

**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА ЧАЧАК**



Зоран Еберсолд

**ЕЛЕКТРОНСКО И СОФТВЕРСКО РЕШЕЊЕ
КВАДРОФОНСКЕ ТРАНСМИСИОНЕ
УЛТРАЗВУЧНЕ ДЕФЕКТОСКОПИЈЕ У ПРИМЕНИ
НА ДИРЕКТНО ЛАСЕРСКИ СИНТЕРОВАНИМ
МАТЕРИЈАЛИМА**

Докторска дисертација

У Чачку,
2013. године

**УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА ЧАЧАК**

Ментор: Др Слободан Ђукић, редовни професор

ИДЕНТИФИКАЦИОНА СТРАНИЦА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ
<i>I. Аутор</i>
Име и презиме: Зоран Еберсолд
Датум и место рођења: 28.01.1960. Пожаревац
Садашње запослење: Инжењер – програмер, „Fujitsu Technology Solutions“ у Аугсбургу, Немачка
<i>II. Докторска дисертација</i>
Наслов: Електронско и софтверско решење квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије у примени на директно ласерски синтерованим материјалима
Број страница: 197
Број слика: 144
Број библиографских података: 158
Установа и место где је рад израђен: Универзитет у Крагујевцу, Факултет техничких наука Чачак
Научна област (УДК): Електротехничко и рачунарско инжењерство
Ментор: Проф. Др Слободан Ђукић, редовни професор Факултета техничких наука Чачак
<i>III. Оцена и одбрана</i>
Датум пријаве теме: 18.01.2012.
Број одлуке и датум прихватања докторске дисертације: 339/9 од 14.03.2012.год.
Комисија за оцену подобности теме и кандидата: <ol style="list-style-type: none"> 1. Др Слободан Ђукић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 2. Др Бранислав Петровић, редовни професор, Електронски факултет, Ниш 3. Др Небојша Митровић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 4. Др Сениша Ранђић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 5. Др Бранка Јордовић, редовни професор., Факултет техничких наука, Чачак
Комисија за оцену докторске дисертације: <ol style="list-style-type: none"> 1. Др Слободан Ђукић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 2. Др Бранислав Петровић, редовни професор, Електронски факултет, Ниш 3. Др Небојша Митровић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 4. Др Сениша Ранђић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 5. Др Бранка Јордовић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак
Комисија за одбрану докторске дисертације: <ol style="list-style-type: none"> 1. Др Слободан Ђукић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 2. Др Бранислав Петровић, редовни професор, Електронски факултет, Ниш 3. Др Небојша Митровић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 4. Др Сениша Ранђић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак 5. Др Бранка Јордовић, редовни професор, Факултет техничких наука, Чачак
Датум одбране дисертације:

*Дух слободарског и креативног истраживања,
инспирисан сценаријима актуелних потреба,
почивајући на постојећим знањима и искуствима,
је фундамент непосредно делотворног
проналазаштва.*

*Овај рад посвећујем
мојој мајци
Анђелки Еберсолд рођ. Миленковић
учитељици и наставници музике
1935 †2004

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	1-1
2. ТЕОРИЈСКИ ДЕО	2-1
2.1 Директно ласерско синтеровање материјала	2-1
2.1.1 Предности ласерског синтеровања	2-4
2.1.2 Синтеровање.....	2-5
2.1.3 Основни принципи синтеровања.....	2-6
2.1.4 Појмови „Rapid Prototyping”, „Rapid Tooling”, „Rapid Manufacturing”	2-9
2.1.5 Поступак директног ласерског синтеровања DLSM.....	2-10
2.1.6 Поступак индиректног ласерског синтеровања ILSM	2-14
2.1.7 Актуелно стање у вези DLSM поступка.....	2-16
2.1.8 DLSM техника у развоју	2-17
2.1.9 Рачунарске симулације поступка синтеровања	2-19
2.1.10 Ток рачунарске симулације	2-22
2.1.11 Дефектоскопија делова добијених DLSM поступком.....	2-23
2.2 Техника ултразвука	2-24
2.2.1 Звучни таласи	2-24
2.2.2 Звучно поље	2-27
2.2.3 Примене ултразвука	2-29
2.3 Електронска мерења неелектричних величина (сензорика)	2-30
2.3.1 Сензорика	2-31
2.3.2 Пиезоелектрични ефекат.....	2-31
2.3.3 Ултразвучни сензори на принципу пиезоелектричког ефекта.....	2-33
2.4 Дефектоскопија.....	2-36
2.4.1 Ултразвучна дефектоскопија.....	2-36
3. МЕТОДА КВАДРОФОНСКЕ ТРАНСМИСИОНЕ УЛТРАЗВУЧНЕ ДЕФЕКТОСКОПИЈЕ (KTUD)	3-1
3.1 Електронско решење	3-7
3.1.1 Принципи електронског решења.....	3-7
3.1.2 Патентирани дефектоскоп на принципу методе KTUD.....	3-11
3.1.3 Лабораторијски експериментални склоп за KTUD	3-16
3.1.4 Концепти анализе сигнала KTUD	3-19
3.1.5 Калибрација.....	3-24
3.2 Софтверско решење апликације за приказ дијаграма мерења.....	3-26
3.2.1 Релациона база података за KTUD.....	3-28
3.2.2 WEB апликација.....	3-42

4.	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ МЕРЕЊА KTUD	4-1
4.1	Поступак мерења и анализа резултата	4-4
4.2	Својства испитиваног узорка AlSi12	4-8
4.3	Својства узорка AlMg3 за упоредна мерења	4-10
4.4	Резултати и анализа резултата мерења над узорком AlSi12	4-12
4.4.1	Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорак AlSi12 без дефекта	4-13
4.4.2	Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорак AlSi12 са дефектом	4-24
4.4.3	Упоређивање резултата мерења на узорку AlSi12	4-34
4.5	Резултати и анализа резултата мерења над узорком AlMg3	4-39
4.5.1	Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорку AlMg3 без дефекта	4-40
4.5.2	Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорку AlMg3 са дефектом	4-49
4.5.3	Резултати мерења утицаја дефекта на узорку AlMg3	4-58
4.5.4	Упоређивање резултата мерења на узорку AlMg3	4-64
5.	ЗАКЉУЧАК	5-1
6.	ЛИТЕРАТУРА	6-1
7.	ПРИЛОЗИ	7-1
7.1	Патентно писмо и додела патента KTUD дефектоскопа	7-2
7.2	Позив Одбора за дефектоскопију без разарања Савеза немачких инжењера (VDI)	7-5
7.3	Изводи из софтверског кода	7-6

1.

УВОД

Предмет ове докторске дисертације представља дефектоскоп који функционише на принципу нове ултразвучне методе, названој квадрофонска трансмисиона ултразвучна дефектоскопска метода (KTUD метода), у примени на директно ласерски синтерованим материјалима.

За потребе ултразвучне дефектоскопије чврстих тела до сада су развијане различите методе. Особине ових метода зависе од области примене и циљева мерења. Карактеристичне мерне величине које се добијају ултразвучном дефектоскопијом су време простирања и интензитет ултразвучних таласа, а ове величине служе као параметри за анализу стања у датом узорку материјала. Ултразвучна дефектоскопија се најчешће реализује употребом само једне ултразвучне главе за емитовање и пријем сигнала, при чему се користи импулсна ехо техника. Импулсна ехо метода је широко распрострањена у литератури и индустрији. Још једна метода ултразвучне дефектоскопије, која је до сада мало развијана, је ултразвучна метода са одвојеним ултразвучним главама. У литератури се о овој ултразвучној методи говори као о поступку у коме се користи једна ултразвучна глава као одашиљач сигнала и једна глава за пријем ултразвучног сигнала, која има улогу сензора. Ова ултразвучна метода се назива „метода проласка звука” или „трансмисиона ултразвучна метода”.

Дефектоскоп заснован на KTUD методи састоји се из модула за генерисање сигнала релативно ниских, а тиме и веома продорних ултразвучних фреквенција, као и четири електронска мерна ланца за пријем и конверзију трансмисионих ултразвучних сигнала.

Иницијална мотивација за проналажење и развој новог дефектоскопа, су захтеви који су се појавили на пољу најновијих међународних научних истраживања директно ласерски синтерованих метала (DLSM). Истраживања DLSM припадају научној дисциплини развоја савремених техничких материјала, а најчешћи циљ им је израда чврстих, лаганих и шупљикавих материјала за различите врсте примена. Нарочито је

битна производња металних елемената у техници орбиталних сателита, савремених мотора и авионској техници. Посебно су ригорозни захтеви у области производње материјала за свемирску технику, где се од елемената тражи да имају све мању тежину, а да при томе имају исте или чак боље механичке особине од елемента произведених на конвенционалан начин.

Важан разлог за развој DLSM методе је покушај испуњавања захтева за већом економичношћу производње при малим серијама машинских елемената и потреба за испуњавање захтева све комплекснијих геометрија металних елемената, и то како спољашњих тако и унутрашњих. И поред мноштва побољшања која су до данас постигнута у развоју DLSM технике, и даље постоје разни проблеми, као што је нежељено рушење хелијских геометрија, а што је нарочито проблематично у области свемирске технике где је обавезан изузетно висок ниво квалитета елемената.

Директно ласерско синтеровање метала је технологија производње код које се тродимензионални елемент изграђује на тај начин што се додају један по један део запремине у облику танког слоја, чиме настаје порозан и шупљикав елемент, који је чврст и лак. За разлику од индиректног ласерског синтеровања метала, директно ласерско синтеровање метала се састоји од само једног процесног корака. Велика предност директне методе је управо постојање једног процесног корака мање, чиме се избегава проблематична процедура очвршћавања у пећи, па је резултат тога знатно краће време производње елемента. Поред предности које носи директна метода, постоје и мане које се огледају у много већем броју физичких феномена које је потребно контролисати, него што је то случај код индиректног ласерског синтеровања. Последице претходно изречених мана DLSM методе доводе до недовољно уједначеног квалитета производа. У неким случајевима настају пукотине, а понекад долази и до рушења унутрашњих структура.

На међународном истраживачком нивоу, са циљем побољшања резултата DLSM методе, ради се на оптимизацији производног процеса синтеровања и на унапређењу нумеричке симулације производног процеса. Такође, са циљем побољшања резултата DLSM методе од велике користи и за науку и за индустрију била би и могућност примене ултразвучне дефектоскопије на производима директног ласерског синтеровања. Међутим, тренутно актуелна метода ултразвучне импулсне ехо технике није примењива, пре свега због велике порозности и шупљикавости елемената произведених директним ласерским синтеровањем. Велика порозност и шупљикавост изазива изражену апсорпцију ултразвучних таласа у материјалу што доводи до немогућности

ултразвучне дефектоскопије применом сигнала високих фреквенција (неколико мегахерца).

Циљ овога рада је да пружи конкретан допринос контроли квалитета процеса производње DLSM производа, представљањем методе квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије (KTUD). Ова нова метода, омогућава ултразвучну дефектоскопију елемената произведених директним ласерским синтеровањем.

Дисертација је подељена у неколико глава, како би се почевши од приказа релевантних теоријских основа из области науке и технике, у даљем излагању приказало ново решење у области ултразвучне дефектоскопије.

Најпре је приказан преглед стања науке и технике у области директног ласерског синтеровања и области ултразвучне дефектоскопије чврстих тела. Поред приказа главних принципа директног ласерског синтеровања DLSM, разматрају се теоријске основе процеса синтеровања и предности и проблеми DLSM. Преглед над актуелним стањем у области технике и истраживачког рада унутар DLSM у смислу најновијих експерименталних испитивања и описа тока нумеричких симулација које се при томе користе, закључују тематику DLSM. У поглављима друге главе, која третирају ултразвучну дефектоскопију, говори се најпре о техници ултразвука као дисциплине акустике, а затим се улази у појединости технике ултразвучне дефектоскопије и разматрају се аспекти електронских мерења неелектричних величина, који су релевантни за сензорику која се користи унутар ултразвучне дефектоскопије.

У трећој глави је приказан развој научног, техничког, електронског и софтверског решења дефектоскопа који функционише на принципу нове KTUD методе. Најпре је објашњен принцип KTUD методе, а затим принципи електронског решења. Након тога је представљен део пријаве патента дефектоскопа који је развијен у току овог рада. Наведена пријава патента је у октобру 2010. године уручена Централном Заводу за Патенте (Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA)) у Минхену, у Немачкој [DPMA]. Јула 2012. год. прихваћен је патент под редним бројем 10 2010 046 781, под називом **"Дефектоскопија узорка материјала без разарања, излагањем узорка ултразвучним таласима и обрадом сигнала насталих трансмисијом ултразвука кроз узорак"** ("Vorrichtung und Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung eines Prüfgegenstands mittels Ultraschallwellen")

Затим је приказан лабораторијски експериментални склоп KTUD методе. Следе концепти анализе мерних сигнала и осврт на тему калибрације. На крају ове главе презентирано је софтверско решење апликације за приказ дијаграма резултата изведених експерименталних мерења, које се састоји из релационе базе података

специјално дизајниране за ову сврху и вишеслојне софверске апликације.

Четврта глава, приказом експерименталних мерења изведених лабораторијским експерименталним склопом, пружа потврду да се са концептом KTUD методе заиста може спровести дефектоскопија материјала израђених директним ласерским синтеровањем. Приказани су резултати и дискусија примене KTUD методе код узорка AlSi12, добијеног поступком директног ласерског синтеровања на Фраунхофер Институту, Аугсбург, Немачка. Током извођења експеримената при различитим вредностима параметара извршена је оптимизација облика ултразвучног сигнала и притиска сензора на површину испитиваног узорка, с циљем добијања најбоље анализе структуре материјала са становишта постојања дефеката. Сprovedена је и упоредна анализа експеримената над стандардним индустријским узроком AlMg3.

У закључку се резимира успешност истраживања у смислу решења и сазнања која су постигнута у овом раду и показује се перспектива даљег развоја KTUD методе и дефектоскопа који се на њој заснива.

2.

ТЕОРИЈСКИ ДЕО

Ова глава се односи на преглед стања науке и технике у области ласерског синтеровања и ултразвучне дефектоскопије чврстих тела. Поред приказа главних принципа генеративних поступака у које спада ласерско синтеровање, разматрају се предности и проблеми, и даје се преглед над актуелним стањем у истраживањима, експерименталним испитивањима, као и опис тока нумеричких симулација у области ласерског синтеровања.

У поглављима која третирају ултразвучну дефектоскопију, говори се о техници ултразвука као дисциплине акустике, а затим се улази у појединости технике ултразвучне дефектоскопије и разматрају се аспекти електронских мерења неелектричних величина, која су релевантна за сензорику која се користи унутар ултразвучне дефектоскопије.

Теоријске основе синтеровања и ултразвука, као и излагања презентована о њима, преузета су из литературних извора. Све слике, графици и дијаграми који су презентовани, реализовани су од стране аутора овог рада, с изузетком фотографија система компаније SLM [SLM], за коју је је ова компанија дала одобрење за употребу и објаву у овом раду.

2.1 Директно ласерско синтеровање материјала (DLSM)

Ласерско синтеровање метала спада у генеративне технологије производње. Генеративним технологијама означавају се поступци код којих се тродимензионални елемент гради на тај начин што се додаје један по један део запремине елемента у облику танких слојева а њима се израђују метални и неметални елементи. Тренутно су најбројнији системи генеративног поступка производње елемената од неметала и ова технологија већ поседује висок ниво испуњења захтева за квалитетом. У овом раду се говори о генеративним поступцима за производњу металних елемената и то специјално о поступку директно ласерско синтеровања метала (DLSM) који је предмет најновијих

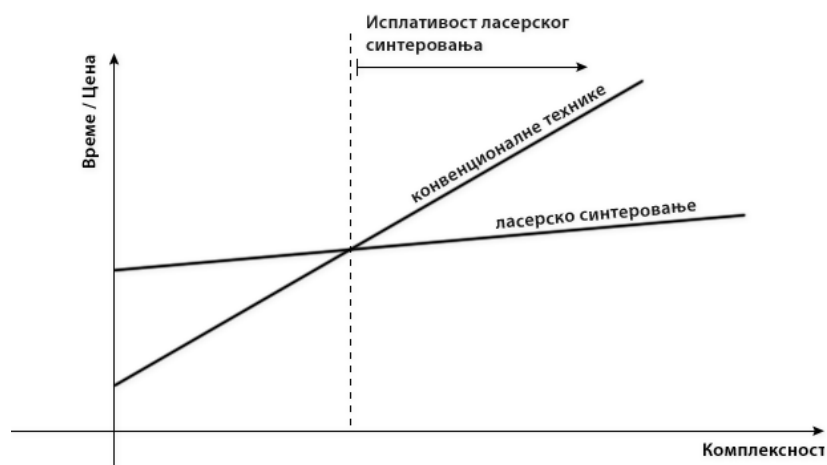
међународних научних истраживања са циљем постизања израде чврстих и уједно и лаганих порозних шупљикавих елемената за примене у техници орбиталних сателита, технологији најмодернијих мотора и у авионској техници.

Насупрот генеративним поступцима, конвенционални машински поступци резања, бушења, брушења, глодања итд., означавају се као субтрактивни поступци израде елемената. Генеративне технологије израде машинских елемената се пореде са субтрактивним методама, а такође се пореде и са разним категоријама конвенционалних поступака ливења метала, као и са поступцима ласерске ерозије. Упоређења увек узимају у обзир време потребно за производњу, настале трошкове и ефикасност, а осим тога, у зависности од датог сценарија пореде се и други параметри [Fae02]. Проблеми који се све чешће јављају код конвенционалних техника, леже у томе што су до сада економичност омогућавале велике серије произведених елемената и ако су за припрему производње појединачне серије, најчешће биле потребне велике инвестиције.

Међутим, у садашњим, измењеним условима, знатно расте потреба за мноштвом варијанти производа у малим серијама (или чак за само појединачним прототиповима и моделима). Мале серије или појединачни производи, конвенционалним техникама стварају тешкоће у финансирању оваквог типа производње. Осим тога, захтеви за све комплекснијим геометријским облицима елемената (како спољашњим, тако и унутрашњим геометријама), нарочито у техници производње орбиталних сателита, мотора и авиона, све више расту и почињу да надмашују могућности конвенционалних техника. Када се на то додају посебни захтеви из области свемирске технике - да елементи треба да имају вишеструко мању тежину него до сада, а да при томе имају исте или чак боље механичке особине од елемената произведених на конвенционалан начин, постаје разумљиво, да се техника и наука све интензивније баве унапређењем генеративних поступака који нуде перспективу испуњења ових нових захтева, а све то по рентабилној цени.

На слици 2.1. је приказан дијаграм из кога се види, да исплативост ласерског синтеровања расте са порастом комплексности [Fae02]. У литератури се у вези са генеративним поступцима редовно спомињу појмови израде модела, израде прототипова и израде малих серија елемената. Нарочито што се тиче прва два појма, добро је прецизирати да је сходно дефиницији у литератури [Mei05] - модел пројекција неког система или процеса у неки други реални систем који довољно тачно одговара

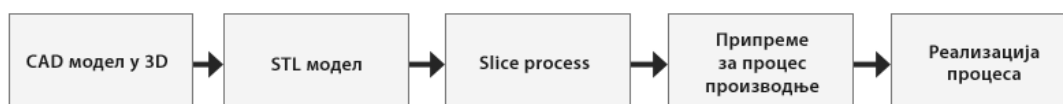
првобитном систему или процесу који се тиче једног изабраног подскупа постављених питања.



Слика 2.1 Зависност исплативости и комплексности ласерског синтеровања [Fae02].

У оквиру водећих дисертација из области ласерског синтеровања [Mei05], појам модела се описује као пројекција планираног производа, при чему прототип не пружа свеукупна својства производа, а његова намена је експериментална примена у смислу сакупљања практичних искустава. То значи да је моделу и прототипу, заједничко то, да презентују само један део особина које би имао крајњи производ. За разлику од модела и прототипа, серијски елементи морају да садрже свеобухватне планиране особине и при томе морају да буду испуњени прописани критеријуми квалитета.

Ласерско синтеровање метала се изводи директно на основу тродимензионалних CAD (Computer-Aided Design) података, грађењем, тј. ласерским синтеровањем, једног по једног танког слоја металног праха [Bea97]. Ток процеса који је приказан на слици 2.2 почиње тако што се машински елемент најпре конструише помоћу тродимензионалног CAD модела.



Слика 2.2 Процесни ток генеративног поступка [Bea97].

Обавезно је да модел мора да има затворене површине и да подаци о њему садрже комплетне информације о његовим спољашњим и унутрашњим облицима. Након тога се 3D модел из CAD формата преноси у тзв. STL формат. STL је скраћеница за „Standard Transformation Language”, што представља интерфејс који апроксимира

површине модела помоћу полигона. Код јако закривљених површина потребан је велики број веома малих полигона, док код мање закривљених или равних површина потребан је мањи број полигона [Fae02]. Модел у STL формату се позиционира у виртуелном простору за изградњу где се модел виртуално сече на хоризонталне слојеве (2D) подједнаке висине. Ово исецање се назива „SLICE process”. Тако настали пакети података појединачних танких слојева представљају информације за израду путем генеративног поступка.

У фази припреме за процес производње, појединачним слојевима се додељују специфични процесни параметри (нпр. снага ласера [Fae02]). Ти слојеви се тада један по један реализују (детаљније у поглављу 2.1.5. „Поступак директног ласерског синтеровања” [Mac99]). За изведбу трансформације CAD података у STL датотеке, постоје одговарајући софверски пакети. Тренутно се изводе пројекти, специјалне адаптације појединих софверских пакета, за потребе примене у техници орбиталних сателита авионској техници. Комплексни поступци израде тродимензионалних елемената трансформишу се у далеко једноставније дводимензионалне помоћу генеративног поступка. Свакако, примена овог процеса је неопходна код комплексне геометрије елемената [Fae02].

2.1.1 Предности ласерског синтеровања

Предности ласерског синтеровања су вишеструке:

- повећање брзине производног поступка („time to market“) на само неколико сати (5 до $20 \text{ cm}^3/h$), почев од CAD конструкције до готовог производа;
- висок степен аутоматизације;
- смањење трошкова: минимизирање погонских и персоналних издатака;
- нове могућности логистике: смањење трошкова складиштења, мале серије, велики спектар производа;
- нови пословни модели: на пример, израда резервних делова по потреби „spare parts on demand“;
- прилагођавање производа појединачним потребама („customization“).

Значајна особина ласерског синтеровања је могућност израде најразличитијих конструкција изузетно комплексних геометрија, како спољашњих тако и унутрашњих. Тако је, на пример, могуће израдити машинске делове са каналима за хлађење који теку паралелно са површином („conformal cooling“) а који су спиралне геометрије. За потребе машинских делова за орбиталну технику (сателити, ракете, постројења за

лансирање) је веома важна могућност израде машинских делова који имају исте механичке особине као делови који би били произведени на класичан начин, али са вишеструко мањом тежином (при лансирању постоје границе максималне тежине које се не смеју прекорачити). Други аргумент за израду елемената технологијом ласерског синтеровања је и могућност израде површина које имају одређен степен храпавости. Специјална храпавост машинских делова отвара могућности повезивања машинских делова за друге површине унутар летелице техником лепљења. Машински метални делови произведени DLSM техником чију површину карактерише одређена храпавост, могу се поуздано и лако лепити на површине других елемената направљених од разних полимера, што представља атрактивну могућност употребе у сателитској техници.

2.1.2 Синтеровање

Металургија представља поступке добијања и коришћења метала, важних полуметала и неких неметала. Металургија праха је грана металургије, која се бави производњом и даљом обрадом метала у облику праха. Металургија праха се раније називала и „метална керамика”, чиме се желело изразити да се користе поступци који су иначе уобичајени у керамици [Eis66]. Класично синтеровање метала представља технологију у области металургије праха. Класичним синтеровањем се производе машински елементи од металног праха тако што се прах у калупима под притиском згусне, чиме се постиже одређени облик. Како би се додатно постигла и жељена чврстоћа, следи конкретно синтеровање, у смислу загревања, обично на температури која представља око три четвртине температуре топљења датог метала. На тај начин се стварају чврсте везе на додирним тачкама зрна праха, а том приликом, поред загревања, долази и до додатног згушњавања. Кораци технологије синтеровања су [Eis66]: производња праха разним методама и провера квалитета праха, пресовања металног праха, синтеровања у смислу загревања, накнадне механичке обраде, обраде површина и накнадне термичке обраде.

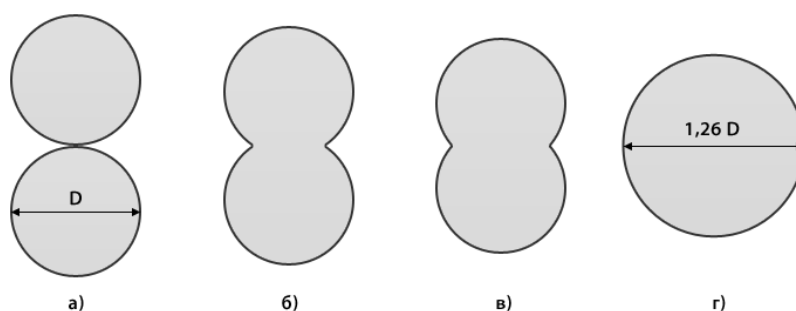
Наведена дефиниција синтеровања као загревања згуснутог праха на око $\frac{3}{4}$ температуре топљења датог метала, изворно потиче из примера синтеровања гвожђа, где је температура синтеровања знатно нижа од температуре топљења гвожђа, па се ово назива синтеровањем у чврстој фази. Код синтеровања тврдих метала, ради се о елементу који се састоји од неколико метала, на пример волфрама, угљеника и кобалта, а често су укључени и додатни елементи. У процесу који следи прво се уједине волфрам и угљеник из облика праха у волфрам-карбид, а затим се у даљем радном кораку изврши синтеровање ове смеше на температури под којом се кобалт истопа.

Удео кобалта у легури износи око 10%, тако да самим тим кобалт успева само да обавије честице волфрам-карбида. Оне се нису истопиле, јер је њихова температура топљења знатно виша од кобалта. Резултат је веома чврст и тврд синтерован елемент који је настао синтеровањем у течној фази [Eis66]. Металургија праха има за циљ да произведе елементе који имају нове особине које се нису могле постићи већ постојећим методама. На пример, добијање легуре као што је волфрам-бакар, не може се остварити топљењем. Такође, још један пример је и комбинација метала и неметала, где долази до заједничког деловања особина компоненти.

Предност металургије праха је непосредно и јефтино постизање сложених облика крајњег елемента, а поступак производње се може комплетно аутоматизовати [Eis66]. Код металургије праха проблематични су трошкови производње праха, а производња квалитетних калупа такође изазива високе трошкове који се економски могу компензовати једино у великим серијама елемената. Битан фактор је и цена пећи за синтеровање где је потребно обезбедити специјалну атмосферу или вакуум. У случајевима када је потребна додатна обрада површина синтерованих елемената долази до додатног повећања цене коштања. Проблемима производње елемената на стандардни начин доприносе и веома компликоване геометрије које се не могу произвести у калупу. На крају, синтеровани елементи су увек порозни. У одређеним случајевима порозност је пожељна, али у ситуацијама када то није, потребно је извршити инфилтрацију других метала у поре настале синтеровањем, што доприноси подизању трошкова који често нису прихватљиви.

