на 80-110°C, код неких мазива долази до погоршања својстава и пораста силе трења.



Слика 5.3 Зависност коефицијента трења од брзине клизања

На слици 5.3 приказан је дијаграм промене коефицијента трења за челичне лимове различитих вредности храпавости у функцији брзине клизања. Зависност коефицијента трења од специфичног притиска изузетно је значајна због повезаности са условима који су присутни у зони држача. Порастом притиска опада коефицијент трења. Сила трења не може директно да прати пораст нормалне силе, што доводи до смањења коефицијента трења. При томе сила и напон трења на контактної површини расту.

Процес дубоког извлачења изводи се са релативно малим брзинама деформисања (релативно мале брзине клизања), па се може сматрати да је процес изотермички, тј. да се сва топлота предаје околини, мазиву и алату. Да би се пратио утицај температуре на својства мазива при малим брзинама, мора се обезбедити уређај који омогућава претходно загревање мазива (приближно као да топлоту генерише контактни пар) [20].

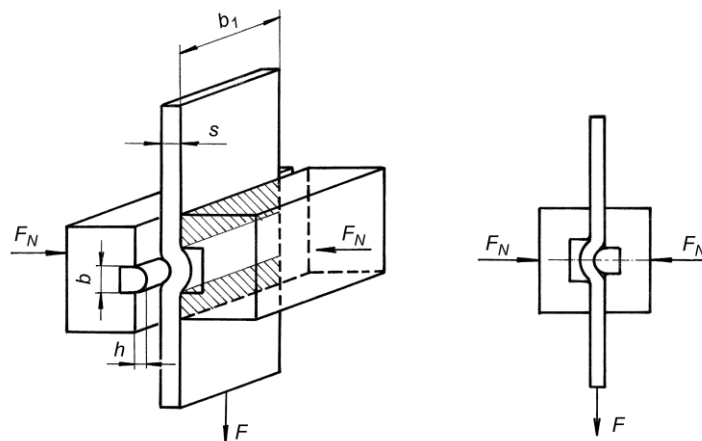
Истраживања утицаја текстуре и хемијског састава површинског слоја на степен и карактер поравнања врхова неравнина површина лима дата су у радовима [80, 81], као и механизам приваривања метала у контакту и тсл. На основу изучавања веза између параметара топографије лима (физичких и статистичких величина) и спољашњих утицаја, могуће је дефинисати услове за настанак интензивног трења-браздања и тешког оштећења површине лима ("galling" процес) [82]. Као последица настаје и оштећење алата. Ово је област тзв. неуобичајеног понашања лима у производњи, када због одређених поремећаја у процесу (геометрија, зазори, сила на држачу и тсл.) у неким зонама долази до интензивног пораста притиска и појаве грубог задирања-скидања честица мекшег метала у контакту. Да би се спречиле поменуте штетне појаве као и хабање алата, врло је важно извршити правилан избор геометрије алата и мазива [83]. На зону обода лима и матрице отпада око 60% свих оштећења алата, док је код коришћења лимова повишене јачине тај проблем још израженији [13].

Детаљнији преглед новијих истраживања из области клизања лима између равних контактних површина биће дат у поглављу 5.6.

Ради целовитости излагања, у поглављима 5.2 до 5.5, биће укратко изложене карактеристике физичких модела „В“, „С“, „D“ и „Е“ (сл. 4.2), иако нису предмет истраживања у овом раду.

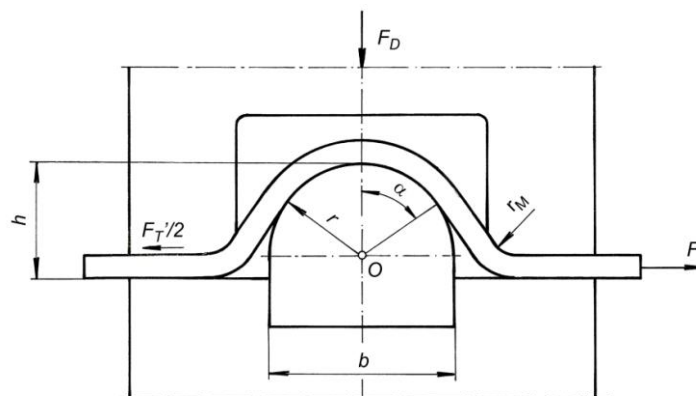
5.2. Модел клизања преко затезног ребра

Клизање лима између површина затезног ребра и држача, односно матрице, један је од најсложенијих триболошких модела процеса дубоког извлачења. Код модела клизања између равних површина држача и матрице (модел „А“, сл. 4.2), где утицај макроеометрије одсуствује и модела савијања са затезањем (модел „С“, сл. 4.2), где је од значаја полупречник заобљења ивице матрице, код овог модела клизања преко затезног ребра (модел „В“, сл. 4.1) од великог значаја је макроеометрија контактних површина.



Слика 5.4 Модел клизања преко затезног ребра [13]

При клизању је деформационо стање раванско и нема промене ширине траке. Раванско напонско стање у зонама малих полупречника савијања, нарочито на матрици (ребро врши обликовање) прелази у просторно. Укупна сила клизања састоји се од више сила: силе обликовања, силе трења, па укупна сила клизања настаје као резултат збирног дејства наведених сила [84]. У специфичним триболошким условима, које може карактерисати слабо подмазивање, недовољно чисте контактне површине, повишена храпавост алата и лима, сила трења може порасти до половине укупне силе на затезном ребру. За случај затезног ребра, када је $r = b/2$, силе које делују на лим при клизању се могу представити шематски на слици 5.5 [12, 13, 14].



Слика 5.5 Шема дејства сила при клизању

На шеми (сл. 5.5) заступљене су следеће силе у зависности од одговарајућих зона:

- а) На сваком равном делу где постоји контакт лима преко две површине, сила трења је једнака:

$$F_T' = 2 \cdot \mu_D \cdot F_N, \quad (5.4)$$

где су:

μ_D - средњи коефицијент трења на равnoj површини контакта и

F_N - део силе на држачу којом се остварује притисак по равним површинама (део силе на држачу који се троши на савијање око затезног ребра).

б) Према слици 5.5, на изласку из зоне радијуса (заобљења), сила F_T' се повећава и износи:

$$F_T'' = F_T' \cdot e^{\mu_M \cdot \alpha}, \quad (5.5)$$

где су:

μ_M - коефицијент трења на заобљењу ивице матрице или на затезном ребру и

α - угао зоне контакта ребра и лима.

в) Један део силе клизања троши се на савијање и исправљање при кретању лима између површине ребра и жлеба. За свако савијање и исправљање, ова сила се може приближно израчунати према изразу:

$$F_S = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_p \cdot s}{2 \cdot \frac{r_M}{s} + 1} \quad (5.6)$$

где су:

R_p – напон на граници течења,

r_M – радијус заобљења ивице матрице и

s – дебелина лима.

Укупна сила се добија сабирањем елементарних сила, односно појединачним израчунавањем свих компонената. При томе се за различите полупречнике заобљења (r) и висине (h) ребра, добијају различите вредности угла (α). Може се прихватити да вредности коефицијената трења на равном делу контакта μ_D и заобљењу ребра или матрице μ_M (сл. 5.5) одговарају моделу клизања између равних површина (модел „А“). Због узастопних провлачења и наизменичног савијања и исправљања долази до изразитог поравнања микропикова површине лима. Последица тога је знатно умањење вредности коефицијента трења (притисци у локалним зонама заобљења малог полупречника су високи). При изласку из зоне контакта долази до затезања тих површина и делимичног пораста храпавости површине лима.

За случај према слици 5.5, укупна сила извлачења је једнака [12, 84]:

$$F = \left[\left\{ F_T'' + F_S^M \right\} \cdot e^{2 \cdot \mu_M \cdot \alpha} + F_S^R \right] \cdot e^{\mu_M \cdot \alpha} + F_S^R \cdot e^{2 \cdot \mu_M \cdot \alpha} + F_S^M + F_T', \quad (5.7)$$

$$F = \left[\left\{ 2 \cdot \mu_D \cdot F_N \cdot e^{\mu_M \cdot \alpha} + F_S^M \right\} \cdot e^{2 \cdot \mu_M \cdot \alpha} + F_S^R \right] \cdot e^{\mu_M \cdot \alpha} + F_S^R \cdot e^{2 \cdot \mu_M \cdot \alpha} + F_S^M + 2 \cdot \mu_D \cdot F_N, \quad (5.8)$$

$$F = 2 \cdot \mu_D \cdot F_N \cdot \left(1 + e^{4 \cdot \mu_M \cdot \alpha} \right) + F_S^M \cdot \left(1 + e^{3 \cdot \mu_M \cdot \alpha} \right) + F_S^R \cdot e^{\mu_M \cdot \alpha} \cdot \left(1 + e^{\mu_M \cdot \alpha} \right), \quad (5.9)$$

где су:

F_S^M – сила савијања на ивици матрице и

F_S^R – сила савијања на затезном ребру.

Испитивање клизањем између површина затезног ребра и жлеба успешно се може применити и код оцене мазива за дубоко извлачење, као и истраживања појава хабања алата. Склоност ка тзв. *прилепљивању* – адхезивном дејству лима и алата, најчешће се изучава у условима „редукованог подмазивања“, када се мазиво наноси само на први комад, а затим прати преко пораста силе клизања и погоршања изгледа узорка лима, у случајевима настанка тзв. *хладног приваривања* [81, 84]. Склоност ка прилепљивању у великој мери зависи од тврдоће, храпавости и хемијских карактеристика површина у контакту, као и од реолошких својстава мазива.

Поред овог модела, биће изложен још један модел клизања лима преко затезног ребра и поступак израчунавања укупне вучне силе [85].

Геометрија затезног ребра и матрице са карактеристичним мерама приказана је на слици 5.6.

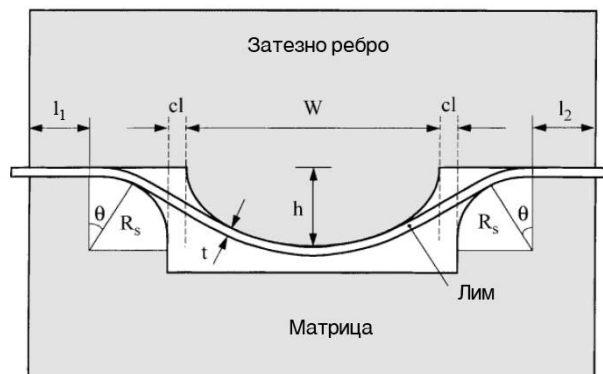
На основу слике 5.6 и спроведених истраживања, теоријско-експерименталним путем су изведени следећи изрази за еластичну силу (F_e) и померање (δ):

$$F_e = \frac{16 \cdot E \cdot w \cdot \delta \cdot t^3}{(2 \cdot R_s + W + 2 \cdot cl)}, \quad (5.10)$$

$$\delta = \min \left(h, 2 \cdot (2 \cdot R + t) \cdot \frac{R \cdot R_{eH}}{t \cdot E} \right), \quad (5.11)$$

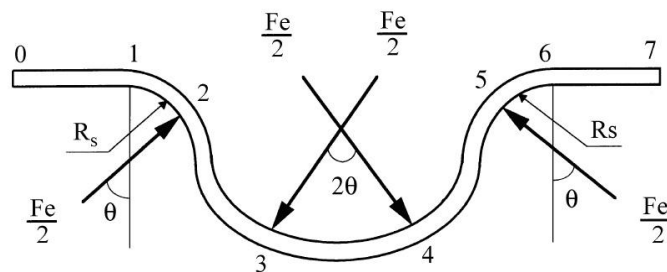
где су:

- E – модул еластичности,
- R_{eH} – напон на граници течења,
- w – ширина траке лима,
- t – дебљина лима,
- R_s – радијус матрице,
- W – ширина ребра,
- h – висина ребра,
- R – полупречник ребра,
- cl – зазор између ребра и матрице.



Слика 5.6 Приказ затезног ребра и матрице са карактеристичним димензијама

На слици 5.7 дата је шема карактеристичних зона обликованог комада и деловања еластичних сила на деформисаном лиму.



Слика 5.7 Приказ деловања еластичних сила на деформисаном лиму

Вучна сила је резултат збирног дејства сила савијања и исправљања, сила трења и затежућих сила, при клизању и деформисању лима преко затезног ребра.

Силе трења на равним деловима лима (F_{c1} и F_{c2}) износе:

$$F_{c1} = 2 \cdot \mu \cdot (BHF - F_R) \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad (5.12)$$

$$F_{c2} = 2 \cdot \mu \cdot (BHF - F_R) \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad (5.13)$$

где су:

- μ – коефицијент трења,
- BHF – сила држања која делује преко затезног ребра,
- F_R – сила притиска која делује са стране матрице,
- l_1 и l_2 – дужине равног дела (према слици 5.6).

У зони између тачака 1 и 2 (сл. 5.7) сила се добија тако што се збир сила F_{c1} и F_{c2} помножи са $e^{\mu\theta}$. Наредна сила делује у тачки 2 (сл. 5.7) и представља силу исправљања. Сила трења услед еластичне силе (F_e) такође делује на лим. У тачки 3 делује сила савијања (F_3), као и сила трења ($1/2\mu F_e$). У зони између тачака 3 и 4 сила после клизања се добија множењем чланом $e^{\mu\theta}$. Деловањем силе исправљања у тачки 4 (F_4), силе трења μF_e (од тачке 4 до тачке 5), силе савијања F_5 у тачки 5, силе трења μF_e (од тачке 5 до тачке 6), силе исправљања F_6 (у тачки 6), силе трења на равном делу F_{c2} добија се сложена формула за укупну вучну силу F :

$$F = \left[\left\{ (F_{c1} + F_1) \cdot e^{\mu\theta} + F_2 + \mu F_e + F_3 \right\} \cdot e^{2\mu\theta} + F_4 + \mu F_e + F_5 \right] \cdot e^{\mu\theta} + F_6 + F_{c2} \quad (5.14)$$

Занемаривањем појединих чланова у изразу (5.14), настаје његово поједностављење и свођење на израз (5.3):

$$F_{c1} = F_{c2} = 2\mu_D F_N = F_T' - \text{сила трења,}$$

$$F_e = 0 - \text{еластична сила,}$$

$$F_2 = F_5 = F_S^M - \text{сила савијања на матрици,}$$

$$F_1 = F_6 = F_S^M - \text{сила савијања на матрици,}$$

$$F_3 = F_4 = F_S^R - \text{сила савијања на ребру,}$$

$$\theta = \alpha - \text{угао зоне контакта ребра – матрице,}$$

Заменом наведених величина у израз (5.8) за вучну силу (F) добија се:

$$F = \left[\left\{ (2\mu_D F_N + F_S^M) \cdot e^{\mu_M \alpha} + F_S^M + F_S^R \right\} \cdot e^{2\mu_M \alpha} + F_S^R + F_S^M \right] \cdot e^{\mu_M \alpha} + F_S^M + 2\mu_D F_N, \quad (5.15)$$

а после сређивања овог изрази добија се коначан израз за вучну силу, идентичан изразу (5.9):

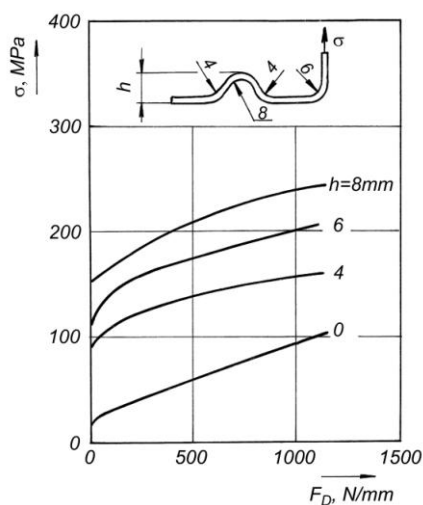
$$F = 2 \cdot \mu_D \cdot F_N \cdot (1 + e^{4\mu_M \alpha}) + F_S^M \cdot (1 + e^{3\mu_M \alpha}) + F_S^R \cdot e^{\mu_M \alpha} \cdot (1 + e^{\mu_M \alpha}). \quad (5.16)$$

5.2.1. Основни утицајни фактори

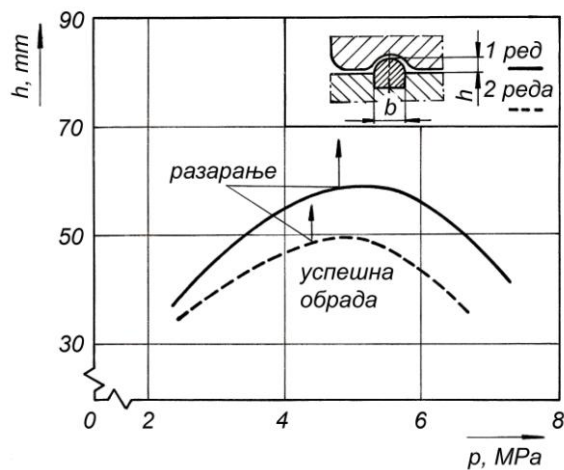
За испитивање и оцену мазива могу се успешно применити испитивања клизањем између површина затезног ребра и жлеба тј. држача [14, 86], као и истраживања појава хабања алата [87]. Одређивање геометријских параметара затезног ребра и оптималне силе држања, представља сложен задатак при извлачењу делова сложеног геометријског облика тј. неправилне геометрије [14, 88, 89].

На слици 5.8 дата је зависност нормалног напона у узорку лима (силе клизања) од специфичне силе држача, за променљиву висину ребра [13]. При овоме је моделирање потпуно и обухвата и зону заобљења ивице матрице.

Утицај ширине затезног ребра је значајан и израженији је код вишеродног постављања.

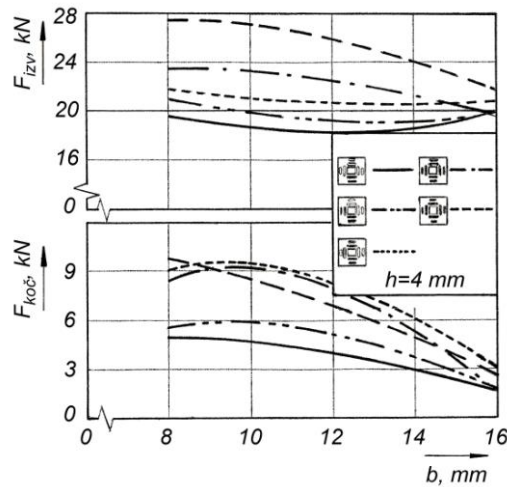


Слика 5.8 Зависност напона у епрувети од услова испитивања



Слика 5.9 Утицај броја ребара на дубину извлачења

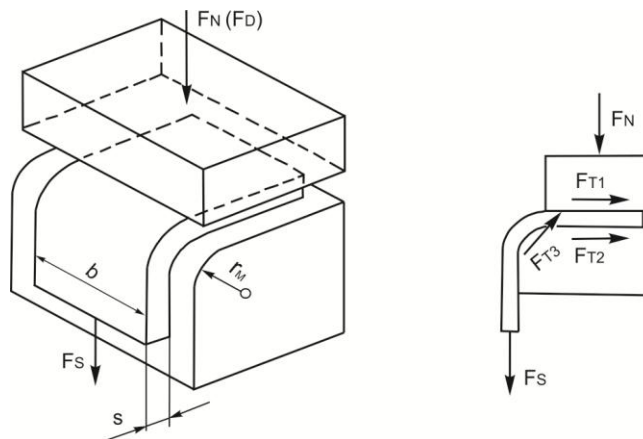
На слици 5.9 приказани су резултати истраживања утицаја броја ребара, а на слици 5.10 утицаји ширине и места постављања ребара [13, 14]. Сила кочења има највећу вредност при $b=10\text{ mm}$, после чега опада. Положај затезних ребара у односу на контуру извлачења, означен је различитим линијама.



Слика 5.10 Утицај ширине и места постављања ребара при извлачењу [13]

5.3. Модел клизања преко ивице матрице

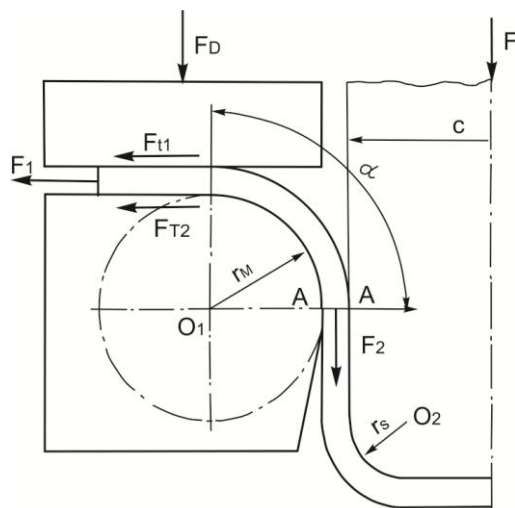
Клизање лима преко површине држача и матрице и ивице матрице при одсуству тангенцијалних напона у материјалу, у потпуности се може моделирати савијањем са затезањем (модел „C“). Ово испитивање је логично проширење модела клизања између равних контактних површина држача и матрице (модел „A“), пошто лим у наредној фази померања долази у зону заобљења ивице матрице (сл. 5.11). С обзиром на остваривање трајних пластичних деформација, укључен је и утицај геометрије алата (опис технологије).



Слика 5.11 Шема испитивања клизањем преко ивице матрице [12, 13]

Геометријски односи у зони савијања омогућавају деформисање у области пластичности. Напонско и деформационо стање је раванско, без промене ширине траке и напона у правцу дебљине лима. Према сликама 5.11 и 5.12, постоје две одвојене зоне трења при савијању са затезањем - равни део на држачу и зона заобљења ивице матрице. У одређеним истраживањима ове две зоне се анализирају одвојено, што при експерименталном раду захтева извођење специјалног уређаја за испитивање [14, 90].

Из теорије савијања танких лимова познато је да је за одређивање силе савијања неопходно познавати вредности момената унутрашњих сила, тј. расподелу тангенцијалних напона по пресеку лима. Због начина деформисања – савијања, а затим исправљања, отежано је проналажење тачне вредности деформационог отпора.



Слика 5.12 Шема деловања сила код савијања са затезањем [13]

Укупна сила на извлакачу (F) једнака је, према слици 5.12, збиру сила трења на заобљењу ивице матрице (F_T) и силе чистог савијања око радијуса r_M (F_S):

$$F = 2 \cdot (F_T + F_S). \quad (5.17)$$

Сила трења је једнака:

$$F = F_1 \cdot e^{\mu_M \alpha} = 2 \cdot F_D \cdot (\mu_{D1} + \mu_{D2}) \cdot e^{\mu_M \alpha}. \quad (5.18)$$

где су:

F_D – сила држача на равном делу матрице,

μ_{D1} и μ_{D2} – коефицијенти трења на контактним површинама држача и матрице,

μ_M – коефицијент трења у зони заобљења ивице матрице,

α – угао зоне контакта на заобљењу ивице матрице.

За $\mu_{D1} = \mu_{D2} = \mu_D$ (средњи коефицијент трења у зони држача) сила трења износи:

$$F = 2 \cdot \mu_D \cdot F_D \cdot e^{\mu_M \alpha}. \quad (5.19)$$

Уколико се претпостави да нема разлике у напонима савијања и исправљања сила савијања износи [13]:

$$F_S = \frac{2 \cdot M_\sigma}{r_M + 0,5 \cdot s}. \quad (5.20)$$

С обзиром на познате начине одређивања момента унутрашњих сила (M_σ) за област пластичног савијања, укупна сила износи:

$$F = 2 \cdot \mu_D \cdot F_D \cdot e^{\mu_M \alpha} + \frac{n' \cdot R_m}{2 \cdot \frac{r_M}{s} + 1}. \quad (5.21)$$

где су:

R_m – затезна чврстоћа,

n' – корекциони коефицијент ојачања,

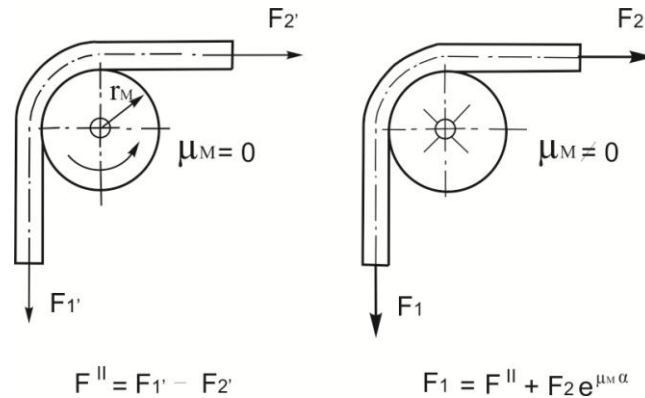
r_M – радијус заобљења ивице матрице и

s – дебелина лима.

Кључни утицај на деформациони отпор, који се на показани начин одређује ($K \approx n' R_m$), има остварени степен деформације, тј. однос r_M/s . Тачно аналитичко одређивање деформационе чврстоће је веома отежано, ако је лим пре уласка у зону ивице матрице већ поднео извесно деформисање (нпр. у случају клизања преко затезног ребра).

Сила чистог обликовања – савијања (F_S) не зависи од услова трења, већ искључиво од механичких карактеристика материјала и геометрије савијања. На релативно једноставан начин

може се одредити сила F_S експериментално, ако се као матрица користе окретни ваљчићи пречника $2r_M$ [12, 13], према слици 5.13.



Слика 5.13 Шема одређивања коефицијента трења на ивици матрице

Упоредивањем силе савијања (F_S) и укупне силе (F) коефицијент трења на заобљењу ивице матрице се одређује према изразу:

$$\mu_M = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F_1 - F_S}{F_2} \quad (5.22)$$

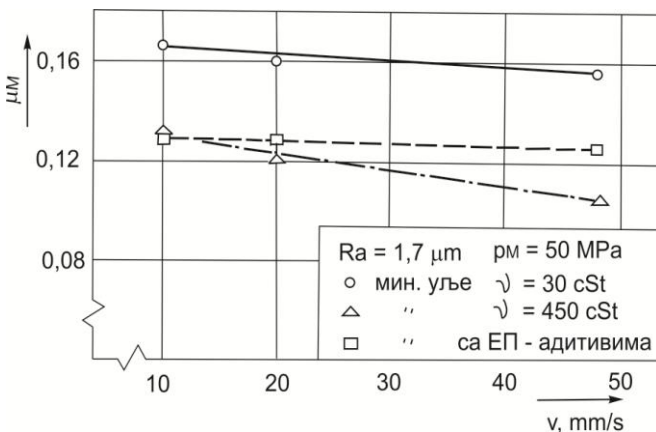
или обухватајући и геометрију савијања [13]:

$$\mu_M = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{r_n}{r_M} \ln \frac{F_1 - F_S}{F_2} \quad (5.23)$$

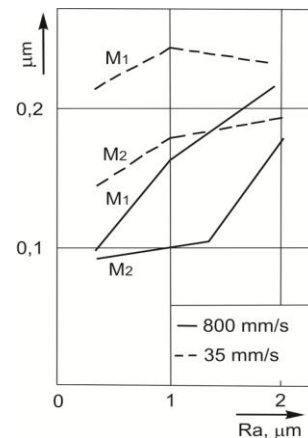
5.3.1. Основни утицајни фактори

У истраживању [90] упоређиване су вредности силе трења на држачу и ивици матрице и дошло се до закључка да важнију улогу има трење на ивици матрице, што је истакнуто и у монографији [13]. Према тим резултатима, при савијању преко мањих радијуса остварују се веће силе трења; уз мањи коефицијент трења већи је површински притисак у зони заобљења. При томе је испитивана трака лима претходно затегнута, зарад потпунијег опонашања услова трења при извлачењу.

Израчунавања и експериментална мерења [12] потврђују да су притисци у зони ивице матрице знатно већи од оних на месту држача, и да за челичне лимове износе 20 – 40 МПа. Као што је познато, са порастом брзине клизања долази до опадања коефицијента трења (сл. 5.14). На слици 5.15 приказан је утицај параметра храпавости R_a на коефицијент μ_M . Према тумачењу у радовима [12, 13], резултати представљају основу за развој мерних поступака на бази савијања са затезањем.

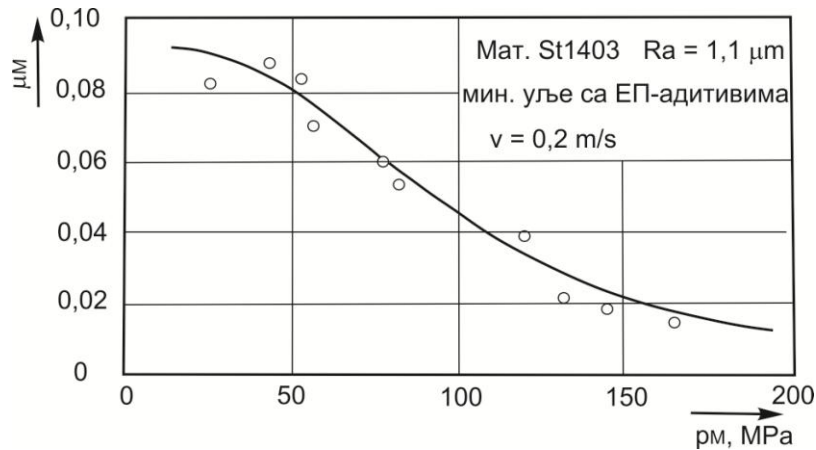


Слика 5.14 Зависност коефицијента трења од брзине клизања



Слика 5.15 Зависност коефицијента трења од параметра храпавости R_a

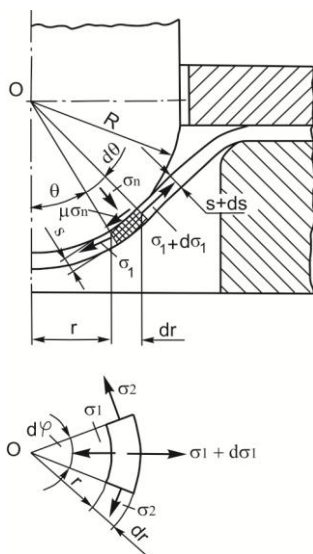
Промена коефицијента трења у зони заобљења матрице са порастом притиска, добијена експериментално према изразу (5.22), за ширу област притиска, дата је на слици 5.16 [14].



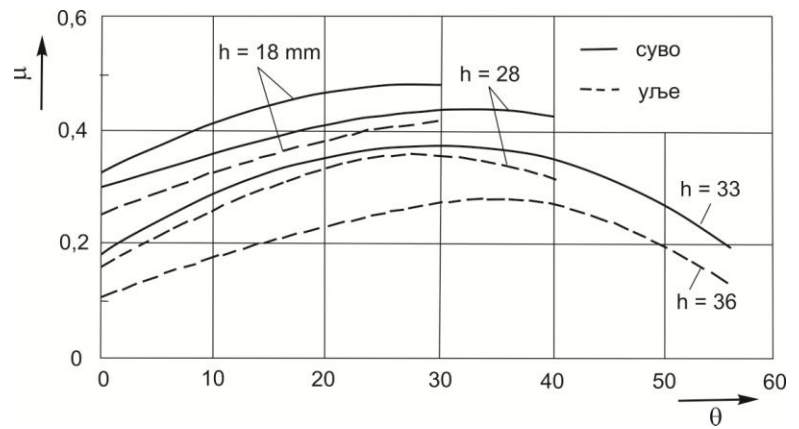
Слика 5.16 Зависност коефицијента трења од средњег притиска у зони савијања

5.4. Модел двостраног затезања – развлачења

Триболошки модел развлачења (модел „D“) је знатно сложенији од претходно тумачених и подразумева просторно деформисање материјала, под дејством два главна нормална напона, који делују затежуће у равни лима. Поједини делови од лима се добијају искључиво развлачењем; најчешће при обради постоји комбинација шема чистог дубоког извлачења и развлачења. Испитивање развлачењем се дуго низ година користи код оцењивања параметара обрадивости лимова за дубоко извлачење [13, 33, 39]. Према основној шеми изучавања (сл. 5.17), до развлачења долази испод чела извлакача и/или на месту заобљења ивице извлакача.



Слика 5.17 Равнотежа елемента лима при развлачењу [13, 39]



Слика 5.18 Расподела коефицијента трења при развлачењу [13, 39]

При деформисању се обод радног комада чврсто притеже држачем, па се деформисање обавља само унутар отвора матрице. Код развлачења је пожељно да трење између лима и извлакача буде што мање, за разлику од чистог дубоког извлачења, о чему ће бити више говора у наредном поглављу.

Општи облик једначине равнотеже елемента луске који се двострано затеже при променљивим облицима контура, добија се из опште теорије деформисања танкозидних елемената [13]:

а) у правцу нормале на елемент површине:

$$\frac{\sigma_n}{s} = \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}. \quad (5.24)$$

б) у тангенцијалном правцу:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} - \frac{\mu}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0. \quad (5.25)$$

где су:

σ_ρ или σ_1 – главни нормални напон у меридионалној равни,
 σ_θ или σ_2 – главни нормални напон у тангенцијалном правцу,
 R_ρ, R_θ – радијуси кривина у меридионалном и тангенцијалном правцу,
 s – дебљина лима,
 μ – коефицијент трења,
 ρ – растојање посматраног елемента од осе симетрије и
 α – угао између тангенте на елементарну површину и осе симетрије.

За случај сталне контуре ($R_\rho = R_\theta = R$) и непроменљиве дебљине, уводећи као основну координату угао θ , према слици 5.17, добија се:

$$\frac{\sigma_n}{s} = (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot \frac{1}{R}. \quad (5.26)$$

$$\frac{d}{d\theta} (\sigma_1 \cdot r \cdot s) - \sigma_2 \cdot s \cdot R \cdot \cos \theta - \mu \cdot \frac{r}{s} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) = 0. \quad (5.27)$$

Да би се олакшало решавање једначина (5.24) и (5.25), оне се често комбинују са релацијама које су добијене експериментално. У већини случајева ради се о претходном одређивању напона σ_1 и σ_2 , преко тзв. поступка мерних мрежа [13]. Користи се апроксимација односа $\sigma_1 \cdot s$ у облику:

$$\sigma_1 \cdot s = C_1 \cdot \sin \theta + C_2. \quad (5.28)$$

која омогућава решавање претходног система једначина по коефицијенту трења:

$$\mu = \frac{s \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) + C_1 \cdot \sin \theta}{s \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \operatorname{tg} \theta}. \quad (5.29)$$

На слици 5.18 приказана је расподела коефицијента трења у правцу главног меридијана комада добијеног развлачењем, за три дубине и два стања контактних површина [14]. Највеће вредности коефицијената трења померене су ка координатном почетку у односу на локацију највеће главне деформације (главних напона).

Применом методе коначних елемената могуће је такође дефинисати напонско-деформациона поља, уз апроксимације које намеће ова метода. При томе се могу користити различити модели материјала (вископластичан, крутопластичан) и усвајају потребна ограничења, линеаризације [1, 29, 30].

Без обзира на примењену теорију и метод изучавања, у свим радовима се потврђује изузетан утицај трења на расподелу деформације, хомогеност деформисања, односно појаву локализације деформације.

5.5. Модел чистог дубоког извлачења

Због поједностављених релација којима се описује механика процеса извлачења код осносиметричних комада са равним или полусферичним дном, погодно је управо код таквих геометрија изучавати значај триболошких услова. Према општој шеми изучавања (сл. 4.1), ово је најсложенији модел (модел „Е“) према напонско-деформационим карактеристикама, али и по начину утицаја трења. На слици 5.19 приказане су карактеристичне зоне трења, које у различитим формама постоје код свих операција дубоког извлачења.

Обухватајући истовремено зоне клизања између површине држача и матрице (1), савијања и клизања преко ивице матрице (2), као и клизање на месту заобљења извлакача (3), овај модел, упрошћено посматрано, представља синтезу модела који су већ разматрани. Важно је нагласити да је у овом моделу присутно и тангенцијално сабијање.

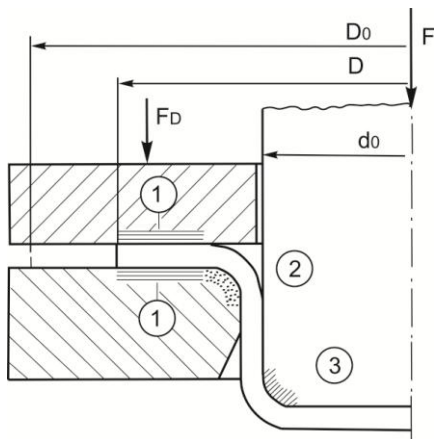
Због могућег израженог клизања у зони заобљења чела извлакача и појаве локализованог деформисања, пожељно је да трење на том месту буде појачано. Супротно томе, у зони држача и матрице, као и заобљења ивице матрице, потребно је трење што више смањити, како би се смањило и укупни отпор на ободу. Због тога је уобичајено да се подмазивање одвија само на ободу, а понекад се користе и извлакачи повишене храповости у зони заобљења чела [70].

При подмазивању се на ободу формира уљни клин, ограничен ивицом матрице и задебљањем обода (сл. 5.20) [13, 14, 90]. Укупна нормална сила распоређује се на површине A_1 и A_2 :

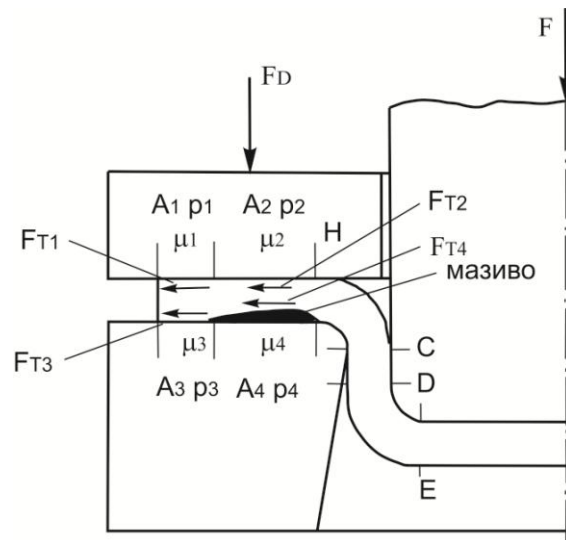
$$F_D = A_1 \cdot p_1 + A_2 \cdot p_2 = F_{D1} + F_{D2}, \quad (5.30)$$

при чему је укупна сила трења једнака:

$$F_T = F_{D1} \cdot (\mu_1 + \mu_3) + F_{D2} \cdot (\mu_2 + \mu_4). \quad (5.31)$$



Слика 5.19 Карактеристичне зоне трења [13]



Слика 5.20 Зоне трења на ободу [14]

Због природе деформисања обода ($p_1 > p_2$), најмање вредности су μ_1 и μ_3 , а највећа у „слободној“ зони μ_2 . У подручју 2, због постојања уљног клина сматра се да је $\mu_4 \approx 0$. Уколико се познају посебне вредности коефицијената трења, могуће је одредити елементарне силе трења на ободу.

Ако дође до прекорачења граничних односа при извлачењу, настаје разарање радног комада. На карактер разарања одлучујући утицај има феномен деформационог ојачања и триболошки услови у контакту комада и алата. У зависности од интензитета трења и параметара обрадивости лима, зона разарања комада лоцира се различито, између тачака H и E (сл. 5.20), при чему се критеријуми разарања прилагођавају условима који постоје у критичној зони.

Код теоријског описивања процеса извлачења осносиметричних комада постоји више приступа који се углавном разликују у појединостима примене одговарајуће теорије пластичног обликовања метала, односно у начинима реализације појединих апроксимација. Приликом истраживања утицаја трења на напоне и силу извлачења, најпогодније је одвојено израчунавати одговарајуће компоненте силе трења уз основно упрошћење: трење није функција координате на ободу. Другим речима, при постављању диференцијалних једначина равнотеже утицај трења се не узима у обзир [12, 13, 14]. Такође, поред затезне чврстоће и ојачања, не узимају се у обзир и остале карактеристике материјала, нпр. r – фактор. Према неким старијим анализама поменутих у [13], део силе трења у укупној сили извлачења износи 10-12%, када је пречник извлачења 90 mm. Међутим новија разматрања доказују да удео силе трења вишеструко расте при повећању пречника комада.

Сила извлачења за прву операцију, када је полазни облик кружно развијено стање, израчунава се на основу препоруке за израчунавање радијалног напона на ободу радног комада у тренутку постизања највеће силе [39]. Укупна сила која се региструје као активна сила на извлакачу, састоји се од више компонената:

- а) силе „идеалног обликовања“ (F_1) која је неопходна за тангенцијално сабијање на ободу;
- б) силе савијања и исправљања око заобљења ивице матрице (F_2);
- в) силе трења у зони равног дела обода (F_3) и
- г) силе трења на заобљењу ивице матрице (F_4).

При израчунавању се не узима у обзир трење у зони 3 (сл. 5.19). Укупна сила се добија:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4. \quad (5.32)$$

Поједине компоненте се израчунавају према следећим изразима:

$$F_1 = A_0 \cdot R_m \cdot \left(\frac{\beta^{2\psi_M} - 1}{2\psi_M} \right)^{\frac{1}{1-\psi_M}}, \quad (5.33)$$

$$F_2 = A_0 \cdot \frac{R_m \cdot s_0}{2 \cdot r_M + s_0}, \quad (5.34)$$

$$F_3 = 2 \cdot \mu_D \cdot F_D \cdot \frac{1}{\beta} \quad \text{и} \quad (5.35)$$

$$F_4 = \left(e^{\mu_M \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \cdot (F_1 + F_3). \quad (5.36)$$

где су:

$A_0 = d_0 s_0$ – површина попречног пресека комада пречника d_0 и дебљине лима s_0 ,

R_m – затезна чврстоћа,

$\beta = D_0/d_0$ – степен извлачења,

ψ – деформација сужења узорка лима при тесту једноосног затезања у тренутку појаве локализованог деформисања (користи се крива ојачања II реда, с обзиром на то да релативној деформацији при извлачењу одговара деформација сужења при затезању [39]),

r_M – полупречник заобљења ивице матрице,

F_D – сила држања која се израчунава према изразу (5.37) и

μ_m, μ_D – коефицијенти трења у различитим зонама трења (сл. 5.19).

За случај када се уводи просторно напонско стање, уместо сложеног интегрисања, проблем се поједностављује засебним израчунавањем силе трења на ободу комада, уз претпоставку о концентрисаном дејству силе држача на уској прстенастој површини спољашњег дела обода [13]. Сила држања се најчешће израчунава према упрошћеном изразу:

$$F_D = p_D \cdot A_D = p_D \cdot \left[D_0^2 - (d_M + 2 \cdot r_M)^2 \right] \cdot \frac{\pi}{4}, \quad (5.37)$$

где је:

p_D – специфични притисак држача који се рачуна према формули (5.38) [13]:

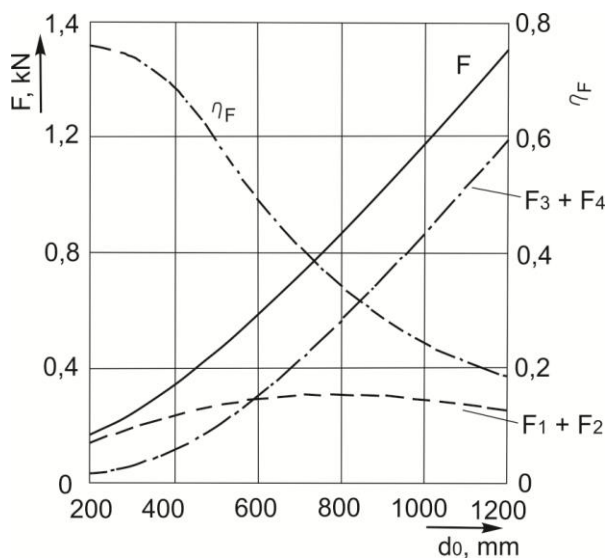
$$p = 0.025 \cdot \left[(\beta - 1) + 0.5 \cdot \frac{d_0}{100 \cdot s_0} \right] \cdot R_m. \quad (5.38)$$

Оптимална вредност силе држања мора задовољити услове с обзиром на појаву набора, тј. разарање комада.

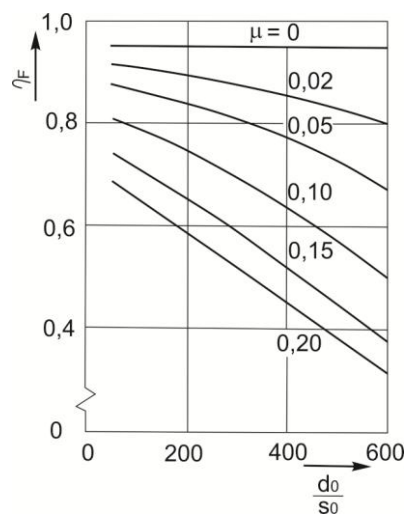
Повећањем пречника комада који се извлачи, повећава се и специфични притисак на ободу комада, расте сила држања уз смањење граничног степена извлачења. Одређивањем компонената силе извлачења које се односе на „чисто обликовање“ (F_1+F_2) и трење (F_3+F_4), може се погодно

представити утицај трења при дубоком извлачењу. При томе се за сваки пречник извлачења усваја на основу препорука или експериментално одређује гранични степен извлачења. На слици 5.21 приказане су компоненте силе извлачења у функцији пречника према изразима (5.33) до (5.36), за случај извлачења комада од нискоугљеничног челичног лима Č0148P5 (DC04, према EN10027-1), према истраживању [13]. Поменути лим је један од коришћених материјала у експерименталном делу овог рада.

Са порастом пречника комада расте сила трења у односу на силу обликовања. То истовремено значи да код великих отпресака значајан утицај на процес извлачења има трење у поменутим зонама. Карактеристике материјала, као што су: затезна чврстоћа, експонент деформационог ојачања (n – фактор) и тсл. су од секундарног значаја. Ову констатацију треба условно прихватити, с обзиром на то да ови параметри одређују и способност за преношење укупне силе извлачења [12, 13]. Оптималним избором мазива (као и зоне његовог наношења) могуће је значајно смањити трење на ободу и побољшати стабилност одвијања процеса обликовања.



Слика 5.21 Компоненте силе извлачења у зависности од пречника комада [12]



Слика 5.22 Зависност коефицијента η_F од услова извлачења [12, 13]

Коефицијент ефикасности процеса пластичног обликовања (слике 5.21 и 5.22) посредно описује утицај трења, а израчунава се према изразу:

$$\eta_F = \frac{F_1}{F} \quad (5.39)$$

У циљу што потпуније контроле и управљања процесом дубоког извлачења, сила држања (тј. контактни притисак на држачу) може бити променљива за време процеса. Та проблематика је изложена у истраживањима [14, 15, 33, 34, 35, 36, 48, 49, 51, 71].

5.6. Преглед резултата досадашњих истраживања

Да би се проблем утицаја променљивог контактеног притиска на процес клизања у моделу контакта траке лима између равних површина детаљно сагледао реализован је експериментални компјутеризовани уређај и изведен је сложени фишефакторни експеримент. Како је напоменуто, примењени су различити материјали комада (пре свега лим од Al легура и нискоугљенични челични лим са и без превлаке), различите варијанте контактних елемената алата, различити режими трења и различити утицајни параметри (променљиви контактни притисак за време процеса). Практично, експериментални уређај представља симулатор за реализацију и изучавање физичког модела једног битног сегмента процеса дубоког извлачења у потпуно реалним условима (реални материјали, реалан процес, итд.).

У актуелним радовима из ове области [16-24] обрађена је проблематика моделирања процеса дубоког извлачења на ободу лима између равних контактних површина држача и матрице.

Триболошки модели су формирани у потпуно реалном окружењу: материјал, алат, машина, контактни услови и др. У већини истраживања прати се промена коефицијента трења и деформационе (вучне) силе варирањем поменутих реалних услова у којима се процес одвија. Примењују се алати различите храпавости равних контактних површина (са превлакама и без превлака). Контактни услови се, поред стања контактних површина алата, остварују применом више врста мазива за дубоко извлачење и лимовима са разним превлакама (А1 и челични лимови). Поред тога, могуће је варирати брзину клизања лима. Циљ већине истраживања је управљање излазним параметрима процеса дубоког извлачења. Тежи се добијању што нижих вредности коефицијената трења и деформационих сила, с једне стране, и делова жељене геометрије, без дефеката на ободу (набори), с друге стране.

Могућности утицаја на процес за време његовог трајања су ограничене и своде се на утицаје на ободу лима, углавном преко контактнoг притиска (силе држања) и деловањем затезних ребара на држачу. Заједничко свим досадашњим истраживањима у овој области је задавање константних вредности силе држања или притиска држача у алату за дубоко извлачење. Континуално задавање променљивог притиска, преко унапред дефинисаних функција, за време процеса клизања представља предмет овог истраживања с циљем да обухвати утицај променљивог притиска поред осталих одговарајућих утицаја (алат, контактни услови, материјал, итд.). Међусобна зависност утицаја променљивог притиска држача са осталим утицајима би требало да омогући унапређење управљања процесом дубоког извлачења и допринесе бољем разумевању понашања материјала на ободу лима. На тај начин се могу минимизирати многи проблеми који прате овај процес у реалним производним условима. У наставку ће бити дат кратак осврт на актуелна истраживања из ове области.

У раду [16] дато је експериментално одређивање коефицијента трења при клизању трака од танких лимова према тзв. Вилсоновом моделу. Мерни систем за аквизицију података је релативно једноставан и прати промену силе на траци током процеса клизања. Уређај омогућава коришћење трака од различитих лимова као и цилиндричног алата од различитих материјала. Могуће је задавати контактне услове зависно од примењеног мазива, превлака на материјалу и алату, храпавости, итд. Брзина клизања је константна. Добијају се поуздани резултати употребљиви у процесима обликовања танких лимова са сличном шемом клизања.

У раду [17] приказана је експериментална студија одређивања коефицијента трења при клизању лима између равних површина. Користи се уређај масивне конструкције са великом контактном површином. Контактни притисак узима константне вредности у распону од 1 до 15 МПа. Коришћена су три лима. Два су са превлаком. Остварен је само један режим трења (мешовит). Вариране су и храпавости алата. Добијени резултати за зависности коефицијента трења углавном потврђују познате утицаје. За веће брзине и веће контактне притиске коефицијент трења опада. Међутим, већа храпавост алата није значила увек и већу вредност коефицијента трења.

У раду [18] приказује се експериментално истраживање коефицијента трења код танких лимова на два модела. Први модел је клизање цевчице унутрашњег полупречника 5 mm од лима по цилиндру истог полупречника. Други експериментални модел је клизање траке лима преко ваљчића који симулира затезно ребро. Резултати показују да се тестом унакрсног клизања добијају ниже вредности коефицијената трења и да је разлог вероватно нешто већа вредност контактнoг притиска. Такође, запажено је да коефицијент трења опада са бројем остварених пролаза због ефекта уходавања површина.

У раду [19] приказано је опсежно истраживање ефеката клизања лима између равних површина. Лим је од челика повишене јачине са превлаком од цинка и храпавошћу у виду испупчења. Од овакве храпавости очекује се формирање и задржавање микро цепова мазива и повољнији услови трења у односу на класичне лимове. Одређене су зависности коефицијената трења од брзине клизања и контактнoг притиска за различите услове подмазивања. Углавном су потврђене очекиване зависности. Коефицијент трења опада са порастом брзине и притиска, али не и са повећањем дебљине слоја мазива.

У раду [20] приказује се експериментално истраживање на уређају за клизање трака између равних површина са повишеном температуром. Праћене су промене коефицијената трења у зависности од контактнoг притиска, температуре и примењених мазива. Поред очекиваних утицаја посебно се наглашава да је ефекат мазива знатно слабији код лима са превлаком од алуминијума.

У раду [21] излаже се и тестира сложен математички модел контакта равних површина при сувом трењу. Модел је еластично-пластичан са контактом врхова неравнина. Обављено је поређење

са одговарајућим моделом по методи коначних елемената и констатовано да је предложени модел 60-80 пута бржи без утицаја на тачност резултата.

У раду [22] даје се приказ опсежног експерименталног истраживања понашања лима од челика повишене чврстоће 22MnB5 намењеног за топло обликовање. Исти материјал био је предмет истраживања и у раду [20]. Међутим, нужно је користити превлаку на лиму како би се спречили штетни процеси за време загревања и обликовања. Превлаке су обично на бази комбинација Al-Si и Zn-Ni. Прате се промене коефицијената трења, површинске промене, структурне промене и трансфер материјала од лима ка алату. Треба истаћи запажање да је коефицијент трења нижи са Zn-Ni превлаком у односу на Al-Si. Сматра се да је узрок томе формирање оксида ZnO за време загревања. Та повољна околност праћена је појачаним хабањем лима коју узрокује управо тај оксид. У експериментима нису коришћена мазива.

У раду [23] приказује се опсежно испитивање понашања тврдих превлака на алатима које су намењене пластичном обликовању лимова. Важан део у експерименту заузима испитивање у тесту клизања трака лима између равних површина. Примењују се две савремене DLC (енг. *diamond like carbon*) превлаке. Прате се промене коефицијената трења зависно од брзине и контактнoг притиска у условима сувог трења и са мазивом. Са мазивом све 4 превлаке дају уједначене вредности коефицијената трења $\mu = 0.05-0.2$ у зависности од брзине. При сувом трењу класичне превлаке су изразито неповољне ($\mu = 0.4-0.6$), док DLC превлаке дају приближно константну вредност $\mu = 0.15$.

У раду [24] даје се део експерименталног истраживања утицаја површинске храпавости и вискозитета мазива на коефицијент трења у тесту клизања трака лима између равних површина. На основу резултата формира се модел (формула) за коефицијент трења који се тестира на примеру чистог развлачења дна цилиндричног комада са добром усаглашеношћу модела и експеримента.

Теоријски приступ код триболошких модела дубоког извлачења углавном се заснива на одређивању вучне силе и коефицијента трења. Сила се разлаже на више компонената [105] уз дефинисање ојачања при цикличном оптерећењу лима током деформисања и клизања обода. Користе се поставке теорије пластичности.

Неки од триболошких модела, нпр. провлачење лима између површина ребра и матрице (модел “В”) или дубоко извлачење са променом дебљине лима могу се применити за оцену мазива [14, 48, 76, 79, 91, 92, 93], као и за истраживање хабања алата [87].

Поједина истраживања [87] посвећена су адхезивном дејству алата и лима. Реч је о појави „прилепљивања” делова лима за површину алата. Показује се да она највише зависи од храпавости, тврдоће и хемијских карактеристика површина у контакту, као и од реолошких својстава мазива.

Крајем прошлог века долази до значајних промена у изучавању могућности утицаја на ободу при дубоком извлачењу лимова (променљиви контактни притисак и примена затезних ребара). То се, пре свега, односи на развој и примену сложених лабораторијских уређаја са компјутерским управљањем. Дефинише се крајњи научни, али и технолошки циљ: активно управљање процесом обликовања према задатим критеријумима уз управљајућа дејства током трајања процеса обликовања. Значај оваквог приступа огледа се у све већој примени нових материјала, углавном повишене јачине и знатно лошијих својстава деформабилности и обрадивости. Показује се да избор параметара који значајно утичу на процес, а омогућавају управљање у смислу промене неких величина симултано током процеса, није велики [14, 91, 94]. Заправо, то су само два параметра: сила држања и висина затезних ребара.

С друге стране, у широку употребу улазе све јачи софтвери за нумеричке симулације процеса обликовања, који омогућавају све боље предикције ефеката процеса пластичног обликовања на реалним материјалима [26, 28, 29, 32, 36, 95, 96]. То поједностављује развој производа и избор технологија, али не умањује значај експерименталних истраживања.

Један од првих радова који приказује сложен експериментални приступ заснован на компјутеризованој апаратури је рад [97]. Истраживање је спроведено на Мичигенском технолошком универзитету у Хјутону (*Michigan Technological University, Houghton, USA*). Апаратура у основи представља физички модел клизања траке лима преко затезног ребра и заобљења ивице матрице. На овај начин симулира се заобљење ивице матрице и обод алата за дубоко извлачење са затезним ребром и држачем. Управљачки систем омогућава задавање променљиве силе држања и висине ребра током процеса клизања траке. Могуће је мерити вучну силу, силу држања, силу на ребру, ход траке и ход ребра. Коначни циљ експеримента јесте остваривање управљачког дејства висине ребра према вучној сили. Задат је критеријум жељене растуће-оппадајуће зависности вучне силе и управљачки систем је корекцијом померања ребра остваривао потребне висине ребра да би се задовољио постављени критеријум са довољном тачношћу. Пре овог коначног теста вршене су разне

пробе рада уређаја са ручним задавањем висине ребра, са константним и променљивим силама држања, са различитим односима брзине клизања траке и брзине померања ребра. Праћен је утицај свих ових параметара на вучну силу. Коришћене су траке од класичног нискоугљеничног челичног лима без превлака са затезном чврстоћом од 431 МПа и коефицијентом деформационог ојачања (n-фактор) 0.245. Ширина трака била је 25 mm, а дебљина 0.8 mm. Тежиште у овом истраживању било је на апаратури, а не на свеукупној анализи утицаја битних фактора на процес деформисања и клизања. Недостаје анализа утицаја услова трења. Аутори наглашавају да су површине трака брисане папирним убрисом, а у зони заобљења матрице подмазиване уљем чије карактеристике нису дате. Значај овог рада лежи у томе да је успешним експериментом показана реална могућност симултаног задавања променљиве силе држања, као управљачког дејства на вучну силу траке за време процеса клизања. У раду је наглашена техничка димензија апаратуре на рачун шире анализе и процене свих утицајних фактора.

Рад [98] даје методологију пројектовања алата за обликовање сложених делова каросерије аутомобила од легура алуминијума. Паралелно се излажу карактеристике класичног пројектовања и пројектовања коришћењем CAD софтвера. Наглашава се и значај затезних ребара, као једна од могућности управљања клизањем на ободу, с обзиром на то да лимови од Al легура имају изражену склоност ка појави набора у различитим зонама.

Методика решавања технолошког задатка дубоког извлачења комада већих димензија типа каде дата је у раду [95] са Националног универзитета у Тајпеху, Тајван (*Taiwan National University, Taipei*). Урађена је нумеричка симулација на великом комерцијалном софтверу *PAM-STAMP*, с циљем решења оптималног распореда затезних ребара и одабира геометрије ребра. Претходно су експериментално одређене карактеристике обрадивости материјала и дијаграм граничне деформабилности. После више изведених симулација потребни подаци су усвојени и примењени на реалном алату.

Рад [99] даје веома успешну анализу и систематизацију различитих утицаја на трење при дубоком извлачењу сложених каросеријских делова. Можда најзначајнији резултат рада представља формирање основе за реализацију управљања деформисањем на ободу комада. Да би управљање на ободу било могуће прво треба прецизно идентификовати управљајуће параметре. То су они које је могуће мењати, односно којима је могуће управљати, за време трајања самог процеса обликовања. Показује се да су то само два параметра. Сила држања и висина затезног ребра. Предуслов за овакву констатацију јесте овладавање техничким могућностима управљања пре свега променљивом силом држања. С друге стране су утицаји које није могуће мењати за време процеса: облик и димензије развијеног стања, мазиво (врста, карактеристике, количина, дистрибуција), константна сила држања. Треба издвојити и анализу утицаја контактне притиска (0 – 25 МПа) на коефицијент трења при коришћењу мазива различите вискозности. Закључује се да код вискознијих мазива коефицијент трења нема линеарну зависност од притиска што може лоше да утиче на управљање преко силе држања, односно силе трења на ободу. За управљање су погодне веће вредности коефицијената трења линеарно зависне од притиска.

Рад [96] односи се на примену нових материјала, при обликовању дубоким извлачењем. Реч је о ласерски завареним *TWB* лимовима (*TWB – tailor welded blanks*). Истраживање је опсежно и примарно експериментално, али илустративно се дају резултати нумеричких симулација у врхунском софтверу *PAM-STAMP*. Аутори су са Универзитета у Сувону и Чунчону, Јужна Кореја (*Sung Kyun Kwan University, Suwon, Kangwon University, Chunchon, South Korea*).

Корејски аутори са националног Института за савремену науку и технологију у Даеџеону (*Korea Advanced institute of Science and Technology, Daejeon, South Korea*), у раду [26], дају занимљиву анализу. У првом делу изводи се нумеричка симулација на софтверу *ABAQUS* у циљу дефинисања израза за вучну силу. Виртуални експеримент даје податке о зависности вучне силе од дебљине лима. Регресионом анализом долази се до зависности у облику квадратне функције. Са тако добијеним изразом изводи се симулација примене затезног ребра на обликовању каросеријског дела сложене геометрије. Користи се софтвер *LS Dyna 3D*. За време те симулације изводи се и оптимизација израза за вучну силу. Коначни резултат су тачке на дијаграму граничне деформабилности које приказују дистрибуцију деформација у равни лима. Положај свих тачака је испод граничних кривих што треба да докаже успешност примењеног приступа.

Рад [27] потиче из Индије (*Engineering College, Ramanathapuram*). Анализира се оптимални положај затезног ребра код једног од елементарних случајева - извлачења полусферним извлакачем. Изводи се квалитетна нумеричка симулација на софтверима *DYNAFORM* и *LSDYNA*, а затим и експеримент у истим условима као у симулацији. Урађено је више случајева положаја затезног

ребра и праћене су расподеле деформација. Експериментална истраживања су потврдила расподеле деформација добијене у симулацији.

Радови [100] и [101] урађени су у једном од најпознатијих светских центара за истраживања из области технологије пластичног обликовања, Институту за технологију пластичног обликовања метала у Штутгарту, Немачка (*Institute for metal forming technology of the University Stuttgart, Germany*).

Рад [100] је заправо обимна студија праваца развоја поменуте области. У почетном делу даје се анализа стратешких праваца наступа на тржишту, пре свега компанија које се баве производњом каросеријских делова од лима. Иза тога излажу се анализе конкретних истраживачких проблема као што су: унапређивање активних површина код алата за обликовање лима; развој нових модела трења водећи рачуна о количини мазива, дистрибуцији напона и локалним интензитетима напона; истраживања зависности трења од топографије и праваца у равни лима; истраживање триболошких појава код алата од полимерних материјала; развој модификованих процеса обликовања нових лимова са применом механизма претходног ојачања, итд.

Посебно поглавље обухвата оптимизацију силе држања у простору и времену применом нових алгоритама у софтверима за симулацију. Наиме, први основни критеријум за успешно одвијање процеса обликовања јесте одговарајућа промена напона у зиду комада, а други – спречавање појаве набора на ободу. Промену напона у зиду комада је веома тешко експериментално одредити, али је могуће извести нумеричку симулацију и добити промену напона при успешно изведеном процесу обликовања. На основу тога подешавају се управљачка дејства силе држања. Са решењем сензора за мерење напона који би био смештен у извлакачу и са постојећим сензорима за мерење зазора на држачу, постаје могуће поставити савршеније верзије интелигентног система за управљање процесом дубоког извлачења.

У раду [101] излаже се више детаља о унапређеном систему за управљање процесом дубоког извлачења, који је у претходном раду поменут са основним принципима. Централно место у новом систему управљања заузима зависност затежућег напона у зиду комада од хода извлакача, односно дубине извлачења. Експерименталним путем дошло се до оптималних зависности при којима процес обликовања тече успешно и добија се квалитетан комад без дефеката. Да би се процес управљања поједноставио, сложене криве зависности затежућег напона су линеаризоване између одговарајућих превојних тачака. Комплетан управљачки систем је комплексан у хардверском и софтверском смислу. Њему се задаје референтна зависност затежућег напона у зиду комада и прати евентуална појава набора на ободу. Презентовани резултати указују да је овај приступ један од најуспешнијих. Пробе су рађене на призматичном комаду, трапезне форме са четири угла, при чему су радијуси заобљења различити. Коришћена су 4 затезна ребра на равним странама и 8 сензора напона на извлакачу. Примењена су два материјала и 5 различитих мазива. Једини недостатак који је уочен односи се на извесна оштећења комада проузрокована променом геометрије извлакача у зони смештаја сензора напона.

Завршни део рада даје детаљно поређење новог, унапређеног сензора напона са првобитним. Нови сензор минимално ремети геометрију извлакача, а добијени резултати затежућег напона показују да су минималне разлике у односу на претходни сензор. На крају, аутори се надају да ће локалном применом оваквог, интелигентног система управљања заснованог на мерењу затежућег напона у зиду комада, на деловима сложене геометрије и од теже обрадивих материјала добити резултате потпуно упоредиве са карактеристикама комада добијеним у нумеричким симулацијама.

У раду *Sulaiman M.H.* и осталих (*University of Cambridge, United Kingdom, 2017*) [76] истражује се утицај површине алата на подмазивање и трење у тесту дубоког извлачења са стањењем. За потребе експеримента је урађен модел алата са контактним површинама у виду жлебова, оријентисаних у правцу клизања. Жлебови су уздужни, релативно мале дубине, израђени под малим углом у односу на површину радног комада (траке лима). Растојање између жлебова је променљиво. Примењене су две врсте уља за подмазивање (минерално са адитивима и чисто минерално уље). Основна идеја је проналажење оптималног растојања између жлебова. У зонама жлебова се задржава мазиво тако да за време клизања траке лима врши локално блокирање кретања и ствара услове за микропластично хидродинамичко подмазивање. На тај начин се може по зонама пратити коефицијент трења и вредност деформационе силе. Ако су растојања између суседних равних површина алата (зона без жлебова) сувише мала приметан је пораст оптерећења. Слично важи и за превелика растојања суседних равних површина алата. Експериментално је утврђено да постоји оптимално растојање између жлебова које обезбеђује активан слој мазива у контакту и своди коефицијент трења на прихватљиву вредност.

У раду [78] истраживања су усмерена на процес вучења трака лима од алуминијумских легура које су све више заступљене у аутомобилској индустрији. Траке лима су повишене јачине, претходно затегнуте тестом једноосног затезања до одређеног износа пластичне деформације. Обликовање лимова од алуминијумских легура повишене јачине захтева знатно више вредности деформационих сила, што указује на могућност промене услова трења у зависности од вредности претходно остварене пластичне деформације. У овом раду праћена је промена коефицијента трења у процесу вучења три типа комерцијалних каросеријских лимова од А1 легура који су претходно затегнути до различитих износа деофрмација. Показано је, у првом делу рада, да се коефицијент трења повећава са повећањем износа пластичне деформације. У другом делу рада, показано је да се код виших износа пластичних деформација, коефицијент трења може смањивати применом одговарајућих врста мазива. Реч је о чврстим (сувим) мазивима у виду праха и на бази воска, која обезбеђују ниже вредности коефицијената трења, чак и код виших вредности остварених пластичних деформација.

Рад [79] представља студију о мазивима која се примењују у поступку дубоког извлачења. У циљу тестирања и оцене квалитета мазива коришћен је триболошки модел вучења траке лима између равних контактних површина, који симулира клизање обода лима између површина држача и матрице. Испитивана је ефикасност мазива и њихових адитива у циљу смањења коефицијента трења. У тесту вучења траке лима коришћене су различите вредности притисака држача (силе држања), различите вредности брзине клизања. Примењене су различите врсте адитива које се додају базним мазивима, при чему је вариран њихов вискозитет. Анализиран је утицај укупно девет врста мазива на смањење коефицијента трења, при чему шест мазива имају адитиве, а три су без адитива. Хемијски састав сваког адитива као и физичке карактеристике базних мазива, дати су у раду. Добијен је широк дијапазон резултата. Генерално, већина адитива побољшала су карактеристике базних мазива који се огледају преко смањења коефицијента трења. Најефикаснији су они адитиви који повећавају вискозитет мазива.

Аутори у раду [102] баве се теоријско-експерименталним истраживањем улоге трења у познатом “*Nakazima*“ тесту одређивања граничне деформабилности танких лимова. Различити истраживачи имају подељена мишљења о ефекту триболошких услова у зони контакта полусферичног извлакача и узорка. У овом раду приказана је аналитичка процедура истраживања утицаја трења у поступку одређивања главних деформација дијаграма граничне деформабилности (ДГД). Тестови развлачења примењени су на двофазном челику, при чему су остварена два потпуно различита услова трења: (1) минимално трење између извлакача и узорка постигнуто је применом танких тефлонских фолија и (2) максимално трење постигнуто је без присуства мазива после хемијског чишћења површина извлакача и лимова. Као што је и очекивано, ДГД дијаграми добијени под овим условима трења су различити. Међутим, анализа показује да је распоред добијених кривих ДГД једног узорка исти за оба услова трења. С друге стране, износи релативних деформација у материјалним тачкама за обе врсте триболошких услова се веома разликују и строго су зависни од услова трења, што доводи до разлике у локацијама разарања и локализације на узорцима.

У раду [103] истраживана је проблематика деформабилности танких лимова помоћу нелинеарног модела трења. С друге стране, примењена је нумеричка симулација на основу методе коначних елемената. У питању је триболошки модел клизања лима између равних контактних површина, где се варирају константе вредности притисака, брзине клизања и дужине хода клизања. Утицај контактне притиска и брзине клизања испитиван је у условима мешовитог подмазивања у зони између лимова и равних контактних површина алата, док је ефекат недостатка мазива истраживан на засебним алатима са великим равним површинама провлачењем веома дугих трака лима. Резултати експеримента и нумеричка симулација процеса показали су да се применом одговарајућег модела, уз варирањем параметара процеса, може процењивати деформабилност челичних лимова.

Рад [104] представља експериментално-нумеричку анализу процеса дубоког извлачења лимова од алуминијумске легуре на повишеним температурама. Коришћен је реалан алат. Примењена су три типа услова у контакту, одређена врстом мазива. Том приликом дошло се до закључка да вредност коефицијента трења као и положај подмазивања значајно утичу на минималну дебљину лима која гарантује извлачење делова без дефеката. Оптимална вредност коефицијента трења која обезбеђује извлачење без дефеката износи 0.15. Код делова са неповољнијим контактним условима прелом је наступао у зони радијуса извлакача, што је више пута истражено у ранијим научним радовима. Потврђена је добра сагласност експерименталних и нумеричких резултата.

5.7. Значај променљивости параметара за управљање процесом

Приликом израде делова од лима дубоким извлачењем циљ је добијање жељеног облика и геометрије са што мање операција без нежељених дефеката. У пракси се врло често овај циљ, из више разлога, врло тешко у потпуности може остварити. Појава пукотина (разарања) у критичној зони и настајање набора на ободу уз површинске дефекте (огреботине, ситни зарези, трагови клизања, итд.), су три основна дефекта код ове обраде. Треба нагласити да су сви ови дефекти допунски присутнији код извлачења делова сложене геометрије. Проблематика решавања површинских дефеката (због саме природе узрока) углавном је једноставнија (одговарајућим избором поступка или погодном конструкцијом радних елемената алата, применом одговарајућих мазива, заштитних фолија и тсл.) од спречавања настајања набора и разарања. Сложено, нехомогено и неповољно напонско-деформационо стање, основни је узрок појаве набора и разарања код извлачења делова сложених облика. При томе, критични притисни напони у одређеној зони доводе до појаве набора, док затежући доводе до разарања. С обзиром на то да се напонско-деформационо стање од почетка процеса стално мења и да у одређеним зонама тежи неповољном, неопходно је преко одговарајућих утицајних параметара деловати на ток процеса. Досадашња изучавања и пракса показали су да се за време процеса (симултано) могу мењати само два значајна параметра процеса: сила држања (односно специфични притисак на држачу) и висина затезног ребра. Осим утицаја ова два кључна фактора на процес утичу и други стално присутни фактори: материјал комада и алата, геометрија комада и алата, стање машине, триболошки услови, утицај околине, итд. Треба нагласити да су истраживања и развој компјутерских система за аквизицију и управљање у последњих 20-ак година омогућили реализацију и примену променљиве функционалне зависности контактнoг притиска и променљиву висину затезног ребра за време процеса [14]. Без обзира на ову могућност још увек не постоје коначна и трајна решења овог проблема, ни теоријска ни експериментална. Основни проблем је начин дефинисања задатих функционалних зависности управљаних величина.