2.1.3 Основни принципи синтеровања

Када се метал уситњава да би се произвео прах, доводи се спољна механичка енергија да би се превазишли површински напони метала који се уситњава.



Слика 2.3 Модел процеса синтеровања за два зрна праха.

Спољна површина се знатно повећава и то доводи до енергијске неравнотеже зрна праха произведених на тај начин. Када са касније прах механички згушњава и почне његово синтеровање, пре свега енергија загревања поспешује дифузионе процесе, где долази до размене атома у решеткама, што зрна праха враћа у стање енергијске равнотеже.

Основа процеса синтеровања је разлика енергија између почетног и крајњег стадијума [Fae02]. Током процеса долази до редукције површина и разграђивања дефеката, што смањује диференцију слободне енергије. Најважнији чиниоци процеса синтеровања су: време трајања синтеровања, температура у пећи и почетна густина употребљеног праха [Fae02], [Scha07], [Ger96].

Скица феноменолошког приступа објашњења синтеровања је приказана на слици 2. 3. Виде се следећа карактеристична стања: а) почетни контакт у једној тачки, б) почетни стадијум стварања врат, в) интензивни стадијум пораста врата и г) крајње стање у касном стадијуму синтеровања. Упоредбе детаља б и в слике 2.3. показује како долази до приближавања центара зрна и до стварања тзв. „врата” који повезује зрна.

Следећа једначина показује утицаје фактора времена t на приближавање зрна праха:

$$\left(\frac{X}{D}\right)^n = \frac{B \cdot t}{D^m} \quad (2.1)$$

при чему је:

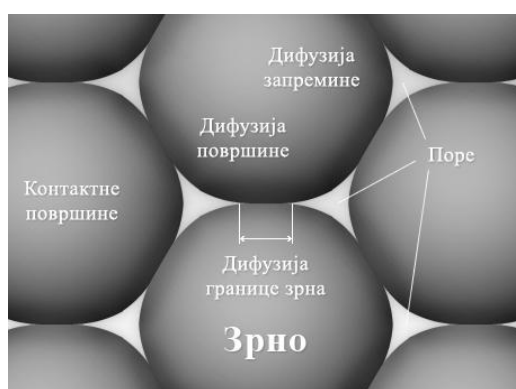
- X - пречник „врата”
- D - пречник зрна праха
- B - фактор параметара материјала
- t - време
- n - експонент који зависи од материјала
- m - експонент који зависи од материјала.

Једначина (2.1) показује најважније зависности у процесу синтеровања, а да би се константе B и експоненти n и m одредили, мора се експериментално доћи до одговарајућих графикона.

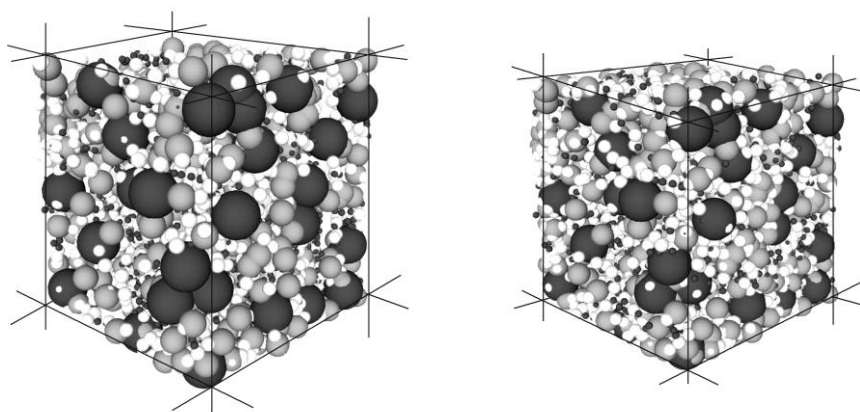
Утицај температуре која влада током синтеровања је садржана у фактору параметара материјала. Виша температура синтеровања доводи до већег приближавања зрна и тиме води ка већој густини, што опет резултира већом чврстоћом синтерованог елемента.

Карактеристике праха су величина зрна, расподела величине зрна и облик зрна. Сходно једначини (2.1) мања величина зрна доводи до веће густине и веће чврстоће, а свеукупно убрзава процес синтеровања. На крају, већа почетна густина употребљеног праха доводи до мање порозности и веће крајње густине [Fae02], [Ger96]. Микроскопски гледано, при синтеровању долази до транспорта материјала од граница зрна у поре на основу разних дифузионих процеса. За згушњавање је пре свега одговорна дифузија по граници зрна. Овде долази до смањења слободне енергије површина, која резултира знатно гушћем, монолитичном крајњем стању.

Слика 2.4. показује детаље дифузије границе зрна, површине и запремине.



Слика 2.4 Дифузија границе зрна, површине и запремине.



Слика 2.5 Почетна и крајња структура симулације синтеровања.

На слици 2.5. је приказана дифузија материјала, са макроскопске тачке гледишта. На левој страни приказан је један пример почетне структуре, док је на десној приказана иста структура након што је дошло до згушњавања, тј. смањења свеукупне запремине.

2.1.4 Појмови „Rapid Prototyping”, „Rapid Tooling”, „Rapid Manufacturing”

У вези са ласерским синтеровањем, како индиректним ILSM, тако и директним DLSM, у публикацијама се користе појмови „Rapid Prototyping (RP)“, „Rapid Tooling (RT)“ и „Rapid Manufacturing (RM)“. Аутори разних публикација на ову тему, не разликују увек у каквој су релацији RP, RT и RM у односу на DLSM и ILSM, што често изазива неспоразуме. Наиме Rapid Prototyping (RP) означава генеративни производни поступак, чија је главна одлика могућност веома брзе производње модела и прототипа. Међутим, прототипови нису увек израђени чак ни од истог материјала од кога ће бити израђен серијски производ. Понекад се прототипови израђују од материјала који са материјалом серијског производа нема чак ни сличности. Код таквих прототипова се фокус усмерава на пример једино на облик или нешто друго. Међутим, генеративни поступци DLSM и ILSM су предвиђени за производњу мањих и већих серија, с тим што се користе за производњу модела и прототипова. Из наведеног разлога је од стране аутора водећих дисертација из ове научне области, уследила препорука да се појам RP не користи као апсолутан синоним за генеративне поступке DLSM и ILSM. Позиција RP на временској оси процеса настанка производа, је одмах након што је израђен концепт машинског елемента. Са RT се означава фаза тј. поступак који се на временској оси налази у пројектној фази инжињеринга.

Дакле, RT је нешто каснија фаза унутар процеса настанка производа. Rapid Manufacturing (RM) је каснија фаза процеса настанка производа, када је већ постигнута одговарајућа „зрелост“ производа за веће серије. Из тог разлога се DLSM и ILSM могу уврстити такође у RT и RM, а не само у RP, што је битно, како не би долазило до нејасноћа.

Када се ради о позицији DLSM и ILSM унутар RP, онда је важно да је изузетно брза изведба конструкције инжењера увек могућа. Да би се то доследно постизало, потребно је располагати већим капацитетима DLSM и ILSM постројења. Економски гледано, тиме се не постиже висок степен искоришћења производних капацитета. Међутим, та цена се мора платити, како би захтеви који се постављају у односу на DLSM и ILSM, били заиста испуњени.

Важно је истаћи и то, да се појмови „Rapid Prototyping (RP)“, „Rapid Tooling (RT)“ и „Rapid Manufacturing (RM)“ у литератури обухватају једним заједничким називом „e-Manufacturing“ у смислу брзе и флексибилне производње директно из електронских података конструктора. За назив RM користе се као синоними и називи „Solid Freeform Manufacturing“, „Additive Manufacturing“ и „Layer Manufacturing“.

2.1.5 Поступак директног ласерског синтеровања DLSM

Директно ласерско синтеровање метала DLSM у односу на индиректно ласерско синтеровање метала ILSM је новији поступак и састоји се од само једног процесног корака [Ove03]. Тренутно у области директног ласерског синтеровања, поред директног ласерског синтеровања метала DLSM, постоје и технологије које се називају Selective Laser Melting (SLM) и Laser CUISSING. Све три технологије заснивају се на истом физичком принципу, а разликују се пре свега у врстама материјала који се могу синтеровати. Тако се код DLSM синтерују мешавине праха, а код SLM и Laser CUISSING се синтерују метали само једне компоненте. Осим тога, разлике међу њима леже и у „стратегијама скенирања“. Унутар тематике стратегија скенирања, важан појам је „вектор скенирања“ који означава површину коју ласерска глава синтерује у појединачном кораку без прекида. Постоји још једна метода генеративног поступка, која има велике сличности са директним ласерским синтеровањем па се често помиње у контексту теме DLSM: то је синтеровање електронским млазом („Electron Beam Melting“ (EBM) [Mei05]). За разлику од директног ласерског синтеровања, код EBM се као извор енергије синтеровања користи електронски млаз који се производи електродама, између којих влада електрични напон од неколико десетина kV . Овде се предности огледају у могућности веома динамичног управљања скретања електронског млаза магнетним намотајима. Дакле, за разлику од ласерских система, код EBM не постоје проблеми инерције модула за скретање. Лоше стране EBM су нижа прецизност него код DLSM и проблеми око превелике храпавости површина. Ипак, EBM се интензивно и даље развија (опција вишеструких млазова) па EBM има великог потенцијала унутар генеративних поступака.

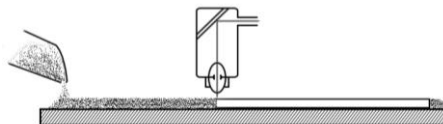
На сликама 2.6.1 до 2.6.6 су приказане скице поступка директног ласерског синтеровања [Mei05]:

- машински део се изграђује на основи (слика 2.6.1)
- резервоар доводи метални прах и наноси први слој (слика 2.6.1)
- ласер учвршћује метални прах првог слоја, сходно информацијама из STL интерфејса и производних информација (слика 2.6.2)
- аналогно првом слоју, издрађује се други слој. Ласер синтерује други слој и истовремено повезује актуелни слој са слојем испод њега (слика 2.6.3)
- слике 2.6.4 и 2.6.5 показују синтеровање трећег слоја и
- слика 2.6.6 показује израду четвртог слоја.

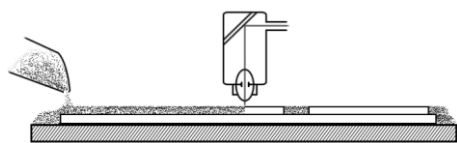
На тај начин се формирају појединачни слојеви елемента који се гради. Слојеви имају дебљину од око 50 μm до 80 μm . Овакав принцип се у литератури уопштено назива селективним ласерским синтеровањем SLS па је скраћеница SLS често присутна и њено мешање са скраћеницом SLM није дозвољено.



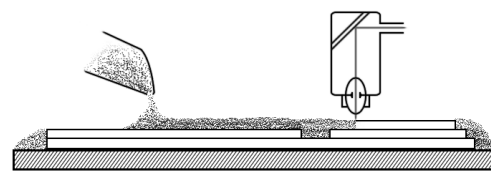
Слика 2.6.1 Наношење првог слоја праха.



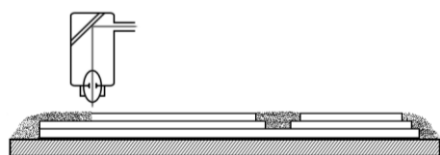
Слика 2.6.2 Синтеровање делова првог слоја праха.



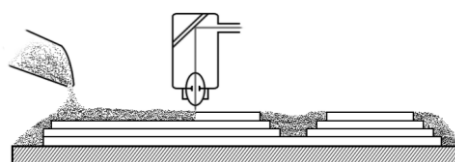
Слика 2.6.3 Синтеровање делова другог слоја праха.



Слика 2.6.4 Синтеровање првог дела трећег слоја праха.



Слика 2.6.5 Синтеровање другог дела трећег слоја праха.



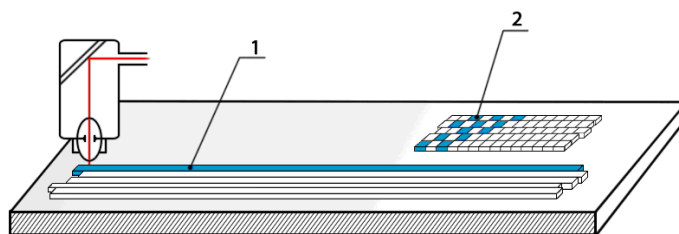
Слика 2.6.6 Синтеровање другог дела четвртог слоја праха.

Слика 2.6 Скице поступка директног ласерског синтеровања.

Треба нагласити да је SLS термички процес који је био употребљаван релативно давно у области процесирања термопласта али је касније дошло до његове примене и код синтеровања металног праха [Fae02], [Nel93], [Ste00]. Извор енергије за синтеровање су разне врсте ласера снаге од 200 W до 400 W. Поред гасних ласера HeCd-, Ar+- или CO₂ ласера, углавном се употребљавају ласери са чврстим језгром односно Nd-YAG или YAG ласери. На сликама 2.6.1 до 2.6.6 је приказана метода довођења праха која се назива метода левка. Осим ове методе, у пракси се у сврху наношења новог слоја праха често користе и друге методе, као што су методе ваљка и метода лењира. Овде се елемент који се гради, налази на једној вертикално покретној плочи (подлози), која се налази посуди. Посуда се ваљком или лењиром, гурањем праха са стране (из резервара који се налази са стране) доводи прах на површину. За наношење новог слоја се плоча, на којој се налази елемент, прецизним серво мотором спушта за висину дебљине новог слоја. Резервоар, у коме се налази прах, лежи у посуди, а истовремено и на металној вертикално покретној плочи, па се приликом сваке итерације, плоча у резервоару симултано моторно подиже, како би ваљку тј. лењиру била стављена на располагање

нова доза праха за гурање. Једна од најновијих метода довођења праха је „поступак сита” [Sig07], где се малим мотором постиже вибрација сита, које се креће на извесној висини изнад површине где се наноси прах. Прах пада кроз сито, а током падања се образује „облак праха” између сита и површине. Предност ове нове конструкције је решење проблема досадашњих метода, као што су агломерација праха током сипања или гурања праха и директни додир механизма за наношење са површином. Додатна предност је и то што механизми не морају да буду отпорни на високе температуре. Постоје и друге идеје решења довођења праха, које се тренутно развијају.

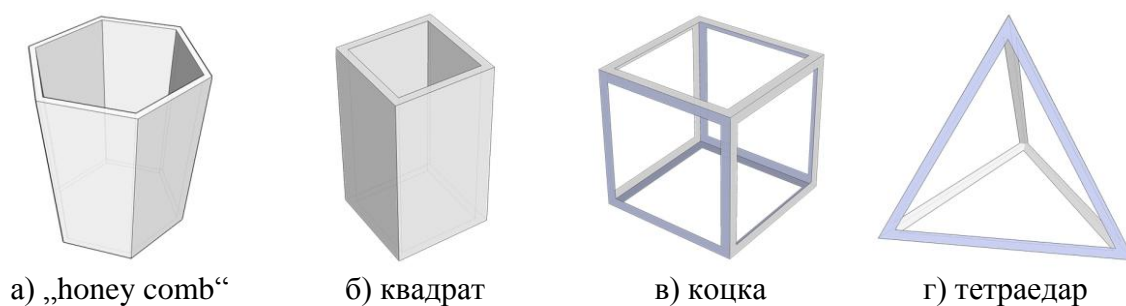
У примени SLS принципа унутар DLSM технологије, разликује се синтеровање металног праха које се састоји од једне компоненте и металног праха који се састоји од више компоненти. На основу веома високих температура које настају приликом уношења енергије ласера у прах који се састоји само од једне компоненте, долази до потешкоћа. Овде настаје нежељена порозност, јављају се велики напони који деформишу облик па је квалитет површине лош [Fae02]. Док су код термопласта у оваквом поступку површински напони били за неколико редова величина мањи, код метала који се састоји од само једне компоненте настају велики индуковани напони, па се овај поступак примењује једино код веома малих елемената [Mei99]. Синтеровање металног праха који се састоји од више компоненти решава претходно споменуте проблеме тако што се за SLS процес праве мешавине праха које се састоје из прве компоненте која се топи на нижој температури и друге компоненте са вишом температуром топљења [Bra10]. Компонента са нижом температуром топљења се под утицајем енергија ласера топи и почиње да се обавија око друге компоненте. Прва компонента има улогу везивне компоненте. Зрна праха друге компоненте се не спајају, тј. не улазе у међусобну хемијску реакцију.



Слика 2.7 Модели скенирања DLSM технологије.

На слици 2.7. у детаљу 1, приказан је модел скенирања где дужина вектора скенирања износи вишеструки износ његове ширине. На слици 2.7. у детаљу 2 су приказани поређани кратки вектори, према распореду који се у литератури често назива „island“-тип вектора скенирања. Могуће су и разне комбинације приказаних стратегија

скенирања. Велика предност директног поступка ласерског синтеровања метала је у томе што се изводи само један процесни корак. Тиме цела процедура очвршћавања у пећи [Ove03], која иначе постоји код индиректног поступка, сада постаје непотребна, што доводи до знатно краћег времена производње. Ипак, директна метода има и недостатака: хрпаовост површина, тешкоће око толеранција, често недовољна чврстоћа и недовољно уједначен квалитет производа од узорка до узорка. Такође, током описаних векторских скенирања директном методом синтеровања, долази до много већег броја физичких феномена него што је то случај код индиректних метода, па је управљање процесом компликованије. Као последица тога, у неким случајевима настају пукотине и понекад долази до рушења „ћелијских геометрија“ („cell unit geometries”). Ћелијске геометрије се користе да би се постигла знатна уштеда материјала, смањила тежина и повећала крутост израђених машинских делова [Fae02].

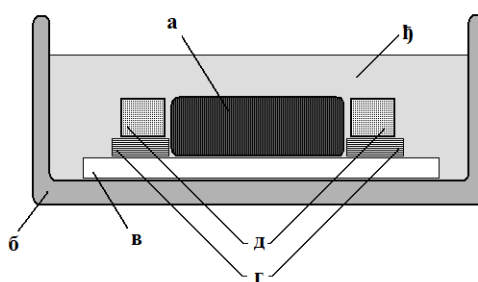


Слика 2.8 Ћелијске геометрије.

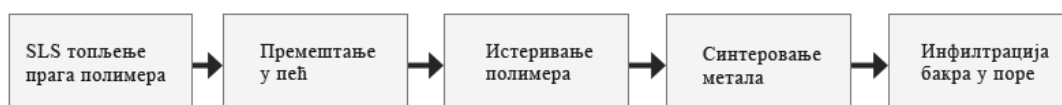
Облици ћелијских геометрија могу бити веома разнолики. На слици 2.8. су приказане неке уобичајене ћелијске геометрије: а) структура „тунела“ облика „ћелија саћа“ („honey comb“), б) структура са квадратним обликом основице, в) структура коцке и комплекснија структура г) тетраедар, код којих су зидови ћелија у тој мери редуцирани да остају само ивице, које се тада називају „ребрима“. Овим се постиже даља редуција тежине при готово истим механичким одликама, а „рупе“ у зидовима користе и за то да би се избацио прах који остане након синтеровања. Грађење делова оваквим ћелијским геометријама назива се „designed porosity” и доноси велике предности, нарочито са циљем постизања израде чврстих, а истовремено лаганих, порозних и шупљикавих металних делова. Порозне површине су од нарочитог значаја због постизања могућности лепљења делова произведених DLSM технологијом на површине од полимера. Узорак који је израђен DLSM методом у лабораторијама Фраунхофер Института у Немачкој [FRA], који је главни узорак на коме се показује овде представљена KTUD метода, садржи целуларну геометрију са квадратним обликом основице.

2.1.6 Поступак индиректног ласерског синтеровања ILSM

Код поступка индиректног ласерског синтеровања метала („ILSM“) у првом производно-радном кораку се селективно учвршћују зрна полимера, која су помешана са металним зрнима праха. Тек се у другом кораку, у пећи, помоћу два степена дефинисаних изотермијских температурних профила, постиже коначно синтеровање металних честица [Bad95]. ILSM поступак је старији од DLSM поступка који је у међувремену етаблиран и доведен до релативно високог степена развијености [Fae02]. Недостаци овог поступка су дуже време производње и мањи број легура које се могу обрадити.



Слика 2.9 ILSM елемент у тиглу [Fae02].



Слика 2.10 Кораки ILSM поступка.

Индиректно ласерско синтеровање метала се конкретно изводи тако, што се обрађује мешавина која се састоји од металног праха и праха полимера [Fae02]. Та мешавина праха се најпре обрађује SLS поступком (селективно ласерско синтеровање) при чему је снага ласера димензионисана тако да постиже топљење полимерског праха. Истопљени прах полимера облепљује зрна металног праха. Сама зрна метала у овој фази, међусобно не ступају ни у какву реакцију тј. међу њима не долази ни до каквог повезивања. Пошто се истопљени полимер након третмана ласером охлади, настаје елемент прве фазе, чија је чврстоћа тек толика да се елемент може пажљиво преместити у пећ за даљу термичку обраду. Овим је прва фаза ILSM поступка, дакле SLS фаза, послужила да се реализује обликовање елемента, рачунарским методама као што је описано у DLSM методи: 3D CAD конструкција, STL конверзија и SLICE процес у 2D. То значи да се као и код DLSM поступка првом фазом ILSM методе омогућава

извођење високо комплексних унутрашњих и спољашњих геометрија и елемент је спреман да се из постројења за SLS поступак, премести у пећ.



Слика 2.11 Температурни дијаграм поступка ILSM [Fae02].

На слици 2.9. се види како се елемент (а) који је премештен у пећ поставља у посуду које се назива „тигл” (б) на чијем се дну налази подлога у облику плоче од алуминијумског оксида (в). Тада се, без притиска, елемент подвргава другој фази процеса ILSM методе. Та друга фаза се састоји од вишестепеног загревања у пећи за синтеровање: на прва два температурна нивоа, на пример на температурама од 380 °C и 420 °C, долази до потискивања полимера из елемента. Затим се даљим загревањем, на температури од 1060 °C, постиже синтеровање зрна металног праха. Производ је након тога порозан, нарочито када је употребљен метални прах од гвожђа. У таквом случају, типичном за методу ILSM, пожељно је затворити поре, а то се изводи инфилтрирањем јеног додатног метала између пора честица гвожђа. У ту сврху се у пећ са свих страна елемента поставе блокови од бакра (г) који се ослањају на носаче (д). Сада се целокупни тигл, у коме се налазе елементи окружени бакарним полугама, до врха „залива” прахом (ђ) од алуминијум оксида Al_2O_3 . Ово се назива препарација тигла за фазу инфилтрације бакра у поре елемента. Кораци ILSM поступка су приказани на слици 2.10. На температури од око 1140 °C долази до инфилтрације бакра у елементима гвожђа. Резултат оваквог ILSM поступка је елемент који се састоји од око 60% гвожђа и 40% инфилтрата (бакра) [Fae02]. Након вађења из пећи и постепеног хлађења, елемент се вади из тигла и спреман је за финалну обраду површине конвенционалним

машинским методама. На слици 2.11. се види температурни дијаграм поступка ILSM на наведеном примеру:

Разлог за потребу финалне обраде површина је тај, што се претходно описан елемент од гвожђа, инфилтриран бакром, најчешће производи генеративним поступком да служи као алатка или као калуп за ливење. То је и разлог зашто је непоходно инфилтрирање бакром, јер би иначе висок степен порозности елемента од гвожђа, спречила могућност његове употребе као калупа за ливење.

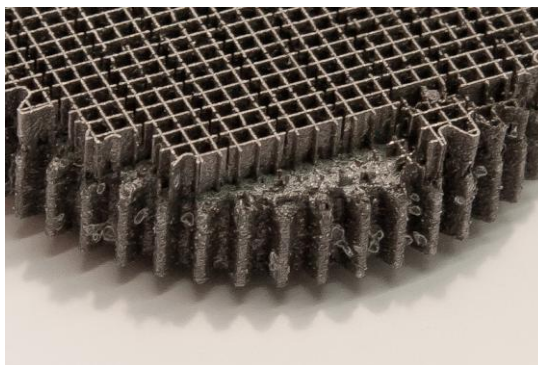
2.1.7 Актуелно стање у вези DLSM поступка

У развоју генеративних технологија и нарочито у области ласерског а нарочито директног ласерског синтеровања метала, постоји велика динамика. Сваке године на тржишту се појављује по неколико нових произвођача адекватних постројења, а годишње се пријављује преко стотину нових патената из ове области. Преглед над актуелним стањем у овом сегменту науке и индустрије пружају бројне публикације у стручним часописима широм света, а структуриран преглед даје и журнал „Wohlers Report” [Woh09] који се објављује годишње. У овом извештају се редовно и детаљно извештава о најновијим достигнућима, објашњавају се бројни нови појмови и даје се приказ инвестиција као и приватних и државних научних програма. Наводе се разне примене, важне конструкционе измене, нови концепцијски модели, описи помоћних система, па чак и адаптација и примене ласерског синтеровања у вајарству и уметности. У сваком броју се обради и по нека област из историје развоја генеративних технологија. Економске анализе пораста продаје постројења су исто тако редовна тема, као и навођење статистичких података броја произведених елемената тј. делова, и процене економске перспективе учесника у овим технологијама. За све који се интересују за набавку нових уређаја, наводи се релативно комплетна листа произвођача одговарајућих производних постројења. Произвођачи се додатно категоризују по областима примена, по континентима, регионима, по величини серија делова који се могу произвести помоћу датих постројења. Заинтересовани посматрачи најновијих трендова унутар ове технологије такође редовно прегледају базе података установа за пријаве патената. Како би се стекао преглед над произвођачима, системима, материјалима и широком спектру разних компоненти из окружења ове области, веома су информативни и специјализовани сајмови из области постројења и материјала.

2.1.8 DLSM техника у развоју

У области DLSM технологије, на интернационалном нивоу се ради на оптимизацији најразличитијих фактора. Тако се на пример експериментално испитују [Bra10]:

- ефективне снаге ласера,
- степен рефлектовања енергије ласера од стране материјала и мера апсорпције енергије материјала,
- предзагревање првим ласером, а завршно синтеровање другим ласером,
- упоређивање резултата разних врста ласера на једну те исту легуру,
- кретања ласера (геометрија покрета и брзина скенирања ласерске главе),
- димензије вектора скенирања,
- испробавање разних мешавина металног праха,
- испробавање разних величина и облика зрна металног праха,
- утицај атмосфере унутар простора синтеровања,
- оптимизација појединачних слојева: њихове равнине, неравнине и дебљине,
- постизање специјалне храпавости и порозности благим померањем положаја вектора скенирања у односу на претходни положај ...



Слика 2.12 Снимак DLSM металног елемента.

Још једно поље истраживања је побољшање познавања особина употребљених материјала. Нарочито у области свемирске технике, обавезно је високостепено познавање својстава употребљених материјала, а осим тога овде постоји захтев да материјали имају исте особине као што је то случај унутар досадашњих конвенционалних техника.

Главна оријентација је ка алуминијумским материјалима и титанијуму, јер они чине основу материјала свемирске технике. Даље је значајно побољшање толеранција.

Код DLSM толеранција тренутно износи неких 0,1 mm, па је јасно да у неким случајевима ово није довољно прецизно, тако да се DLSM мора комбиновати са конвенционалним машинским техникама, како би се постигла потребна тачност [Kru05]. Нежељене поре, пукотине и већ споменуто рушење ћелијских геометрија, стварају додатне проблеме. Метални делови произведени DLSM техником још увек веома често садрже овакве проблеме, који настају пре свега због великог термичког стреса током ласерског скенирања.