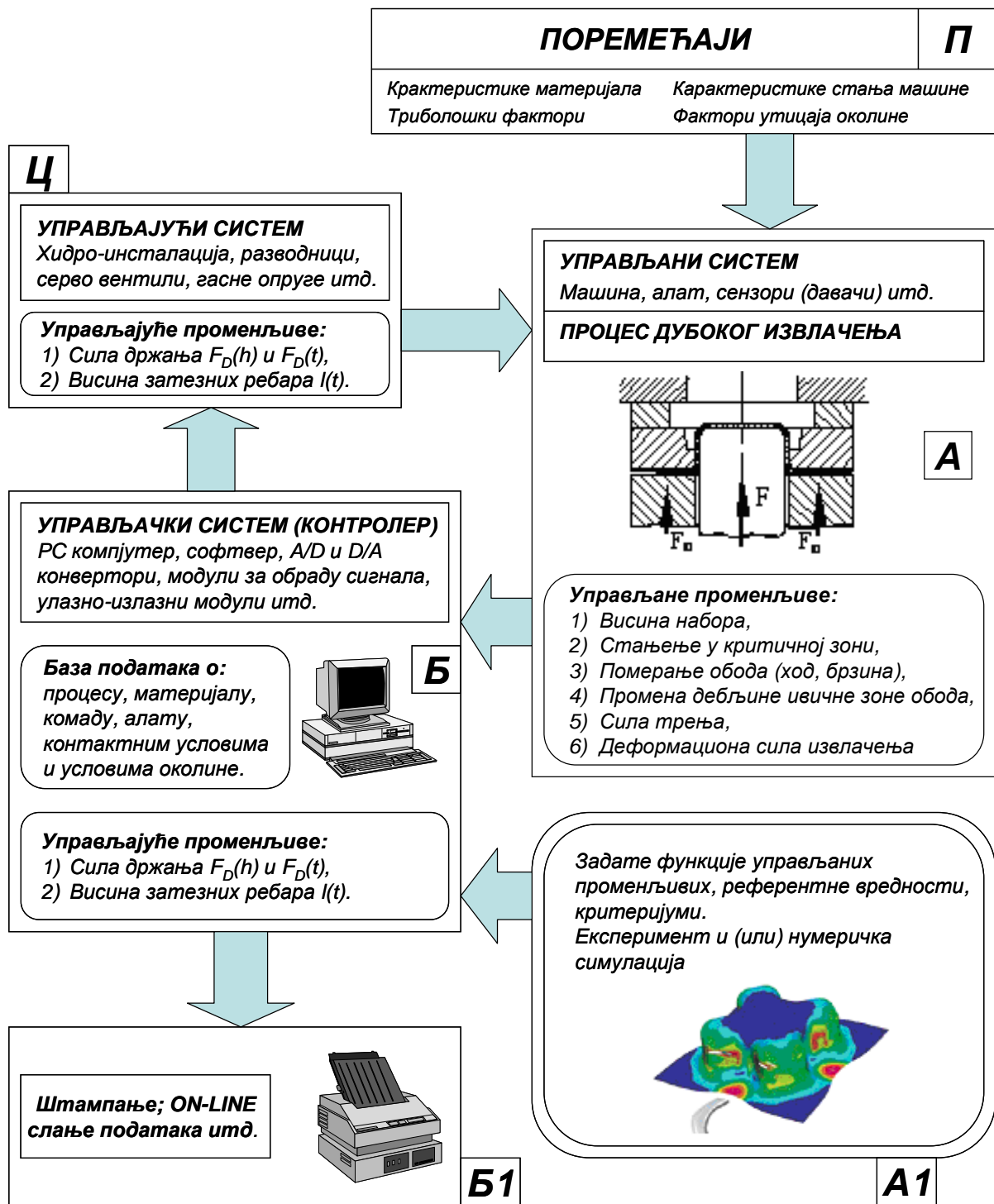
Потребне функционалне зависности се одређују најчешће по систему *try and error* (проба-грешка), било експериментално или нумеричким симулацијама.

Уважавајући све наведене проблеме у циљу тражења једноставнијег система, развило се и реализовало више система за управљање процесом дубоког извлачења. На слици 5.23 [33] дата је шема потпуног, затвореног система управљања са повратном спрегом, док је на слици 5.24 [33] приказана шема поједностављеног система управљања. У оба система, централно место заузима управљани блок (блок „А“), тј. машина са простором за постављање алата, која може да располаже различитим мерним системима, сензорима (давачима), а често и комплетним управљајућим системом или његовим елементима. Код система на слици 5.23 за време читавог процеса прати се испуњавање критеријума успешности. Углавном су то функције промене висине набора и стањења лима и на њих се утиче деловањем управљајућих променљивих (сила држања и висина ребра). Активна дејства се изводе најчешће у неколико (или више) зона на комаду.

Систем на слици 5.24 је знатно једноставнији. Он захтева претходно истраживање и дефинисање функција промене силе држања и висине ребра које гарантују успешан процес. Управљање је једноставније и само захтева реализацију поменутих функција које су сада управљане величине, за разлику од система на слици 5.23 где су управљајуће.

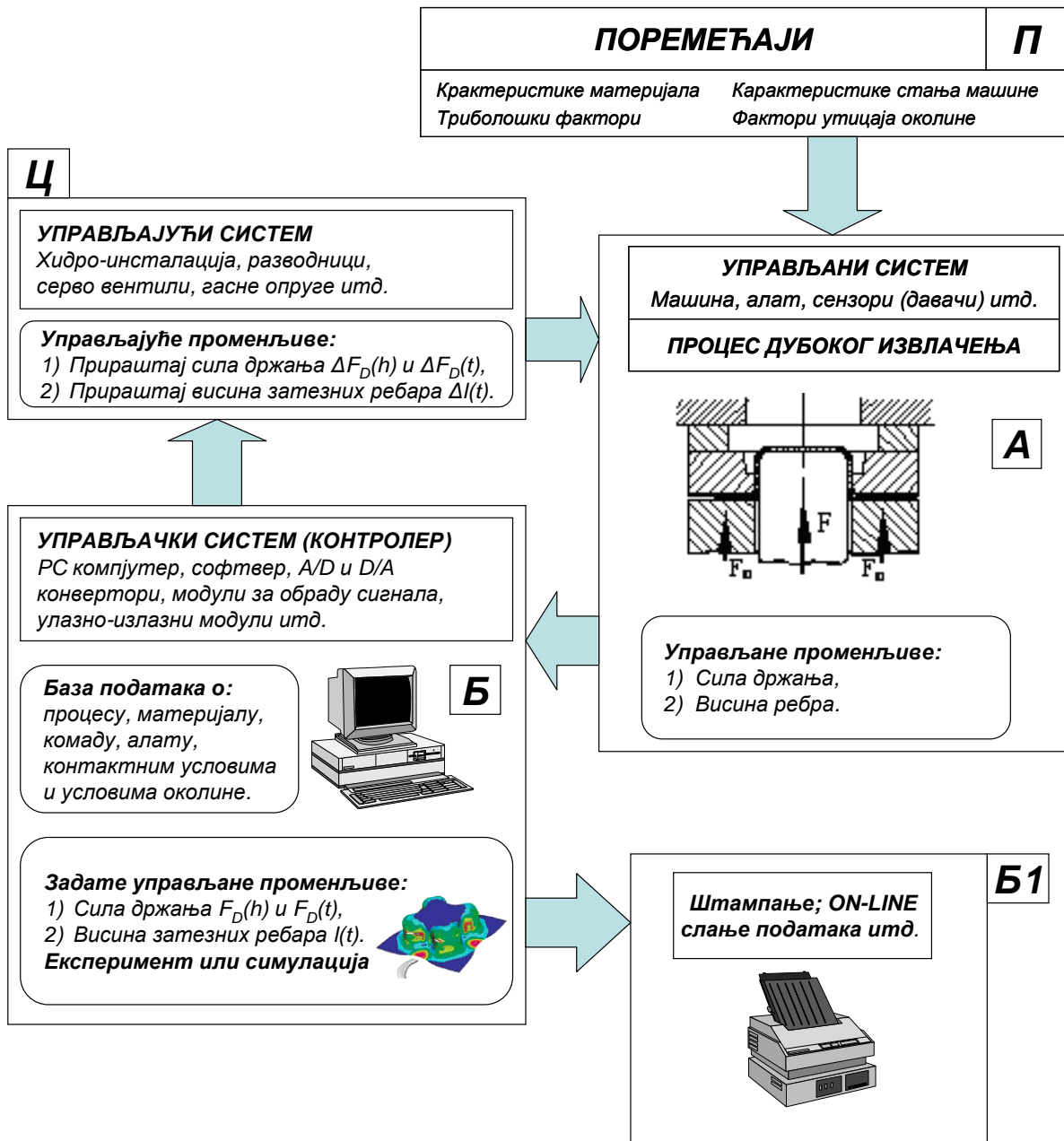
Важни елементи управљачких система (блок „В“ на сликама 5.23 и 5.24), су и базе података о процесу, материјалу, геометрији комада, алата, контактним условима (стање површина, подмазивање и тсл.), као и управљачки систем у којем софтвер има централну улогу.

До сада су реализовани различити системи управљања [4, 5, 6, 7, 44, 105, 106, 107], при чему одабрана управљана променљива практично карактерише систем. Код сложених “closed loop” система управљања (сл. 5.23), сила држања као управљајући параметар одржава задату вредност управљаног параметра у дозвољеним границама. Код оваквог управљања интензитет променљиве силе држања, дефинише задата функција управљане променљиве (зависност померања обода од хода извлакача, зависност брзине клизања обода од хода извлакача, зависност силе трења на ободу од хода извлакача, итд.).



Слика 5.23 Шема управљања процесом дубоког извлачења (“closed loop”) [33]

Код управљања поједностављеним “open loop” системом (сл. 5.24), потребно је унапред дефинисати функцију променљиве силе држања (тзв. еталон криву) која постаје управљана променљива. Еталон криве могу се одредити теоријско – емпиријски, нумеричком симулацијом или експериментално. Еталон криве добијене експериментално су најпоузданије али су експерименти скупи и дуготрајни. Зависности променљиве силе држања добијене у експерименталном делу овога рада, код извлачења делова сложене геометрије, могу у одређеним случајевима послужити као еталон криве.



Слика 5.24 Шема управљања процесом дубоког извлачења ("open loop") [33]

6. КОНЦЕПЦИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Истраживања која су спроведена у овој докторској дисертацији представљају, у извесном смислу, наставак истраживања која се већ неколико деценија изводе на Факултету инжењерских наука (раније Машински факултет) у Крагујевцу. Највећи део поменутих истраживања из области технологије пластичног обликовања односи се на обраду лима дубоким извлачењем како осносиметричних тако и несиметричних комада [12, 13, 14, 15, 37, 44]. Готово сва истраживања из ове области на Машинском факултету у Крагујевцу (сада Факултету инжењерских наука) везана су за три имена: пок. проф. др *Б. Девеџића* који је поставио основе изучавања обрадивости танких лимова, за проф. др *М. Стефановића* који акценат ставља на трибологију процеса и за проф. др *С. Александровића* који истражује деформабилност лимова, а нарочито утицај променљивих параметара на процес обликовања. Сва досадашња истраживања су публикована како у форми докторских дисертација и магистарских теза, тако и у форми монографија и већег броја научних радова.

Дисертација је замишљена као експериментално истраживање понашања лима на моделу клизања између равних површина у условима сложених променљивих утицаја за време процеса дубоког извлачења. Основна идеја је задавање функција променљивог притиска у контакту за време процеса клизања и праћење промене вучне силе, коефицијента трења, површинске храпавости лима и алата.

6.1. Планирање истраживања

Процес обликовања се најчешће реализује тако што се сви параметри и услови процеса (сила држања, брзина деформисања, смањење или повећање трења и др.) подешавају пре почетка радног хода машине. Процес аутономно траје до краја, успешно или неуспешно. Постоје знатне тешкоће у остваривању било каквих додатних дејстава док процес траје. У садашњим условима то су само две могућности: сила држања променљивог интензитета и затезна ребра променљиве висине. Оба дејства захтевају сложене управљачке системе. Конкретно истраживање на моделу треба да покаже какве ефекте (заједно са осталим утицајима) остварују променљиви интензитети силе држања на трење, вучну силу и посредно на затезући напон у материјалу. Такође, у основне проблеме спада и дефинисање функционалних зависности споменутих величина.

Као што је већ речено сила држања и висина затезног ребра су једина два фактора процеса дубоког извлачења које је могуће симултано мењати за време трајања процеса обликовања. Ако је та промена правилно осмишљена и изведена, водећи рачуна о свеукупном склопу са осталим утицајима, могуће је процес усмеравати ка успешном крају, односно, постаје могуће управљање процесом.

Да би се тај циљ остварио треба савладати потешкоће у разумевању самог процеса обликовања, с једне, и потешкоће техничке природе, с друге стране. Разумевање процеса треба да резултира дефинисањем функција променљивих параметара погодних за управљање (управљане променљиве, поглавље 5.7). Чињени су покушаји са различитим параметрима: висина набора, померање обода, сила трења на ободу, промена дебљине ивице обода, укупна сила извлачења, стањење у критичној зони, да би истраживања [100, 101] увела уздужни (затезући) напон у вертикалном делу комада. Веома је значајно доћи до функционалне зависности управљане променљиве која гарантује успешно одвијање процеса. У циљу дефинисања тих функција могућа су два приступа: експериментални и преко нумеричких симулација. Низ предности фаворизују нумеричке симулације, али је релативно мало високо софистицираних софтвера који могу потпуно да симулирају сложене појаве у реалним процесима пластичног обликовања, какав је процес дубоког извлачења. Ако се функција управљане променљиве (или више променљивих) успешно дефинише, промена силе држања (контактног притиска на држачу) и промена висине ребра својим управљајућим дејством могу да одржавају управљане параметре у задатим границама за време трајања процеса. Управљачки системи који су у стању да изводе оваква дејства код комада сложене геометрије имају велику сложеност, интелигентан и аутономан рад. Веома су скупи и доступни за сасвим мали број великих компанија и истраживачких институција.

Алтернативни приступ (на извештан начин примењен у овом раду) подразумева претходна истраживања (углавном експериментална) у циљу добијања функционалних зависности силе држања које би гарантовале извођење процеса обликовања и добијање успешног комада. Дакле, уместо интелигентног система који дефинише посебне функције управљаних променљивих и где је променљива сила држања (са или без промене висине затезног ребра) управљајуће дејство, формира се систем где је циљна функција непосредно сила држања (и/или функција промене висине затезног ребра), које су претходно оптимизоване и чија промена гарантује успешан ток процеса (сл. 5.23). Тако поједностављен управљачки систем далеко је доступнији због знатно мањих улагања.

Основна идеја овог рада је, заправо, шира експериментална анализа утицаја променљиве силе држања (контактнoг притиска) на вучну силу при клизању трака од лима између равних контактних површина. Вучна сила се може довести у везу са затежућим напоном у вертикалном зиду извучених комада, чија функционална промена презентује ток процеса обликовања [100, 101], што је и основни разлог праћења њене промене.

На основу теоријско-емпиријских разматрања дефинисан је широк дијапазон функција контактнoг притиска различитог карактера промене (сл. 6.1). Ради се о параболичним функцијама опадајућег (P1), растућег (P2), комбинованог опадајуће-растућег (P3) и растуће-опадајућег (P4) карактера. Такође, примењене су две линеарне функције: опадајућа (P5) и растућа (P6), као и две константне зависности (P8 и P10). Притисак се прати у зависности од времена или хода траке (сл. 6.1).

Функције контактних притисака су примењене у комбинацији са одговарајућим триболошким (контактним) условима између алата и радног комада - лима. Примењена су три стања: суво трење - технички суве површине (потпуно одмашћене одговарајућим растварачима) и мешовито трење – примена одговарајућег уља за дубоко извлачење, као и мазиве масти на бази молибден-дисулфида. Поред тога, примењена су четири типа површина на изменљивим контактним елементима: брушене површине, нитриране површине, полиране површине и површине са превлаком од титан-нитрида.

Истраживање је спроведено на три типа материјала: класичном нискоугљеничном каросеријском челичном лиму (C0148P5, тј. DC04) без превлаке у једном случају, и једнострано поцинкованом у другом случају (DC04+ZE), као и лиму од алуминијумске легуре из серије 5000 (AlMg4,5Mn0,7, тј. EN AW – 5083).

Тежиште експеримента је постављено на истраживању утицаја карактера функционалне промене контактнoг притиска на вучну силу и коефицијент трења, па је брзина фиксирана на 20 mm/min.

Пре извођења централног дела експеримента, у првом делу су изведена испитивања следећих карактеристика материјала: механичке карактеристике и показатељи обрадивости, криве ојачања, дијаграми граничне деформабилности, показатељи храпавости површина и хемијски састав (сл. 6.1). Ова испитивања изведена су на расположивој опреми универзалне намене. Главни део експерименталних истраживања захтевао је пројектовање, израду и тестирање оригиналног механичко-хидрауличног уређаја са компјутеризованим мерно-управљачким системом. Резултати истраживања изведених на том уређају представљају и најважнији допринос овог рада.

Ако би се са набројаним факторима извео пун експеримент без понављања било би потребно 360 епрувета и добијање 1440 дијаграма функција притиска, вучне силе, коефицијента трења и храпавости (сл. 6.1). Узимајући у обзир претходна испитивања и неопходна понављања ти бројеви би били знатно већи, а такав експеримент нереалан. Зато се приступило оптимизацији, односно редукацији одговарајућих комбинација утицајних фактора. Значајно је смањен број испитивања у условима сувог трења, јер такво трење има најмањи практични значај. Такође, урађен је мањи број испитивања са константним притиском зато што су та испитивања класичног карактера и добро позната, посебно код челичног лима. Оваквим приступом потребан број епрувета (без понављања) за централни део експеримента пао је на око 240 што је експеримент учинило практично изводљивим.

У складу са претходно изнетим постављен је план експеримента и утврђени су циљеви истраживања. Прво је пројектовање и реализација оригиналног експерименталног триболошког теста заснованог на физичком моделу клизања трака лима између равних површина. Особеност теста јесте остваривање линеарних и нелинеарних функција промене контактнoг притиска за време трајања процеса. Други циљ је прецизно квантификовање ефеката конкретних утицаја (врсте лима, параметара алата и контактних услова) на вучну силу, коефицијент трења и промене храпавости површина лима и алата.

Треће, очекује се да познавање природе наведених ефеката омогући унапређење знања о утицајима на ток одговарајућих елемената процеса дубоког извлачења, као и могућностима за управљање тим процесом.

У комбинацијама поменутих утицаја потребно је било извршити и процену значаја сваког од њих у датим околностима, и закључити који поспешује, а који не, деловање променљивог притиска на држачу. Оригиналношћу истраживања је увођење у процес променљивих интензитета силе држања. Посебно су значајне промене по нелинерним функционалним зависностима за време процеса. Сила држања је нормална сила при генерисању трења у контакту. Кључни параметар за квантификацију трења је коефицијент трења и он се може успешно мерити за време трајања процеса.



Слика 6.1 Општи план експеримента

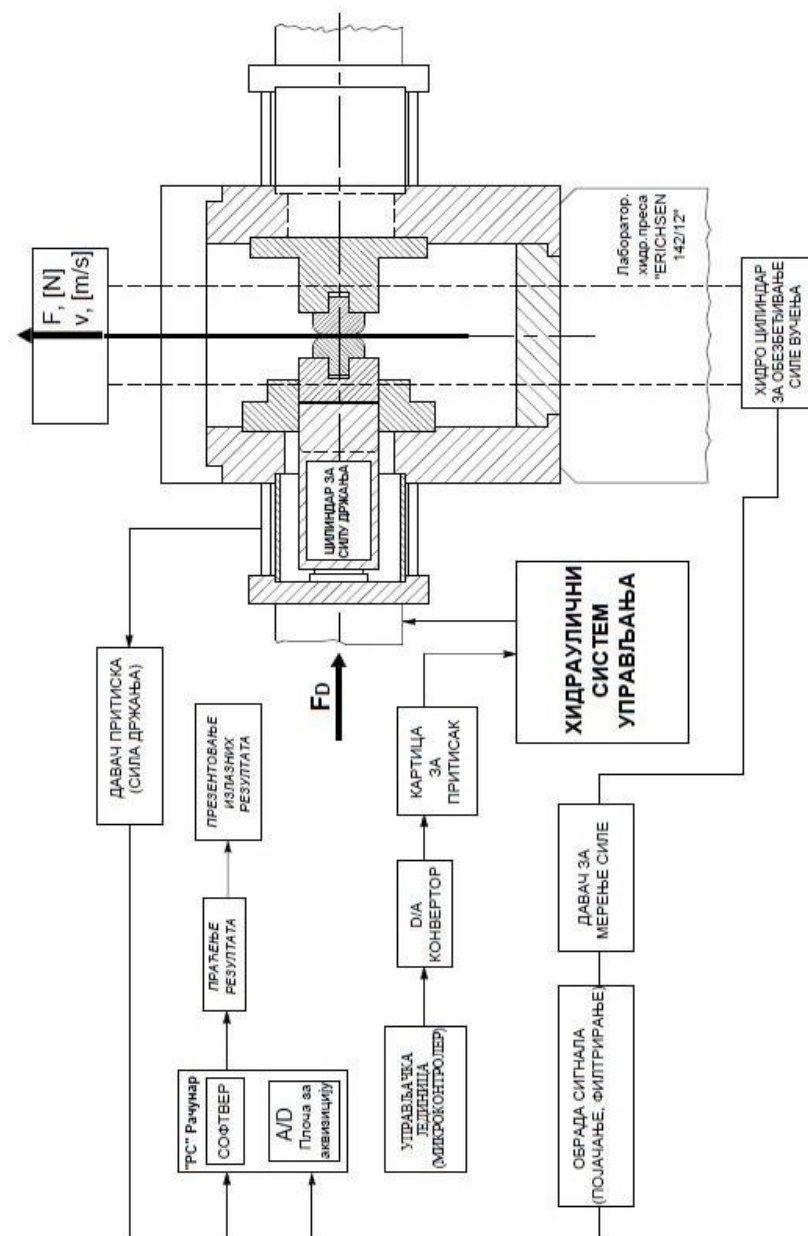
На основу претходно наведеног, најважнији резултати који се очекују од ове докторске дисертације јесу:

- дефинисање и практична реализација оригиналног експерименталног теста чија је особеност реализација сложених нелинеарних и линеарних функција притиска у контакту лима и алата;
- добијање серије резултата који дају зависност вучне силе и коефицијента трења од хода траке или времена при варирању различитих услова (притисак, брзина, материјал лима, параметри алата, мазива);
- дефинисање промене храпавости алата и лима зависно од примењених услова.

Систематизација ових резултата, поред научне, има и значајну практичну вредност у области нових технологија пластичног обликовања, посебно у области дубоког извлачења танких лимова.

6.2. Експериментална опрема и уређаји

За реализацију највећег дела општег плана експеримента (сл. 6.1) било је неопходно, поред универзалне опреме којом располаже Лабораторија за обраду метала деформисањем и машинске материјале на Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, конструисати, изградити и тестирати оригинални уређај који ће омогућити извођење планираног експеримента, а нарочито деловање променљивог притиска према претходно задатим функцијама.



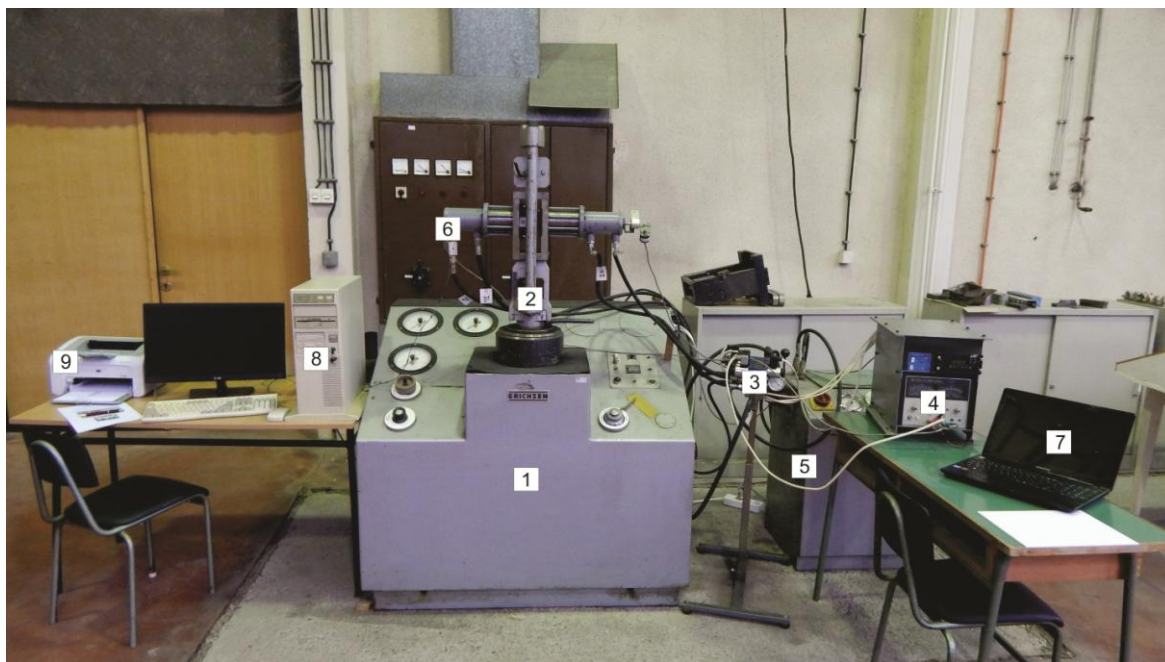
Слика 6.2 Шема система за испитивање клизања лима између равних површина

Концепција комплетног система дата је преко блок шеме на слици 6.2, а физички изглед на слици 6.3. Ради се о компјутеризованој механичко-хидрауличној апаратури са програмским управљањем. Структуру система чине следећи елементи (сл. 6.3):

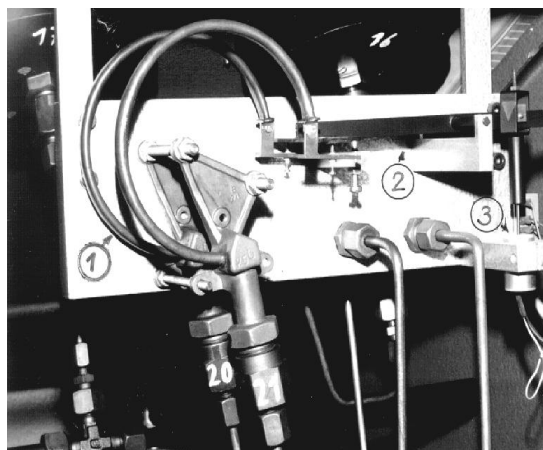
- Лабораторијска хидраулична преса троструког дејства *ERICHSEN* 142/12 - позиција 1;
- Скоп механичко-хидрауличног дела уређаја - позиција 2;
- Хидраулични модул - позиција 3;
- Електро-управљачки модул - позиција 4;
- Хидраулични агрегат - позиција 5;
- Давач притиска - позиција 6;
- Рачунар за израду и меморисање програма - позиција 7;
- Рачунар са модулима за аквизицију података и обраду свих сигнала, праћење и презентацију резултата - позиција 8;
- Принтер за штампање резултата - позиција 9.

Лабораторијска хидраулична преса троструког дејства *ERICHSEN* коришћена је само са својим главним дејством за остваривање силе вучења траке. Као што се види са шеме на слици 6.2, главно дејство машине у затвореном кућишту поседује сензор који даје аналогни (напонски) излазни сигнал. На слици 6.4 приказано је оригинално решење индуктивног давача силе.

Померање језгра индуктивног давача (3) обезбеђује Бурдонова цев (1), која одговарајући притисак у главном цилиндру претвара у померање. Померање се преко двокраке полуге (2) преноси на језгро давача (3) у вертикалном правцу.

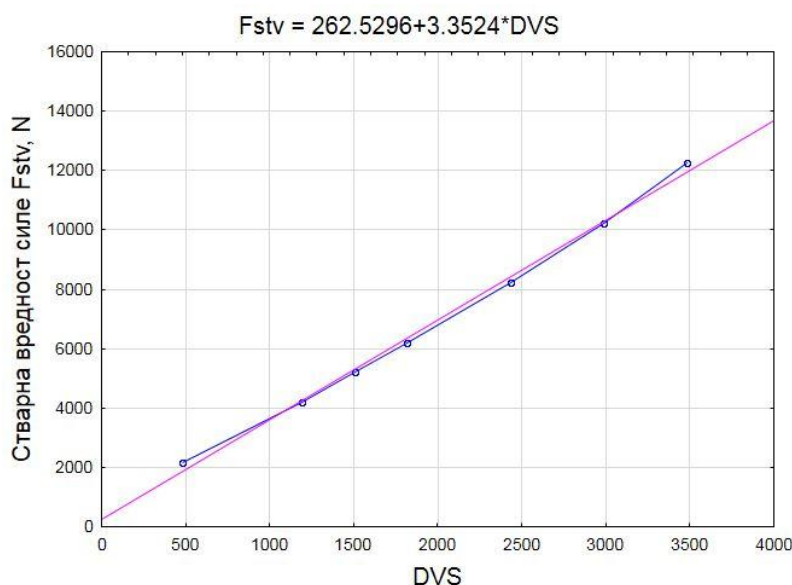


Слика 6.3 Систем за провлачење траке лима између равних контактних површина



Слика 6.4 Индуктивни давач силе (*ERICHSEN* 142/12)

На слици 6.5 дата је карактеристика давача силе (крива зависности стварне вредности силе од дигиталних вредности силе), добијена мерењем тј. баждарењем. Баждарења су вршена за време пуштања апаратуре у рад и пробних мерења.



Слика 6.5 Карактеристика давача силе

Код индуктивног давача силе напонски сигнал на излазу је релативно малог интензитета. Износи приближно 180 mV за вредност остварене силе од 5000 N. Сигнал је појачан и прилагођен А/Д конвертору. А/Д конвертор је елемент мултифункционалне картице за аквизицију података која је уграђена директно на конекторе матичне плоче рачунара (позиција 8, сл. 6.3). Матична плоча је типа PCADDA-12-FPC-010 (Flytech Technology Co. Ltd., Taiwan) са карактеристикама:

А/Д конвертор

- Принцип рада заснован је на методи сукцесивних апроксимација;
- Поседује 16 канала са 12-то битном резолуцијом;
- Опсег улазног сигнала износи 0-9 V;
- Фреквенција износи 200 Hz.

Д/А конвертор

- Поседује 1 канал са 12-то битном резолуцијом;
- Опсег излазног сигнала износи -9 V до +9 V;
- Нелинеарност уређаја је приближно 2%.

С обзиром на параметре процеса дубоког извлачења као и параметре који су предвиђени планом експеримента, карактеристике матичне плоче су у потпуности задовољавајуће. Илустрације ради, 12-то битна тачност омогућава конвертовање минималне вредности сигнала 0,0244% мерног опсега, уколико нема појачавања сигнала. Појачање (p) повећава тачност А/Д конверзије (k) према следећем изразу [37]:

$$k = \frac{U}{p} \cdot 2^N, \text{ V}, \quad (6.1)$$

где су:

- U - мерни опсег сигнала и
- N - број бита који одређује резолуцију конвертора.

За случај да је $U = 9 \text{ V}$, $p = 20$, $N = 12$ минимални напон сигнала који се може конвертовати је 0,00011 V, што је 0,00122% од мерног опсега.

Измерена вредност фреквенције од 200 Hz значи да А/Д конвертор може да изврши 200 конверзија у секунди, што је практично његова реална брзина. Према Nyquist-овом критеријуму [37] требало би да фреквенција А/Д конвертора буде најмање два пута већа од максималне фреквенције мерног сигнала. Процес дубоког извлачења као и процес провлачења траке између равних

контактних површина са укупним мереним параметрима процеса спадају у релативно споре (тзв. квази статичке) процесе, па је поменути услов задовољен са великом резервом.

Рачунар, на чију матичну плочу је монтирана плоча за аквизицију и који је директно коришћен у експерименту је лабораторијски персонални рачунар типа *Pentium 3*. За остале потребе (обрада резултата експеримента, реализација софтвера, техничка обрада текста и тсл.) коришћена су још два рачунара јаче конфигурације. Као излазна јединица коришћен је принтер *HP Laser Jet P1102*.

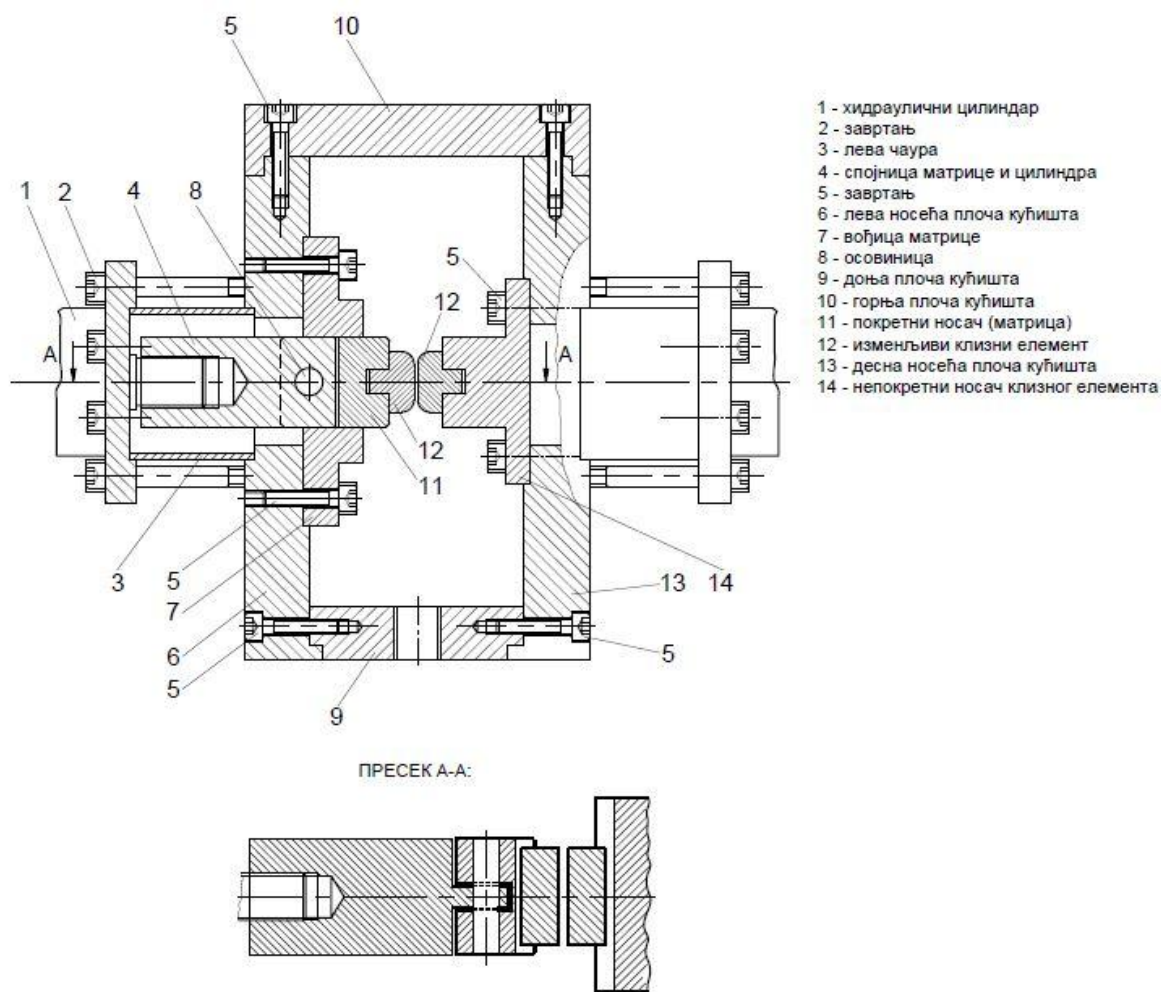
У оквиру обраде сигнала вучне силе [37], изводи се појачање и филтрирање. Појачање се изводи операционим појачивачем са фактором 20, с обзиром на то да је максимални излазни напон давача за мерни опсег силе главног дејства при овом експерименту $U < 0.5 \text{ V}$. Опсег улазног сигнала А/Д конвертора $0 \div 9 \text{ V}$. Поред функције појачања овај електронски склоп врши функцију нископропусног једнополног филтера. Хардверско филтрирање је нужно због шума који проузрокује погонски електромотор машине *ERICHSEN* (шум је фреквенције 24 Hz услед броја обртаја мотора од 1440 o/min).

6.2.1. Уређај за провлачење траке лима између равних контактних површина

Реализовани уређај (сл. 6.3) је оригинално решење и израђен је у циљу обезбеђивања свих захтева који су предвиђени општим планом експеримента тј. темом овога рада. Основну структуру уређаја чине механичко-хидраулични, хидраулични и електро-управљачки модул. Важно је напоменути да овај уређај поседује извесну универзалност. Поред модела вучења траке лима између равних контактних површина, могуће је његово успешно коришћење за испитивање на другим моделима (нпр. модел са затезним ребром), са одговарајућим изменама у механичком делу уређаја, тј. на самом алату. Са тим циљем је уређај израђен са два хидраулична цилиндра у оквиру механичко-хидрауличног модула и читав систем управљања је подешен у складу с тим. У том случају један од цилиндара би се користио за померање затезног ребра, а други за задавање променљивог контактнoг притиска. С обзиром на то да је у овом раду истраживан утицај променљивог контактнoг притиска, за потребе експеримента је коришћен један од хидрауличних цилиндара који врши померање изменљивих контактних елемената са равним површинама. На том цилиндру је монтиран давач притиска (позиција 6, сл. 6.3). Други цилиндар је био активан само из аспекта управљања, тј. није био физички повезан са механичким делом уређаја (клизним контактним елементима) и за време експеримента је радио „празним“ ходом. Потпуно имобилисање другог цилиндра би захтевало радикалну измену управљачког дела уређаја, тј. електро и хидрауличног модула. Овако конструисан и израђен уређај се може веома успешно користити за испитивање утицаја променљивог контактнoг притиска како за модел клизања између равних контактних површина (модел „А“, поглавље 5.1), тако и код других модела клизања (нпр. модел са затезним ребром „В“, поглавље 5.2). За то би биле неопходне значајне измене на механичком делу уређаја-алату.

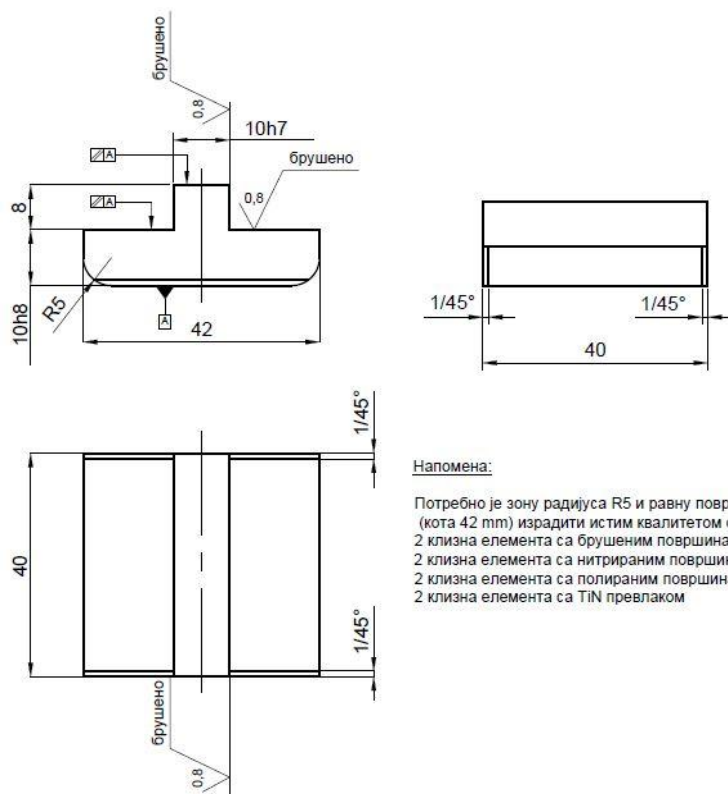
6.2.1.1. Механичко-хидраулични модул

Основу механичког дела уређаја (модула) чини круто кућиште (сл. 6.6) које се састоји од четири плоче (позиције 6, 9, 10 и 13) које су међусобно спојене завртњевима са цилиндричном главом (позиција 5). Свака плоча у смеру оптерећења има сигурносно ребро које спречава евентуално померање у том правцу. У толерисаном каналу кућишта клизи покретни носач са „U“ жлебом (позиција 11) по вођици матрице (позиција 7), образујући фини спој. Вођица матрице је причвршћена завртњевима са округлом главом (позиција 5). Посредством дистантне чауре (позиција 3) и помоћу завртњева са округлом главом (позиција 2) на кућиште је причвршћен хидраулични цилиндар који обезбеђује силу држања траке (позиција 1). Везу између цилиндра (позиција 1) и покретног носача (позиција 11) обезбеђују спојница са навојем (4) и цилиндрична осовиница (позиција 8). Вођица по којој клизи покретни носач (позиција 11) је термички обрађена због контактних услова. Контактне површине изменљивих клизних елемената (позиција 12) су брушене, нитриране, полиране и са превлаком од титан-нитрида. Облик и димензије изменљивог контактнoг елемента су дати на слици 6.6.



- 1 - хидраулични цилиндар
- 2 - завртањ
- 3 - лева чаура
- 4 - спојница матрице и цилиндра
- 5 - завртањ
- 6 - лева носећа плоча кућишта
- 7 - вођица матрице
- 8 - осовиница
- 9 - доња плоча кућишта
- 10 - горња плоча кућишта
- 11 - покретни носач (матрица)
- 12 - изменљиви клизни елемент
- 13 - десна носећа плоча кућишта
- 14 - непокретни носач клизног елемента

Слика 6.6 Склоп механичког дела уређаја за вучење траке између равних контактних површина

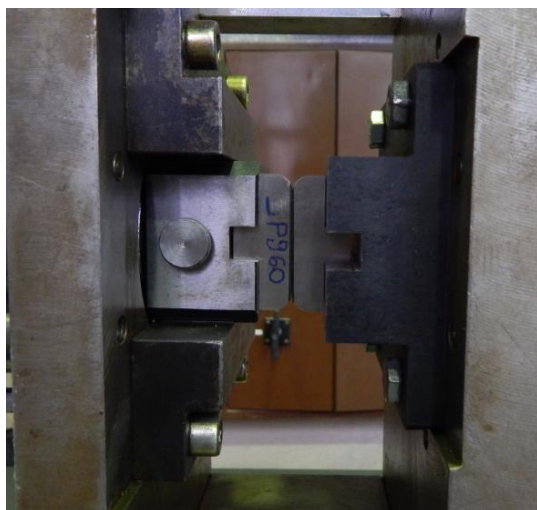


Слика 6.7 Облик и димензије изменљивог контактнoг елемента

На слици 6.7 дата је детаљнија скица изменљивог контактнoг елемента. Активна равна површина која учествује у контакту са траком лима износи 960 mm^2 . Физички изглед механичко-хидрауличног модула дат је на слици 6.8. На сликама 6.9 и 6.10 приказани су изменљиви контактни елементи пре контакта са лимом, и у контакту са лимом за време трајања процеса клизања. Носачи изменљивих контактних елемената су израђени са „Т“ жлебом у циљу лакше и брже замене. Посебна пажња приликом израде контактних елемената, поред тачности димензија, усмерена је на паралелност површина. Активне површине жлеба на покретном носачу (позиција 11, сл. 6.6) и клизном елементу (сл. 6.7) су фино брушене. Равне површине клизних контактних парова израђене су на четири начина: брушењем, нитрирањем, полирањем и превлачењем слојем титан-нитрида, у циљу варирања триболошких контактних услова.



Слика 6.8 Изглед механичког дела уређаја за провлачење траке лима између равних контактних површина



Слика 6.9 Клизни елементи пре контакта са лимом

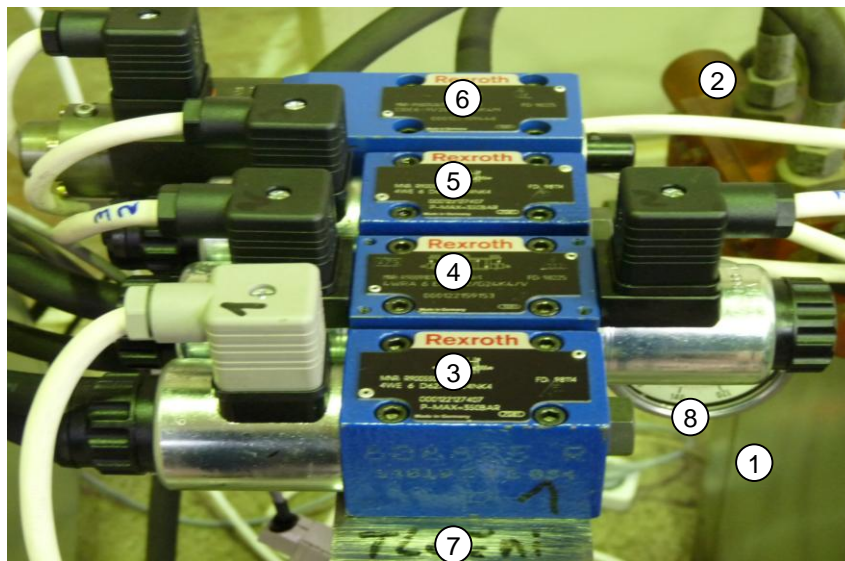


Слика 6.10 Клизни елементи у контакту са лимом за време процеса клизања

6.2.1.2. Хидраулични модул

На слици 6.11 приказана је фотографија хидрауличног склопа-модула, који се састоји од хидрауличног агрегата (позиција 1), чији склоп чине пумпа, резервоар, филтер, регулациони вентил

и троположајни разводник са ручним управљањем). Хидраулични агрегат обезбеђује потребан притисак и проток за извршне цилиндри преко разводне плоче (позиција 7). Притисак који се подешава на излазу из агрегата износи приближно 65 бара. С обзиром на то да је уређај баждарен за подешавање силе држања задаје се вредност од око 32 кN, која одговара датој вредности притиска држача. Позиција 2 представља троположајни разводник на излазу из хидрауличног агрегата са ручицом за активирање радног и неутралног хода. На разводној плочи уграђени су пропорционални вентили (типа 4WRA6Е07-22/G24K4/V и DBE6—11/200YG24K4M) за регулацију протока и притиска (позиција 4 и 6), као и два електромагнетна разводника (4/2 NO6 4WE62/EG24NK4) за напајање, односно усмеравање (позиције 3 и 5). Пропорционални вентили за регулацију и електромагнетни разводници су професионалног квалитета и производи су познатог светског произвођача хидрауличних компонената. Сви елементи су везани са цревима високог притиска и прикључцима.



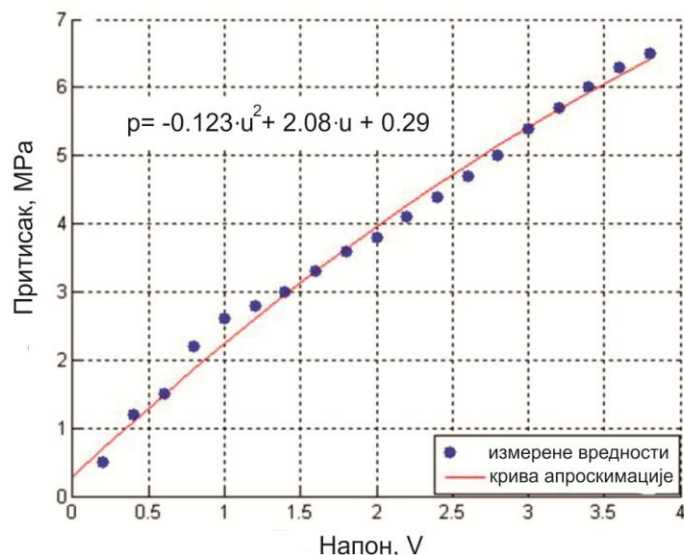
Слика 6.11 Хидраулични модул

Важни елементи у овом хидрауличном систему су пропорционални вентил за проток и пропорционални вентил за притисак. Оба вентила су напонски. То значи да се за одређену вредност улазног напона пропорционалног вентила за регулацију притиска (позиција 6, сл. 6.11) може добити одређени притисак у цилиндру држача. Битно је напоменути да је вентил за проток активан само у смислу управљања, због целовитости система, али у смислу остваривања дејства није активан. Цилиндар којим управља овај вентил је активан (има празан ход) али није физички повезан са механичким делом уређаја. Веза је прекинута непокретним носачем (позиција 14, сл. 6.6). Поменути цилиндар се може користити за модел клизања преко затезног ребра, и њиме би се задавало померање ребра, са значајним конструкторским изменама на механичком делу уређаја – алату. Ово показује да апаратура пружа шире могућности реализације различитих модела (тестова) клизања трака лима у променљивим условима.

У циљу добијања тачних карактеристика ових пропорционалних вентила било је неопходно извршити њихово баждарење. Баждарење је урађено у склопу читавог система (за време израде, повезивања компонената апаратуре и њиховог пуштања у рад), тако што су вентили преко одговарајућег електро-уређаја напајани одређеним напонам. Одзив вентила се мерио директно на извршним цилиндрима. Мерење оствареног притиска контролисано је преко манометра који је био монтиран на позицији давача притиска.

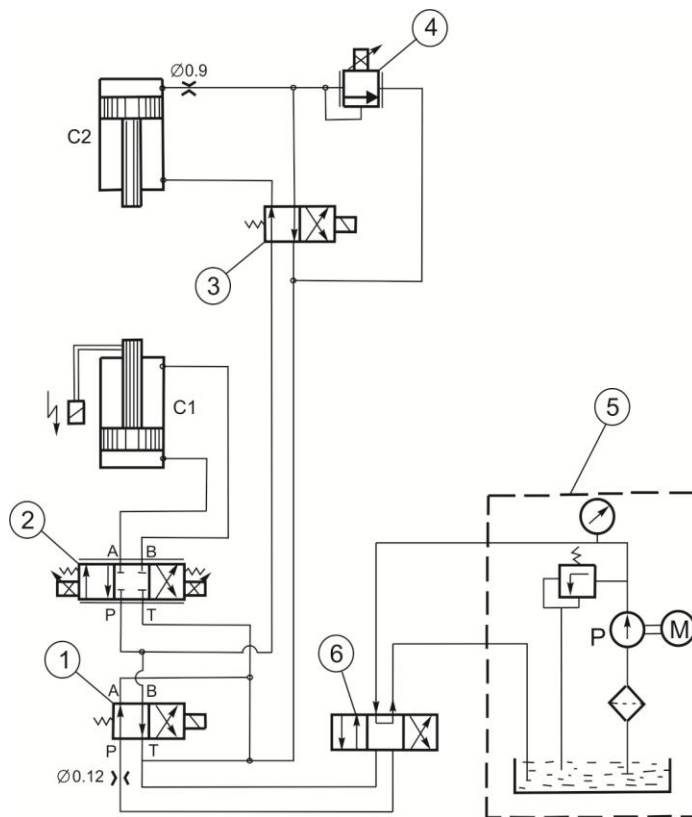
Треба истаћи да се баждарење вршило и преко *PLC*-а, тј. исте напонске вредности су задаване и програмским путем.

Мерења су обављена више пута, тако да су приказане њихове средње вредности. На слици 6.12 дата је апроксимативна крива зависности притиска од напона пропорционалног вентила за притисак, која се користила као полазна основа код израде програма.



Слика 6.12 Крива зависности пропорционалног вентила за притисак

Хидраулична шема дата је на слици 6.13, са које се јасно виде све компоненте као и њихова улога у систему. Хидраулични агрегат, позиција 5, (електромотор, пумпа, филтер, резервоар и регулациони вентил) преко механичког троположајног разводног вентила (позиција 6) и електромагнетног разводника (позиција 1), напаја пропорционални вентил за проток (позиција 2) који управља цилиндром (C1). Хидраулични агрегат такође напаја и разводни електромагнетни вентил (позиција 3) којим се, у зависности од положаја, напаја пропорционални вентил за промену притиска (позиција 4). Вентил за промену притиска управља цилиндром (C2) који је физички повезан са механичким делом уређаја и путем кога се задаје променљиви контактни притисак на клизном елементу.

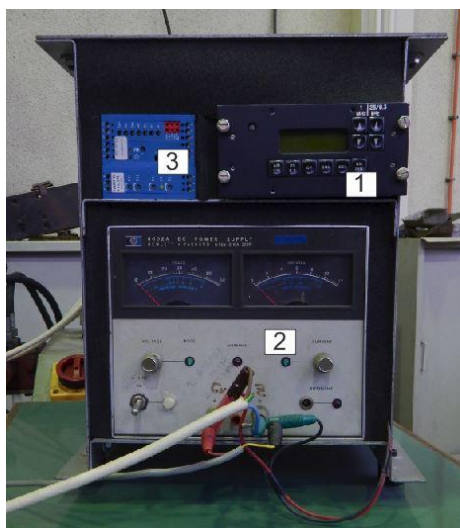


Слика 6.13 Хидраулична шема уређаја за провлачење траке између равних контактних површина:
 1 и 3 – електромагнетни разводник 4/2 N06 4NJE6D62/EG24NK4, 2 – пропорционални вентил протока 4NJRA6E07-22/G24k4/V, 4 - пропорционални вентил притиска DBE6-11/200SG24K4M, 5 - хидраулични агрегат $p_{max} = 200 \text{ bara}$, 6 – троположајни разводник, C1 – цилиндар са празним ходом, C2 - цилиндар за остваривање силе држања

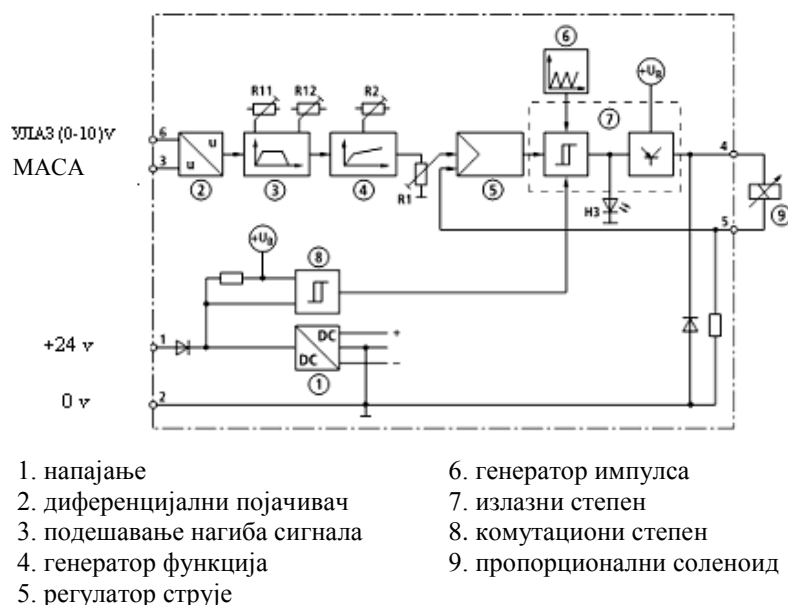
6.2.1.3. Електро-управљачки модул

Електро-управљачки модул (сл. 6.14) је важан елемент укупног система. Улога овог дела апаратуре је поуздано напајање свих компонената и програмско управљање хидрауличног система како би се оствариле планом предвиђене функционалне зависности притиска симултано, у току процеса.

Извор напајања (позиција 2) карактеристика: +24 V/12 A; +5 V/20 A; +12 V/2 A, преко разводног система напаја све компоненте система. Управљачка јединица, тј. микроконтролер (PLC-Programable Logic Controller) (поз. 1) са меморисаним софтвером представља подршку систему управљања. Преко D/A конвертора и управљачких картица (позиција 3, сл. 6.14) генеришу се управљачки сигнали ка извршним елементима хидрауличног система.



Слика 6.14 Електро-управљачки модул



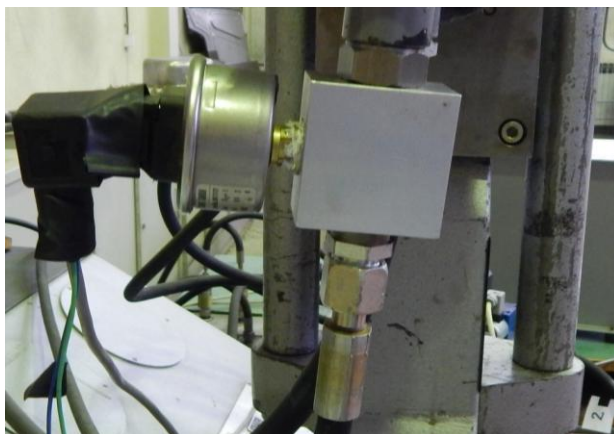
Слика 6.15 Шема управљачке картице која управља пропорционалним вентилом за задавање променљивог притиска

На слици 6.15 дата је шема управљачке картице пропорционалног вентила за притисак. Склоп напајања (1) испоручује истосмерне напоне за напајање осталих подскопова аналогне картице. Напон напајања овог склопа износи 24 V и доводи се из спољашњег извора истосмерног напона. Диференцијални појачивач (2) врши појачавање сигнала из А/Д конвертора. Овај сигнал обавља контролу притиска према задатој функционалној зависности. Системом за подешавање нагиба ивице

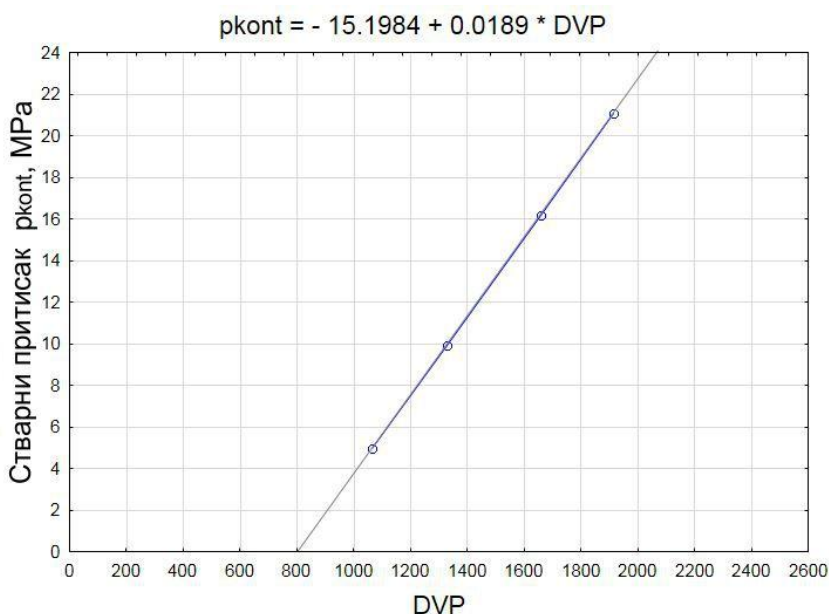
управљачког сигнала (3), омогућава се одговарајућа брзина одзива притиска на побудни сигнал. Отпорник R11 служи за подешавање нагиба предње ивице сигнала, док отпорник R12 одређује нагиб задње ивице сигнала. Генератор функција (4) додатно прилагођава улазни сигнал, помоћу отпорника R2. Регулатором (5) постиже се регулација струје, користећи отпорник R1, која је пропорционална улазном управљачком сигналу. Генератор импулса (6) генерише импULSE неопходне за контролу излазног побудног степена којим се управља струјним регулатором. Излазни степен (7) даје струјну побуду соленоиду вентила за притисак. Комутациони склоп (8) директно прослеђује спољашњи напонски извор за напајање излазног степена због потребне струје за побуду соленоида. Пропорционални соленоид помоћу струјне побуде управља вентилом за притисак.

У меморију управљачке јединице је у складу са општим планом експеримента (сл 6.1) меморисан програм за све зависности притиска. Програм је израђен у програмском језику „С“. Програмски уређај (PLC, позиција 1, сл. 6.14) поседује мини тастатуру која пружа могућност избора свих 10 меморисаних зависности притисак. Поред тога, тастатура се користи за стартовање и заустављање процеса. Управљачка јединица израђена је на бази сложеног и професионалног микроконтролера.

Давач притиска (сл. 6.16) је посредством Т-прикључка постављен на хидраулични вод који напаја цилиндар за остваривање силе држања или променљивог контактнoг притиска (позиција 6, сл. 6.3). Давач региструје притисак ослобођен од свих претходних губитака који су настали од регулационог вентила до цилиндра, па се може рећи да је притисак који показује давач једнак притиску у цилиндру. На слици 6.17 дата је карактеристика давача (зависност притиска од дигиталних вредности), добијена мерењем, односно поступком баждарења.



Слика 6.16 Давач за мерење притиска



Слика 6.17 Карактеристика давача притиска

6.2.1.4. Кратак опис управљачког модула уређаја

Управљачки модул за хидрауличну апаратуру чине:

- *Хардвер*, заснован на 16-битном микроконтролеру *P24HJ256GP610* марке *Microchip* и
- *софтвер* написан у *Microchip C30* програмском језику у *MPLAB IDE v.8.10* програмском развојном окружењу.

Хардверске компоненте су:

- Микроконтролер *P24H256GP610* карактеристика: 16-бита, *40MIPS*, *256 Kbytes* програмске меморије, *16 Kbytes SRAM*, 85 програмабилних дигиталних *I/O*, 118 интерапт вектора, девет 16-битних тајмера, итд.);
- Тастатура са 7 активних тастера;
- *LCD* мини екран са 2x16 карактера;
- Остале компоненте као неопходно окружење.

Софтвер је написан у програмском језику „C“, структурном техником. По стартовању одвија се покретање (иницијализација) свих параметара система. Тиме се подразумева постављање потребних параметара микроконтролера и његовог окружења, тастатуре, софтверских драјвера дисплеја, као и почетних стања целог система, везаног за притисак у систему хидраулике.

Програм поставља корисничко окружење за рад и избор потребних функција (укупно 10 за регулацију притиска).

На основу изабраних параметара, користећи тајмере у тачно дефинисаним корацима, постављају се вредности претходно унешене у програм. Пратећи повратну спрегу, изводе се корекције функција задатих зависности да би стварне вредности одговарале задатим.

6.2.1.5. Опис поступка рада

Узорци од лима припремљени су у виду трака, димензија 250 × 30 mm, дебљине 0.8 mm (челични лим и челични једнострано поцинковани лим) и 0.9 mm (лим од Al легуре), према слици 6.1. Припремљене траке су одмашћене уљним разређивачем и ацетоном, а потом је на њиховим површинама наношено уље за дубоко извлачење, мазива маст на бази молибден-дисулфида, или је примењена варијанта без мазива, у складу са планом експеримента (сл. 6.1). Тако припремљене траке постављају се у уређај причвршћивањем једног краја у стезну чељуст рама лабораторијске пресе. Веома је битно обратити пажњу на управност и заузимање централне позиције узорка у односу на изменљиве контактне елементе (клизаче). За ту активност коришћен је контролник управности површина. Потребно је извршити подешавање брзине вучења траке, помоћу потенциометра на лабораторијској преси. Вредност брзине је 20 mm/min, што је усклађено са ходом вучења од 60 mm у трајању од 3 min. На рачунару за аквизицију података (позиција 8, сл. 6.3) инсталиран је програм под називом „ЛИМАС“ који региструје, обрађује и приказује све вредности силе вучења и реалног притиска клизног елемента. Поменути програм треба да буде припремљен пре стартовања машине, тј. провлачења траке лима, а његово активирање одвија се истовремено са активирањем главног дејства на лабораторијској преси.

Први корак код стартовања апаратуре представља укључивање хидрауличног агрегата (позиција 5, на слици 6.3 и позиција 5, на слици 6.13). Потом следи постављање узорка лима између контактних елемената и причвршћивање у чељустима са горње стране. Наредни корак је подешавање притиска на хидрауличном агрегату (који одговара сили држања од приближно 32 kN) и активирање радног хода на троположајном разводнику (позиција 6, сл. 6.13) помоћу ручице. На управљачкој јединици (позиција 1, сл. 6.14) врши се избор одговарајуће функционалне промене притиска. На лабораторијској преси марке *ERICHSEN*, активира се главно дејство за остваривање вучне силе, при чему се доводи у контакт главни потисни елемент машине са потисним клипом носећег рама чељусти. Непосредно после тога врши се подешавање константне вредности брзине (20 mm/min).

Активирањем тастера на управљачкој јединици покреће се програм за претходно одабране промене притиска, тј. управљачка јединица почиње према програму да шаље управљачке сигнале. Сигнали се преко управљачких картица (позиција 3, сл. 6.14) генеришу и стижу до извршних хидрауличних елемената, потом се активира програм ЛИМАС за регистровање и обраду података, као и процес вучења траке стартовањем пресе. Потребно је са што мање временских губитака („у исто време“) активирати процес вучења, мерни и управљачки систем. Процес тече, давачи (силе,

притиска) врше мерење и шаљу сигнале који се, како је објашњено, обрађују и приказују на монитору рачунара (позиција 8, сл. 6.3). По истеку времена од 180 s, управљачка јединица престаје да шаље сигнале, провлачење траке се зауставља а програм ЛИМАС самостално завршава са радом после истека 200 s. С обзиром на то да се програм ЛИМАС покреће нешто раније од активирања процеса вучења, а завршава касније од заустављања вучења, било је неопходно за те фазе додати сигурносних 20 s. Завршетком ових радњи, на рачунару се меморишу регистроване зависности, ослобађа се вучена трака лима из чељусту рама, поставља нова и процес се понавља. Детаљи о дефинисању променљивих функција притиска дати су у поглављу 7.3.

6.3. Карактеристике мазива

При испитивању, као једно од мазива, коришћено је уље за дубоко извлачење које садржи одговарајуће количине рафинисаног минералног уља, инхибиторе корозије, EP и AW - адитиве (једињења на бази фосфора и неактивног сумпора). Успешно се користи као средство за подмазивање код операција дубоког извлачења челичних лимова и лимова од лаких и обојених метала при изради отпресака сложених конфигурација.

У аутомобилској индустрији углавном се користи при изради каросеријских делова, резервоара за гориво, уљних корита, поклопаца глава СУС-мотора, наплатак точкова возила, итд. Примењује се при дубоком извлачењу делова беле технике, посуђа, када за купатила, бојлере. Употребљава се у концентрованом облику, а може и као псеудоемулзија са водом (вода се постепено додаје у уље до жељене концентрације уз интензивно мешање). На предмете обраде се наноси четком, сунђером, ваљком или пиштољем за распршивање. Са отпреска се уклања воденим раствором индустријских средстава за прање, а може и органским растварачима. Заваривање отпресака могуће је обавити без претходног одмашћивања.

Одликују га следеће особине:

- добро приања за металне површине,
- добро подмазује смањивањем контактеног трења,
- добра отпорност на смицање,
- висока термичка стабилност,
- лако се меша са водом стварајући псеудоемулзију,
- добро се одмашћује после дугог ускладиштења,
- добро штити од корозије.

Карактеристике коришћеног мазива дате су у табели 6.1.

Табела 6.1 Карактеристике коришћеног мазива

	Јединице	Уље за дубоко извлачење	Методe
Изглед концентрата	-	брстро уље	-
Густина на 20°C	g/cm ³	0.950	ISO 3675
Кинематска вискозност на 40°C	mm ² /s	170	ISO 3104
Корозија на бакру (100°C/3h)	степен	1a	ISO 2160
Заштитна моћ на влагу	-	корозија одсутна	FIAT ST 50502
Способност одмашћивања	-	одлична	FIAT ST 50505

Мазива маст на бази молибден-дисулфида, коришћена у овом експерименту, носи ознаку FOR 21 MS [108]. Представља хомогену дисперзију литијумових сапуна виших масних киселина, у селективно рафинисаном минералном уљу. Садржи, поред других, посебну групу EP адитива за повећање отпорности мазивога слоја на високе притиске и молибден-дисулфид у праху, одговарајуће гранулације као ефикасно чврсто мазиво. Одговара стандарду ISO 2176:1995/Cor 1:2001.

Ова мазива маст је тамно сиве боје, хомогене глатке структуре и средње тврдоће. Поседује врло добру механичку, оксидациону и термичку стабилност и на веома високим температурама и у присуству воде или паре. Поред осталих добрих карактеристика, које поседују мазиве масти за високе притиске, као што је висока носивост и отпорност мазивога слоја, пружа и додатну сигурност подмазивања, омогућава смањење хабања и у условима отежаног подмазивања.

Од основних техничких података које су дате у каталогу произвођача [108], могу се издвојити: најмања вредност температуре капања 195°C, вискозност 500 mm²/s² при 40°C (DIN ISO 2176).

С обзиром на то да је реч о вишенаменској масти са побољшаним својствима у погледу отпорности и носивости мазивог слоја, као и појачане отпорности на хабање, може се веома успешно применити у условима непрекидног рада одговорних склопова машина. Примењује се за подмазивање машинских елемената и склопова изложених високим ударним оптерећењима или високим радним температурама. Због одличне одрживости мазивог слоја и ниског коефицијента трења чак и при већим притисцима, успешно се примењује у технологији дубоког извлачења делова од лима. Могуће је користити у широком распону температура, од 20 до 150°C, а краткотрајно и до 170°C. Препоручује се нарочито за подмазивање веома оптерећених спојница, зглобова, кулисних механизма за аксијална лежишта багера, гарнитура алата за бушење и тсл. Најчешће се наноси сунђером или танком четкицом.

7. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСТРАЖИВАЊА

Експериментална истраживања су обављена у складу са општим планом, приказаним на слици б.1. У овом делу рада биће изложени резултати експерименталних испитивања који се односе на модел клизања лима између равних контактних површина при променљивом притиску, применом три типа материјала узорака (трака лима), четири типа површина изменљивих контактних елемената и три типа режима трења (суво и применом два мазива). Поред тога, одређиване су и основне карактеристике материјала узорака коришћених у експерименту.

Основне карактеристике материјала које укључују: хемијски састав, механичке карактеристике, криве ојачања, параметре храпавости и тел., дате су у облику табела, дијаграма и графичких приказа храпавости.

Основни резултати истраживања модела клизања између равних контактних површина засновани су на дефинисању и практичном извођењу оригиналног експерименталног теста чија је особеност реализација сложених нелинеарних и линеарних функција притиска у контакту лима и алата. Добијене су серије резултата које дају зависност вучне силе и коефицијента трења од хода при варирању различитих услова (притисак, материјал лима, параметри алата, мазива). Изведено је и испитивање површинске храпавости клизних контактних елемената (алата) и лима у зависности од примењених услова. Највећи део резултата приказан је у форми дијаграмских зависности.