На слици 2.12 је приказана фотографија једног узорка израђеног DLSM методом у лабораторијама Фраунхофер Института у Немачкој, где се препознају споменуте ћелије које су у овом случају правоугаоне, као и поједини настали дефекти у смислу рушења појединих „зидова ћелија“.

Додатна тема је поузданост поступка и гаранција нивоа квалитета у смислу менаџмента квалитета [Kru05]. У овој области важе сви критеријуми који су већ у другим областима индустрије веома строго дефинисани. Ово обухвата менаџмент квалитета сваког појединачног тока процеса тј. појединачних процесних корака, менаџмент квалитета употребљених производних система и на крају, што је од нарочитог значаја за тему овог рада, менаџмент квалитета резултата DLSM.

И ако су све три наведене области менаџмента квалитета повезане, оне не представљају идентичне скупове. Потребно је најпре прецизно дефинисати све критеријуме релевантне за тражени квалитет, а затим израдити механизме за њихово поуздано постизање. У свемирској техници, сви поступци морају се увек репродуковати са високом поузданошћу, па на овом пољу остаје да се још много тога реши и постигне. Да би се ови високи циљеви тј. захтеви постигли, од великог значаја је подршка даљег развоја путем :

- побољшања самог производног процеса директног ласерског синтеровања метала,
- унапређењем нумеричке симулације,
- новим методама дефектоскопије готових производа за извођење контроле квалитета.

Важно је да се представљањем методе квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије (KTUD) пружи конкретан допринос развоју DLSM технике. Наравно, дефинитивно тестирање квалитета производа израђених DLSM техником се реализује у орбиталној ситуацији [Kru05].

2.1.9 Рачунарске симулације поступка синтеровања

Рачунарске симулације су спона између теорије и реалног извођења експерименталног процеса синтеровања. У данашње време ефикасне рачунарске симулације су омогућене развојем савремених рачунарских система који располажу од неколико стотина па све до неколико хиљада процесора [Won08]. Да би се постигла конкуретност на тржишту мора се обезбедити економичност DLСM система уз истовремену поузданост производног процеса [Bra10]. И поред великог напретка, који је постигнут последњих година, поузданост производних процеса DLСM још увек није на највишем нивоу. Са циљем постизања тзв. „first-time-right” производње, врше се интензивна научно-техничка истраживања, нарочито у експерименталном делу [Bra10], [Zae06]. Разлог нестабилности процеса су бројни нестационарни физички феномени током процеса синтеровања [Bra10], [Zae06]. Научни радови посвећени новим концептима рачунарске симулације, говоре о узимању у обзир што већег броја претходно споменутих чинилаца, како би се постигао значајан напредак у квалитету симулација [Bra10]. При симулацији се најпре разматрају основе комплексних физичких процеса, које се деле на термичке феномене и термомеханичке физичке феномене. Рачунарска симулација обликује се тако да се програмирају посебни модули за:

- термичке процесе (кондукција, конвекција, радијација) методом „Finite Elemente”,
- термомеханичке процесе, на пример помоћу „Njutn-Rapson” методе,
- податке о појединачним слојевима синтеровања (геометријски подаци, дебљине слојева, стратегија скенирања),
- податке о материјалу (својства металног праха, дилатација, еластичност...).

Овако се постиже могућност прецизне конфигурације појединачних модула, бољи пренос симулационих података током извођења симулације и тиме остваривање високог степена ефикасности прорачуна и тачност резултата [Bra10]. Тежи се ка томе да се уноси што већи број симулационих података који се тичу следећих величина [Mei05]:

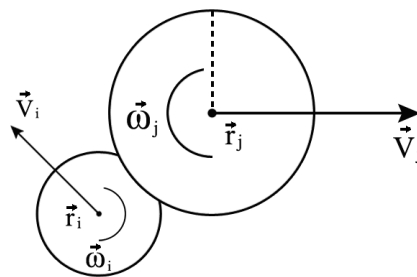
- материјал, прах: легура, хемијске особине, топлотне проводљивости и топлотна капацитивност, температура топљења, величина, облик, механичке особине зрна, густина, дебљина слоја и температура предзагревања,
 - ласер: тип, снага, површина снопа светлости,
 - простор за изградњу: атмосфера, запремина, димензије, вакуум,
-

- део који се гради: облик, геометрија, положај у простору за изградњу,
- скенирање: брзина скенирања, стратегија скенирања.

Рачунарска симулација омогућава да се симулирани процес може много пута понављати и да се изврши велики број оптимизација у смислу подешавања наведених параметара. Да би се описао систем који је заснован на методама које третирају честице материјала, постоје два различита приступа [Won08].

- Микроскопски приступ, када се полази од микроскопског стања да би се дошло до закључака о макроскопским својствима материјала. Ово је приступ који је познат и под именом „Bottom Up“ или „Bottom Up Approach“, што у преводу значи „приступ од дна према врху“.
- Макроскопски приступ је познат под именом „Top Down“ или „Top Down Approach“ што значи „од врха према дну“, где се полази од макроскопских законитости да би се формулисале релације између честица које представљају материјал.

Микроскопски приступ се изводи тако да се дефинишу индивидуална својства честица. Свака појединачна честица система описује се својом масом m_i , просторним вектором \vec{r}_i и вектором брзине \vec{v}_i . Када су дозвољене ротације, додаје се момент инерције I_i као и вектор угаоне брзине $\vec{\omega}_i$. На слици. 2.13. види се приказ својстава система честица.



Слика 2.13. Приказ својстава система честица [Won08].

Временска промена координата честица произилази из следећих једначина:

$$\frac{d}{dt} \vec{r}_i = \vec{v}_i \quad (2.2)$$

$$m_i \frac{d}{dt} \vec{v}_i = \vec{F}_i^{tot} \quad (2.3)$$

У овим изразима \vec{F}_i^{tot} означава укупну силу која делује на једну честицу и састоји се од суме свих сила између честица \vec{F}_{ij} као и спољних (екстерних) сила \vec{F}_i^{ex} .

$$\vec{F}_i^{tot} = \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij} + \vec{F}_i^{ex} \quad (2.4)$$

Практична реализација симулације система (кога чине све честице) тече тако да се из стања система у временском тренутку t прорачунава ново стање система у временском тренутку $t + \Delta t$, при чему је Δt довољно мали временски интервал [Won08].

Макроскопски приступ се изводи тако да се симулирани медијум, дискретизује у облик појединачних честица, при чему силе међусобних релација овде не произилазе из микроскопских релација, већ из макроскопских релација. Овај приступ је познат и под именом „Smoothed Particle Hydrodynamics”, а био је развијен за примене у астрофизици, па је касније почела његова примена и рачунарским симулацијама у другим дисциплинама. У симулацији се полази од Navier-Stokes једначине, која је основа кретања флуида. Општи облик Navier Stokes једначине је:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\mathbf{T}} + \mathbf{f} \quad (2.5)$$

где су:

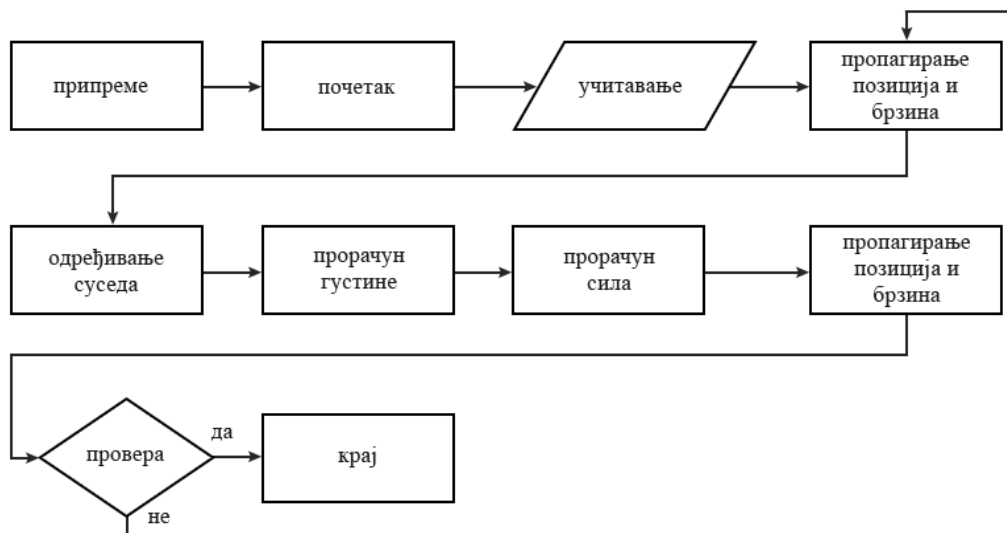
- ρ густина медијума
- v брзина кретања флуида и
- p притисак
- \mathbf{T} тензор напрезања и
- \mathbf{f} екстерне силе (по јединици запремине).

За разлику од микроскопског приступа, код макроскопског приступа силе су директно одређене. Оне следе из дискретизације макроскопских конститутивних једначина. Како у микроскопском тако и у макроскопском приступу, медијум се представља паровима честица које су у релацији једна са другом. У микроскопском поступку се честице посматрају као стварни представници микроскопских особина материјала, чиме се из њихове расподеле и динамике могу пружити директни искази о микроструктури. Насупрот томе, код макроскопског приступа прво су само покретни пакети масе, на чијим се позицијама дискретизују одговарајуће конститутивне једначине, позиција честица у овом случају није од значаја.

Оба приступа имају своје предности и мане, а њихова примена зависи од тога који се феномени желе симулирати. Микроскопским приступом се пре свега испитују дејства микроскопских ефеката на макроскопско понашање, а недостатак је што је број честица који је потребан за симулацију огроман. Предност макроскопског приступа је да се компликовани макроскопски ефекти боље представљају. Резолуцију (тј. растојање између честица) је у овом случају могуће изабрати по жељи.

2.1.10 Ток рачунарске симулације

У основи конкретног програма рачунарске симулације лежи програмска петља у оквиру које се за сваки временски интервал Δt израчунавају положај и брзина честице и остале напред описане величине [Won08]. Број програмских пролазака кроз петљу обично износи од један милион па до једну милијарду, а у зависности од постављеног циља, расположивих рачунарских ресурса, времена које стоји на располагању за симулацију, броја симулација које се у оквиру једног временског периода желе извести итд. Дијаграм програма симулације је приказан на слици 2.14.



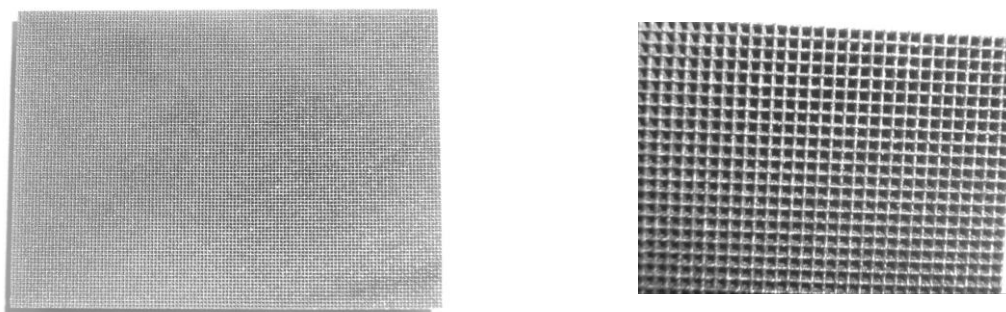
Слика 2.14 Дијаграм тока програма симулације [Won08].

Пред почетак тока програма дефинишу се сви потребни почетни параметри који су у претходном излагању наведени. Симулација почиње након извршених припрема, а томе следи учитавање података свих потребних почетних параметара. Следећи корак је програмско извођење математичког алгоритма којим се унутар једног проласка кроз програмску петљу пропагирају позиције и брзине честица. Након тога се за сваку појединачну честицу одређује са којом другом честицом ступа у интеракцију. После прорачуна "суседа", наступа прорачун величина интерполације, а пажња се нарочито

посвећује прорачуну густине. Следећи корак представља прорачун сила (полази се од сила које имају кратак домет и чији интензитет после извесног растојања тежи нули). Када је ово урађено, добијене вредности сила се убацују у програмску реализацију математичког алгоритма за следећи временски интервал. Након провере да ли је почетно дефинисани број пролазака кроз програмску петљу постигнут, одлучује се да ли ће доћи до поновног извођења петље.

2.1.11 Дефектоскопија делова добијених DLSM поступком

Машински делови произведени директним ласерским синтеровањем DLSM не само да су сами по себи порозни, већ и ћелијске геометрије уносе велику додатну шупљикавост материјала. Дефектоскопија код делова произведених по DLSM поступку се најчешће изводи методама без разарања. Код синтерованих узорака добијених DLSM методом првенствено се користи рендгенска томографија. Међутим, ова метода је релативно скупа и компликована, а повезана је и са високим стандардима заштите од зрачења. Испитивања ултразвуком са апаратима који су тренутно најзаступљенији (тзв. импулсна ехо техника), на жалост нису могућа, и поред тога што би била веома пожељна. Ради се о томе, да сигнали импулсне ехо технике доживљавају велику апсорпцију од стране порозног материјала, а шупљине „ћелија“ доводе до комплетног „рушења“ ултразвука на основу рефлексија унутар ћелија. Ултразвучна дефектоскопија импулсном ехо техником користи веома високе фреквенције, реда величине од неколико мегахерца, а фактор апсорпције унутар материјала расте са четвртим експонентом фреквенције [Kut88]. На слици 2.15. је приказан узорак од материјала AlSi12, који је ласерски синтерован DLSM методом на Фраунхофер институту у Немачкој, у сврху извођења експерименталних мерења, чији су резултати приказани у овој дисертацији. На десној страни слике се види детаљ правоугаоне ћелијске структуре узорка. Хемијска и механичка својства за овај узорак су наведена у поглављу 4.2.



Слика 2.15 Узорак материјала AlSi12, који је ласерски синтерован DLSM методом на Фраунхофер институту у Немачкој.

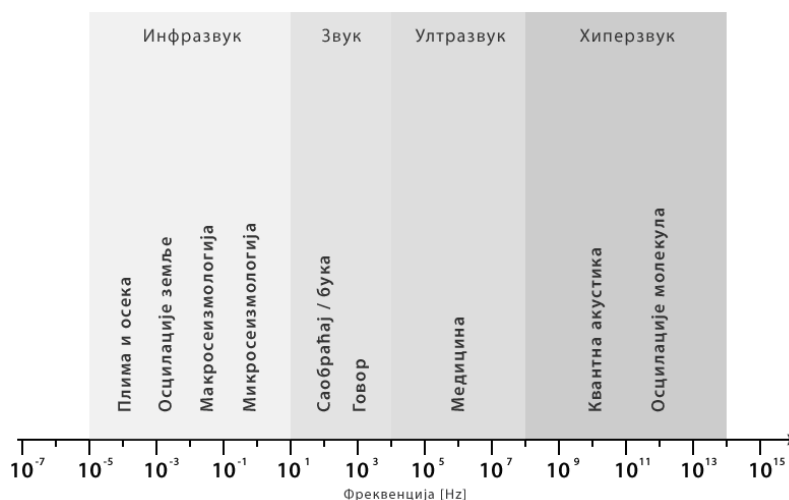
2.2 Техника ултразвука

Акустика, као област физике, је научна област о звуку и његовом ширењу. Акустика обухвата све феномене звучних таласа, као што су њихово генерисање, ширење, апсорпција итд. Осим тога, ова дисциплина се бави и интеракцијама звука и материјала, а бави се и темом људске перцепције звука слухом и деловањем звука на људе и животиње. Првим научним истраживањем су се бавили још у древној Грчкој (Pythagoras из Самоса, 570–510 год. пре Христа испитује релације између дужине жица и висине тонова музичких инструмената; Chrysippos из Соли 281–208 год. пре Христа је приметио сличност облика звучног таласа са таласом на води). Стари Грци су проучавали и изграђивали позоришта по принципима акустике.

Акустика је интердисциплинарна наука, која се заснива на сазнањима бројних научних дисциплина, а где поред физике улогу игра и психологија, информатика и наука о материјалима. Једна од значајних примена акустике је истраживање и редукација буке. У важне примене науке о акустици такође спада и медицинска дијагностика као и дефектоскопија материјала у техници и науци.

2.2.1 Звучни таласи

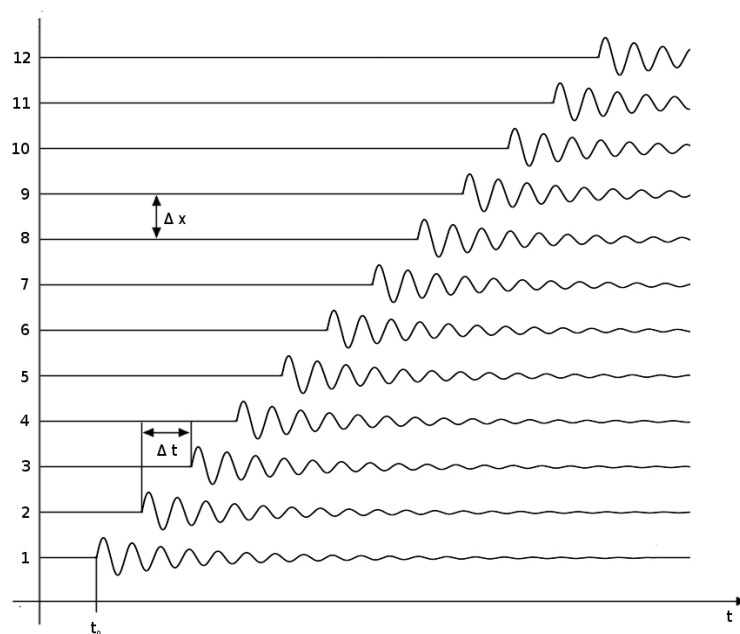
Звучни таласи се могу распростирати у чврстом, течном и гасовитом агрегатном стању. Звучни таласи се специјално називају ултразвучним таласима или ултразвуком, када им је фреквенција већа од 20 kHz. Важно је напоменути да чисто физички гледано не постоји јасна граница између звука и ултразвука. Граница од 20 kHz је узета произвољно као граница која се најчешће наводи као горња граница опсега чула слуха код човека [Sor02]. Наравно и код људи је ова граница различита и мења се током живота са годинама.



Слика 2.16 Фреквенцијски опсези звука.

Инфразвук је звук који има фреквенцијски опсег који је нижи од опсега људског чула слуха, дакле мање од 20 Hz. Инфразвук се користи у сеизмологији, за праћење кретања тла и потреса тла. Слика 2.16. приказује преглед опсега звучних фреквенција, где се такође види, да се звучне фреквенције реда величине изнад 10^8 Hz називају хиперзвуком:

У природи и техници постоји много разних механичких, електричних, магнетних, оптичких и других појава које се одвијају периодично. Неке таласе је могуће посматрати голим оком, али је велики број области где се одвијају таласни феномени које човек не може директно регистровати својим чулима. Звучни талас је механички талас где честице материје осцилују око свог сопственог тежишта. Код звучних фреквенција које људи могу да чују, амплитуде осцилација су веома мале у односу на таласну дужину, а енергија која се преноси је мала. Основа звучног таласа је дакле његово распрострањање кроз материју.



Слика 2.17 Скица ширења звука [Kut88].

Слика 2.17. приказује скуп честица (1 до 12) које се налазе на подједнаком међусобном растојању Δx . У тренутку t_0 честица број 1 је померена из равнотежног положаја, мировања. Као последица еластичне интеракције са суседима, честица број 2 почиње са истом таквом осцилацијом, али са временским закашњењем од Δt . Трећа честица започиње са истим таквим осцилацијама, али са дуплим закашњењем. Закључак је да се поремећај стања мировања шири брзином звука c (количник пута и времена).

Табела 2.1. Брзине распрострања звука кроз разне материјале [Kut88].

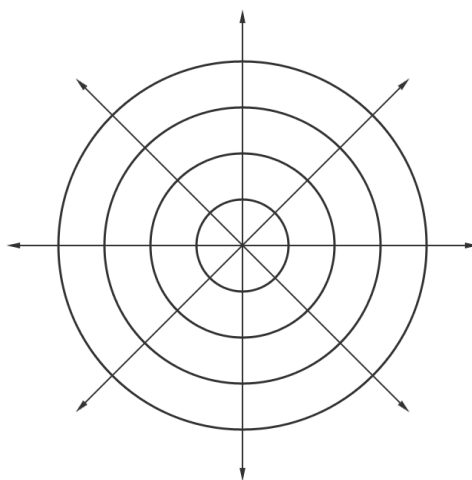
Материјал	Брзина звука [m/s]
Акрилична смола (Perspex®)	2730
Алуминијум	6320
Берилијум	12900
Месинг	4430
Кадмијум	2780
Бакар	4660
Глицерин	1920
Злато	3240
Гвожђе	5900
Олово	2160
Манган	4660
Жива	1450
Молибден	6250
Моторно уље (SAE 20 или 30)	1740
Никл, без примеса	5630
Платина	3960
Полиамид (најлон, Perlon®)	2600
Плистирен поливинилхлорид	2340
PVC, тврди	2395
Сребро	3600
Челик 1020	5890
Челик 302, аустенитни нерђајући	5660
Калај	3320
Титан	6100
Уран	3370
Вода (20 °C)	1490
Цинк	4170
Цирконијум	4650

Научна дисциплина која се бави преносом енергије звука кроз молекуле, назива се молекуларна акустика. Тежиште молекуларне акустике је испитивање брзине звука и апсорпције звука унутар материје. Као последица утицаја ултразвука, некада долази и до прерасподеле молекуларних структура. На основу детекције таквих измена у структури обликују се модели и извлаче се индиректни закључци о грађи молекула [Sor02]. Феномен фона на унутар молекуларне акустике представља паралелу са фотонима из области оптике [Kut88].

Модел грађе кристалних материјала се описује решетком, где између честица („градивних елемената“) делују еластичне силе [Pet91]. Ова решетка никада не мирује, већ се „градивни елементи“ непрестано крећу и са порастом температуре интензивирају. Свака појединачна осцилација представља механички осцилатор, који сходно законим квантне теорије, енергију из своје околине не може да прима у произвољним количинама, већ само у вишеструком износу једног елементарног кванта енергије, који се у молекуларној акустици назива фонон. То исто важи за одавање енергије. Када се чврсто тело које се налази у термичкој равнотежи, подвргне спољашњем ултразвучном таласу, онда се тело више не налази у равнотежи. Равнотежа се након одређеног времена постепено поново успоставља, тиме што се фонони унутар тела расипају. Расипају се пре свега на неравномерностима кристалне структуре, али и на самој решетки. Дакле, ултразвучни талас се апсорбује тако што се његова енергија претвара у топлоту.

2.2.2 Звучно поље

Звучно поље је окаракерисано разним величинама која се користе за опис простирања звука кроз материју: просторне координате посматране тачке (x, y, z) , одступање положаја појединачне тачке у односу на стање мировања (услед осцилације изазване дејством ултразвучног таласа [Kut88]), моментална густина и моментални притисак. Разлика моменталног притиска од притиска у стању мировања се назива звучни притисак. Ако се замисли, да је извор ултразвука тачкаст, онда се од те тачке ултразвучни таласи шире изотропно на све стране у облику сфере (слика 2.18.). Ултразвучни таласи изазивају промене густине, притиска и температуре.



Слика 2.18 Деловање тачкастог извора ултразвучног таласа (дводимензионални приказ).

Деловање ултразвучног таласа (који се простира дуж x -осе) се описује таласном једначином која је дефинисана следећим изразом:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

а решење ове једначине гласи:

$$p(x, t) = F(x - ct) + G(x + ct) \quad (2.7)$$

Први члан једначине (2.8) описује промену притиска који се почев од временске тачке t почиње ширити брзином c по x -оси. Однос брзине простирања звука (c) и брзине осциловања појединачне тачке око тачке мировања (v_x) је важна карактеристика материјала. Други члан у једначини (2.8) описује притисак, који почев од тренутка t почиње да се шири брзином c по x -оси са негативним предзнаком. Код сферних таласа површине које имају исто стање осцилације су у облику концентричних сфера. За описивање оваквих таласа уводе се сферне координата тако да таласна једначина гласи:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Решење ове једначине, које је практично примењиво, је [Kut88]:

$$p(r, t) = \rho_0 \frac{\dot{Q}\left(t - \frac{r}{c}\right)}{4\pi \cdot r} \quad (2.9)$$

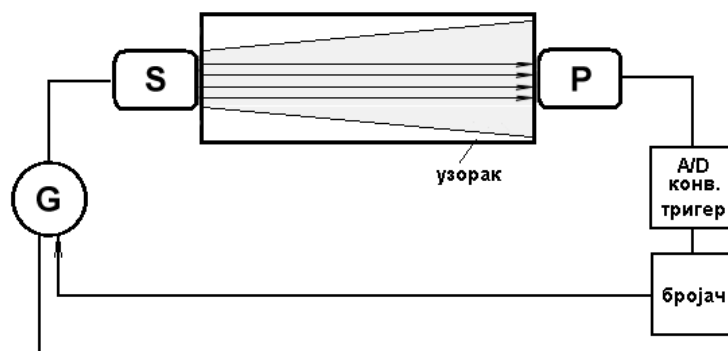
при чему \dot{Q} означава парцијални извод првог реда по времену t . Аргумент функције \dot{Q} указује на простирање таласа у смеру растуће радијалне координате r . Дакле, притисак опада са порастом растојања од тачкастог извора звука. Препреке ометају распрострањање ултразвучних таласа кроз материју, где под препрекама пре свега, подразумевамо нехомогености материје.

Битна величина код распрострањања ултразвучног таласа је однос таласне дужине λ и димензије препреке d . Ако је d много веће од λ , онда се распрострањање ултразвука одвија геометријски, а ако је d много мање од λ , онда препрека постаје секундарни извор таласа и јавља се дифракција. Наведене појаве знатно утичу на распрострањање ултразвука унутар материјала.

2.2.3 Примене ултразвука

Током развоја ултразвучне технологије издвојиле су се поједине самосталне области. На пример, примене ултразвука у медицини поделиле су се на „дијагностичке“ и „терапеутске“. Дијагностичке примене служе испитивању стања и ту ултразвук служи као преносник, тј. сигнал информација. У терапеутским применама се ултразвук користи у унутрашњости материје (тј. пацијенту) где се преноси енергија таласа која изазива жељена дејства [Lie10]. Ултразвучна дијагностика у медицини спада у најважније савремене примене ултразвука. Такође веома значајне и распрострањене примене ултразвука, су дефектоскопија материјала без разарања, ултразвучна обрада материјала и индустријско чишћење материјала путем ултразвука (кавитациона техника).

Једна од предност ултразвучне дефектоскопије материјала над рендгенском дефектоскопијом је много мања апсорпција ултразвука у хомогеним материјалима у односу на рендгенске таласе. Ултразвучном дефектоскопијом је могуће пропустити сигнал кроз материјале дебљине до 10 m. При том се прате промене брзине и енергије ултразвучног таласа у зависности од присутности структурних дефеката (шупљина, пукотина...). У лабораторијским условима је могуће обавити високо прецизна мерења промене брзине проласка ултразвука кроз материјале и извести закључке о присуству разних дефеката и других промена у структури узорка.



Слика 2.19 Шема поступка мерења брзине звука кроз материјал.

На слици 2.19. је приказан принцип где се користи једна ултразвучна глава за емитовање сигнала и једна ултразвучна глава за пријем сигнала, која има улогу сензора. Ултразвучна глава одашиљача емитује кратак импулс у узорак (трајања неколико микросекунди). Након трансмисије кроз узорак, ултразвучна осцилација се у пријемној глави конвертује у електрични напон, који се одводи у електронски склоп који је у стању да временски, веома прецизно, региструје да ли је сигнал пристигао и када и изазива електронски тригер. Овај тригер се користи као сигнал да генератор

фреквенције произведе нов импулс, који се затим преко одашиљача поново шаље кроз узорак. Тиме се осигурава постојање петље, чије трајање је претходно подешено. То време се мери, а осим тога дигитални бројач мери број пролазака петље бројећи тригерске сигнале. На основу измереног времена и познатих димензија узорка одређује се брзина звука кроз материјал. Ова метода је веома повољна за имплементацију уз коришћење микроконтролера. Недостатак овог (тзв. „Sing-around”) поступка је потреба за изузетно прецизним, а скупим, аналогно дигиталним конверторима потребним за електронски склоп детекције примљених сигнала.

2.3 Електронска мерења неелектричних величина (сензорика)

Електронска мерења неелектричних величина се примењују у областима научног истраживања, развоја техничких апарата, тестирања, у управљању и контроли најразличитијих производних процеса у техничкој пракси [Gol05] и обухватају поступке код којих се физичке величине уз познавање физичких ефеката претварају у електричне величине. се врши на пример за промену Неелектричне величине које се најчешће мере су: положај, температура, сила, притисак, вибрације, проток течности, итд. У поређењу са механичким мерним методама, електрична мерења неелектричних величина пружају велики број предности: релативно мали утицај спољашњих околности на мерену величину, мерни систем има малу инерцију, резултати мерења се добијају у облику који се лако да даље обрађивати, једноставно читање мерних резултата, осетљивост система може да буде веома висока, могућ је скоро неограничен пренос мерних резултата на даљину, истовремено мерење и меморисање резултата. Трошкови оваквог мерења су најчешће мањи од свих других метода.

Да би се користиле електричне методе мерења, врши се конверзија неелектричних величина у електричне сигнале помоћу уређаја који се зову улазни мерни претварачи или најчешће сензори. Сензор представља главни и основни елемент улазног уређаја па и целог мерног система. Велика предност добијања електричног сигнала из неелектричне величине је да се за регистровање, приказивање и даљу обраду сигнала могу једноставно користити компоненте електричне мерне технике које су стандардне и тиме не морају бити израђење специјално за дату мерну величину [Mit05].

У наставку овог рада ће се видети да је за потребе реализације KTUD методе, електронски мерни склоп конструисан тако да садржи четири идентична мерна ланца који се састоје из побуде физичког процеса, сензора, адаптера, аналогно дигиталних конвертора и рачунара за процесирање мерних сигнала.

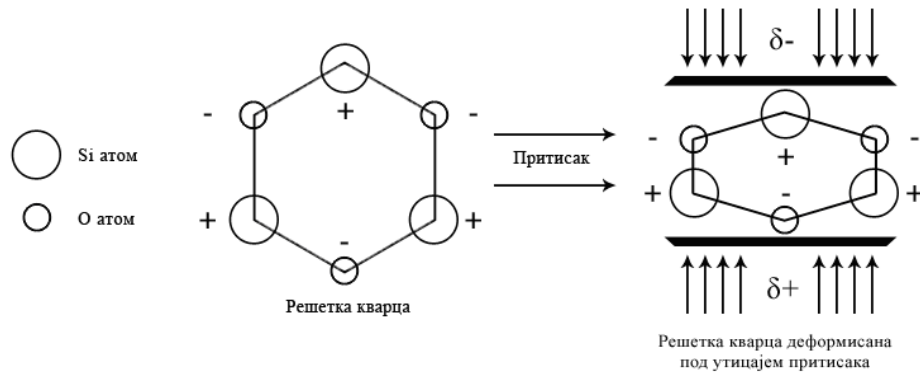
2.3.1 Сензорика

Класификација сензора се може урадити на више начина, а најчешће се то чини према облику енергије носећег сигнала. Тако су на пример најчешћи облици сигнала: термички, зрачење (гама зраци, X-зраци, разни спектри светлосних зрака, итд.), механички, магнетни, хемијски, биолошки, електрични. Даља могућа подела је према принципу рада. Тако постоје импедансни сензори, код којих као излазну величину имамо промену импедансе под утицајем неелектричне мерне величине; сензори са самогенерацијом, који као излазни сигнал имају електромоторну силу, количину наелектрисања или струју, коју непосредно генерише сензор као последицу дејства неелектричне мерне величине и френвенцијски сензори, који дају на излазу периодичан сигнал а чија се фреквенција мења у зависности промене неелектричне мерне величине. Једна од важних подела сензора је и према физичком ефекту на коме се заснива њихов рад. Најчешћи физички принципи који се користе за израду сензора су провођење топлоте, топлотно зрачење, Зебеков ефекат, пироелектрични ефекат, термоелектрични ефекат, Пелтијеов ефекат, Томсонов ефекат, фотогалвански ефекат, фотооптички ефекат, Земанов ефекат, Раманов ефекат итд., као и пиезоелектрични ефекат који је за овај рад од нарочите важности. Даља подела сензора је на активне и пасивне. Код активних мерних сензора, електричне величине се добијају претварањем енергије из механичке, термичке, оптичке или хемијске енергије (стварају се наелектрисања: примери су термоелементи, пиезоелектрични елементи, фотоћелије). Код пасивних сензора се не генерише енергија за пренос сигнала већ се користе спољашњи извор енергије. Електричне величине које се прате су електрични отпор, индуктивност, капацитивност, напон и струја. Типичан пример је отпорни сензор температуре, где се на излазу мерног моста добија напон пропорционалан мереној температури. Може се закључити да су ултразвучни сензори, сензори где се електрична величина (напон), добија претварањем из механичке енергије (звук, осцилације) путем пиезоелектричног ефекта [Mit05].

2.3.2 Пиезоелектрички ефекат

Пиезоелектричним ефектом се назива појава поларизације диелектрика под дејством механичких напрезања. Диелектрицима су материјали код којих су наелектрисања чврсто везана за атоме, молекуле или јоне. Реч пиезо долази од грчке речи „*piezein*”, што значи притиснути. Пиезоелектрични ефекат су 1880-те године пронашли браћа Jacques и Pierre Curie, када су експериментисали са кристалима турмалина који мењају боју када се на њих погледа са разних страна. На слици 2.20. је

дат приказ промене електричне поларизације и тиме појаве електричног напона над чврстим телом, у овом случају кристалу кварца, када се изведе еластична деформација, односно када се на кристал изврши механички притисак. Супротно томе пиезоелектрични материјали се деформишу када се на њих прикључи електрични напон, што се назива пиезоелектричним реципроцитетом.



Слика 2.20 Пиезоелектрични ефект код кристала кварца.

Када се на једну плочицу (дефиниција плоче подразумева да су попречне димензије много веће од дебљине) прикључи електрични напон, у плочици настаје електрично поље E . Тада у плочици настаје механички напон σ који одговара односу:

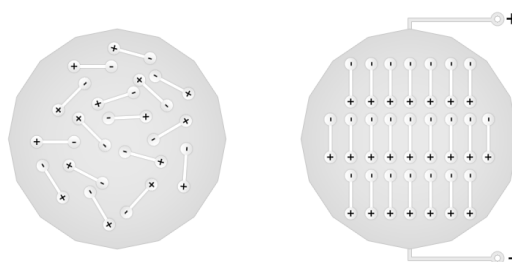
$$\sigma = e \cdot E \quad (2.10)$$

Фактор пропорционалности e је својство материјала и назива се пиезоелектрична константа. Када се обрнуто, изврши механички притисак на плочицу и тиме се изазове њена промена дебљине s , онда у плочици настаје диелектрична поларизација заснована пиезоелектричним ефектом. Ако се електроде плочице кратко споје, поларизација плочице изазове наелектрисање диелектричног помераја:

$$D = e \cdot s \quad (2.11)$$

Од разних категорија диелектричних материјала, за примену пиезоелектричног ефекта се по правилу користе чврсти, активни неоргански диелектрици. Најпознатији пример је монокристални кварц, од кога се за ове сврхе режу танке плочице. Осим кварца, код разних сензора који раде на пиезоелектричном принципу, користе се и други материјали, као кристали литијума, Сењетове соли, ниобати и друго. Користи се и пиезокерамика на бази олово цирконијум-титаната ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ $0 \leq x \leq 1$). Предност пиезокерамика над монокристалима је у могућности да се произведу елементи сложеног облика и величине.

Индустријски произведене пиезокерамичке плочице су најчешће од керамике и производе се најчешће процесом синтеровања. Непосредно после синтеровања, ове керамике још увек немају пиезоелектричне особине. Пиезоелектрично својство им се даје излагањем керамике јаком електричном пољу, реда величине од неколико 10^6 V/m , док се материјал загрева непосредно испод Киријеве температуре, а после се изврши хлађење. Овако наметнут пиезоелектрични ефекат после тога је постојан. На слици 2.21. су приказана два стања решетке кристала керамике у смислу пиезоелектричног ефекта, пре и после излагања електричном пољу.



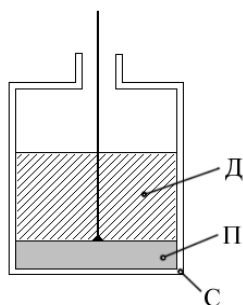
Слика 2.21 Кристали керамике пре и после излагања електричном пољу.

PVDF („Polyvinylidene fluoride“) је релативно нов материјал за сврхе производње пиезоелектричних сензора. То је пластични полимер у облику фолије, а важан је за варијанте ултразвучних сензора, када се жели произвести пиезо фолија. Пиезо фолија је потребна када је потребан ултразвучни сензор који има веома усмерен облик карактеристике слања ултразвука. Колико год да су пиезокерамике до сада истраживане и развијане, и даље се ради на даљем усавршавању и стицању све дубљих знања о физичким феноменима унутар њих. Тако се на пример изводи све прецизније одређивање еластичних, диелектричних и пиезоелектричних особина пиезокерамичких елемената помоћу анализатора импедансе [Per10], прецизно се испитују карактеристике прелазних стања приликом укључивања [Hag11], [Chi05], ради се на новим методама производње пиезокерамика поступком синтеровања високим фреквенцијама [Rhe00] итд.

2.3.3 Ултразвучни сензори на принципу пиезоелектричног ефекта

Сензори који се користе при ултразвучној дефектоскопији се у пракси често називају „ултразвучне главе“. За слање и примање ултразвука најчешће се користе ултразвучне главе које су по конструкцији једнаке, што се заснива на способности реципроцитета пиезоелектричних плочица. На ултразвучну главу која заузима улогу одашиљача, прикључује се електрични сигнал побуде који изазива механички

ултразвук који се затим преко контакта на површини узорка преноси на испитивани материјал. Ултразвучне главе које имају улогу пријемника служе да генеришу електрични напон који настаје механичким дејством ултразвука који је до њих стигао после трансмисије кроз узорак. У случају импулсне ехо методе, за одашиљач и за пријемник ултразвука се по правилу користи једна те иста ултразвучна глава. На слици 2.22. је приказана типична конструкција ултразвучне главе. На позицији **П** је пиезоелектрична плочица која је монтирана унутар кућишта **С** а унутрашњост простора између плочице и кућишта је испуњен материјалом за пригушивање **Д**.

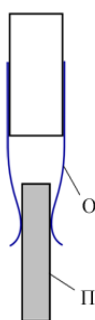


Слика 2.22 Типична конструкција ултразвучне главе.

Материјал који се најчешће користи за производњу пиезокерамичких плочица у ултразвучним главама, је керамика. Осим тога, као материјал за ултразвучне сензоре на пиезоелектричном принципу се користи споменути полимер PVDF и то специјално онда, када је потребно да је њихова дебљина нарочито мала (пиезо фолија) тј. када је потребан ултразвучни сензор који има веома усмерену емисију ултразвука. То је од значаја у применама импулсне ехо технике, а овакви сензори су и знатно скупљи. Међутим, код KTUD методе није потребно произвести специјално уско усмерење, што представља битну предност саме методе.

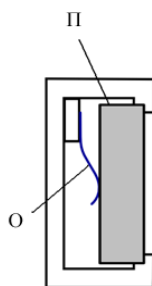
Следећа важна ставка за практичну изведбу пиезокерамичких плочица су електроде. Електроде, које се користе за генерисање електричног поља пиезокерамичког претварача, морају да се налазе директно на површини пиезокерамичког материјала. Ако би се електроде на површину пиезокерамичког материјала лепиле, онда би међуслој лепка деловао као додатни непожељни диелектрик, што би изазвало знатан пад напона. Због тога је оптимално да се пиезоелектричне површине директно металзирају. То се ради тако, што се најпре нанесе један слој сребра, па се након тога пиезоелектрична керамичка плочица подвргне високој температури што омогућава добро везивање сребра на површини. У случајевима када је пиезоелектрични материјал полимер, онда описани поступак није

могућ, већ се у том случају електроде наносе кондензовањем металне паре („chemical vapour deposition” CVD). У овим случајевима се показало као нарочито ефикасно да се најпре нанесе један слој металне паре од хрома, никла или алуминијума, па се тек након тога наноси сребрна пара. Након што се произведе пиезокерамичка плочица са нанесеним електродама, потребно ју је адекватно монтирати у кућиште и довести напон на електроде. Довођење електричног напона побуде се на електроде врши помоћу контактних опруга или се доводна жица лемји на электроду. Ако се врши лемљење, онда се мора обратити пажња на то да пиезокерамички материјал због загревања не изгуби свој поларитет. Једна могућност је и коришћење специјалних нискотемпературских лемова.



Слика 2.23 Довођење напона и монтирање пиезоелектричне плочице помоћу опруге.

У сваком случају је при конструкцији и изведби сензора важно постићи поуздано довођење напона на пиезоелектричну плочицу. Стога је битан и начин како се пиезоелектрична плочица механички монтира унутар кућишта сензора. На слици 2.23. је приказана монтажа помоћу опруге, које доводе напон на електроде, што је веома практично и једноставно (пиезокерамичка плочица означена са П, а опруга са О).



Слика 2.24 Прикључак унутрашње електроде изведен помоћу једне опруге.

На слици 2.24. је приказана могућност да се прикључак унутрашње електроде изведе помоћу само једне опруге. Електрода пиезокерамичке плочице која је окренута ка споља, директно додирује метално кућиште па је тиме изведено механичко фиксирање и остварен је електрични контакт са спољном електродом. Простор између

пиезо плочице и унутрашњег дела кућишта се пуни материјалом за пригушивање као што је то приказано на слици 2.22. (пиезо плочица пригушена са једне стране). Разлог за потребу финалне обраде је појава унутрашњих рефлексција унутар пиезоелектричне плочице. Ове унутрашње рефлексције се могу смањити пригушивањем, јер оне изазивају релативно спор престанак вибрација након искључења побудног сигнала у случајевима када пиезо плочица има функцију одашиљача. Ово споро слабљење ултразвука након престанка дејства напона је изузетно проблематично код импулсне ехо методе, па импулси морају бити веома кратки. Да би се то постигло, позадина пиезоелектричне плочице се са унутрашње стране покрива пуњењем, а ради пригушења непожељних унутрашњих рефлексција.

Међутим, када се ради о преносу ултразвука применом KTUD методе, није потребно извести меру пригушивања са унутрашње стране, јер су овде сигнали дужег трајања, тако да ова околност представља једну од предности KTUD методе.

2.4 Дефектоскопија

Дефектоскопијом материјала се називају поступци којима се испитује да ли узорци садрже грешке. Постоји више метода дефектоскопије, од којих су најпознатије рендгенска, ултразвучна и магнетска метода. Осим тога постоји и метода убацивања течности у узорке, када и где год је то могуће, како би се пронашле пукотине. Такође је могуће применити и технику убризгавања гасова у котлове и сличне узорке, као би се пронашла места која нису довољно добро заптивена или заварена [Rug02].

2.4.1 Ултразвучна дефектоскопија

Дефектоскопија је научна дисциплина која се бави налажењем грешака тј., дефеката у структури материјала. Када се то чини ултразвуком, методу називамо ултразвучном дефектоскопијом. Током испитивања простирања ултразвука у материјалу неопходно је знати брзину звука и коефицијент апсорпције датог материјала. Ултразвучна дефектоскопија је неопходна у случајевима када услед јаке апсорпције електромагнетни таласи нису примењиви.

Предмети испитивања који се подвргавају испитивању ултразвучном дефектоскопијом не трпе никаква оштећења, дакле ради се о методи за испитивања материјала без разарања. Ова метода се може добро интегрисати у технолошки процес производње или као завршна фаза контроле готових производа или полупроизвода. Ултразвучна дефектоскопија се примењује код оптички непрозирних материјала, материјала који снажно апсорбују рендгенске таласе и код метала, код којих примена

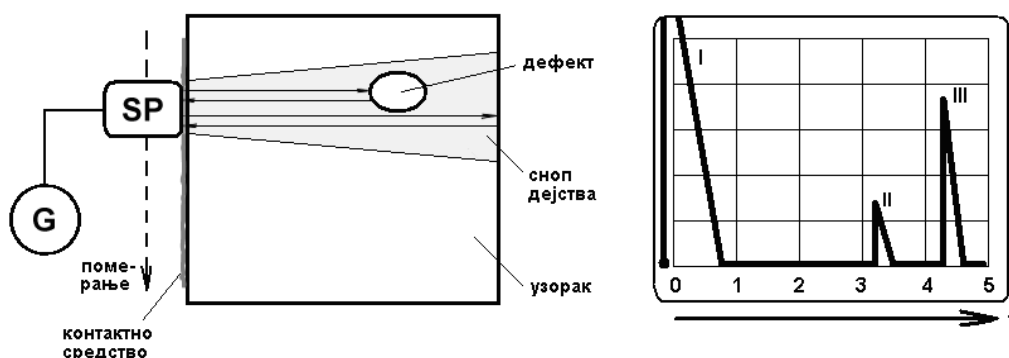
електромагнетних сигнала због „skin ефека“ није могућа, итд. У случају оптички непрозирних материјала, ултразвучна дефектоскопија треба да нам пружи исказ о стању унутар материјала, без потребе да се материјал разреже или да се на неки други начин разори. Расправе о томе да ли је за ову сврху боља рендгенска или ултразвучна техника су већ престале да се воде, јер се рендгенска дефектоскопија и ултразвучна дефектоскопија толико разликују, па чак једна другу допуњују, тако да и не представљају конкурентске поступке. Може се рећи да код мањих дебљина испитиваних узорка рендгенска дефектоскопија даје прецизније резултате. Што је узорак дебљи, то је налажење грешака поузданије методом ултразвучне дефектоскопије. На основу претходно изнетог се може закључити да главна примена рендгенске дефектоскопије лежи у аутоматској и полуаутоматској дефектоскопији лимова, трака, шипки и цеви. Када се ради о великим деловима, ултразвучна дефектоскопија је оптимално решење.

Два главна задатка ултразвучне дефектоскопије су поступак тражења дефекта и поступак одређивања позиције дефекта. Након ових задатака, као следећа категорија је процена величине дефекта. Затим следи дијагноза облика и врсте дефекта. Основни задатак ултразвучне дефектоскопије је тзв. „техника тражења квара“, где је најважније сазнати да ли се унутар материјала (узорка тј. предмета контроле) налази нека грешка. Задатак који се на то надовезује јесте омогућавање што тачнијег одређивања положаја и величине дефекта. Овај други корак, се назива „техника анализе“. Оптимално решење је спајање „технике тражења квара“ и „технике анализе“ унутар једног истог техничког решења. При „техници тражења квара“ се превасходно ради на томе да се постигне што већи фактор вероватноће откривања квара.

У сврхе ултразвучне дефектоскопије чврстих тела, до сада је развијен читав низ метода. Особине ових метода зависе од области примене, циљева мерења, итд. Карактеристичне мерне величине које се добијају ултразвучном дефектоскопијом су време распрострањања и интензитет. Тренутно се у техници ултразвучна дефектоскопија реализује најчешће употребом једне ултразвучне главе за емитовање и пријем сигнала, при чему се користи метода импулсне ехо технике. Ова метода је у литератури широко распрострањена. Може се рећи да тренутно импулсна ехо метода представља главни „тренд“ унутар ултразвучне дефектоскопије. Ова метода је веома развијана и у области медицинске дијагностике, где се и усавршава [Ваг02]. На пример, ради се на истраживању могућности побољшања математичких алгоритама анализе сигнала помоћу „wavelet“ трансформације [Воу09].

Импулсна ехо техника

Код импулсне ехо технике ултразвучна глава има одређено усмерење при слању импулса. Ако дође до рефлексије сигнала, ултразвучна глава, која је послала сигнал, ће примити повратни импулс. Када испитивани узорак садржи дефект, долази до рефлексије ултразвучних таласа у свим правцима. Један мали део тих рефлексија се враћа ка ултразвучној глави, чиме се региструје неправилност унутар узорка. Затим следи поступак одређивања позиције дефекта тако што се промени позиција ултразвучне главе и изводи се ново мерење. То се понавља са свих страна узорка, како би се ближе одредила позиција дефекта, а истовремено се са мањим или већим успехом долази и до закључака о облику дефекта.



Слика 2.25 Шема принципа импулсне ехо технике.

На почетку сваког појединачног ултразвучног мерења стоји пренос ултразвучног таласа у унутрашњост узорка. Када се ултразвучна глава наслони на испитани узорак, у сваком случају постоји мањи или већи зазор између додирних површина ултразвучне главе и узорка. Овај зазор је изазван видљивим или микроскопским неравнинама које доводе до проблема преноса ултразвучног таласа са ултразвучне главе у унутрашњост узорка. Наиме, неравнине су испуњене ваздухом, а ваздух има знатно мању густину од чврстог материјала. Осим тога постоји велика разлика брзина распростирања звука. Те разлике доводе до рефлектовања ултразвучног таласа од површине узорка, па само један мањи део улази у узорак. Што је фреквенција ултразвучног таласа већа, то су већи и губици који настају на овај начин. Да би се ови проблеми ублажили, уобичајена је примена контактних средстава, која се наносе између ултразвучне главе и испитаног узорка. Као контактна средства у импулсној ехо техници користе се разна уља, разређена туткала или контактни гелови на бази глицерина. Избор конкретног контактнег средства зависи од многих фактора, а важна околност је и та, које контактне средство даје најбоље резултате са одређеном површином узорка.

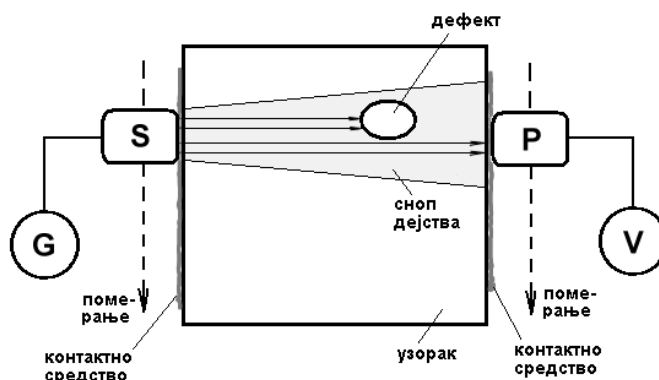
Следећи корак у појединачном мерењу је пријем рефлектованог ултразвучног таласа из унутрашњости узорка. Рефлектовани таласи доводе до генерисања амплитуде електричног напона у ултразвучној глави која у овом временском периоду представља пријемник. И сам назив методе говори да се код ове технике, шаље један кратак импулс.

Када овај импулс стигне до неког дефекта, рефлектује се и враћа ка одашиљачу. Унутар чујног опсега звука, овакво враћање звука се назива ехо, па је тиме настао назив „импулс ехо“ метода. Ултразвучна глава SP је конструисана тако да може да обави улоге и одашиљача и пријемника (S=„слање“, P=„пријем“). Генератор функције G снабдева ултразвучну главу SP високом фреквенцијом док глава има улогу одашиљача. На зид узорка је нането контактено средство. На слици 2.25. је приказан типичан облик поворке ултразвучних таласа код ехо технике. На слици се види, како се део послатог ултразвучног таласа рефлектује о дефект и враћа се назад ка глави SP, која је у тренутку повратка укључена као пријемник. Други део ултразвучног таласа пролази кроз узорак и одбија се о полеђину узорка, пре него што се врати до главе SP. Појединачни импулси морају да следе један за другим у одговарајућим временским размацама и то тако да приликом померања ултразвучне главе не постоје непроверени сегменти унутар узорка. Брзина емитовања импулса мора да буде тако изабрана да се са слањем наредног импулса увек довољно дуго чека док се претходно послати импулс врати као ехо. Због тога се код великих узорака мора чекати дуже, јер су тада времена распрострањања ултразвучног таласа дужа.

Када је ултразвучна глава SP пријемник тада се генерисани ултразвучни сигнал шаље ка осцилоскопу (види слику 2.25.) Позиција I означава сигнал на осцилоскопу чији је узрок почетак слања импулса. Наиме, након укључења генератора функције G, већи део импулсног сигнала се рефлектује на површини узорка и у ултразвучној глави SP, која је одмах након слања импулса укључена као пријемник па изазива генерисање амплитуде која је толико велика, да њен врх превазилази оквир екрана осцилоскопа. На позицији II се види амплитуда која потиче од ултразвучног таласа након времена проласка до дефекта, плус времена које је протекло током пута рефлектованог дела ултразвучног таласа назад до главе SP. На позицији III се види амплитуда, која настаје рефлектовањем ултразвучног таласа од друге површине (полеђине) узорка, која се налази наспрам главе SP. Време проласка ултразвука до полеђине узорка је дуже него у случају већ описаног дефекта. И амплитуда настала рефлексом од полеђине узорка је већа од амплитуде која потиче од дефекта. После изведеног мерења, ултразвучна глава се постепено помера, клизећи по контактеном средству.

Трансмисиона техника

У литератури се о методи са одвојеним ултразвучним главама за емитовање и пријем говори једино као о поступку где су инволвиране једна ултразвучна глава за емитовање ултразвучног сигнала и једна ултразвучна глава за пријем ултразвучног сигнала. Ова метода се назива и „методом проласка звука“ или „трансмисионом ултразвучном методом“.



Слика 2.26 Шема принципа трансмисионе технике.

На слици 2.26. је приказан принцип ове методе. Ултразвучна глава S служи као одашиљач, а глава P као пријемник ултразвучног сигнала. Генератор функције G снабдева ултразвучну главу S, која електрични напон побуде претвара у ултразвук. На зид узорка је нането контактено средство. На слици се види како сноп дејства ултразвучног таласа пролази кроз узорак. Примљени сигнал ултразвучне главе P, се води на волтметар V, како би се измерила амплитуда генерисаног пријемног сигнала. После изведеног мерења, обе ултразвучне главе се морају постепено синхроно померати, клизећи по контактном средству, да би се извело следеће мерење. На позицијама, када се између одашиљача и пријемне ултразвучне главе налази дефект, генерисана амплитуда пријемника је слабија, што наводи на закључак да постоји дефекат у узорку материјала. Као највећи недостатак ове методе се у литератури навод потреба, да се истовремено оперише са две ултразвучне главе, и да се при том главе морају померати синхроно. Наиме, чим би дошло до десинхронизације позиција ултразвучних глава, дошло би и до грешака због одступања које не потичу од дефекта у материјалу, већ од слабљења пријема, због неподударности позиција ултразвучних глава S и P. Осим тога и код ове методе је потребно контактено средство, јер када се ради са високим фреквенцијама онда је то неопходно, као што је то неопходно и код импулсне ехо технике.