7.1. Карактеристике лимова коришћених у експерименту

У експерименталним испитивањима, према слици б.1, коришћена су три материјала који се најчешће примењују у технологији дубоког извлачења лимова. Један од материјала је челични нискоугљенични каросеријски лим без превлаке Č0148P5 (DC04), дебљине 0,8 mm и то је референтни материјал. Други је исти материјал са галванском превлаком Č0148P5 (DC04+ZE) једнострано поцинкован дебљине 0.8 mm, и трећи је лим од Al-легуре, ознаке AlMg4,5Mn0,7 (EN AW – 5083) дебљине 0.9 mm. Димензије трака за сва три материјала су исте: ширина 30 mm и дужина 250 mm. Челични лим са галванском превлаком (DC04+ZE) једнострано је превучен слојем цинка, дебљине приближно 10-15 μm, поступком потапања у кадама за галванизацију, о чему је било више речи у поглављу 3.6.1 овог рада.

Основне карактеристике материјала су одређиване тестом једноосног затезања, у складу са прописаним стандардом (SRPS EN 10002-1:1996). Узорци лима су стандардних димензија, дебљина $s = 0.8$ mm (челични лим и челични лим са превлаком цинка) и $s = 0.9$ mm за алуминијумски лим. Узорци су припремљени поступком просецања из табле лима и то у три правца:

- у правцу ваљања (0°),
- под углом од 45° у односу на правац ваљања и
- управно на правац ваљања (90°).

За сваки правац исецања узета су по три узорка, и извршен је прорачун аритметичке средине, као и прорачун аритметичке средине с обзиром на раванску анизотропију.

Експонент деформационог ојачања (n-фактор) и коефицијент нормалне анизотропије (r-фактор), одређени су одговарајућим поступцима, описаним у [12, 37].

Криве ојачања су одређиване тестом једноосног затезања, при чему су у овом раду приказане само аналитичке апроксимације због својих практичних предности.

Аналитичке апроксимације су одговарајуће математичке функције које могу да замене експериментално одређену криву ојачања. Углавном су то две експоненцијалне и једна линеарна функција. Показатељи деформације могу да буду различити, али се најчешће користи природна (логаритамска) деформација. Степене функције кривих ојачања су:

$$K = C \cdot \varphi^n,$$

$$K = C_1 + C_2 \cdot \varphi^m,$$

где су C , C_1 , C_2 и n константе.

Према подацима из табела 7.2 и 7.4 одређене су вредности константи за све три врсте материјала и три могућа правца исецања материјала. Све вредности се односе за брзину деформисања од $v = 20 \text{ mm/min}$ и собну температуру испитивања.

Мерење параметара храпавости изведено је на лабораторијском компјутеризованом уређају *Talysurf 6*.

Дијаграм граничне деформабилности одређен је при пропорционалном (монотонном) процесу деформисања у складу са тзв. поступком „*Nakazima*“, детаљније описаним у поглављу 2.

7.1.1. Основне карактеристике челичних лимова DC04 и DC04+ZE

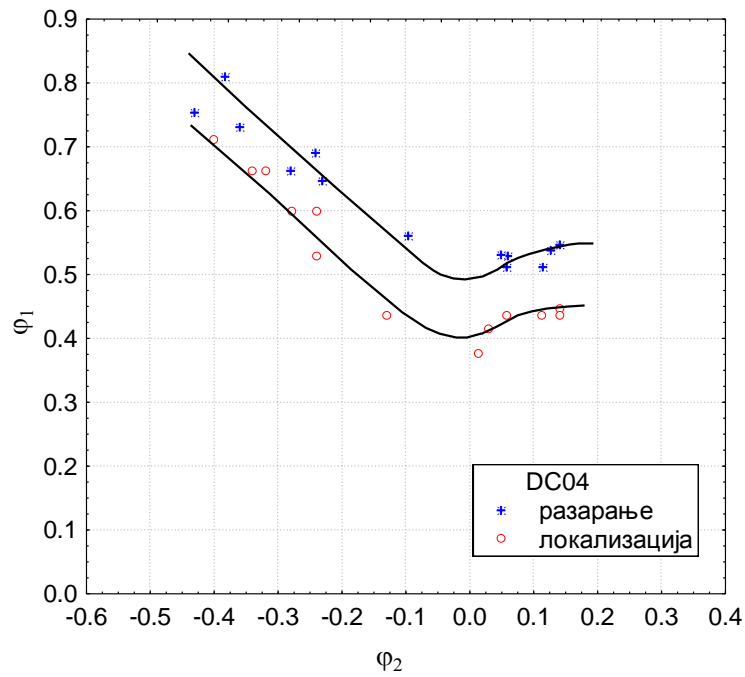
Хемијски састав, основне механичке карактеристике, карактеристике обрадивости и храпавости челичних лимова DC04 (без превлаке) и DC04+ZE (са превлаком цинка) дате су у табелама 7.1 и 7.2, а дијаграм граничне деформабилности на слици 7.1. Ови лимови припадају групи квалитетних лимова предвиђених за дубоко извлачење делова сложене геометрије. Изрази за криве ојачања израчунате за средње вредности дате су у табели 7.2, а њихов дијаграмски приказ на слици 7.2. Структура материјала одређивана је посматрањем припремљених металографских избрусака (шлифова) на оптичком микроскопу. Изглед микроструктура испитиваних лимова, при увећању од $100\times$ дат је на слици 7.3. Структура челичног лима састоји се од светлих жилавих зрна ферита између којих су смештена острвца перлита.

Табела 7.1 Хемијски састав челичних лимова *Č0148P5 (DC04)* и *DC04+ZE (EN 10027)*

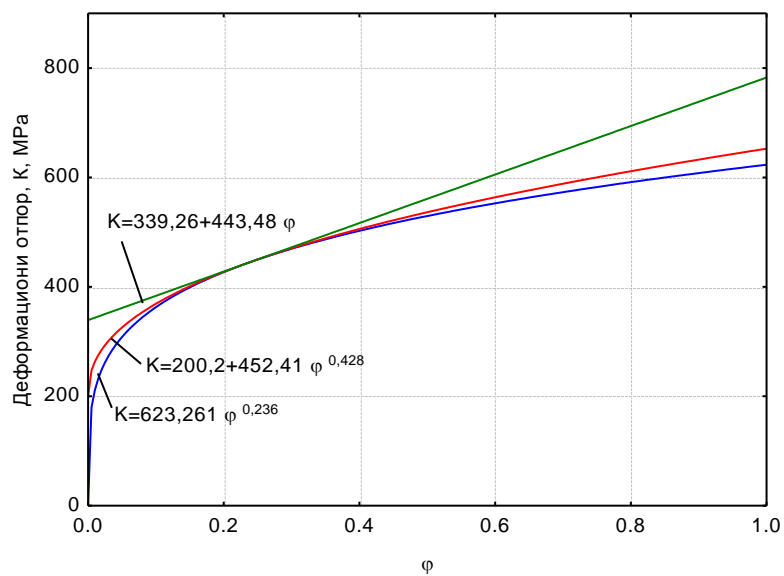
	Садржај хемијских елемената, %					Тип микроструктуре
	C	Si	Mn	P	S	
Прописан	до 0.10	до 0.20	0.20 до 0.45	највише 0.030	највише 0.035	Феритна
Одређен	0.06	у траговима	0.28	0.014	0.021	

Табела 7.2 Карактеристике челичних лимова *Č0148P5 (DC04)* и *DC04+ZE (EN 10027)*

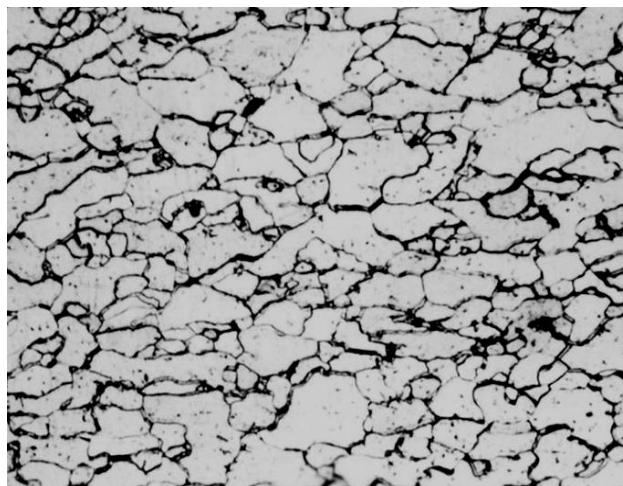
а) Механичке карактеристике					
Угао	R_p , МПа	R_m , МПа	A_{80} , %	n	r
0°	194.4	352.5	32.4	0.236	1.463
45°	204.1	350.8	36.2	0.227	1.397
90°	198.2	348.3	39.6	0.250	1.656
\bar{X}	200.2	350.6	36.1	0.235	1.505
Криве ојачања (за правац 0°): $K=623.261 \cdot \varphi^{0.236}$, МПа $K=200.2+452.41 \cdot \varphi^{0.428}$, МПа $K=339.26+443.48 \cdot \varphi$, МПа					
б) Параметри храпавости DC04 / DC04+ZE					
R_a , μm	R_t , μm	R_z , μm	R_p , μm		
0.96 / 1.74	6.1 / 13.3	5.1 / 11.5	3.2 / 7.6		



Слика 7.1 Дијаграм граничне деформабилности (ДГД) за челични лим



Слика 7.2 Крива ојачања челичног лима



Слика 7.3 Приказ микроструктуре за челични лим DC04 са увећањем од 100×

На испитиваним челичним лимовима DC04 и DC04+ZE одређивани су следећи параметри храпавости:

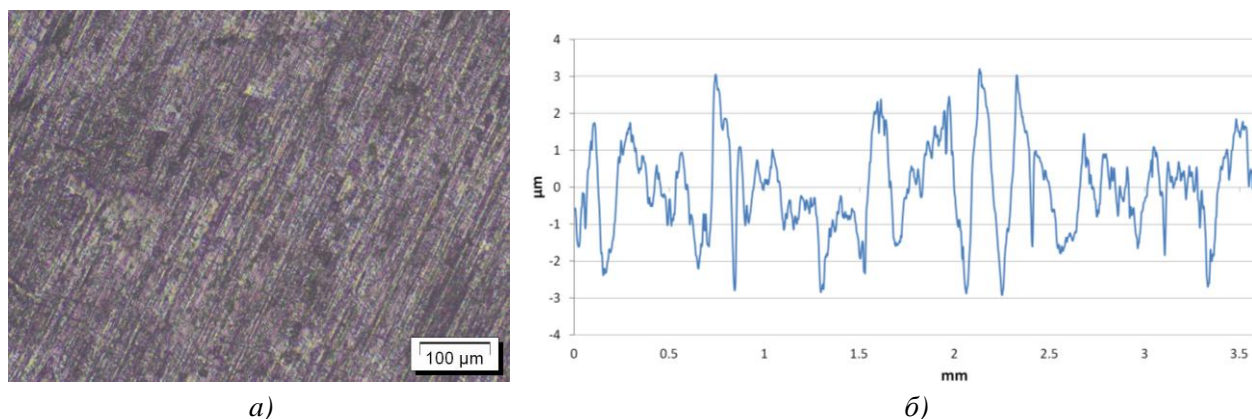
R_a - Средње аритметичко одступање профила на дужини мерења,

R_p – Максимална висина неравнина мерена од средње линије,

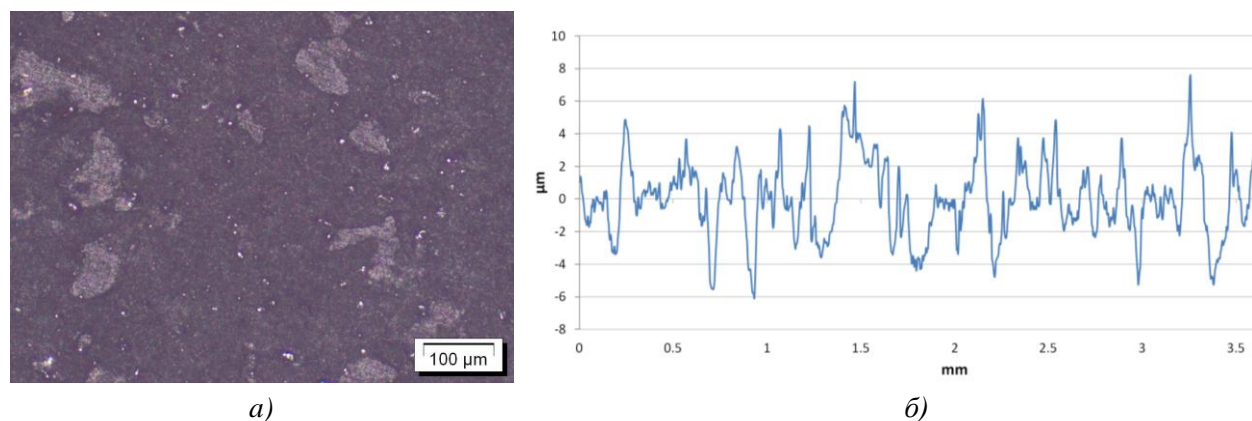
R_t - Максимална висина неравнина профила храпавости,

R_z - Средња вредност 5 појединачних локалних вредности R_t .

Поменути параметри приказани су у табели 7.2. Код испитиваних лимова практично не постоји разлика између храпавости једне и друге стране лима, осим у случају лима са једностраном галванском превлаком. Изгледи профила површине испитиваних челичних лимова, као и њихове микрофотографије приказани су на слици 7.4 за лим DC04 и на слици 7.5 за лим DC04+ZE.



Слика 7.4 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) површине челичног лима DC04



Слика 7.5 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) површине челичног лима DC04+ZE

7.1.2. Карактеристике лима од алуминијумске легуре AlMg4.5Mn0.7

Алуминијумска легура коришћена у овом истраживању може да се сврста у Al-Mg легуре серије 5000, чија је основна карактеристика одсуство било каквог термичког третмана, који подразумева период пре, за време и после обликовања. Поред тога, теже је обрадива дубоким извлачењем. У табели 7.3 приказан је хемијски састав лима од наведене алуминијумске легуре.

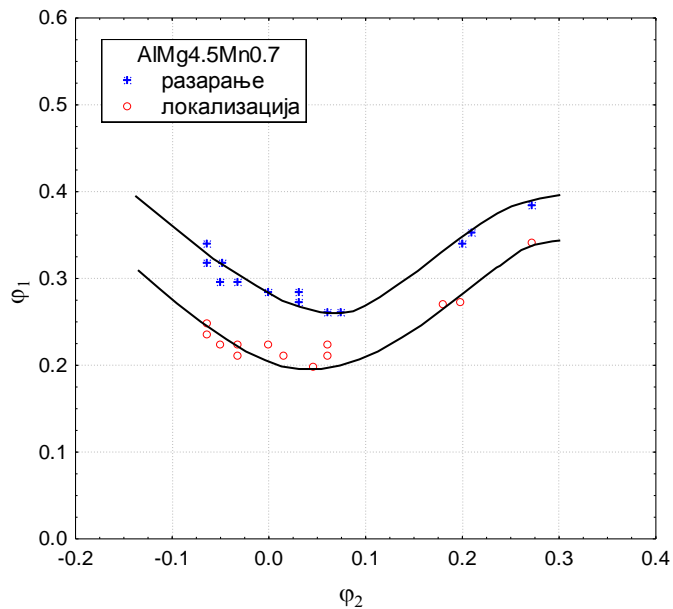
Табела 7.3 Хемијски састав лима од Al легуре AlMg4.5Mn0.7

Елемент	Mg	Mn	Si	Fe	Cu	Ti	Zn	Cr
%	4.20	0.57	0.0869	0.29	0.013	0.007	0.068	0.092

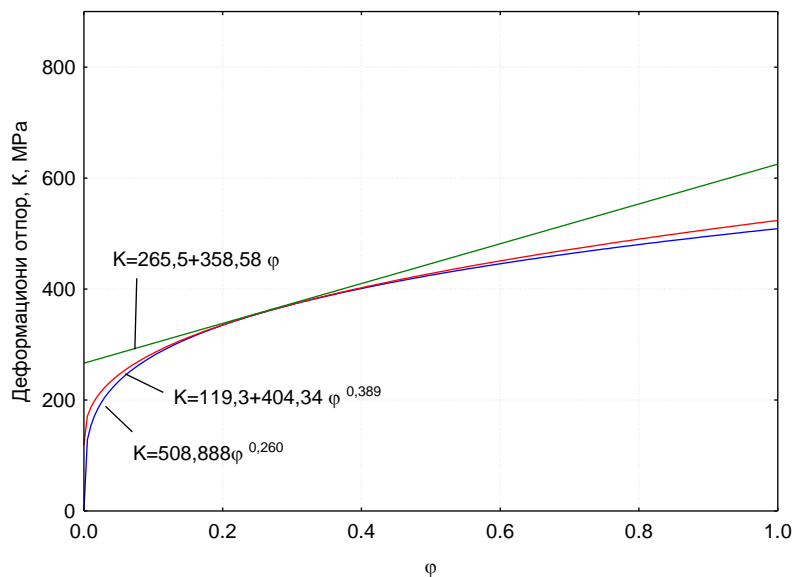
У табели 7.4 приказане су механичке карактеристике алуминијумског лима, аналитичке апроксимације криве ојачања и измерени параметри храпавости. Дијаграм граничне деформабилности за алуминијумски лим је дат на слици 7.6, а криве ојачања на слици 7.7.

Табела 7.4 Основне карактеристике лима од легуре AlMg4.5Mn0.7

AlMg4.5Mn0.7 s = 0.9 mm					
Угао	R _p , МПа	R _m , МПа	A, %	n, -	r, -
0°	125.7	281.2	24.9	0.274	0.694
45°	115.7	273.6	26.1	0.255	0.714
90°	120.1	278.1	27.8	0.254	0.738
\bar{X}	120.5	276.6	26.2	0.26	0.715
Крива ојачања (0°): K=508.888·φ ^{0.260} , МПа K=119.3+404.34·φ ^{0.389} , МПа K=265.5+358.58·φ, МПа					
R _a , μm	R _b , μm		R _z , μm		R _p , μm
0.85	6.3		5.1		4.2



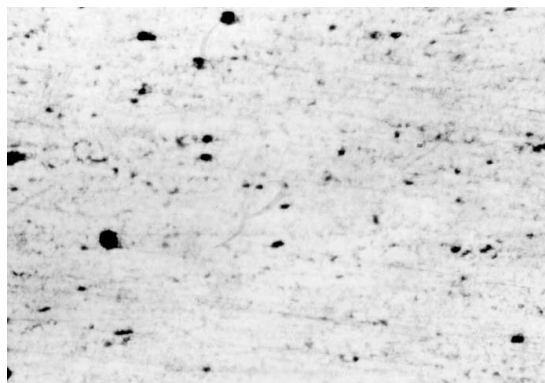
Слика 7.6 Дијаграм граничне деформабилности (ДГД) за Al легуру



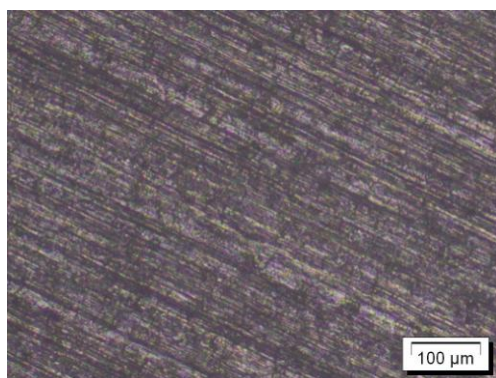
Слика 7.7 Крива ојачања узорка од алуминијумског лима

Легура AlMg4.5Mn0.7 има структуру α -чврстог раствора са излученим и исталоженим преципитатима Al₃Mg₂. Изглед микроструктуре приказан је на слици 7.8.

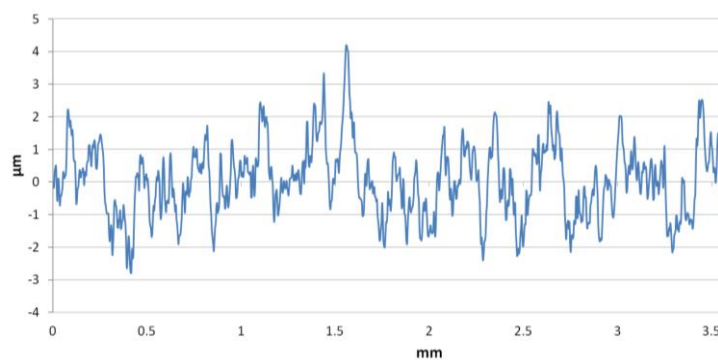
Микрофотографија испитиваног алуминијумског лима, као и њихов изглед 2D профила површине приказани су на слици 7.9.



Слика 7.8 Приказ микроструктуре за алуминијски лим AlMg4,5Mn0,7 са увећањем 100×



а)

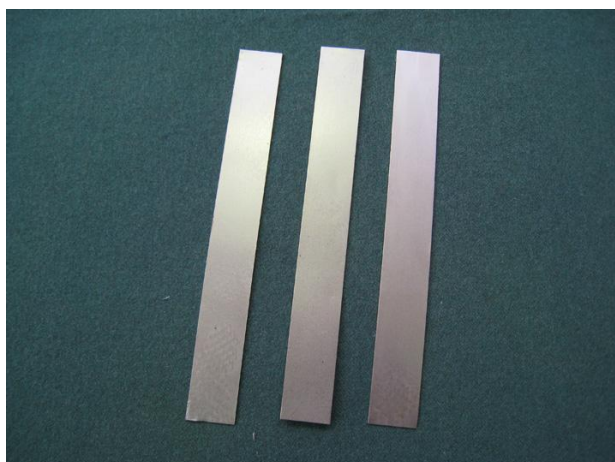


б)

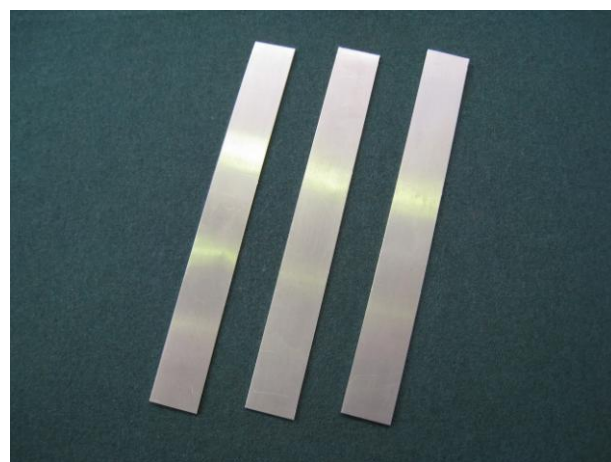
Слика 7.9 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) површине лима AlMg4.5Mn0.7

7.2. Узорци лима и изменљиви контактни елементи

Узорци лима у виду трака који су коришћени у експерименту припремљени су сечењем на хидрауличним маказама из табли лима, у правцу ваљања (0°). Ивице трака додатно су обрађене ручним турпијама. Фотографије коришћених трака лима пре провлачења дате су на слици 7.10а, б.

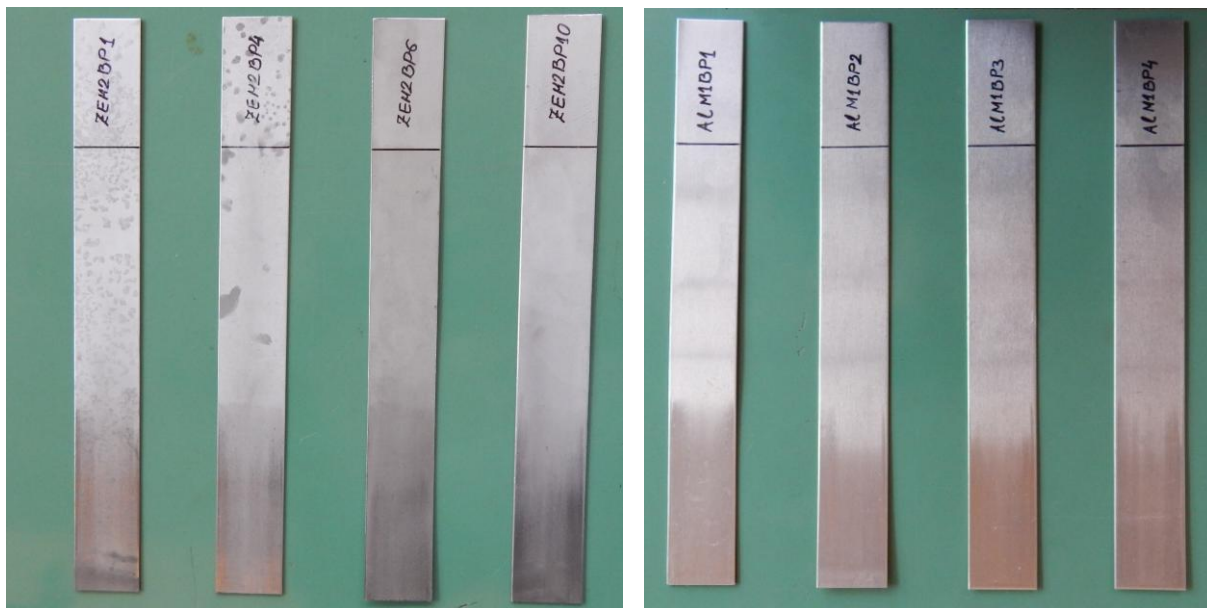


а)



б)

Слика 7.10 Изглед узорка пре провлачења: а) челик DC04, б) алуминијум AlMg4.5Mn0.7

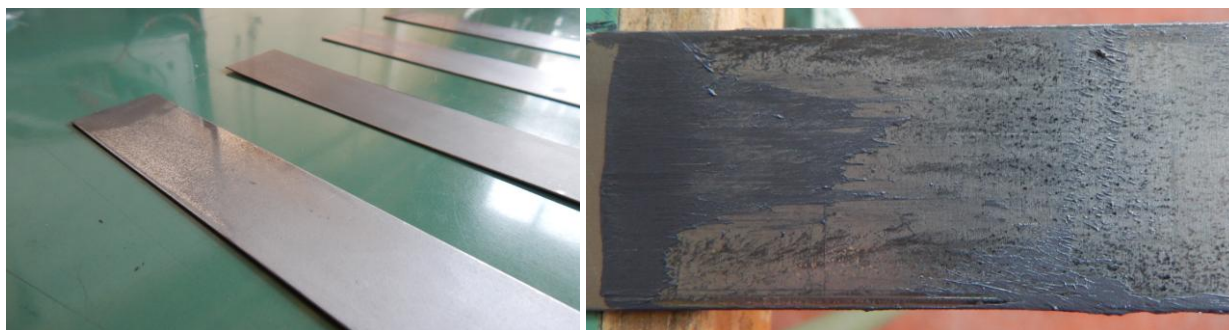


а)

б)

Слика 7.11 Изглед трака лима после провлачења од: а) челичног лима са превлаком цинка DC04+ZE, б) алуминијумске легуре AlMg4.5Mn0.7

На слици 7.11 дат је физички изглед узорака од челичног лима са превлаком цинка (а) и алуминијумске легуре (б) после провлачења између изменљивих контактних елемената. При дну узорака, на дужини од око 60 mm, јасно је уочљив траг клизања, кога одликује светла рефлектујућа површина у односу на остатак дужине узорака. Сваки узорак има одговарајућу ознаку, која је формирана према врсти материјала, врсти мазива, типу површина изменљивих контактних елемената и примењеној функционалној зависности притиска. Први симбол указује на врсту материјала узорка (С-челични лим ознаке DC04, ZE-једнострано поцинковани челични лим ознаке DC04+ZE, А-алуминијумска легура ознаке AlMg4.5Mn0.7). Други симбол говори о стању на контактним површинама (S-суве контактне површине, M1-контактне површине подмазане уљем за дубоко извлачење, M2-контактне површине подмазане мазивом машћу на бази молибден-дисулфида). Трећа, словна ознака представља тип површине изменљивих контактних елемената (В-брушене површине, N-нитриране површине, Р-полиране површине и Т-површине са превлаком од титан-нитрида). Четврти словни и пети бројчани симбол означавају функционалну промену контактне притиска (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P8 и P10). На слици 7.12а дат је приказ зоне клизања узорка лима од алуминијумске легуре, који се разликује по светлијој површини у односу на преостали део узорка, док је на слици 7.12б приказана фотографија узорка после процеса клизања са остацима мазива на бази молибден-дисулфида.



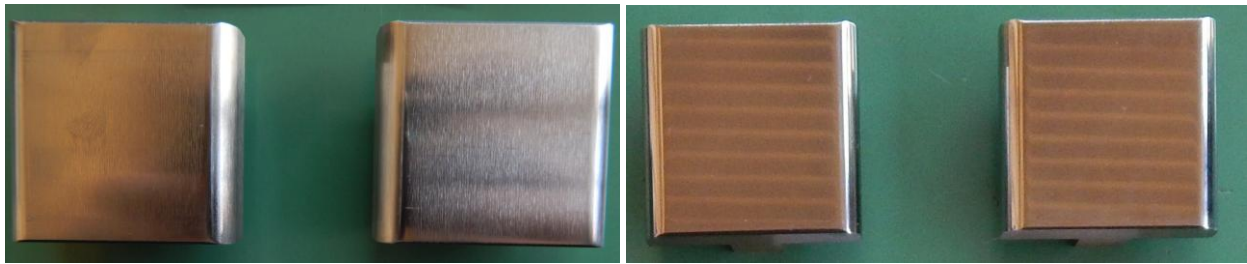
а)

б)

Слика 7.12 Изглед епрувета од алуминијума после провлачења: а) приказ зоне клизања, б) приказ остатака мазива на површини лима

На фотографијама (слике 7.13 и 7.14) приказани су изменљиви клизни елементи са контактним површинама различите храповости. Сви контактни елементи израђени су од алатног челика ознаке

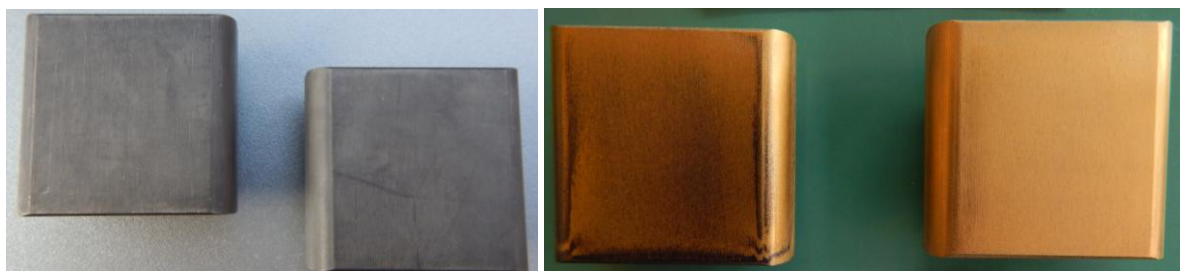
Š4752, a пре брушења, полирања, нитрирања и наношења превлаке од титан-нитрида, били су подвргнути термичкој обради каљења и високог отпуштања (побољшања), при чему је остварена тврдоћа од 55 HRC.



a)

б)

Слика 7.13 *Изменљиви клизни елементи: а) са брушеним контактним површинама, б) са полираним контактним површинама*



a)

б)

Слика 7.14 *Изменљиви клизни елементи са: а) нитрираним контактним површинама, б) превлаком од титан-нитрида на контактним површинама*

С обзиром на то да су контактне површине изменљивих клизних елемената знатно веће тврдоће у односу на узорке лима од челика и алуминијума, као и веће адхезивне склоности, за време процеса провлачења долазило је до појаве налепнина мекшег материјала на тврде контактне површине изменљивих елемената. Та појава је нарочито била изражена код провлачења трака лима од меке алуминијумске легуре, као и у случајевима истискивања мазива из контактне зоне услед високе вредности стварног притиска у контакту. На слици 7.15 приказани су трагови налепнина на контактним елементима, оријентисани у правцу провлачења траке лима. После појаве првих трагова налепнина, вршено је њихово уклањање брусним папиром најфиније гранулације брусних честица и по потреби полирање одговарајућом пастом.



a)



б)

Слика 7.15 *Трагови налепнина трака лима на контактном елементу са: а) полираном површином, б) превлаком од титан-нитрида*

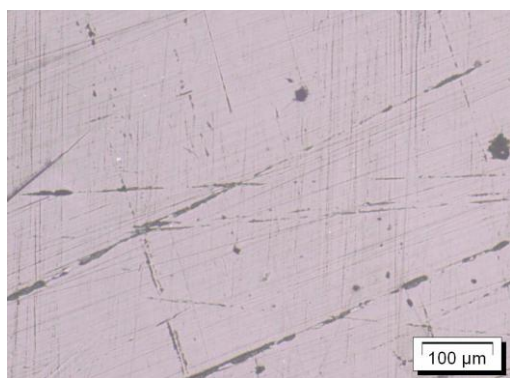
Појаву штетних налепнина најбоље је пратити преко промене површинске храпавости контактних елемената. У том циљу, мерена је површинска храпавост, пре почетка процеса

провлачења и после појаве првих уочљивих трагова налепнина. На наредним сликама (од 7.16 до 7.23) и табелама (од 7.5 до 7.12) биће дати прикази параметара храпавости, микрофотографије површина и 2D профили храпавости, за сваки контактни елемент, пре и после процеса провлачења.

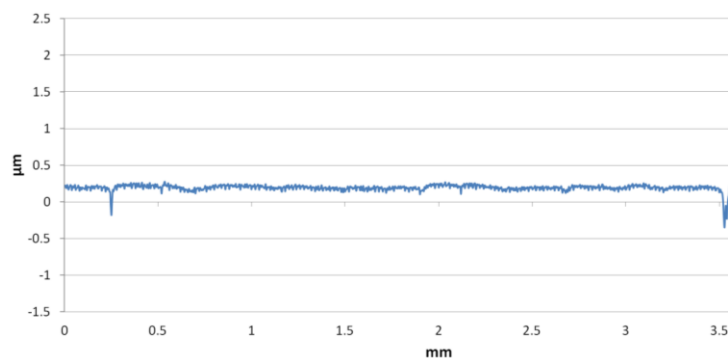
Примена мазива у великој мери утиче на појаву налепљених слојева на изменљивим контактним елементима. Једнак утицај на налепнине има и врста лима. Код подмазивања уљем за дубоко извлачење налепљени слојеви су мање изражени, посебно код лимова веће тврдоће (нпр. челични лим без превлаке цинка). Најнеповољнија комбинација мазива и материјала лима јесте мазиво на бази молибден-дисулфида и алуминијум. Честице меког алуминијума се под утицајем вучне силе и високог притиска у контакту одвајају и прилепљују на површине клизача. То је мање изражено код уља за дубоко извлачење. Код уља је присутан ефекат спирања (одношења) честица из зоне контакта, док се код мазива веће густине (маст на бази молибден-дисулфида) честице метала задржавају у мазиву и контактної зони.

Табела 7.5 Основни параметри храпавости за брушене површине пре провлачења

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.050	0.627	0.52	0.25



a)

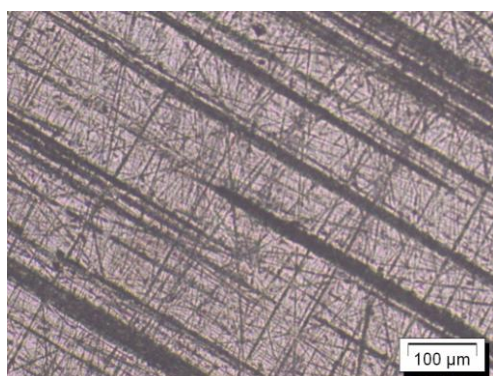


б)

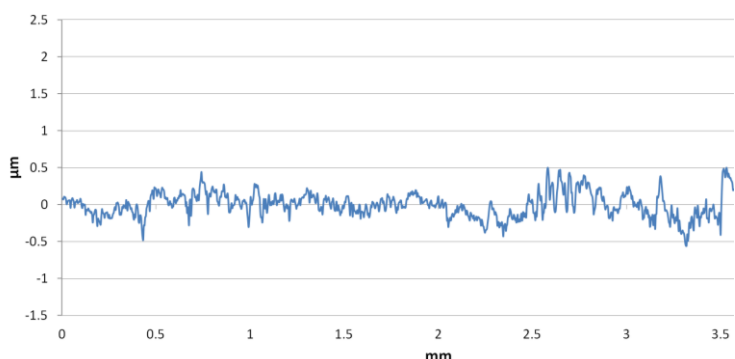
Слика 7.16 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са брушеним површинама пре провлачења

Табела 7.6 Основни параметри храпавости за брушене површине после провлачења

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.131	1.06	0.804	0.50



a)



б)

Слика 7.17 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са брушеним површинама после провлачења

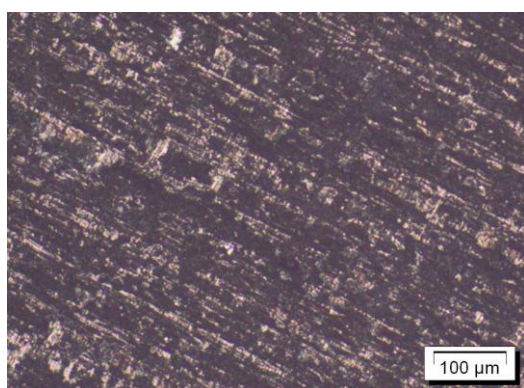
Приметно је да се храпавост површина мења независно од појаве налепнина (табеле 7.5 до 7.12 и слике 7.16б до 7.23б). Та промена може бити последица процеса клизања лима између контактних елемената и недовољне количине мазива у неким случајевима. Храпавост лима је већа на ивицама

трака лима (као последица поступка одсецања и брушења), па може настати микробраздање на контактним елементима, чиме се вредности параметара храпавости увећавају.

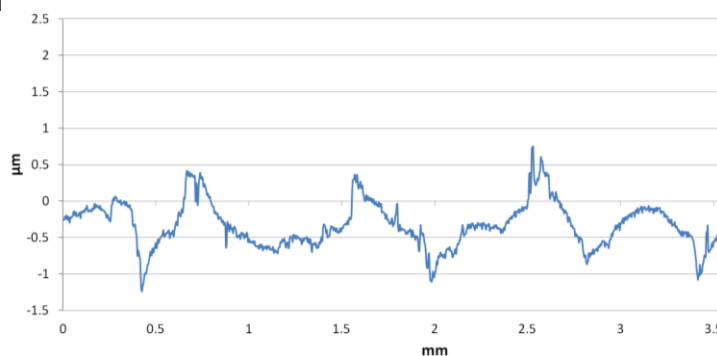
Упоређивањем параметара храпавости (табеле 7.5 и 7.6) приметно је повећање висина неравнина и храпавости површина (сл. 7.17б), као последица појаве трагова налепљених слојева на контактним површинама. Томе у прилог иде и приказ у виду микрофотографија (слике 7.16а и 7.17а), снимљених на оптичком микроскопу са повећањем 100×, где се јасно виде трагови у правцу провлачења. То је запажено и на изменљивим елементима осталих типова површина (нитрирано, полирано, превлака од титан-нитрида).

Табела 7.7 Основни параметри храпавости за нитриране површине пре провлачења

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.291	1.74	1.32	0.562



а)

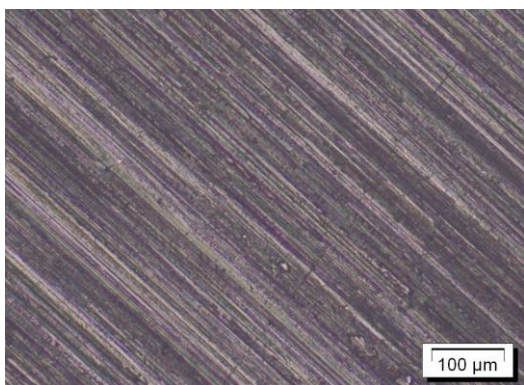


б)

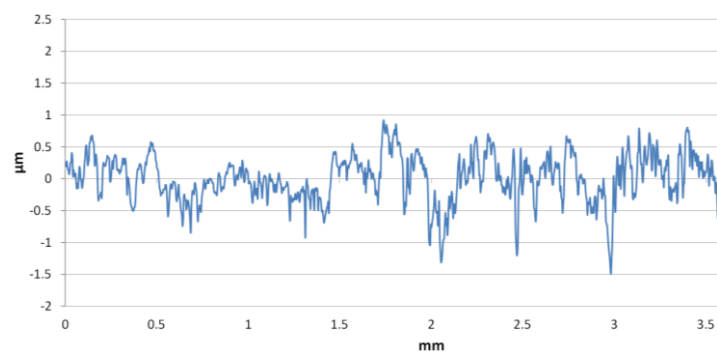
Слика 7.18 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са нитрираним површинама пре провлачења

Табела 7.8 Основни параметри храпавости за нитриране површине после провлачења

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.295	2.28	1.86	0.92



а)



б)

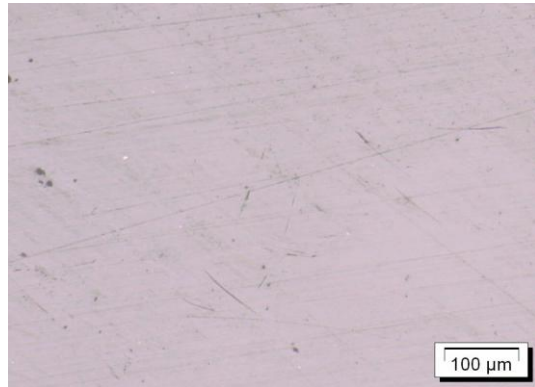
Слика 7.19 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са нитрираним површинама после провлачења

У случају нитрираних површина изменљивих контактних елемената, појава налепљених слојева није значајно изражена, што је било запажено за време извођења експеримента. Средње аритметичко одступање профила пре и после провлачења је готово непромењено (табеле 7.7 и 7.8). Остали параметри храпавости су нешто виши после провлачења (сл. 7.19б). Трагови налепљених слојева оријентисани у смеру клизања траке лима по контактним површинама изменљивих елемената су

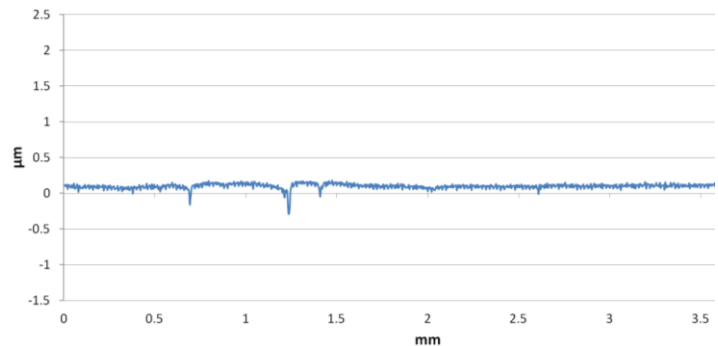
јасно изражени после провлачења (сл. 7.19а) у односу на изглед површине пре почетка процеса (сл. 7.18а).

Табела 7.9 Основни параметри храповости за полиране површине пре провлачења

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.038	0.49	0.315	0.11



а)

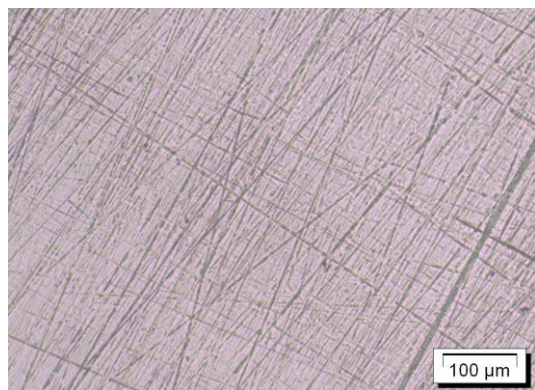


б)

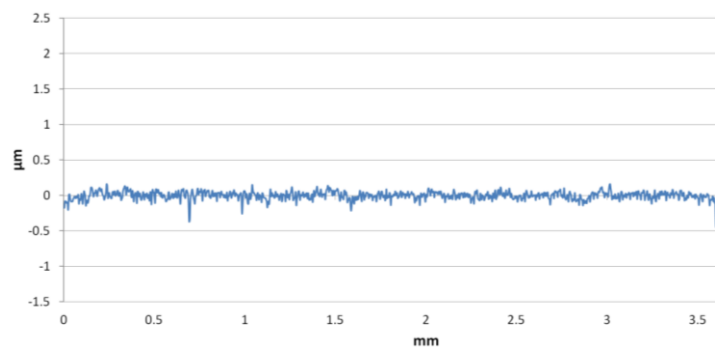
Слика 7.20 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са полираним површинама пре провлачења

Табела 7.10 Основни параметри храповости за полиране површине после провлачења

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.042	0.52	0.344	0.16



а)



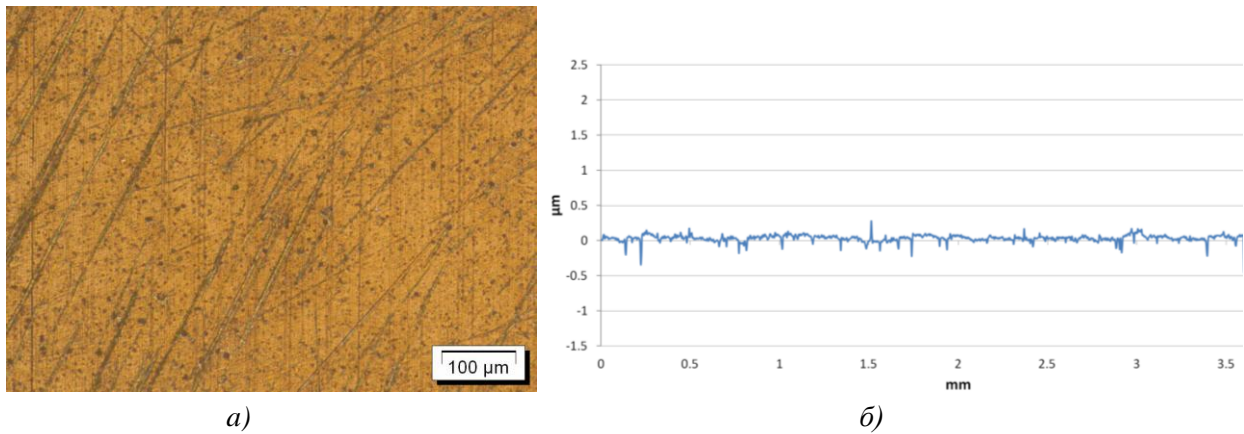
б)

Слика 7.21 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са полираним површинама после провлачења

Код полираних контактних површина, појава налепљених слојева је била изражена за време извођења експеримента, али то није значајно утицало на отежавање контактних услова, због веома ниских вредности параметара површинске храповости (табеле 7.9 и 7.10, слике 7.20б и 7.21б). На микрофотографији (сл. 7.21а) видљиви су мањи зарези од задирања ивица трака лима по полираној површини изменљивих клизних елемената за време процеса провлачења.

Табела 7.11 Основни параметри храповости за површине са TiN превлаком пре провлачења

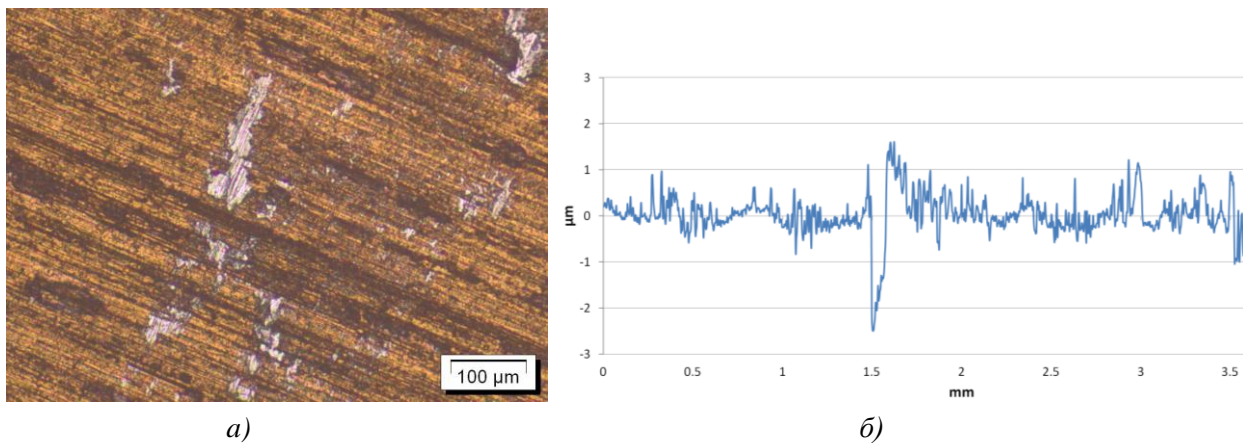
$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.27	2.55	1.74	0.42



Слика 7.22 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са TiN превлаком пре провлачења

Табела 7.12 Основни параметри храповости за површине са TiN превлаком после провлачења

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.32	4.0	2.52	1.6



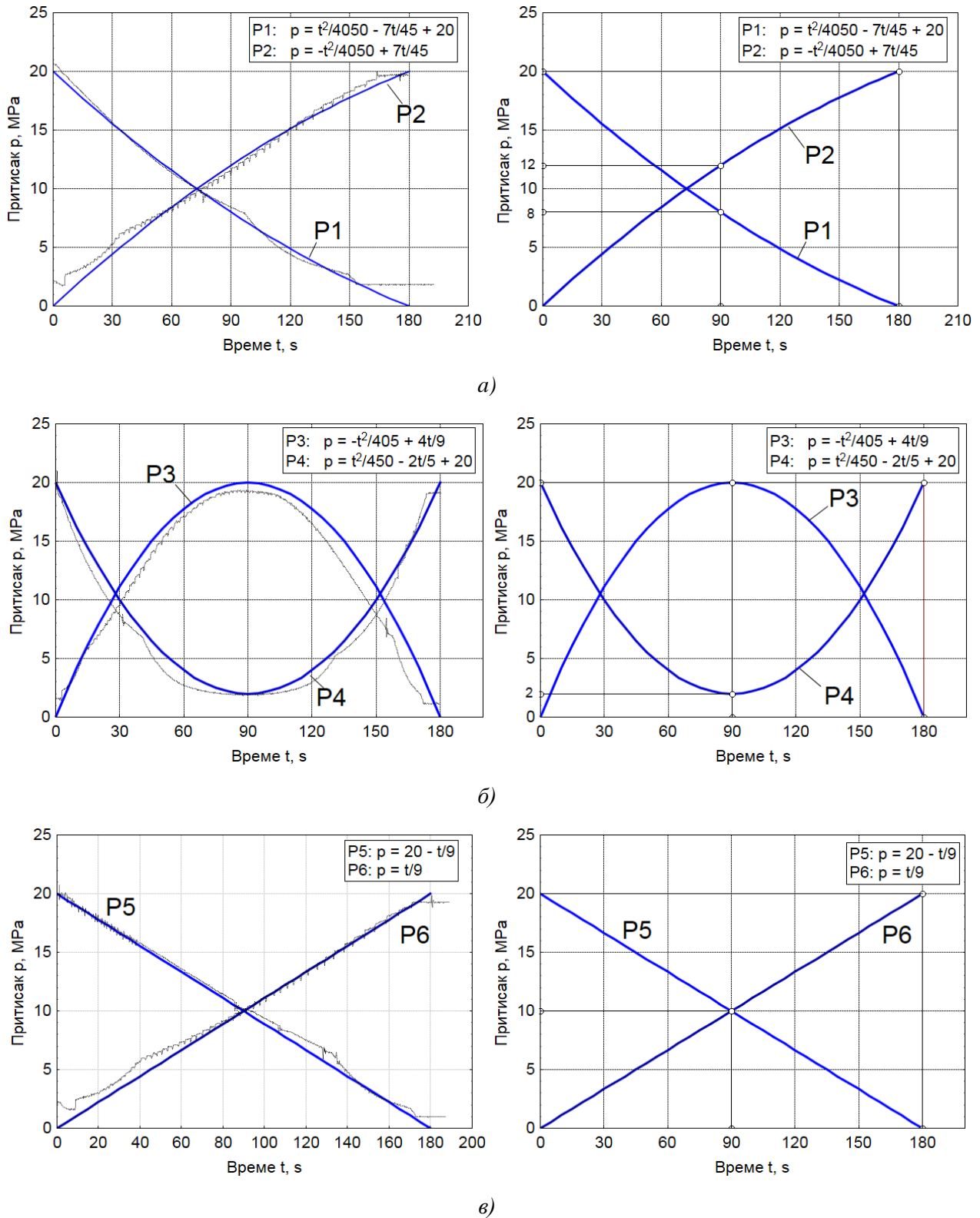
Слика 7.23 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) контактнoг елемента са TiN превлаком после провлачења

Упоредивањем добијених параметара храповости (табеле 7.11 и 7.12, слике 7.22б и 7.23б), као и визуелним прегледом контактних елемената (слике 7.14б и 7.15б) и изгледа на микрофотографијама (слике 7.22а и 7.23а), пре и после провлачења, утврђено је присуство налепљених слојева у виду слојева већих микроповршина. На осталим типовима површина изменљивих клизних елемената, налепљени слојеви су били присутни у виду танких линијских трагова, па се на основу тога може закључити да је превлака од титан-нитрида веома склона стварању налепнина, нарочито у лошијим контактним условима и провлачењем узорака од алуминијума, што је запажено и за време извођења експеримента.

7.3. Теоријски дефинисане и експериментално остварене зависности притисака од времена

Механичко-хидрауличним компјутеризованим системом, детаљно описаним у поглављу 6 овог рада, експериментално су остварене функционалне зависности промене контактнoг притиска од времена (тј. хода). Због начина рада управљачког система и одговарајуће повратне спреге, експерименталне зависности у мањој мери одступају од теоријски дефинисаних. У циљу теоријског дефинисања функционалних зависности промене притиска $p_{(t)}$ неопходно је било одређивање граничних вредности у складу са емпиријским препорукама ранијих истраживања у овој области [12, 13]. За контактни притисак то су вредности у опсегу 0 – 20 МПа (сл. 7.24). С друге стране,

требало је одредити трајање процеса.



Слика 7.24 Теоријски дефинисане и експериментално добијене функције притисака: а) опадајућег (P1) и растућег (P2) типа, б) растуће-опадајућег (P3) и опадајуће-растућег типа (P4), в) линеарно опадајућег (P5) и линеарно растућег типа (P6)

Максимални ход траке лима износи око 60 mm, што је условљено могућностима лабораторијске пресе. Изабрана је нешто мања вредност брзине вучења траке лима од 20 mm/min, у циљу једноставнијег решења управљања хидрауличном апаратуром. С обзиром на поменуте вредности хода и брзине вучења лако је добијено максимално трајање процеса од 180 s (3 min). На

тај начин дефинисан је оквир променљивих функција притиска $20 \text{ bara} \times 180 \text{ s}$. На основу опсега вредности за p (0-20 bara) и t (0-180 s) дефинисане су почетне и крајње тачке тражених функција, а на основу жељеног нагиба криве још једна тачка на половини трајања процеса (90 s). Те три тачке су биле сасвим довољне за одређивање параболичких функција $p(t)$. Све функције су дате на слици 7.24.

Пример извођења аналитичког израза функција променљивог притиска биће дат за функцију P1 (сл. 7.24a десно). Да би се одредио аналитички израз морају се познавати вредности притиска (p) и времена (t) за три тачке поменуте параболичне функционалне промене. Вредност притиска на почетку хода ($t=0 \text{ s}$) износи 20 МПа, а на крају хода ($t=180 \text{ s}$) износи 0 МПа. Средишњем делу хода ($t=90 \text{ s}$) одговара притисак од 8 МПа. Општи облик квадратне функције гласи:

$$p = a \cdot t^2 + b \cdot t + c \quad (7.1)$$

Заменом вредности притисака и времена за три тачке добија се систем једначина са 2 непознате.

$$p = 20 \text{ МПа} \rightarrow t = 0 \rightarrow c = 20 \quad (7.2)$$

$$p = 0 \text{ МПа} \rightarrow t = 180 \rightarrow 0 = 32400 \cdot a + 180 \cdot b + 20 \quad (7.3)$$

$$p = 8 \text{ МПа} \rightarrow t = 90 \rightarrow 8 = 8100 \cdot a + 90 \cdot b + 20 \quad (7.4)$$

Решавањем једноставног система једначина добијају се вредности параметара a и b :

$$a = \frac{1}{4050} \text{ и } b = -\frac{7}{45} \text{ и коначни израз гласи: } p = \frac{1}{4050} \cdot t^2 - \frac{7}{45} \cdot t + 20 \quad (7.5)$$

На сличан начин добијају се изрази осталих функција променљивог притиска (параболичних P2, P3, P4 и линеарних P5, P6).

Одабране константне вредности притиска са одговарајућим ознакама су: P8 – 10 МПа; P10 – 20 МПа. Просечно одступање експерименталних од теоријских кривих је до 5%, док је код линеарних зависности и константних вредности притисака тај проценат готово занемарљив. На дијаграмима (сл. 7.24), приказане су остварене карактеристичне функционалне зависности притисака од времена. На свим дијаграмима испрекиданим линијама приказане су претходно (теоријски) дефинисане функције, а пуним линијама експериментално остварене.

Експериментално добијене функције притиска P3 и P4 (пуне линије, сл. 7.24) у области минимума и максимума, у одређеној мери одступају од дефинисаних у смислу праћења криве, док се остварени минимум и максимум практично поклапају са претходно дефинисаним. Ова, као и друга слична одступања било је могуће избећи, али је било потребно извести додатне активности и већа додатна улагања, што се практично показало непотребним.

Грешке које се манифестују на самом почетку су последица рада и укључивања система, јер се за време процеса испитивања, истовремено укључују три тастера (управљачка јединица, лабораторијска преса и рачунар). Исто тако, грешке које се могу занемарити, а видљиве су на крају процеса, последица су различитог трајања процеса (брзина), које је износило две, три секунде. Све то суштински не утиче на валидно одвијање процеса и мерење вучних сила и касније коефицијената трења.

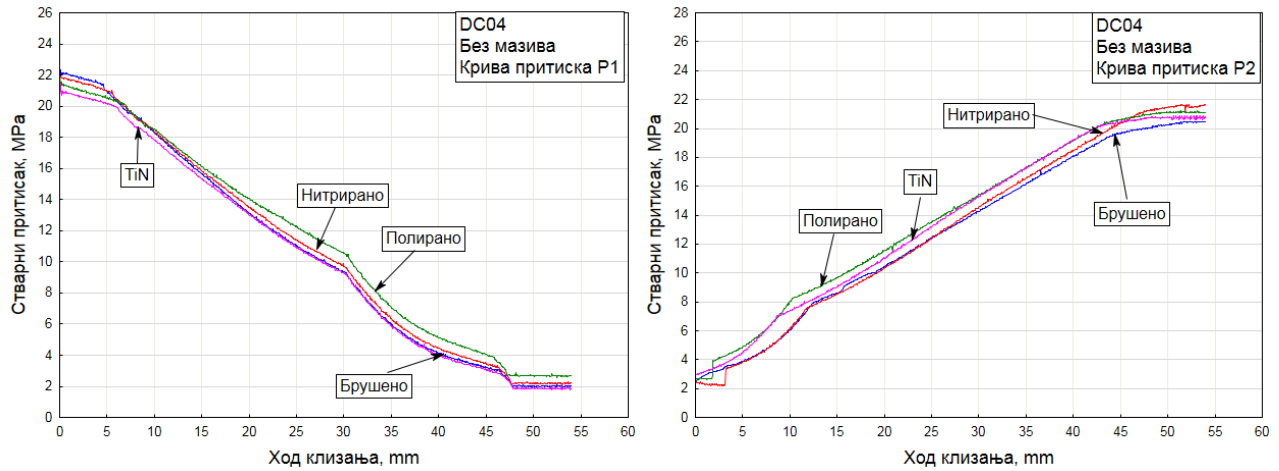
7.3.1. Експерименталне зависности притисака за челични лим без превлаке (DC04)

На сликама 7.25 до 7.54 приказане су експерименталне (реално остварене) зависности притисака од хода при провлачењу узорака лима. Зависности су груписане према врсти материјала лима. У оквиру једног дијаграмског приказа дате су четири криве које се односе на тип површине изменљивих контактних елемената, у циљу лакшег упоређивања резултата, при истим контактним условима (са мазивима и без мазива). Сваки дијаграмски приказ се односи на једну променљиву зависност, односну константну вредност притиска. Нешто мањи број резултата приказан је за услове без подмазивања, јер такви контактни услови код обликовања дубоким извлачењем у реалној пракси немају значај. На одговарајући начин ово је тест поузданости коришћене апаратуре.

Анализирајући експериментално добијене зависности притисака може се закључити да компјутеризована апаратура веома добро остварује теоријски задане криве притисака. На појединим дијаграмима су врло мале разлике између кривих, а често се криве и поклапају. Мала разлика у трендовима кривих упућује на различиту храпавост изменљивих контактних елемената, као и

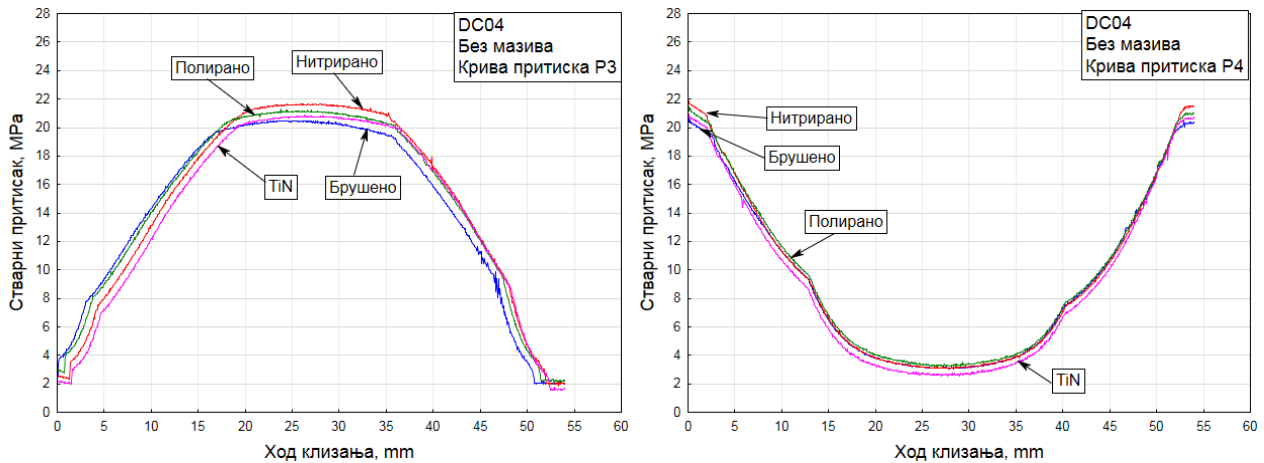
могуће присуство налепљених честица мекшег материјала лима на тврђи материјал контактних елемената.

7.3.1.1. Зависности притисака од хода при сувим контактним површинама



Слика 7.25 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

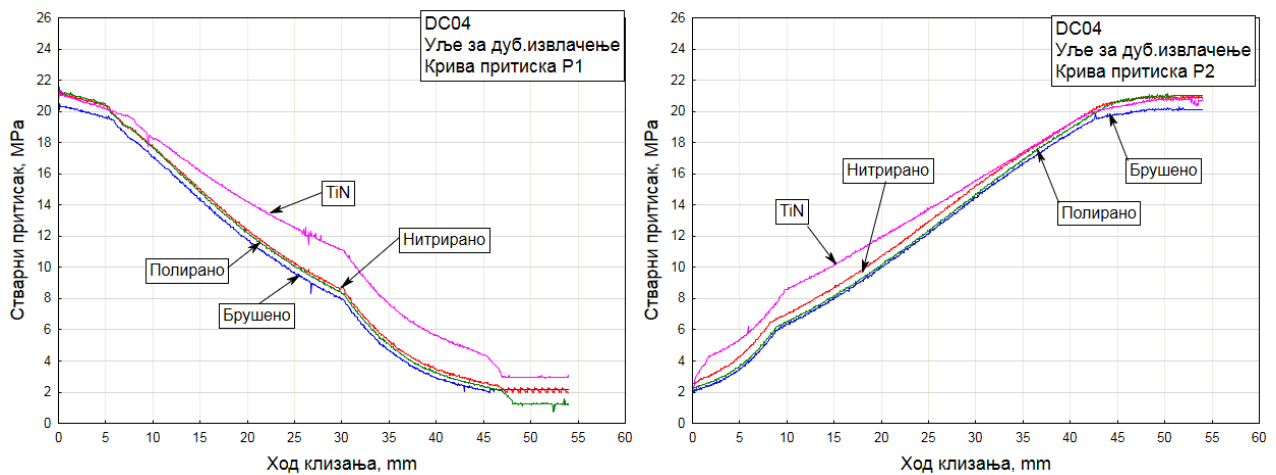
На сликама 7.25 и 7.26 приказане су зависности реалног притиска у условима без подмазивања. Криве су уједначене и постоје врло мале разлике између њих, као последица различите храповости површина контактних елемената. Са већим отпором клизања, стварни притисак је у порасту. На слици 7.25 за случај задате промене притиска P1, крива притиска код полираних површина има нешто већу вредност, што је углавном последица стварања налепљених слојева, имајући у виду да су се испитивања без мазива углавном спроводила при крају експеримента, а после испитивања применом два типа мазива.



Слика 7.26 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

7.3.1.2. Зависности притисака од хода применом уља за дубоко извлачење

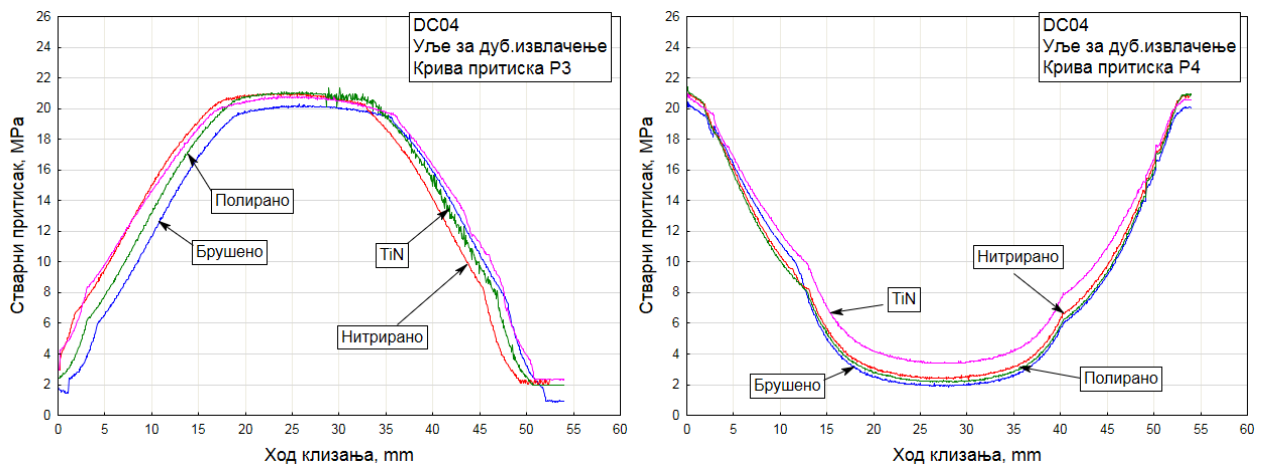
Упоредне зависности стварног притиска у контакту за узорке од челичног лима применом уља за дубоко извлачење приказани су у виду дијаграма на сликама 7.27 до 7.30. Пораст притиска је углавном присутан код површина превучених титан-нитридом, док се остале криве углавном поклапају.



Слика 7.27 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

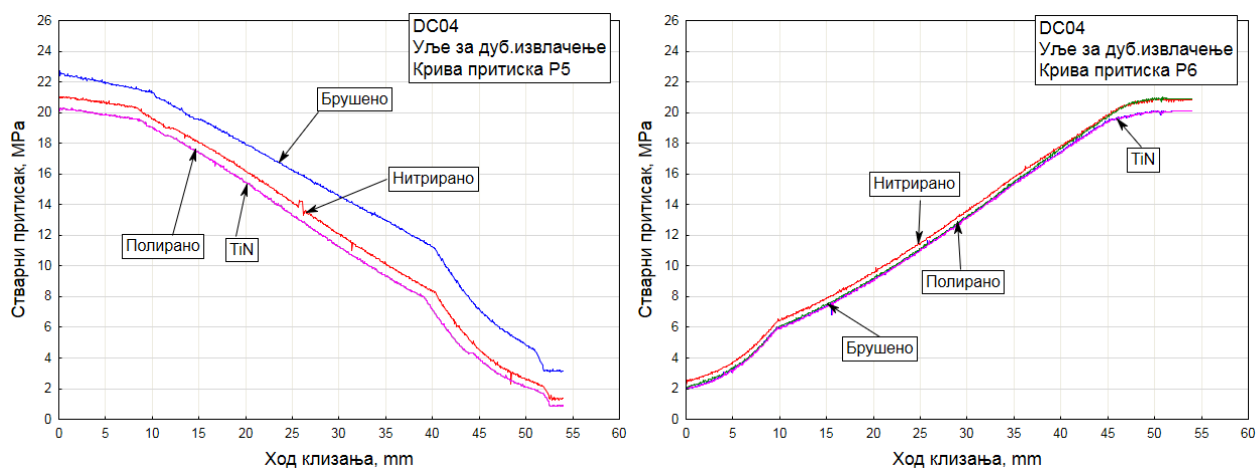
Комбинација превлаке са уљем доводи до отежаних услова клизања нарочито у почетном делу хода где су присутне високе вредности притиска P1 (почев од 20 МПа, сл. 7.27). У том делу хода за време експеримента било је присутно повећање затежућег напона у траци лима, односно блокирање процеса клизања, што је довело до прелома узорка. То се нарочито може пратити преко тренда зависности вучних сила од хода, о чему ће бити говора у наредном поглављу 7.4. Последица отежаних услова клизања изражена је и код криве притиска P2 (сл. 7.27).

И код експерименталних зависности P3 и P4 (сл. 7.28) изражене су повишене вредности притисака код превлаке од титан-нитрида. Најнижи стварни притисак је регистрован код полираних и брушених површина (P3, P4, сл. 7.28) а највиши код титан-нитрида, што је довело до прелома узорка лима (P3, сл. 7.28), као и код притиска P1.