3.

МЕТОДА КВАДРОФОНСКЕ ТРАНСМИСИОНЕ УЛТРАЗВУЧНЕ ДЕФЕКТОСКОПИЈЕ (KTUD)

Имајући у виду велики део међународних искустава из области ултразвучне дефектоскопије, јавила се потреба за представљањем једног новог приступа ултразвучној дефектоскопији у облику развоја система који ће својом конструкцијом, уз помоћ рачунарске подршке и аутоматизације поступка мерења, створити услове за ефикаснију проверу квалитета материјала добијених директним ласерским синтерованњем метала DLSM.

У овом делу дисертације ће се представити развој техничког, електронског и софтверског решења дефектоскопа који функционише на принципу нове, овде презентоване квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије (KTUD). Ултразвучни дефектоскоп заснива се на KTUD методи, за коју је у октобру 2010. године у Немачком централном заводу за патенте уручен захтев за признавање патента [DPMA]. Јула 2012. год. прихваћен је патент под редним бројем 10 2010 046 781. Развој дефектоскопа и нове методе ултразвучне дефектоскопије ће довести до унапређења трансмисионе ултразвучне дефектоскопије у високо ефикасну методу за проверу квалитета узорака добијених DLSM. Један од основних захтева је да се обезбеди задовољавајућа продорност ултразвука која омогућава примену чак и код порозних и шупљикавих материјала синтерованих DLSM методом, описаној у уводном делу.

У овој глави се објашњава принцип рада KTUD методе, а затим се приказује принцип електронског решења, који чини срж разумевања рада дефектоскопа након чега је предочен превод описног дела патента. Потом је презентирани експериментални склоп KTUD методе реализован за лабораторијска истраживања која су изведена у оквиру ове дисертације. На крају ове главе презентована је Интернет апликација и посебно дизајнирана релациона база података која је у сврси приказивања резултата KTUD методе.

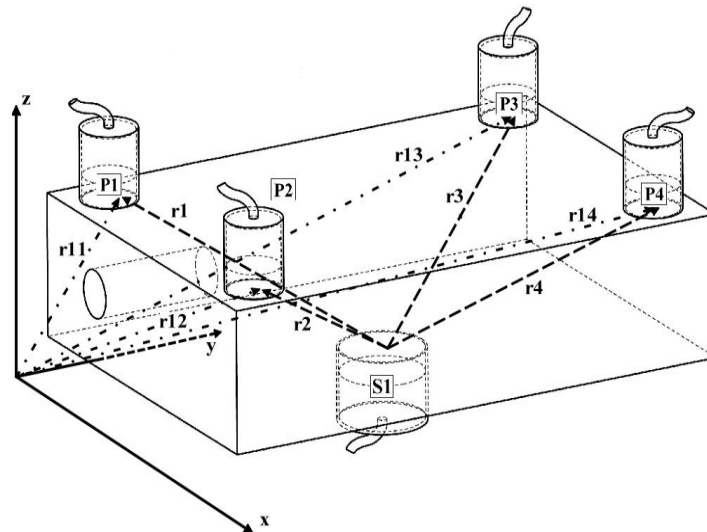
KTUD метода представља унапређену верзију до сада мало развијане методе са одвојеним ултразвучним главама за емитовање и пријем сигнала. У литератури се о овој методи говори једино као о поступку, у који су укључене једна глава као извор ултразвучног сигнала и једна глава за пријем ултразвучног сигнала, која би имала функцију сензора [Cor87].

Овде приказана метода квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије KTUD користи једну главу за емитовање ултразвучног сигнала и четири главе за пријем ултразвучног сигнала. Примена релативно ниских ултразвучних фреквенција од само неколико десетина килохерца омогућава захтевану продорност сигнала неопходну за квалитетну дефектоскопију узорка материјала који не само да су сами по себи порозни већ и „ћелијске геометрије” доприносе додатној „шупљикавости”. Наиме, применом поменутих ултразвучних фреквенција, избегава се апсорпција од стране материјала узорка, као што је то случај код сигнала високих фреквенција примењених код импулсне ехо технике. Наиме тада долази до интензивних рефлексија и апсорпције ултразвука унутар порозних и шупљикавих структура.

Значајна предност KTUD методе јесте чињеница, да су електронске компоненте (пре свега аналогно дигитални конвертори из области масовне индустријске производње) због својих нижих радних фреквенција вишеструко јефтинији од електронских елемената искоришћених код импулсне ехо методе, па се тиме отвара пут широке примене дефектоскопа заснованог на KTUD методи, у науци и индустрији. О вишеструким предностима KTUD методе, што се тиче могућности примене веома једноставних конструкција ултразвучних глава, већ је било говора у другој глави, у поглављу „Ултразвучни сензори на принципу пиезоелектричког ефекта”. Осим споменутих предности, од велике је важности могућност KTUD дефектоскопа, да се резултати дефектоскопије постигну без употребе било каквих контактних средства између ултразвучних сензора и узорка материјала. Употреба контактних средстава је код импулсне ехо технике обавезна, што представља велики проблем, посебно када се ради о порозним и шупљикавим материјалима. Порозни и шупљикави материјали произведеним DLСM поступком, који се израђују за примене у техници орбиталних сателита, се не могу третирати контактним средствима, јер би контактна средства могла да оштете њихове површине које су посебно дизајниране тако да олакшавају лепљење по површинама других елемената израђених од разних других типова материјала,

најчешће од разних полимера. Осим тога, контактна средства би могла да допру у унутрашњост шупљикавих структура и тиме изазову разне нежељене последице.

Разлози за концепт KTUD методе, као решења које се заснива на једном одашиљачу и четири пријемника ултразвука, су вишеструки. У смислу остваривања ултразвучне дефектоскопије машинских елемената који се производе методом DLSSM оптимална је подела простора на четири квадранта. Карактеристичне мерене величине у ултразвучној дефектоскопији су време распрострањања и интензитет ултразвучних таласа, а KTUD метода са једном одашиљачком и четири пријемне ултразвучне главе може да користи обе величине. Следећи разлог за квадрофонско решење је математички апарат заснован на правилима просторне геометрије. На основу познавања просторних координата четири пријемника звука и познавања износа појединачних временских разлика простирања звука између одашиљача и пријемника, могуће је одговарајућим једначинама дефинисати координате одашиљача у простору. У KTUD методи и дефектоскопу заснованом на овој методи, просторне координате одашиљача ултразвука се узимају као познате. То омогућава да се на основу расположивих математичких релација и на основу добијених мерних података, дође до оптималне анализе структуре узорка. На тај начин локација евентуалног дефекта и квантификација дефекта унутар узорка постаје могућа по сваком појединачном просторном квадранту.

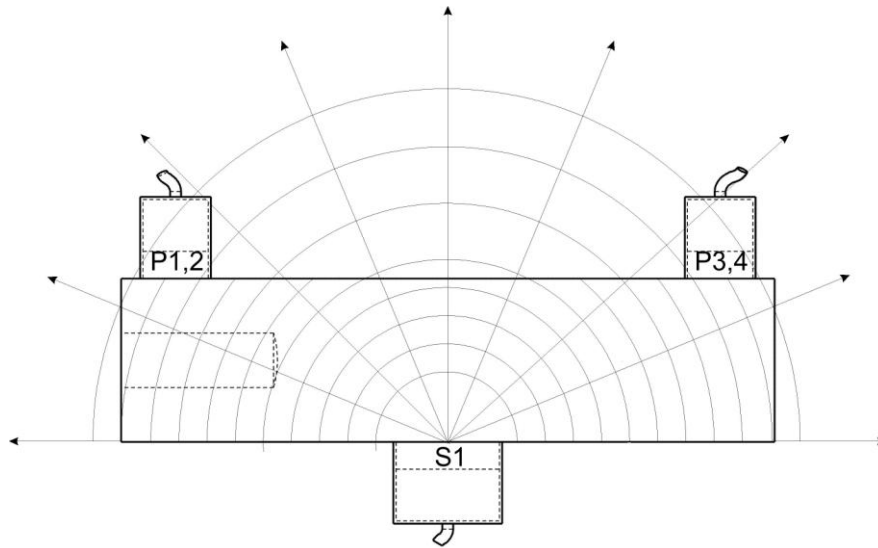


Слика 3.1 Позиције ултразвучних глава на узорку.

Следи приказ наведених математичких релација. На слици 3.1 су означене позиције појединачних ултразвучних глава на једном узорку материјала. Тачка означена са S_1 (координате (x_s, y_s, z_s)) одговара позицији додира контактне површине одашиљачке ултразвучне главе са површином узорка материјала. Ова позиција је са

доње стране узорка. Тачке са ознакама P_1, P_2, P_3 и P_4 , са координатама $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$ и $P_4(x_4, y_4, z_4)$ одговарају позицији додира пријемних ултразвучних глава P_1, P_2, P_3 и P_4 , са површином узорка материјала. Ове позиције су на супротној, горњој страни узорка материјала. Положаји тачака P_1, P_2, P_3 и P_4 , у односи на извор ултразвука кога репрезентира тачка S_1 на слици 3.1 су дати векторима $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3$ и \vec{r}_4 .

На слици 3.2 се види, да одашиљачка ултразвучна глава S_1 формира звучно поље у облику концентричних сферних површина, чиме долази до трансмисије ултразвучних таласа до ултразвучних пријемника.



Слика 3.2 Поље ултразвука које развија одашиљачка глава S_1 .

Сигналу који пролази кроз узорак материјала потребно је извесно време t_m како би стигао до ултразвучних пријемника. Оно што се мерењем конкретно установљава је износ диференције времена $\Delta t_{m,n} = t_m - t_n$ јер сигнали не пристижу истовремено у сваки од пријемника. Брзина простирања ултразвучног таласа је у наредним једначинама означена са c_m . За дати материјал то је физичка константа која се мора унапред познавати како би се могао извести прорачун. Математичка поставка служи да се на основу времена диференција $\Delta t_{m,n}$ израчунају растојања $r_{m,s}$. Ознака $r_{m,s}$ стоји за појединачна растојања извора ултразвучног таласа S_1 до тачака P_m . За математички прорачун три компоненте положаја извора (x_s, y_s, z_s) потребне су три једначине које

резултирају из растојања ултразвучних пријемника ($m=1,2,3,4$) од извора звука. За та растојања користи се дефиниција [Jän08]:

$$r_{m,s} = \sqrt{(x_m - x_s)^2 + (y_m - y_s)^2 + (z_m - z_s)^2} \quad (3.1)$$

тако да за појединачне тачке ултразвучних пријемника важе следећи изрази:

$$r_{1,s} = \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2} \quad (3.2)$$

$$r_{2,s} = \sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2 + (z_2 - z_s)^2} \quad (3.3)$$

$$r_{3,s} = \sqrt{(x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2 + (z_3 - z_s)^2} \quad (3.4)$$

$$r_{4,s} = \sqrt{(x_4 - x_s)^2 + (y_4 - y_s)^2 + (z_4 - z_s)^2} \quad (3.5)$$

Решење овог система једначина се може извести тако што ће се једначина (3.5) убацили у преостале три једначине, а након квадрирања обе стране долази се до следећих изрази:

$$(r_{4,s} - \Delta r_{1,4})^2 = (x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2 \quad (3.6)$$

$$(r_{4,s} - \Delta r_{2,4})^2 = (x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2 + (z_2 - z_s)^2 \quad (3.7)$$

$$(r_{4,s} - \Delta r_{3,4})^2 = (x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2 + (z_3 - z_s)^2 \quad (3.8)$$

Када се једначина (3.6) реши по x_s и замени у једначине (3.7) и (3.8) добија се:

$$x_1 - \sqrt{(r_{4,s} - \Delta r_{1,4})^2 - (y_1 - y_s)^2 - (z_1 - z_s)^2} = x_s \quad (3.9)$$

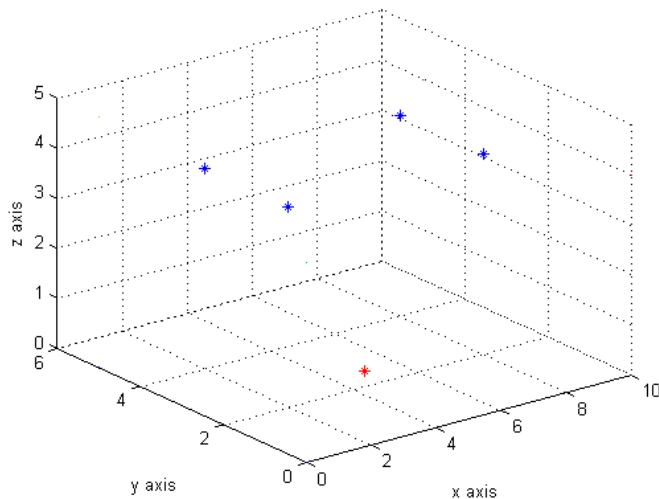
$$(r_{4,s} - \Delta r_{2,4})^2 = (x_2 - (x_1 - \sqrt{(r_{4,s} - \Delta r_{1,4})^2 - (y_1 - y_s)^2 - (z_1 - z_s)^2}))^2 + (y_2 - y_s)^2 + (z_2 - z_s)^2 \quad (3.10)$$

$$(r_{4,s} - \Delta r_{3,4})^2 = (x_3 - (x_1 - \sqrt{(r_{4,s} - \Delta r_{1,4})^2 - (y_1 - y_s)^2 - (z_1 - z_s)^2}))^2 + (y_3 - y_s)^2 + (z_3 - z_s)^2 \quad (3.11)$$

Сходно овоме, исто се поступа са једначинама (3.7) и (3.8) чиме се долази до дефиниција просторних координата x_s, y_s, z_s . У изведби конкретног дефектоскопа који је овде представљен, координате x_s, y_s, z_s су познате, па је могуће да се убацивањем свих измерених диференција времена $\Delta t_{m,n}$ дође до прорачуна просторних координата у случају када испитивани узорак садржи дефект.

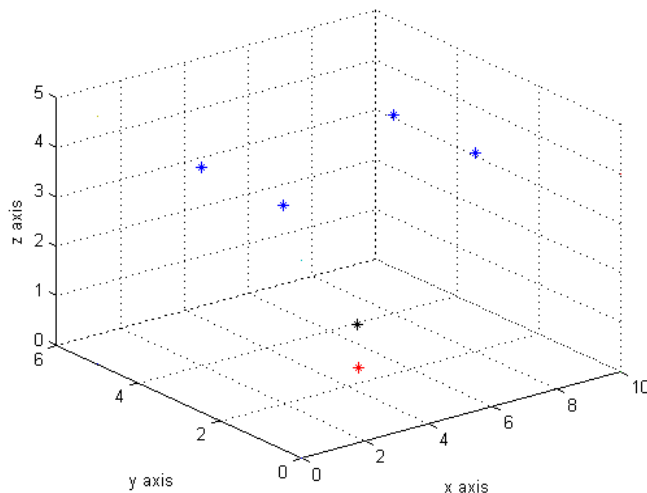
Закључци о структури испитаног узорка материјала се могу изводити на основу разлика кашњења ултразвучних таласа и на основу разлика амплитуда пристиглих у пријемне ултразвучне главе. Када се пође од тога да су пријемне ултразвучне главе P_1, P_2, P_3 и P_4 постављене симетрично у односу на просторне координате одашиљача S_1 и

са претпоставком да је структура испитиваног узорка материјала „исправна” (тј. да не садржи никакав дефект), ултразвучни таласи који крећу од S_1 , треба да подједнако брзо стигну до сваке од пријемних ултразвучних глава P_1 , P_2 , P_3 и P_4 . Математичка дефиниција координата x_s, y_s, z_s која је претходно приказана, је у овом случају приказана на слици 3.3.



Слика 3.3 Скица координата у случају без дефекта.

Додатна је чињеница, да сигнали који пристигну у P_1 , P_2 , P_3 и P_4 , имају идентичне амплитуде, што има практични значај за овде приказан експериментални склоп.



Слика 3.4 Скица прорачунатих координата у случају са дефектом.

У случају када испитан узорак материјала садржи дефект, највеће закашњење ултразвучног сигнала ће се регистровати на ултразвучној глави која је најближа

дефекту. Прорачун просторних координата ће тада дати координате извора ултразвучног сигнала x_{sp}, y_{sp}, z_{sp} које одступају од реалних координата извора ултразвука x_s, y_s, z_s . То је приказано на слици 3.4.

Способност предвиђеног система да довољном прецизношћу региструје закашњење ултразвучног сигнала зависи од квалитета и резолуције употребљених аналогно дигиталних конвертора. Тржишне цене квалитетних аналогно дигиталних конвертора са високом резолуцијом су значајна инвестиција при реализацији. Самим тим су могућности оваквог ултразвучног дефектоскопа у директној вези са висином уложених средстава. У случају да испитани узорак материјала садржи дефект, највеће слабљење амплитуде ултразвучног сигнала ће се манифестовати у ултразвучној глави која је најближа дефекту. Да је наведена амплитуда стварно мања од осталих амплитуда, могуће је регистровати и помоћу релативно једноставних и јефтиних аналогно дигиталних конвертора.

У наредном поглављу следи опис принципа електронског решења, опис патентираног дефектоскопа, приказ концепта електронско-софверске реализације микроконтролера KTUD дефектоскопа, приказ дизајна специјалне релационе базе података за складиштење података мерења KTUD методом и опис софтверске апликације за генерисање резултата мерења.

3.1 Електронско решење

За практичну реализацију KTUD методе веома је важна конкретна реализација уређаја који се користи за генерисање ултразвучних сигнала односно њихов пријем и обраду после проласка кроз испитивани материјал.

3.1.1 Принцип електронског решења

Главне компоненте које објашњавају принцип електронског решења KTUD методе, приказане су на слици 3.5. Реализација електронског склопа KTUD методе садржи четири електронска мерна ланца. Генератор функције служи да напаја ултразвучни одашиљач у смислу побуде физичког процеса. Емитовање ултразвучног сигнала унутар узорка материјала доводи до физичког процеса трансмисије ултразвука. Сензори мерних ланаца су четири ултразвучна пиезокерамичка пријемника који генеришу пријемне аналогне напонске амплитуде. Ови напони се појачавају помоћу четири електронска адаптера. Излази сигналних адаптера се доводе аналогно дигиталним конверторима до рачунара задуженог за процесирање мерних сигнала.

Приказу приложене блок шеме одговарају компоненте електронског решења приказане на слици 3.6: генератор функције G1; ултразвучни одашиљач S_1 ; ултразвучни сензори као пријемници P_1 , P_2 , P_3 и P_4 ; предпојачивачи сигнала N1, N2, N3 и N4; аналогно дигитални конвертори B1, B2, B3 и B4 и извор једносмерног напона G2.

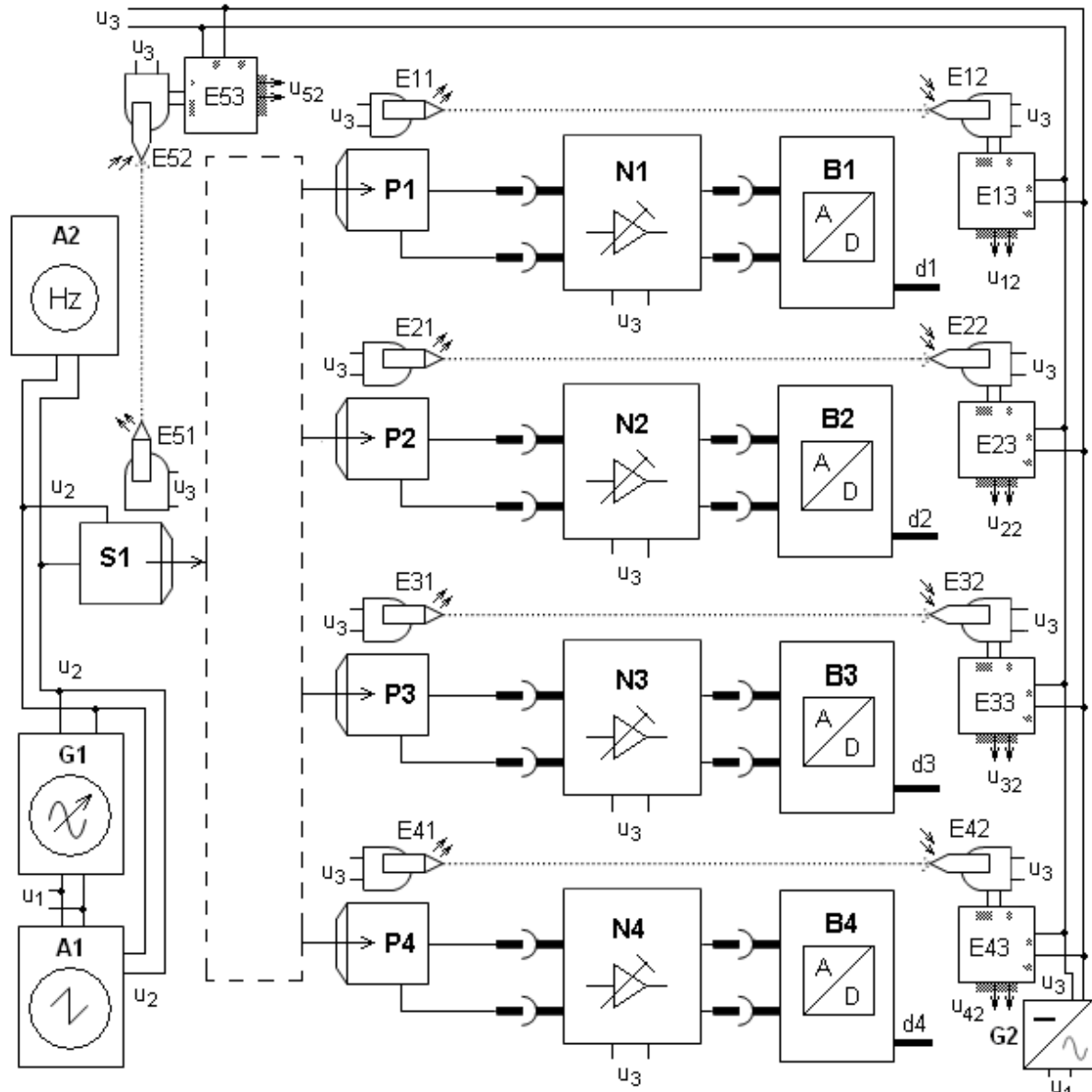


Слика 3.5 Блок шема KTUD методе.

Електронске компоненте система за одређивање координата чине: предајници инфрацрвених сигнала E11, E21, E31, E41 и E51; пријемници инфрацрвених сигнала E12, E22, E32, E42 и E52 и сигнализатори E13, E23, E33, E43 и E53 који ће у наредном излагању бити ближе описани. Осцилоскоп A1 и фреквенцметар A2 су помоћни контролни електронски лабораторијски инструменти експерименталног склопа.

Електрични напони су: u_1 напон напајања 220 V; u_2 ултразвучно фреквентни напонски сигнал; u_3 напон напајања 9 V за предпојачиваче, са A/D су означени конвертори и електронске компоненте помоћног система; u_{12} , u_{22} , u_{32} , u_{42} и u_{52} су излазни сигнали система за одређивање координата ултразвучних глава тј. сензора. Појачавач је реализован као обичан инвертујући појачавач са операционим појачавачем. Везе између електронског склопа и рачунара представљене су са d1, d2 d3 и d4.

Као одашиљач ултразвучног сигнала и пријемни сензори користе се сензори на принципу пиезоелектричног ефекта од олово цирконијум титаната ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ $0 \leq x \leq 1$). Генератор функције G1 генерише сигнал фреквенције од 45 kHz. Високофреквентни сигнал је на напонском нивоу u_2 и доводи се ултразвучном одашиљачу S_1 који је уствари ултразвучна глава са прстенастим пиезокерамичким кристалом за изазивање физичке побуде узорка.

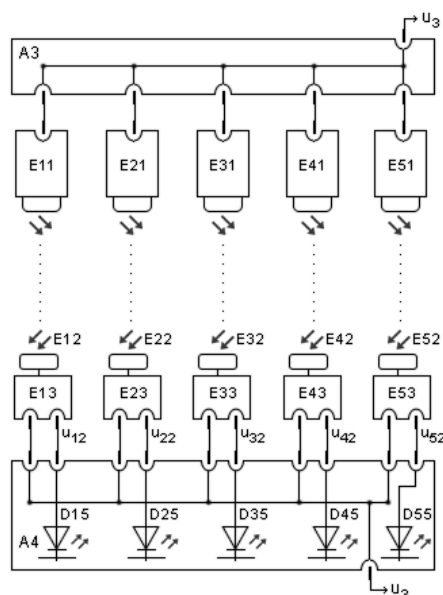


Слика 3.6 Компоненте електронског решења KTUD методе.

Ултразвук, након што је дошло до његове трансмисије кроз узорак материјала, пристиже мање или више ослабљен тј. са мање или више закашњења у ултразвучне пријемне сензоре P_1 , P_2 , P_3 и P_4 . Побуду насталу механичким дејством ултразвука пријемници конвертују у аналогне електричне напоне. Напони са пријемника P_1 , P_2 , P_3

и P_4 се доводе предпојачивачима сигнала N_1 , N_2 , N_3 и N_4 , а након тога на аналогно дигиталне конверторе B_1 , B_2 , B_3 и B_4 . Једносмеран напон u_3 из G_2 , служи за напајање предпојачивача, A/D конвертора и електронског система за одређивање координата. За прорачун просторних координата потребни су сигнали S_1 , P_1 , P_2 , P_3 и P_4 , у циљу одређивања дефекта у материјалу.

Систем за одређивање координата је помоћни систем унутар експерименталног склопа, приказан на слици 3.7., и састоји се од следећих електронских компоненти: предајника инфрацрвених сигнала E_{11} , E_{21} , E_{31} , E_{41} и E_{51} , пријемника инфрацрвених сигнала E_{12} , E_{22} , E_{32} , E_{42} и E_{52} и сигнализатора E_{13} , E_{23} , E_{33} , E_{43} и E_{53} . Компоненте E_{51} , E_{52} и E_{53} су предвиђене за случај да ултразвучни извор S_1 механички буде изведен тако да се његова позиција може мењати.



Слика 3.7 Блок шема система за одређивање координата.

Унутар реализованог експерименталног склопа, глава S_1 је чврсто фиксирана, тако да су њене просторне координате познате и фиксне. Разводник A_3 служи за напајање предајника E_{11} , E_{21} , E_{31} , E_{41} и E_{51} напонем u_3 . Ови предајници путем фото ћелија емитују инфрацрвене сигнале, како би фото транзистори унутар пријемника E_{12} , E_{22} , E_{32} , E_{42} и E_{52} реаговали на прецизно усмерен примљен инфрацрвени сигнал. На основу тога сигнализатори E_{13} , E_{23} , E_{33} , E_{43} и E_{53} генеришу појединачне напоне u_{12} , u_{22} , u_{32} , u_{42} и u_{52} који укључују сигналне фото диоде D_{15} , D_{25} , D_{35} , D_{45} и D_{55} . Ови напони су прикључени на кућиште A_4 , унутар кога су смештене сигналне фото диоде, а ово кућиште истовремено служи и као разводник напона u_3 за сигнализаторе.

Пријемници инфрацрвених сигнала су монтирани на механичким шинама тако да могу да се померају на спољњем делу конструкције механичког експерименталног склопа. Након што се узорак материјала механички фиксира и на њега се наслоне ултразвучне пријемне главе, сваки појединачни пријемник инфрацрвене светлости (E12, E22, E32, E42) се помера по механичким шинама, све док појединачна сигнализациона фото диода (D15, D25, D35, D45) не засветли и тада се једноставно читају позиције.

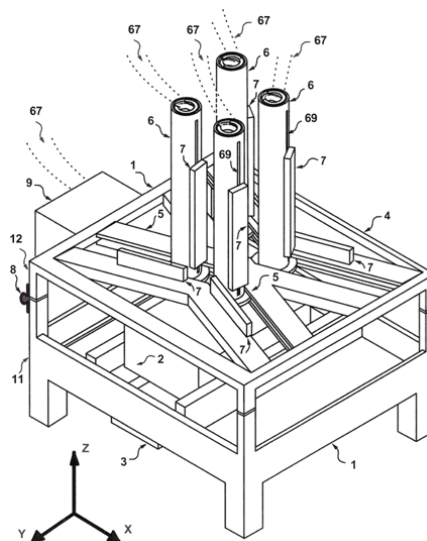
3.1.2 Патентирани дефектоскоп на принципу методе KTUD

Као додатак овом раду налази се додела патента дефектоскопа заснованог на методи квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије. Приказан је превод дела пријаве у коме се налази опис патента, који чини главни део пријаве, заједно са скицама које су такође саставни делови патента. Остали делови патента се овде не преводe, јер су правног карактера, а у суштини садрже текстове из описног дела патента.

Описни део пријаве патента састоји се из поглавља “опис”, “задатак” и “пример-изведбе”. Као “опис” је наведено: ***проналазак се тиче апаратуре и поступка за дефектоскопију узорка материјала без разарања, излагањем узорка ултразвучним таласима и обрадом сигнала насталих трансмисијом ултразвука кроз узорак.***

Механички део апаратуре KTUD

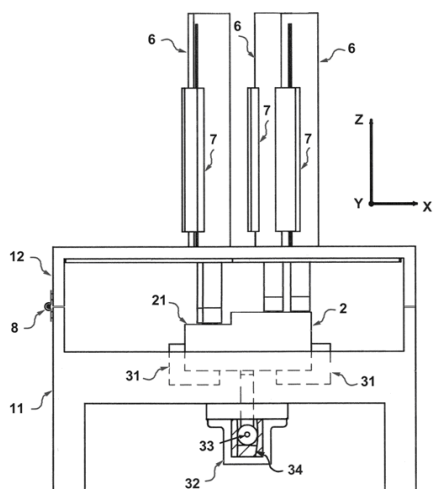
Слика 3.8. пружа поглед искоса на апаратуру проналаска, у коме се налази пробни узорак (2). Апаратура је склопљена као мерни кавез (1).



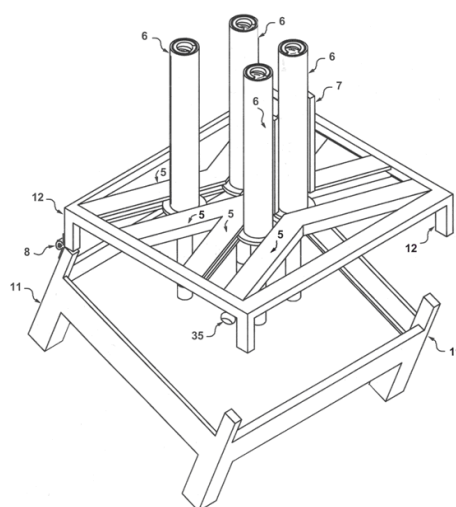
Слика 3.8 Поглед искоса на патентирану апаратуру KTUD.

Пробни узорак се поставља на шине (31) које се налазе на поду (3) мерног кавеза. Мерни кавез се састоји од доњег (11) и горњег дела (12) који су спојени помоћу шарки (8). На овај начин мерни кавез може да се отвара, како би се олакшало тј. омогућило стављање узорка. На горњем делу мерног кавеза се налазе мерне главе (6) које су монтиране на два пара шина, тако да су покретне по X и Y осима.

Слика 3.9. показује поглед са стране на мерни кавез (11) који није отворен, са убаченим пробним узорком (2), при чему се може видети како се мерне главе (6), на основу посебне конструкције (5) могу подешавати, тј. прилагођавати топологији горњег дела (21) пробног узорка.



Слика 3.9 Поглед са стране на мерни кавез.

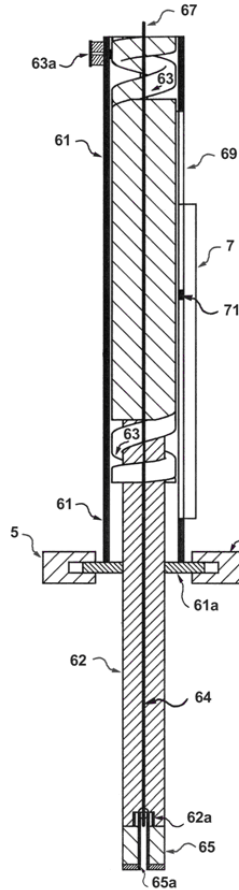


Слика 3.10 Поглед искоса на мерни кавез без узорка.

Позиција шина (31) се може померати по X осима, тако да је могуће прилагођавање габаритима узорка (2). Наравно, само до одређене мере, тј. док габарити узорка не прелазе унутрашње димензије мерног кавеза (11). Осим тога, на слици 3.9. се види начин монтаже ултразвучног одашиљача (33). Слика 3.10. показује поглед искоса на мерни кавез (11) који је отворен, а без узорка.

Слика 3.11. показује пресек једне од четири подједнаке мерне главе (6). Мерна глава је конструисана тако да се у цеви (61) налази шипка (62), која има функцију мерног клипа. На цев је вертикално причвршћен електрични потенциометар (7) који служи за одређивање позиције ултразвучног пријемника (65) на y-оси. Како би се омогућила механичка веза између потенциометра и шипке, у цеви се налази прорез величине око 2 mm. Кроз тај прорез пролази покретна ушица (71) потенциометра, која је причвршћена за шипку (62). На основу тога се позиција потенциометра, која

одговара позицији шипке, преноси као аналогна електрична вредност електричног отпора у рачунар (9). Између цеви (61) и шипке (62) је постављена опруга (63), која приликом додиривања ултразвучног одашиљача затеже шипку и омогућава генерисање механичког притиска на површину пробног узорка.



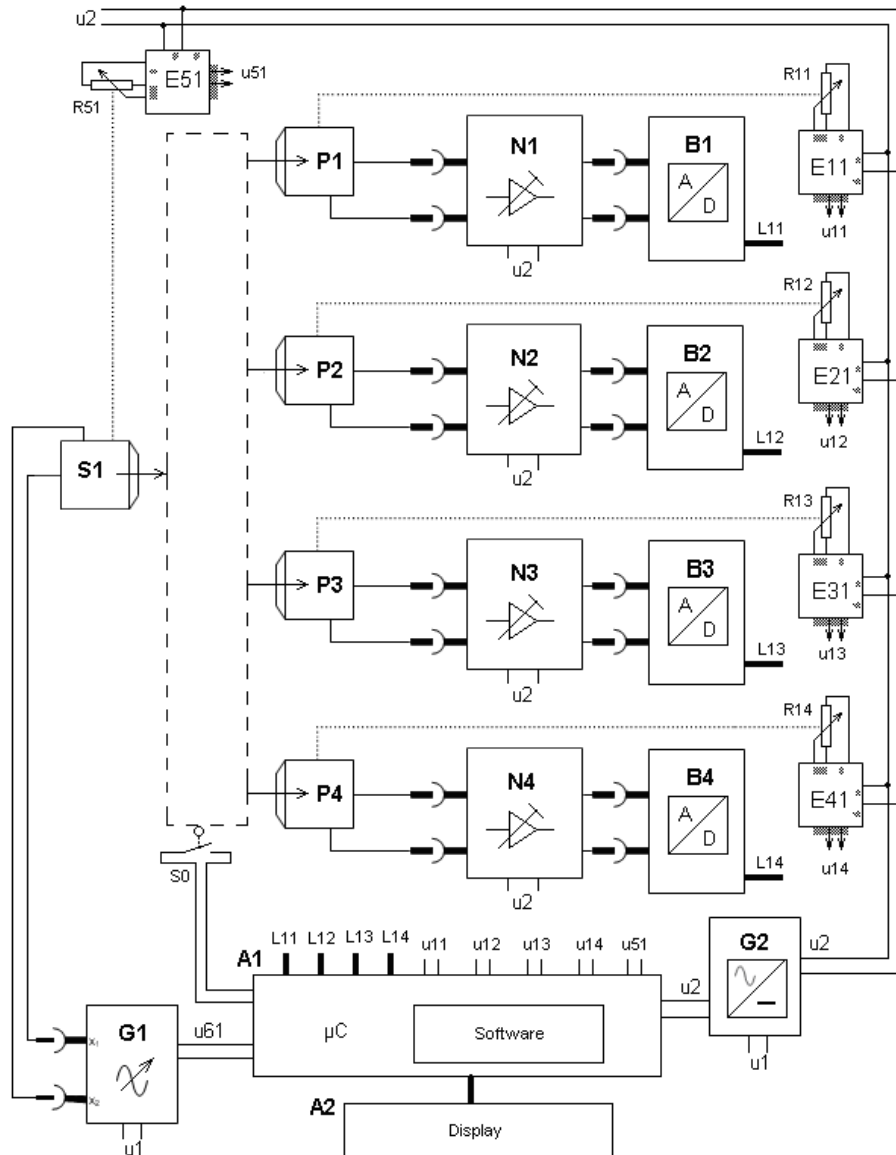
Слика 3.11 Пресек патентиране мерне главе.

Тиме позиција шипке по у-оси директно зависи од топологије горњег дела пробног узорка. Шипка је пробушена по вертикали у њеној средини (65), а кроз ту шупљину се спроводе електрични проводници (67), који спајају ултразвучни пријемник (65). Доњи део цеви (61) је спојен са потенциометрима који леже хоризонтално. Ови потенциометри служе да дају информацију о положају мерне главе дуж x, y и z-оса. Елемент за подешавање (63a) је предвиђен за калибрацију притиска опруге (63).

Електронски склоп апаратуре

Слика 3.12. показује шему електронског склопа апаратуре и управљачке јединице која носи ознаку А1. Ова слика представља оригинал слике која је чинила саставни део пријављеног патента и разликује се у детаљима од слике 3.6. где су представљене компоненте електронског решења KTUD методе. Ова шема је конструисана како би се помоћу ње реализовали следећи кораци. Након исправног постављања узорка тј. када

су мерне главе притиснуле узорак управљачка јединица А1 добија електрични сигнал од уграђеног електромеханичког контакта S0. Сигнал са S0 је знак за старт програма унутар управљачке јединице А1.



Слика 3.12 Електрична шема патентираног дефектоскопа KTUD.

Након тога управљачка јединица А1 је спремна да прими и додатне информације. То су пре свега електричне информације које пристижу од електричних потенциометара R11, R12, R13 и R14, које служе за дефиницију просторних координата пријемних ултразвучних глава P1, P2, P3 и P4. Електрични сигнали наведених потенциометара у управљачку јединицу А1 стижу посредно преко сигналних адаптера E11, E12, E13 и E14. Напон снабдевања за сигнале адаптера E11, E12, E13 и E14 је означен са u2, а излазни сигнали адаптера су означени са u11, u12, u13 и u14. Јединица

напајања напона G1 која генерише напон напајања u_2 , такође припада склопу управљачке јединице A1. Напон снабдевања јединице напајања G1 је означен са u_1 . Просторне координате одашиљачке ултразвучне главе S1 су фиксне, тако да су те вредности чврсто кодиране унутар управљачке јединице. У некој другој варијанти изведбе мерног кавеза (у случају када просторне координате одашиљачке ултразвучне главе S1 не би биле фиксиране), већ би биле такође променљиве, у електричну шему слике 3.12. је уцртан потенциометар R51 и њему одговарајући адаптер E51.

Након што је елекромеханички контакт S0 управљачкој јединици A1 послао сигнал о затварању мерног кавеза, генератор фреквенције G1 даје електрични напон u_{b1} чија су амплитуда, фреквенција, облик сигнала и трајање, софтверски дефинисани. Напон u_{b1} се доводи одашиљачкој ултразвучној глави, која овај електрични напон трансформише у ултразвучне таласе који пролазе кроз узорак. Пријемници ултразвука P1, P2, P3 и P4 примају ултразвучни талас и трансформишу их у електричне сигнале.

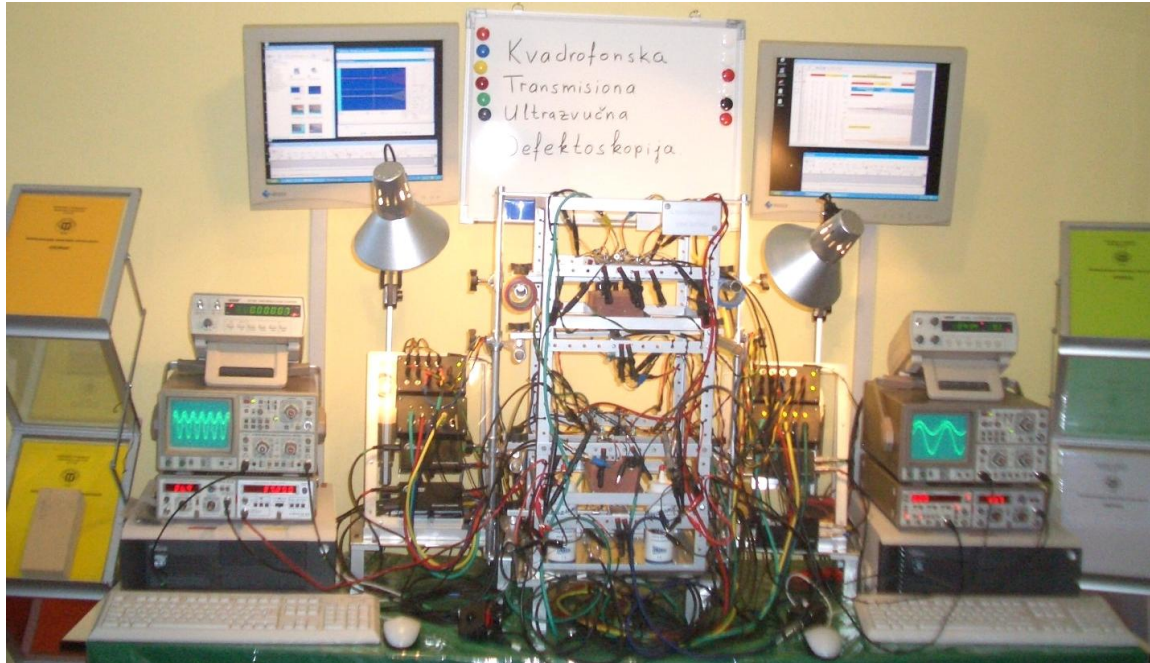
Наведена четири аналогна електрична сигнала се подешавају помоћу електричних предпојачавача N1, N2, N3 и N4 и затим се одводе ка аналогно дигиталним конверторима B1, B2, B3 и B4 на чијим се излазима добија дигитализовани сигнали који се везама L11, L12, L13 и L14 одводе у управљачку јединицу A1 у сврху даље обраде мерних сигнала. Након обраде сигнала долази до приказа резултата прорачуна о стању узорка на пригодном дисплеју A2 или се резултат одводи преко интерфејса на неку удаљену позицију. Евентуалне грешке или проблеми који би се појавили током извођења мерења, такође се региструју помоћу управљачке јединице A1 која може ова стања да јавља.

Управљачка јединица располаже са модулом за убацивање следећих информација у софтвер:

- врста материјала узорака
- просторне координате одашиљачке ултразвучне главе
- избор жељеног концепта тј. алгорита прорачуна
- наређења за убацивање нових ажурирања за софтвер
- појединости за начин приказа резултата мерења
- појединости о начину спровођења мерних резултата на удаљене позиције, као што су протокол преноса информација, адресирање пријемника мерних података
- друге појединости које могу да буду од користи за спровођење поступка.

3.1.3 Лабораторијски експериментални склоп за KTUD

Склоп намењен за лабораторијске експерименте квадрофонском трансмисионом ултразвучном дефектоскопијом KTUD приказан је на слици 3.13.

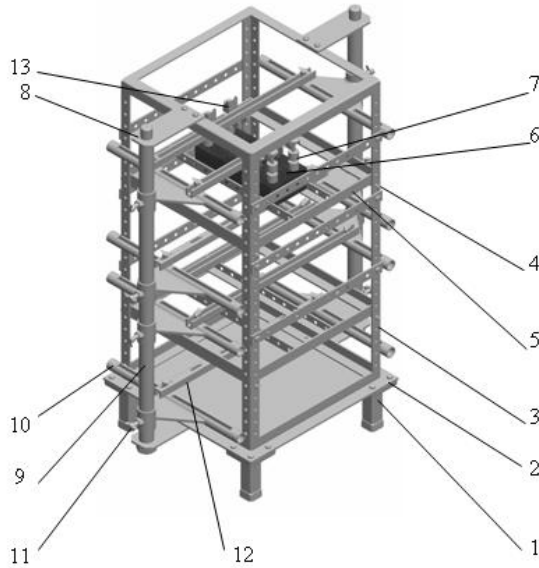


Слика 3.13 Лабораторијски експериментални склоп за KTUD.

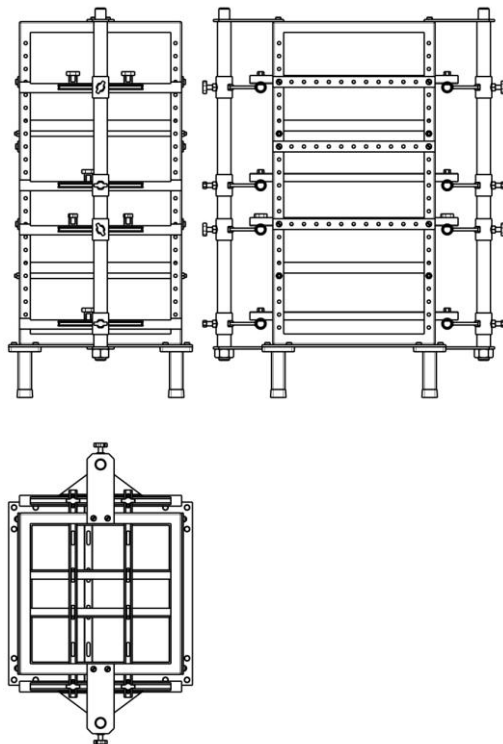
Ово је прототип описаног патентираног KTUD дефектоскопа, на коме су изведена мерења чији се резултати приказују у овом раду. У средини се налази механички део („мерни торањ“) чија је сврха да стабилно држи узорак, тј. пре свега да ултразвучни одашиљач (S_1) и четири ултразвучна пријемна сензора (P_1 , P_2 , P_3 и P_4) могу поуздано да додирују узорак. За разлику од патентиране апаратуре, лабораторијски прототип је изведен тако, да може да одједном прими два узорка, а разлог је остваривање могућности да се експерименти изводе паралелно и евентуално наизменично над различитим узорцима, без губљења времена за монтажу (прототип не поседује шарке и не поседује аутоматизоване мерне главе, као што је приказано у изведби патентираног апарата). Са леве и са десне стране налазе се електронске компоненте: генератори функције, осцилоскопи, фреквенцметри, рачунари, екрани и помоћни елементи.

На слици 3.14. је детаљније приказан „мерни торањ“ лабораторијског експерименталног склопа. На постољу (1) налази се алуминијумска плоча (2), а на њој рам (3) сачињен од L-профила спојених заваривањем. На вертикалним стубовима рама избушени су отвори, преко којих се за њега везују шипке (4). На њих се ослањају оквири (5) који служе као носачи L-профила. На L-профиле се поставља испитивани

узорак (6) са ултразвучним главама (7), на којима се помоћу вијака (7) може ручно подешавати механички притисак. Преко плочица (8), за главну конструкцију су везани стубови (9) по којима се, у вертикалном правцу, могу померати носачи U-профила (10). Положај носача се фиксира вијцима (11).



Слика 3.14 „Мерни торањ” лабораторијског експерименталног склопа.

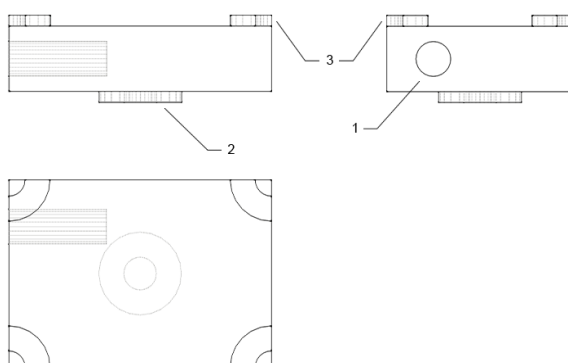


Слика 3.15 Пројекције „мерног торања”.

Носачи су направљени од цеви које су са горње стране прорезане. У носачима се налазе уметци преко којих се, помоћу вијака, учвршћују U-профили (12). На овим

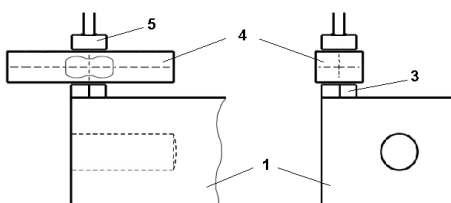
профилима налазе се држачи (13) који носе ултразвучне главе. Отвори избушени на вертикалним стубовима рама имају функцију да се помоћу њих причврсте шипке (4), а осим тога да се помоћу њих изврши везивање бројних каблова као што се то види на слици 3.13. На слици 3.15. су приказане све три пројекције мерног торња.

Унутар склопа намењеног за лабораторијске експерименте као ултразвучни одашиљач и ултразвучни пријемници коришћени су пиезокерамици од олово цирконијум титаната ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ $0 \leq x \leq 1$) фирме PI из Немачке [PIС]. Коришћени су елементи прстенастог облика, који се масовно производе за потребе конструкције кавитационих корита за индустрију. Димензије једног пиезокерамичког елемента су: спољни пречник 38 mm, унуташњи пречник 15 mm, дебљина 5 mm. Као одашиљач узет је цео овакав елемент, а као пријемници коришћене су четвртине елемента, као што је то приказано на сликама 3.16. и 3.17., где се са доње стране узорка (1) налази један цео прстенаст елемент, тј. извор (2), а са друге стране узорка, четвртине пиезокерамичких елемената (3) које служе као пријемници. Из наведених димензија следи да површина једног прстенастог елемента износи 957,4 mm², док је површина четвртине 239,3 mm².



Слика 3.16 Скица узорка са назначеним пиезокерамичким главама.

Мерење притиска на пријемне пиезокерामике изведено је помоћу мерних елемената (4) чија је тачност 0.05 % немачке фирме НВМ [НВМ], као што се види на слици 3.17. На мерне елементе се са горње стране вијцима (5) појачава механички притисак, а мерни елементи притиска леже на пријемницима (3).



Слика 3.17 Мерење притиска мерним елементима.

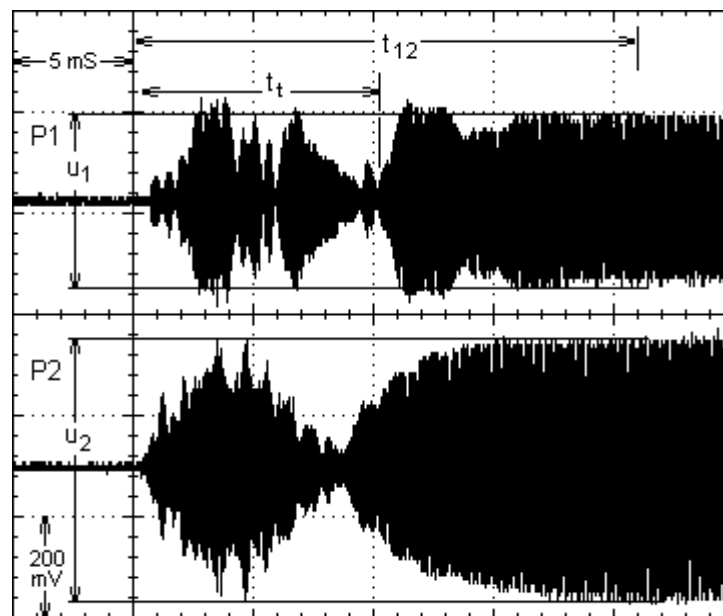
3.1.4 Концепти анализе сигнала KTUD

Као што је претходно изложено у овом раду, главне категорије карактеристичних мерних величина које се добијају ултразвучном дефектоскопијом су време распрострањања и интензитет ултразвучних таласа. Током развоја дефектоскопа заснованог на методи KTUD, разрађено је више варијанти анализе сигнала које ће овде бити приказане. На сликама су приказани снимци начињени дигиталним осцилоскопом типа Owon PDS5022s.

Диференција стабилних електричних напона

Анализа сигнала на основу диференције (разлике) стабилних електричних напона је варијанта која се заснива на разлици интензитета ултразвучна таласа два пријемника.

Након што ултразвучна глава S_1 емитује ултразвучни талас и након што дође до трансмисије ултразвука кроз узорак материјала, талас пристиже мање или више ослабљен у ултразвучне пријемне сензоре P_1 , P_2 , P_3 и P_4 . Степен слабљења зависи од величине и врсте дефекта који је узрок слабљења ултразвучног таласа приликом трансмисије. Пријемни сензори механичку енергију ултразвучног таласа, путем пиезоелектричног ефекта претварају у електрични напон.



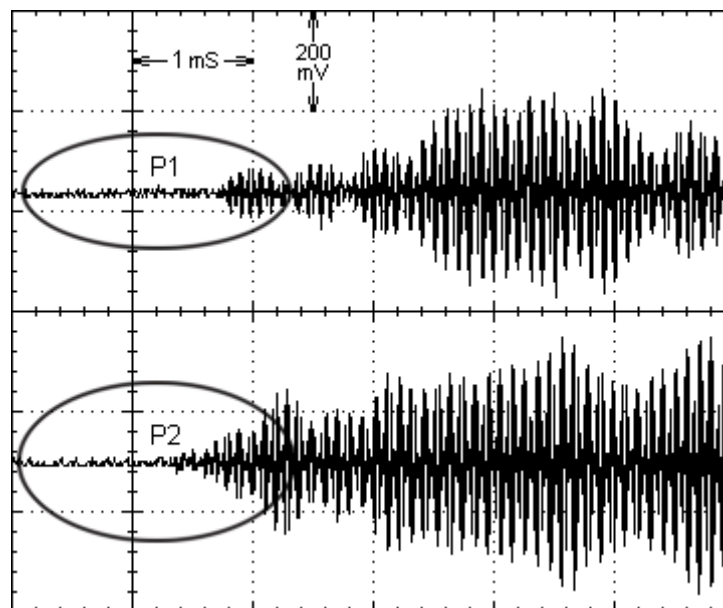
Слика 3.18 Варијанта диференције стабилних електричних напона.