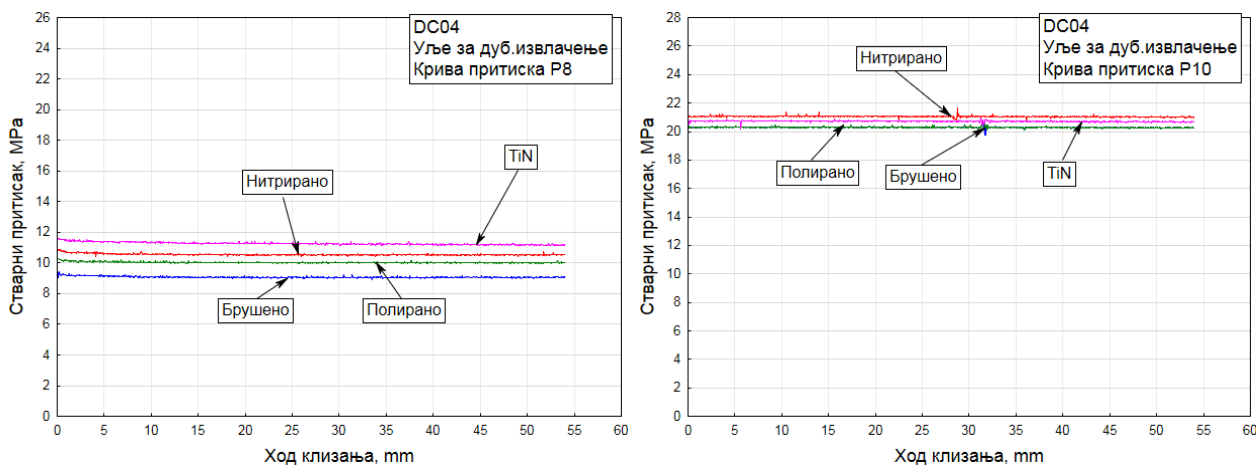
Слика 7.28 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

На слици 7.29 за примењену криву притиска P5, стварни притисак у контакту најнижи је за полиране површине и површине са превлаком од титан-нитрида, а највиши за брушене површине. Међутим, повишени притисак код брушених површина није довео до прелома траке лима. Супротно томе, прелом је наступио управо код нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида, али се то није манифестовало порастом стварног притиска. Појава прелома се најбоље прати преко дијаграма вучних сила (сл. 7.59, притисак P5). Код дијаграма на слици 7.29 (притисак P6) нема значајнијег одступања кривих за све типове контактних површина изменљивих клизних елемената. Криве се у већој мери поклапају. Уједначеност поменутих кривих може се тумачити растућим карактером промене P6, односно постепеним порастом притиска од минималних до максималних вредности, за време процеса вучења (клизања).



Слика 7.29 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

На слици 7.30 приказане су константне вредности стварних притисака у контакту у складу са задатим вредностима од 10 МПа (крива P8) и 20 МПа (крива P10). У случају притиска P8, процес је успешно завршен за све типове површина клизних елемената. Једино је у првом делу хода код нитрираних површина било присутно повећање затежућег напона траке лима (дијаграм вучне силе P8, сл. 7.60), да би се процес наставио успешно до краја. За разлику од притиска P8, код константне вредности притиска P10, деформисање узорка лима је било присутно у свим случајевима осим за полиране површине, што је директна последица високог притиска у контакту и триболошких услова (храпавости површина). То је јасно видљиво на дијаграму вучне силе (притисак P10, сл. 7.60).

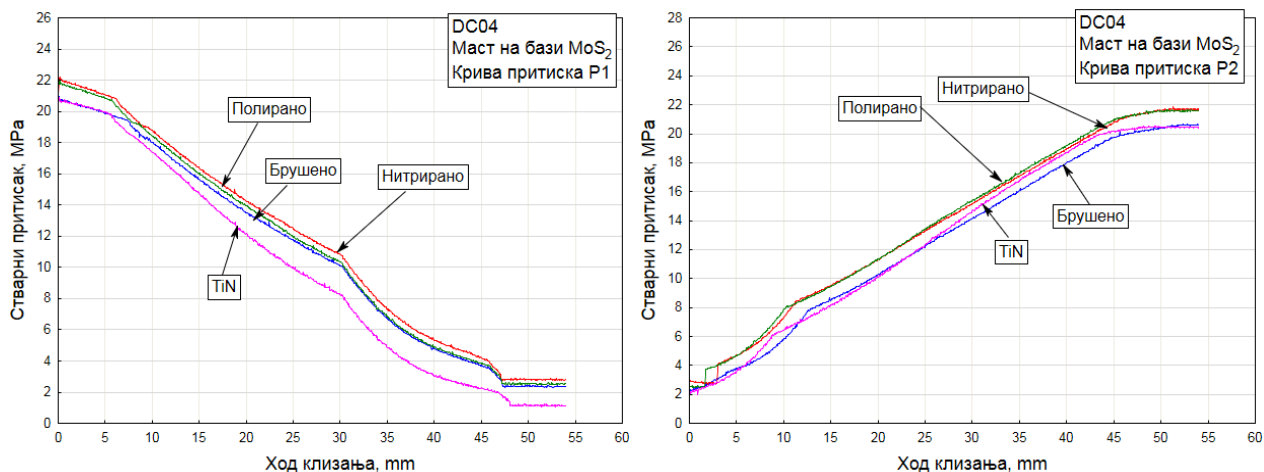


Слика 7.30 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

7.3.1.3. Зависности притисака од хода применом мазиве масти на бази MoS₂

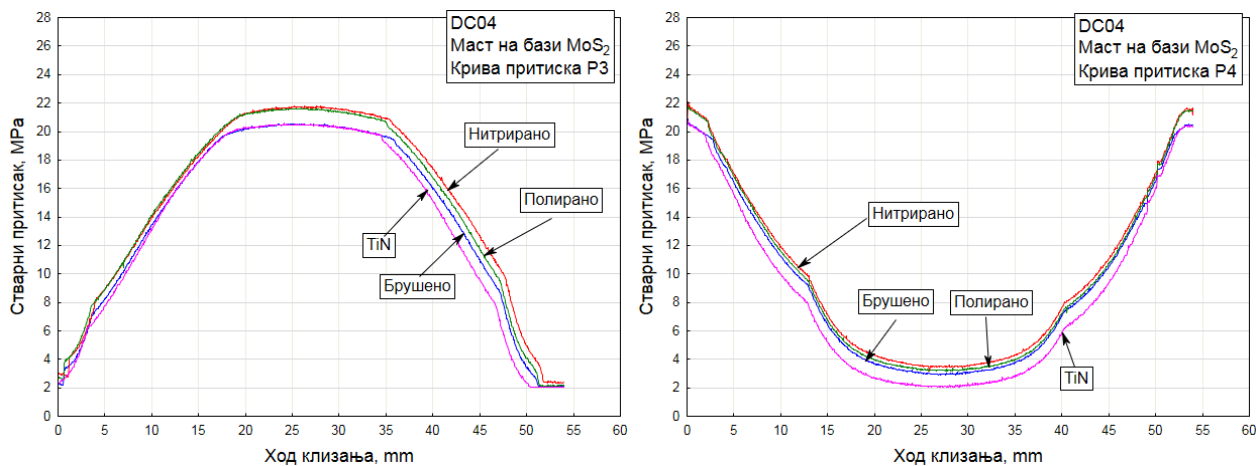
На сликама 7.31 до 7.34 дати су дијаграмски прикази реално добијеног контактнoг притиска за челични лим, применом мазиве масти на бази MoS₂ и за сваки тип површина изменљивих клизних елемената. Криве притиска се углавном поклапају, као и у случају подмазивања уљем. Мања одступања уочена су код криве притиска за површине са превлаком од титан-нитрида.

У случају притиска P1 (сл. 7.31) криве се готово идеално поклапају осим за случај контактних површина са TiN превлаком, где су заступљене најниже вредности контактнoг притиска. Упоредном анализом дијаграма вучне силе при истим условима (сл. 7.61) највише вредности вучне силе су управо за случај површина са TiN превлаком. На основу тога се може закључити да криве притиска нису увек меродавне за оцену услова клизања, па је зато неопходно тумачење које укључује и дијаграме вучне силе а нарочито коефицијента трења, који је у директној спрези са контактним притиском.



Слика 7.31 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

На слици 7.31 код растуће експоненцијалне промене притиска P2 криве стварног притиска за различите типове контактних површина клизних елемената се углавном поклапају.

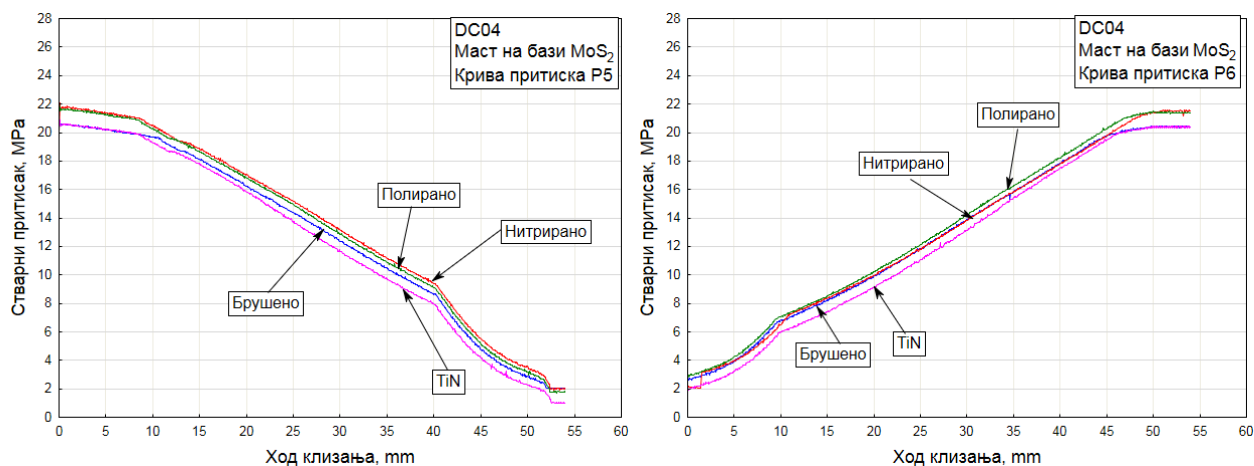


Слика 7.32 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

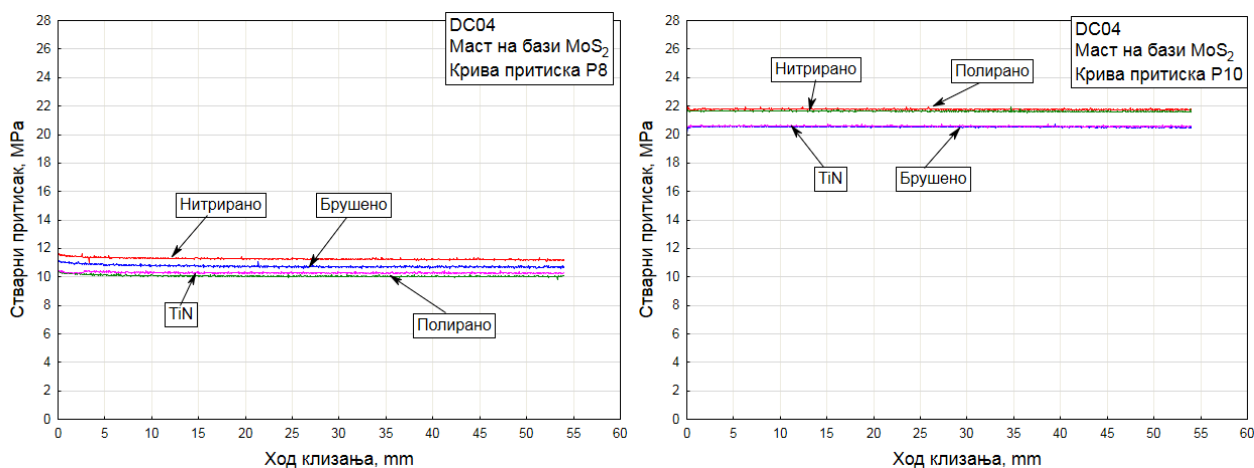
Реалне криве притисака за теоријски задату криву P3 (сл. 7.32) применом масти на бази MoS_2 се као и код случаја подмазивања уљем (сл. 7.28) не поклапају у већој мери за све типове површина. То је регистровано и код преостала два типа материјала трака лима. Одговор се може тражити у самом карактеру теоријске растуће-оппадајуће промене P3. Код промене притиска P4 (сл. 7.32) криве се веома добро поклапају осим за случај превлаке од титан-нитрида, чија крива стварног притиска има најнижу вредност, за разлику од исте криве (притисак P4, сл. 7.28), која применом уља има највишу вредност.

Криве стварног притиска (дијаграми на слици 7.33) за случај теоријских промена притиска P5 и P6 се у већој мери поклапају и имају исте трендове, осим криве која се односи на површине клизних елемената са TiN превлаком, која у оба случаја има најнижу вредност.

Константне вредности стварног притиска, при теоријски задатим притисцима P8 и P10 приказане су на слици 7.34. Вредности притиска су у складу са расподелама вучне силе за све типове површина (сл. 7.64, константне задате вредности P8 и P10). Код константних расподела је доминантан утицај мазива. Боља подмазујућа својства чврстог мазива на бази MoS_2 се огледају у томе да прелом траке није наступио ни у једном случају за константни притисак од 20 МПа (сл. 7.64, притисак P10) за разлику од подмазивања уљем (сл. 7.60, притисак P10), где прелом није наступио само код полираних површина. То је директна последица триболошких услова у контакту (врста мазива, храпавост површина изменљивих контактних парова).



Слика 7.33 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

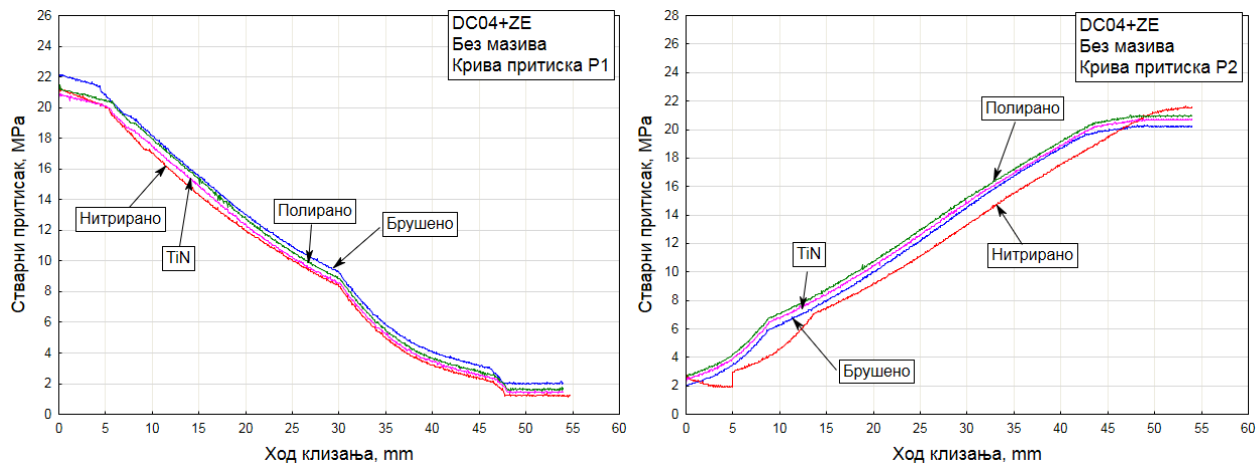


Слика 7.34 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

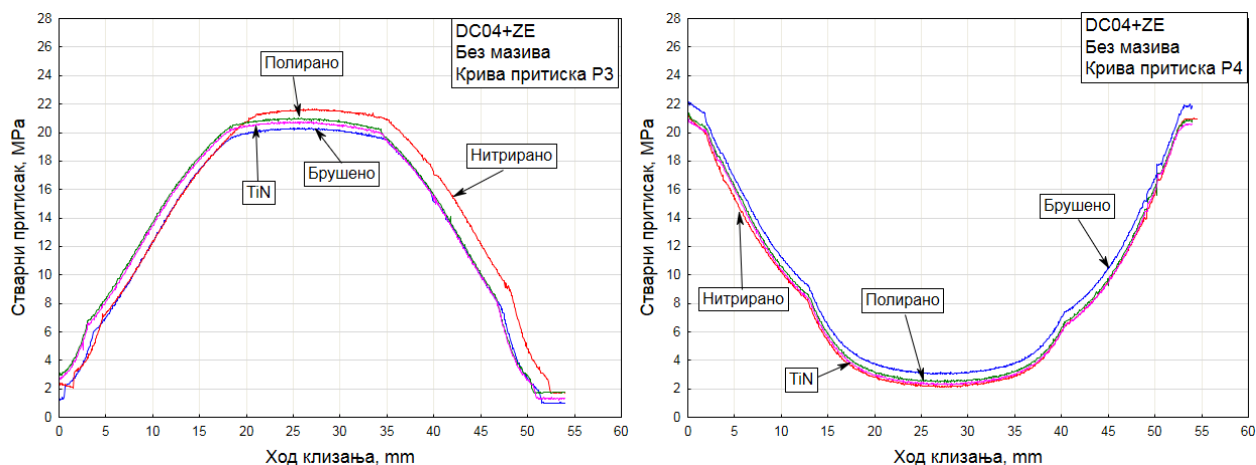
7.3.2. Експерименталне зависности притисака за поцинковани челични лим (DC04+ZE)

На наредним дијаграмима (слике 7.35 до 7.44) приказане су зависности стварног притиска у контакту за узорке од једнострано поцинкованог челичног лима (DC04+ZE). Дијаграми су веома слични као и за класични челични лим, који су приказани и коментарисани у претходном поглављу. Највише вредности притиска су регистроване код нитрираних површина за теоријску промену P3, при свим условима подмазивања (слике 7.36, 7.38 и 7.42). Такође, код ове промене, приметне су значајне разлике у положајима кривих стварног притиска за сва четири типа површина контактних елемената и исти тип мазива. Поменуто разлике између кривих стварног притиска приметне су и код задатих промена P1 и P5, као и код константне вредности P8. Код кривих које имају опадајући карактер у првом делу хода (P1, P3, P5, нпр. слике 7.37, 7.39, 7.41, 7.43 и др.), услед високог почетног притиска могу настати отежани услови вучења (клизања). То доводи до повећања затежућег напона узорка. На основу тога, у зависности од примењених контактних услова (мазива, хrapавост површина), могу се јавити мање или веће разлике у добијеним кривама стварног притиска. Слично томе, код константне вредности притиска P8 (10 МПа), постоје разлике у кривама стварног притиска за поједине типове површина. Ова константна вредност притиска обезбеђује успешан завршетак процеса клизања, без деформисања и прелома (сл. 7.40), а на разлике у добијеним кривама утиче највише хrapавост површина контактних елемената.

7.3.2.1. Зависности притисака од хода при сувим контактним површинама

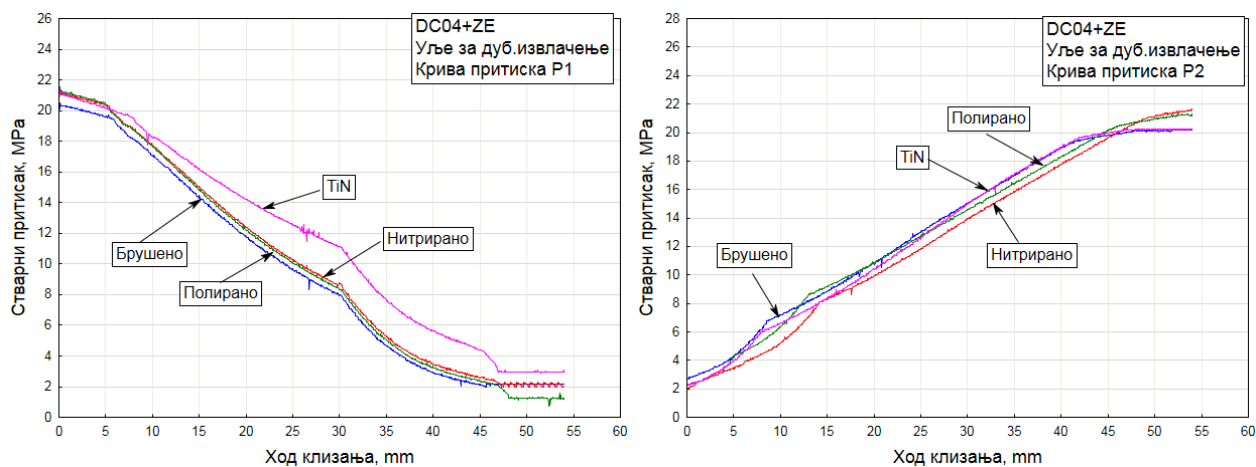


Слика 7.35 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

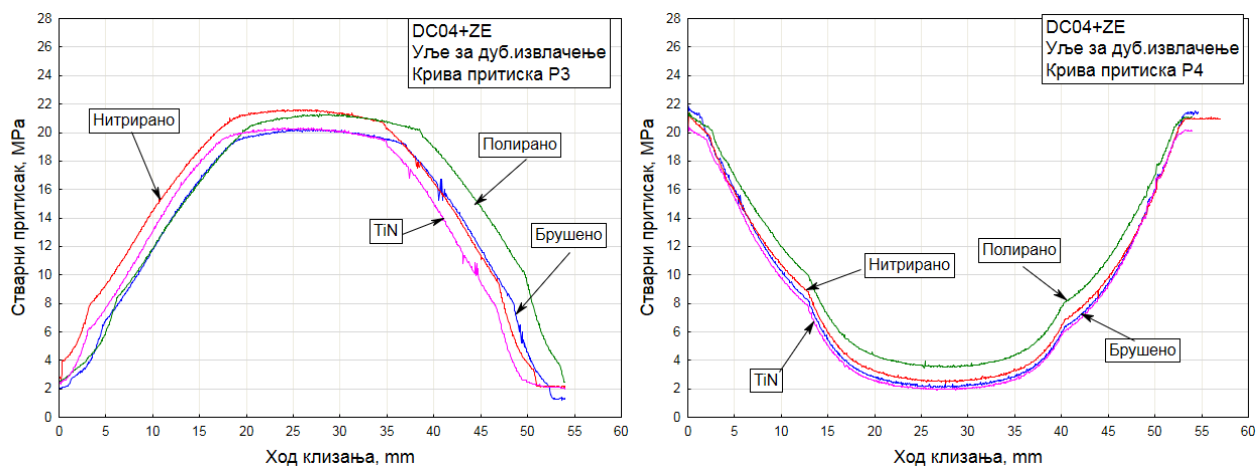


Слика 7.36 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

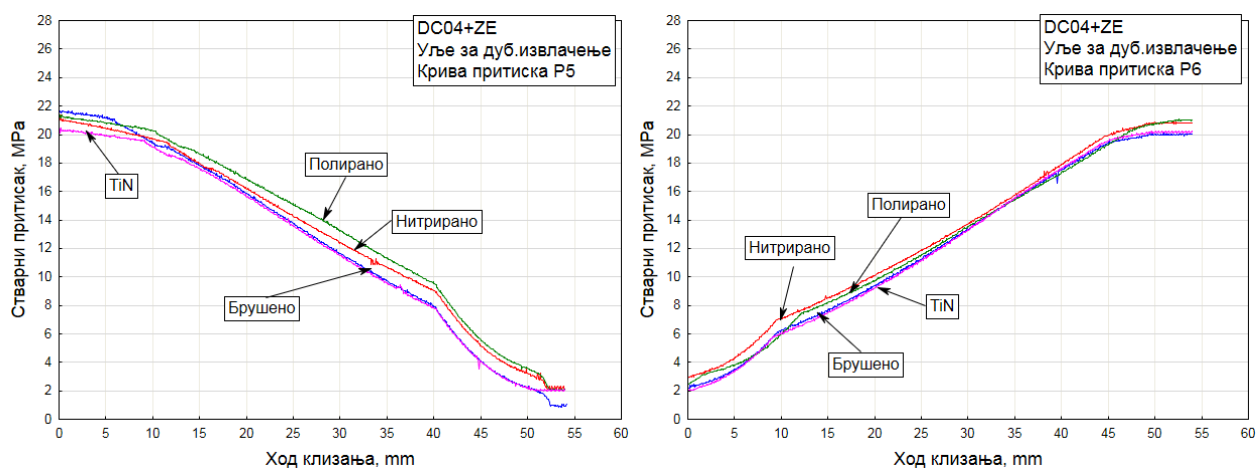
7.3.2.2. Зависности притисака од хода применом уља за дубоко извлачење



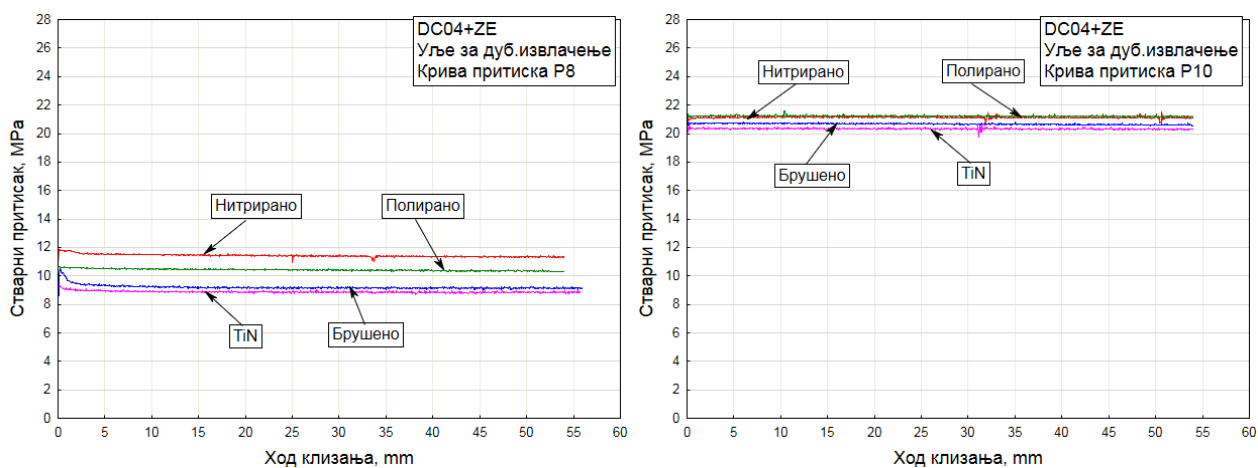
Слика 7.37 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)



Слика 7.38 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

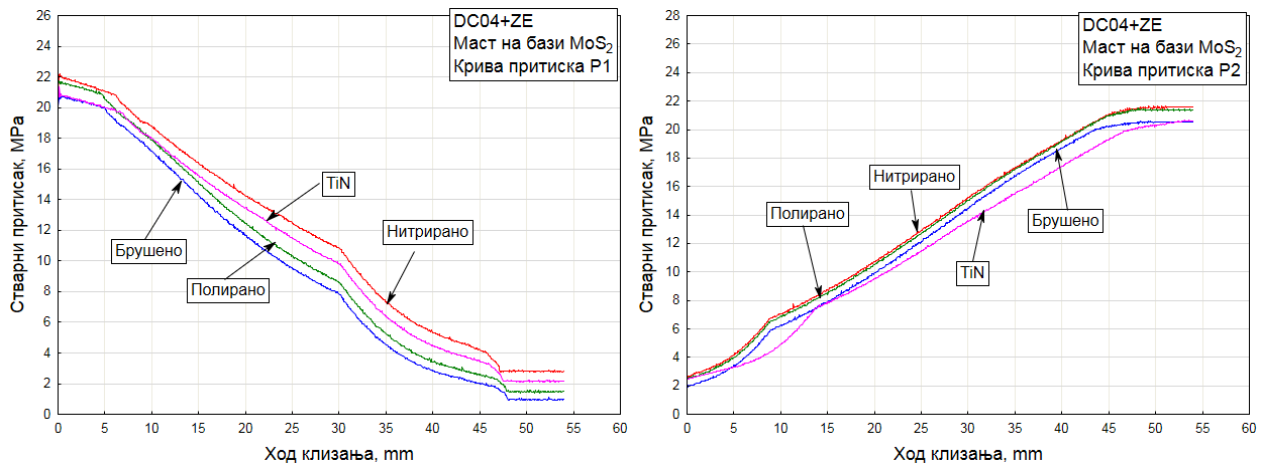


Слика 7.39 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

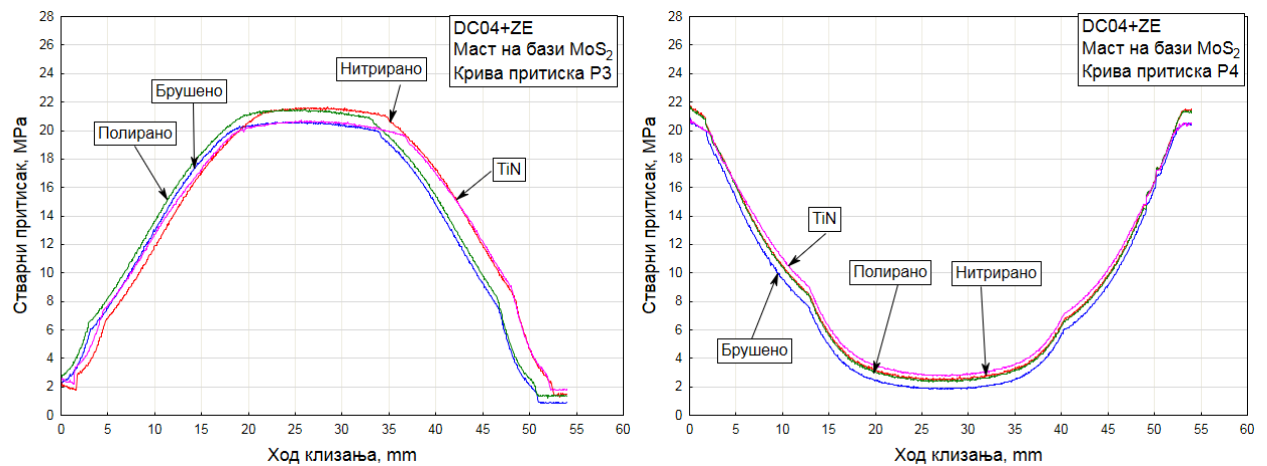


Слика 7.40 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

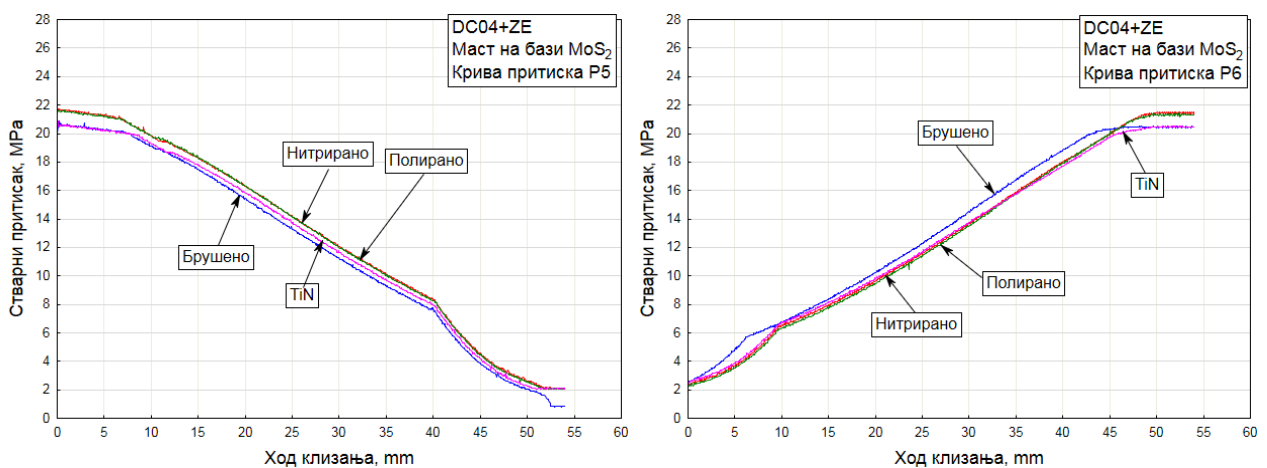
7.3.2.3. Зависности притисака од хода применом мазиве масти на бази MoS_2



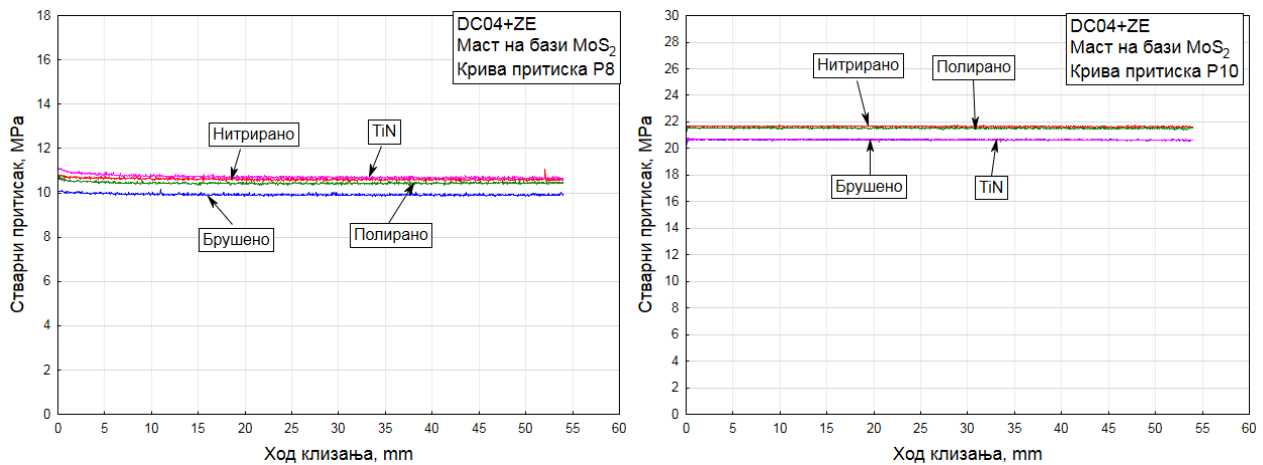
Слика 7.41 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)



Слика 7.42 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)



Слика 7.43 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)



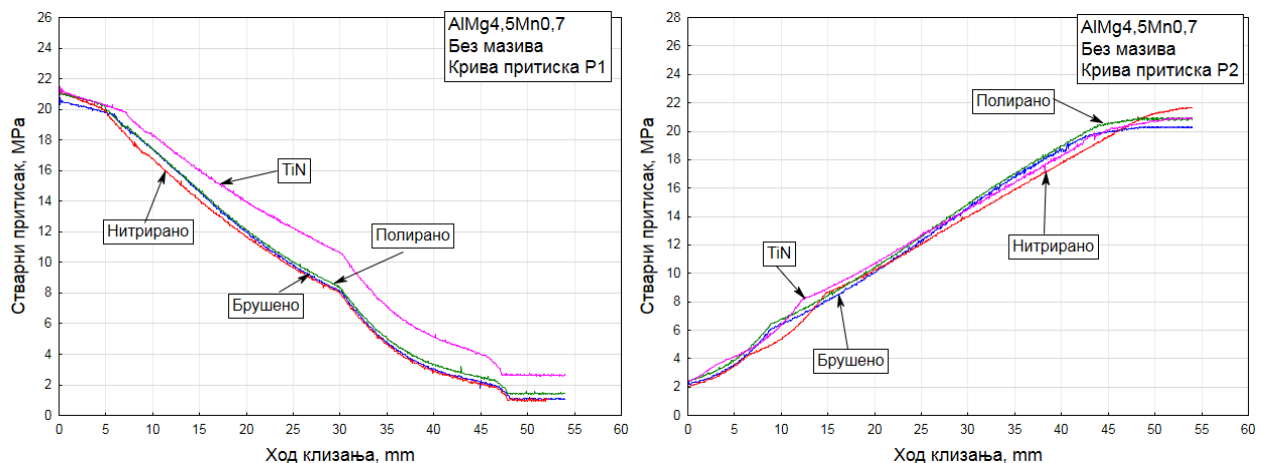
Слика 7.44 Зависности контактних притисака од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS₂, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

7.3.3. Експерименталне зависности притисака за лим од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)

Експериментално добијени дијаграми стварног притиска за процес вучења трака лима од алуминијумске легуре приказани су на сликама од 7.45 до 7.54. Овај материјал има веома повољне карактеристике пластичности и једна је од најпогоднијих легура за процес дубоког извлачења, на шта је већ указано у поглављу 6. Захваљујући добрим пластичним својствима и веома доброј моћи ношења мазива, приметно је нижи број узорака који су претрпели прелом, за разлику од челичних лимова. Прелом је углавном наступао у условима без подмазивања, и за случај подмазивања уљем, нарочито за промене притиска са опадајућим трендом у почетном делу хода клизања. Истовремено, запажено је повећано стварање налепнина на узорцима од Al легуре. Убрзано стварање налепнина примећено је код виших вредности притиска, чак и на површинама контактних елемената мање храпавости (полиране површине).

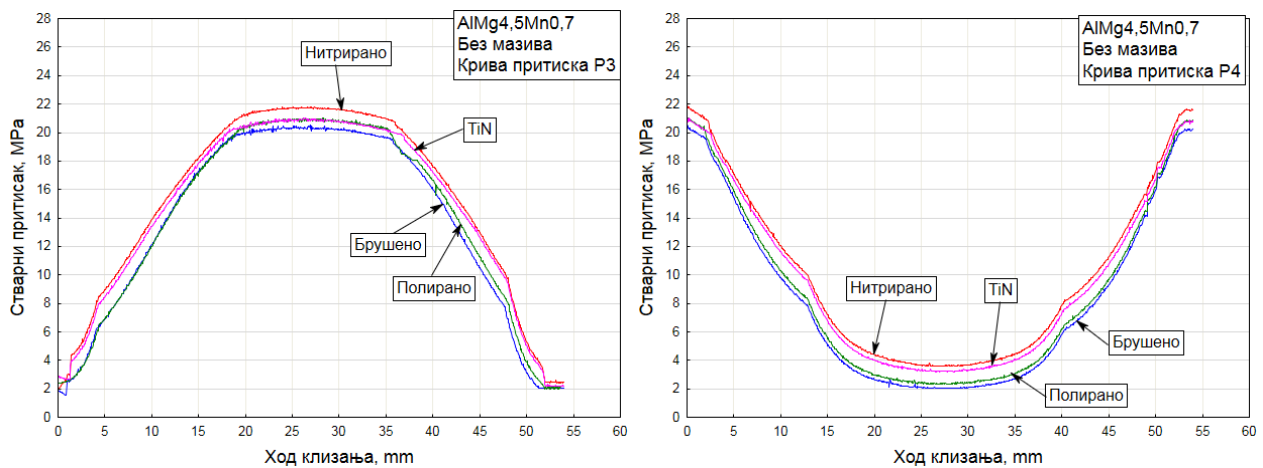
7.3.3.1. Зависности притисака од хода при сувим контактним површинама

Код услова клизања без мазива добијени су дијаграми стварног притиска који веома подсећају на дијаграме претходна два материјала. Затезање узорака је било заступљено код површина са TiN превлаком и нитрираних површина (притисак P1, сл. 7.45). Прелом није наступио, због добрих својстава пластичности алуминијума, али се лим значајно издужио. Код притиска P2 (сл. 7.45), криве се у већој мери поклапају, што је резултат постепеног задавања притиска.



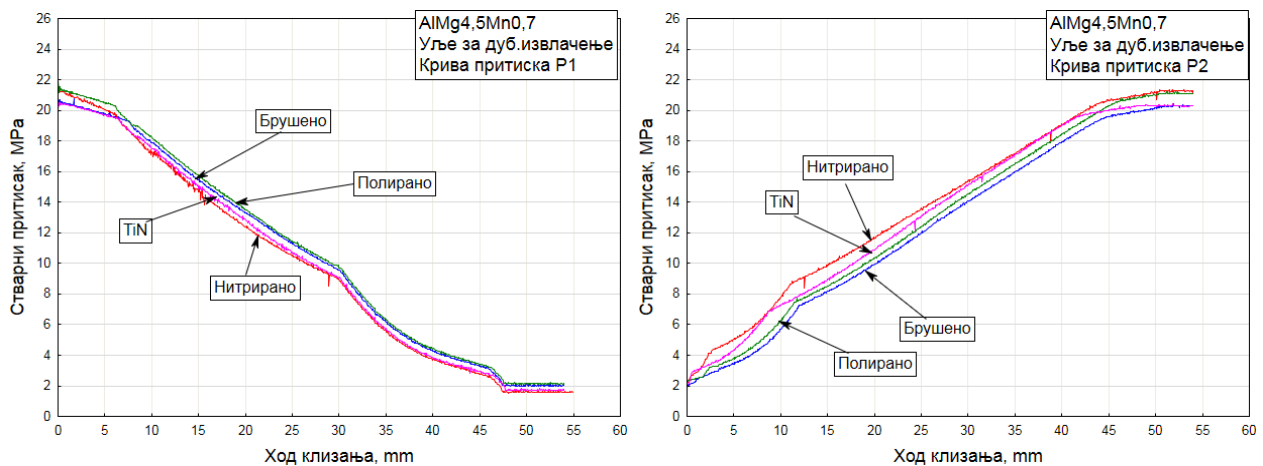
Слика 7.45 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Код притисака P3 и P4 (сл. 7.46) највише вредности су код површина које имају највише вредности параметара храпавости: TiN превлака и нитриране површине.



Слика 7.46 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

7.3.3.2. Зависности притисака од хода применом уља за дубоко извлачење

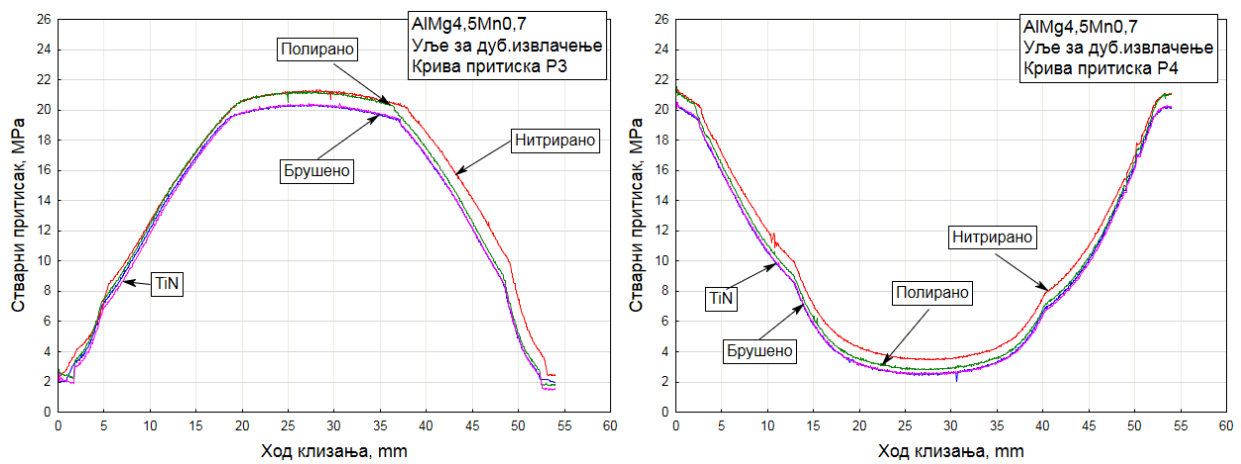


Слика 7.47 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Уље за дубоко извлачење, коришћено за подмазивање узорака од Al лима, дало је веома добре резултате. Криве притиска су веома уједначене, а затезање узорака проузроковано лошим условима клизања било је присутно углавном код опадајућих карактеристика, где су присутне високе вредности притиска на самом почетку хода. То су дијаграми стварног притиска P1 (сл. 7.47), P5 (сл. 7.49) и константна вредност P10 (сл. 7.50). Упркос отежаним условима клизања и затезању узорака, криве стварног притиска у контакту за поједине површине се у већој мери поклапају (слике 7.49 и 7.50).

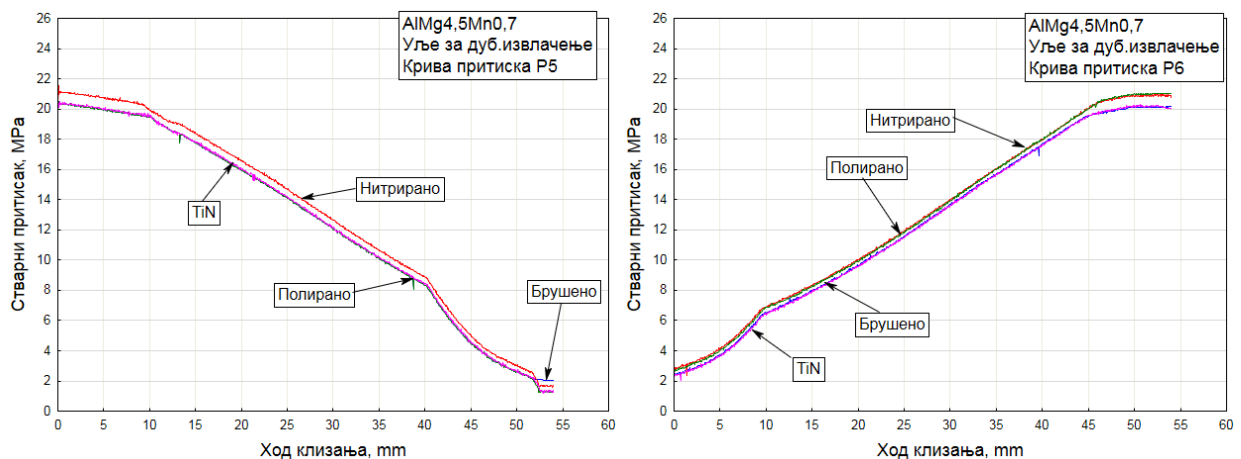
Нешто више вредности стварног притиска, код комбиноване растуће-опадајуће промене P3 (сл. 7.48) присутне су код нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида. Повишени притисак прате повећане вредности вучне силе за промену P3 и поменуте површине (сл. 7.78) и знатно су више у односу на криве за полиране и брушене површине.

На дијаграму промене P4 (сл. 7.48) највише вредности притиска достигнуте су за нитриране површине, што је на дијаграму вучне силе (притисак P4, сл. 7.78) приказано пиком који упућује на затезање узорка.

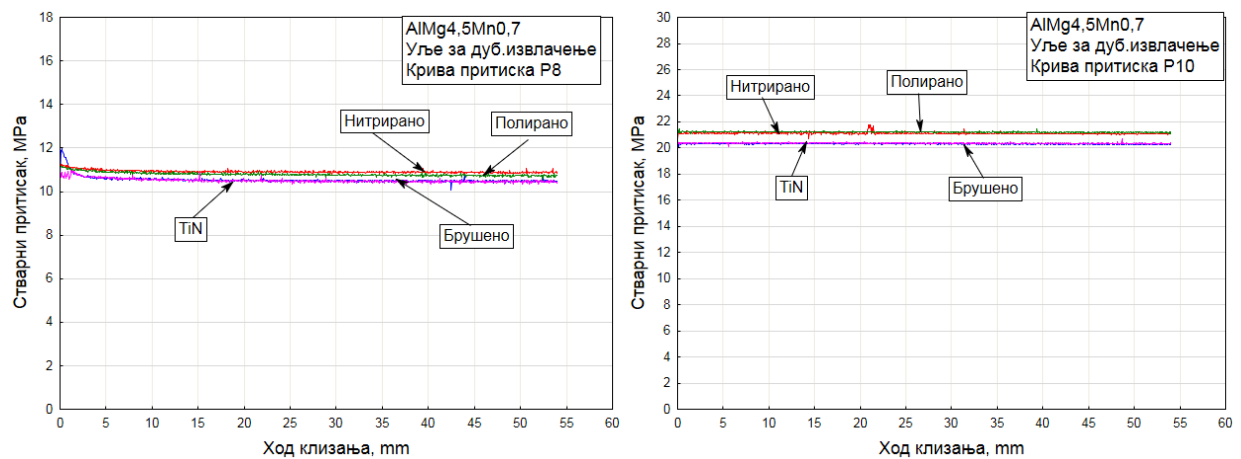


Слика 7.48 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Код дијаграма притиска P5 и P6 (сл. 7.49) криве стварног притиска се поклапају у већој мери осим за нитриране површине, где су достигнуте максималне вредности. Пораст стварног притиска код промене P5 је директна последица затезања код нитрираних површина, док је прелом наступио за време вучења између површина са превлаком од титан-нитрида. Више пута се показало да нитриране површине и TiN превлака нису добра комбинација са опадајућим променама притиска (P1, P5, делимично и P4).



Слика 7.49 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

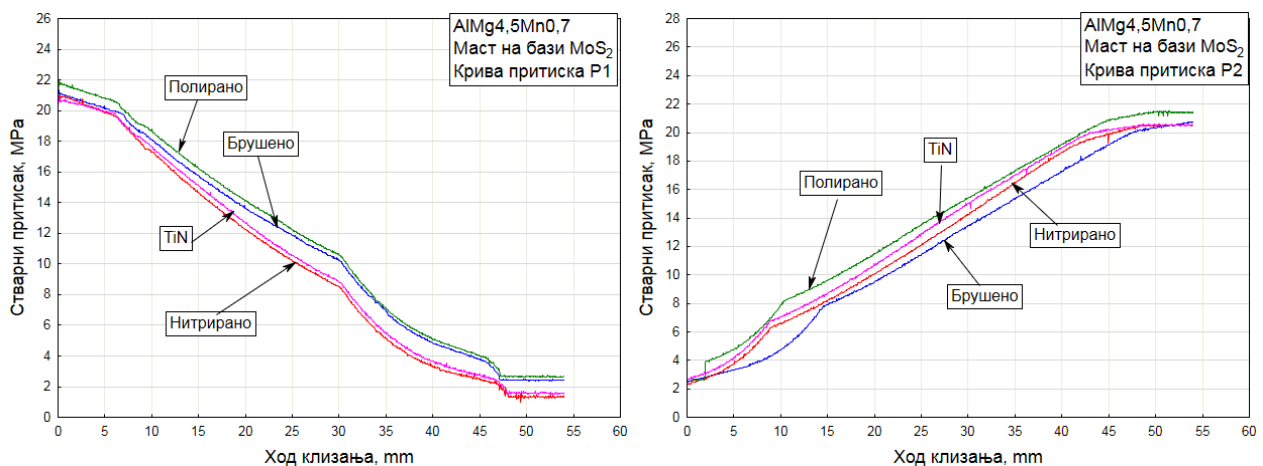


Слика 7.50 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Код константних вредности P8 и P10 (сл. 7.50), као и до сада, триболошки услови у контакту одређују успешност процеса вучења и евентуално повећање стварног притиска. Високи притисак (крива P10) од 20 МПа и повећана храпавост на превлаци од титан-нитрида, услед стварања налепљених слојева, доводе до повећања затежућег напона и прелома узорка, док ове појаве нису наступиле код нижег константног притиска P8 (10 МПа).

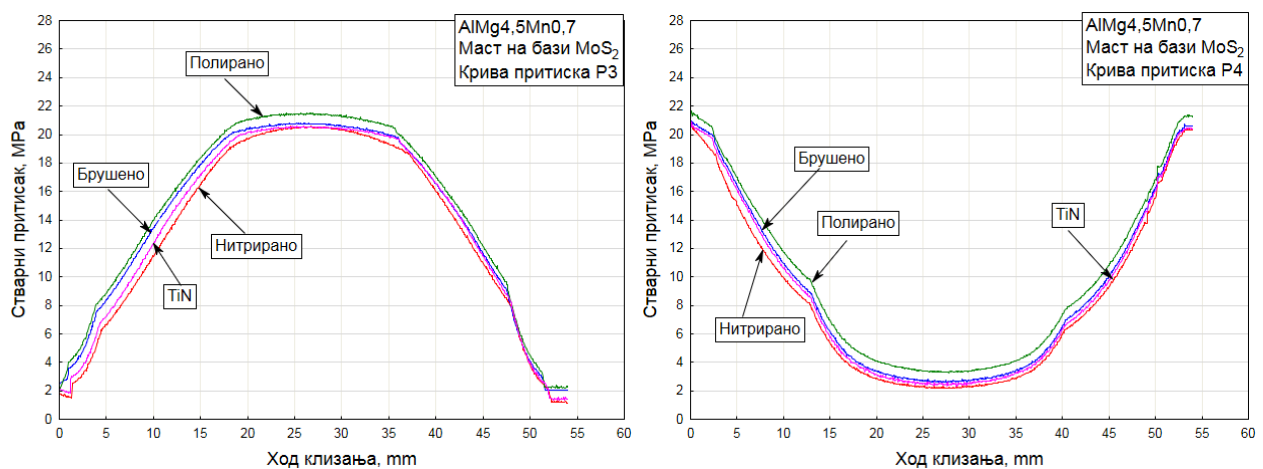
7.3.3.3. Зависности притисака од хода приликом примене мазице на бази MoS_2

Дијаграми на сликама од 7.51 до 7.54 односе се на криве стварног притиска у контакту за четири типа контактних површина, за узорке лима од Al легуре и приликом примене мазице на бази молибден-дисулфида. Анализирајући све дијаграме при датим условима, приметно је повећање стварних притисака у контакту нарочито за полиране површине. Поред тога, дијаграми вучних сила, имају знатно повишене вредности добијене провлачењем између полираних површина (слике 7.81 до 7.84), иако су се приликом примене мазице на бази MoS_2 и веома глатких површина (ниска храпавост) очекивале најмање вредности. Напротив, код полираних површина највише су и вредности притисака, вучних сила и коефицијената трења од свих примењених типова контактних површина.



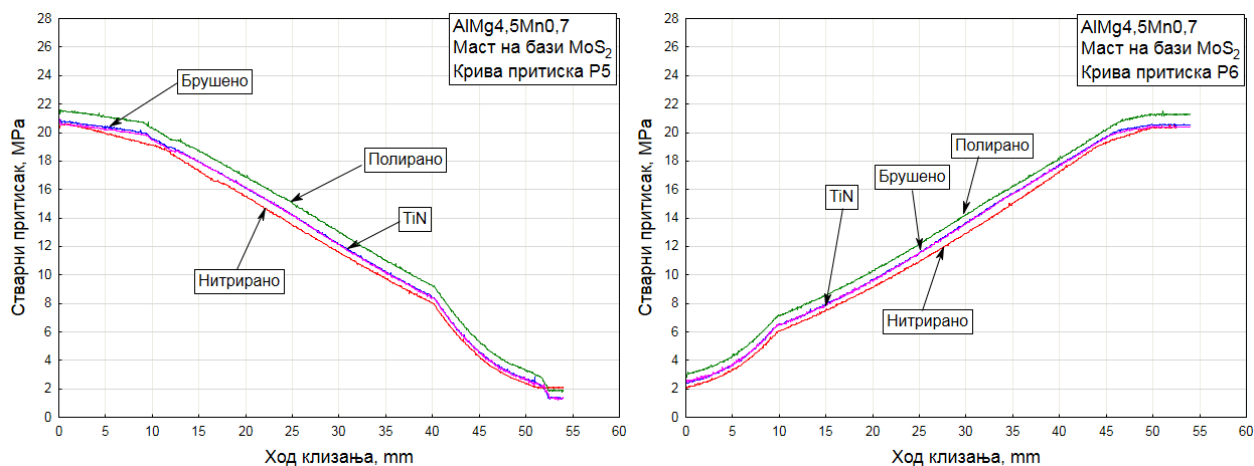
Слика 7.51 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, мазица масти на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Вишеструким понављањем на допунским узорцима лима и свеукупном анализом, дошло се до могућег тумачења да комбинација мазице на бази MoS_2 и полираних површина мале храпавости доводи до истискивања мазице из контактне зоне под дејством притиска у контакту.

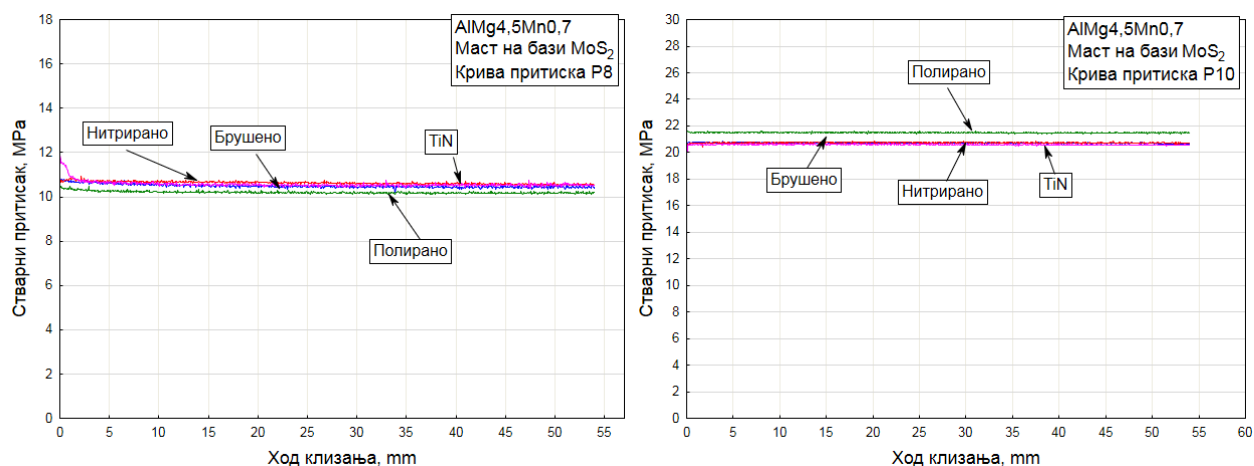


Слика 7.52 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, мазица масти на бази MoS_2 , крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Код осталих површина, одређена количина мазива је била присутна (због веће храпавости) на изменљивим контактним елементима, захваљујући довољно израженим врховима неравина на површинама. Код полираних површина, мазиво на бази молибден-дисулфида је готово увек било истиснуто далеко ван контактне зоне. У таквим условима клизања са недовољном количином мазива био је присутан допунски проблем стварања налепљених слојева мекшег алуминијума на тврђе површине изменљивих контактних елемената.



Слика 7.53 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)



Слика 7.54 Зависности контактних притисака од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS_2 , константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

У поглављу 7.3 приказан је врло велики број дијаграма стварних притисака у контакту (слике 7.25 до 7.54). Добијени су за различите услове у контакту (мазиво, материјал лима, тип површина контактних елемената), за променљиве зависности притисака, као и за константне вредности притисака. Циљ приказа великог броја сличних дијаграма јесте провера поузданости коришћене апаратуре. Сличност у тренду дијаграма за сваку функцију притиска и константну вредност при различитим условима у контакту је јасно изражена и упућује на добру поузданост оригиналног компјутеризованог уређаја за провлачење трака лима између равних контактних површина. Мале разлике у положају кривих за сваку промену притиска потичу од променљивих контактних услова, што је потпуно очекивано. На основу оваквог теста поузданости, закључује се да апаратура веома успешно реализује триболошки модел клизања лима између равних контактних површина задавањем променљивог притиска у контакту, што отвара могућност њене примене и код осталих триболошких модела (нпр. модел клизања са затезним ребром). Поред стварних притисака, мерена су и вучне силе. Ове две променљиве величине су довољне за израчунавање коефицијената трења.

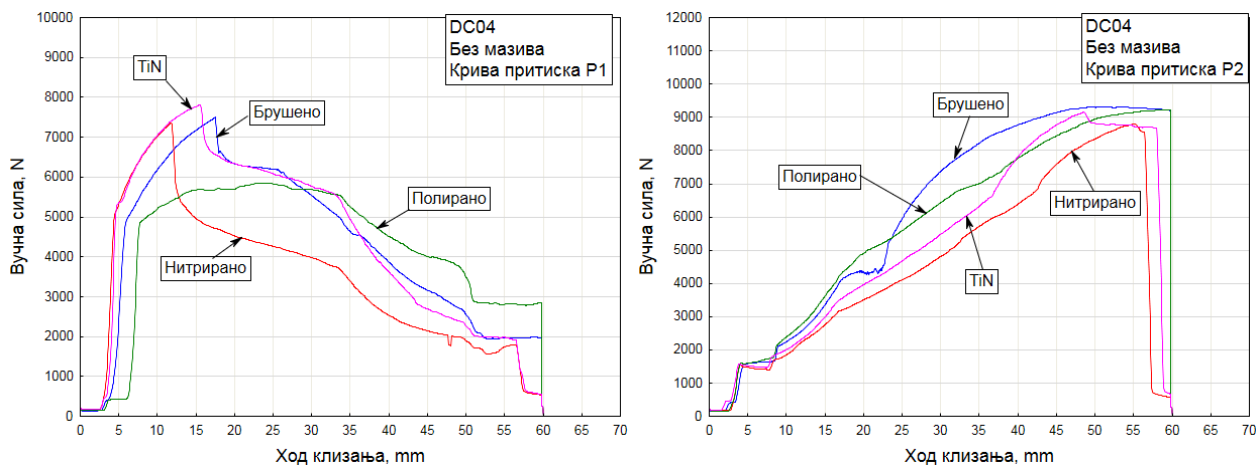
7.4. Дијаграмске зависности вучних сила од хода

С обзиром на концепцију и план експерименталних испитивања, изложених у поглављу 6, због обимности нису изведене све могуће варијанте функционалних зависности притисака и контактних услова. Реализоване су карактеристичне варијанте довољне да се сагледају обухваћени утицаји. За све три врсте материјала лима, истраживања су обављена варирањем четири типа контактних површина као и три контактна стања између њих и лима, са сувим (претходно одмашћеним) површинама и подмазаним (претходно одмашћеним а затим равномерно подмазаним) контактним површинама. Коришћена мазива су уље за дубоко извлачење и мазива маст на бази молибден–дисулфида. При истим условима добијени су и претходно приказани дијаграми стварних контактних притисака у поглављу 7.3.

7.4.1. Резултати за челични лим без прелаче (DC04)

7.4.1.1. Зависности вучних сила од хода при сувим контактним површинама

У склопу ових истраживања реализоване су различите комбинације могућих утицаја променљивих контактних притисака при сувим контактним површинама. Приказане су само карактеристичне зависности које су довољне да се илуструје значај ових утицаја на процес клизања тј. вучних сила узорака лима. Важно је уочити у којој мери се карактер промена вучних сила поклапа са трендом задате промене функције притиска (силе држања F_N). Може се констатовати да у великом броју случајева карактер промена вучних сила прати тренд промена функција притисака. То практично значи да сила има очекивани карактер сходно промени притиска, тј. растући, опадајући, опадајуће-растући и тсл. То је присутно код већине промена вучних сила, осим код дијаграма узорака лима који су претрпели прелом. На дијаграмима (слике 7.55 и 7.56) приказане су промене вучних сила применом растућих, опадајућих, растуће-опадајућих зависности контактних притисака и сва четири типа контактних површина у условима клизања без мазива.

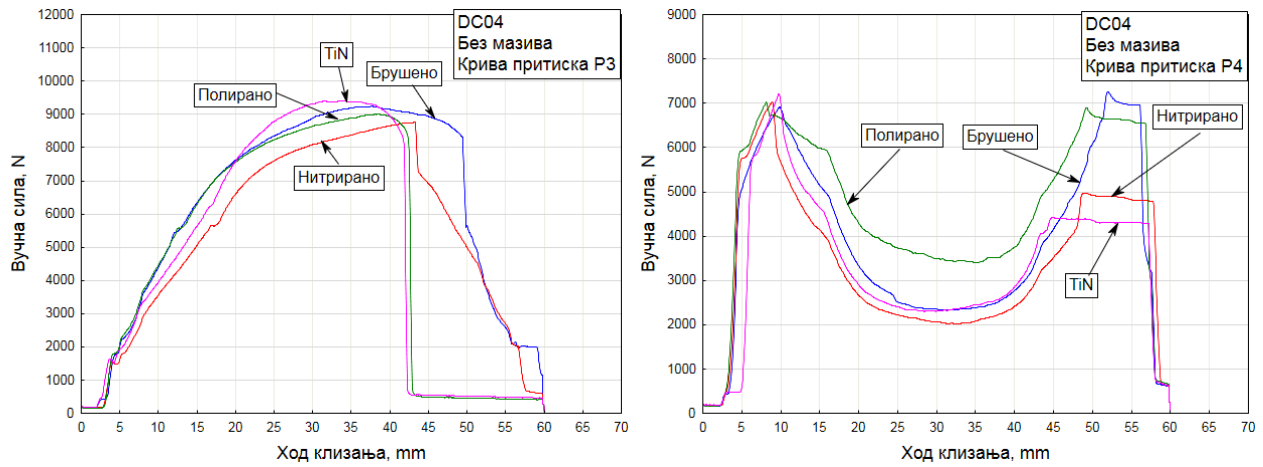


Слика 7.55 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Највише вредности вучних сила (преко 9000 N) достигнуте су у условима без подмазивања. У таквим условима присутно је затезање и издуживање епрувета при високим вредностима стварних притисака у контакту. Углавном је почетни део хода критични момент када настаје затезање код опадајуће промене P1 (сл. 7.55) и опадајуће-растуће промене P4 (сл. 7.56). Пошто крива P4 има стрмију промену и интензивније опадање вредности притиска до средине хода од промене P1, период затезања неупоредиво краће траје код промене P4. Код промене P1 затезање услед високих почетних притисака је било присутно за све случајеве осим код полираних површина. Код криве P3 (сл. 7.56) било је присутно затезање узорака код свих типова површина контактних елемената услед интензивних пораста притисака у првом делу хода, а у два случаја је дошло и до прелома траке лима. Код промене P2 (сл. 7.55) затезање је било присутно само код брушених површина.

Захваљујући постепеном и благом порасту притиска P2 током целог хода, процес клизања код осталих типова површина, текао је успешно до краја хода, без присутних деформација (издужења).

Иако нема практични значај, истраживање процеса вучења без подмазивања корисно је ради разумевања утицаја промена притисака на вучне силе и уопште процес провлачења.

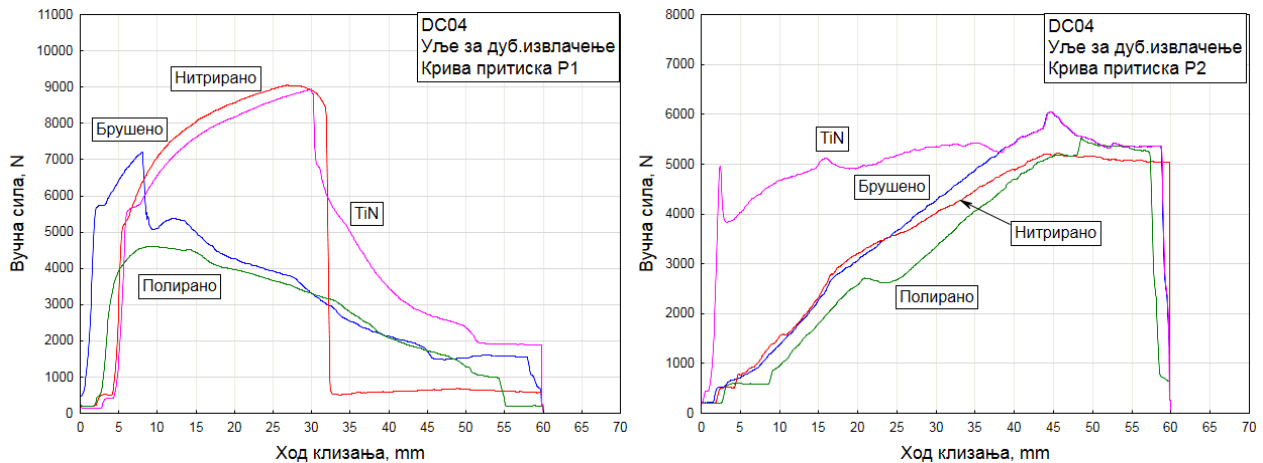


Слика 7.56 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Код дијаграма вучних сила за случај контакта без мазива примењене су четири функционалне промене притиска. Као што је напоменуто, очекивало се да карактери вучних сила одговарају тренду одговарајуће промене притиска. То је углавном остварено код промена P1, P2 и P4, док код промене P3 то није био случај. Реч је о промени која има растуће-оппадајући карактер. Може се сматрати да до половине хода промене вучних сила прати тренд промене притиска P3, а онда на средини хода долази до повећања интензитета затежућег напона који доводи до разарања структуре лима. Карактер промена вучних сила добијених за промене P1 и P2 потпуно су очекиване и у складу са опадајућим, тј. растућим трендом поменутих промена притисака.

7.4.1.2. Зависности вучних сила од хода применом уља за дубоко извлачење

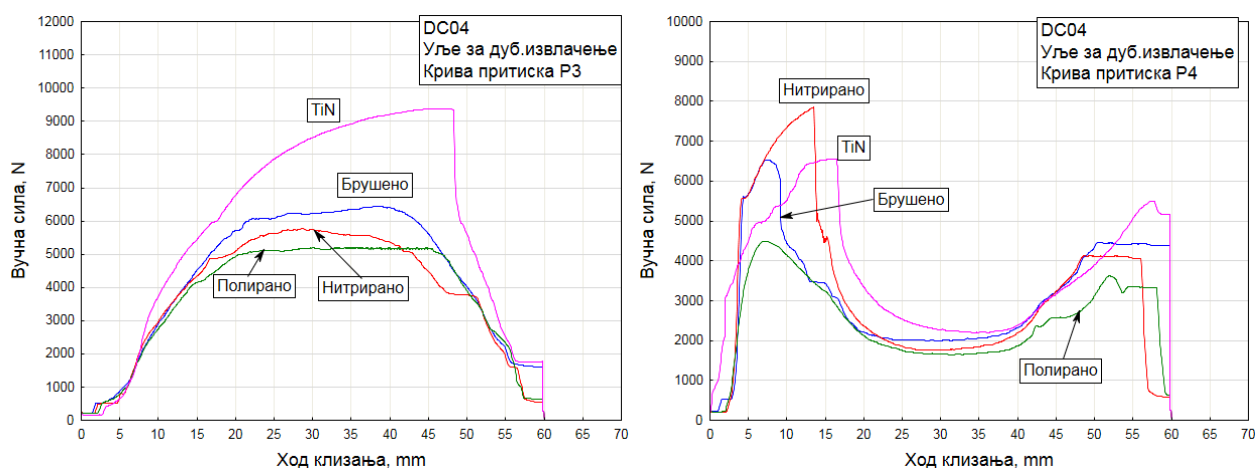
Комбинација високих почетних вредности опадајуће промене притиска P1 (сл. 7.57) и веће храпавости нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида, доводе до виших интензитета затежућих напона трака лима, отежаног клизања и до високих вредности вучних сила. При томе су добијене зависности вучних сила потпуно другачије од тренда задате промене P1. Вучна сила је нешто већа и код брушених површина за исту промену, али само на почетку хода, где достиже највећу вредност од 7000 N. Најмања вредност вучних сила достигнута је код полираних површина, од око 4700 N, при чему је добијен опадајући тренд који веома подсећа на функцију P1.



Слика 7.57 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

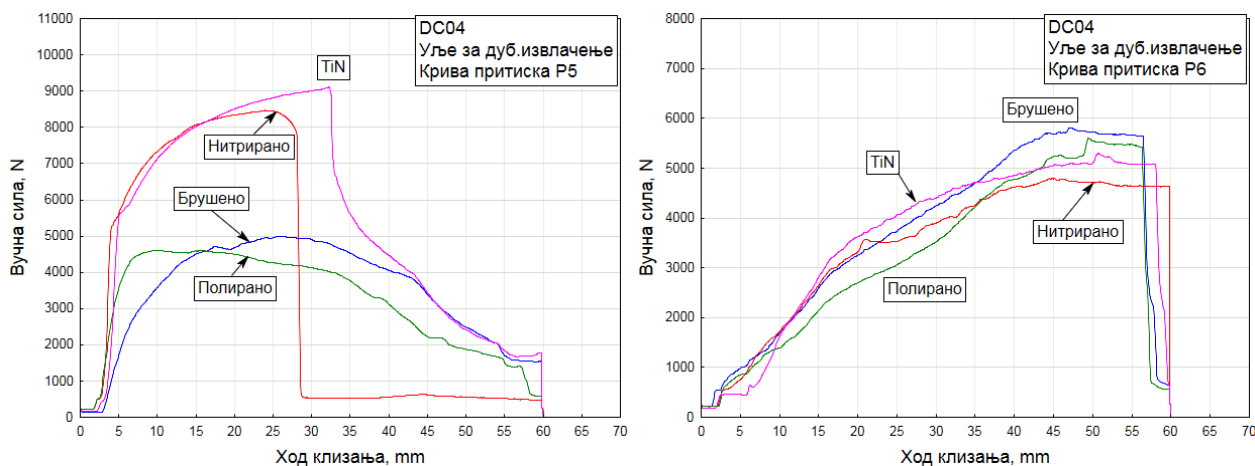
Код растуће промене P2, приметне су доста ниже вредности вучних сила у односу на промену P1, због постепеног задавања притиска. Из тог разлога су добијени дијаграми вучних сила са растућим трендом, сходно промени P2, код већине површина. Код површине са превлаком од титан-нитрида, услед лошијих услова у контакту, дошло је до пораста затежућег напона, па је добијен дијаграм нешто другачијег тренда. И у овом случају применом полираних површина, остварује се најнижа вредност вучне силе.