На слици 3.18 је приказан снимак напона пријемних ултразвучних глава P_1 и P_2 , при чему се сензор P_1 налази изнад квадранта узорка са уграђеним дефектом, а сензор P_2 се налази изнад квадранта узорка без дефекта. На временској оси је са t_{12} означено време, након кога се заврши мерење напона u_1 који потиче од P_1 и напона u_2 кога је

генерисао сензор P_2 . Постојање уграђеног дефекта у облику ваљка (добијеног бушењем испод P_1) региструје се знатно мањи напон u_1 у поређењу са напонам u_2 . Варијанта анализе сигнала у смислу диференција стабилних напона подразумева да је мерење напона изведено тек након времена t_{12} које је изричито дуже од временског периода t_t , а никако не у року временског периода t_t . Наиме, у оквиру периода t_t се унутар пријемника одвијају комплексни прелазни процеси, који би, ако би се мерило унутар времена t_t , довели до неких случајних и највероватније неадекватних вредности измерених напона, тако да не би било могуће извести валидне закључке о запремини дефекта на основу ослабљене амплитуде ултразвука у пријемнику. У случају конкретне реализације дефектоскопа конструисаног по принципу KTUD, морају се извести експерименти који ће као резултат дати износ времена t_{12} , након кога се може доћи од стабилних напона пријемних сензора. Велика предност ове варијанте је веома поуздан једнозначан мерни резултат и што су електронске компоненте за ову варијанту јефтине. То је и основни разлог што су резултати презентовани у овој дисертацији добијени применом ове варијанте анализе сигнала.

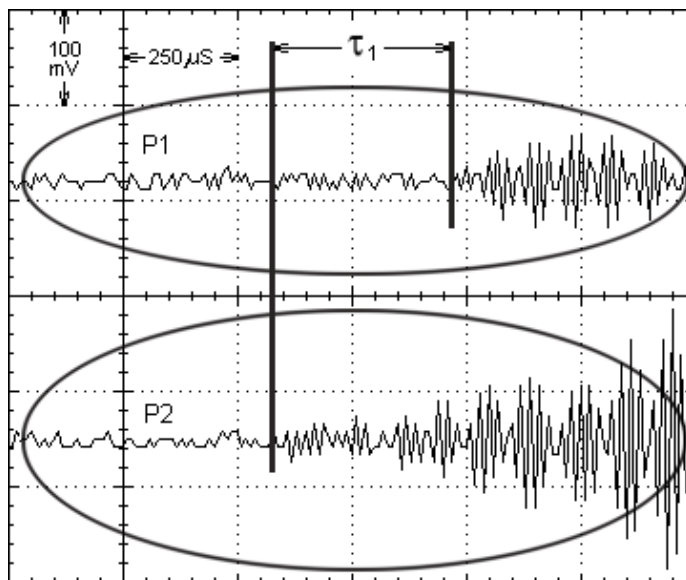
Варијанта анализе закашњења сигнала

Концепт анализе закашњења сигнала се заснива на категорији мерених времена распрострањања ултразвучних таласа.



Слика 3.19 Варијанта закашњења електричног сигнала, прво увећање.

Након што ултразвучна глава S_1 емитује ултразвучни талас и након што дође до трансмисије кроз узорак материјала, ултразвучни талас пристиже са мање или више закашњења у ултразвучне пријемне сензоре. Време кашњења, зависи од величине и врсте дефекта.



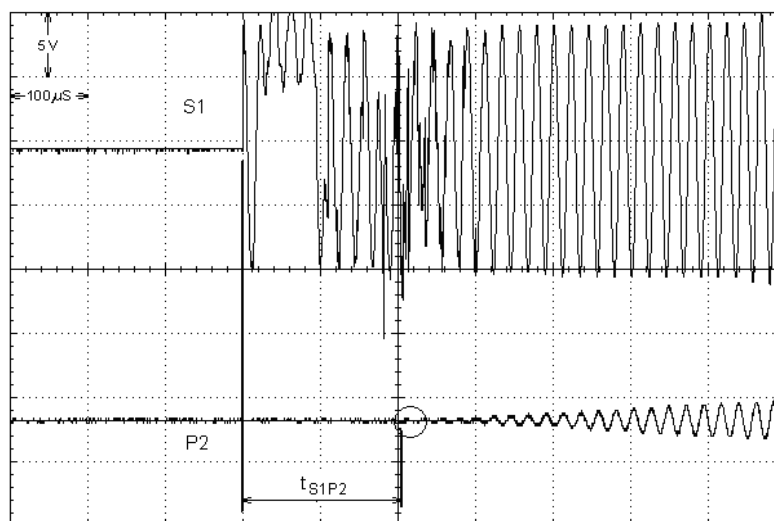
Слика 3.20 Варијанта закашњења електричног сигнала, друго увећање.

На сликама 3.19. и 3.20. је приказана оваква ситуација пријемних сигнала глава P_1 и P_2 , при чему се сензор P_1 налази изнад квадранта узорка са уграђеним дефектом, а сензор P_2 се налази изнад квадранта узорка без дефекта. Слика 3.20. показује прво увећање почетног дела сигнала са слике 3.19. На слици 3.19. су уцртане две елипсе, означене са P_1 и P_2 . Слика 3.20. показује увећање почетног дела тока сигнала са слике 3.19., тако да се види увећани сигнални ток унутар временског периода кога окружују елипсе P_1 и P_2 . На слици 3.20. је приказан начин одређивања диференције времена које износи $\tau_1 = 396 \mu\text{s}$.

Упоредивање сигнала пријемника референцирањем сигнала побуде

Претходне две варијанте анализе сигнала су третирале упоређење сигнала пријемних ултразвучних сензора, без да се прецизније референцирао сигнал побуде. Наредне две варијанте анализе сигнала чине управо то. Прва од ове две варијанте је приказана на слици 3.21. У горњем делу се види снимак напона директно на прикључницама одашиљача ултразвука S_1 , а испод тога се види снимак напона који је генерисала пријемна ултразвучна глава, које се налази над сегментом P_2 . Прва

препознатљива осцилација P_2 је графички заокружена, а време између ње и почетка прве осцилације S_1 је означено са t_{S1P2} .



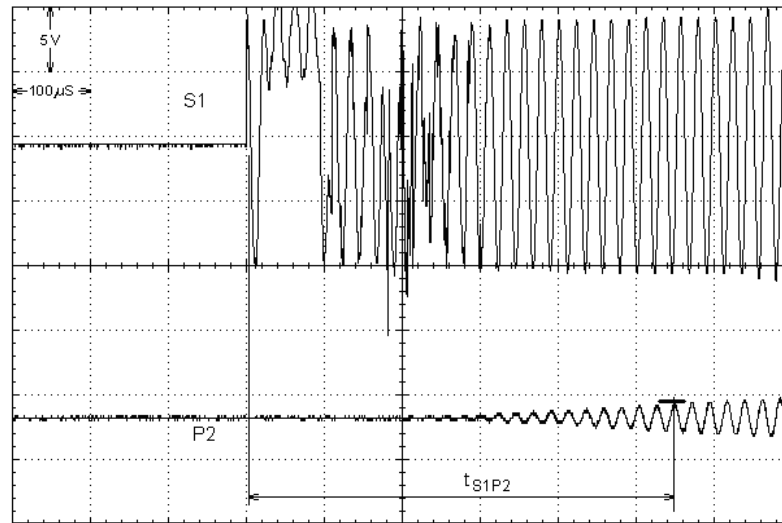
Слика 3.21 Варијанта прве препознатљиве периоде осцилације $S_1 - P_2$.

Овакав концепт анализе сигнала се заснива на чињеници да након трансмисије ултразвучни талас пристиже са мање или више закашњења у ултразвучне пријемне сензоре, а степен закашњења у односу на случај када нема дефеката зависи од величине и врсте дефекта. Овом приликом се мерење времена закашњења не изводи упоређењем пријемних сензора, већ се сигнал сваке пријемне главе упоређује директно са стартним тренутком сигнала ултразвучне побудне главе. Предности оваквог поступка анализе сигнала је најпре изузетно велика брзина детекције, јер је време t_{S1P2} много пута краће од времена t_{21} код варијанте диференције стабилних електричних напона. Предност у односу на варијанту анализе сигнала закашњења сигнала је та, што се референцира поуздан тренутак старта побудног сигнала. Недостатак свих варијанти анализе закашњења сигнала је потреба за квалитетним аналогно дигиталним конверторима високе резолуције. То изазива трошкове који су многоструко већи него ког варијанте диференције стабилних електричних напона.

Следећа варијанта анализе сигнала приказана је на слици 3.22. У горњем делу се поново види снимак напона директно на прикључницама одашиљача ултразвука S_1 , а испод тога се види снимак напона који је генерисала пријемна ултразвучна глава P_2 .

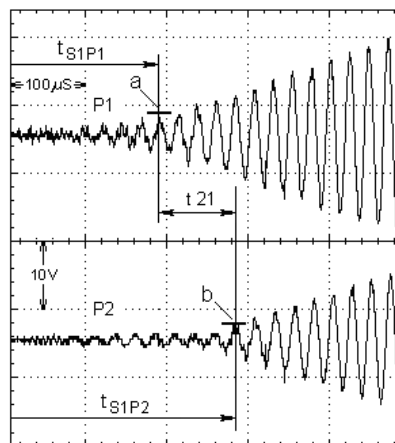
Разлика између приказа 3.21. и 3.22. је што је на слици 3.21. графички означен један мање или више произвољан максимум амплитуде прве препознатљиве осцилације сигнала P_2 , а на слици 3.22. је означена позиција сигнала P_2 , (t_{S1P2}) која се у области електронског мерења назива „окидач” или „тригер”. Када дође до “окидања”, тј.

постизања управо одређене унапред подешене висине амплитуде, почиње се са даљим разматрањем мерних сигнала.



Слика 3.22 Варијанта тригерованог сигнала $S_1 - P_2$.

Користећи поступак који се заснива на овој варијанти, када дође до означеног “окидања”, измери се време t_{S1P2} , као време између прве осцилације на S_1 и временског тренутка окидања тригера. На слици 3.23. где је графички означена разлика времена t_{21} достизања истог тригерског нивоа за пријемнике P_1 и P_2 .

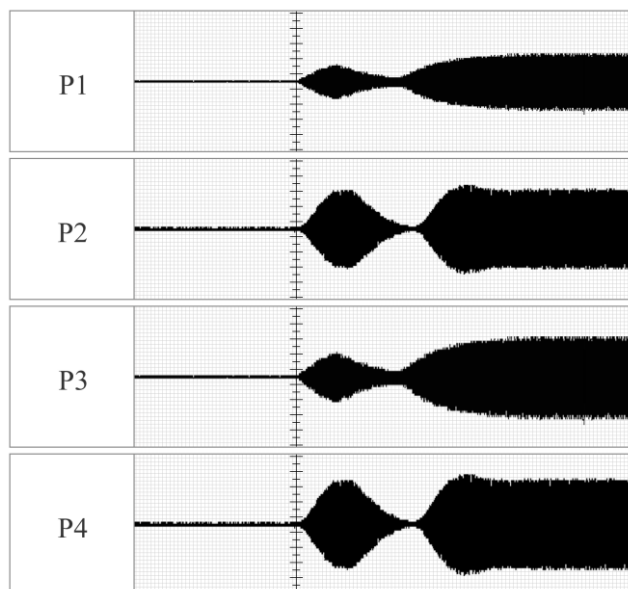


Слика 3.23 Варијанта тригерованог сигнала $P_1 - P_2$.

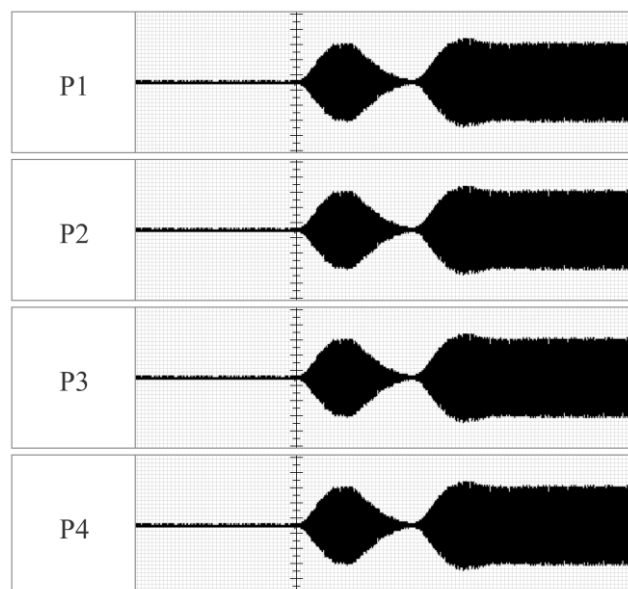
Овакав концепт анализе сигнала је сличан претходној варијанти прве препознатљиве периоде осцилације. Разлика и предност ове варијанте лежи у томе, што би регистравање изазивања тригера било могуће лакше детектовати него извођење детекције прве препознативе осцилације чија је амплитуда изузетно мала (незнатно се издиже изнад нивоа шума). Преостали део извођења закључака у вези стања узорка је као и у досадашњим варијантама закашњења ултразвучног таласа, где је степен закашњења еквивалент величине и врсте дефекта унутар узорка.

3.1.5 Калибрација

Код дефектоскопа заснованог на методи KTUD, је као и код бројних других експерименталних склопова и апаратура из разних области физике, потребно да се реши питање калибрације мерног система. Калибрационо мерење се код KTUD дефектоскопа почиње тако што се у мерну апаратуру најпре монтира калибрациони узорак.



Слика 3.24 Изглед неуједначених сигнала сензорских глава P_1 , P_2 , P_3 и P_4 пред калибрацију.



Слика 3.25 Изједначене амплитуде сва четири сигнала сензорских глава P_1 , P_2 , P_3 и P_4 након извршене калибрације.

Калибрациони узорак односно референтни узорак, је специјалан узорак који је анализиран помоћу других апарата и где је без разарања установљено да тај калибрациони узорак не садржи никакав дефект и да је тиме исправан и погодан за извођење калибрације. Када се такав калибрациони узорак причврсти у мерну апаратуру, ултразвучне главе S_1 , P_1 , P_2 , P_3 и P_4 се монтирају тако да се добије што прецизнија геометријска симетрија. Међутим, јасно је да позиције тачака P_1 , P_2 , P_3 и P_4 никада неће бити сасвим симетричне у односу на S_1 . Поступак постизања веома великог степена тачности симетрије био би сувише компликован. Приближна симетрија позиција ултразвучних глава значи да постоји релативно мала али ипак постојећа геометријска несиметрија. Ова несиметрија је први разлог неопходности извођења калибрације мерног система пре него се почне са реалним мерењима. Последице несиметрије позиција ултразвучних глава унутар приказаног експерименталног склопа доводе до разлика амплитуда сигнала пријемних ултразвучних глава. Разлози због чега је калибрација неопходна су следећи: ултразвучни побудни сигнал емитован од стране S_1 , када након трансмисије кроз узорак допре до ултразвучних сензора P_1 , P_2 , P_3 и P_4 , бива конвертован најпре у аналогни сигнал, а затим бива појачан и конвертован у дигитални сигнал, након чега долази до снимања у рачунару односно микроконтролеру.

Свака од компоненти унутар сваког појединачног од четири мерна ланца KTUD дефектоскопа, уноси своју грешку, чиме долази до нагомилавања грешака. Чак и уз велику инвестицију у изузетно квалитетне а тиме и скупе компоненте које имају нарочито мале толеранције, мора се рачунати са одступањима. Ако се жели извести KTUD дефектосоп са компонентама приступачних цена, толеранција компоненти ће бити још већа, па ће тиме доћи до још већих одступања. То подвлачи значај теме калибрације система.

Амплитуде сигнала које пристигну у P_1 , P_2 , P_3 и P_4 ће дакле бити различите и поред тога што се калибрационо мерење изводи над исправним узорком. Из тог разлога је калибрација толико важна и спроводи се у случају KTUD метода на следећи начин: калибрациони узорак, након што је монтиран у мерну апаратуру, све ултразвучне главе се позиционирају колико је могуће симетрично. Тада се укључује генератор функције и проверава да ли су све остале компоненте мерних ланаца укључене. Након тога се покреће софтвер на рачунару, а затим помоћу генератора функције G1 пушта сигнал ултразвучне фреквенције (на пример 45 kHz).

Стање сигнала у оваквом сценарију, пре него што је калибрација система изведена, приказана је на слици 3.24. Примећује се да су амплитуде P_1 и P_3 ниже од P_2 и P_4 . Калибрација овде приказаног експерименталног склопа се састоји од тога, да се помоћу потенциометара појачавача N1 и N3 повећавају амплитуде P_1 и P_3 толико да све четири амплитуде буду изједначене. Када се након тога понови мерење, амплитуде су подједнаке, као што је приказано на слици 3.25.

Тиме је калибрација путем подешавања степена предпојачања амплитуде сигнала завршена и може се приступити даљим мерењима.

Постоји још један важан аспект у смилу решавања питања калибрације који ће бити приказан у експерименталном делу овог рада. Наиме, висине амплитуда пријемника зависе у мањој или већој мери и од вредности механичких притисака којом ултразвучне главе додирују узорак. У идеалном случају је могуће да се пронађе опсег вредности унутар кога притисак може да варира а да то не изазове веће измене амплитуда. У случају да се у томе не успе, онда би се у механичке склопове пријемних сензора, конструкционо предвиделе мерне јединице механичког притиска, чији би се излазни напони укључили у улазне информације микроконтролера KTUD дефектоскопа.

3.2 Софтверско решење апликације за приказ дијаграма мерења

Један од важних аспеката мерења је начин приказивања добијених резултата. Имајући то у виду, у реализованом систему посебна пажња је посвећена развоју софтверске апликације која ће кориснику обезбедити адекватно праћење резултата спроведених мерења. Сходно томе у овој секцији ће бити приказане основне карактеристике софтвера за графичко приказивање резултата мерења. Софтверско решење које се овде приказује, састоји се из релационе базе података (у даљем тексту ће се означавати са DBKTUD) и вишеслојне софтверске WEB апликације која оперише над датом базом података.

Развијени софтвер поред практичних аспеката у коришћењу развијене KTUD методе има значај у стварању квалитетног окружења за даљи научно – истраживачки рад на побољшању KTUD методе, у смислу:

- оптимизовању подршке структурираном прикупљању и складиштењу мерних података;

- памћењу података за потребе визуализације резултата мерења и истраживања;
- омогућавању приступа резултатима истраживања, не само непосредним истраживачима, већ и корисницима широм света, путем Интернета.

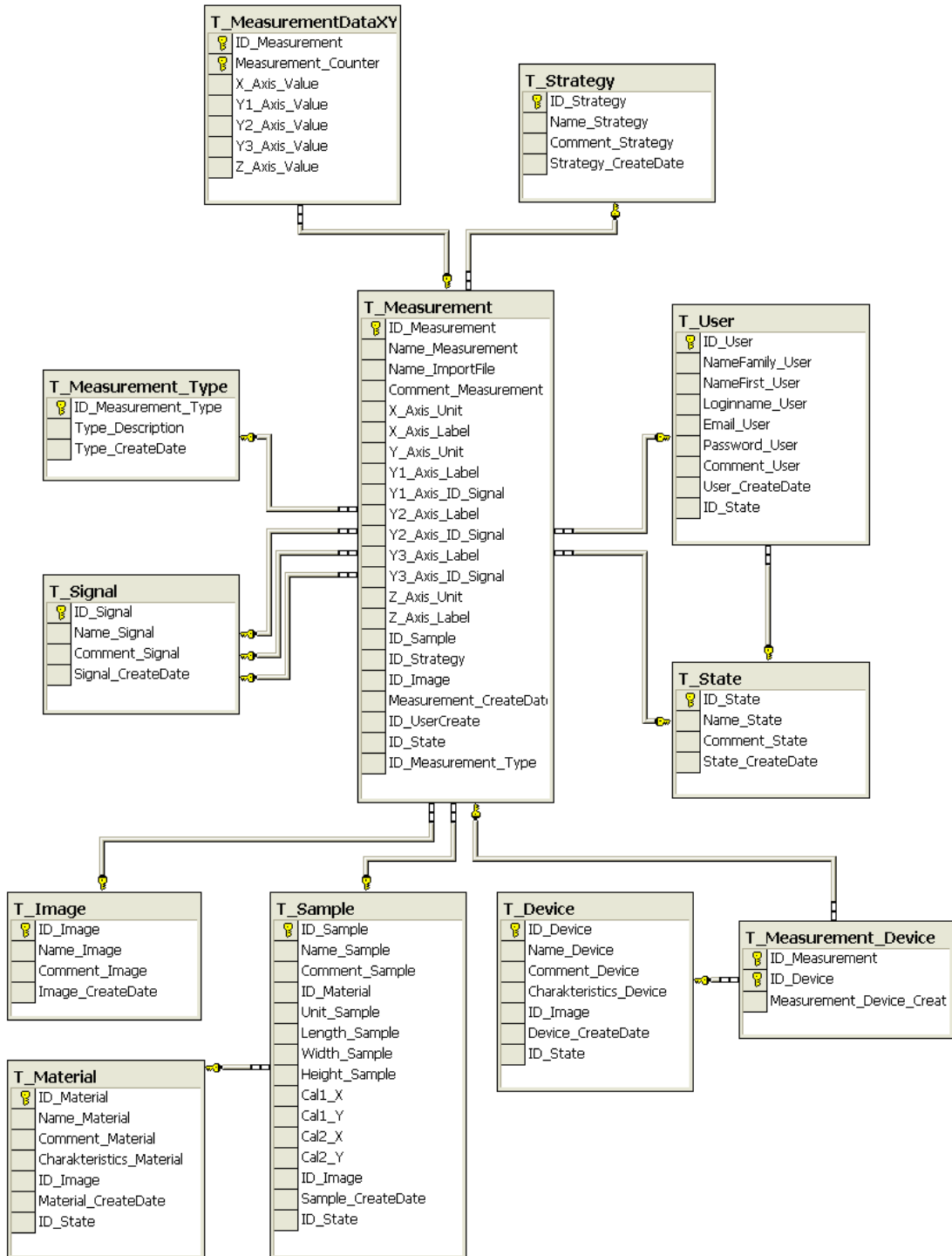
Веза разматране софверске подршке са KTUD методом лежи у основи на којој су дефинисани оквири за извођење експерименталних мерења. Наиме, поступак мерења који се спроводи у оквиру изведених експеримената, се одвија по унапред дефинисаном систему, где се добијени мерни резултати уписују у одговарајући мерни протокол. За мерне податке из протокола, који се називају „сирови подаци мерења”, потребне је дефинистаи одговарајуће структуре, које треба да гарантују оптимално складиштење података мерења. База података која је у ту сврху дефинисана и која се приказује у овом раду, то омогућава.

Осим складиштења силових података мерења, ова база података има и друге задатаке, а то је да ускладишти и информације о појединачним мерним поступцима, типове и стратегије мерења, податке о коришћеним сигнаlima мерења, податке о мерним узорцима и карактеристикама употребљених материјала, податке о мерној опреми и фотографским снимцима. База такође треба да омогући памћење и корисничких податке са циљем регулисања права приступа подацима тј. самој WEB апликацији.

На основу овако структуриране базе података, могуће је формирање потребних информација за потребе визуализације резултата мерења. Да би се извела анализа добијених мерних резултата, потребни су дводимензионални и тродимензионални дијаграми мерења и међусобно упоређивање појединих дијаграма. За ову сврху развијена је софтверска WEB апликација, која омогућава генерисање наведених дијаграма за потребе визуализације резултата мерења. Добијени дијаграми првенствено су корисни члановима истраживачког тима. Могућност да заинтересовани корисници широм света приступе резултатима истраживања, путем Интернета, може значајно побољшати квалитет научно истраживачког рада у области KTUD методе. На тај начин се ствара пут непосредног и максимално брзог приступа експерименталним резултатима од стране широке истраживачке заједнице. Корисници који би се служили оваквим увидом у дијаграме резултата истраживања KTUD методе, могу бити колеге истраживачи, партнерски универзитети и истраживачки институти и многи други. Ово су само поједини примери где се развијена софтверска подршка може користити.

3.2.1 Релациона база података за KTUD

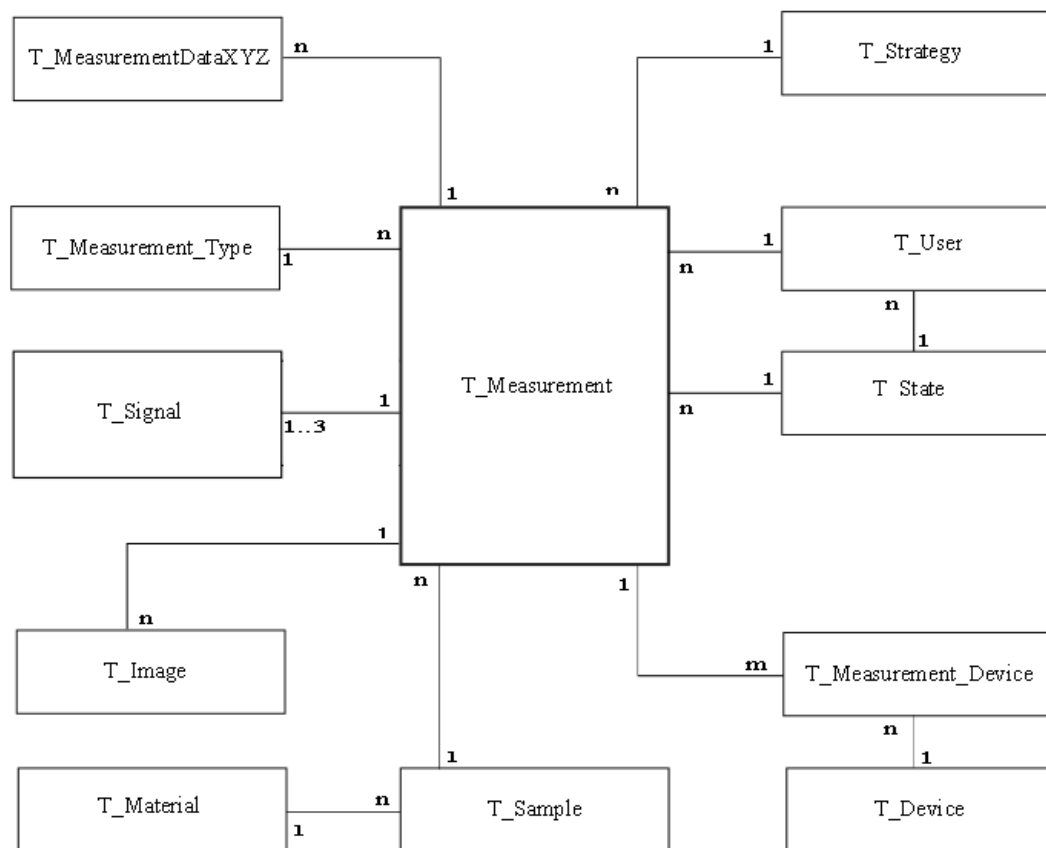
Релациона база података [Jin12], [Dav12], на којој се базира софтверска подршка за квадрофонску трансмисиону ултразвучну дефектоскопију (DBKTUD) пројектована је за оптимално памћење свих релевантних података добијених током мерења која спроводе поменутом методом.



Слика 3.26 Дијаграм базе података DBKTUD.