Релативно брзи пораст контактнoг притиска растуће-опадајуће промене P3 (сл. 7.58), до половине хода у комбинацији са високим вредностима параметара храпавости превлаке од титан-нитрида, довео је до деформисања траке лима и великог пораста вучних сила. У том случају дијаграми вучних сила постају дијаграми затезања. Међутим код осталих контактних површина са мањом храпавошћу, уље за дубоко извлачење показало се као погодно из аспекта завршетка процеса без пораста неповољног затежућег напона, тј. без деформисања траке лима. Дијаграми вучних сила су растуће-опадајућег карактера, као и промена притиска P3. Минимална вредност вучне силе уочена је и, у овом случају, код полираних површина (око 5000 N), док је највећа код брушених (око 6500 N). Висока вредност контактнoг притиска промене P4 (сл. 7.58) доводи до повећања затежућег напона трака лима за све типове контактних површина осим код полираних. С обзиром на то да је у првој половини хода ова промена стрмо опадајућа, пораст затежућег напона је изражен релативно кратко, да би се потом процес нормално наставио до краја хода.



Слика 7.58 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

С обзиром на то да су линеарне промене притиска (сл. 7.59) P5 и P6 сличне (по растућем односно опадајућем карактеру) променама P1 и P2, није тешко закључити и да су расподеле вучних сила веома подударне.

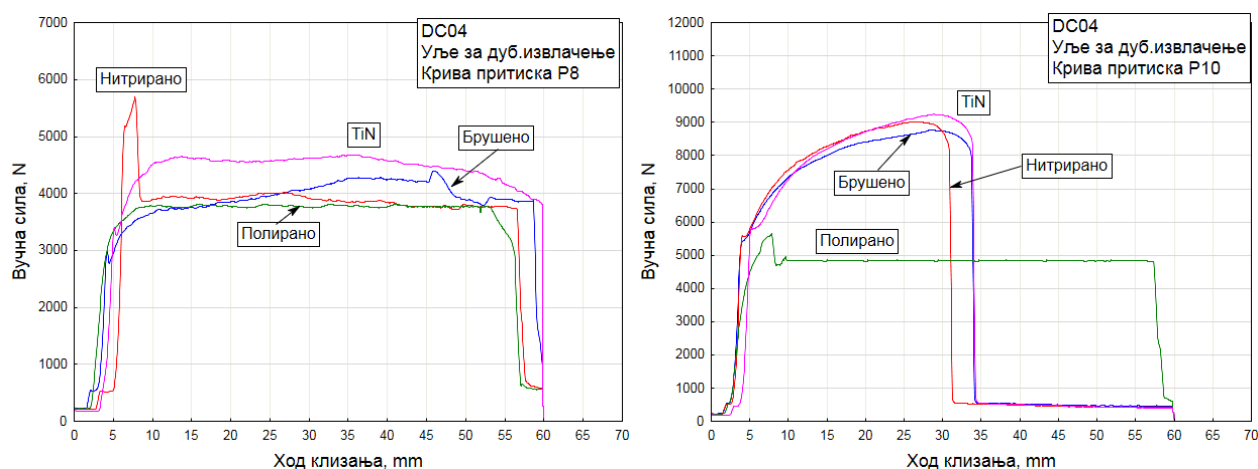


Слика 7.59 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

И код промене P5 као и код P1 (сл. 7. 57) при истим условима присутан је пораст затежућег напона код површина са превлаком од титан-нитрида, који у случају нитрираних површина достиже критичну вредност и доводи до прелома. Једина разлика је код брушених површина, где су вредности вучних сила код промене P5 значајно мање у односу на P1.

Код промене P6 (7.59) за превлаку од титан-нитрида добијене су мање вредности вучних сила у односу на промену P2 (сл. 7.57). Дијаграми вучних сила за остале површине клизних елемената су готово идентичне као код промене P2 и прате растући тренд промене притиска P6. Ради подсећања, промена P2 је експоненцијалног, а промена P6 линеарног типа, међутим разлике у трендовима дијаграма вучних сила су релативно мале (слике 7.57 и 7.59).

На слици 7.60 приказане су зависности вучних сила за константе вредности притисака P8 и P10 (10 МПа и 20 МПа респективно). Доминантан је утицај нижег притиска у контакту (P8), где су најниже вредности вучних сила остварене код полираних површина, а највеће код превлаке од титан-нитрида. Супротно томе, на другој слици, код притиска P10, јасно је уочљив утицај високог притиска у контакту, који је довео до пораста затежућег напона и прелома узорака у свим случајевима осим код полираних површина. Јасно је да храпавост површина има пресудан утицај на повећање интензитета затежућег напона и у том смислу успешност процеса.



Слика 7.60 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево) и константни притисак P10 (десно)

Код свих примењених промена притисака, као и код две константне вредности, максимална вредност вучне силе код полираних површина достиже 5000 N. При томе су се процеси успешно одвијали, без деформисања трака лима, чак и при високим почетним вредностима притисака у првом делу хода опадајућих промена. На основу овога је лако закључити да је погодна примена уља за дубоко извлачење са свим променама притисака и полираних површина изменљивих контактних елемената.

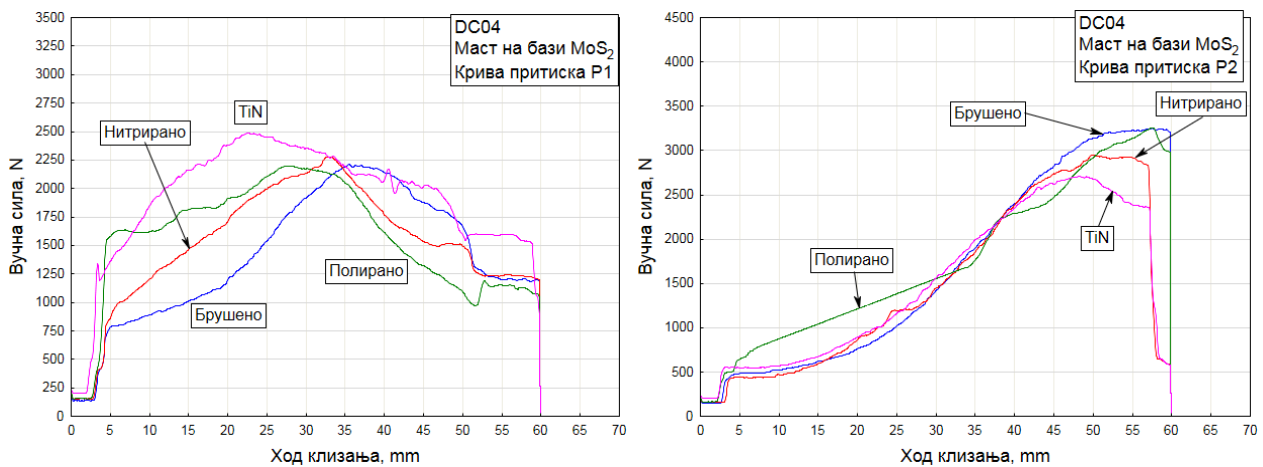
Поред тога, битно је истаћи у којој мери се задата промена притиска (нормална сила држања) преноси на вучну силу (тј. силу трења)? Пораст интензитета затежућег напона (услед неповољних услова у контакту) утиче на карактер дијаграма вучне силе и битно га мења у односу на очекивани тренд дат одговарајућом променом притиска. Код опадајућих промена (P1, P5) дијаграми вучних сила на почетку хода се у одређеној мери разликују од карактера задате функционалне промене притиска. Разлика је утолико израженија уколико су неповољнији услови у контакту. Са побољшањем услова клизања добијају се мање вредности вучних сила, а тиме и добијени дијаграми имају тренд који више подсећа на карактер задате промене. Дијаграми вучних сила добијени задавањем растућих промена притиска (P2 и P6) се у већој мери поклапају са поменутима функцијама притисака у односу на опадајуће промене. Овде је реч о постепеном задавању притиска (од најниже вредности на почетку хода), па промена вучне силе прати промену притиска без пораста неповољног затежућег напона на већем делу хода. Код комбинованих опадајуће-растућих и растуће-опадајућих промена (P3 и P4), дијаграми вучних сила се могу разликовати од карактера задатих промена притисака. Делови дијаграма вучних сила где су разлике присутне јесу на местима највиших вредности притиска (на средини хода, код промене P3; на почетку односно на крају хода код промене P4). Разлике у односу на очекивани тренд се могу ублажити избором погодних услова у контакту. Код константних притисака P8 и P10, на већем делу хода добијају се дијаграми код којих

су присутне занемарљиве разлике у вредностима притисака. Углавном потичу од грешака при мерењу (обрада сигнала, филтрирање шумава, А/D конверзија и тсл.).

Анализом дијаграма вучних сила закључује се да је могуће у реалном процесу, променом силе држања (притиска на држачу) и избором контактних услова, управљати трењем и процесом клизања лима између равних контактних површина (зона обода лима). Поузданост експерименталне апаратуре је већ истакнута анализом дијаграма стварних контактних притисака у поглављу 7.3. Експерименталном апаратуром може се такође са довољном поузданошћу остваривати променљива сила држања (притисак на држачу), у зависности од примењених услова у контакту. Избором одговарајуће промене притиска, храпавости контактних површина, услова подмазивања, може се значајно утицати на карактер вучне силе и тиме смањити могућност појаве неповољног затежућег напона на ободу. На тај начин се дијаграм вучне силе може значајно приближити жељеном, који прати тренд промене притиска. То је значајно из аспекта управљања трењем на ободу, јер је коефицијент трења директно пропорционалан вучној сили код равних контактних површина.

7.4.1.3. Зависности вучних сила од хода приликом примене масти на бази MoS_2

Дијаграми вучних сила за челични лим ознаке DC04 добијени применом масти на бази молибден-дисулфида приказани су сликама 7.61 до 7.64. На смањење вучне силе веома утиче примена масти, у поређењу са уљем за дубоко извлачење за све задате промене притисака.

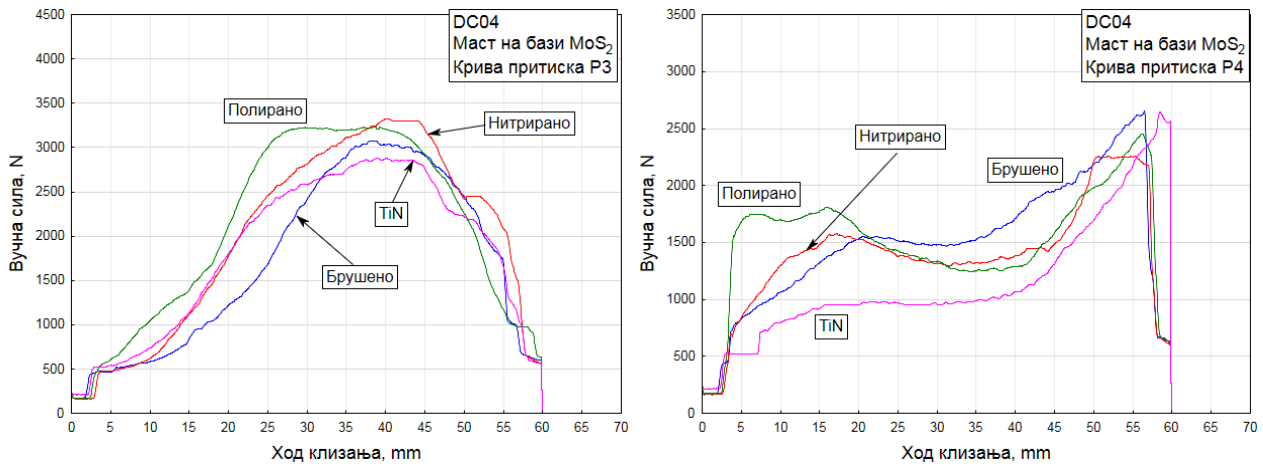


Слика 7.61 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Вредности вучних сила за све типове површина су знатно мање, него што је био случај код подмазивања уљем, а опсег максималних вредности износи од 2500-3500 N. Анализирањем дијаграма свих промена, приметно је повећање вредности вучних сила (F) код полираних контактних површина. О релативно вишим вредностима вучних сила код полираних површина у комбинацији са мазивом машћу на бази молибден-дисулфида, већ је било речи у претходном поглављу, у коме су анализирани дијаграми стварних притисака. Задавањем силе притиска на изменљивим контактним елементима и остваривањем контакта између траке лима и активних контактних површина, у већини случајева доводило је до губитка масти на бази MoS_2 из зоне контакта, због веома глатких (полираних) површина у контакту. Задржавање масти на бази MoS_2 у удубљењима неравнина изражено је код површина веће храпавости, нпр. нитриране или брушене, па и код превлаке од титан-нитрида (слике 7.62, 7.63 и 7.64), што се директно манифестује порастом вучне силе, а касније и порастом коефицијента трења. Вероватно је реч о лошијим условима подмазивања у зони контакта.

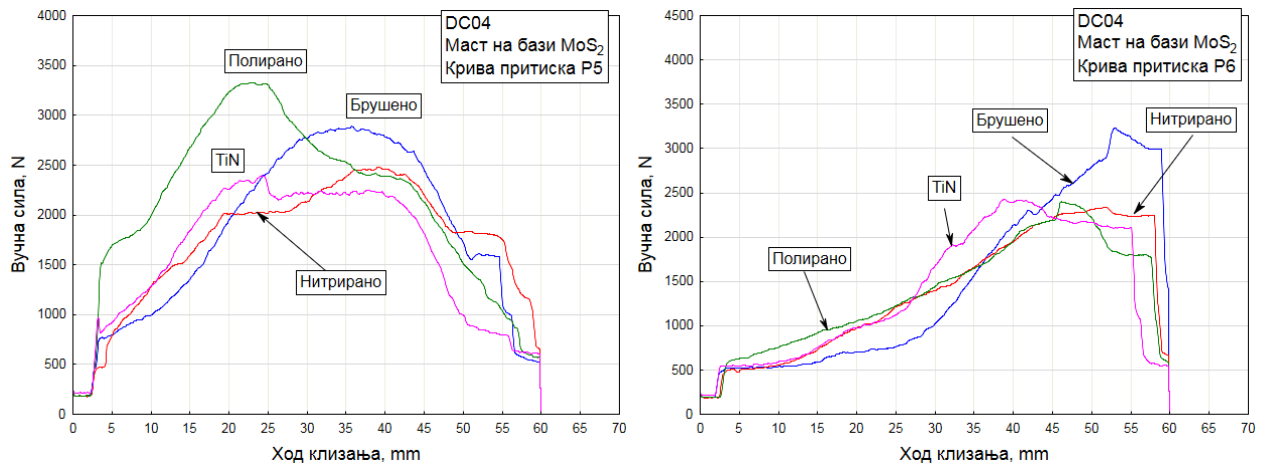
Криве вучних сила имају највише вредности код опадајућих или комбиновано опадајућегорастућих промена притиска (P1, P4, P5, слике 7.61, 7.62 и 7.63 респективно), где долази до задавања највиших вредности притисака на самом почетку хода, а тиме и до истискивања масти са полираних површина. Ова појава је додатно изражена код узорака од алуминијумске легуре, где поред недостатка масти у контакту, долази и до појачане појаве налепнина услед контакта површина лима мање тврдоће са тврдом контактним површинама изменљивих контактних

елемената од алатног челика. Поред тврдоће, присутна је и повећана склоност лимова од алуминијумских легура ка налепљивању честица у односу на челичне лимове.



Слика 7.62 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

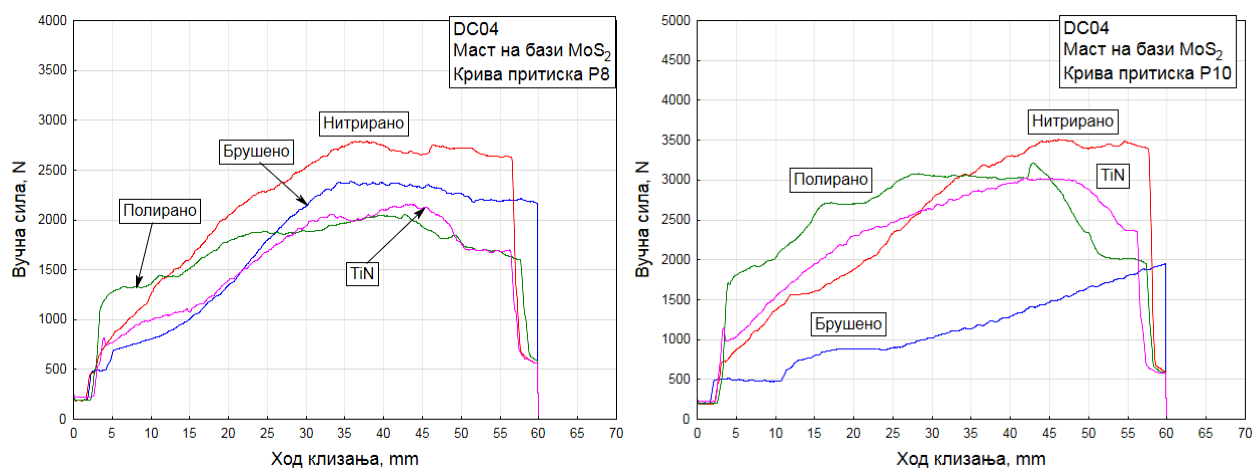
Успешно задржавање мазива на бази MoS₂ у контакту изражено је код површина са превлаком од титан-нитрида (притисак P2 на слици 7.61, притисци P3 и P4 на слици 7.62, притисак P5 на слици 7.63), што није био случај код примене уља. Већа храпавост TiN превлаке има добру способност задржавања мазива у удубљењима неравнина.



Слика 7.63 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

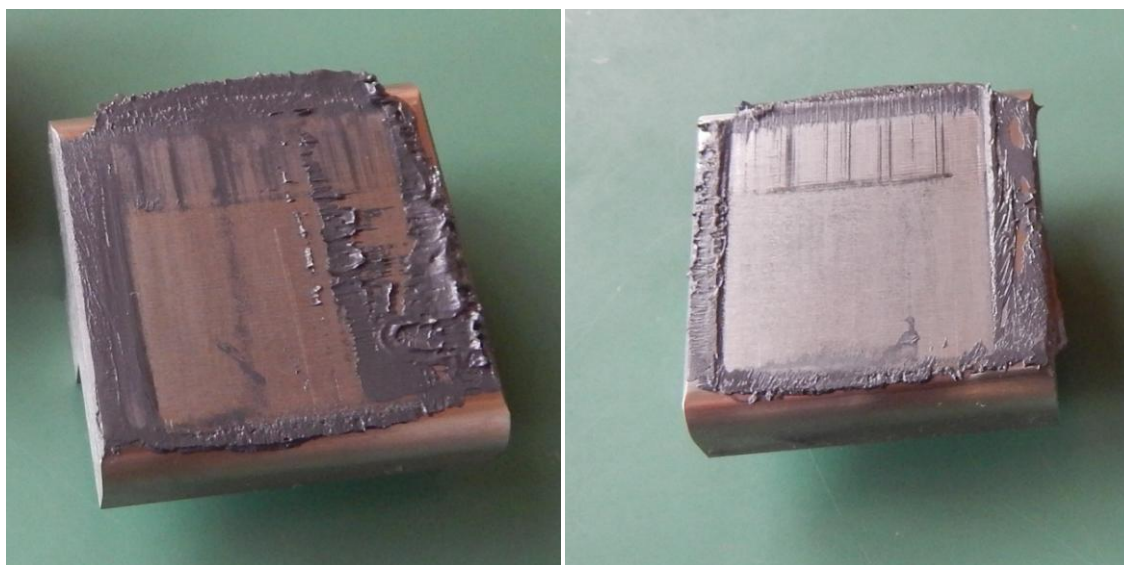
Утицај притиска на задржавање мазива у зони контакта најбоље се одражава код константних зависности притисака P8 и P10 (сл. 7.64). Задавањем ниже вредности притиска P8 (10 MPa) могуће је делимично очување мазивог слоја, што се манифестује преко нешто ниже расподеле вучне силе код полираних површина. Код веће вредности P10 (20 MPa), крива вучне силе за полиране површине је знатно виша него у претходном случају, односно пораст вучне силе је директна последица отежаних услова у контакту и недовољног подмазивања.

У условима примене мазива са бољим подмазујућим својствима, глатке површине алата, са врло ниском површинском храпавошћу, не морају увек бити најбоље решење. Понекад може доћи до губитка мазивог филма у контакту са површинама мање храпавости, јер се мала количина мазива задржава у удубљењима таквих површина. Појава губитка мазива нарочито постаје изражена при већим вредностима контактеног притиска, о чему сведочи фотографски приказ на слици 7.65.



Слика 7.64 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Наредна фотографија изменљивих контактних елемената са полираним површинама, настала је после процеса вучења, применом мазива на бази молибден-дисулфида и две вредности константних притисака P8 и P10 и даје илустрацију утицаја вредности притисака на способност одржавања мазива у контакту код полираних површина. На овом упоредном приказу јасно се види да је већа количина мазива задржана на стварној контактної површини код ниже вредности константног притиска P8 (сл. 7.65а).



а)

б)

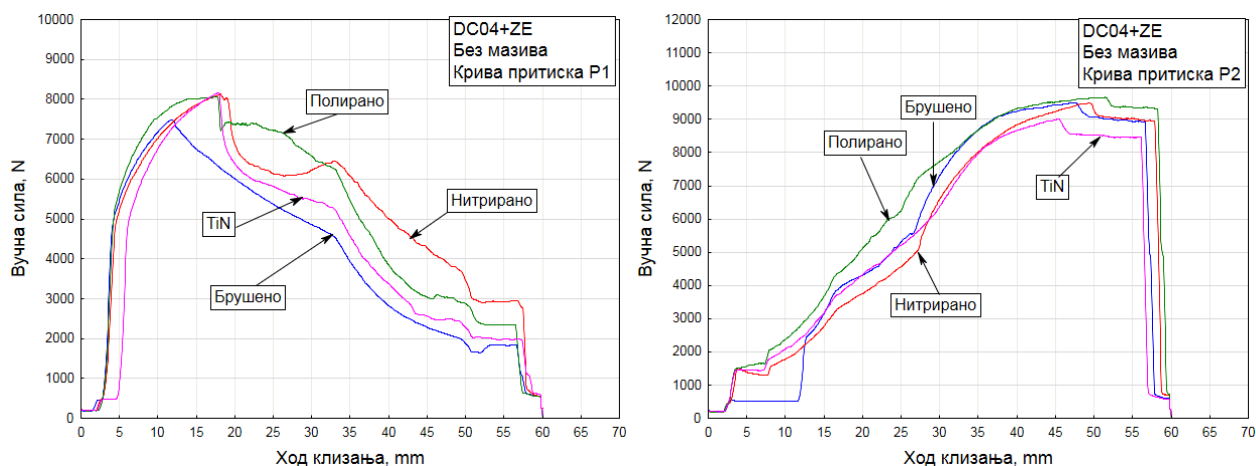
Слика 7.65 Фотографски приказ клизног елемента са полираним површинама после процеса провлачења при константном притиску: а) 10 MPa (P8) и б) 20 MPa (P10)

7.4.2. Резултати за поцинковани челични лим (DC04+ZE)

Дијаграмске зависности вучних сила добијене за поцинковани нискоугљенични челични лим (DC04+ZE) веома су сличне зависностима које су добијене за исти материјал без превлаке цинка DC04 које су детаљно изложене и прокоментарисане у претходном поглављу. У овом поглављу биће дат преглед зависности вучних сила добијених при истим условима као и за претходни материјал. Том приликом ће бити дат коментар само одређених приказа, а остали се неће посебно разматрати због сличности са претходним материјалом.

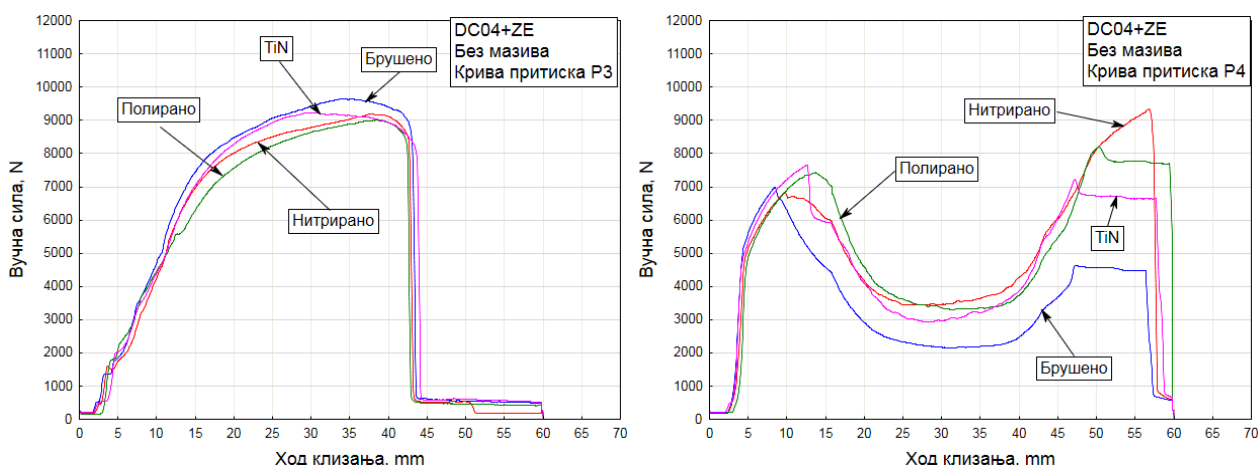
7.4.2.1. Зависности вучних сила од хода при сувим контактним површинама

Утицај појаве налепнина највише је изражен у условима без подмазивања. Иако је овде реч о истом основном материјалу DC04 (уз превлаку од цинка), присутно је стварање налепнина на површини клизног елемента, нарочито при високим контактним притисцима. Нарочито повећање вучне силе регистровано је код полираних површина (сл. 7.66, P1, P2), што није био случај код класичног челичног лима. За притисак P1 у свим случајевима је долазило до повећања затежућег напона у првом делу хода, због повишених вредности притисака, али ипак до прелома није дошло.



Слика 7.66 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Последица брзог пораста притиска код растуће-оппадајуће функције P3 (сл. 7.67) и лоших триболошких услова у контакту резултирала је порастом затежућег напона и преломом траке лима применом сва четири типа површина контактних елемената. Код промене P4 пораст затежућег напона је био краткотрајан у првом делу хода. Код свих типова контактних површина за промену P4 није наступио прелом. У овом случају (сл. 7.67, P4) карактер промене је доминантно утицајан на успешност процеса.



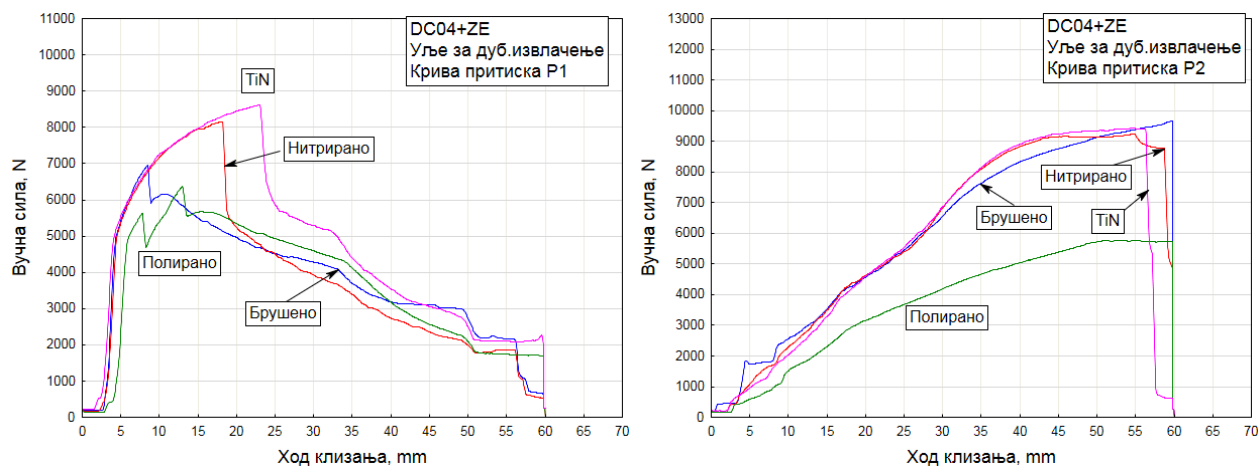
Слика 7.67 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

7.4.2.2. Зависности вучних сила од хода применом уља за дубоко извлачење

Код ове врсте лима са једнострано нанесеном превлаком, било је заступљено релативно често уклањање налепљених слојева цинка са контактних површина клизних елемената. Та појава је итекако присутна у производним условима. Да би се добиле реалне зависности вучних сила, за свако

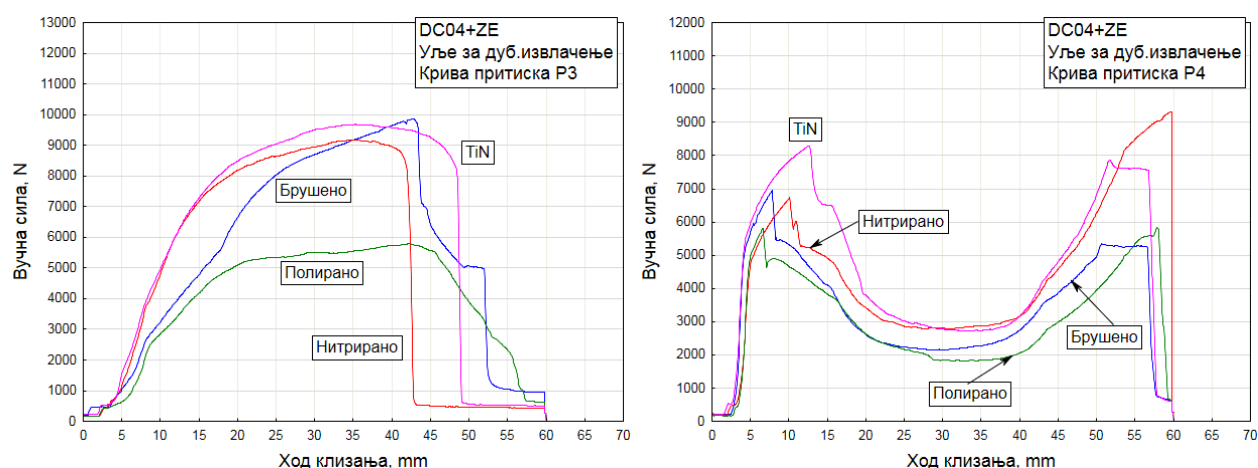
ново испитивање површине морају бити потпуно одмашћене и очишћене од налепљених слојева метала, пре доношења слоја мазива. Једино тако добијени резултати могу се сматрати релевантним.

Већ је било говора, на почетку поглавља, како се велики део зависности вучних сила за челични лим без превлаке поклапају са зависностима код челичног лима са превлаком. То је нарочито изражено код дијаграмских зависности P1 и P2 (сл. 7.68), осим што код лима са превлаком (DC04+ZE) није дошло до прелома у случају површина са TiN превлаком за притисак P1. Код оба материјала лима, применом полираних површина, постиже се најмања вредност вучне силе. И у овом случају се показало да је комбинација полираних контактних површина и уља за дубоко извлачење и готово свих промена притиска веома погодна.



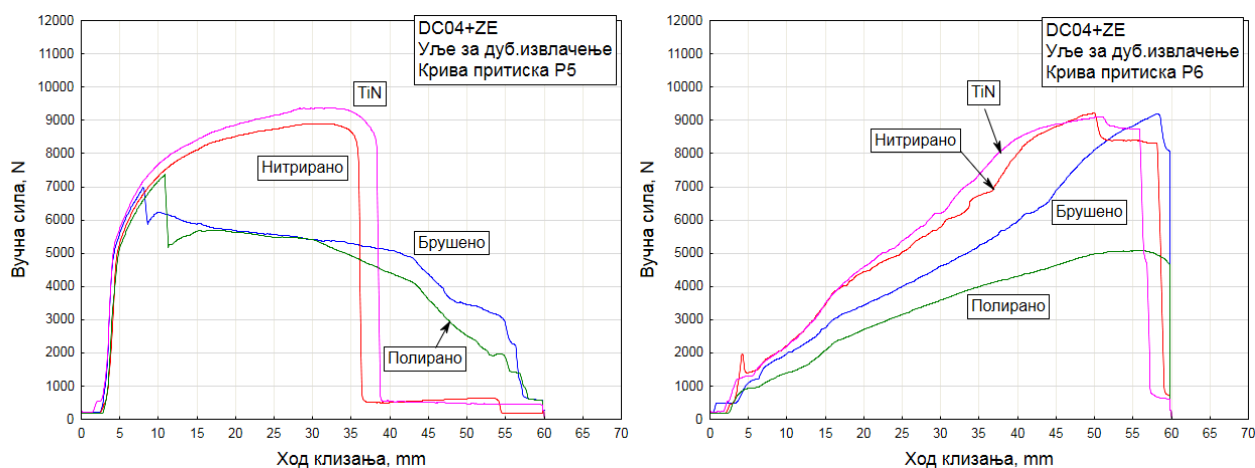
Слика 7.68 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Нешто лошија својства подмазивања уља у односу на мазиво на бази MoS₂ се готово увек испољавају код промене притиска P3 (сл. 7.69). То је додатно изражено код контактних елемената повишене храпавости (TiN превлака, нитриране и брушене површине). У сва три случаја је дошло до прелома трака лима. Код полираних површина, вучна сила има релативно ниску вредност, као што је био случај код класичног челичног лима без превлаке. Код криве P4, дијаграми вучних сила за све типове површина су исти као и код челичног лима без превлаке, о чему је већ говорено.

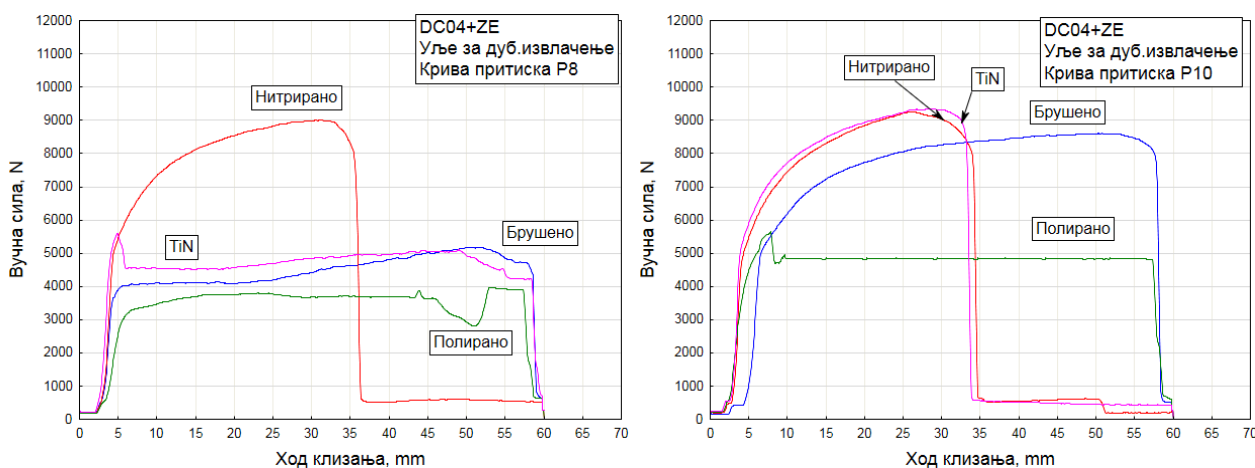


Слика 7.69 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Дијаграми на сликама 7.70 и 7.71 су још један пример добре поновљивости резултата за оба челична лима. Сличне расподеле су већ добијене код материјала DC04 (слике 7.59 и 7.60).



Слика 7.70 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)



Слика 7.71 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Комбинација уља за дубоко извлачење и површина веће храпавости, у извесним случајевима, неповољно утиче на услове клизања, а често доводи и до повећања затежућег напона, што у крајњем случају може довести и до прелома траке лима. То је посебно изражено код опадајућих промена притисака P1, P5 и код растуће-опадајуће промене P3. Реч је о задавању највиших вредности притисака (≈ 20 МПа, P1, P5) на самом почетку процеса вучења, што у комбинацији са површинама веће храпавости и течног мазива (уља) доводи до отежаног клизања а често и до немогућности одвијања процеса. Услед тога расте неповољни затежући напон. Код површина мање храпавости, тај проблем је нешто мање изражен. Додатни проблем код опадајућих промена је и појачана појава стварања налепљених слојева цинка на клизним елементима. То је логична последица, високог почетног притиска, веће храпавости површина и уља.

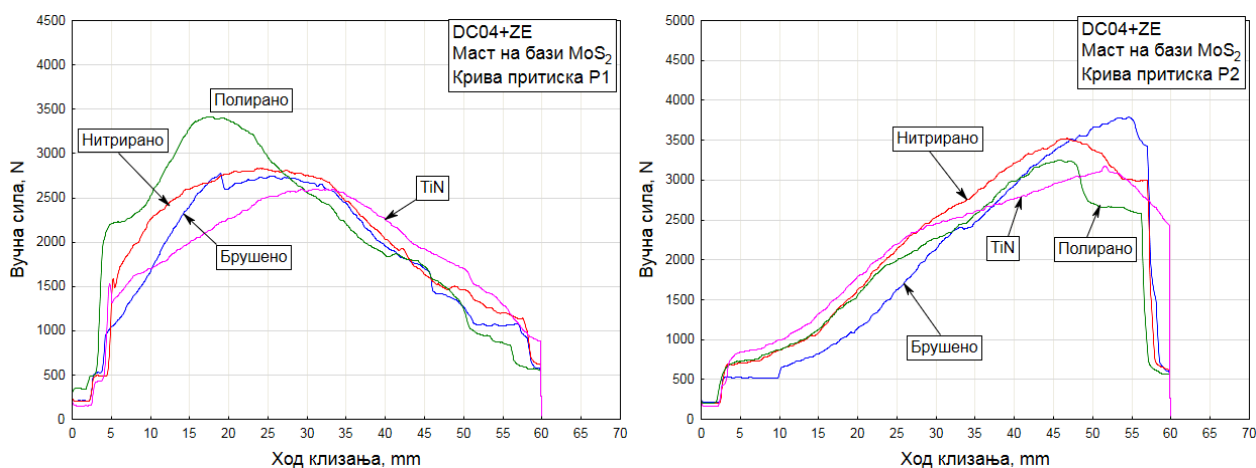
Међутим, када су у питању експоненцијално растућа промена притиска P2 и линеарно растућа промена P6, процес клизања почиње са најнижом вредношћу притиска и постепено се повећава за време вучења. То веома повољно утиче на услове клизања, чак и код површина веће храпавости (TiN превлака и нитриране површине). У условима постепеног задавања притиска појава налепнина је у мањој мери изражена, осим на самом крају хода, где су присутне највише вредности притисака, али тај моменат је краткотрајан.

Код комбиноване растуће-опадајуће функције P3, притисци су највиши на средини хода, па се релативно брзи пораст од најнижег до највишег притиска одвија за половину укупног хода. У таквим условима брзог пораста притиска, расте и интензитет затежућег напона, нарочито код површина веће храпавости. Супротно томе, код опадајуће промене P4, притисак релативно брзо опада до половине хода, тако да је повећање затежућег напона присутно на самом почетку за кратку дужину хода, после чега процес вучења несметано тече чак и за случај клизања између нитрираних

површина и превлаке од титан-нитрида. Карактер функционалне промене притиска (растући, опадајући и комбиновани) веома утиче на процес вучења, док услови у контакту могу само додатно допринети том утицају.

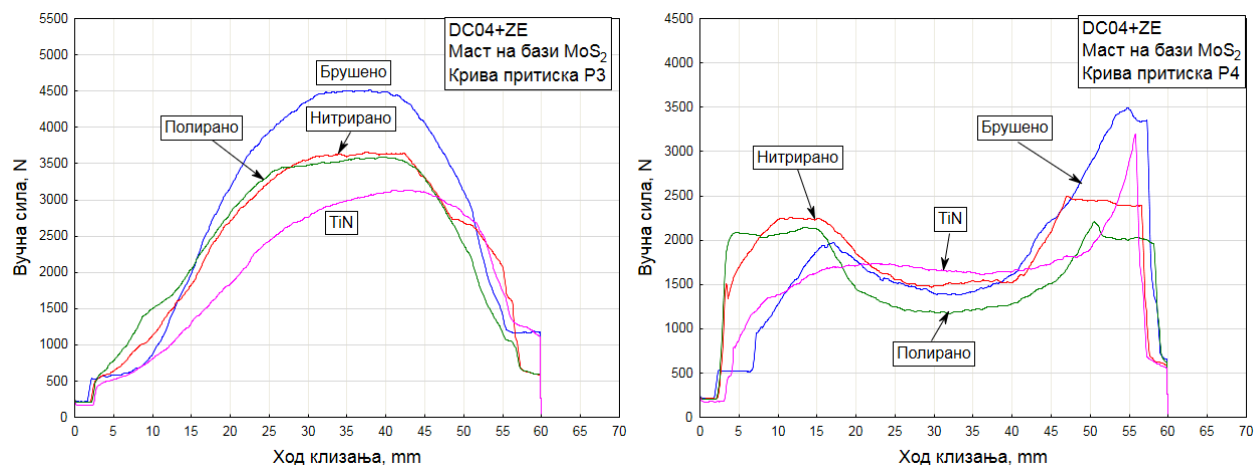
7.4.2.3. Зависности вучних сила од хода применом мазиве масти на бази MoS_2

О неповољној комбинацији мазива на бази молибден-дисулфида и полираних контактних површина изменљивих клизних елемената већ је указивано више пута. На те неповољне услове додатни утицај има превлака од цинка на челичном лиму. Стварање налепљених слојева цинка је посебно присутно код опадајућих промена притиска, услед високих вредности притисака на почетку хода. Генерално, опадајуће промене притисака су веома неповољне из аспекта стварања налепљених слојева, за разлику од растућих. Стварање налепнина је присутно готово код свих типова површина, али је посебно изражено код полираних површина у комбинацији са мазивом на бази MoS_2 и опадајућим променама P1 (сл. 7.72) и P5 (сл. 7.74). Резултат тога је пораст вредности вучних сила. Неповољни утицај карактера функционалне промене притиска на стварање налепнина изражен је и код комбиноване промене притиска P3 (сл. 7.73). Најниже вредности вучних сила добијене су применом TiN превлаке код већине промена, захваљујући доброј способности задржавања мазива у удубљењима површинске храповости, чак и при вишим вредностима притисака.



Слика 7.72 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

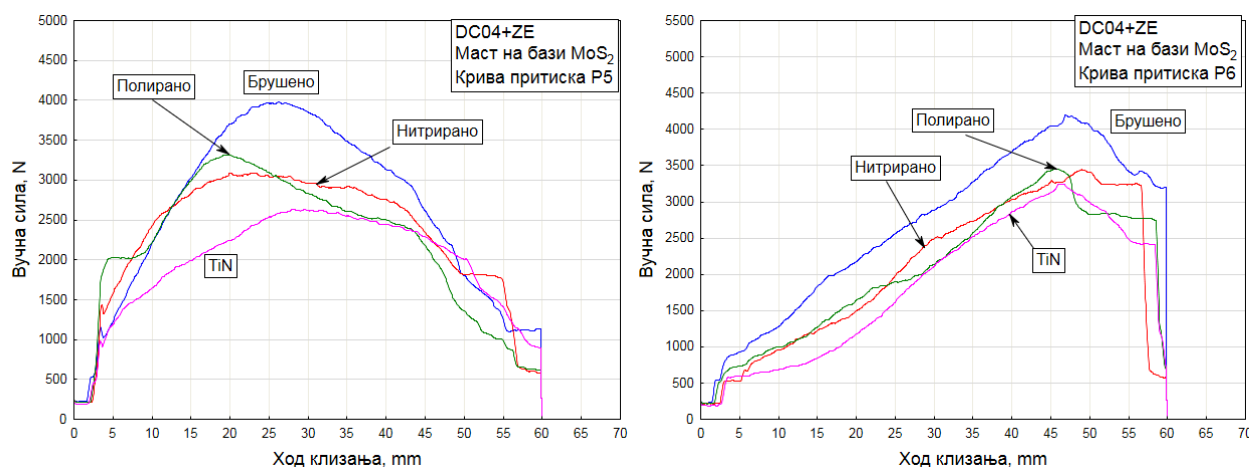
Постепено експоненцијално задавање притисака од најнижих ка највишим вредностима релативно повољно утиче на задржавање мазива у контакту и на вредности вучних сила код полираних површина (притисак P2, сл. 7.72).



Слика 7.73 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

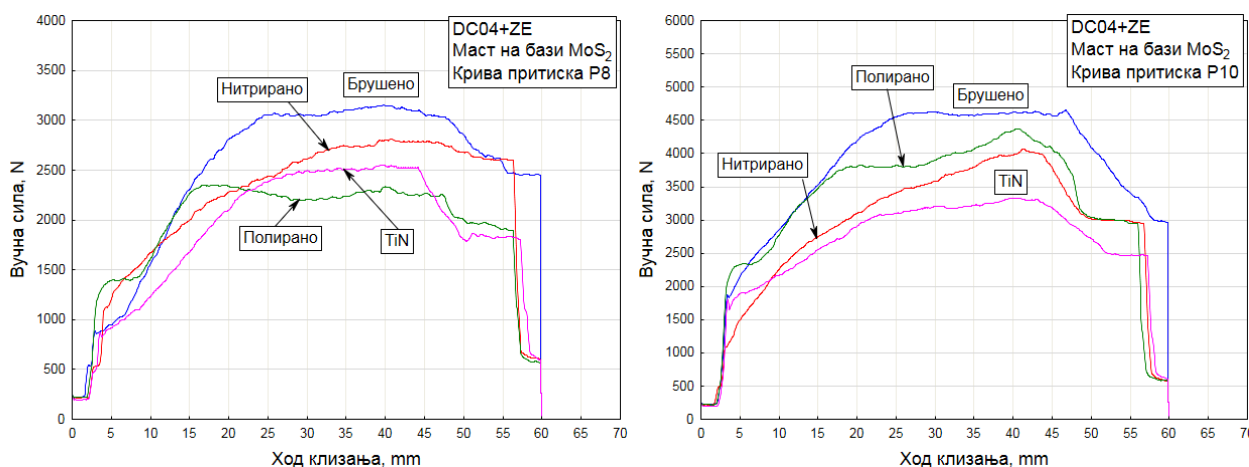
Повећање вредности вучних сила заступљено је и код брушених површина, услед брзог пораста притиска P3 до половине хода и налепљивања слоја цинка (сл. 7.73). Вредности достижу чак и 4500 N, што није био случај код лима без превлаке цинка. И у овом случају се показало да превлака од титан-нитрида има веома добру способност задржавања мазива на бази MoS₂, што се манифестује најнижим вредностима вучних сила. И код криве P4 (сл. 7.73) вредности су нарочито повишене посебно у задњем делу хода, где су заступљене највише вредности притисака. Ниске вредности притиска P4 у средњем делу хода, веома повољно утичу на процес вучења применом полираних површина, јер се услед нижег притиска, већи део мазива задржава у контакту, па је тиме и формирање налепљених слојева успорено.

Код линеарних промена P5 и P6 (сл. 7.74), као и код осталих промена, приметно је да су најниже вредности вучних сила заступљене код површина са превлаком од титан-нитрида. Међутим, веома повољан утицај из аспекта стварања налепљених слојева има промена P6 (сл. 7.74), за разлику од опадајуће промене P5.



Слика 7.74 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

Дијаграми линеарних промена (сл. 7.74) су веома сличног тренда као експоненцијалне промене P1 и P2 (сл. 7.72). Највише вредности заступљене су код брушених површина, код опадајуће P5 и код растуће промене P6. Показало се више пута да полиране и брушене површине имају мању способност задржавања мазива на бази MoS₂, док је код нитрираних површина и TiN превлаке заступљена супротна тенденција. Додатни неповољни утицај на стварање налепљених честица има опадајући тренд линеарне промене P5.



Слика 7.75 Зависности вучних сила од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS₂, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Пораст вредности вучних сила применом константних притисака P8 и P10 (сл. 7.75) је знатно израженији код лима са превлаком, а посебно код P10 (до 4550 N), док је код лима без превлаке

достигао 3500 N, при истом мазиву и за исте површине. Повећање се објашњава појавом налепљених слојева цинка на клизним елементима. Приметно је да су дијаграми вучних сила за константне притиске P8 и P10 променљивог тренда, супротно очекиваној константној вредности. Разлог променљиве вучне силе треба тражити у налепљеним слојевима на клизним елементима, који ремете континуалан процес вучења и сталну вредност вучне силе. Променљив тренд са вишим вредностима вучних сила је посебно изражен код веће вредности притиска P10 (сл. 7.75). Логично је да је налепљивање честица израженије при већем притиску.

Анализирајући дијаграме вучних сила добијене применом уља, може се рећи да опадајуће промене притисака (P1, P5 и комбинована P3) утичу на пораст вредности вучних сила, на појаву налепљених честица и на пораст интензитета затежућег напона. Пораст интензитета затежућег напона је присутнији код подмазивања уљем, при вишим притисцима, а било је заступљено и налепљивање честица (углавном код површина веће храпавости, а нешто мање код брушених и полираних површина). Независно од промене притиска, брушене и полиране површине при подмазивању уљем имају мању склоност ка налепљивању слојева цинка. Затезући напон, чији се интензитет повећавао код опадајућих промена притисака, био је углавном заступљен код нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида. Комбинација која се показала погодном јесте примена растућих промена притисака P2 и P6 (делимично и комбинована промена P4) са полираним и брушеним површинама при подмазивању уљем.

При подмазивању мазивом на бази молибден-дисулфида приметан је изостанак пораста интензитета затежућег напона, чак и код опадајућих промена. Разлог су веома добра својства подмазивања. Захваљујући томе, вредности вучних сила су доста мање у поређењу са дијаграмима добијеним при подмазивању уљем. Негативна појава уочена применом овог мазива је стварање налепљених слојева (налепнина) у комбинацији са површинама мање храпавости (полиране, брушене делимично), што се манифестује порастом вучних сила. Присутна је код свих функционалних промена притисака. Појава налепљених слојева посебно је изражена код опадајућих промена, где на самом почетку хода долази до избацивања мазива из контактне зоне, под дејством високих притисака. Полиране површине имају мања удубљења површинске храпавости, а тиме и мању способност задржавања мазива у контакту, за разлику од нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида. У случају подмазивања мазивом на бази MoS₂ погоднија је примена растућих промена притисака (P2, P6) и комбиноване промене P4, у варијанти са нитрираним површинама и TiN превлаком веће храпавости, због бољег задржавања мазива у контактної зони, чиме се смањује могућност за налепљивање честица цинка.

7.4.3. Резултати за лим од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)

Просечне вредности вучних сила, добијене процесом вучења трака лима од алуминијумске легуре, значајно су ниже од челичног лима без превлаке (DC04) и са превлаком (DC04+ZE). Разлози за то су боља својства пластичности алуминијума, а посебно ниже вредности параметара храпавости ($R_a \approx 0.85 \mu\text{m}$, табела 7.4) у односу на поменуте челичне лимове ($R_a \approx 0.96 \mu\text{m}$ за DC04 и $R_a \approx 1.74 \mu\text{m}$ за DC04+ZE, табела 7.2).

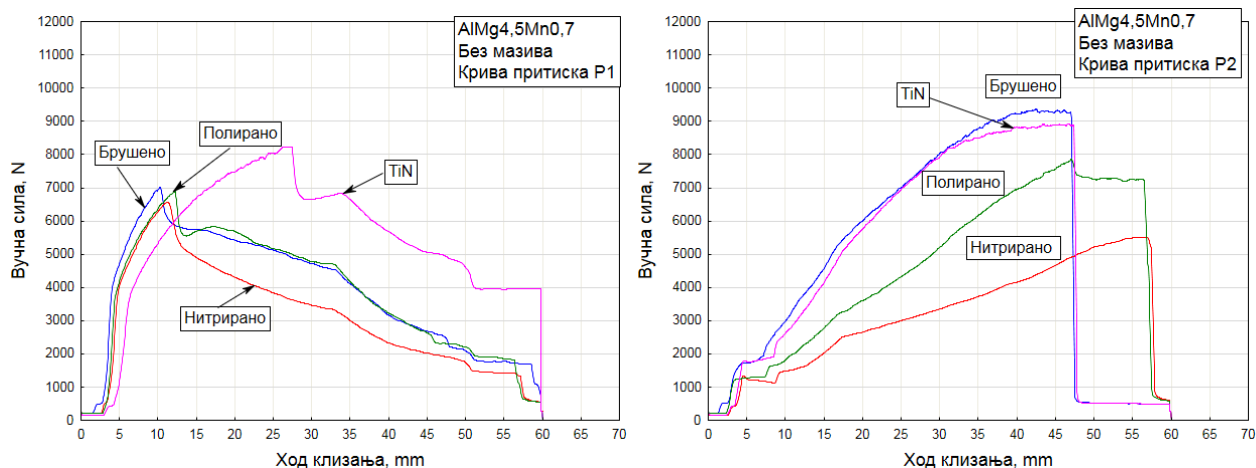
Неповољне околности које утичу на процес вучења лима од Al легуре јесу повећана склоност ка настанку налепљених слојева алуминијума на знатно тврђе контактне површине изменљивих клизних елемената. Та појава је нарочито изражена при вишим интензитетима стварних притисака у контакту, а посебно у условима недовољног и неодговарајућег подмазивања. То је захтевало периодично чишћење контактних површина и њихово полирање, брусним папиром најфиније гранулације.

На сликама од 7.76 до 7.85 приказани су дијаграми вучних сила за узорке лима од Al легуре, за случај без мазива, применом уља за дубоко извлачење и применом мазиве масти на бази молибден-дисулфида. Примењени су потпуно исти услови као и код претходна два материјала лима.

7.4.3.1. Зависности вучних сила од хода при сувим контактним површинама

Отежани услови клизања у контакту без присуства мазива, доводе до пластичног деформисања лима у смеру вучења, у комбинацији са високим почетним вредностима притисака промене P1 (сл. 7.76). С обзиром на опадајућу карактеристику притиска P1, затезање је углавном присутно само у првом делу хода (до 15 mm), после чега процес тече до краја хода. Више вредности вучних сила

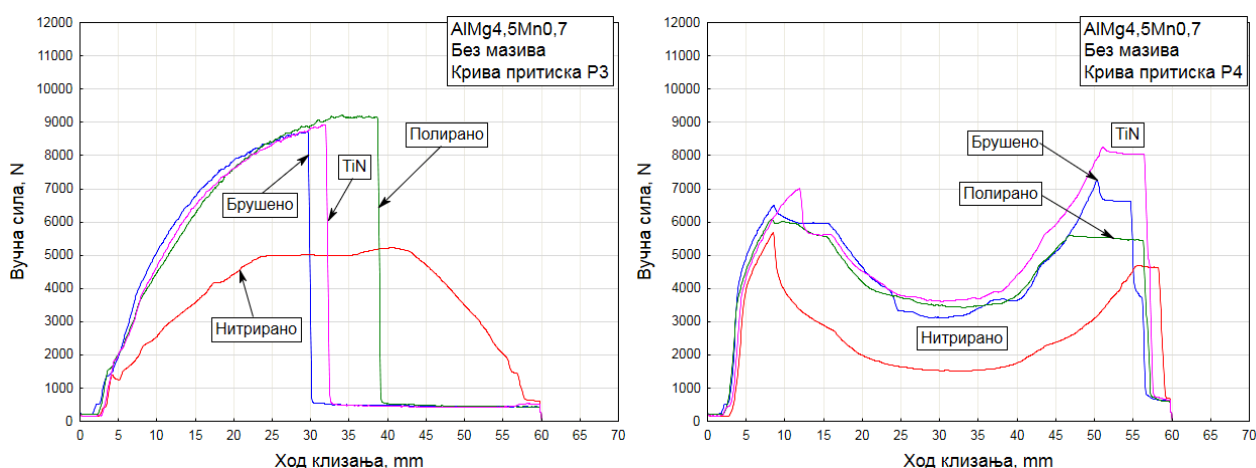
упућују на појаву налепљених слојева, посебно код TiN превлаке. Најниже вредности су заступљене код нитрираних површина, при чему је више пута напоменуто да овај тип површине има најмању склоност ка стварању налепљених слојева. Код притиска P2 је присутно деформисање лима код брушених површина и TiN превлаке (сл. 7.76). Затежање настаје услед неповољних услова у контакту (висока храпавост и одсуство мазива), а после достизања критичне вредности притиска на крају хода, наступа прелом траке лима код поменутих површина. Код полираних и нитрираних површина процес тече без повећања интензитета затежућег напона, при чему су вредности вучних сила веће код полираних површина, због присутних налепљених слојева.



Слика 7.76 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Брзи пораст притиска до половине хода код растуће-оппадајуће промене P3 (сл. 7.77) доводи до деформисања и прелома траке лима за већину контактних површина, осим за нитрирану. Добра отпорност ка налепљивању честица алуминијума је у овом случају дошла до пуног изражаја.

Карактер опадајуће-растуће промене притиска P4 (сл. 7.77) преноси се и на тренд дијаграма вучних сила. Краткотрајно повећање затежућег напона присутно је на самом почетку процеса услед високог притиска, а даљим опадањем притиска до минимума промене P4 не долази до пораста затежућег напона. Поновни пораст затежућег напона настаје при самом крају хода због повишеног притиска. На основу тога се закључује да је тренд промене P4 у потпуности пренет и на дијаграме вучних сила. Мале разлике између дијаграма потичу од разлика у параметрима храпавости контактних површина.



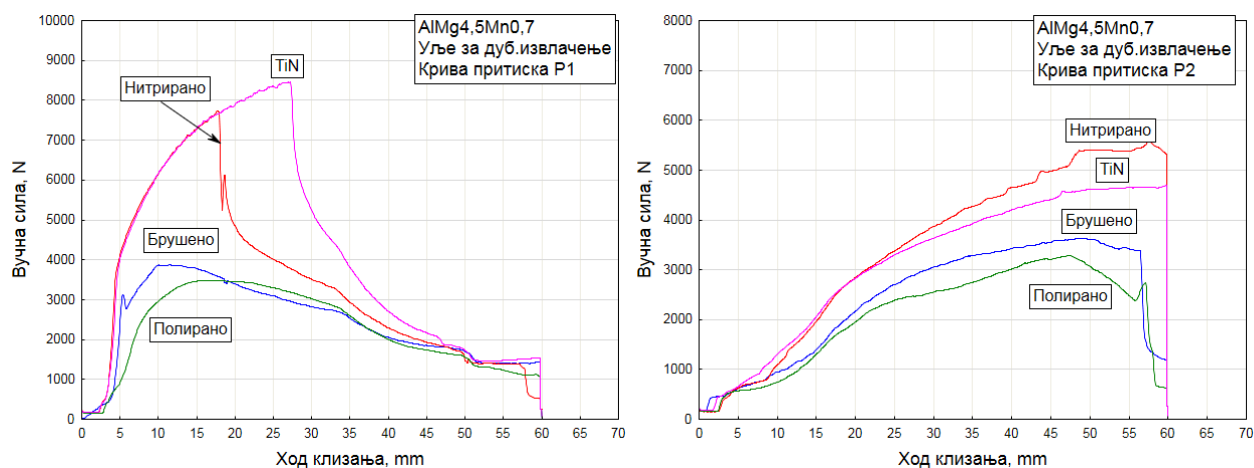
Слика 7.77 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Упоредивањем дијаграма вучних сила за лим од алуминијумске легуре са дијаграмима за челични лим (без превлаке и са превлаком) у условима без подмазивања, може се уочити да се провлачењем алуминијумског лима добијају приметно мање вредности вучних сила. Алуминијум је

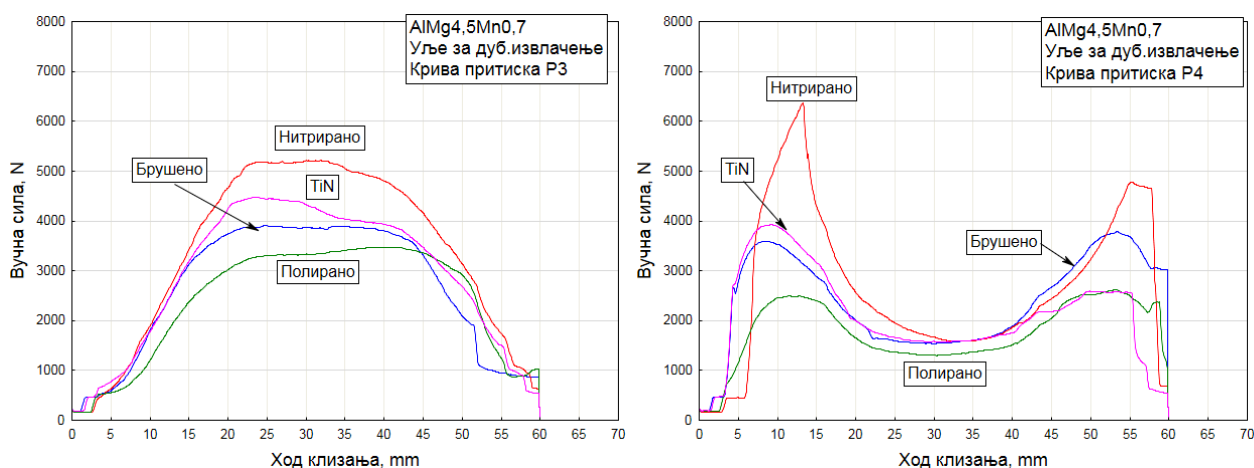
познат као материјал са добрим својствима пластичности, па се то може сматрати предношћу, у извесном смилу, у односу на челичне лимове. Међутим, лимови од алуминијумских легура имају повећану склоност ка налепљивању честица, под дејством виших вредности контактних притисака. То је посебно изражено у условима без подмазивања или недовољног подмазивања. Повишена храпавост површина има такође негативан утицај на стварање налепљених слојева у условима без подмазивања. Разматрајући утицај карактера функционалних промена притисака на пораст интензитета затежућег напона, заједничко је и за алуминијумски и челични лим да опадајуће промене притисака имају неповољан утицај. То су, пре свега, промене P1 и P3. Повољнији утицај из аспекта повећања интензитета затежућег напона, имају промене P2 и P4.

7.4.3.2. Зависности вучних сила од хода применом уља за дубоко извлачење

Дијаграмске зависности вучних сила од хода добијене за лим од Al легуре и применом уља за дубоко извлачење приказане су на сликама од 7.78 до 7.81. Утицај опадајуће промене P1 (сл. 7.78) и висока вредност почетног притиска се манифестују порастом затежућег напона код површина веће храпавости, тј. код нитрираних површина и код TiN превлаке. Такав утицај притиска P1 био је заступљен и код претходна два челична лима. Најниже вредности вучних сила су заступљене код брушених и полираних површина. Ове две површине у комбинацији са уљем за дубоко извлачење нису показале велику склоност ка стварању налепљених слојева, што није био случај код мазиве масти на бази молибден-дисулфида. Код промене P2 доминантан је утицај храпавости површина, па су највише вредности вучних сила код нитрираних површина и TiN превлаке. Генерално, вредности вучних сила за лим од Al легуре су доста ниже у поређењу са челичним лимовима (са и без превлаке) при подмазивању уљем, о чему је већ било речи.



Слика 7.78 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

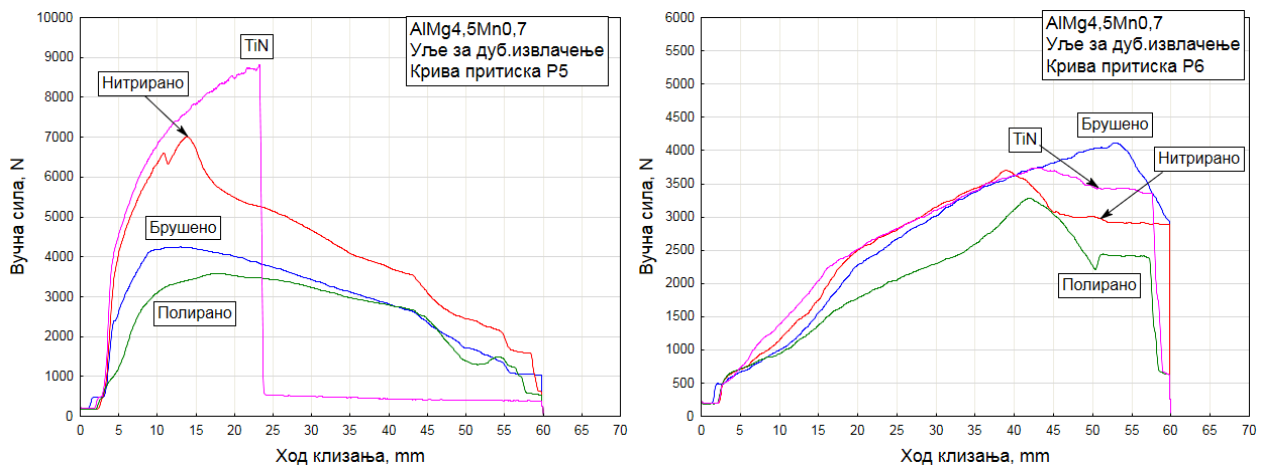


Слика 7.79 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

И код дијаграма вучних сила за промене притисака P3 и P4 (сл. 7.79) ток дијаграма је у складу са карактером промене притиска (опадајуће-растући и растуће-опадајући тренд). На вредност вучне силе највећи утицај има тип површине у контакту, па су највише вредности заступљене као и до сада код нитрираних површина и површина са TiN превлаком. Услед веће храпавости нитриране површине и високе почетне вредности промене притиска P4 (сл. 7.79), на самом почетку хода био је заступљен пораст затежућег напона, све док притисак није релативно брзо опао до вредности која обезбеђује клизање лима.

Анализирањем дијаграма на сликама 7.78 и 7.79, може се закључити да се карактер функционалних промена притисака углавном преноси на тренд дијаграма вучних сила. Одступања код дијаграма вучних сила у односу на промену притиска P1 заснована су на повећању затежућег напона услед високог притиска на почетку хода и лошијих контактних услова. То је заступљено код површина веће храпавости, тј. нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида. Код дијаграма вучних сила где није присутан пораст затежућег напона (брушене и полиране површине, промена P1, сл. 7.78) постоје међусобно фина одступања у тренду, као последица различите храпавости брушених и полираних контактних површина. Тренд промена притисака P2 (сл. 7.78) и P3 (сл. 7.79) је добро пренесен на дијаграме вучних сила. Дијаграми имају приближан тренд, а разлике између вредности вучних сила и положаја дијаграма појединих површина потичу од различитих параметара храпавости. На основу тога, доминира утицај врсте контактних површина на вредности вучних сила. Код промене P4 (сл. 7.79) трендови дијаграма вучних сила су приближни, осим код нитрираних површина, где је присутан пораст интензитета затежућег напона на почетку хода.

Опадајућа линеарна промена притиска P5 (сл. 7.80) даје сличне дијаграмске приказе вучних сила као и експоненцијална опадајућа промена P1 (сл. 7.78).

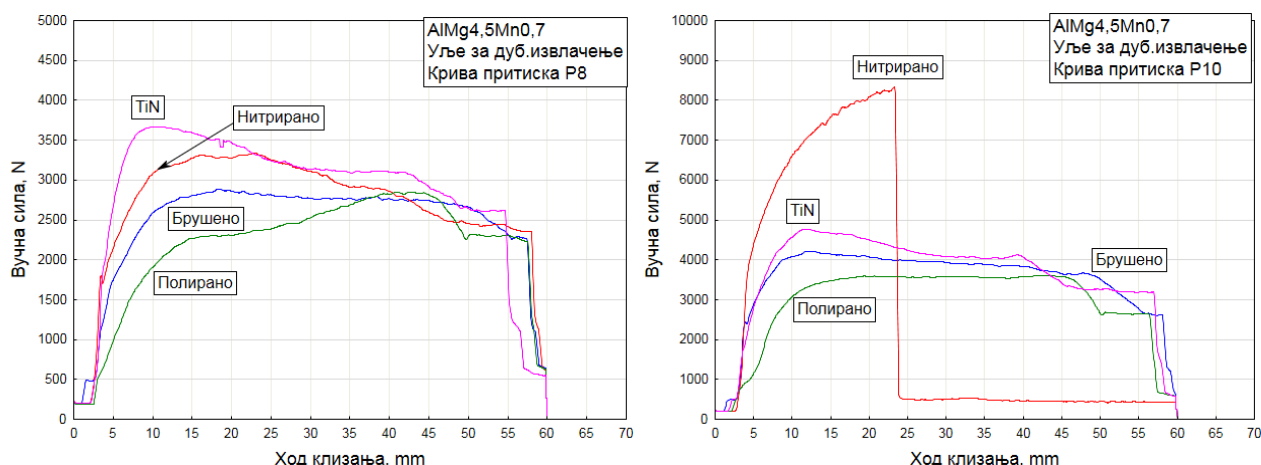


Слика 7.80 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

При подмазивању уљем, комбинација опадајуће промене притиска P5 и веће храпавости нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида утиче на пораст интензитета затежућег напона. У тим условима, повећано је формирање налепљених слојева алуминијума. Доминантан утицај на вучну силу (за промену P5) има храпавост површина, с обзиром на то да је при истим условима подмазивања за полиране и брушене површине изостао пораст интензитета затежућег напона, а формирање налепљених слојева било мање изражено. Повољан утицај линеарно растуће промене P6 (сл. 7.80) је заступљен код свих типова површина. Тај утицај се огледа у постепеном порасту притисака од најнижих вредности. Најмања вредност вучне силе је регистрована код полиране површине. И овде су, код свих површина, вредности вучних сила веома мале, у поређењу са челичним лимовима (максимална вредност износи око 4000 N).

Повољан утицај мање константне вредности притиска P8 (10 MPa, сл. 7.81) огледа се у релативно ниским вредностима вучних сила код свих типова контактних површина. Најниже вредности вучних сила (F) су код полираних и брушених површина (од 2400 до 2700 N), а највише код нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида. Код више константне вредности притиска од 20 MPa (вредност P10, сл. 7.81), услед високог притиска и веће храпавости дошло је до пораста неповољног затежућег напона и разарања траке лима код нитрираних површина. Вредности вучних

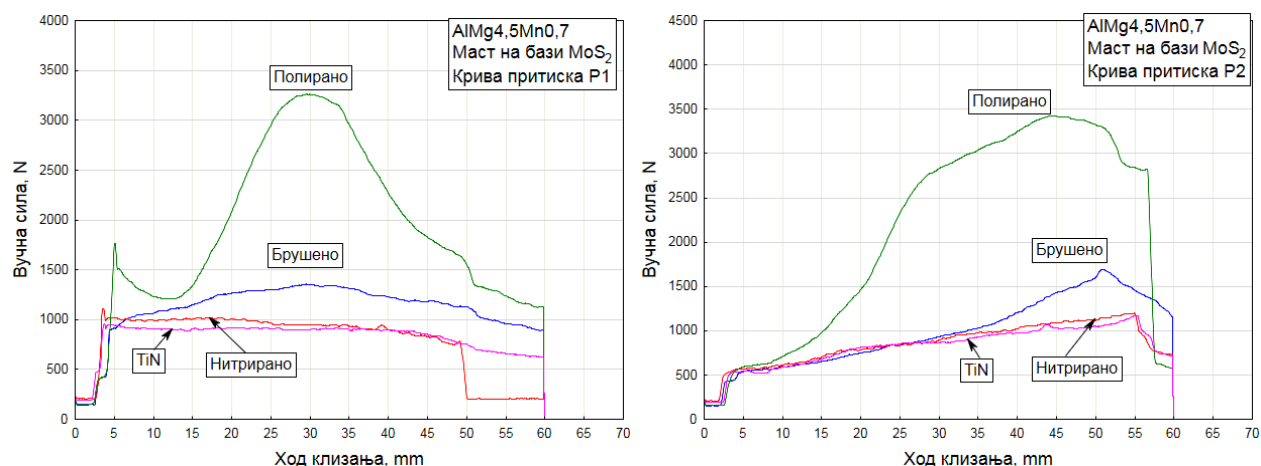
сила су нешто повишене код превлаке од титан-нитрида (4800 N), док су најниже код брушених површина (око 4000 N) и полираних површина (око 3700 N).



Слика 7.81 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

7.4.3.3. Зависности вучних сила од хода применом мазиве масти на бази MoS₂

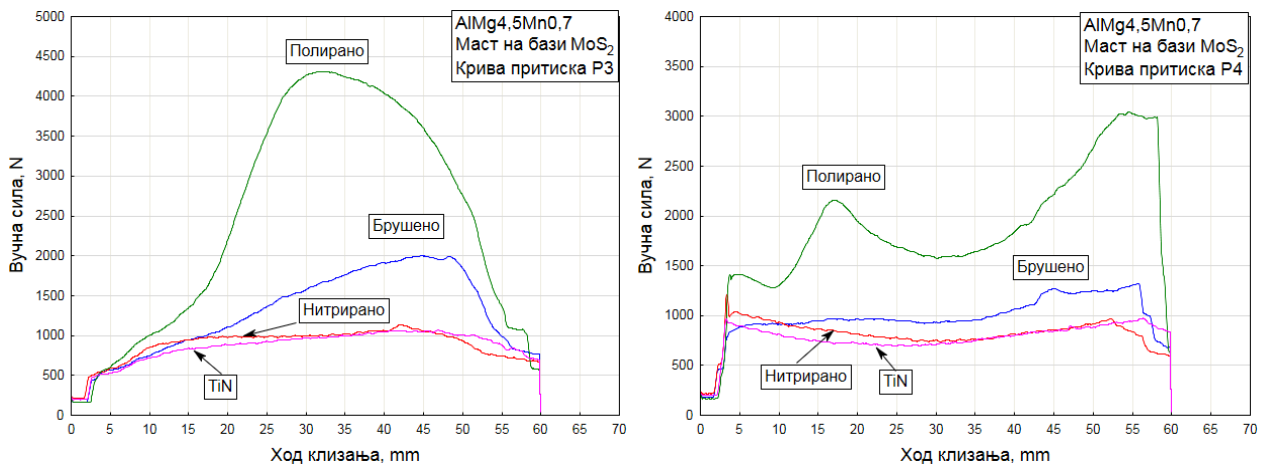
Претходно поменути неповољна комбинација мазива на бази молибден-дисулфида и полираних контактних површина, код вучења лима од Al легуре дошла је до пуног изражаја, с обзиром на склоност ове врсте лима ка стварању налепнина. О овом феномену је већ било говора код испитивања челичних лимова мазивом на бази MoS₂ где су вредности вучних сила (F) биле највеће код провлачења трака између полираних површина. С обзиром на то да је лим на бази алуминијума доста мекши материјал, као и да има већи афинитет налепљивања честица у односу на челичне лимове, налепљивање његових честица на полиране контактне површине било је присутно при готово свакој комбинацији промена притисака (слике 7.82 до 7.85). Други тип површина по склоности стварања налепљених слојева су брушене површине. На основу тога, лако је закључити да се код површина мање храпавости чврсто мазиво теже задржава у зони контакта, што је с друге стране предност код површина веће храпавости, нпр. нитрираних и површина са превлаком од титан-нитрида.



Слика 7.82 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притисака P1 (лево), крива притисака P2 (десно)

Пораст вучне силе код полираних контактних површина додатно је анализиран испитивањем површинске храпавости у поглављу 7.6. Упоређивањем параметара храпавости поменутих узорка са параметрима храпавости недеформисаног узорка, као и анализом микрофотографија може се установити присуство налепљених слојева на полираним површинама као последица недовољног

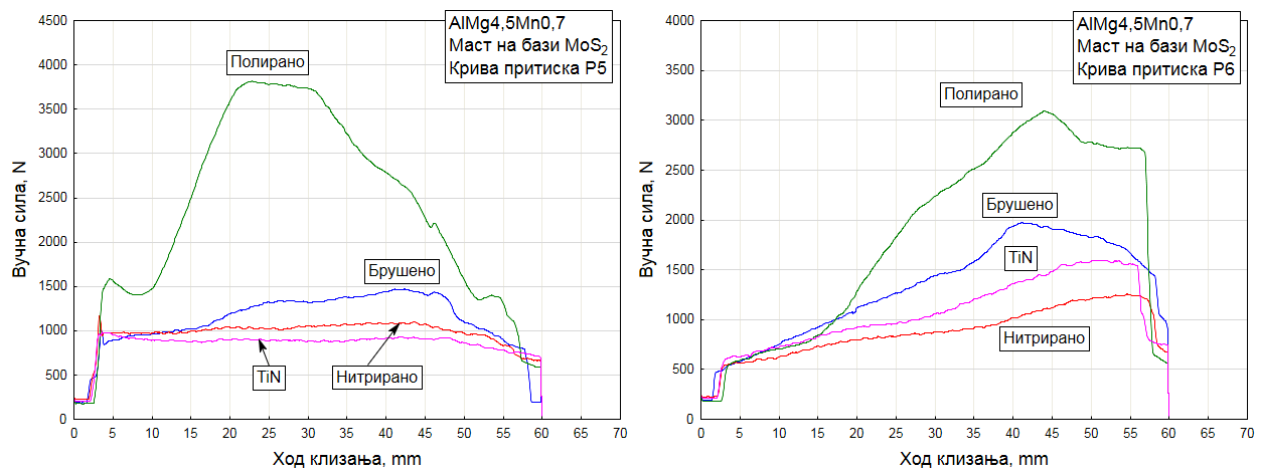
подмазивања у зони контакта и утискивања мекшег алуминијумског лима на тврђе површине клизних елемената.



Слика 7.83 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Код површина где није заступљена појава налепљивања честица алуминијума, добијене су најниже вредности вучних сила, па је самим тим положај дијаграма вучних сила најнижи у односу на челични лим (без превлаке и са превлаком). Анализирајући дијаграме за промену P1 (сл. 7.82), може се приметити да тренд вучних сила код нитрираних површина и TiN превлаке има благо опадајући карактер и ниске вредности и потпуно је у складу са опадајућим карактером промене P1. Реч је о веома повољним условима клизања и доброј комбинацији мазива на бази MoS₂ и веће површинске храпавости. Површине веће храпавости у удубљењима боље задржавају мазиву маст, чак и при већем контактном притиску. Велики скок дијаграма вучне силе за полиране површине приписује се убрзаном стварању налепнина услед недовољног подмазивања. Мања удубљења површинске храпавости имају малу способност задржавања мазива у контакту, посебно при вишим вредностима притисака. На основу тога комбинацију полираних површина и мазиве масти треба избегавати код свих материјала, а посебно код алуминијумског лима.

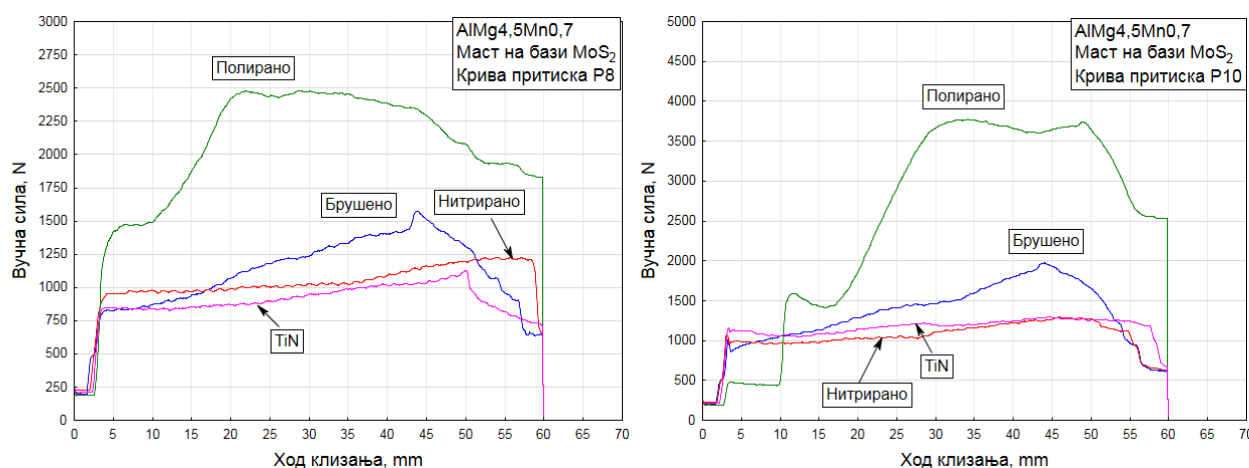
С друге стране, треба приметити, да су вредности вучних сила за нитриране контактне површине и површине са TiN превлаком, при провлачењу трака лима од Al легуре, релативно ниске не само код подмазивања мазивом на бази молибден-дисулфида, него и у односу на обе врсте челичног лима. Разлог томе је повољна комбинација храпавости поменутих контактних површина и добра способност задржавања мазива у контакту алуминијумског лима веома добре пластичности. Присуство мазива у контакту за време укупног хода вучења је пресудно на стварање налепљених слојева.



Слика 7.84 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

Најниже вредности вучних сила код брушених површина регистроване су за случај промене притиска P1 (приближно 1450 N, сл. 7.82) и P4 (око 1350 N, сл. 7.83), нешто више код промене P2 (око 1600 N, сл. 7.82), а највише код промена P3 (до 2000 N, сл. 7.82), P6 (сл. 7.84) и P10 (сл. 7.85).

Код промене P5 важе слична запажања као за промену P1. Дијаграми вучних сила за нитриране површине и превлаку од титан-нитрида имају приближно константан тренд и врло ниске вредности, што је доказ добре комбинације контактних услова (површинске храпавости и мазиве масти). Код промене P6 се запажа добро преношење растућег тренда притиска на дијаграм вучне силе. Уобичајено, као и код осталих промена присутна је појава налепљивања честица посебно за полиране површине, док је та појава веома мало заступљена код нитрираних површина и TiN превлаке. Мале разлике у тренду између дијаграма вучних сила за ове две површине су заступљене при крају хода, где је притисак највећи и где постоји могућност избацавања мазива из контактне зоне. Узрок поменутих разлика може бити и у заосталим слојевима честица алуминијума на контактним елементима од претходног провлачења.



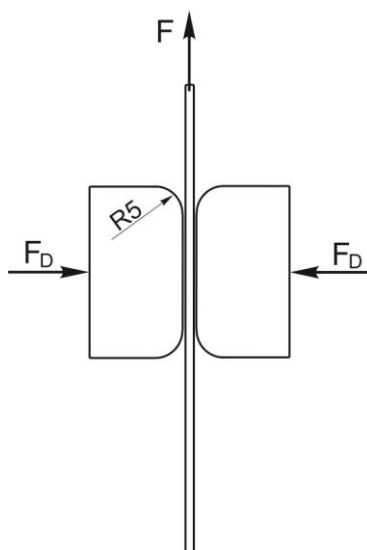
Слика 7.85 Зависности вучних сила од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS₂, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Површине са превлаком од титан-нитрида и нитриране површине имају најниже вредности вучних сила. Крећу се у распону од 1000 N (промене P1 и P2, сл. 7.82, промене P3 и P4, сл. 7.83) до 1500 N (промена P6, сл. 7.84). Приближно сталан тренд заступљен је код обе константне вредности притисака P8 и P10 (сл. 7.85) за површине веће храпавости (нитриране површине и превлака од титан-нитрида), што је добар пример преношења константне вредности притиска на дијаграме вучних сила. Код брушених и нитрираних површина, триболошки услови у контакту диктирају тренд вучне силе, који се манифестује скоком на дијаграму за полиране и делимично брушене површине. Налепљене честице алуминијума у условима лошијег подмазивања имају кључни утицај.

7.5. Дијаграмске зависности коефицијената трења од хода

Коефицијент трења, поред вучне силе, јесте један од излазних параметара процеса помоћу кога је могуће реално сагледати утицај променљивог контактнoг притиска на трење, заједно са осталим факторима. У зависности од примењених контактних услова (мазиво, различити типови површина изменљивих контактних елемената), као и зависности притисака, могу се добити различите зависности коефицијената трења од хода у току процеса. Коефицијент трења у овом истраживању је израчунаван на основу стварних (измерених) вредности вучних сила и реално добијеног притиска у контакту. На ходу дужине 60 mm, за сваки конкретни случај, уснимљено је око 1000 вредности вучних сила и стварних притисак. С обзиром на то да се процес вучења одвија између равних контактних површина (сл. 7.86), коефицијент трења је било једноставно одредити, на основу познате вредности стварне контактне површине изменљивих елемената и траке лима од 960 mm² (израз 7.6).

$$\mu = \frac{F_{\text{вуч.}}}{2 \cdot F_D} = \frac{F_{\text{вуч.}}}{2 \cdot p_D \cdot A} = \frac{F_{\text{вуч.}}}{1920 \cdot p_D}, \quad (7.6)$$



Слика 7.86 Шематски приказ деловања сила притиска (F_D) и вучне силе (F) између равних контактних површина

Веома је значајно успоставити везу између промена зависности стварних притисака у контакту и карактера промена коефицијената трења. Анализирајући наведени образац за израчунавање коефицијента трења (7.6), смањивањем вредности контактнoг притиска, директно се повећава вредност коефицијента трења, и обрнуто. Из аспекта дијаграмских зависности, код опадајућих промена притисака $P1$ и $P5$ у почетном делу хода углавном су заступљене ниске вредности коефицијената трења, због високих вредности притисака. Код растућих промена притисака $P2$ и $P6$ заступљен је супротни случај. Више вредности коефицијената трења заступљене су на почетку хода у тачкама где је притисак најнижи, с обзиром на растући карактер поменутих промена. Код растуће-опадајуће промене $P3$, највиши коефицијент трења је на самом крају хода вучења, у тачкама где притисак достиже најниже вредности. Те вредности стварних притисака у крајњим тачкама су, у неким случајевима, биле екстремно ниске, чак и до 0.5 МПа, што је доводило до екстремно високих вредности коефицијената трења (чак и преко 0.55). Зато, у случају функционалне промене $P3$, вредности коефицијената трења на крају хода треба узимати са резервом. Код опадајуће-растуће промене притиска $P4$, максимална вредност коефицијента трења је на средини хода, тамо где су вредности стварног притиска најниже. Минималне вредности коефицијената трења су на самом почетку и крају хода, где је притисак највиши, сходно карактеру промене $P4$.

Код константних вредности притисака, већи коефицијент трења углавном је заступљен код нижег притиска $P8$ (10 МПа), а нижи код вишег притиска $P10$ (20 МПа).

Значајно питање на које треба дати одговор јесте: може ли се променом нормалне силе (контактнoг притиска) управљати процесом трења? Идеални случај је потпуно преношење карактера функционалних зависности притисака на тренд дијаграма вучних сила и коефицијената трења. О преношењу тренда промена притисака на дијаграме вучних сила већ је било говора. Том приликом је истакнуто да се на већем делу хода може пренети карактер промене притиска на тренд вучне силе, са извесним пригушењима. Осетљив пренос тренда био је заступљен код опадајућих промена ($P1$, $P5$) или растуће-опадајуће промене $P3$. Код тих промена услед високих вредности притисака на почетку хода ($P1$, $P5$), при одговарајућим триболошким условима, био је присутан пораст затежућег напона, што је сматрано значајним поремећајем при преношењу притиска на вучну силу. Такође, брзи пораст притиска до половине хода (промена $P3$) утицао је на појаву затежућег напона. Бољим условима у контакту, који подразумевају комбинацију уља са површинама мање храпавости и мазиве масти на бази молибден-дисулфида са површинама веће храпавости, може се умањити пораст интензитета затежућег напона или ограничити на кратком делу хода. Код растућих промена, углавном је карактер функција притисака пренесен на трендове вучних сила, због веома постепеног повећања стварних притисака у контакту од најнижих вредности. У таквим случајевима углавном није долазило до повећања интензитета затежућег напона, осим на крају хода за поједине триболошке услове, када притисак достиже највишу вредност. Опадајуће растућа промена $P4$ веома је добро пренета на тренд вучне силе, јер су високе вредности притисака на самом почетку хода краткотрајне и са веома интензивним трендом опадања до средине хода (када притисак има најнижу вредност) до поновног пораста притиска до краја хода.

Што се коефицијента трења тиче, ситуација се у одређеној мери разликује у односу на вучну силу. Анализирајући израз (7.6), може се закључити да код дијаграма коефицијената трења постоји пар критичних ситуација, а то су када вредност притисак тежи нули ($p_D \rightarrow 0$), када вучна сила тежи нули ($F \rightarrow 0$) и када су и притисак и вучна сила истовремено приближне нули ($p_D \approx 0, F \approx 0$). Приказ оваквих случајева је од битног значаја за илустрацију преноса функционалних зависности притисака на дијаграме коефицијената трења и могуће управљање процесом трења преко задавања променљивог притиска. Важно је истаћи да цео процес вучења има смисла када постоји нормална сила (F_D) односно контактни притисак (p_D). Тада постоји и вучна сила (F).

Случај када се вредност притиска приближава нули за време хода вучења карактеристичан је углавном за промене где долази до опадања притиска (опадајуће P1 и P5 и растуће-опадајућа промена P3). У тој ситуацији се притисак приближава ниским вредностима и тежи нули, па према изразу (7.6) коефицијент трења тежи бесконачности, односно до краја хода коефицијент трења може достићи нереалне вредности (изнад 0.55), иако је на највећем делу хода имао очекиване вредности. То је један од критичних момената које треба избегавати код промена притисака које се завршавају опадајућим трендом, односно где притисак достиже веома ниске вредности. При тако ниском притиску са опадајућим трендом, могуће је управљање трењем на већем делу хода осим на самом крају. С друге стране, могуће је погодним избором триболошких услова у контакту значајно умањити вредности коефицијената трења и ублажити ефекте ниског притиска на крају хода. То се односи на одабир повољне комбинације мазива и контактне површине (мање или веће храпавости), као и материјала лима. Значајан закључак из аспекта управљања трењем јесте када притисак тежи нули, израчунавање коефицијента трења губи смисао, односно ако притисак тежи нули нема клизања и нема реалног контакта лима са изменљивим клизним елементима, па самим тим нема смисла изучавати трење.

Случај када је сила (F) приближна или једнака нули, а притисак (p_D) има одређену вредност односи се на сам почетак процеса и то код промена притиска које почињу опадајућим карактером (P1, P4 и P5). Тај однос је на самом почетку процеса вучења приближно једнак нули, тј. коефицијент трења расте од најнижих вредности како притисак (p_D) почиње да опада, а вучна сила (F) расте. Услед високе вредности притисака на почетку хода и релативно лошијих услова у контакту могућ је пораст интензитета затежућег напона, који се манифестује порастом вучне силе. У складу са тим и вредност коефицијента трења расте. Повољнијом комбинацијом услова у контакту могуће је избећи пораст затежућег напона и постепени пораст вучне силе и коефицијента трења.

Трећи случај када вучна сила (F) и контактни притисак (p_D) теже нули је карактеристичан за сам почетак процеса вучења, када вучна сила (сила трења) почиње да расте са порастом притиска. Такав случај је карактеристичан за функционалне промене притиска које почињу растућим трендом (P2, P3 и P6). Код чисто растућих функција P2 и P6 могуће је управљати трењем (преко коефицијента трења), јер је у питању растућа линеарна веза контактнoг притиска и вучне силе. Порастом притиска, расте и вучна сила. Помоћу ових функционалних промена добијане су углавном ниске вредности притисака у поређењу са осталим функционалним променама при истим условима у контакту. Коефицијент трења, и у овом случају, може варирати у зависности од примењених триболошких услова (мазиво, тип контактне површине, материјал лима).

Код свих функционалних промена је могуће на већем делу хода управљати коефицијентом трења, задавањем функционалних зависности притисака. Наведена су три карактеристична случаја, преко анализе изрази (7.6). Код опадајућих промена P1 и P5, као и промене која се завршава опадајућим карактером P3, критична места на укупној дужини хода где коефицијент трења достиже нереалне вредности су сам завршетак процеса, где притисак има тенденцију приближавања нули. У том случају вредност вучне силе је у порасту, па њихов однос даје висок коефицијент трења. Таква места на дијаграму вучне силе углавном су довела до пораста интензитета затежућег напона. Најповољније промене притисака из аспекта управљања трењем су растуће промене P2 и P6, јер на почетку процеса и вучна сила и стварни притисак расту од најнижих вредности и имају линеарни однос. Код промене притиска P4, критично место је на средини хода, где коефицијент трења има највишу вредност, и који се може значајно смањивати одговарајућим избором триболошких услова у контакту, што чини управљање трењем изводљивим на укупном делу хода.

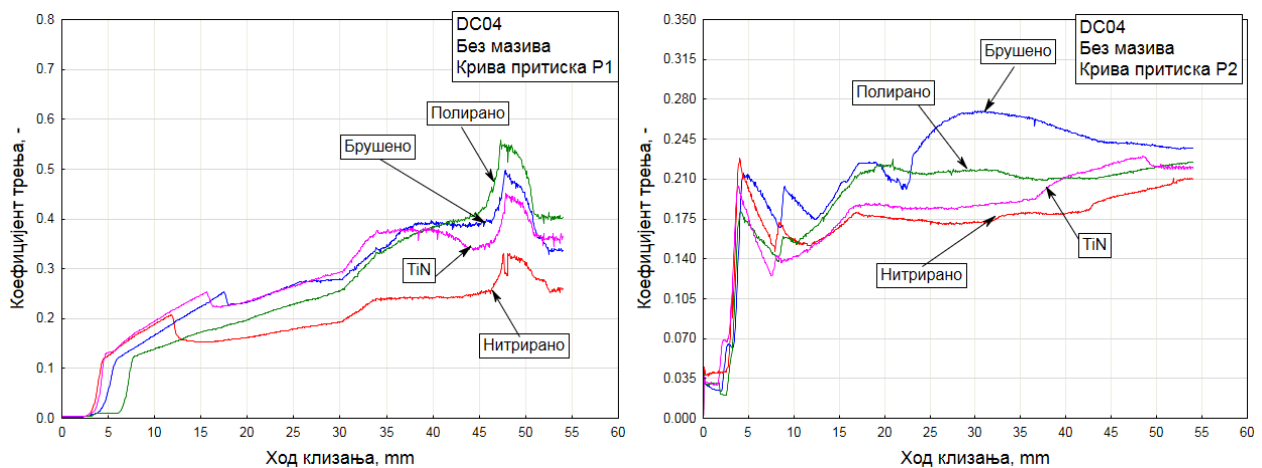
7.5.1. Резултати за челични лим без превлаке (DC04)

Као и у случају дијаграмских зависности вучних сила од хода, тако и код зависности коефицијената трења, приказане су за сваки материјал криве варирањем четири типа контактних

површина као и три контактна стања између њих и лима, са сувим (претходно одмашћеним) површинама и подмазаним (претходно одмашћеним а затим равномерно подмазаним) контактним површинама. Анализирањем промена коефицијената трења и упоређивањем са променама вучних сила и контактних притисака, могуће је успоставити релацију између њих за свако контактна стање.

7.5.1.1. Зависности коефицијената трења од хода при сувим контактним површинама

На сликама 7.87 и 7.88 приказане су дијаграмске зависности коефицијената трења за промене притисака од P1 до P4 у условима без подмазивања, за сваки тип површине изменљивих контактних елемената. Код криве P1 (сл. 7.87) вредности коефицијената трења су релативно високе (чак до 0.55) што је последица отежаних услова клизања, у једном случају. Други разлог је мала могућност управљања трењем на самом крају процеса, када притисак тежи нули (опадајући карактер промене P1). Зато су на самом крају хода вредности коефицијената трења нереално високе. Релативно висока вредност коефицијента трења на већем делу хода потиче од лошијих услова у контакту (недостатак мазива). Постепени пораст притиска код промене P2 не доводи до отежаног клизања и великог пораста интензитета вучне силе (није присутно повећање интензитета затежућег напона), о чему је већ било говора код тумачења дијаграма вучних сила, па су и вредности коефицијената трења релативно ниже (од 0.15 до 0.26, сл. 7.87 промена P2). Распоред зависности коефицијената трења одговара потпуно распореду зависности вучних сила за контактне површине (највиша зависност је за брушене а најнижа за нитриране површине). Код растуће промене (P2) доминантан је утицај храпавости површина изменљивих контактних елемената на вредност коефицијента трења.

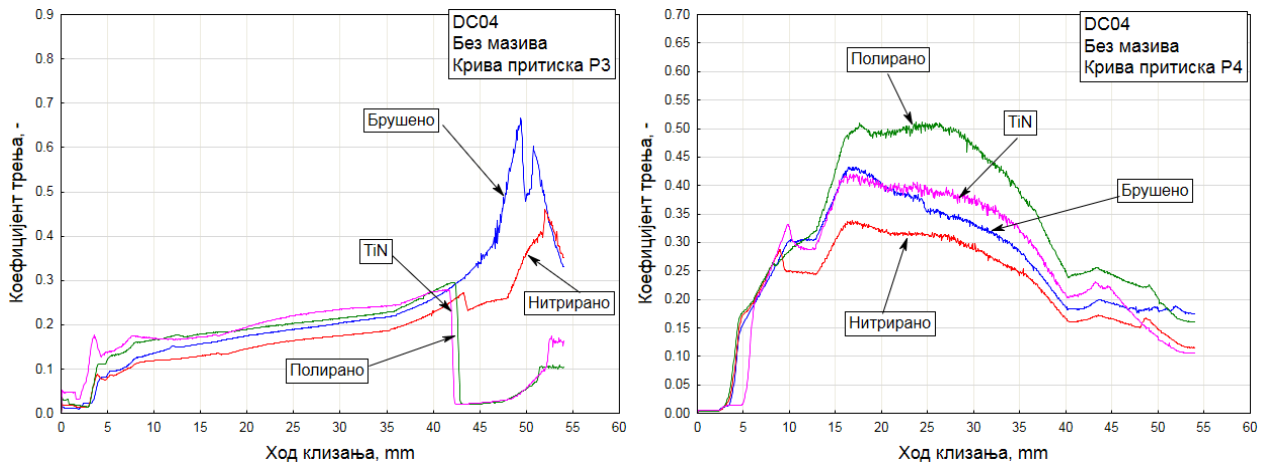


Слика 7.87 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Код промене P3 (сл. 7.88) код свих типова контактних површина било је присутно повећање интензитета вучне силе, па и прелом траке лима (TiN превлака и нитриране површине), па су стога вредности коефицијената трења веома високе, због неповољних услова у контакту, као и интензивно опадајућег карактера промене у другој половини хода. На самом крају хода заступљене су нерелно високе вредности коефицијената трења, највише због приближавања притиска нули и делимично због лошијих контактних услова.

Дијаграмске зависности коефицијената трења за промену P4 (сл. 7.88) распоређене су према типовима контактних површина на идентичан начин као и зависности вучних сила. Наравно, то је заступљено и код осталих дијаграмских зависности, што указује на међусобну повезаност коефицијента трења и вучне силе, што није тешко закључити на основу линеарне везе у обрасцу за израчунавање коефицијента трења (7.6). Код промене P4 се за дате услове јасно види склоност појединих типова површина ка стварању налепљених слојева (полиране и брушене површине), па су стога код тих површина и максималне вредности коефицијената трења (чак и преко 0.50, сл. 7.88). Треба истаћи да је средишњи део хода уједно и место на коме је заступљена најнижа вредност притиска ($p_D \rightarrow 0$) па зато коефицијент трења има максималну вредност. Нитриране површине имају најмању склоност ка стварању налепљених слојева па је уједно код њих заступљена и најнижа

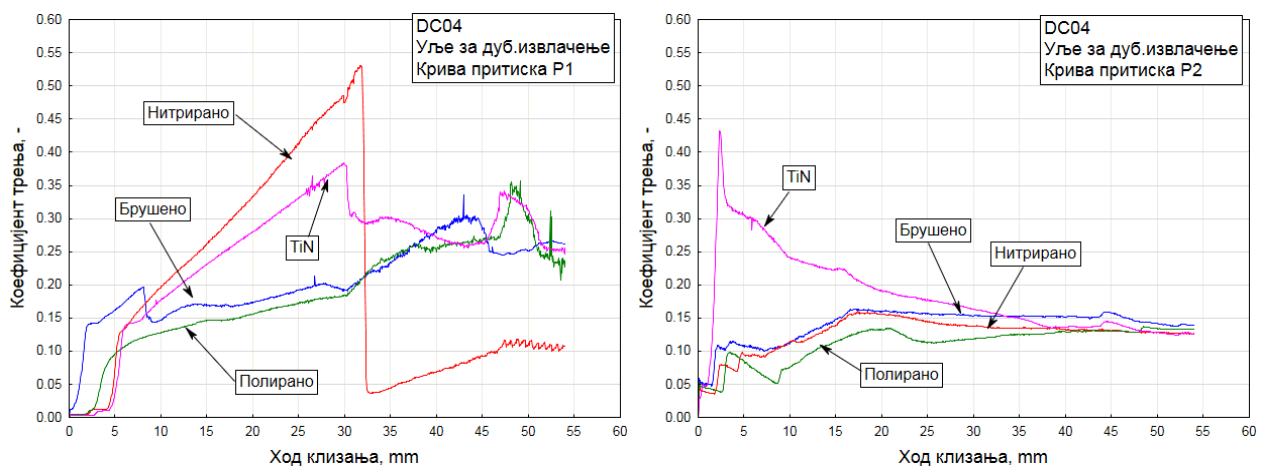
вредност коефицијента трења (≈ 0.34). Одговарајућим избором мазива и типа контактних површина може се постићи значајно умањење коефицијента трења на месту где притисак достиже најнижу вредност.



Слика 7.88 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

7.5.1.2. Зависности коефицијената трења од хода приликом примене уља за дубоко извлачење

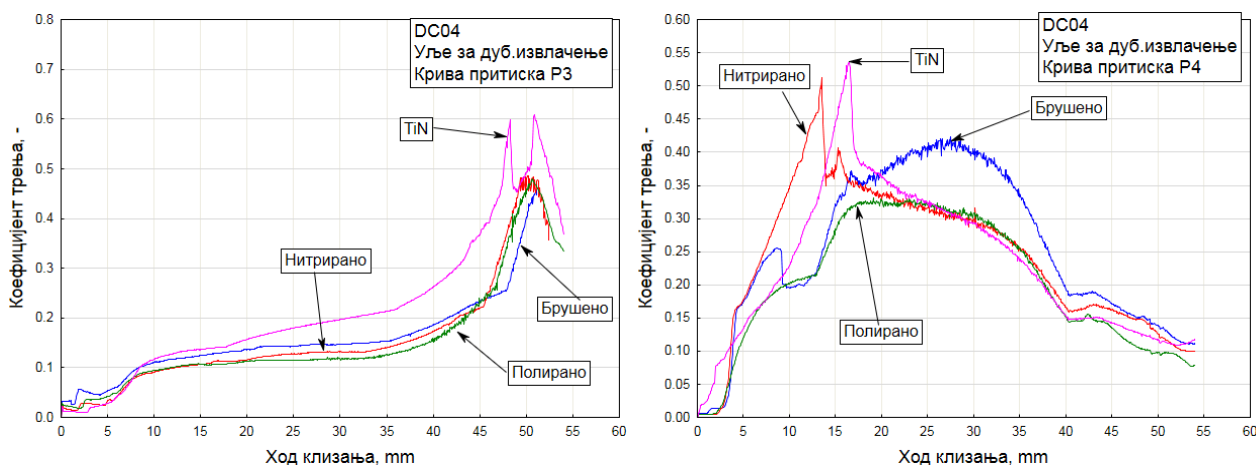
Утицај растућих промена притисака (P2, P6) на добијање релативно ниских вредности коефицијената трења заступљен је у процесу вучења при подмазивању уљем (слике 7.89 до 7.92). Разлике у положајима кривих (промена P2, сл. 7.89) су одређене параметрима храпавости брушених, нитрираних и полираних површина, при истиим условима подмазивања. Лошија комбинација уља и превлаке од титан-нитрида довела је до повећања силе трења (вучне силе) која се у потпуности пренела и на коефицијент трења. Код промене P2, присутан је постепени пораст притиска по експоненцијалној функцији и пораст вучне силе у складу с тим, што се у потпуности пренело и на дијаграме коефицијената трења. Ово је добар пример преношења функције притисака на коефицијент трења из аспекта управљања трењем. Опадајући карактер промене притиска P1 у комбинацији са лошијим условима у контакту, код већине површина довели су до повећања вредности коефицијената трења. Вредности су нарочито високе при крају хода услед тежње притиска нули, што отежава потпуно управљање трењем. Поред тога, комбинација уља и контактних површина веће храпавости (нитриране површине, TiN превлака) доводи до отежаних услова клизања и повећања интензитета вучне силе (преко повећања интензитета затежућег напона).



Слика 7.89 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Највиша вредност коефицијента трења при подмазивању уљем за дати челик је код растуће-оппадајуће промене притиска P3 (сл. 7.90) за случај површина са превлаком од титан-нитрида. Та вредност заступљена је на крају хода, због веома ниске вредности стварног притиска (обрнута пропорционалност). Реч је о интензивном опадању притиска од половине хода услед тежње притиска нули, што даје нереалне вредности коефицијената трења. То је присутно код свих промена које се завршавају опадајућим трендом, што представља критични момент хода, где није могуће потпуно пренети промену притиска на дијаграм коефицијента трења и на тај начин управљати трењем. На већем делу хода је то могуће, у случајевима где притисак пропорционално расте са силом трења и где је притисак знатно већи од нуле.

Треба напоменути да постоји извесна мала разлика у времену од искључивања машине и управљачке јединице, па је често присутна ситуација да је машина заустављена у кратком временском периоду до искључивања управљачке јединице, па се може догодити да управљачка јединица задаје притисак и даље иако је радни ход завршен, а мерни ланац за обраду сигнала и рачунар за приказ и уснимавање дијаграмских зависности још увек региструју притисак. Међутим, овако мале разлике у временима искључивања свих модула експерименталне апаратуре не могу утицати на валидност процеса и добијене резултате, што је проверено на великом броју добијених дијаграма стварних притисака у контакту, као и на дијаграме вучних сила. Штавише, апаратура веома добро преноси теоријски задате функционалне промене притисака, што се потврдило на дијаграмима стварних притисака у контакту (поглавље 7.3). Из тог разлога је и приказан велики број дијаграмских зависности стварних притисака у контакту.

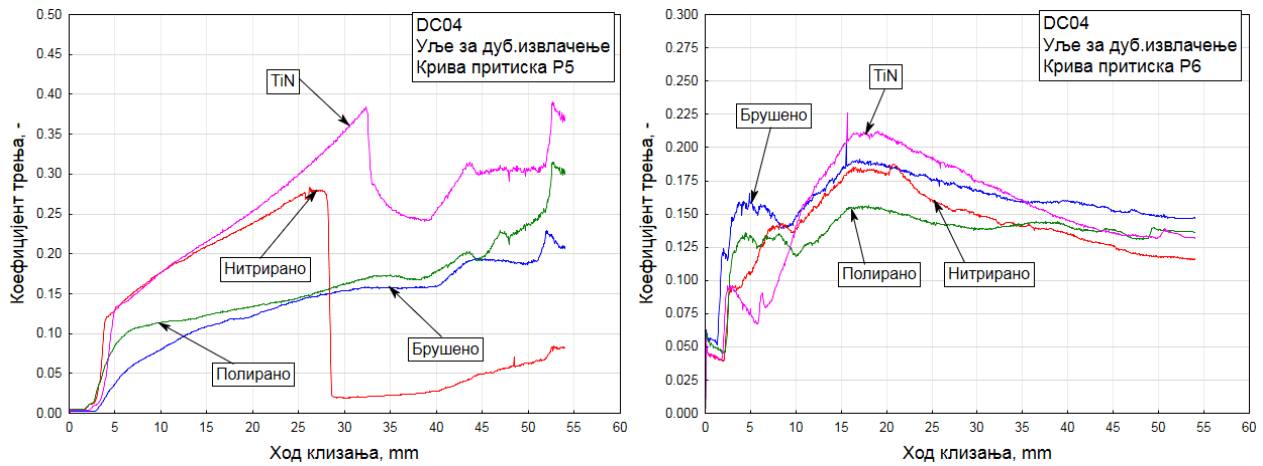


Слика 7.90 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Критично место хода вучења функционалне промене притиска P4 (сл. 7.90), где је управљање коефицијентом трења доведено у питање је минимум опадајуће-растуће промене притиска P4 ($p_D \rightarrow 0$). На дијаграму коефицијента трења, максималне вредности заступљене су управо на средини хода где је притисак најнижи и те вредности треба узети са резервом, посебно за случај површина са вишим параметрима храпавости (нитриране површине и превлака од титан-нитрида) при подмазивању уљем. Расподела коефицијената трења за различите типове површина је у складу са расподелама вучних сила (сила трења), па због лошијих услова подмазивања коефицијент трења је управо највиши код нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида. Избором површина мање храпавости у комбинацији са уљем може се ублажити критично место на ходу из аспекта управљања процесом трења. У том случају вредности коефицијената трења значајно су мање.

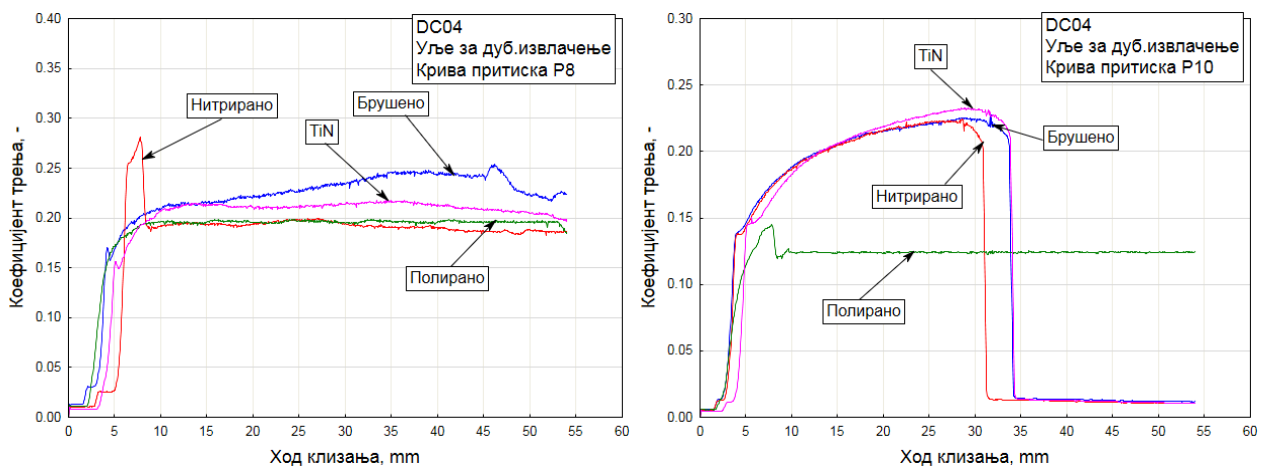
Код промене P5 (сл. 7.91), због опадајућег карактера и нешто лошијих контактних услова, код превлаке од титан-нитрида и нитрираних површина дошло је до пораста силе трења (вучне силе) и прелома трака лима. Процес је завршен без наглог пораста интензитета вучне силе (а тиме и интензитета неповољног затежућег напона) код полираних и брушених површина, због повољнијих услова у контакту, тј. нижих вредности параметара храпавости поменутих површина. Просечна вредност коефицијента трења за полиране и брушене површине, изузимајући сам крај хода где је притисак најнижи (а тиме и отежано управљање трењем због тежње притиска нули) износи око 0.17. Код линеарно растуће промене P6 (сл. 7.91) дијаграми коефицијената трења, за сва четири типа површина, су расподељене као и дијаграми вучних сила. Највећи просечни коефицијент трења је код

TiN превлаке (приближно 0.225), а најнижи код полираних површина 0.150. Релативно ниске вредности коефицијената трења и уједначеност кривих су резултат постепеног пораста притиска линеарно растуће промене P6 и вучне силе. Избором растућих промена и површина ниске храпавости при подмазивању уљем, коефицијент трења се може значајно умањити.



Слика 7.91 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

Утицај контактнoг притиска и храпавости површина на вредност коефицијента трења се веома добро уочава код константних притисака P8 и P10 (сл. 7.92). Код процеса вучења где је задавана нижа вредност константног притиска P8 (10 МПа), није било значајно повећање интензитета силе трења и затежућег напона, осим код нитрираних површина на самом почетку хода услед веће храпавости. У складу с тим добијене су и вредности коефицијената трења.



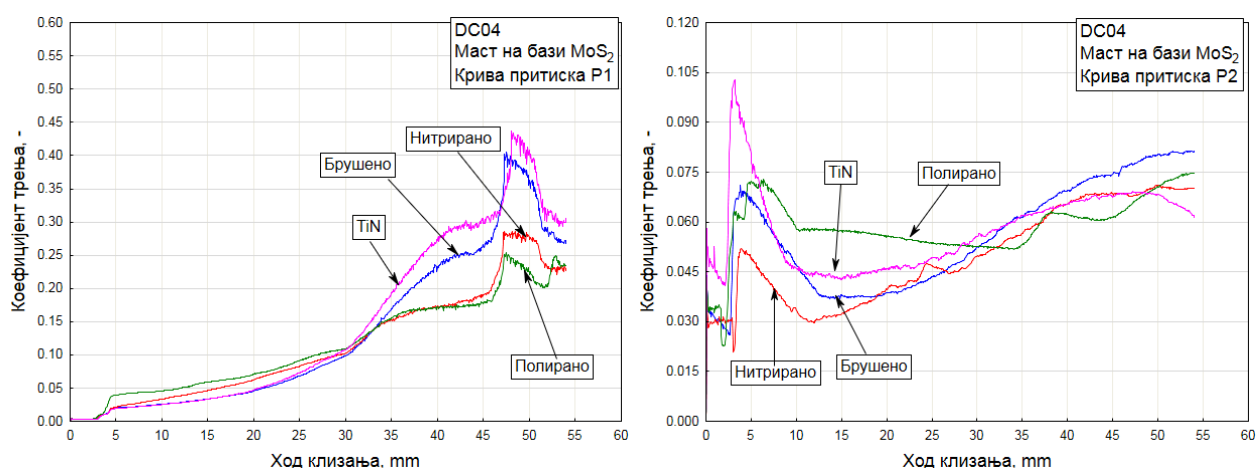
Слика 7.92 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Просечне вредности коефицијената трења за све типове површина крећу се од 0.18 до 0.24, што је потпуно очекивано код нижег контактнoг притиска. Код веће вредности притиска P10 (20 МПа, сл. 7.92) услед високог притиска у контакту и веће храпавости контактних површина, дошло је до повећања интензитета вучне силе (силе трења) и прелома траке лима код свих површина, осим полираних. Захваљујући ниској храпавости ове површине и подмазивања уљем, стварање налепљених слојева је било најамње изражено, а коефицијент трења се може сматрати константним и његова вредност је приближно 0.125.

7.5.1.3. Зависности коефицијената трења од хода приложеном мазиве масти на бази MoS_2

Приметно мање вредности коефицијената трења заступљене су код провлачења челичних трака лима приложеном мазиве масти на бази молибден-дисулфида. Коефицијент трења је нарочито мањи код опадајућих промена P1 (сл. 7.93), P5 (сл. 7.95) и опадајуће-растуће промене P3 (сл. 7.94), у поређењу са претходним случајем где се подмазивање одвијало уљем за дубоко извлачење. Код овог челичног лима за промену P1 (сл. 7.93) просечна вредност коефицијента трења (ако се изузме сам крај хода где је притисак најнижи) износи у опсегу од 0.15 до приближно 0.30, што је мање него код подмазивања уљем. Најниже вредности коефицијената трења заступљене су код полираних површина, а највише код TiN превлаке и брушених површина.

Проблем управљања трењем код опадајућих функција (када притисак тежи нули при крају хода) заступљен је и у случају подмазивања мазивом машћу на бази молибден-дисулфида. Захваљујући релативно добрим својствима мазива на бази MoS_2 , вредности коефицијената трења су умањене у односу на претходни случај подмазивања уљем. Нарочито је то изражено код нитрираних и полираних површина (сл. 7.93, притисак P1), где је коефицијент трења најмањи, као добра комбинација храпавости површина и мазива. Ово је доказ да се погодним избором триболошких услова може у извесној мери компензовати трансфер функције променљивог контактнoг притиска на дијаграме коефицијената трења, односно тежња притиска нули и у том смислу повећање коефицијента трења. Код бољих услова у контакту, сила трења, односно вучна сила има мању вредност, па је самим тим коефицијент трења мањи, чак и при релативно ниском стварном притиску.

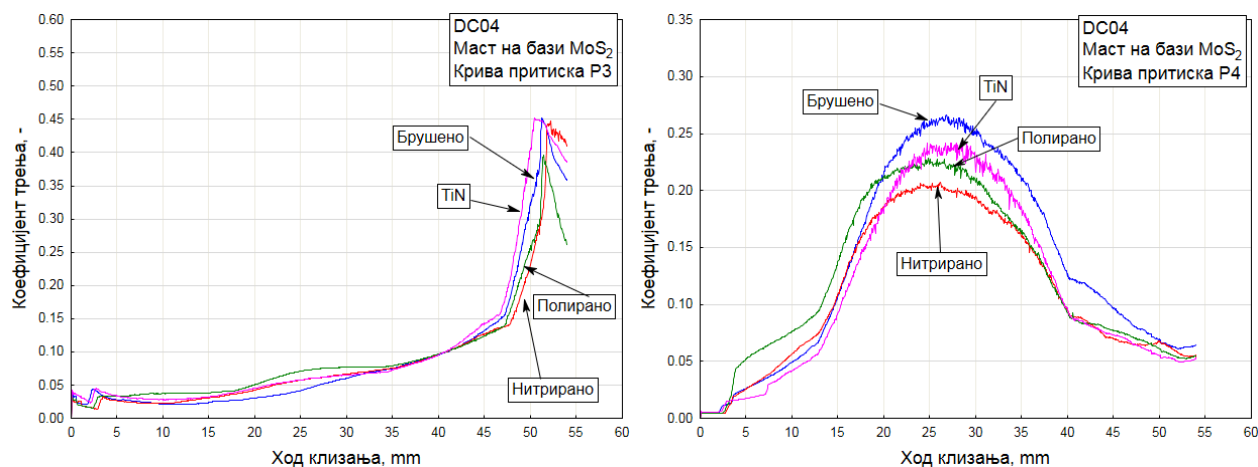


Слика 7.93 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Функционална промена притиска P2 (сл. 7.93) обезбеђује готово најниже вредности коефицијената трења од 0.030 код нитрираних површина (најнижа вредност) до приближно 0.1 код TiN превлаке (највиша вредност). Почетни пик код свих дијаграма коефицијената трења промене P2 је присутан у зони најнижег притиска. Тај пик је одређен почетним тренутком процеса вучења када притисак још увек има релативно ниску вредност а вучна сила (сила трења) почиње нагло да расте под утицајем контактних услова. Растућа промена притиска P2 у комбинацији са мазивом бољих својстава подмазивања утиче на смањење вредности коефицијената трења код свих типова контактних површина и олакшава процес преноса силе држања (контактнoг притиска) на трендове дијаграма коефицијената трења. На тај начин је приметно смањено пригушење преноса променљивог притиска на коефицијент трења из аспекта управљања трењем.

Примена притиска P3 (сл. 7.94) у комбинацији са мазивом на бази молибден-дисулфида на узорцима лима од нискоугљеничног челика даје веома добру уједначеност дијаграма коефицијената трења за све типове површина. С обзиром на то да је реч о комбинованој растуће-опадајућој функцији и да на крају хода крива притиска интензивно пада тежећи нули, ту треба тражити разлог наглог скока функције коефицијента трења. Интензивни пад функције притиска је присутан од половине хода, и тада управо долази до пораста коефицијента трења. Вредности коефицијената трења губе смисао када притисак тежи нули. То намеће закључак да када притисак тежи нули нема

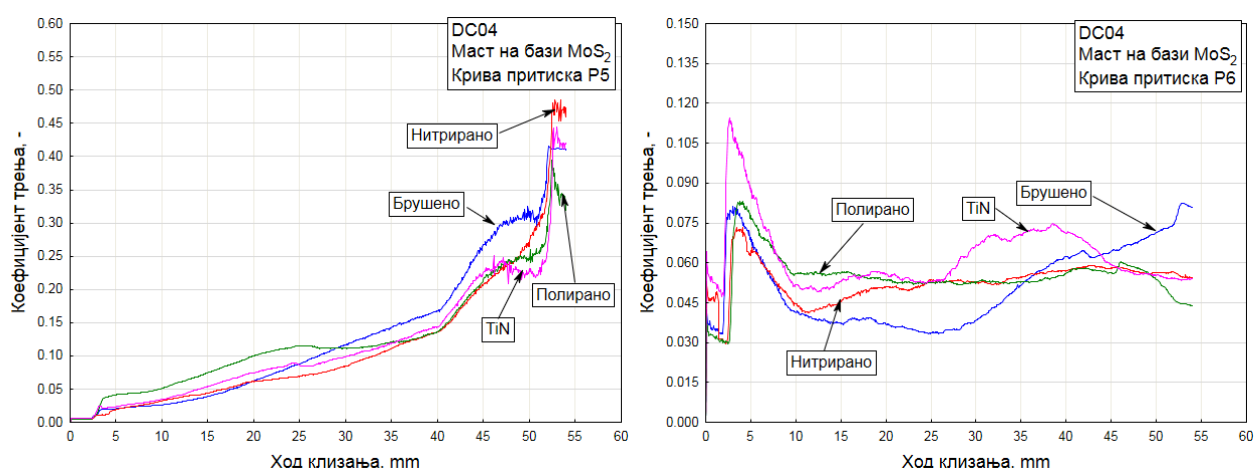
клизања и правог (реалног) контакта и нема смисла изучавати трење. Одбацивањем крајева дијаграма, из поменутих разлога, максималне вредности коефицијената трења за ову промену притиска износе приближно 0.15. У овом случају, чак и применом бољих контактних услова није могуће значајно утицати на смањење коефицијента трења.



Слика 7.94 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Код промене P4 (сл. 7.94) највише вредности коефицијената трења заступљене су код брушених контактних површина (максимално 0.26), а најниже код нитрираних површина (највише 0.20). Код полираних површина коефицијент трења има максималну вредност 0.22, док код превлаке од титан-нитрида достиже 0.24. Те вредности су регистроване приближно на средини хода вучења, на месту најнижег стварног контактнег притиска. Вредности су приметно ниже у односу на случај подмазивања уљем. Триболошким условима у контакту, може се смањити пораст интензитета силе трења, чак и на делу хода код промене P4 где притисак достиже најнижу вредност.

Положај дијаграма коефицијената трења за линеарно опадајућу промену P5 (сл. 7.95), веома подсећа на промену P3 (сл. 7.92), с тим што су регистроване нешто веће просечне вредности коефицијената трења (од 0.225 до 0.24 за све површине осим брушене), а око 0.30-0.33 за брушену површину. Реч је о линеарно опадајућој промени притиска (P5) где се притисак приближава вредности нула, при чему је јасно да вредности коефицијената трења при крају хода нису реалне, јер у реалности нема стварног контакта када притисак тежи нули.

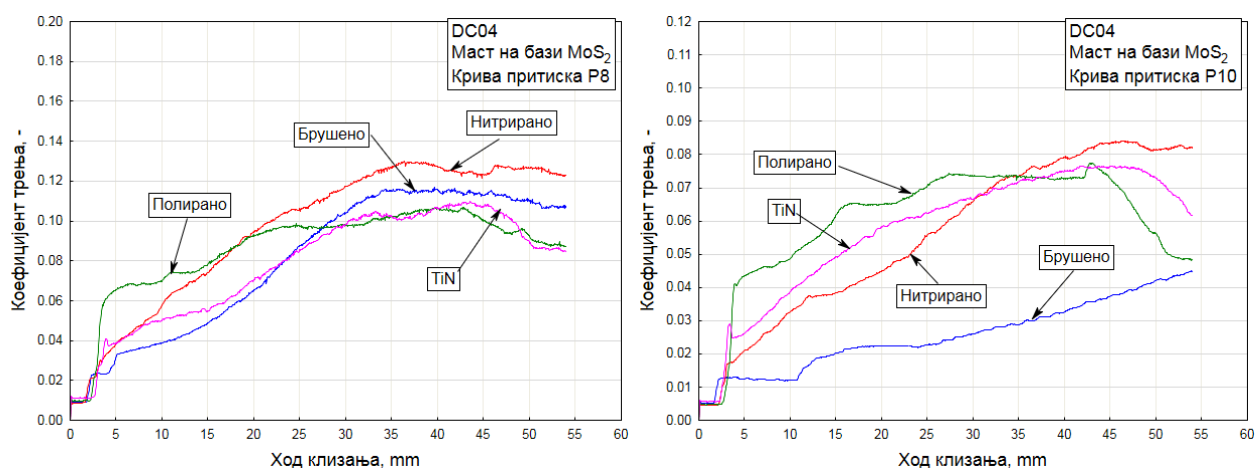


Слика 7.95 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

Упоредивањем дијаграма за растућу линеарну промену P6 (сл. 7.95) са дијаграмима растуће експоненцијалне промене P2, може се заључити да су криве коефицијената трења веома сличног тренда, али се вредности за поједине типове површина разликују. Максимална вредност коефицијента трења заступљена је код површина са TiN превлаком (0.114 на почетку хода и 0.075

при крају хода). Најнижа вредност је код брушених површина 0.033, а полиране и нитриране површине имају веома сличан тренд са минималним вредностима од 0.046 до 0.057). Анализирајући све криве за задату промену притиска P6 може се закључити да су код свих површина присутне веома мале вредности коефицијената трења, настале као резултат повољне комбинације растуће промене притиска и веома добрих подмазујућих својстава мазива на бази молибден-дисулфида. У прилог томе иде и веома мала склоност челичног лима ка стварању налепљених слојева, за разлику од алуминијумског. Скоковит део дијаграма на почетку хода везује се за нагли пораст вучне силе (силе трења) као последица почетка процеса клизања, где притисак још увек има ниске вредности, с обзиром на растући карактер промене P6.

Утицај константног притиска у условима подмазивања мазивом на бази MoS₂ испољава се и код дијаграма коефицијената трења (сл. 7.96). Код већег константног притиска P10 (20 МПа) проблем одржавања мазива у контакту лима са полираним површинама испољава се порастом коефицијента трења у односу на остале типове површина. Нешто већа разлика између кривих код притиска P10 потиче управо од триболошких услова у контакту. Коефицијент трења има нижу вредност код оних површина које најдуже могу задржати мазиво у контакту, а то су површине веће храпавости, када је у питању мазива маст на бази MoS₂, што није био случај код подмазивања уљем. С друге стране, код већег притиска су заступљене мање вредности коефицијената трења, у складу са изразом (7.6). На основу тога опсег максималних вредности коефицијената трења за притисак P8 и све четири површине износи од 0.105 до 0.131, док код вишег притиска P10 тај опсег се креће од 0.045 до 0.085.



Слика 7.96 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04 лим, мазива маст на бази MoS₂, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

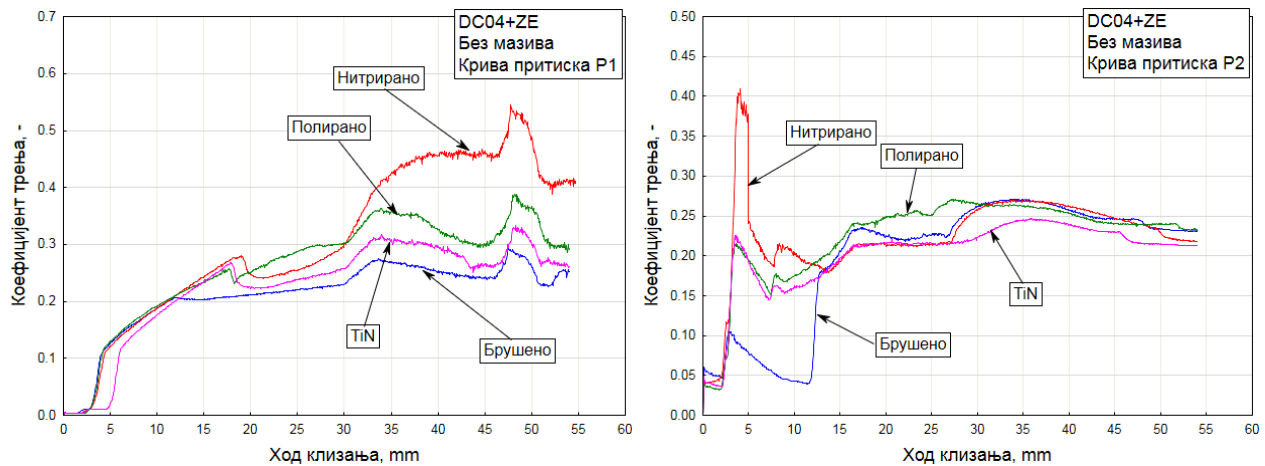
7.5.2. Резултати за поцинковани челични лим (DC04+ZE)

Дијаграмске зависности коефицијената трења за челични лим са једностраном превлаком цинка (DC04+ZE), биће представљене у овом делу рада. Криве за поменути челик веома подсећају на зависности коефицијената трења за исти челични лим без превлаке (DC04), с тим што су у одређеним случајевима заступљене нешто више вредности због појаве скидања и налепљивања слојева цинка са лима на контактним површинама изменљивих клизних елемената. Налепљене честице цинка углавном настају у нешто лошијим триболошким условима, као што су: неодрживост слоја мазива у контакту, високи контактни притисци и већа храпавост контактних површина.

7.5.2.1. Зависности коефицијената трења од хода при сувим контактним површинама

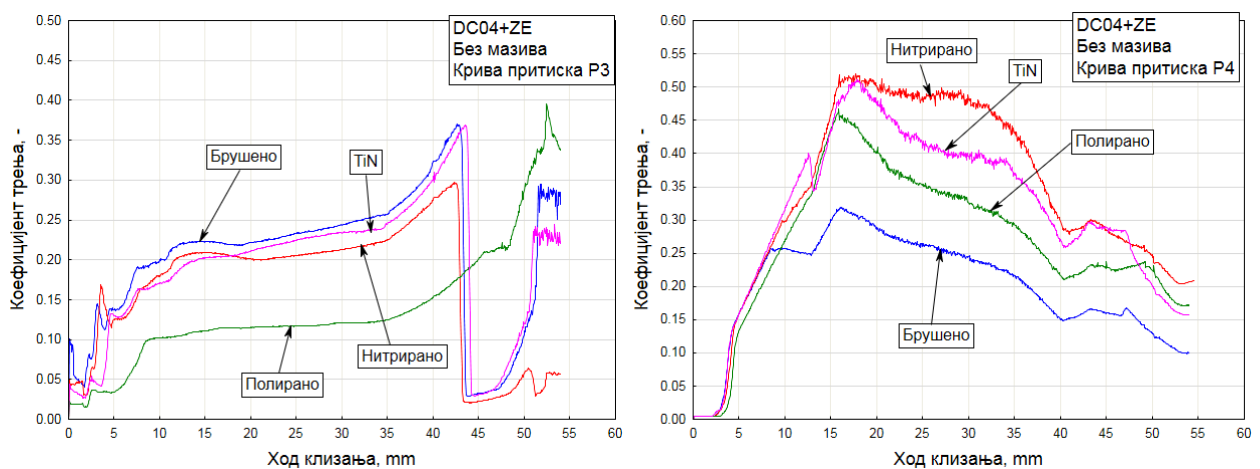
На сликама 7.97 и 7.98 приказане су дијаграмске зависности коефицијената трења за челични лим са превлаком цинка у условима без подмазивања. Код притиска P1 (сл. 7.97), највиша вредност коефицијента трења измерена је код нитрираних површина. Вредности коефицијената трења на самом крају процеса (хода) вучења су нереалне и добијене у условима високе вредности вучних сила и тежње притиска нули, што се манифестовало скоком на дијаграму. Као и код челика без превлаке, тако и у случају челика са превлаком, важи констатација да коефицијент трења нема смисла

изучавати када притисак тежи нули, јер у стварности нема контакта лима и контактних елемената. Упоредјујући вредности добијене за основни материјал (челични лим без превлаке) може се закључити да висока храпавост нитрираних површина, у комбинацији са већом храпавошћу поцинкованог челичног лима директно утиче на повећање коефицијента трења, посебно у условима без подмазивања. Виша вредност коефицијента трења (од 0.36 до 0.39) запажена је и код полираних површина, као резултат стварања налепљених слојева цинка у условима без подмазивања. Брушене површине и превлака од титан-нитрида имају најниже вредности коефицијената трења (0.27 и 0.31 респективно).



Слика 7.97 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Блаже разлике у трендовима дијаграма коефицијената трења за функционалну промену P2 (сл. 7.97) потичу од триболошких услова у контакту, при чему је регистровано да су највише вредности заступљене код полираних површина због веће склоности ка налепљивању честица цинка на површине контактних елемената. Код растуће промене P2 у односу на опадајућу P1 вредности за поједине контактне површине су осетно ниже. На то утиче, пре свега, карактер промене P2 са растућим током, где је заступљен постепени пораст вучне силе и притиска. Критични тренутак је на самом почетку хода када притисак има ниску вредност, а вучна сила нагло расте под утицајем отежаних услова у контакту (одсуство мазива) што се види као врх на дијаграму. Већ је напоменуто код тумачења дијаграма основног материјала (без превлаке) да су растуће промене притисака из аспекта управљања трењем веома повољне, јер притисак постепено расте, па и сила расте у складу са тим.



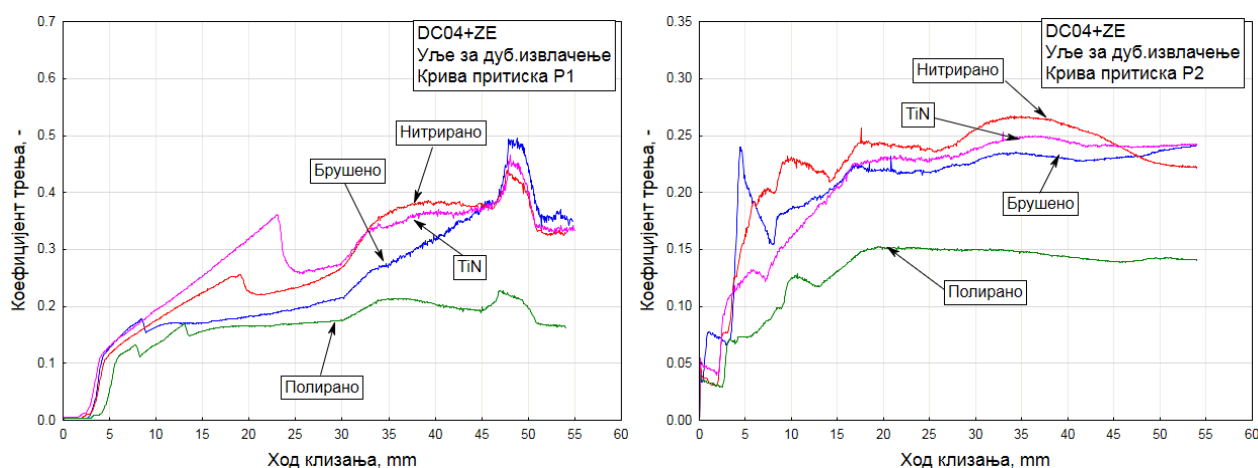
Слика 7.98 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Дијаграме коефицијената трења добијених за промену притиска P3 (сл. 7.98) у условима без подмазивања и за сва четири типа контактних површина не треба посебно коментарисати с обзиром

на то да је услед неповољних услова клизања било заступљено повећање интензитета вучне силе (силе трења), као последица повећања интензитета затежућег напона. При таквим околностима је долазило до деформисања трака лима и њиховог прелома, осим код полираних контактних површина. Вредности коефицијената трења за полиране површине су знатно веће у односу на основни материјал (челични лим без превлаке) услед склоности површина мање храпавости ка стварању налепљених слојева. Поред тога, вредности коефицијената трења на крају хода где притисак интензивно опада и тежи нули сматрају се нереалним. То значи да нема стварног контакта лима и клизних елемената па те вредности не треба разматрати. Уобичајено, код промене P4 (сл. 7.98) највише вредности коефицијената трења су на месту најнижег притиска, тј. тамо где притисак има тенденцију да се приближи нули (средина хода). Максималну вредност коефицијента трења треба узети са резервом, јер када притисак тежи нули у реалности значи губитак контакта, на шта је указивано код опадајућих промена притисака.

7.5.2.2. Зависности коефицијената трења од хода приликом уља за дубоко извлачење

Дијаграми коефицијената трења за једнострано поцинковани челични лим добијени у условима подмазивања уљем за дубоко извлачење, приказани су на сликама 7.99 до 7.102. Као што је то био случај и код челичног лима без превлаке, највише вредности коефицијената трења присутне су код опадајућих промена (P1 и P5), као и опадајуће-растуће промене P3. Поред тога, дијаграми притисака који се завршавају опадајућим трендом, су дискутабилни на самом крају хода, због тежње притиска нули. Другим речима, у таквим условима нема стварног контакта лима и контактних елемената, па су вредности коефицијената трења нереалне. С друге стране, посматрајући дијаграме коефицијената трења добијене за промену притиска P1 (сл. 7.99) запажен је утицај лошије комбинације контактних услова (уље са површинама веће храпавости) и високог притиска на почетку процеса. Тај утицај је нарочито изражен код нитрираних површина и превлаке од титан-нитрида преко пораста силе трења (вучне силе) који се манифестује врховима на дијаграму коефицијента трења. Дијаграми коефицијената трења за промену P1 (сл. 7.99) веома подсећају на дијаграме добијене у случају провлачења класичног челичног лима (DC04, сл. 7.89). Вредности коефицијената трења су нешто више због појаве налепљивања цинка на контактним елементима.



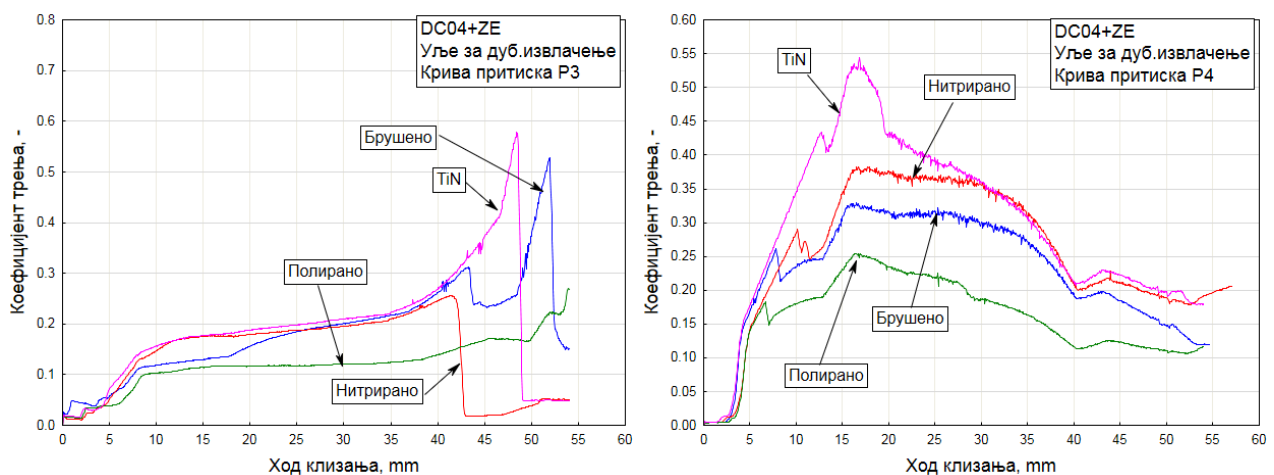
Слика 7.99 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Комбинацијом уља за дубоко извлачење, полираних контактних површина, и растуће експоненцијалне промене притиска P2 (сл. 7.99) добијен је најнижи коефицијент трења од 0.15. Такође, при овој комбинацији триболошких услова појава налепљених слојева је веома мала, а израженија је код површина веће храпавости. Знатно више вредности добијене су за нитриране површине (0.27) и TiN превлаку (0.25), док је код брушених површина коефицијент трења приближно 0.23. На коефицијент трења, као и на вучну силу (силу трења) значајно утичу храпавост површина клизних елемената. Функција постепено расте са порастом вучне силе, осим на самом почетку хода где притисак има мале вредности, а сила расте у складу са условима у контакту. Касније, на преосталом делу хода пораст силе трења прати тренд промене притиска, а разлике

између дијаграма за све четири површине потичу од различитих услова у контакту. Тако код полираних површина, на већем делу хода коефицијент трења има приближно сталан тренд, што говори да је у питању повољна комбинација триболошких услова у контакту и растуће промене притиска. Ово је добар пример преноса зависности притисака на дијаграме коефицијената трења.

Функционална промена P3 (сл. 7.100) је веома осетљива из аспекта управљања трењем преко променљивог притиска у контакту. Завршетак промене је опадајућег карактера, када притисак тежи нули, што управљање процес чини немогућим јер нема реалног контакта па је сувишно говорити о вредностима коефицијената трења при крају хода. Друга неповољна околност су лошији контактни услови у комбинацији са наглим порастом притиска у првој половини хода. Код површина веће храпавости настаје повећање силе трења (преко пораста интензитета затежућег напона) које доводи до деформисања узорка лима и његовог прелома. Примена полиране површине у комбинацији са уљем показује да се погодним избором триболошких услова може смањити интензитет силе трења и остварити пригушење при преносу функционалне промене притиска на дијаграм коефицијента трења. Практично то значи да контактни услови омогућавају да интензитет вучне силе буде низак, тако да се смањивањем притиска у контакту добије мањи однос тих величина, тј. коефицијент трења.

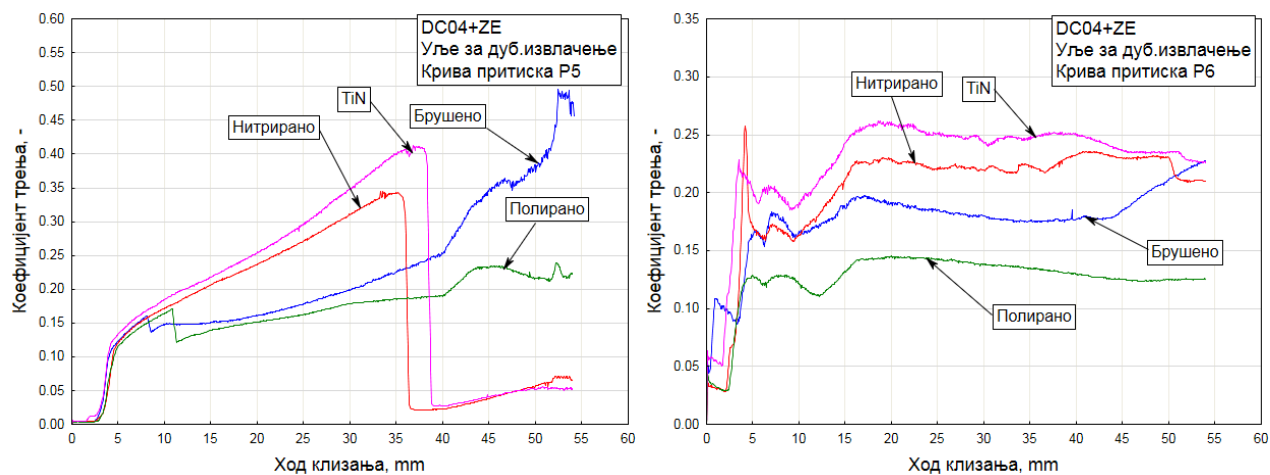
Највиши коефицијент трења код промене P4 (сл. 7.100) заступљен је средини хода, на месту где се притисак приближава најнижој вредности, па ту вредност треба узети са резервом, с обзиром на опадајуће-растући карактер промене и тежње притиска нули (одсуство реалног контакта). Притисци на почетку и на крају промене имају највише вредности, па почетак дијаграма приближно креће из координатног почетка, јер сила постепено расте од најнижих вредности (израз 7.6). За време процеса сила трења наставља да расте због услова у контакту, а притисак опада, при чему њихов однос (коефицијент трења) расте све до половине хода, када притиска почиње да расте много интензивније од пораста вучне силе. Храпавост контактних површина изменљивих клизних елемената веома утиче на вредност коефицијента трења. Највиши коефицијент трења за поцинковани челични лим за полиране контактне површине износи 0.25 при минималном притиску док је просечна вредност око 0.20. Код брушених површина максимални коефицијент трења је нешто виши (0.32), код нитрираних 0.36, а највиши код превлаке од титан-нитрида (0.53), што доста говори о комбинацији контактних услова. Анализирајући дијаграме вучних сила, највиша вредност вучне силе је управо за превлаку од титан-нитрида на средини хода (сл. 7.69), па је пропорционално томе, на том месту и највиши коефицијент трења.



Слика 7.100 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

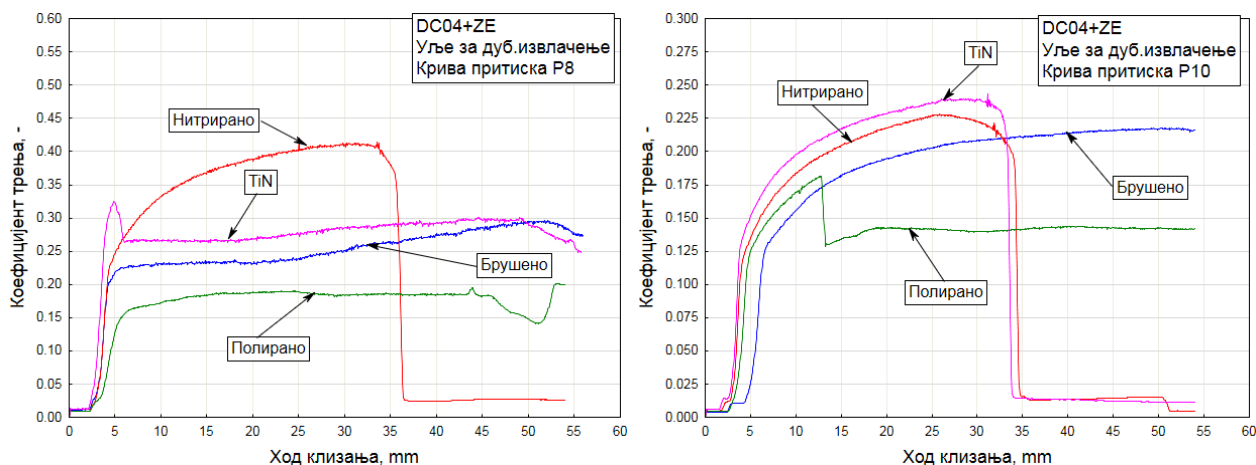
Зависности коефицијената трења добијене за линеарно опадајућу промену P5, приказани су на слици 7.101. Дијаграми за све четири контактне површине су веома слични као код промене P1 (сл. 7.99), с обзиром на опадајући карактер промена. На основу тога, констатације изнете за промену P1 у потуности важе и за промену P5, како из аспекта управљања трењем преко опадајућег карактера функције притиска, тако и из аспекта услова у контакту. Вредности и трендови дијаграма коефицијената трења су приближни добијеним за основни материјал (DC04), при чему је на клизним површинама израженија појава налепљених слојева што је очекивано код лимова са превлаком цинка.

Зависности коефицијената трења за једнострано поцинковани челични лим при растућој промени притиска P6 (сл. 7.101) веома подсећају на зависности добијене за класични челични лим при истим условима, приказане у претходном поглављу. На сличан начин су поређане и зависности вучних сила (сила трења) за све контактне површине. Највиши коефицијент трења заступљен је код превлаке од титан-нитрида (око 0.26), код нитрираних 0.23, код брушених 0.19, а најнижи код полираних површина 0.14. И код поцинкованог челичног лима се показало да комбинација опадајуће промене P6, полираних површина и уља за дубоко извлачење даје најниже вредности коефицијената трења, као што је био случај са дијаграмима вучних сила (сл. 7.70). Као и код промене P2, растући карактер притиска је повољнији из аспекта управљања трењем.



Слика 7.101 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

Дијаграми коефицијената трења при задатим константним притисцима P8 (10 МПа) и P10 (20 МПа) приказани су на слици 7.102. Управљање трењем преко константних вредности притисака је знатно једноставније у односу на функционалне зависности.



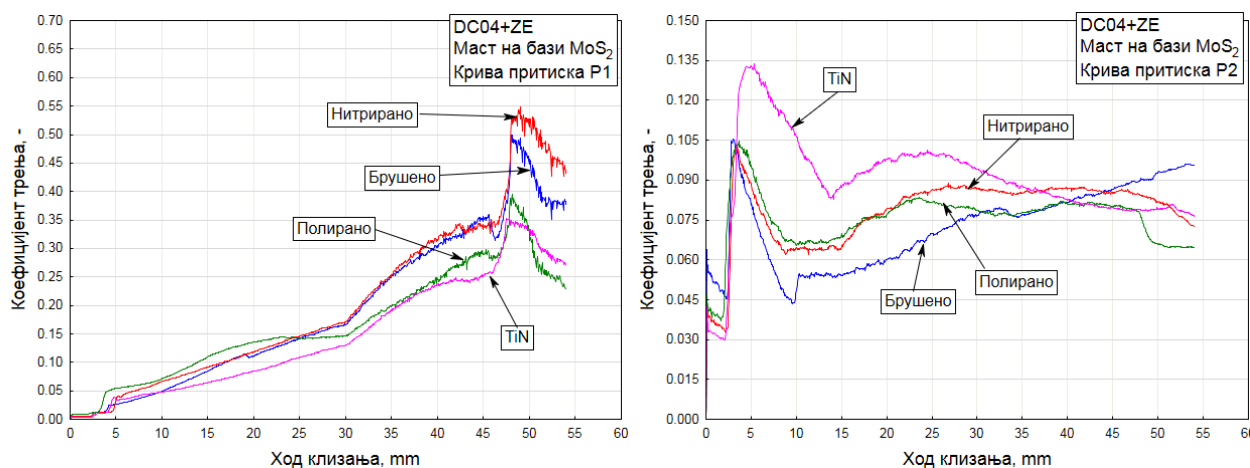
Слика 7.102 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

При мањем константном притиску сила трења као последица дејства притиска и триболошких услова у контакту има мањи интензитет. При већем константном притиску, расте и интензитет силе трења. Међутим већа константна вредност силе држања, односно контактнoг притиска, у комбинацији са површинама веће храпавости и уљем често онемогућава процес клизања. Као последица тога настаје повећање затежућег напона у контакту, при чему у таквим условима нема клизања лима између равних контактних површина, а самим тим и израчунавање коефицијента трења нема смисла. Бољи триболошки услови добијени применом полираних површина (најнижи параметри храпавости) омогућавају процес клизања, осим на самом почетку хода где долази до

краткотрајног деформисања лима услед пораста затежућег напона и постепеног пораста вучне силе. Касније, услед уходавања процеса, опада интензитет затежућег напона и однос вучне силе и притиска остаје приближно константан (промена P10, сл. 7.102). Супротно томе, мањи контактни притисак P8 – 10 МПа (сл. 7.102) утиче на могућност одвијања процеса клизања, за разлику од већег. Већа храпавост превлаке од титан-нитрида се одразила преко највише вредности коефицијента трења (просечно 0.29) и благог затезања на почетку хода (P8, сл. 7.102). Брушене и полиране површине имају најмањи коефицијент трења (просечно 0.25 и 0.19 респективно). Вредности коефицијената трења су нешто више у поређењу са основним материјалом без превлаке, јер је приметна појава налепљивања честица.

7.5.2.3. Зависности коефицијената трења од хода приликом мазиве масти на бази MoS_2

На сликама 7.103 до 7.106 приказани су дијаграми коефицијената трења за једнострано поцинковани челични лим (DC04+ZE) за сва четири типа контактних површина и приликом мазиве масти на бази молибден-дисулфида. Вредности коефицијената трења за челични лим са превлаком су приметно више него што је био случај код испитивања класичног челичног лима без превлаке при истим условима подмазивања (маст на бази MoS_2). Повишена вредност коефицијента трења је резултат скидања слојева цинка са површине лима (посебно при већим контактним притисцима) и налепљивања на контактним површинама клизних елемената.



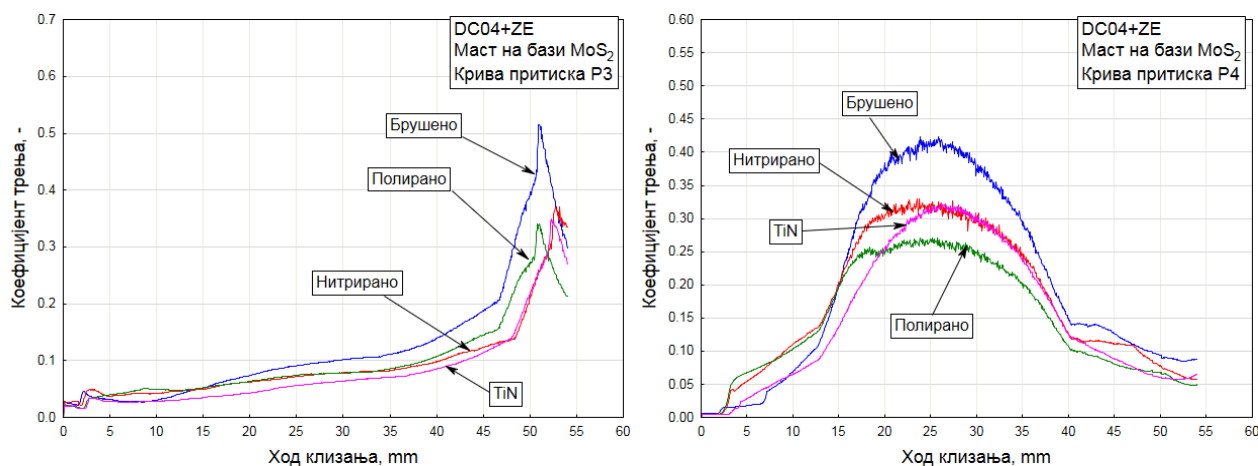
Слика 7.103 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Изузимајући сам крај хода вучења (где притисак тежи нули), код промене P1 (сл. 7.103), може се закључити да су вредности коефицијената трења веома високе код већине површина (од 0.25 до 0.40). Интензивни пораст коефицијента трења, јесте директна последица опадајуће промене притиска и његово приближавање нули. У таквој ситуацији израчунавање коефицијента трења нема значаја, јер нема реалног контакта лима и контактних елемената.

Код подмазивања мазивом машћу на бази молибден-дисулфида, познато је да постоји боље задржавање мазива код површина веће храпавости (нитриране површине и превлаке од титан-нитрида), јер се одређена количина мазива задржава у удубљењима површинске храпавости. То је посебно погодно код опадајућих промена услед високе вредности притиска на почетку хода. Проблем управљања трењем код опадајућих промена присутан је у свим условима, али се одговарајућим избором мазива и контактних површина, могу постићи извесна пригушења у ситуацијама кад притисак интензивно тежи нули. Та пригушења су бољи контактни услови који могу умањити интензитет силе трења (вучне силе), па са мањом вучном силом, биће мањи и коефицијент трења. Анализирајући дијаграме коефицијената трења (промена P1, сл. 7.103) на већем делу хода (осим у последњем делу где притисак интензивно тежи нули), превлака од титан-нитрида има најмањи коефицијент трења (0.25). Нешто виши је код полираних површина (0.29), а највеће вредности су регистроване код нитрираних и брушених површина (приближно 0.35). Вредности коефицијената трења су осетно мање у поређењу са вредностима добијеним приликом уља за

дубоко извлачење. Поред тога, комбинација мазиве масти на бази MoS_2 са полираним и брушеним површинама, доводи до интензивнијег формирања налепљених слојева цинка на контактним површинама. Код ових површина мања су удубљења површинске хрпавости, па самим тим се и мања количина мазива задржава у њима. У таквим условима недовољног подмазивања налепљени слојеви лима или превлаке од цинка са лима се брже стварају.

И код промене притиска P2 (сл. 7.103) заступљене су знатно више вредности коефицијената трења него што је био случај код челичног лима без превлаке (сл. 7.93). Вредности су мање у односу на исти материјал где је као мазиво коришћено уље (претходно поглавље) за већину контактних површина. Просечне вредности за сваку криву (тип површине) се крећу од 0.075 за брушене површине до 0.103 (TiN превлака). Почетни врх код свих дијаграма коефицијената трења промене P2 је присутан у зони најнижег притиска на самом почетку хода вучења. О односу силе трења (вучне силе) и промене притиска растућег типа већ су дата тумачења за основни материјал (без превлаке).

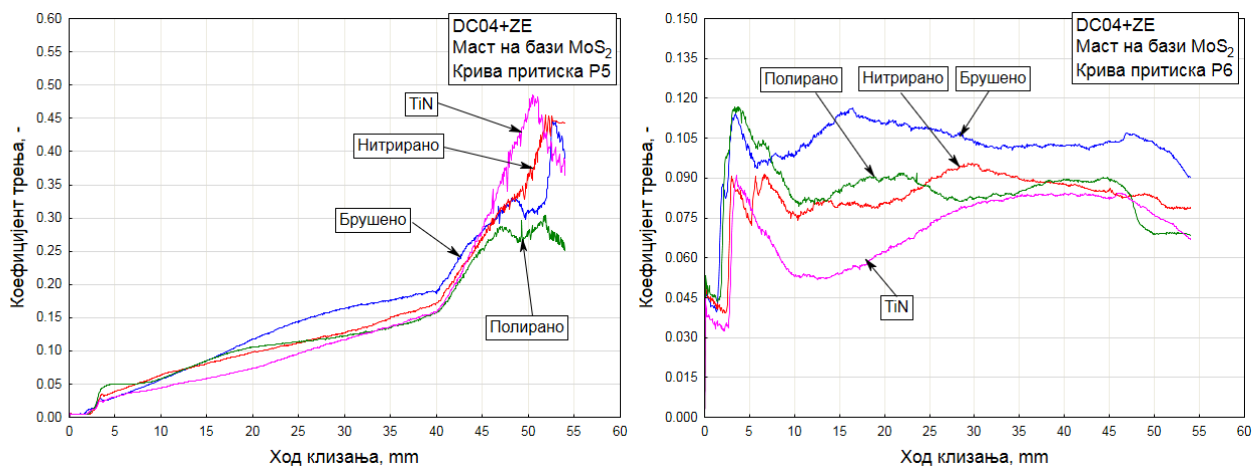


Слика 7.104 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Стварање налепљених слојева цинка и повећање коефицијената трења (у односу на класични челични лим), регистровани су и код промена притиска P3 и P4 (сл. 7.104). Нарочито су налепљени слојеви изражени на површинама мање хрпавости (брушене површине и полиране површине код промена P3 и брушене код промене P4). Вредности коефицијената трења при подмазивању мазивом на бази MoS_2 (промена P3, сл. 7.104) су осетно ниже у односу на вредности коефицијената трења добијене подмазивањем уљем. То је уједно добар пример пригушења, тј. смањивања силе трења, побољшањем услова у контакту, при чему се ублажава проблем управљања трењем код промене која се завршава опадајућим карактером. Код промене P3 максимална вредност коефицијента трења се може узимати до приближно 47 mm хода, тј. до тренутка када притисак почиње интензивно да опада до веома ниских вредности тежећи нули, при чему би израчунавање коефицијента трења изгубило смисао, јер нема реалног контакта између лима и клизних елемената ($p_D \rightarrow 0$). На основу тога максимална вредност коефицијента трења за брушене површине износи нешто више од 0.2, за полиране 0.16, а за нитриране површине и превлаку од титан-нитрида приближно 0.12.

Расподела коефицијената трења за промену P4 веома подсећа на дијаграме добијене за случај вучења челичног лима без превлаке при истим условима (сл. 7.94), с том разликом што су за све контактне површине вредности коефицијената трења значајно увећане (брушене површине чак до 0.40). Максималне вредности коефицијената трења (на средини хода) треба узети са резервом, јер притисак до половине хода интензивно опада и тежи нули, док вучна сила прати опадање притиска, али мањим интензитетом него што притисак опада. Другим речима, однос силе трења (вучне силе) је висок, јер се притисак приближава нули, па је на средишњем делу хода коефицијент трења нералан, што чини потешкоћу код преноса променљивих зависности притисака на дијаграме коефицијената трења у циљу управљања трењем.

С друге стране налепљени слојеви цинка на површинама мање хрпавости код промене P4 додатно утичу на повећање отпора клизања (силе трења, тј. вучне силе), па коефицијенти трења имају веће вредности у односу на основни материјал без превлаке.

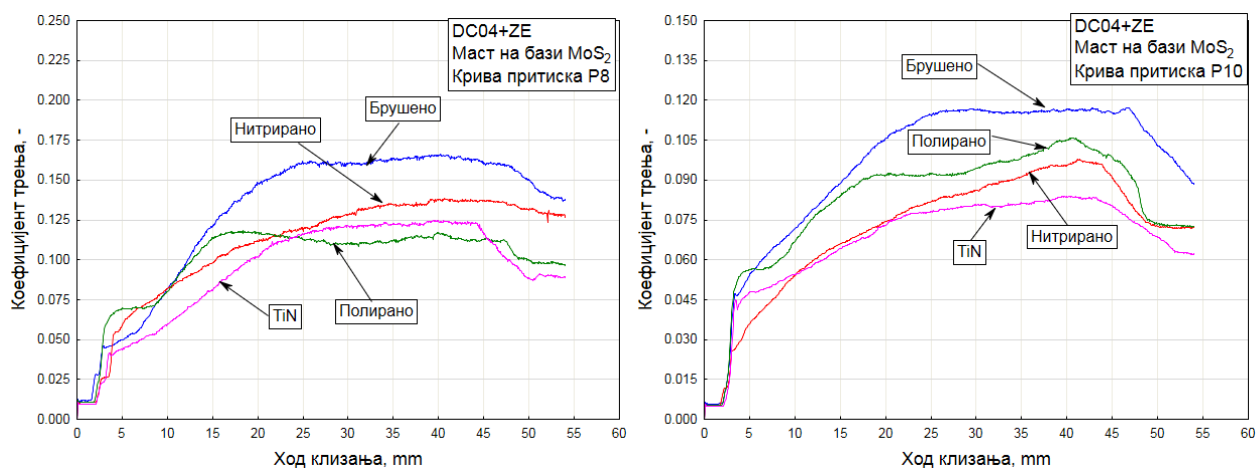


Слика 7.105 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

На веома сличан начин као код lima DC04 (сл. 7.95) дата је расподела дијаграма коефицијената трења за лим са превлаком од цинка (DC04+ZE) за промену притиска P5, према слици 7.105. Слична констатација као за промену P1 (сл. 7.103) важи за промену P5 јер је у питању опадајући карактер промене, где се притисак приближава нули, па се у том случају не могу разматрати вредности коефицијената трења. Међутим, има смисла разматрати коефицијент трења до дела хода када притисак још увек има реалне вредности (знатно веће од нуле), што је на дијаграму приказано наглим скоком коефицијента трења. То је, по слободној процени до 45 mm хода.

Код линеарно растуће промене притиска P6 (сл. 7.105) доминантан је утицај стања контактних површина за време процеса вучења. Присутне су јасне разлике између дијаграма коефицијената трења за сваку од површина. Коефицијент трења је управо највећи код брушених и полираних површина, за које се показало да су склоне стварању налепнина у комбинацији са мазивом на бази молибден-дисулфида. Вредности су осетно веће у поређењу са истим материјалом без превлаке (сл. 7.95), а мање у односу на исти материјал са превлаком за случај подмазивања уљем. Код ове растуће промене је присутна директнија веза вучне силе и притиска, тј. пораст вучне силе прати постепени пораст притиска, па је у том смислу погодније управљати процесом трења него код опадајућих промена. На самом почетку дијаграма (промена P6, сл. 7.105) заступљен је нагли скок вучне силе, услед отпора који је одређен условима у контакту, а притисак у том тренутку још увек има релативно ниску вредност.

Склоност ка стварању налепнина је уочљива и код константних притисака P8 и P10 (сл. 7.106), посебно при вишем притиску. Коефицијент трења је повишен код површина мање храпавости, које имају мању способност задржавања мазива у контакту. То су брушене и полиране површине.



Слика 7.106 Зависности коефицијената трења од хода при условима: DC04+ZE лим, мазива маст на бази MoS_2 , константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Код нижег притиска P8 коефицијент трења за брушене површине износи максимално 0.169, док код вишег притиска P10 износи 0.119. Разлог томе је обрнута пропорционалност притиска и коефицијента трења, сходно обрасцу (7.6), о чему је већ било говора. То важи и за максималне коефицијенте трења преостала три типа површина (нитриране: 0.140 код P8 и 0.095 код P10; полиране 0.122 за P8 и 0.105 за P10; TiN превлака 0.125 код P8 и 0.081 код P10). Код вишег константног притиска је већи отпор кретању па у складу са тим вучна сила има знатно већу вредност него код нижег притиска. На основу тога заступљен је и већи однос вучне силе и притиска (коефицијент трења).

7.5.3. Резултати за лим од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)

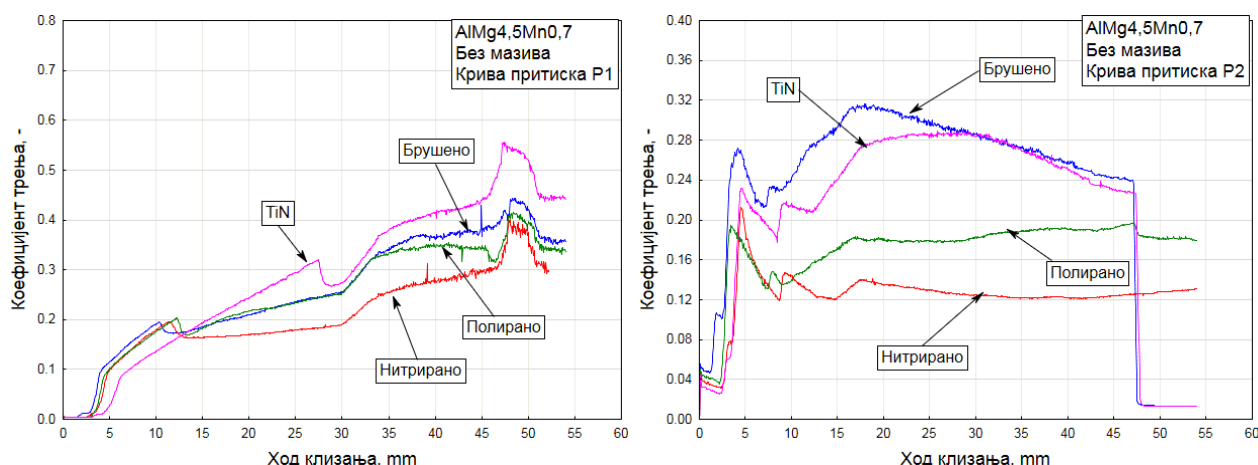
Поред дијаграмских зависности стварних притисака у контакту и вучних сила, који су већ приказани и тумачени за узорке лима од алуминијумске легуре, у циљу потпунијег сагледавања понашања овог материјала за време обликовања, биће приказани и дијаграми коефицијената трења (слике 7.107 до 7.116). У поређењу са челичним лимовима (DC04 и DC04+ZE) коефицијенти трења за већину промена притисака при различитим контактним условима углавном имају мање вредности. Поред веома добре деформабилности овог лима и нижег коефицијента трења, присутни су, као што је већ указано, проблеми са стварањем налепљених честица мекшег алуминијума на тврђе контактне површине изменљивих контактних елемената. Нарочито неповољна комбинација јесте примена мазива на бази молибден-дисулфида и полираних контактних површина, што је већ истакнуто у поглављу о резултатима зависности вучних сила. Та појава се манифестовала повећањем интензитета вучне силе или силе трења, а тиме и повећањем коефицијента трења. Изражена је нарочито код опадајућих промена притисака, када притисак на почетку хода има највишу вредност. Поред тога, код промена које се завршавају опадајућим трендом, притисак нагло тежи нули, што резултује нерелним вредностима коефицијената трења (као и код челичног лима). Повећање коефицијента трења на полираним површинама уз присуство мазива на бази MoS₂, као резултат настанка налепнина, може се утемељити испитивањем површинске храпавости за конкретне случајеве (поглавље 7.6). Значајно је и упоређивање параметара храпавости провлачених узорака лима и недеформисаних узорака.

7.5.3.1. Зависности коефицијената трења од хода при сувим контактним површинама

На сликама 7.107 и 7.108 приказани су дијаграми коефицијената трења за случај провлачења без подмазивања. Приметно је да су вредности коефицијената трења лима од Al легуре у већем броју случајева ниже него код челичног лима (са превлаком и без превлаке). Један од разлога су нижи параметри храпавости овог лима у односу на челични. Поред тога, алуминијумски лимови имају бољу обрадивост дубоким извлачењем. У већем броју случајева није долазило до великог пораста интензитета вучне силе (силе трења) који би доводио до деформисања узорака лима услед отежаних услова клизања, што је код челичних лимова било знатно заступљеније. То се посебно види на дијаграму промене P1 (сл. 7.107) где коефицијенти трења за Al лим имају ниже вредности у односу на челични лим. И у овом случају коефицијенти трења на самом крају хода имају нерелне вредности због опадајућег карактера промене P1. У реалности, када је вредност притиска нула или близу нуле упућује на то да нема стварног физичког контакта лима и контактних елемената. Без реалног контакта нема процеса клизања, па коефицијент трења не треба разматрати. То је основни проблем код свих материјала где се примењује промена притиска која се завршава опадајућим карактером.

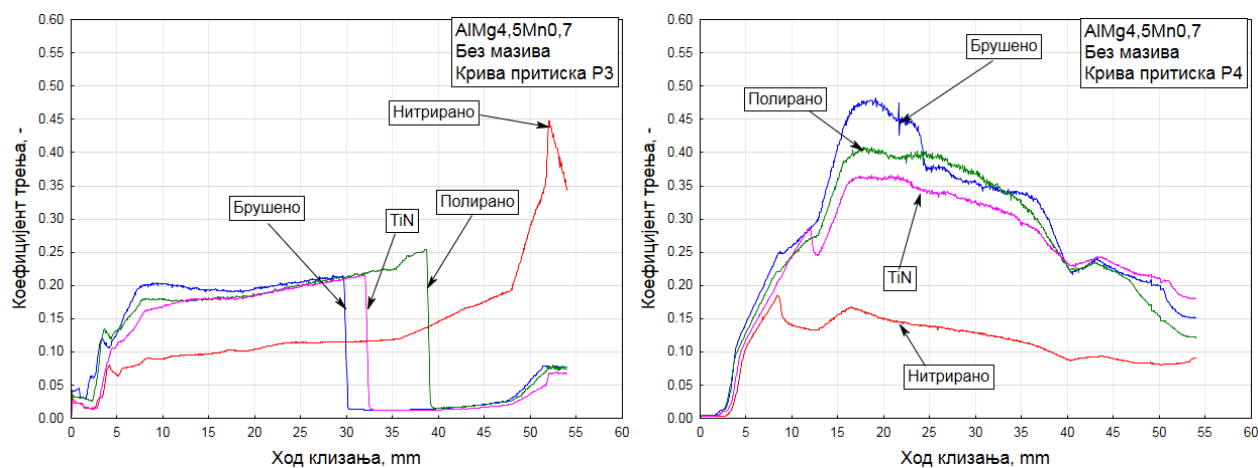
Код површина мање храпавости (брушене и полиране површине) достигнуте су више вредности коефицијената трења од нитрираних површина, што јасно показује да је у условима без подмазивања појачана склоност ка стварању налепљених слојева површина мање храпавости. И код промене P2 (сл. 7.107) коефицијенти трења достижу потпуно очекиване вредности за ову врсту лима, с обзиром на то да се ради о условима без присуства мазива у контакту. Због постепено растуће промене притиска, појава налепнина је мање изражена код полираних површина него што је то био случај код опадајуће промене P1. Реч је о постепеном порасту притиска и силе трења, при чему је управљање трењем преко променљивог притиска у потпуности могуће, за разлику од опадајуће промене. У таквим условима појава налепнина је знатно мање изражена у односу промене притиска опадајућег тренда. Максимални коефицијент трења за брушене површине износи 0.31, за

полиране површине 0.19, а код нитрираних око 0.15 (изузимајући нагли пораст на почетку хода због ниског почетног притиска и пораста силе трења).



Слика 7.107 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, без мазива, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Код промене P3 (сл. 7.108) као и код претходна два типа материјала, заступљене су тешкоће у преносу променљивог притиска на дијаграм коефицијента трења и на тај начин је било отежано управљање процесом трења. У питању је промена која се завршава опадајућим трендом, при чему је пад притиска интензивнијег карактера (друга половина хода) у односу на чисто опадајуће промене. То је случај кад притисак интензивно тежи нули, па коефицијент трења нема смисла разматрати. Код промене P3 притисак је нагло порастао у првој половини хода, што је довело до отежаних услова клизања, у условима без подмазивања, па се интензитет силе трења нагло повећао. Резултат тога је деформисање и прелом узорака лима. Прелом није наступио једино код нитрираних површина, јер се показало да овај тип површина има најмању склоност ка стварању налепнина. Код промене P3 при истим условима, разарање структуре је било присутно и за оба типа челичног лима.



Слика 7.108 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, без мазива, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

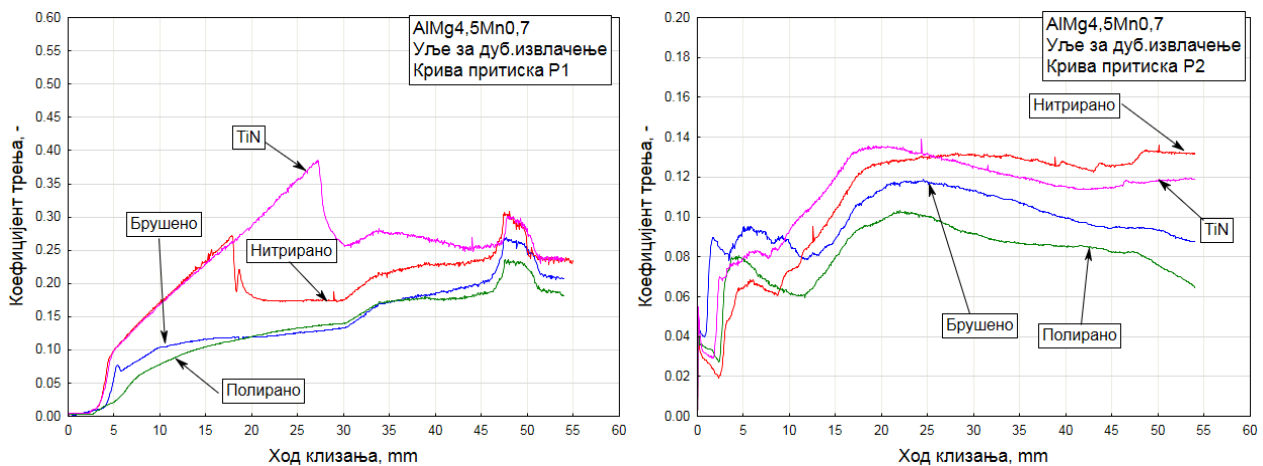
Код промене P4 јасно се види склоност ка стварању налепнина на површинама мање храповости: полираним и брушеним, а коефицијенти трења на дијаграмима достижу максималне вредности 0.40 и 0.48 за поменуте површине респективно. У вези поменутих максималних вредности треба рећи да су добијене на делу хода где притисак P4 има најнижу вредност, тј. тежи нули, с обзиром на то да се ради о комбинованој опадајуће-растућој функционалној зависности притиска. На основу тога ове максималне вредности треба узети са резервом. На почетку хода коефицијент трења расте (пропорционално порасту вучне силе, тј. силе трења) због отежаних услова клизања при максималном почетном притиску. Мању склоност ка стварању налепнина (што је више пута показано код тумачења дијаграма вучних сила и стварних притисака у контакту) имају

нитриране површине и превлака од титан-нитрида. То се директно манифестује нижом вредношћу коефицијента трења, јер су бољи услови клизања са мањим слојевима налепљених честица алуминијума.

7.5.3.2. Зависности коефицијената трења од хода примене уља за дубоко извлачење

Вредности коефицијената трења добијене за случај провлачења узорка лима од алуминијумске легуре примене уља за дубоко извлачење имају приметно мање вредности, у поређењу са челичним узорцима са и без превлаке при истим условима. Лим од алуминијумске легуре познат по добрим својствима пластичности има мању површинску храпавост у поређењу са челичним. Комбинација уља за дубоко извлачење и контактних површина мање храпавости (брушене и полиране површине) утиче на побољшање контактних услова и смањење појаве налепљивања честица. Код површина веће храпавости (нитриране површине и превлака од титан-нитрида), појава налепнина при подмазивању уљем знатно је израженија. То се може уочити преко дијаграма вучних сила и коефицијената трења. Најниже вредности коефицијената трења добијене су код растућих промена притисака, јер притисак и вучна сила постепено расту, што повољно утиче на услове клизања. Супротно је заступљено код опадајућих промена, јер висока вредност притиска на почетку хода може истиснути мазиво у контакту, па је трење израженије. Зато вучна сила (сила трења), као отпор кретању, нагло расте. Неповољна околност код опадајућих промена је из аспекта управљања трењем преко задавања опадајуће промене притиска или промене која се завршава опадајућим карактером. Познато је да када притисак на клизним елементима тежи нули или је приближан нули значи да је остваривање реалног контакта између лима и клизних елемената доведено у питање. У вези с тим, је и израчунавање коефицијента трења сувишно и нема смисла, јер нема контакта и клизања. То је, генерално, проблем код свих материјала, односно у свим случајевима где је примењена опадајућа промена (P1, P5) или растуће-опадајућа промена (P3). Тај недостатак се само делимично може надоместити (пригушити) бољим контактним условима, који не утичу на нагло повећање силе трења. С обзиром на то да притисак тежи нули, пожељна је што мања вредност вучне силе (мањи отпор кретања), како би однос (коефицијент трења) био што мањи. То се делимично постиже код лимова мање површинске храпавости, као што је алуминијум.

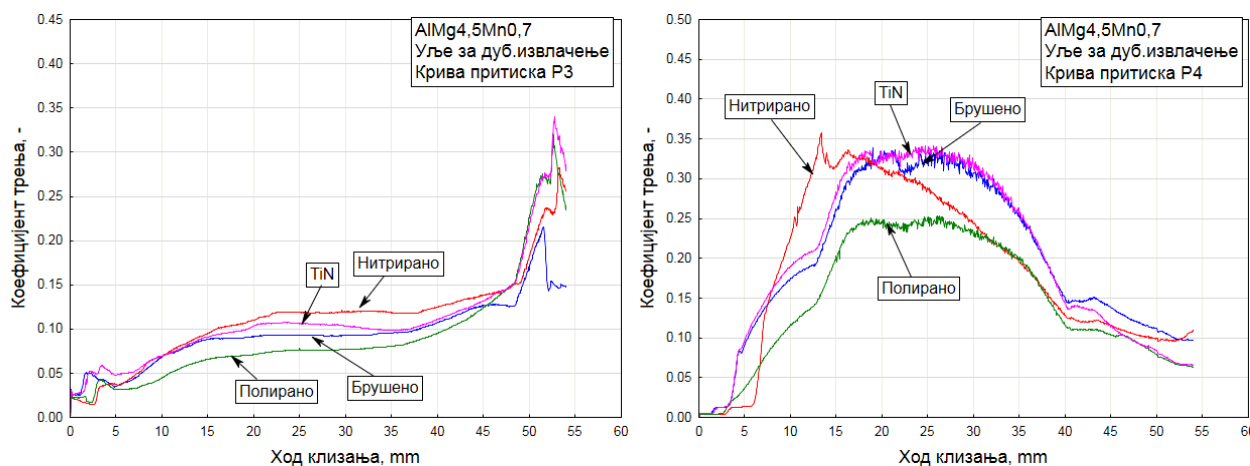
Коефицијенти трења имају мање вредности код брушених и полираних површина, за случај промене P1 (сл. 7.109). Разлог томе је поменута боља комбинација контактних услова (уље и површине мање храпавости). Код нитрираних површина и TiN превлаке процес клизања је завршен деформисањем и преломом лима, због пораста вучне силе (силе трења) услед лошијих контактних услова. Вредности коефицијената трења које су добијене за полиране и брушене површине при крају хода нису релевантне, јер је реч о вредностима притисака које се приближавају нули и где нема стварног контакта и клизања лима. У односу на челични лим, вредности коефицијената трења су значајно ниже, јер је мањи интензитет вучне силе због бољих контактних услова.



Слика 7.109 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Код промене притиска P2, утицај храпавости површина при подмазивању уљем долази до изражаја. Највише вредности коефицијената трења имају нитриране површине и превлака од титан-нитрида (од 0.13 до 0.14) а најмање брушене површине (максимално 0.12) и полиране површине (максимално 0.10). Код челичних лимова биле су заступљене приметно више вредности. Треба додати да су код свих растућих промена бољи аспекти управљања трењем у односу на опадајуће промене, због равномерног пораста вучне силе и притиска.

Нижи коефицијенти трења за узорке алуминијумског лима, при подмазивању уљем у односу на челичне лимове заступљени су и код растуће-опадајуће промене притиска P3 (сл. 7.110). Као што је познато, промена се завршава интензивно опадајућим трендом (од половине до краја хода), па с обзиром на тежњу притиска нули, добијене су нереалне вредности коефицијената трења. То су вредности на дијаграму које имају скоковит тренд. Одбацујући вредности добијене при нереално ниском притиску који се интензивно приближава нули, просечне вредности коефицијената трења према типу површине износе: нитриране површине 0.13, TiN превлака 0.105, брушене површине 0.09 и полиране површине 0.075. И код промене притиска P4 (сл. 7.110) коефицијент трења је значајно нижи у односу на узорке од челичног лима са и без превлаке, који су разматрани у претходним поглављима. Максималне вредности су добијене у делу хода где је притисак најнижи и тежи нули, па их треба узети са резервом, јер кад се притисак приближава нули нема стварног контакта. Тај тренутак траје релативно кратко, на мањој дужини хода, и представља критичан моменат из аспекта управљања трењем, односно преношења карактера функција притисака на дијаграме коефицијената трења.

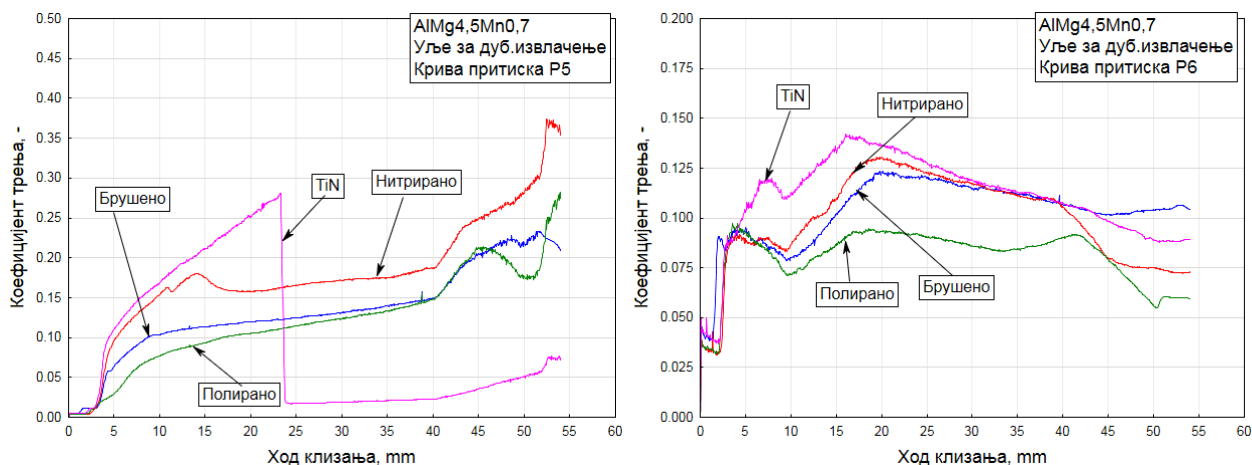


Слика 7.110 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Коефицијент трења код промене P5 (сл. 7.111) на већем делу хода, има приближно линеарни пораст. Такав тренд је у вези са линеарном карактеристиком функционалне промене притиска P5, с тим што је у питању опадајући тренд. Слично важи и за експоненцијално опадајућу промену P1. На самом почетку хода притисак опада од максималне вредности, а вучна сила на почетку процеса расте. Даљим опадањем притиска и порастом вучне силе као отпора кретању, расте њихов однос, тј. коефицијент трења (израз 7.6). Пораст коефицијента трења има смисла све док притисак не опадне до вредности које не гарантују поуздану силу држања и уопште контакт клизних елемената и лима. Зато се доводи у питање смисао вредности коефицијената трења на крају хода. Просечне вредности коефицијената трења за промену P5 (сл. 7.111) одговарају приближно вредностима на средини хода и нешто су веће у односу на експоненцијално опадајућу промену P1 (сл. 7.109). Коефицијент трења за брушене и полиране површине има веома блиску просечну вредност (приближно 0.125 на средини хода), а веће вредности су заступљене код нитрираних површина (просечно 0.175) док је код превлаке од титан-нитрида услед лошијих услова у контакту наступило разарање узорка лима.

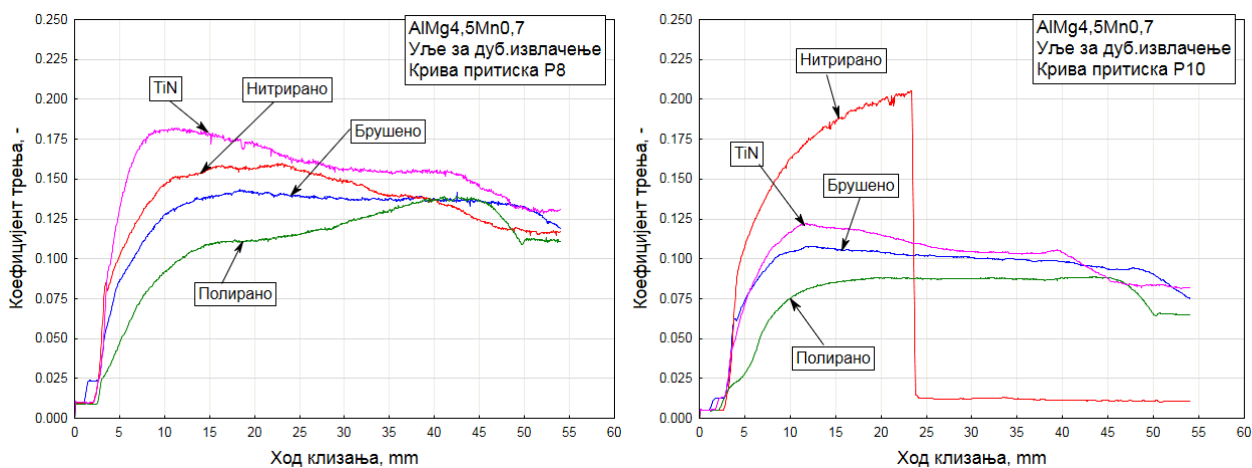
Релативно ниске вредности коефицијената трења заступљене су код промене P6 (сл. 7.111), као резултат постепеног линеарног пораста притиска и вучне силе. У прилог томе иде комбинација површина мање храпавости (брушене и полиране) и уља за дубоко извлачење. Када је у питању примена уља за дубоко извлачење, више пута се показало да полиране површине имају најниже вредности коефицијената трења (0.090) и мању склоност ка налепљивању честица од осталих површина. Са узорцима од алуминијумске легуре, те вредности су сада још ниже него што је то био

случај код челичних лимова. Највиша вредност коефицијента трења је уобичајено код превлаке од титан-нитрида (око 0.140), а нешто ниже вредности коефицијената трења су код нитрираних (0.128) и брушених површина (0.124).



Слика 7.111 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

Ниже вредности коефицијената трења заступљене су и код вредности притисака P8 и P10 (сл. 7.112), у односу на челичне лимове. Коефицијенти трења имају веће максималне вредности код нижег притиска P8, због обрнуте пропорционалности и те вредности се крећу у распону од 0.130 за полиране површине до 0.177 за превлаку од титан-нитрида. За нитриране површине износе 0.155 а нешто ниже су за брушене површине 0.140. Код већег константног притиска P10 распон максималних коефицијената трења се креће од 0.081 за полиране површине, до 0.124 за TiN превлаку. Брушене површине обезбеђују максимални коефицијент трења од 0.108, док је лом узорка наступио при провлачењу лима између нитрираних контактних површина услед пораста вучне силе.

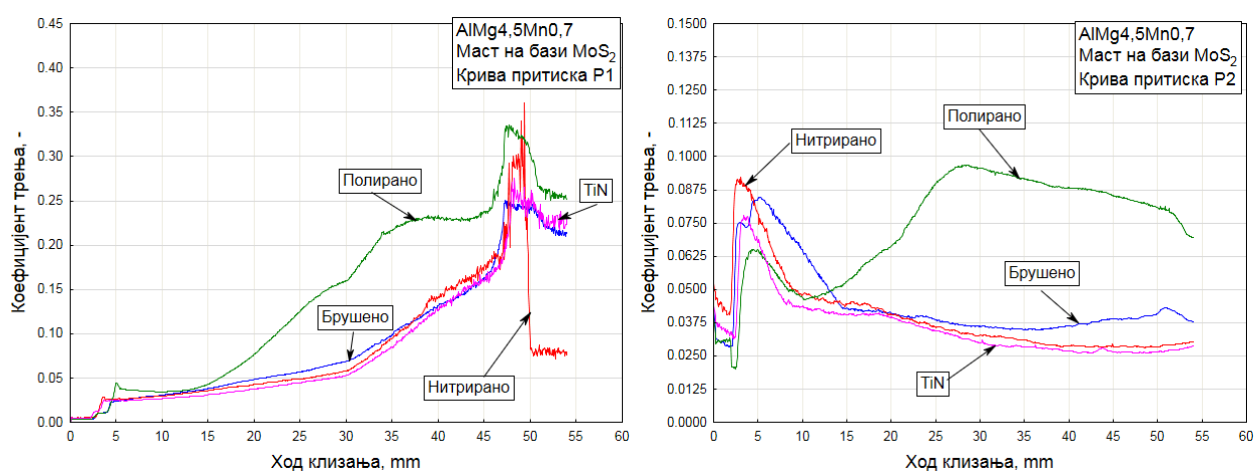


Слика 7.112 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, уље за дубоко извлачење, константни притисак P8 (лево), константни притисак P10 (десно)

Већи коефицијент трења код нижег константног притиска P8 (10 МПа) у односу на притисак P10 (20 МПа) јесте резултат већег односа вучне силе (силе трења) и константног притиска. Код вишег притиска отпор кретања је значајно ублажен триболошким условима у контакту, па пораст вучне силе није двоструко већи као вредност притиска. Да би коефицијент трења био већи код притиска P10, вучна сила мора више од два пута да буде већа него што је код нижег притиска. Како то није постигнуто, закључак је да триболошки услови у контакту ублажавају пораст вучне силе и имају знатно већи утицај на процес клизања лима у односу на константни притисак, осим код нитрираних површина где клизање није било могуће, због пораста затезућег напона и преласка силе трења у затезну силу.

7.5.3.3. Зависности коефицијента трења од хода применом мазиве масти на бази MoS_2

Код процеса провлачења лима од алуминијумске легуре у комбинацији са мазивом машћу на бази молибден-дисулфида, заступљен је проблем стварања налепнина код контантних површина мање храпавости. Такве површине су, пре свега, полиране а делимично и брушене. Већ је указано на релативну малу способност задржавања мазива на бази MoS_2 код полираних површина, за случај провлачења лима од алуминијумске легуре. На дијаграмима вучних сила се то манифестовало несразмерним повећањем вучне силе за полиране површине (слике 7.82 до 7.85). Потпуно иста манифестација је заступљена код дијаграма коефицијента трења, где коефицијент трења за полиране површине има знатно веће вредности у поређењу са осталим контактним површинама (слике 7.113 до 7.116). Овај проблем је, знатно мање израженији приликом коришћења уља за дубоко извлачење. С друге стране, присутан је проблем одређивања реалних вредности коефицијената трења код промена притисака које се завршавају опадајућим трендом (промене P1, P3 и P5) на шта је већ указивано. У том случају трењем је могуће управљати до тренутка када притисак опадне толико да се остваривање контакта лима и клизних елемената доводи у питање. То су вредности које су блиске нули. На дијаграмима се тај моменат манифестује наглим скоком коефицијента трења.



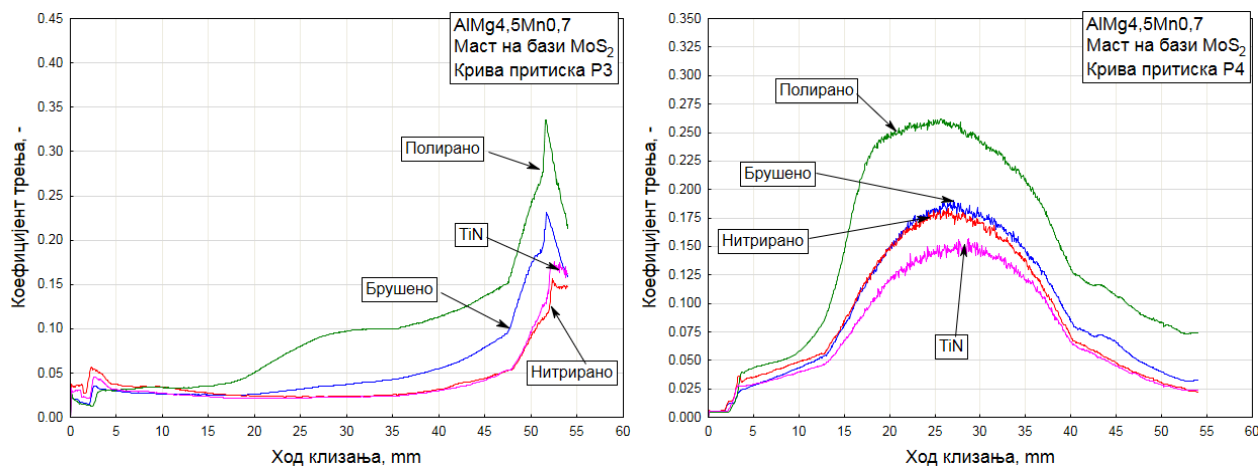
Слика 7.113 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS_2 , крива притиска P1 (лево), крива притиска P2 (десно)

Анализирајући сваки од наведених дијаграма, може се закључити да коефицијенти трења имају веома блиске вредности за нитриране површине и превлаку од титан-нитрида код свих промена. Криве се готово идеално поклапају, а разлог за то су површине знатно веће храпавости од полираних које имају веома добру способност задржавања мазива у контакту. Анализирајући промену P1 (сл. 7.113), коефицијент трења код полираних површина достиже вредност преко 0.25. Та вредност је мања код промене P2 због растућег карактера и постепеног пораста притиска, и достиже максималних 0.096. Код свих дијаграма материјала и мазива коефицијенти трења су мањи код растућих промена него код опадајућих. Један од разлога је нагло опадање притиска код опадајућих промена и отежано управљање процесом трења у таквим случајевима. Други разлог је уједначен пораст притиска праћен постепеним порастом вучне силе код растућих промена. При таквим условима, када притисци расту од најнижих вредности, већа количина мазива остаје на површинама контактних елемената (нарочито површине ниже храпавости, нпр. полиране).

Код промене P3 (сл. 7.114), која се завршава опадајућим трендом и када притисак тежи нули у другој половини хода, вредности коефицијената трења губе смисао. Тај проблем постаје израженији услед додатног повећања вучне силе (силе трења) у случају појаве налепљивања честица алуминијума код полираних површина. Повољнија ситуација заступљена је код нитрираних површина и TiN превлаке (површине веће храпавости), јер се услед бољих контактних услова смањује сила трења, па је сразмерно томе и мањи однос силе трења и притиска, односно коефицијент трења. То је добар пример како се адекватним избором триболошких услова може утицати на интензитет вучне силе (силе трења) и коефицијент трења посредно, и ублажити проблем преношења опадајућих промена притисака на дијаграме вучних сила и коефицијената трења.

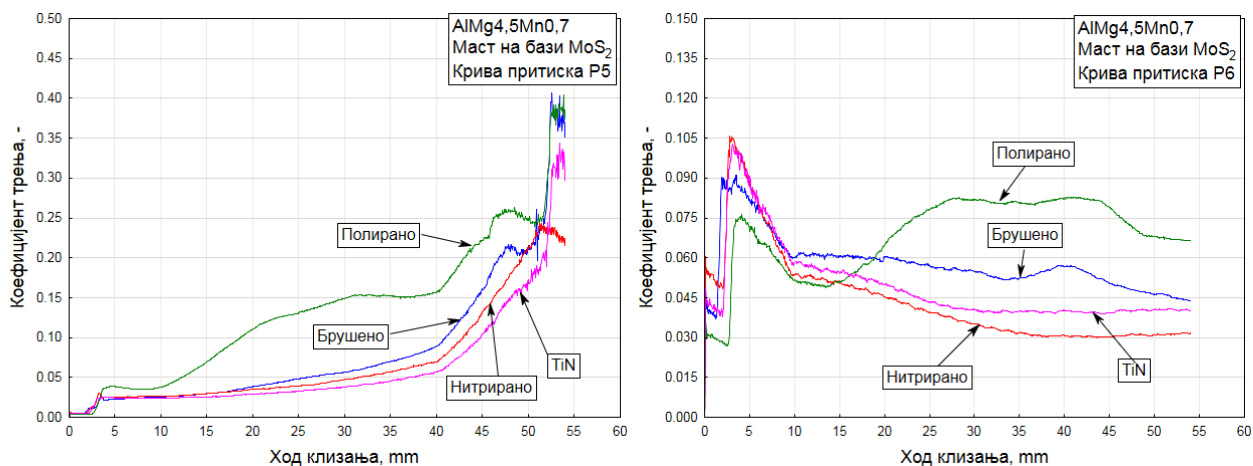
Постизањем оваквих пригушења у преносу променљивог притиска на силу трења значајно се доприноси управљању процесом трења.

Знатно више вредности коефицијената трења за полиране површине заступљене су и код промене P4 (сл. 7.114). Основни разлог је формирање налепљених слојева и повећање силе трења, посебно на делу хода где притисак достиже најнижу вредност. Проблем тежње притиска нули и остваривања реалног контакта лима и клизних елемената је присутан код свих типова површина, али је појава налепљених слојева мање изражена. Лошији услови у контакту утичу на повећање интензитета вучне силе при чему се однос силе трења и притиска додатно увећава, поред наглог опадања притиска ($p_D \rightarrow 0$).



Слика 7.114 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притиска P3 (лево), крива притиска P4 (десно)

Код линеарних промена P5 и P6 (сл. 7.115) коефицијенти трења имају веома сличне вредности као код експоненцијалних промена P1 и P2 (сл. 7.113). Проблем налепљивања честица алуминијума на полиране површине је и овде јасно изражен. Већ је наведено да површине мање храпавости имају већи афинитет ка стварању налепнина. Поред тога, код линеарно опадајуће промене присутан је проблем одређивања реалних вредности коефицијената трења, у ситуацији када притисак тежи нули. Лошији контактни услови који проузрокују повећање силе трења, само додатно отежавају проблем код опадајућих промена. У поређењу са челичним лимовима, коефицијент трења је нижи код промене P5 при истим условима, због мање површинске храпавости алуминијумског лима. Код линеарно растуће промене P6 заступљене су релативно ниске вредности коефицијената трења. Изузимајући сам почетак хода, где притисци достижу ниске почетне вредности, а сила трења расте услед контактних услова, најниже коефицијенте трења имају нитриране површине и TiN превлака, а највише брушене и полиране површине. То је очекивано због поменутог афинитета површина мање храпавости ка налепљивању честица.

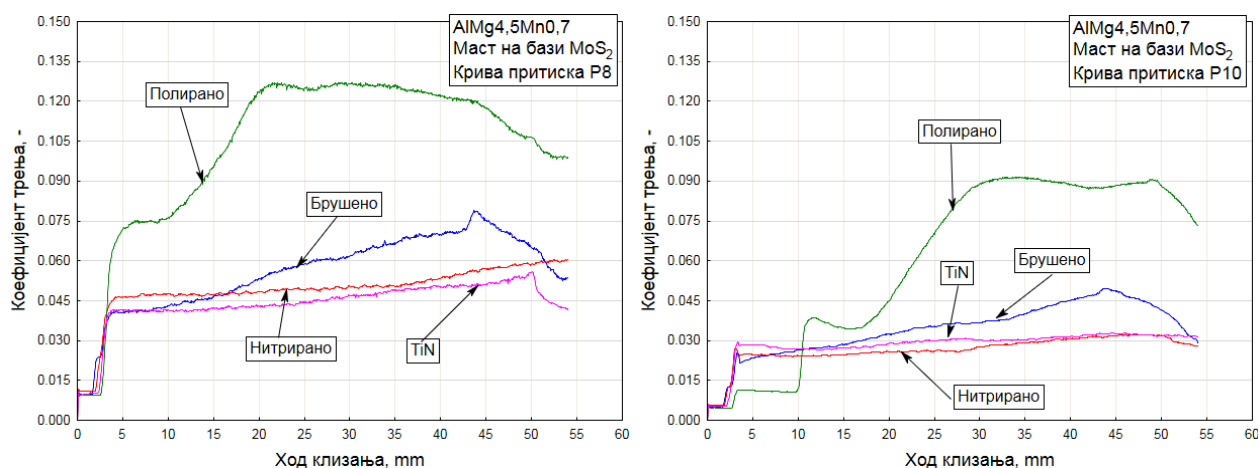


Слика 7.115 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS₂, крива притиска P5 (лево), крива притиска P6 (десно)

Посматрајући све дијаграме коефицијената трења за промену Р6, може се закључити да су вредности добијене за сваку површину веома ниске и прихватљиве из аспекта управљања трењем у процесу клизања (свака вредност је доста нижа од 0.1), иако се крива за полиране површине издваја као резултат стварања налепнина. Слична констатација се може извући и код константних вредности притисака Р8 и Р10 (сл. 7.116). Најнижи коефицијент трења заступљен је код вишег притиска Р10 (20 МПа), због мањег односа силе трења и притиска у контакту, па за нитриране површине и превлаку од титан-нитрида износи свега 0.030, док је за брушене површине нешто већи (0.047), а највећи код полираних површина (0.090) због присутног налепљивања честица алуминијума на полиране површине.

Више вредности коефицијената трења су заступљене код нижег константног притиска Р8, због већег односа силе трења и притиска, па је за нитриране површине и превлаку од титан нитрида око 0.050, за брушене површине 0.076 и за полиране 0.125.

Проблем стварања налепнина додатно је истражен испитивањем површинске хрпавости за сваки од случаја значајног повећања вредности вучних сила и коефицијената трења у поглављу 7.6.



Слика 7.116 Зависности коефицијената трења од хода при условима: Al лим, мазива маст на бази MoS_2 , константни притисак Р8 (лево), константни притисак Р10 (десно)

7.6. Параметри хрпавости и микрофотографије површина лима после провлачења

Испитивање површинске хрпавости, као и израда микрофотографија лима после провлачења, обављено је на одређеном броју узорака, код којих је примећен пораст вредности вучних сила, а нарочито коефицијената трења. Анализом параметара хрпавости на узорцима лима после процеса провлачења може се сагледати утицај триболошких услова у контакту (мазиво, тип површине, врста лима) и задатих промена притисака.



Слика 7.117 Изглед уређаја „Talysurf“ (а), мерење хрпавости на узорку лима (б)

Појава налепнина је истраживана мерењем храпавости на контактним елементима пре и после провлачења, а резултати су дати у табелама од 7.5 до 7.12 (поглавље 7.2). Налепнине настају једино на контактним елементима јер су то површине знатно веће тврдоће од трака лимова коришћених у експерименту. Испитивање површинске храпавости је обављено у Лабораторији за трибологију Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу. У питању је уређај марке „Talysurf“, британске компаније “Taylor & Hobson“ са компјутерском аквизицијом података. Изглед уређаја приказан је на слици 7.117а, док је поступак мерења приказан на слици 7.117б. Микрофотографије површина израђене су на оптичком инвертном микроскопу марке „OLYMPUS GX41“, са максималним увећањем 1000 пута. Приликом снимања узорака коришћено је увећање од 100×, што је у потпуности задовољило потребе овог истраживања. На слици 7.118 приказан је коришћени оптички микроскоп. Узорци за ову анализу одмашћивани су уљним разређивачем и очишћени ацетоном у завршној фази. Испитивања на микроскопу спроведена су на Факултету техничких наука у Косовској Митровици.



Слика 7.118 Изглед оптичког микроскопа „OLYMPUS GX41“ са максималним увећањем до 1000×

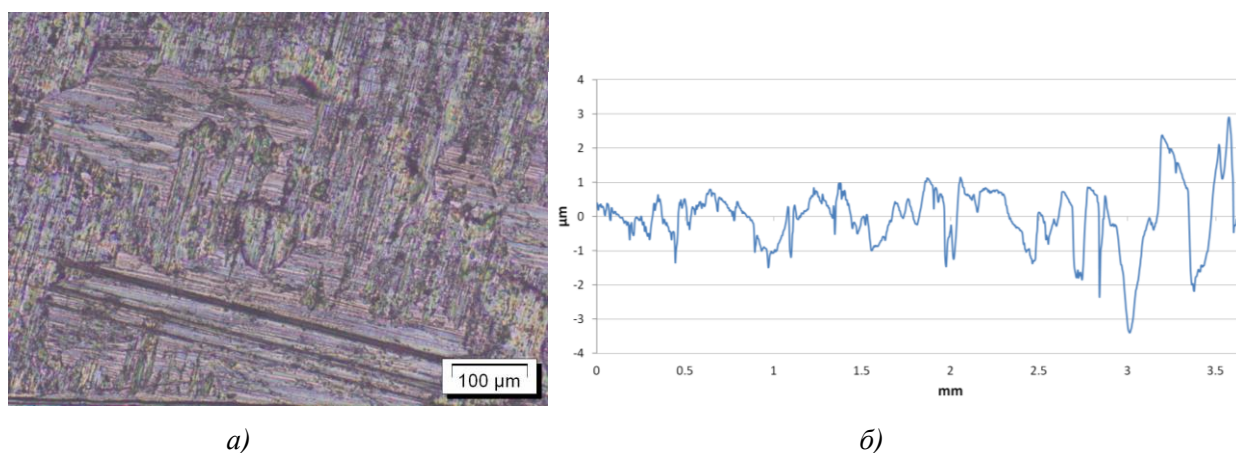
7.6.1. Површинска храпавост за узорке од челичног лима (DC04)

Површинска храпавост мерена је на појединим узорцима лима после завршеног процеса провлачења између равних контактних површина. Такође, мерења храпавости вршена су и на узорцима лима пре процеса провлачења и ти резултати су дати на почетку овог поглавља у табели 7.2. Значење параметара храпавости R_a , R_t , R_z и R_p изложено је у поглављу 7.1.1 када је говорено о основним карактеристикама лимова. Упоредивањем резултата за различите комбинације услова у контакту и задатих зависности притисака може се оцењивати утицај променљивог притиска на промену храпавости лима после провлачења. Према измереном податку из табеле 7.2, средње аритметичко одступање профила недеформисаног узорка износи $0.96 \mu\text{m}$. Сви узорци лима после процеса провлачења имају мању вредност R_a у односу на почетни недеформисани узорак. Тиме се евалуира повољан утицај процеса обликовања на храпавост обода лима по завршеном процесу. Разлике параметара храпавости у појединим случајевима деформисаних узорака потичу од примењених триболошких услова и дате криве притиска.

Табела 7.13 Основни параметри храпавости за услове: уље, полиране површине и притисак P5

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.63	5.7	3.56	2.9

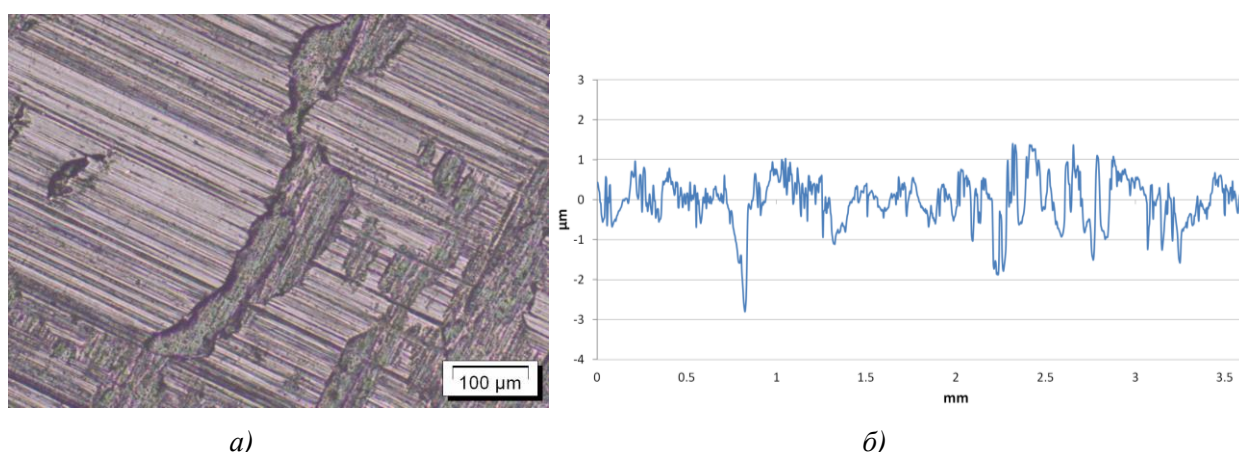
Анализом измерених параметара храпавости из табела 7.13 и 7.14 може се закључити да се код исте врсте лима (DC04) постиже мања храпавост код растуће функције притиска P2 ($R_a = 0.44 \mu\text{m}$) у односу на опадајућу функцију притиска P5 ($R_a = 0.63 \mu\text{m}$), иако су код притиска P2 (сл. 7.120) примењене контактне површине знатно веће храпавости (TiN превлака) од полираних код притиска P5 (сл. 7.119). За наведене случајеве је примењено исто мазиво: уље за дубоко извлачење. Код тумачења дијаграма коефицијената трења и вучних сила, више пута је напоменуто да се применом опадајућих промена притисака повећава склоност ка стварању налепљених честица лима на контактним елементима. На почетку хода притисак је највећи, па под утицајем тога расте сила трења и долази до већег приањања честица лима. Даљим клизањем налепљене честице знатно погоршавају храпавост лима. С друге стране, показано је да површине мање храпавости имају већу склоност ка стварању налепнина. Код растућих промена притисци расту од најнижих вредности, при чему постепено расту и вучне силе (силе трења) па се у таквим условима мање стварају налепљени слојеви материјала лима. Из тог аспекта растуће промене имају много повољнији утицај на умањено стварање налепнина, што се види и на основу параметара храпавости (табела 7.13 и 7.14).



Слика 7.119 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) челичног лима при контактним условима: уље за дубоко извлачење, полиране површине и крива притиска P5

Табела 7.14 Основни параметри храпавости за услове: уље, TiN превлака и притисак P2

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.44	3.8	2.96	1.4



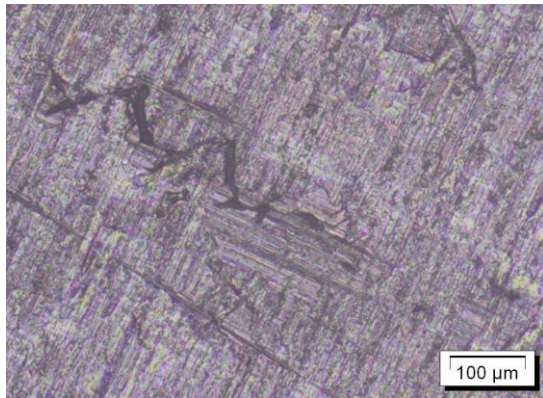
Слика 7.120 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) челичног лима при контактним условима: уље за дубоко извлачење, TiN превлака и крива притиска P2

Нешто веће вредности параметара храпавости заступљене су код узорак челичног лима применом мазиве масти на бази молибден-дисулфида и константног притиска P10 (сл. 7.121). У питању су полиране контактне површине код којих је за конкретни случај уочено стварање

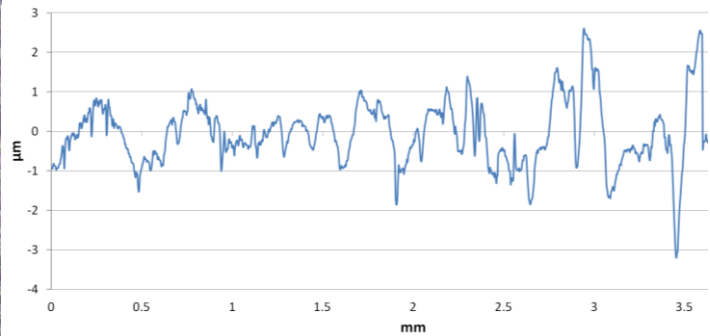
налепљених слојева, као последица високог притиска у контакту и истискивања мазива из контактне зоне, што се манифестовало повећањем храповости (табела 7.15).

Табела 7.15 Основни параметри храповости за услове: MoS_2 , полиране површине и притисак P10

$R_a, \mu m$	$R_t, \mu m$	$R_z, \mu m$	$R_p, \mu m$
0.67	5.8	3.6	2.6



a)



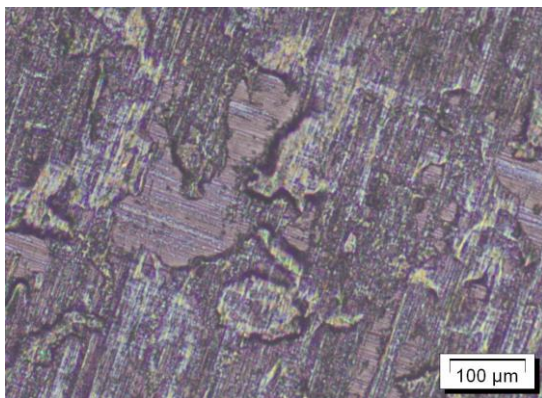
б)

Слика 7.121 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) челичног лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и константни притисак P10

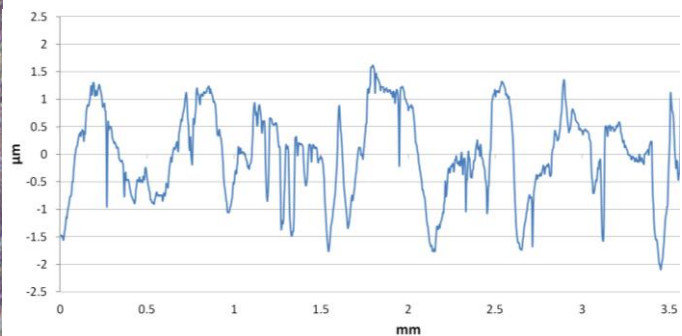
У табелама од 7.16 до 7.18 дати су параметри храповости за случајеве провлачења узорка од челичног лима између полираних површина, применом мазива на бази молибден-дисулфида и промена притисака P2, P5 и P6 респективно.

Табела 7.16 Основни параметри храповости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P2

$R_a, \mu m$	$R_t, \mu m$	$R_z, \mu m$	$R_p, \mu m$
0.61	3.8	3.22	1.7



a)



б)

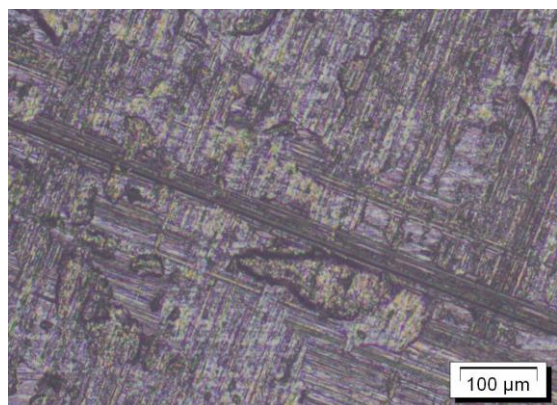
Слика 7.122 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) челичног лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и криву притиска P2

На сликама 7.122 до 7.124 дате су микрофотографије узорка као и 2D профили храповости. У сва три случаја, с обзиром на то да је реч о комбинацији мазива на бази MoS_2 и полираних површина, била је у одређеној мери заступљена појава наленљивања честица. То се манифестује порастом параметара храповости, посебно параметра R_a . На повећање параметара храповости утиче и карактер промене притиска, па је параметар R_a највећи код линеарно опадајуће промене P5 (0.68 μm , табела 7.17), а најнижи код линеарно растуће промене (0.58 μm , табела 7.18). Такав утицај промена притиска је запажен и на вучну силу и коефицијент трења, што је наведено у претходним

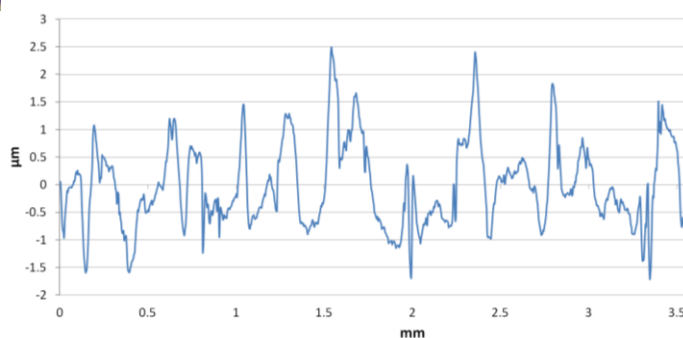
поглављима. Код експоненцијално растуће промене P2 (табела 7.16) вредност средње висине неравнина R_a износи $0.61 \mu\text{m}$, нешто више у односу на линеарно растућу промену P5 при истим контактним условима.

Табела 7.17 Основни параметри храповости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P5

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.68	4.1	3.5	2.5



a)

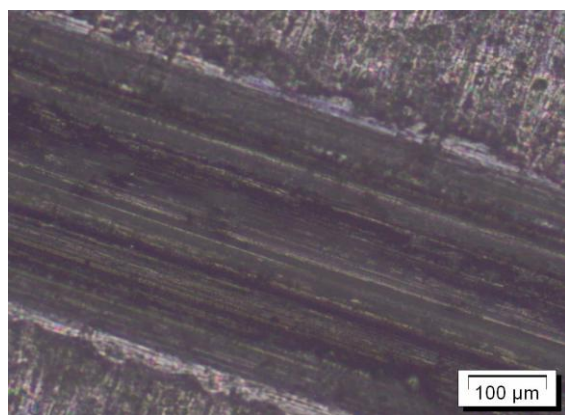


б)

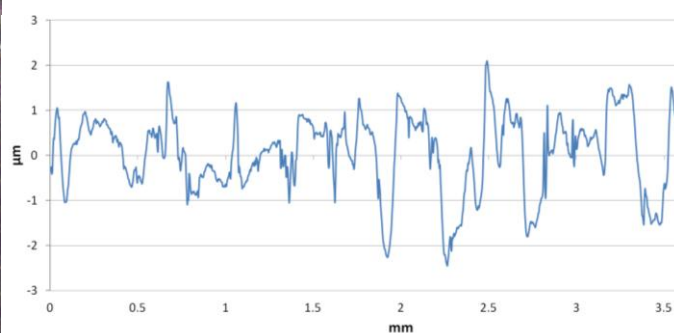
Слика 7.123 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) челичног лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P5

Табела 7.18 Основни параметри храповости за услове: MoS_2 , полиране површине и притисак P6

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.58	4.1	3.34	2.1



a)



б)

Слика 7.124 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) челичног лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P6

На основу приказаних параметара храповости челичног лима за поједине контактне услове (мазиво, тип контактних површина) као и различите промене притисака, може се закључити да на површинску храповост подједнако утичу и триболошки услови и карактер промена притисака. Генерално, опадајуће промене притисака утичу неповољно на стварање налепнина, због високе вредности притисака на самом почетку хода, када и вучна сила расте услед отежаних услова клизања. Тада највише долази до налепљивања честица нарочито у лошијим контактним условима, па налепљене честице за време клизања могу створити микробрзадања на лиму која се не виде увек голим оком, али се веома добро манифестују повећањем параметара површинске храповости (најчешће R_a - средње аритметичко одступање профила). Нарочиту склоност ка стварању налепнина и

промени хрпавости имају полиране површине у комбинацији са мазивом на бази молибден-дисулфида, због мање способности задржавања мазива у удубљењима неравнина. Поред тога, уочено је код варијанте уља за дубоко извлачење и превлаке од титан-нитрида повећано стварање налепљених слојева. Важно је истаћи да је основни материјал DC04 (без превлаке цинка) у поређењу са истим материјалом са превлаком од цинка и лимом од алуминијумске легуре, најмање склон стварању налепнина.

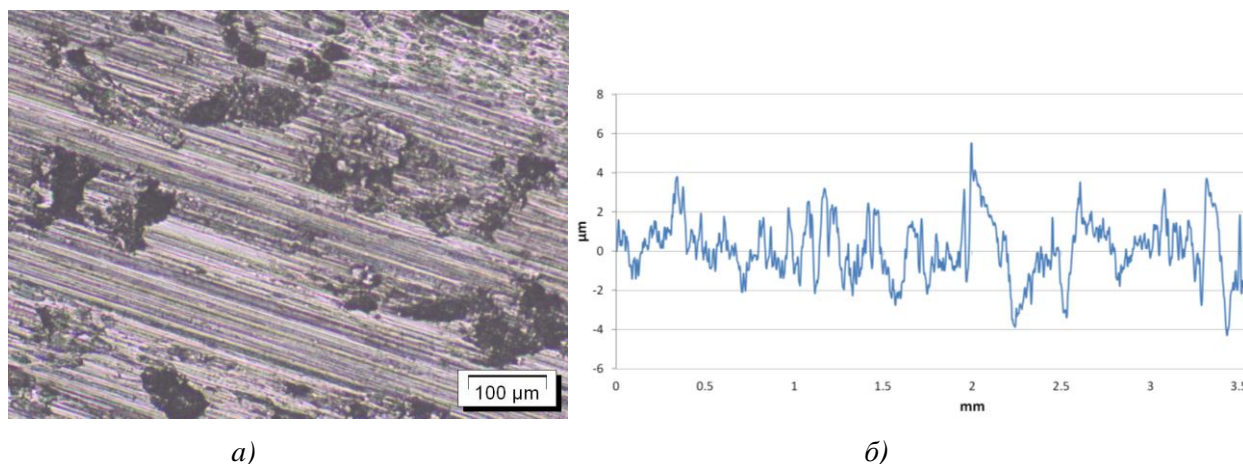
7.6.2. Површинска хрпавост за узорке од поцинкованог челичног лима (DC04+ZE)

Параметри површинске хрпавости за узорке од једнострано поцинкованог челичног лима су нешто виши у поређењу са класичним лимом без превлаке. То је заступљено и на недеформисаним узорцима, чији су параметри хрпавости приказани у табели 7.2. Највећи недостатак код ове врсте лима је скидање слојева цинка при провлачењу, посебно при вишим вредностима контактних притисака и лошијим контактним условима. Честице цинка се при вишим притисцима релативно лако налепљују на контактне површине и за време клизања лима браздају његову површину. Појава је посебно изражена код опадајућих промена, што је приказано наредним табелама и сликама.

Табела 7.19 Основни параметри хрпавости за услове: уље, TiN превлака, притисак P1

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
1.11	9.4	7.22	5.5

У табелама 7.19 и 7.20 дати су параметри површинске хрпавости за промену притиска P1, где су у првом случају примењене површине са превлаком од титан-нитрида, а као мазиво коришћено уље за дубоко извлачење. У другом случају (табела 7.20) примењене су полиране контактне површине, (мање хрпавости од TiN превлаке) и мазиво на бази молибден-дисулфида.

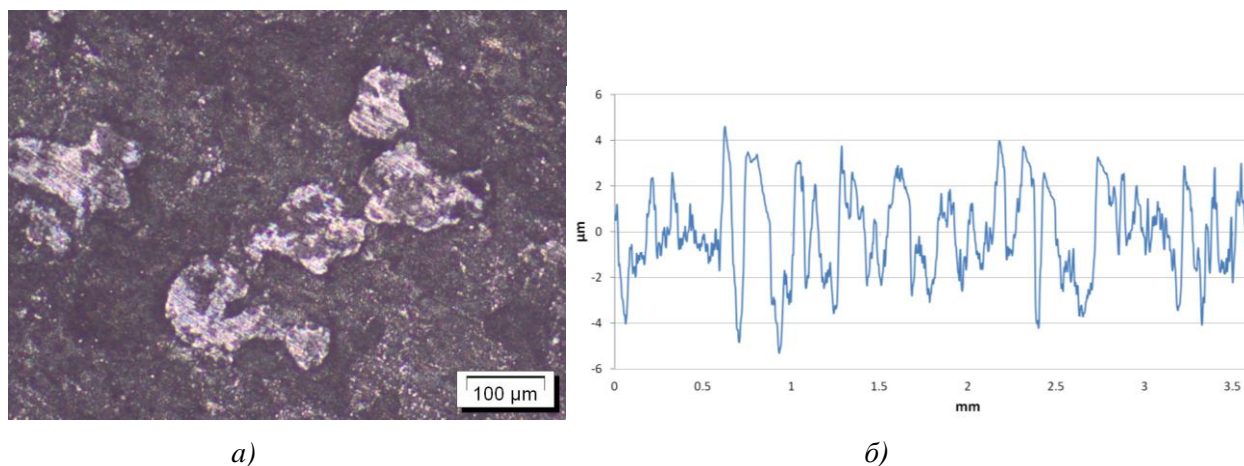


Слика 7.125 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) поцинкованог лима при контактним условима: уље за дубоко извлачење, TiN превлака и крива притиска P1

Упоређујући параметре хрпавости (табеле 7.19 и 7.20), може се закључити да су за исту промену притиска параметри хрпавости већи код полираних површина и мазива на бази MoS_2 него код TiN превлаке и уља. То указује на израженију појаву налепнина на полираним површинама и повећану хрпавост узорака насталу браздањем слојева превлаке од цинка. Изглед микроструктуре и профила хрпавости дати су на сликама 7.125 и 7.126. Велика склоност полираних површина у комбинацији са мазивом на бази молибден-дисулфида ка стварању налепнина манифестовала се и преко параметара хрпавости, поред пораста вучне силе и велике вредности коефицијента трења.

Табела 7.20 Основни параметри хрпавости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P1

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
1.59	9.4	8.48	4.6



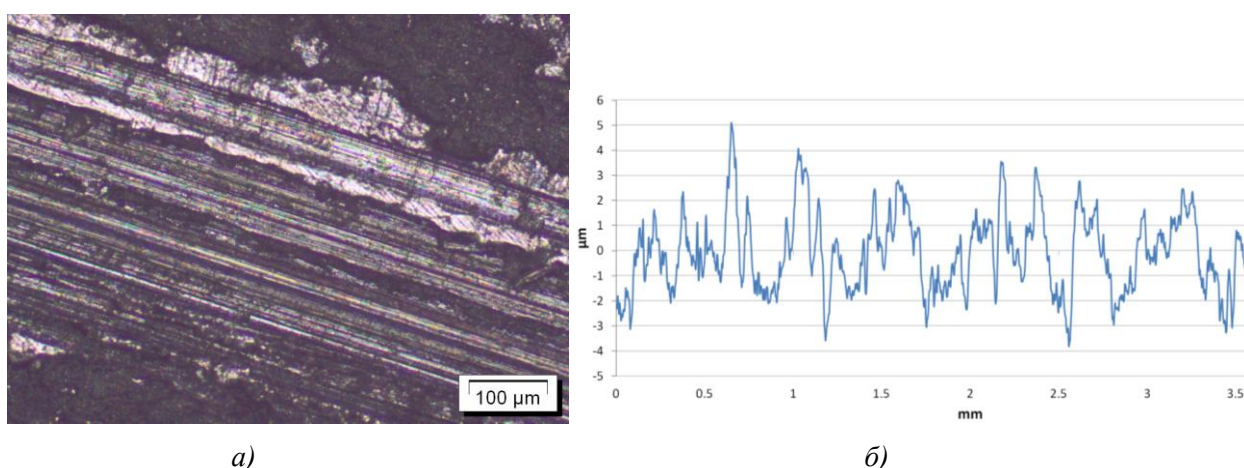
Слика 7.126 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) поцинкованог лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска $P1$

У наставку је дато поређење параметара храпавости промена $P2$ и $P6$ (табела 7.21, сл. 7.127 и табела 7.22, сл. 7.128) при истим условима у контакту: полиране површине и мазиво на бази MoS_2 .

Табела 7.21 Основни параметри храпавости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак $P2$

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
1.25	8.1	7.58	5.1

За исто мазиво и исти тип контактних површина изменљивих елемената може се преко параметара храпавости пратити утицај промене притиска. Тако за промену $P2$ (табела 7.21) добијају се нешто више вредности параметара R_a . И код челика без превлаке у претходном поглављу је истакнуто да се применом линеарно растуће промене $P6$ добијају мање вредности R_a у односу на експоненцијално растућу функцију $P2$. Поређењем параметара храпавости добијених за функционалну промену $P1$ (табеле 7.19 и 7.20) и промену $P2$ (табела 7.21), као и $P6$ (7.22) закључује се да растуће промене притисака имају повољнији утицај на параметре храпавости од опадајућих, тј. појава налепнина је мање изражена код растућих промена, због постепеног пораста притиска у контакту. Ова констатација је била заступљена и код челичног лима без превлаке (поглавље 7.6.2).

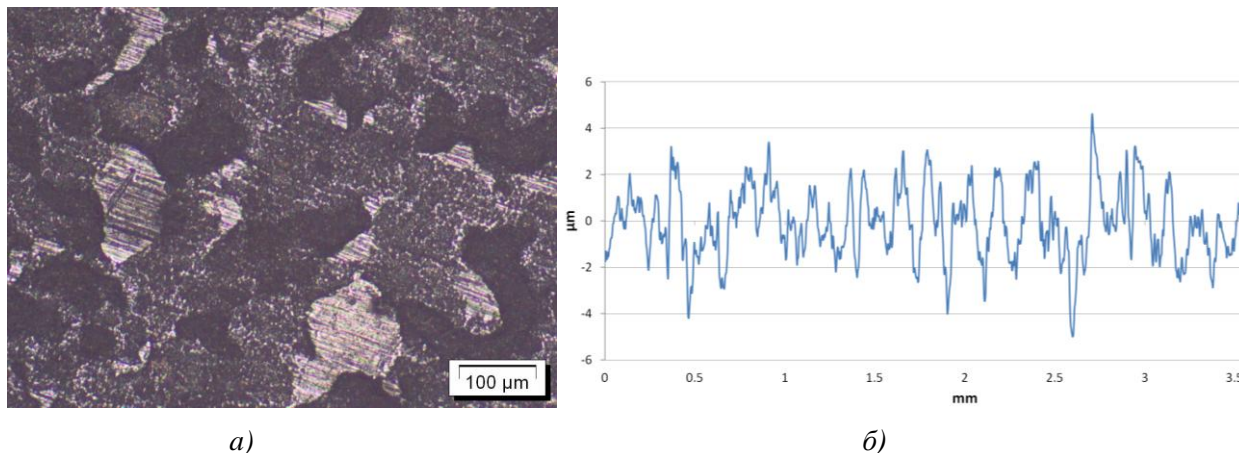


Слика 7.127 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) поцинкованог лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска $P2$

Код свих узорака једнострано поцинкованог челичног лима, параметри храпавости имају ниже вредности после процеса провлачења у односу на измерене вредности на почетном недеформисаном узорку ($R_a = 1.74 \mu\text{m}$, табела 7.2).

Табела 7.22 Основни параметри храповости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P_6

$R_a, \mu m$	$R_t, \mu m$	$R_z, \mu m$	$R_p, \mu m$
1.23	9.6	7.54	4.9



Слика 7.128 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) поцинкованог лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P_6

7.6.3. Површинска храповост за узорке лима од алуминијумске легуре (AlMg4.5Mn0.7)

Мерење површинске храповости на узорцима од алуминијумске легуре обављено је у циљу поређења параметара храповости за различите триболошке услове и промене притисака, као и објашњења настанка налепнина на појединим узорцима. Значајно је и поређење параметара храповости лима од алуминијумске легуре са параметрима храповости челичног лима (без превлаке и са превлаком).

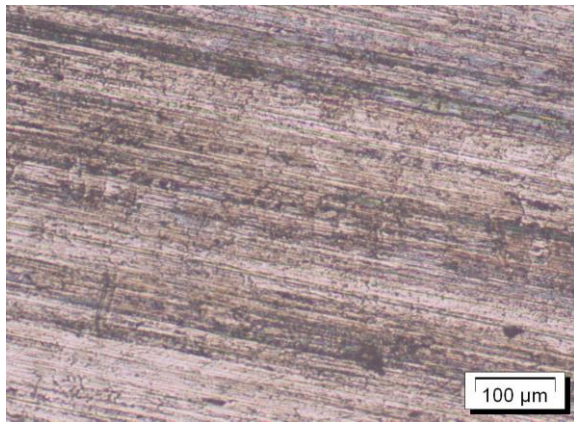
У табелама 7.23 до 7.30, као и на сликама 7.129 до 7.136 дати су параметри храповости за узорке од алуминијумског лима при различитим триболошким условима и променама притисака. Одмах се може уочити да су параметри храповости, за све приказане комбинације код лима од алуминијумске легуре, знатно мањи него код челичног лима. Исто је било заступљено и пре процеса провлачења (поглавља 7.1.1 и 7.1.2). Лимови од алуминијумске легуре имају глаткију површину и добру обрадивост дубоким извлачењем, што оправдава њихову широку примену. С друге стране, неповољна околност се односи на повећано стварање налепнина, где је један од разлога релативно мала тврдоћа овог материјала у односу на челичне лимове. Посебна склоност ка стварању налепнина испољава се на алатима који имају полиране површине, или површине мање храповости. Нарочито неповољна комбинација из аспекта стварања налепнина су површине мање храповости и мазиве масти веће густине и вискозности. Основни проблем је у задржавању мазива у контактної зони.

Као што је приказано на дијаграмима вучних сила и коефицијената трења, појава налепнина је нарочито утицала на повећање поменутих величина приликом провлачења узорка од алуминијумског лима између полираних површина и уз присуство мазива на бази молибден-дисулфида. Способност задржавања мазива на бази молибден-дисулфида код површина мање храповости (глатких површина) доводи се у питање посебно при већим притисцима у контакту. Тако се процес провлачења одвија са недовољном количином мазива и под утицајем притиска долази до слепљивања мекших честица алуминијума на тврђе контактне површине изменљивих елемената. Честице алуминијума на површинама клизних елемената врше додатно хабање траке лима, које се манифестује порастом параметара храповости, посебно код опадајућих промена притисака, где се на самом почетку хода задаје висока вредност притиска.

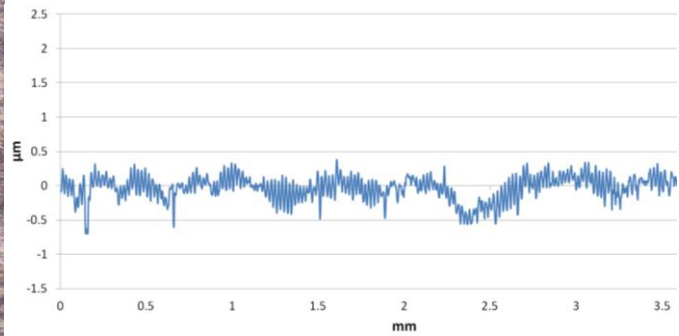
Пример повољне комбинације триболошких услова (уље и нитриране површине) из аспекта стварања налепнина дат је на слици 7.129 и у табели 7.23, где су заступљене релативно ниске вредности параметара храповости ($R_a = 0.13 \mu m$). Анализом дијаграма вучних сила и коефицијената трења у претходним поглављима већ је указано на то да нитриране површине имају најмању склоност стварања налепнина.

Табела 7.23 Основни параметри храповости за услове: уље, нитриране површине, притисак P1

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.13	1.0	0.92	0.47



a)



б)

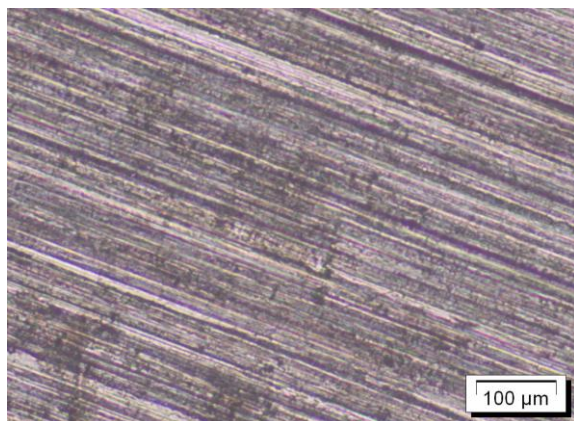
Слика 7.129 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: уље за дубоко извлачење, нитриране површине и крива притиска P1

Код промена P1 и P3 (табеле 7.24 и 7.25, слике 7.130 и 7.131) за исте услове у контакту (уље за дубоко извлачење и TiN превлака) добијају се приближне вредности параметара храповости. Те вредности су нешто веће у поређењу са претходним случајем (сл. 7.129) јер је превлака од титан-нитрида изразито склона стварању налепнина код провлачења узорака од алуминијумског лима у комбинацији са уљем за дубоко извлачење.

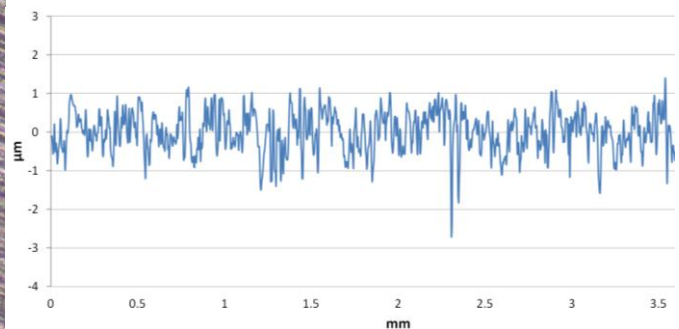
Када је у питању превлака од титан-нитрида, треба избегавати течна мазива (уља) у тој комбинацији, јер је подмазивање уљем мање ефикасно од подмазивања мазивим мастима које се задржавају у удубљењима површинске храповости. Нарочито повећање параметара храповости се испољава код опадајуће промене P1 (табела 7.24) и комбиноване растуће-опадајуће промене P3 (табела 7.25). У овим случајевима, налепнине алуминијума настају као удружено дејство релативно лоших услова у контакту (уље и TiN превлака) и опадајућег карактера притиска (висок притисак на почетку хода код P1 и брзи пораст притиска до половине хода P3).

Табела 7.24 Основни параметри храповости за услове: уље, TiN превлака, притисак P1

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.42	3.7	2.8	1.4



a)

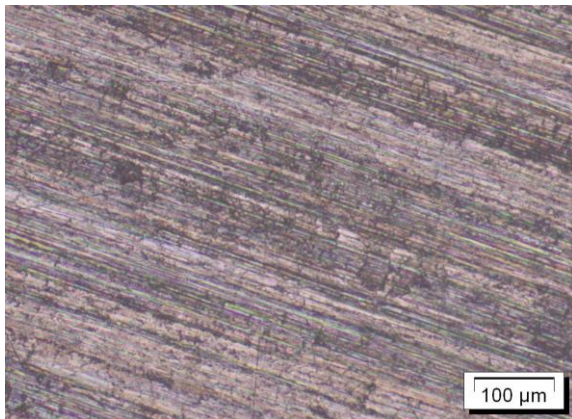


б)

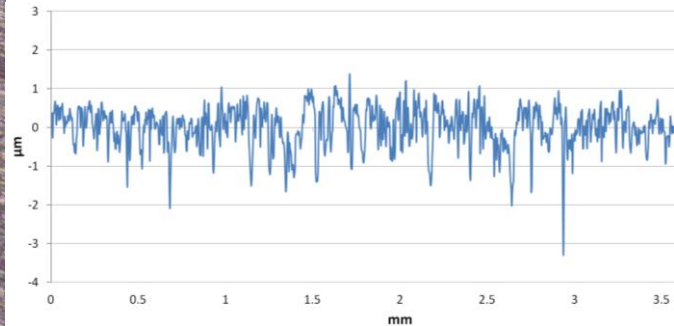
Слика 7.130 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: уље за дубоко извлачење, TiN превлака и крива притиска P1

Табела 7.25 Основни параметри храповости за за услове: уље, TiN превлака, притисак P3

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.43	4.3	3.18	1.45



a)



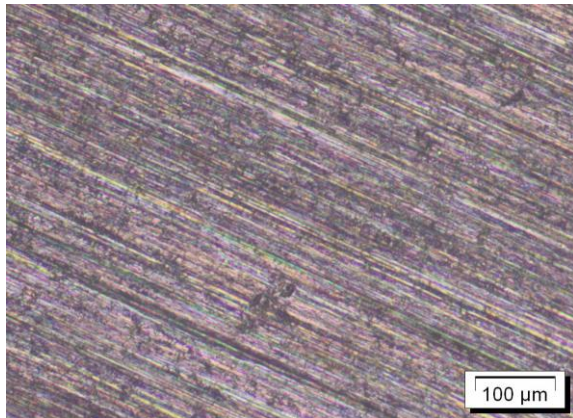
б)

Слика 7.131 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: уље за дубоко извлачење, TiN превлака и крива притиска P3

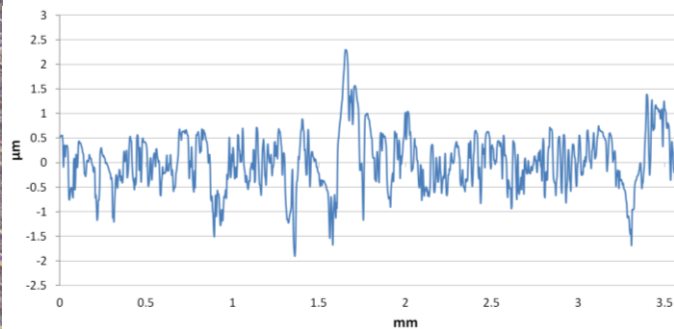
У наредним табеларним приказима (7.26 до 7.30) дате су вредности параметара храповости, а на сликама 7.132 до 7.136 микрофотографије и профили храповости узорака алуминијумског лима за исте услове у контакту (полиране површине, мазиво на бази MoS_2) за промене притиска P1, P2, P4, P5 и P6 респективно.

Табела 7.26 Основни параметри храповости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P1

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.55	3.5	2.6	2.3



a)



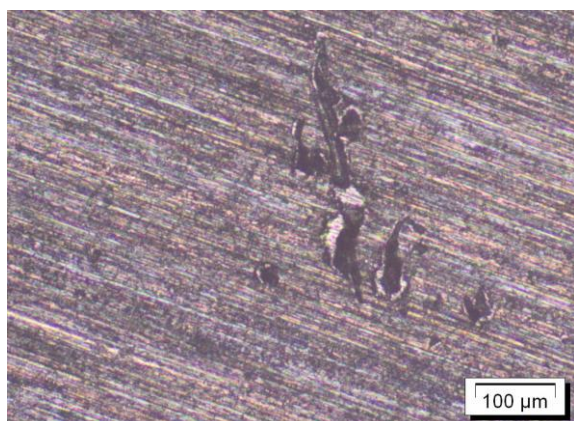
б)

Слика 7.132 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P1

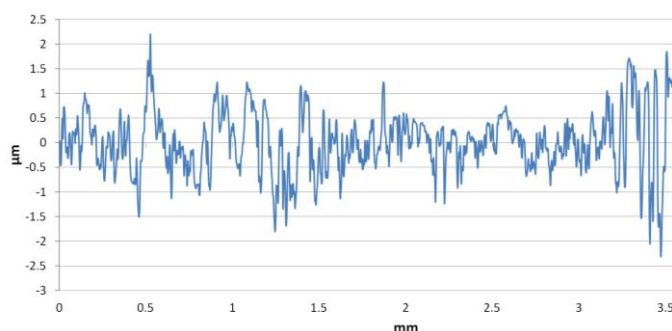
Повећане вредности параметара храповости за све промене притисака указују на отежане услове клизања због присуства налепљених слојева. Трагови оштећења површине лима су јасно видљиви на слици 7.133а. Вредности су високе, како за растуће, тако и за опадајуће промене.

Табела 7.27 Основни параметри храповости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P2

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.44	5.6	3.36	2.25



a)



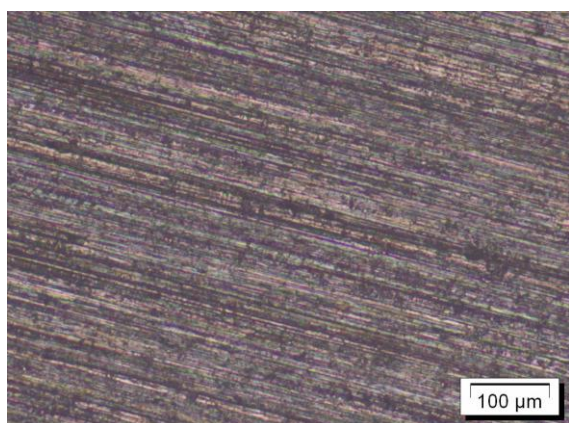
б)

Слика 7.133 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P2

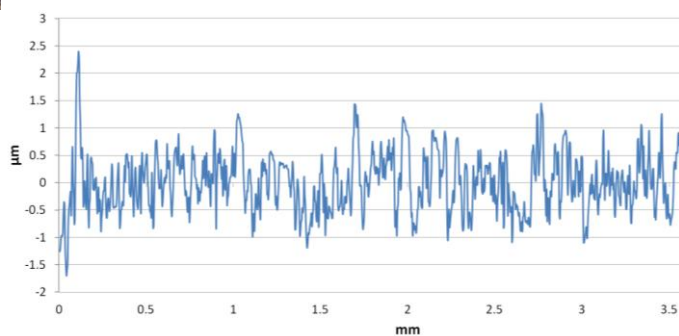
Код опадајуће промене P1 (табела 7.26) вредности R_a су нешто веће него код промене P2 (табела 7.27), на шта има утицај опадајући карактер промене притиска. Код опадајућих промена су и вучне силе и коефицијенти трења имаали веће вредности него код постепеног повећања притиска, тј. код растућих промена. То се у великој мери пренело и на параметре храпавости. Код комбиноване опадајуће-растуће промене P4 (табела 7.27) вредност R_a је приближна вредности добијеној код промене P2.

Табела 7.28 Основни параметри храпавости за за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P4

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.44	4.2	2.82	2.4



a)



б)

Слика 7.134 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P4

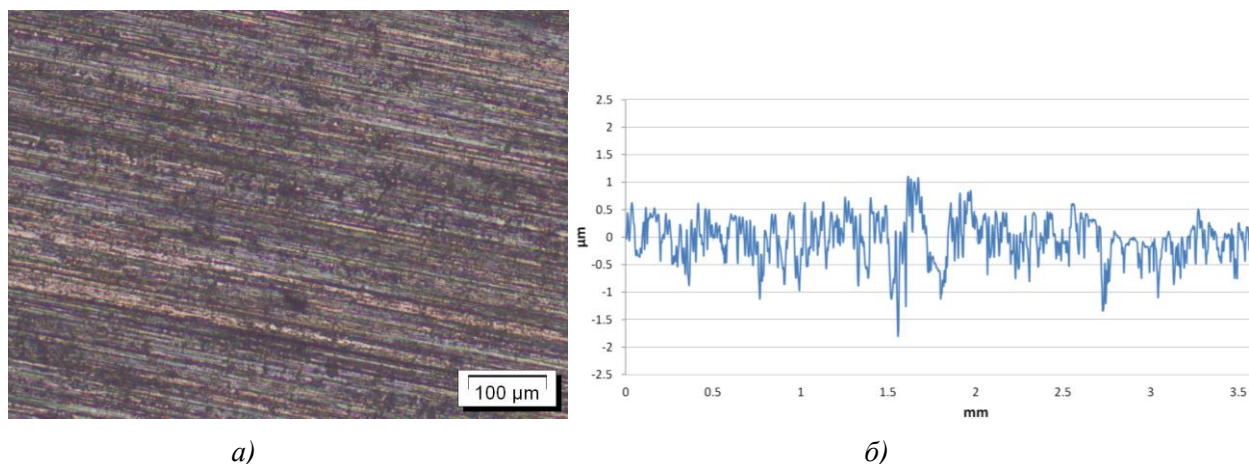
Упоређивањем параметара храпавости за промене P5 и P6 (табеле 7.29 и 7.30, слике 7.135 и 7.136), јасно је да су сви параметри храпавости нижи код опадајуће промене P5, иако се очекивао супротни резултат, у складу са претходним ставом.

Табела 7.29 Основни параметри храпавости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P5

$R_a, \mu\text{m}$	$R_t, \mu\text{m}$	$R_z, \mu\text{m}$	$R_p, \mu\text{m}$
0.32	2.5	2.1	1.1

На то може утицати начин одстрањивања трагова налепнина на изменљивим контактним елементима. За време експеримента налепнине су уклањане брусним папиром одговарајуће гранулације, после провлачења сваког узорка алуминијумског лима. Међутим, вероватно је да је после чишћења остао незнатни слој налепнина невидљив голим оком, који може значајно избраздати лим наредног узорка. То може веома утицати на повећање храпавости узорка лима (таб. 7.30, сл. 7.136). Из тог разлога, код ове комбинације контактних услова, мора се обратити посебна пажња на често и темељно чишћење контактних површина клизних елемената (пожељно је и поновно полирање контактних површина), јер трагови налепнина присутни од претходног провлачења могу значајно утицати на повећање параметара храпавости, а посебно коефицијената трења и вучних сила, што је детаљно приказано у претходним поглављима.

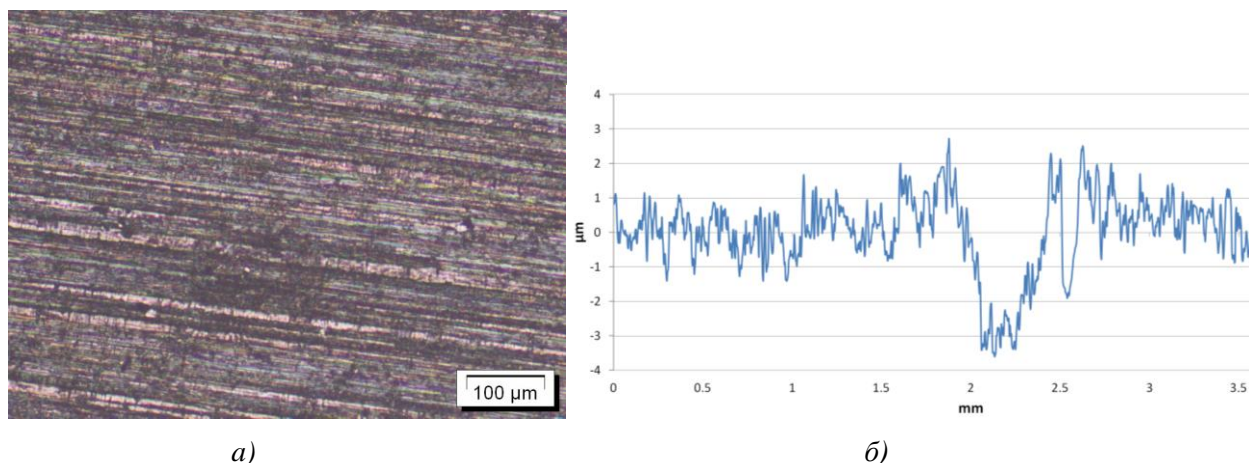
На приказаним микрофотографијама (сlike 7.132a до 7.136a) се могу уочити трагови провлачења на површинама лима.



Слика 7.135 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P5

Табела 7.30 Основни параметри храпавости за услове: MoS_2 , полиране површине, притисак P6

$R_a, \mu m$	$R_t, \mu m$	$R_z, \mu m$	$R_p, \mu m$
0.77	6.2	3.7	2.7



Слика 7.136 Микрофотографија (а) и 2D профил (б) алуминијумског лима при контактним условима: маст на бази MoS_2 , полиране површине и крива притиска P6

8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Предвиђање понашања материјала за време пластичног обликовања има битну улогу код унапређивања савремене производње, у циљу добијања производа жељених карактеристика (тачности облика, димензија, квалитета обрађених површина), уз истовремено смањење губитака материјала и енергије потребне за реализацију неког процеса.

Развијање технологије пластичног обликовања, усмерено је углавном на израду делова сложене геометрије и обликовање нових материјала, најчешће лошије обрадивости и тсл. То захтева проналажење метода и начина за потпуније коришћење ресурса материјала. У ресурсе материјала спада и деформабилност, као способност материјала да се трајно-пластично обликује без настајања нежељених појава (дефеката у првом реду) и која се примењује у зависности од управљања параметрима процеса за време обликовања.

Деформабилност лимова представља релативно ширу област у којој се проучава понашање материјала, почев од услова пластичности (услов преласка из еластичног у пластично деформисање), до услова за реализацију максималне пластичне деформације. Одговарајући број фаза обликовања, геометријске промене радног комада за време обликовања, заснивају се на предвиђању понашања материјала при пластичном деформисању.

Израда делова сложеног геометријског облика технологијом дубоког извлачења све више је присутна у савременој производњи металних делова и производа. Због тога је ова проблематика предмет изучавања многих истраживача у научним и истраживачким центрима. Основни задатак изучавања ове проблематике је управљање клизањем материјала на ободу, где је заступљено сложено напонско и деформационо стање за време процеса. Управљање клизањем лима на ободу може се једино реализовати на два начина: променом силе држања (притиска држача) и применом затезних ребара.

У циљу што успешније израде делова дубоким извлачењем, нарочито у аутомобилској индустрији, чине се велики напори у циљу потпуног овладавања и управљања процесом обликовања. На основу тога развијени су и реализовани различити системи управљања који за време процеса дубоког извлачења одржавају поједине параметре процеса у одређеним границама. Сва досадашња истраживања показала су да је за време процеса дубоког извлачења могуће мењати само два параметра: силу држања (односно специфични притисак на држачу) и висину затезног ребра. То практично значи да се само ова два параметра могу користити као управљајућа дејства.

Код веома сложених и скувих активних (аутономних, интелигентних) система управљања процесом дубоког извлачења променљива сила држања и висина затезних ребара се користе као управљајућа дејства за одржавање једне или више управљаних функција одговарајућих параметара. У већини актуелних истраживања [16, 17, 18], као управљани параметар је предложен затезући напон у вертикалном зиду комада који се извлачи. Одржавање промене тог напона (као задате или циљне функције) у одговарајућим границама, требало би да гарантује успешан ток процеса.

Вучну силу (силу трења), као један од основних параметара који је праћен и истраживан у овом раду, могуће је довести у везу са поменутиим затезућим напоном.

Основна замисао у овом истраживању је била анализа и процена утицаја различитих функционалних промена контактнoг притиска на зависност вучне силе од хода (или времена) и зависност коефицијента трења од хода. Значајна је анализа могућности преноса функција притиска на коефицијент трења, тј. у којој мери је могуће управљати трењем на ободу симултаним задавањем променљивог контактнoг притиска. Испитивање природе тог утицаја одвијало се у потпуно реалном окружењу контактних услова (мазиво, различита врста и храпавост контактних површина алата) и врсте материјала лима. На тај начин се могу појавити одређена пригушења у преносу функција притиска на зависности вучних сила (силе трења), а тиме и на коефицијенте трења. На основу тога може се проценити како триболошки услови у контакту утичу на управљање трењем преко задавања променљивог притиска у контакту.

Детаљнијим познавањем одзива (реакције) вучне силе и коефицијента трења на испитиване утицаје отвара се могућност реализације поједностављених, приступачнијих управљачких система

за рад у конкретним погонским условима. Код ових система постоји потреба за управљање силом држања (контактним притиском). То подразумева познавање оптимизованих функција параметара који гарантују успешан ток процеса. Ово експериментално истраживање је корак у правцу упознавања тих функција.

Приказана апаратура за мерење вучне силе и стварног притиска у контакту за време процеса клизања траке лима између равних контактних површина при променљивом контактном притиску (функција $p_{(t)}$), омогућава прецизно регистровање утицаја променљивог притиска на силу трења, коефицијент трења и променом триболошких услова у контакту омогућава реално сагледавање могућности за управљање трењем.

Реализовани уређај са компјутеризованом управљачко-мерном апаратуром је омогућио потпуну реализацију експеримента. Дефинисане су и реализоване четири нелинеарне параболичне функционалне промене контактнoг притиска (опадајућа P1, растућа P2, растуће-опадајућа P3 и опадајуће-растућа P4). Такође, реализоване су по две линеарне функционалне промене притиска: опадајућа P5 и растућа P6. Поред тога, коришћене су и две константне вредности интензитета притиска P8 (10 МПа) и P10 (20 МПа). У раду су приказани експериментални резултати за процесе клизања траке од нискоугљеничног челичног лима (са превлаком цинка и без превлаке) и лима од алуминијумске легуре из серије 5000. Примењена су два типа мазива: уље за дубоко извлачење и мазива маст на бази молибден-дисулфида. Израђено је четири типа контактних површина изменљивих клизних елемената различите површинске храповости (брушене, полиране, нитриране површине и са превлаком од титан-нитрида).

Спроведена теоријска разматрања и резултати обављених експерименталних истраживања, омогућавају доношење одговарајућих закључака, који карактеришу комплетан истраживачки приступ. Закључци су формирани на основу целокупне анализе утицаја параметара процеса (променљиви контактни притисак, врста мазива, тип површина изменљивих контактних елемената, стање на контактним површинама клизних елемената за време процеса, врста материјала лима) на вучну силу, коефицијент трења и промену храповости лима. Природа и степен утицаја појединих фактора у процесу, разматрани су упоређивањем зависности добијених при различитим комбинацијама и различитим условима.

Закључке је могуће систематизовати на следећи начин:

а) као полазна основа рада изведено је пројектовање, израда и тестирање сложене компјутеризоване мерно-управљачке апаратуре. Њен основни задатак је остваривање широког дијапозона функција промене контактнoг притиска и прецизно мерење њиховог утицаја на промену вучне силе. Велика база остварених резултата показала је да је тај задатак успешно остварен. Такође, остају и значајне могућности за нова истраживања са истом конфигурацијом апаратуре или са одговарајућим изменама и побољшањима;

б) реализација ове апаратуре и остварених резултата има и шири значај као алтернативни приступ у једној области високе технологије која захтева значајна улагања;

в) резултати истраживања су показали да се на овај начин може добити велики број различитих зависности вучне силе, тј. затежућег напона у траци лима (челик и А1 - легура), што представља основу за израчунавање коефицијента трења на ободу лима;

г) показано је да се са одговарајућим различитим функционалним променама контактнoг притиска могу добити зависности вучне силе сличног тренда, при чему се тренд дијаграма коефицијента трења разликује од карактера промене притиска и зависи од односа интензитета вучне силе и вредности променљивог притиска у сваком тренутку хода процеса;

д) опадајуће промене притиска или промене које се завршавају опадајућим трендом могу у лошијим контактним условима утицати на повећање интензитета затежућег напона које се манифестује порастом интензитета вучне силе (силе трења), а тиме посредно и на повећање коефицијента трења;

ђ) избором погодне комбинације контактних површина и мазива, значајно се може умањити отпор клизања, тј. вучна сила (сила трења) и значајно ублажити ефекат ниског притиска код израчунавања коефицијента трења;

е) код промена које се завршавају опадајућим трендом, притисак тежи нули при крају хода, што у реалности значи одсуство реалног контакта, па нема смисла израчунавати коефицијент трења. То се може сматрати критичним моментом код управљања трењем односно у преносу функција променљивог контактнoг притиска на дијаграме коефицијената трења. Осим тих врло ниских вредности притисака, управљање трењем код опадајућих промена могуће је на већем делу хода. Смањењем силе трења, ефекат ниског притиска код одређивања коефицијената трења се може значајно ублажити, преко избора бољих контактних услова;

ж) код растуће промене притиска, како линеарне тако и параболне, постепени пораст притиска од најнижих вредности значајно олакшава процес управљања трењем. Пораст притиска прати пораст вучне силе, одређен и контактним условима. Са побољшањем услова у контакту смањује се отпор клизања, тј. вучна сила, што коефицијент трења чини мањим. На тај начин постиже се ефикасније управљање процесом трења. Код ових промена постиже се управљање процесом трења на целој дужини хода;

з) код опадајуће-растуће промене притиска критични моменат у преносу карактера промене на вучну силу и коефицијент трења је на самом почетку хода, кад притисак има највише вредности, па се пораст интензитета затежућег напона и сила трења услед високог притиска може ублажити бољим контактним условима;

и) примена контактних површина различите храпавости у комбинацији са уљем и мазивом машћу има различите ефекте на вучну силу и коефицијент трења. На то добрим делом утиче и карактер функционалне промене притиска. Резултати су показали да је погоднија примена површина мање храпавости (брушене и полиране) у комбинацији са уљем, док се мазива маст препоручује у комбинацији са површинама веће храпавости (нитриране површине и површине са TiN превлаком);

ј) провлачењем трака лима од алуминијумске легуре постижу се ниже вредности силе трења (вучне силе) и коефицијента трења. Ова врста лима има знатно мању површинску храпавост од челичних лимова (са превлаком цинка и без превлаке), па се у комбинацији са мазивом машћу и површинама веће храпавости добијају убедљиво најниже вредности силе трења. Алуминијумски лим има повећану склоност ка стварању налепљених слојева, нарочито на површинама мање храпавости;

к) челични лим са превлаком цинка има изражен афинитет ка разарању превлаке и стварању налепљених слојева посебно у условима високих контактних притисака. Ова појава је нарочито била изражена код опадајућих промена притисака и применом контактних површина веће храпавости. Код челичног лима без превлаке, стварање налепљених слојева је било најмање изражено од свих материјала;

л) примећена је склоност површина мање храпавости (полираних највише) ка стварању налепљених слојева. Појава је нарочито изражена код подмазивања мазивом машћу, посебно у условима високих контактних притисака на почетку хода (опадајуће промене) када долази до истискивања мазива из контактне зоне. Супротно томе, нитриране површине и превлака од титан-нитрида имају бољу способност задржавања мазиве масти у удубљењима површинске храпавости. Мањи афинитет полираних и брушених површина ка стварању налепљених слојева је при подмазивању уљем;

љ) превлака од титан-нитрида, која је углавном заступљена у обради метала резањем, погодна је за примену код обликовања дубоким извлачењем у комбинацији са мазивим мастима. У удубљењима површинске храпавости слој мазива је одржив чак и при вишим вредностима притисака и у таквим условима стварање налепљених слојева је минимално. Комбинација ове превлаке релативно више храпавости (у односу на полиране и брушене површине) са уљем деловала је неповољно на повећање интензитета затежућег напона и вучне силе, тј. заступљени су релативно лоши контактни услови, посебно при високим притисцима (опадајуће промене и комбиноване функционалне промене притиска). Такође, веома је било изражено стварање налепљених слојева материјала лима на контактним површинама клизних елемената при подмазивању уљем;

м) резултати ових истраживања представљају једну ширу базу података, са мноштвом елемената који се могу успешно користити у даљим истраживањима управљања трењем и

укупним процесом дубоког извлачења. Оваквим испитивањима, са релативно једноставном апаратуром, могуће је дефинисати значајне податке за нумеричке симулације и непосредну примену у пракси при дубоком извлачењу делова сложене геометрије;

н) коришћена апаратура, са релативно једноставним изменама на механичком делу уређаја и софтверу, пружа могућност реализације експеримената заснованих на осталим триболошким моделима процеса обликовања дубоким извлачењем, клизање лима преко радијуса матрице, клизање траке лима преко затезног ребра и тсл. Реконструкцијом и заменом основних делова алата, могуће је извести експеримент клизања лима са затезним ребром;

њ) примена нових материјала, као што су челични лимови са антикорозивним превлакама, лимови повишене чврстоће, нерђајући челични лимови, ламинатни лимови, TWB лимови итд. представља допунске могућности за коришћење апаратуре у наредним истраживањима. Надоградњом хардвера и софтвера могуће је подићи ниво управљања, чиме би се остварило активно управљање процесом и тиме добио нови квалитет експеримената.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Emmens W. 1997.

Tribology of Flat Contacts and its Application in Deep Drawing, PhD- thesis, University Twente, Netherlands, 1997.

[2] Manabe K. et al. 1996.

Development of a square-cup deep-drawing simulator with cellularly divided blank holder control system, 19th IDDRG Biennial Congress, Eger, Hungary, 1996, pp. 101-108.

[3] Manabe K. et al. 2002.

Development of a combination punch speed and blank-holder fuzzy control system for the deep-drawing process, Journal of Materials Processing Technology, 125-126 (2002): pp. 440-445.

[4] Siegert K., Ziegler M., Wagner S. 1997.

Closed loop control of the friction force. Deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology, 71 (1997): pp. 126-133.

[5] Siegert K. et al. 2000.

Tendencies in presses and dies for sheet metal forming processes, Journal of Materials Processing Technology, 98 (2000): pp. 259-264.

[6] Doege E., Elend L. E. 2001.

Design and application of pliable blank holder systems for the optimization of process conditions in sheet metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 111 (2001): pp. 182-187.

[7] Doege E. et al. 2002.

Contactless on-line measurement of material flow for closed loop control of deep drawing, Journal of Materials Processing Technology, 130-131 (2002): pp. 95-99.

[8] Manabe K. et al. 1995.

Fuzzy controlled variable blank holding force technique for circular cup deep drawing of aluminum alloy sheet, Technical paper NAMRI-SME MF, 95-121 (1995).

[9] Koyama H., Manabe K. 2003.

Virtual processing in intelligent BHF control deep drawing, Journal of Materials Processing Technology, 143-144 (2003): pp. 261-265.

[10] Yagami T. et al. 2004.

Intelligent sheet stamping process using segment blankholder modules, Journal of Materials Processing Technology, 155-156 (2004): pp. 2099-2105.

[11] Manabe K. et al. 1996.

Theoretical analysis of punch speed and blank holder force control in deep drawing process of strain-rate-sensitive materials, ASME Dynamics systems and control division, 1996, pp. 175-182.

[12] Стефановић М. 1984.

Прилог истраживању утицаја контактнoг трења при дубоком извлачењу танких лимова, докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1984.

[13] Стефановић М. 1994.

Трибологија дубоког извлачења, Машински факултет у Крагујевцу и Југословенско друштво за Трибологију, монографија, Крагујевац, 1994.

[14] Вујиновић Т. 2012.

Дубоко извлачење танких лимова при управљању клизањем на ободу, докторска дисертација, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2012.

[15] Ђорђевић М. 2011.

Процес клизања лима преко затезног ребра при сталним и променљивим параметрима, мастер рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.

[16] Fratini L. et al. 2006.

A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 172 (2006): pp. 16–21.

[17] Szakaly E. D., Lenard J. G. 2010.

The effect of process and material parameters on the coefficient of friction in the flat-die test, *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (2010): pp. 868–876.

[18] Figueiredo L. et al. 2011.

Experimental study of friction in sheet metal forming, *Wear*, 271 (2011): pp. 1651– 1657.

[19] Coello J. et al. 2013.

Friction behavior evaluation of an EBT zinc-coated trip 700 steel sheet through flat friction tests, *Wear*, 305 (2013): pp. 129–139.

[20] Yanagida A., Azushima A. 2009.

Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58 (2009): pp. 247–250.

[21] Manoylov A. V. et al. 2013.

Dry elasto-plastic contact of nominally flat surfaces, *Tribology International*, 65 (2013): pp. 248–258.

[22] Kondratiuk J., Kuhn P. 2011.

Tribological investigation on friction and wear behaviour of coatings for hot sheet metal forming, *Wear*, 270 (2011): pp. 839–849.

[23] Ghiotti A., Bruschi S. 2010.

Tribological behaviour of DLC coatings for sheet metal forming tools, *Wear*, 271 (2010): pp. 2454–2458.

[24] Lee B. H. et al. 2002.

Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 130–131 (2002): pp. 60–63.

[25] Kirkhorn L. et al. 2013.

The influence of tool steel microstructure on friction in sheet metal forming, *Wear*, 302 (2013): pp. 1268-1278.

[26] Bae G. H. et al. 2007.

Simulation-based prediction model of the draw-bead restraining force and its application to sheet metal forming process, *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188 (2007): pp. 123-127.

[27] Sheriff N. M., Ismail M. M. 2008.

Numerical design optimisation of drawbead position and experimental validation of cup drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 206 (2008): pp. 83-91.

[28] Deneuille P., Lecot R. 1994.

The study of friction in ironing process by physical and numerical modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, 45 (1994): pp. 625– 630.

[29] Мандић В. 2012.

Физичко и нумеричко моделирање процеса обраде деформисањем, монографија, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2012.

[30] Singh S. K. et al. 2014

Finite element simulation of ironing process under warm conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 3 (2014): pp. 71–78.

[31] Neto D. M. et al. 2014.

Influence of the plastic anisotropy modelling in the reverse deep drawing process simulation, *Materials and Design* 60 (2014): pp. 368–379.

[32] Pepelnjak T. et al. 2001.

Numerical simulations in optimisation of product and forming process, *Journal of Materials Processing Technology* 115 (2001): pp. 122–126.

[33] Александровић С. 2005.

Сила држања и управљање процесом дубоког извлачења, монографија, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2005.

[34] Aleksandrović S. et al. 2014.

Different ways of friction coefficient determination in stripe ironing test, *Tribology in Industry*, 36/3 (2014): pp. 293-299.

[35] Đorđević M. et al. 2013.

Experimental analysis of influence of different lubricants types on the multi-phase ironing process, *Materials Engineering (MEMI)*, 20/3 (2013): pp. 147-152.

[36] Đorđević M. et al. 2012.

Computer controlled experimental device for investigations of tribological influences in sheet metal forming, *Materials Engineering (MEMI)*, 19/3 (2012): pp. 88-94.

[37] Александровић С. 1993.

Гранична деформабилност танких лимова у условима немонотоног процеса пластичног деформисања, магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 1993.

[38] Адамовић Д. 2002.

Понашање материјала у контакту при процесима хладног пластичног обликовања са високим радним притисцима, докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац 2002.

[39] Александровић С, Стефановић М. 2010.

Технологија пластичног обликовања метала, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.

[40] Вујовић В. 1992.

Деформабилност, Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду, Нови Сад, 1992.

[41] Јовановић М. и остали 2017.

Наука о материјалима I, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.

[42] Aleksandrović S. et al. 2011.

Variable tribological conditions on the flange and nonmonotonous forming in deep drawing of coated sheets, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 17/2 (2011): pp. 165-178.

[43] Aleksandrović S. et al. 2010.

Influence of variable blank holding force and nonmonotonous process of deep drawing on formability of coated sheets, *Strojarstvo-Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, 52/2 (2010): pp. 159-168.

[44] Александровић С. 2000.

Дубоко извлачење танких лимова при немонотонном деформисању са променљивим триболошким условима, докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2000.

[45] Вујиновић Т. 1996.

Значај триболошких услова при вишефазном дубоком извлачењу, магистарска теза, Машински факултет у Бања Луци, 1996.

[46] Arsić D. et al. 2015.

Analysis of the austenitic stainless steel's r-value behavior at elevated temperatures, *Materials Engineering - Materialove Inzinerstvo (MEMI)*, 22/2 (2015): pp. 66-76.

[47] Hayashi H. 1996.

Forming technology and sheet materials for weight reduction of automobile. Recent technical trends in Japan, 19th IDDRG Biennial Congress, Eger, Hungary, 1996, pp. 13-30.

[48] Đorđević M. et al. 2016.

Comparative study of an environmentally friendly lubricant with conventional lubricants in strip ironing test, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 22/1A-II (2016): pp. 959-970.

[49] Đorđević M. et al. 2016.

Investigation of the lubrication influence on single-phase and multi-phase ironing processes, *Procedia Engineering*, 149 (2016): pp. 40-47.

[50] Gierzynska M. 1983.

Tarcie zużycie i smarowanie w obrobce plastycznej metali, WNT, Warszawa, 1983.

[51] Aleksandrović S. et al. 2012.

Variable drawbead height and variable contact pressure as tribological influences in sheet metal stripe sliding test, *Journal of the Balkan Tribological Association*, 18/2 (2012): pp. 184-194.

[52] Asnafi N. 1995.

The influence of in-process variation of blank holding force on deep drawability, Paper No. IM-3169, Swedish Institute for Metals Research, 1995.

[53] Васиљевић Б., Недић Б. 2003.

Модификовање површина-основне технологије модификовања, Машински факултет Крагујевац, Крагујевац, 2003.

[54] Arsić D. et al. 2016.

Selection of the optimal hard facing (HF) technology of damaged forging dies based on cooling time $t_{8/5}$, *Metalurgija - Metallurgy*, 55/1 (2016): pp. 103-106.

[55] Lazić V. et al. 2016.

Determination of bond strength between the hard-faced (HF) layer and the base material (BM) of forging dies, *Metalurgija - Metallurgy*, 55/1 (2016): pp. 91-94.

[56] Dohda K., Aizawa T. 2014.

Tribo-characterization of silicon doped and nano-structured DLC coatings by metal forming simulators, *Manufacturing Letters*, 2 (2014): pp. 82-85.

[57] Шолић С. 2010.

Утјецај микроструктуре брзорезног челика на триболошка својства резних алата, докторски рад, Факултет стројарства и бродоградње Свеучилишта у Загребу, Загреб, 2010.

[58] Lukaszewicz K. et al. 2014.

Characteristics of CrAlSiN+DLC coating deposited by lateral rotating cathode arc PVD and PACVD process, *Applied Surface Science*, 312 (2014): pp. 126–133.

[59] Bin Abdollah M. H. et al. 2012.

Deformation–wear transition map of DLC coating under cyclic impact loading, *Wear*, 274– 275 (2012): pp. 435– 441.

[60] Mobarak H. M. et al. 2014.

Effect of DLC coating on tribological behavior of cylinder liner/piston ring material combination when lubricated with Jatropa oil, *Procedia Engineering*, 90 (2014): pp. 733–739.

[61] Masuko M. et al. 2015.

Friction and wear characteristics of DLC coatings with different hydrogen content lubricated with several Mo-containing compounds and their related compounds, *Tribology International*, 82 (2015): pp. 350–357.

[62] Yang L. et al. 2014.

Friction reduction mechanisms in boundary lubricated W-doped DLC coatings, *Tribology International*, 70 (2014): pp. 26–33.

[63] Banerji A. et al. 2014.

High temperature tribological behavior of W containing diamond-like carbon (DLC) coating against titanium alloys, *Surface & Coatings Technology*, 241 (2014): pp. 93–104.

[64] Fujii M. et al. 2011.

Influence of DLC coating thickness on tribological characteristics under sliding rolling contact condition, *Tribology International*, 44 (2011): pp. 1289–1295.

[65] Yang W. et al. 2013.

Microstructure and properties of duplex (Ti:N)-DLC/MAO coating on magnesium alloy, *Applied Surface Science*, 270 (2013): pp. 519–525.

[66] Sharma N. et al. 2012.

Scratch resistance and tribological properties of DLC coatings under dry and lubrication conditions, *Tribology International*, 56 (2012): pp. 129–140.

[67] Chen Y. et al. 2013.

Substrate and bonding layer effects on performance of DLC and TiN biomedical coatings in Hank's solution under cyclic impact–sliding loads, *Surface & Coatings Technology*, 237 (2013): pp. 219–229.

[68] Ikeyama M., Sonoda T. 2013.

Transparent Si–DLC coatings on metals with high repetition bi-polar pulses of a PBII system, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 307 (2013): pp. 340–343.

[69] Стефановић М. 1991.

Развој триболошких модела у обради дубоким извлачењем, *YUTRIB* 91, Крагујевац, 1991, стр. 135-141.

[70] Stefanović M. 1992.

Effects of the Tool Geometry and Tribological Conditions on Stretch-Forming, *Technology of Plasticity*, Novi Sad, Vol. 17, No. 1-2 (1992): pp. 27-37.

[71] Đorđević M. et al. 2017.

Experimental-numerical analysis of contact conditions influence on the ironing strip drawing process, *Industrial Lubrication and Tribology*, 69/42 (2017): pp. 464-470.

[72] Aleksandrović S. et al. 2009.

Tribological properties of steel and al-alloys sheet metals intended for deep drawing, *Tribology in industry*, Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac, 31/3&4 (2009): pp. 11-16.

[73] Aleksandrović S. et al. 2017.

Influence of process parameters on the friction coefficient in one and multi phase steel strip drawing ironing test, 13th International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering DEMI 2017, Banja Luka, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina, 26-27 May (2017): pp. 77-86.

[74] Đorđević M. et al. 2015.

Two-phase ironing process in conditions of ecologic and classic lubricants application, 14th International conference on tribology - SERBIATRIB '15, Belgrade, Serbia, 13 – 15 May (2015): pp. 407-413.

[75] Aleksandrović S. et al. 2017.

Influence of process parameters on the friction coefficient in AlMg3 alloy stripe ironing drawing test, International conference on Tribology SERBIATRIB 2017, Kragujevac, Serbia, 17-19 May (2017): pp. 351-356.

[76] Sulaiman M.H. et al. 2017.

Influence of tool texture on friction and lubrication in strip reduction, *Procedia engineering*, 207 (2017): pp. 2263-2268.

[77] Đorđević M. et al. 2016.

Flat Die Sliding Model with Variable Contact Pressure in Deep Drawing Process, 8th International Scientific and Expert Conference TEAM 2016, Trnava, Slovakia, 19-21 October (2016): pp. 255-259.

[78] Masters I.G. et al. 2013.

Friction behaviour in strip draw test of pre-stretched high strength automotive aluminium alloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 73 (2013): pp. 17-24.

[79] Kosanov J. et al. 2006.

The effect of lubricant additives on the coefficient of friction in the flat-die test, *Materials Science and Engineering*, 427A (2006): pp. 274–281.

[80] Oberland K. 1986.

Prüfung von Schmierstoffen für die Blechumformung, *VDI Berichte Nr. 614* (1986): pp. 201-226.

[81] Rigaut J. 1990.

A New Friction Test Procedure for the Improvement of Drawing and Similar Processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 3 (1990): pp. 3-28.

[82] Đorđević M. et al. 2016.

The variable contact pressure influence on the tensile force in the process of strip sliding in the flat die in ironing, *Materials Engineering - Materialove inženierstvo*, 23/2 (2016): pp. 74-83.

[83] Djordjević M. et al. 2017.

Influence of tribological conditions and continuously variable contact pressure on the process of the thin sheet sliding during the flat-die test, 6th International conference on manufacturing engineering – ICMEN 2017, Thessaloniki, Greece, 5-6 October (2017): pp. 173-183.

[84] Стефановић М. 1993.

Клизање преко затезног ребра - специфичан трибо-тест у обради дубоким извлачењем, *YUTRIB 93*, Трибологија у машинству, 3 (1993).

[85] Ghoo B. Y., Keum Y. T. 2000.

Expert drawbead models for sectional FEM analysis of sheet metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technology*, 105 (2000): pp. 7-16.

[86] Aleksandrović S. et al. 2012.

Variable contact pressure and variable drawbead height influence on deep drawing of Al alloys sheets, *Strojarstvo-Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering*, 54/2 (2012): pp. 109-115.

[87] Mellor P.B. 1981.

Sheet Metal Forming, *Int. Metals Rev.*, 26/1 (1981): pp. 1-20.

[88] Aleksandrović S. et al. 2014.

Influence of variable drawbead height and variable contact pressure in al alloy sheet strip drawing process, 5th International conference on Manufacturing Engineering ICMEN 2014, Thessaloniki, Greece, 1-3 October (2014): pp. 71-78.

[89] Aleksandrović S. et al. 2013.

Defining of pressure and drawbead height functions in sheet metal stripe tensile test over drawbead with variable parameters, 11th International conference on accomplishments in Electrical and Mechanical Engineering and Information Technology DEMI 2013, Banja Luka, RS, B&H, 30 May– 01 June (2013): pp. 397-402.

[90] Witthuser P. 1980.

Untersuchung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen, *Dissert.*, Hanover (1980).

[91] Đorđević M. et al. 2017.

Experimental apparatus for investigation of draw bead influence in deep drawing process, 7th International Conference Manufacturing Technology – PILSEN 2017, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic, 7-8 February (2017): pp. 54-60.

[92] Đorđević M. et al. 2015.

Investigation of the lubricants influence on the ironing process, *Procedia Engineering*, 111 (2015): pp. 149–154.

[93] Đorđević M. et al. 2013.

Influence of lubricants on the multiphase ironing process, 18th International PhD. students' seminar SEMDOK 2013, Žilina-Terchova, Slovakia, 30 January - 1 February (2013): pp. 22-26.

[94] Meinders T. et al. 1998.

The implementation of an equivalent drawbead model in a finite-element code for sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, No 83 (1998): pp. 234-244.

[95] Chen F.-K., Chiang B.-H. 1997

Analysis of die design for the stamping of a bathtub, *Journal of Materials Processing Technology*, No 72 (1997): pp. 421-428.

[96] Heo Y. et al. 2001.

Characteristics of weld line movements for the deep drawing with drawbeads of tailor-welded blanks, *Journal of Materials Processing Technology*, No 111 (2001): pp. 164-169.

[97] Michler J. R. et al. 1994.

A strip-drawing simulator with computer-controlled drawbead penetration and blankholder pressure, *Journal of Materials Processing Technology*, 43 (1994): pp. 177-194.

[98] Burk T. G. et al. 1996.

Tool design for aluminum stamping, Aluminum and Magnesium for Automotive Applications, Edited by J. D. Bryant, The Minerals, Metals & Materials Society, (1996).

[99] Wagner S. 1998.

Tribology in drawing car body parts, 11th International colloquium: Industrial and automotive lubrication, Technische Akademie Esslingen, january 1998., Vol. III, pp. 2365-2372.

[100] Liewald M. 2008.

Current Trends in Research on Sheet Metal Forming at the Institute for Metal Forming Technology (IFU) at the University Stuttgart, Papers of the International Conference on "New Developments in Sheet Metal Forming", IFU Stuttgart, 2008., pp. 263-288.

[101] Blaich C., Liewald M. 2008.

New Approach for Closed-Loop Control of Deep Drawing Processes, Papers of the International Conference on "New Developments in Sheet Metal Forming", IFU Stuttgart (2008): pp. 363-384.

[102] Zhang L. et al. 2017.

Experimental and theoretical investigation on the role of friction in Nakazima testing, Internation Journal of Mechanical Sciences, 133 (2017): pp. 217-226.

[103] Tamai Y. et al. 2016.

FE forming analysis with nonlinear friction coefficient model considering contact pressure, sliding velocity and sliding length, Journal of Materials Processing Technology, 227 (2016): pp. 161-168.

[104] MA Wen-yu et al. 2015.

Effect of friction coefficient in deep drawing of AA6111 sheet at elevated temperatures, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25 (2015): pp. 2342-2351.

[105] Siegert K. et al. 1995.

Closed-loop control system for blank holder forces in deep drawing, Annals of the CIRP Vol. 44/1 (1995): pp. 251-254.

[106] Siegert K., Ziegler M. 1997.

Pulsating blank holder forces in the deep-drawing processes, Annals of the CIRP Vol. 46/1 (1997): pp. 205-208.

[107] Cherrill P. A., Zhang S. 1998.

A variable force binder for a draw press, Journal of Materials Processing Technology, 73 (1998): pp. 7-17.

[108] Katalog proizvoda 1979: Mazive masti i maziva za specijalnu namenu, Fabrika Maziva – FAM Kruševac, 1979.

Web странице:

[w1] www.worldstainless.org

[w2] www.teckcominco.com

[w3] www.world-aluminium.org

[w4] www.alunet.net

[w5] www.abal.org.br

[w6] <http://corporate.arcelormittal.com/>

[w7] <https://tradingeconomics.com/sweden/steel-production>