Садржај ове базе података је потребан за генерисање свих дијаграма за потребе визуелизације резултата мерења добијених КТУД методом. Могућност визуелизације резултата мерења посебно је значајна код примене KTUD методе у научно – истраживачке сврхе. База података DBKTUD се састоји из неколико делова:

- главни део базе служи за памћење података о појединачним мерењима, памћење тек добијених података мерења, као и вођење евиденције о типовима и стратегијама мерења и врсти коришћеног сигнала;
- у другом делу базе памте се подаци о мерним узорцима и карактеристикама материјала;
- у помоћним табелама се памте подаци које се односе на мерну опрему и фотографске снимке;
- табела са корисничким подацима употпуњује скуп табела базе података DBKTUD.



Слика 3.27 Кардиналности базе података DBKTUD.

За разумевање могућности базе података DBKTUD и самим тим и одговарајуће софтверске подршке неопходно је упознати се детаљније са структуром базе. На слици 3.26 је дат релациони приказ дијаграма базе података DBKTUD.

На слици 3.27. приказана је дефинисаност кардиналности базе података DBKTUD. Програмски SQL код, (SQL create script), дат је у прилогу на крају рада.

Табела T_Measurement

Табела T_Measurement има централну позицију унутар базе података DBKTUD, а такође заузима и централну позицију унутар споменуте прве групе табела које служе за памћење података о појединачним мерењима, сирових података мерења, типове и стратегије мерења и врсте коришћених сигнала за мерење. Њена намена је да памти податке о мерењима у смислу појединачних поступака мерења. У конкретном случају, спроводи се поступак мерења за одређени узорак материјала, кроз серију одговарајућих мерења чији се резултати записују у мерном протоколу. Сходно томе табела се састоји од одговарајућих атрибута. ID_Measurement је примарни кључ типа bigint, а генерисање овог идентификатора се остварује помоћу наредбе IDENTITY, која ствара нумеричке вредности које се инкрементирају за 1 (то је у овом случају задата вредност корака инкрементовања), почев од 100, па се лако могу читати. Следи атрибут Name_Measurement за уписивање имена мерења. Име се може доделити по жељи. Тип је nvarchar. Овај атрибут обавезно мора да има садржај, па је дефинисан constraint са NOT NULL. На пример, име: “Merenje_20110818_AlSi12_P₁_45kHz” би било име мерења које би одговарало мерној серији урађеној 18. августа 2011. године, над узорком материјала Фраунхофер Института AlSi12, мерено ултразвучном главом P₁ под фреквенцијом побуде одашиљача S₁, која има вредност 45 kHz.

Трећи атрибут – Name_ImportFile представља назив датотеке мерног протокола, а типа је nvarchar и такође мора да има садржај, па је и овде дефинисан constraint са NOT NULL. Четврти атрибут – Comment_Measurement, типа nvarchar, је опционалан (constraint атрибута NULL). Он представља кориснички коментар поступка мерења и дужине је максимално 400 знакова. Наредни атрибути – X_Axis_Label и X_Axis_Unit одређују појединости за цртање x-осе дијаграма. Тако се са X_Axis_Label дефинише какав ће назив имати x-оса, а X_Axis_Unit садржи информацију о којој се јединици мере ради. На пример да ли се ради о секундама, волтима или некој другој физичкој мерној јединици. То је потребно из разлога што је ова база података намењена за памћене података различитих врста мерења. За y-осу је предвиђена група атрибута који садрже податке о мерној јединици, називу осе и врсти сигнала побуде. То је најпре атрибут Y_Axis_Unit аналогно атрибуту X_Axis_Unit x-осе.

Специфичност атрибута за у-осу је то што постоје три атрибута за назив у-осе: Y1_Axis_Label, Y2_Axis_Label и Y3_Axis_Label. Разлог је повезаност табеле T_Measurement са табелом T_MeasurementDataXYZ и то што мерни протокол може одједном да прими мерне вредности за три врсте сигнала: синусне, правоугаоне и троугаоне. Због тога је потребна да постоји могућност дефинисања назива осе у свакој варијанти. Атрибути Y1_Axis_ID_Signal, Y2_Axis_ID_Signal и Y3_Axis_ID_Signal постоје само за у-осу и садрже податке о томе које врсте је сигнал којим се побуђује одашиљач ултразвучног сигнала S_1 . Ова три атрибута су страни кључеви табеле T_Signal, која ће бити објашњена у даљем тексту.

Кључеви су типа bigint, јер је примарни кључ табеле T_Signal тог типа. Атрибути Z_Axis_Unit и Z_Axis_Label служе аналогно опису за х-осу. Сви атрибути за "..._Unit" и "..._Unit" су типа nvarchar, а сви атрибути који служе опису оса су опционални (constraint атрибута NULL): одговорност за њихово испуњавање или неиспуњавање носи бизнис логика апликације. Атрибут ID_Sample је страни кључ унутар табеле T_Measurement који даје исказ о томе над којим мерним узорком је урађено мерење. Типа је bigint, као и сви типови кључева унутар ове базе података, са изузетком типа примарног кључа табеле T_User, о којој ће још бити говора. Овај атрибут, ID_Sample мора да има садржај, па је дефинисан constraint са NOT NULL. Још један страни кључ је ID_Strategy, у коме са записује каква се варијанта поступака анализе сигнала планира са овим мерењем, потиче из табеле T_Strategy.

Из помоћне табеле T_Image потиче страни кључ ID_Image, којим се наводе појединости фотографије, у случају када се овакви снимци раде због документовања мерног поступка. Атрибут Measurement_CreateDate се креира аутоматски и садржи „печат” датума и времена када је унета инстанца у базу података. Тип податка је datetime, а као аутоматски генерисан атрибут има дефиницију NOT NULL. Како се назив овог правила не би препустио аутоматици сервера базе података која генерише нечитка имена, у SQL коду је за ову сврху експлицитно дефинисано име “df_T_Measurement_CreateDate”. Садржај атрибута ID_UserCreate говори о томе који је корисник био логован у апликацију када су се уносили подаци о конкретном мерењу. Овај атрибут није типа bigint, као што је примарни кључ ове табеле, већ је типа uniqueidentifier, као што је то уобичајено када се ради о идентификаторима корисника. Атрибут ID_State служи као тако звани “флер” (flag), да се означи да ли је инстанца валидна, или је можда маркирана као „canceled” или нешто слично. Овај атрибут је страни кључ и потиче из помоћне табеле T_State.

Последњи атрибут `ID_Measurement_Type` носи информацију да ли је врста изведеног мерења дводимензионалног или тродимензионалног типа (или још нешто друго). Тип податка је `bigint`, а због важности дефинисан је `constraint` са `NOT NULL`. У SQL коду, у дефиницији за креирање табеле `T_Measurement` (SQL `create script` која је одштампана на крају рада као додатак), види се како су примарном кључу и свим страним кључевима експлицитно додељена имена, из разлога како се давање ових назива не би препустило аутоматици сервера базе података. Кључеви су названи: `pk_T_Measurement`, `fk_T_Measurement_ID_Sample`, `fk_T_Measurement_ID_Strategy` и тако даље, а увек по правилу да прво слово означава да ли се ради о примарном („p за `primary`”) или страном кључу („f за `foreign`”). Томе следи име табеле у којој се врши дефиниција, а на крају се налази име атрибута ако се ради о страном кључу. Дефиницијама страних кључева се постиже референцијални интегритет унутар базе података `DBKTUD`.

Што се тиче нормализације табеле, извршене су провере по следећем редоследу: први услов прве нормалне форме је поступак да се групе података које су повезане, поставе унутар посебних табела. Закључак је да је то случај у табели `T_Measurement`. Други услов прве нормалне форме казује о атомским подацима атрибута табеле. Другим речима: свако поље сме да садржи само једну вредност атрибута. У овој табели су сви атрибути веома ревносно диференцирани, па је и овај услов испуњен. Трећи услов прве нормалне форме говори о потреби постојања примарног кључа, односно да сваки слог табеле може једнозначно да се идентификује помоћу једног примарног кључа. Кључ `ID_Measurement` постоји и испуњава услов, па се свеукупно може рећи да је у случају табеле `T_Measurement` нормализација у смислу прве нормалне форме испуњена. Испуњење друге нормалне форме захтева да су сви атрибути унутар табеле зависни од комплетног примарног кључа, а не само од једног дела примарног кључа. Пошто табела нема комплементаран (сложен) кључ, овај услов је аутоматски испуњен. Осим тога, ревносна провера друге нормалне форме говори о томе да су сви атрибути унутар табеле „потпуно и једино” зависни од примарног кључа. Провера испуњења овог захтева се постиже провером сваког атрибута понаособ у релацији са примарним кључем. Тако је на пример име мерења `Name_Measurement` везано искључиво за примарни кључ, исто важи и за назив датотеке мерног протокола, за коментар такође итд. Оваква провера даје резултат да је друга нормална форма испуњена. Анализом треће нормалне форме се поставља питање да ли се унутар дате табеле евентуално

налазе неки атрибути који нису зависни директно од примарног кључа, већ од неког другог атрибута унутар табеле.

Тако се на пример може проверити да ли је врста мерног узорка ID_Sample можа зависна од стратегије мерења ID_Strategy. Ако би то био случај, трећа нормална форма не би била испуњена. Међутим, врста узорка није предмет варијанти стратегија мерења, па овде нема зависности. Такође и прецизне провере свих осталих атрибута у разним комбинацијама односа појединачног атрибута у односу на све остале релевантне атрибуте (што захтева пуно времена и размишљања), резултирају закључком, да је у случају табеле T_Measurement трећа нормална форма испуњена. Након анализе испуњена три степена нормализације, следи коментар кардиналности. Веома је важан поглед кардиналних односа табеле T_Measurement као језгра групе табела које служе за конкретне податке о појединачним мерењима, масовне податке мерења, типове и стратегије мерења, у односу на табеле T_MeasurementDataXYZ, T_Measurement_Type и T_Strategy.

Однос кардиналности табеле T_Measurement у односу на T_MeasurementDataXYZ је 1:n, јер ће једном једином мерењу у смислу табеле одговарати на стотине инстанци унутар табеле T_MeasurementDataXYZ. Једна инстанца унутар табеле T_Strategy се потенцијално појављује као употребљена стратегија унутар бројних могућих мерења, па кардиналност гледано са стране табеле T_Measurement, износи n, а кардиналност на страни табеле T_Strategy износи 1. За табелу T_Measurement_Type такође важи 1:n.

Табела T_MeasurementXYZ

Табела T_MeasurementXYZ је табела са најважнијом везом са табелом T_Measurement јер садржи масовне податке мерења. На примеру за већ споменуто мерење са називом: "Merenje_20110818_AlSi12_P1_45kHz", ова табела садржи као страни кључ IDENTITY вредност примарног кључа табеле T_Measurement. Овај атрибут, ID_Measurement, заједно са атрибутом Measurement_Counter, представља комплементаран примарни кључ табеле T_MeasurementXYZ. Атрибут Measurement_Counter је бројач кога генерише бизнис логика апликације. У комбинацији су ова два атрибута једнозначна и испуњавају критеријуме примарног кључа. У случају наведеног примера мерења, цео скуп мерних слогова износи ред величине од стотину.

Сваки слог унутар табеле T_MeasurementXYZ, поред два дела примарног кључа, најпре садржи вредност притиска на пријемну ултразвучну главу, што се складишти у атрибуту X_Axis_Value. Овај атрибут мора да има садржај, па је дефинисан constraint са

NOT NULL. За информације које ће се приказивати на y -оси, следе три атрибута са сличним именима: `Y1_Axis_Value`, `Y2_Axis_Value` и `Y3_Axis_Value`. Сва три такође типа `int`. Ови атрибути ће примити вредности амплитуде измереног напона кога је регистровала одговарајућа пријемна ултразвучна глава. При томе, атрибут `Y1_Axis_Value` је надлежан за вредности напона који је, под датим притиском, генерисала пријемна глава, у варијанти, када је напон побуде одашиљача S_1 имао сигнални облик синусоиде.

Када је напон побуде имао правоугаони облик, онда се вредност примљене амплитуде складишти под атрибутом `Y2_Axis_Value`. Аналогно томе, атрибут `Y3_Axis_Value` одговара напону који ће се представити на y -оси онда када је тип сигнала побуде био троугаони. Сва три “ Y -атрибута” имају `constraint NULL`, јер је контрола над пуњењем података y -осе у рукама бизнис логике. У смислу спречавања редунданције података, дефинитивна информација о томе који тип електричног сигнала којим се побуђује одашиљач ултразвучног сигнала S_1 , одговара појединачном „ Y -атрибуту” ове табеле, садржан је унутар групе `Y..._Axis_ID_Signal` атрибута унутар табеле `T_Measurement`, а не унутар ове табеле. Специфичност правила пуњења „ Y -атрибута” ове табеле је и та, што у случају мерења која се изводе са само једном врстом типа сигнала побуде, колоне атрибута `Y2_Axis_Value` и `Y3_Axis_Value` остају празни, а пуни се једино колона испод атрибута `Y1_Axis_Value`. Бизнис логика је та која ће на основу информација из табеле `T_Measurement` и табеле `T_Measurement_Type` да сазна из којих колона табеле `T_MeasurementXYZ` да исчитава вредности за цртање дијаграма мерења, а ово знање није садржано у табели `T_MeasurementXYZ`, што се има захвалити испуњеним правилима нормализације унутар базе података `DBKTUD`. Последњи атрибут ове табеле носи назив `Z_Axis_Value`, такође је типа `int (constraint NULL)`, а у наведеном примеру мерења одговара вредности напона којим се погони одашиљач S_1 .

Провере нормализације ове табеле: први услов прве нормалне форме да се групе података које су повезане поставе унутар посебних табела је овде испуњена. Закључак је да је то у табели `T_Measurement` случај. Друга одлука прве нормалне форме ја такође у реду, јер свако поље садржи само једну вредност атрибута. Услов за испуњење треће одлуке прве нормалне форме у смислу дефиниције примарног кључа је такође испуњен. Друга нормална форма је испуњена, јер су сви атрибути унутар табеле зависни од комплетног примарног кључа: он се састоји само од једног дела. Анализа треће нормалне форме даје резултат да се унутар табеле `T_MeasurementXYZ` не налазе никакви атрибути који нису зависни директно од примарног кључа, већ од неког другог

атрибута унутар табеле, па је трећа нормална форма испуњена. Однос кардиналности табеле T_Measurement у односу на T_MeasurementDataXYZ је 1 : n. Као што је објашњено у опису табеле T_Measurement.

Табела T_Measurement_Type

Табела T_Measurement_Type је табела која је повезана са табелом T_Measurement и садржи податке о томе, ког су типа мерења. Један тип мерења у овом смислу је такозвано „тродимензионално мерење”, као што је учињено на примеру мерења “Merenje_20110818_AlSi12_P1_45kHz”, где је изведено мерење вредности притиска на пријемну ултразвучну главу као прва димензија (x-оса), те мерења вредности напона мерне главе у три варијанте сигналног облика напона побуде одашиљача S_1 : синусоиде, правоугаоног сигнала и троугаоног сигнала (y-оса), а синхроно је протоколисана висина напона побуде одашиљача S_1 (z-оса). Други типичан тип мерења је „дводимензионално мерење”, када се на пример протоколише запремина симулираног дефекта по x-оси и напон кога региструје пријемна ултразвучна глава по y-оси. Тако се може наставити са дефинисањем разних типова мерења, а табела T_Measurement ће адекватне описе користити за сваки свој слог, без да се тип мерења мора објашњавати сваки пут изнова. Софверска апликација ће ове информације користити приликом генерисања мерних дијаграма. Атрибут ID_Measurement_Type је примарни кључ типа bigint, а генерисање идентификатора се као и код табеле T_Measurement остварује помоћу наредбе IDENTITY, која ствара нумеричке вредности које расту за задато одстојање од по 1. Следи атрибут за опис типа мерења које мора имати садржај, па је дефинисан constraint са NOT NULL. На пример “Тродимензионално мерење”. Последњи атрибут: Measurement_CreateDate се и у овој табели креира аутоматски и садржи „печат” датума и времена када је унета инстанца у базу података. Типа податка је datetime, а као аутоматско генерисан атрибут има дефиницију NOT NULL. За овај constraint је експлицитно дефинисано име “df_T_Type_CreateDate”.

У смислу нормализације ове табеле: Прва одлука прве нормалне форма је овде испуњена. Друга одлука прве нормалне форме је такође испуњена: свако поље садржи само једну вредност атрибута. Испуњење треће одлуке прве нормалне форме у смислу дефиниције примарног кључа је такође постигнуто. Сви атрибути унутар табеле су зависни од комплетног примарног кључа, па је друга нормална форма испуњена. Пошто нема никаквих атрибута који нису зависни директно од примарног кључа, већ

од неког другог атрибута унутар табеле и трећа нормална форма је испуњена. Однос кардиналности табеле T_Measurement_Type у односу на T_Measurement је 1:n.

Табела T_Strategy

Глава три овог рада, унутар које се објашњава KTUD метода, прецизира разне стратегије анализе сигнала у смислу разних варијанти поступака анализе са одговарајућим концептима математичких модела. Ово је тема табеле T_Measurement_Strategy, која је такође повезана са табелом T_Measurement. Примарни кључ носи име ID_Strategy и типа је bigint, генерише се помоћу IDENTITY и он је као увек NOT NULL. Атрибут Name_Strategy садржи име стратегије (NOT NULL) типа је nvarchar, а помоћу следећег атрибута Comment_Strategy омогућен је опционалан опис (constraint NULL). И код ове табеле последњи атрибут: Strategy_CreateDate садржи „печат” датума и времена, када је унет појединачан слог. Нормализација је испуњена аналогно испуњењу одлука нормалних форми претходно описане табеле T_Measurement_Type. Однос кардиналности табеле T_Strategy и T_Measurement је такође 1:n.

Табела T_Signal

Ова табела служи складиштењу информација о врстама сигнала, као што су синусни, правоугаони, троугаони. Примарни кључ носи име ID_Signal и типа је bigint, генерише се помоћу IDENTITY, NOT NULL, почев од броја 1, са порастом од 1. Атрибут Name_Signal садржи назив облика сигнала (NOT NULL), типа је nvarchar, а атрибут Comment_Signal служи за опционалан опис (constraint NULL). И код ове табеле последњи атрибут: Signal_CreateDate садржи „печат” датума и времена. Нормализација је испуњена аналогно испуњењу одлука нормалних форми претходно описане табеле T_Strategy. Однос кардиналности табеле T_Strategy у односу на T_Measurement је 1:n. Овим описом табеле завршава се опис групе табела које служе за конкретне податке о појединачним мерењима, масовне податке мерења, те типове и стратегије мерења и врсту употребљеног сигнала.

Табела T_Sample

Табела T_Sample је главна табела области базе података DBKTUD која служи да складишти податке о мерним узорцима и карактеристикама материјала. Њена намена је да складишти податке о мерним узорцима.

Сваки поступак мерења се изводи са посебним узорком материјала над којим се врши серија мерења које се записују у мерном протоколу. Ова табела је саздана најпре

од атрибута `ID_Sample` који је примарни кључ типа `bigint`, а генерисање идентификатора се остварује помоћу наредбе `IDENTITY`, која ствара нумеричке вредности које расту, почевши од броја 5001 за задато одстојање од по 1, па се лако могу читати и лако се разликују од вредности осталих идентификатора. У SQL коду, унутар дефиниције за креирање табеле `T_Sample`, одштампаног на крају рада као додатак, види се као је овом примарном кључу додељено експлицитно име „`pk_T_Sample`”. Следи атрибут `Name_Sample` за име узорка које додељује како је примерено. Типа је `nvarchar`. Овај атрибут мора да има садржај, па је дефинисан `constraint` са `NOT NULL`. На пример, име: “`AlSi12`” је име узорка које се односи на главни мерни узорак овога рада који је на Фраунхофер Институту у Немачкој директно ласерски синтерован поступком „`DLSM`”. Трећи атрибут: `Comment_Sample`, типа `nvarchar`, може да прими опционалан (`constraint` атрибута `NULL`) кориснички коментар узорка до максимално 400 знакова. Наредни атрибути: `ID_Material` је страни кључ унутар табеле `T_Sample`. Типа је `bigint`, као и сви типови кључева унутар ове базе података, са изузетком типа примарног кључа табеле `T_User`. Овај атрибут, `ID_Material` мора да има садржај, па је дефинисан `constraint` са `NOT NULL`. Пети атрибут табеле `T_Sample` је `Unit_Sample`, типа `nvarchar` и садржи јединицу мере дужине која је дефинисана за групу атрибута који следе. Наредна група атрибута: `Length_Sample`, `Width_Sample`, `Height_Sample`, `Cal1_Sample`, `Cal1Boring_Sample`, `Cal2_Sample` и `Cal2Boring_Sample`, сви типа `int`, садрже механичке вредности узорка и то његове дужине, ширине, висине и вредности пресека бушотина уграђених дефеката. Тринаести атрибут `ID_Image` је страни кључ унутар табеле `T_Sample`, типа `bigint` и везује евентуално направљену фотографију узорка.

Атрибут `Sample_CreateDate` се креира аутоматски и садржи „печат” датума и времена, када је унета инстанца у базу података. Тип податка је `datetime`, а као аутоматско генерисан атрибут има дефиницију `NOT NULL`. Како се назив овог правила не би препустио аутоматици сервера базе података, у SQL коду је и у овом случају експлицитно дефинисано име које овде гласи “`df_T_Sample_Sample_CreateDate`”. Садржај последњег атрибута ове табеле, атрибута `ID_State` служи као “флег” („`flag`”) да се означи да ли је ова инстанца валидна или је означена као неважећа или нешто друго. Овај атрибут је страни кључ и потиче из помоћне табеле `T_State`.

Однос кардиналности табеле `T_Sample` у односу на `T_Measurement` је 1:n, јер ће читавом низу мерења унутар табеле `T_Measurement` одговарати једна те иста инстанца унутар табеле `T_Sample`. Тачно узев, за сврхе мерења чији се резултати приказују у овом раду, табела `T_Sample` садржи само две инстанце, за узорак `AlSi12` и за упоредни

узорак AlMg3, док табела T_Measurement садржи повећи број инстанци разних мерења, а свако мерење референцира или први узорак, AlSi12 или други узорак, AlMg3.

Табела T_Material

Табела T_Material је друга табела области базе података DBKTUD, која служи да складишти податке о мерним узорцима и карактеристикама материјала. Њена намена је да складишти податке о материјалу мерног узорка.

Подељеност података на табеле T_Sample и T_Material је и те како оправдана и ако се то у ситуацији извожења мерења овог рада можда не види на први поглед. Иако је прва инстанца унутар табеле T_Sample везана за прву инстанцу табеле T_Material, где се ради о узорку AlSi12 и опису материјала AlSi12, а друга инстанца унутар табеле T_Sample везана за другу инстанцу табеле T_Material, где се ради о узорку AlMg3 и опису материјала AlMg3, то у општем случају не мора да буде тако. Наиме, када се раде истраживања у још већем обиму, онда постоји знатно већи број узорака. Тада унутар свеукупног скупа узорака, по правилу постоји бар један подскуп механичко гледано различитих узорака, а који су израђени од једне те исте врсте материјала. Највероватније постоји чак неколико подскупова узорака од једне те исте врсте материјала. Тиме би уношење атрибута о врсти и карактеристикама материјала у табели T_Sample повредило правила нормализације. Ова табела T_Material најпре садржи атрибут ID_Material који је примарни кључ типа bigint, а генерисање идентификатора остварује помоћу наредбе IDENTITY, за вредности које расту почевши од броја 3001 за одстојање од по 1, како би се лакше разликовали од вредности осталих идентификатора. У SQL коду, унутар дефиниције за креирање табеле T_Material, овом примарном кључу додељено је експлицитно име „pk_T_Material”. Трећи атрибут, Comment_Material, за назив материјала. Типа је nvarchar и мора да има садржај (NOT NULL). Атрибут Characteristics_Material је такође типа nvarchar, може да прими опционалан текст о карактеристикама материјала до максимално 400 знакова. Пети атрибут ове табеле: ID_Image је страни кључ унутар табеле T_Sample, типа bigint и везује евентуално направљену фотографију неке маркантне површине материјала. Атрибут Material_CreateDate се и овде креира аутоматски и садржи „печат” датума и времена, када је унета инстанца у базу података. Тип податка је datetime, аутоматски је генерисан и има дефиницију NOT NULL, чије је име constrainta “df_T_Material_CreateDate”. Последњи атрибут ове табеле, ID_State, означава евентуално потребно стање. Однос кардиналности табеле T_Material у односу на T_Sample је 1 : n, јер ће, као што је већ објашњено, читав низ узорака унутар табеле

T_Sample потенцијално одговарати једној те истој инстанци унутар табеле T_Материјал. Описом табеле T_Material завршен је опис области базе података DBKTUD, која служи за складиштење података о мерним узорцима и карактеристикама материјала.

Табела T_Device

Табела T_Device је табела из скупа помоћних табела, које се тичу мерне опреме, фотографских документационих снимака, корисничких података и стања. Намена у вези ње је да складишти податке о појединачном мерном уређају.

Примарни кључ јој је атрибут ID_Device, генерисан помоћу IDENTITY, за вредности које расту почевши од броја 4001 за одстојање од по 1, за лакше разликовање од осталих вредности идентификатора. Овом примарном кључу је додељено експлицитно име „pk_T_Device”. Други атрибут, Name_Device, служи за назив материјала. Типа је nvarchar и мора да има садржај (NOT NULL). Атрибут Comment_Device је типа nvarchar и служи да може да прими опционалан коментар о мерном уређају, до максимално 400 знакова. Четврти атрибут Characteristics_Device је типа nvarchar и може да прими опционалан текст о карактеристикама уређаја, такође до 400 знакова. Пети атрибут ове табеле је ID_Image, као идентификатор евентуалне фотографије уређаја. Атрибут Material_CreateDate је „печат” датума и времена, чије је име constrainta “df_T_Device_CreateDate”. Последњи атрибут и ове табеле је познати атрибут ID_State. Однос кардиналности табеле T_Device у односу на T_Measurement је m : n, јер разне инстанце из табеле T_Measurement користе, од случаја до случаја, разне инстанце из табеле T_Device. За реализацију m:n везе, програмирана је табела T_Measurement_Device.

Табела T_Measurement_Device

T_Measurement_Device је друга табела из скупа помоћних табела које се тичу мерне опреме, фотографских документационих снимака, корисничких података и стања. Њена намена је да оствари m:n везу између T_Measurement и табеле T_Device. Ова табела има комплементаран примарни кључ који се састоји од два дела: атрибута ID_Measurement и атрибута ID_Device, оба типа bigint. Атрибут Material_CreateDate као „печат” датума и времена чије је име constrainta “df_T_Measurement_Device_CreateDate”.

Табела T_State

Примарни кључ ове помоћне табеле, ID_State је типа bigint и генерише се помоћу IDENTITY, NOT NULL, почев од броја један кораком од 1. Атрибут Name_State садржи назив стања (NOT NULL), типа је nvarchar. Оваква стања обично имају вредности 1 или 0, а могу имати и друге вредности. Оваква стања унутар разних инстанци продуктивних релационих база података имају карактер “флег-а” и служе да опишу стање, као што је стање валидности или стање “canceled”, или неко сасвим друго посебно стање. То може бити “hidden”, или “excluded”. Искуство о примерености имплементације оваквих вредности долази из дугогодишњег обимног рада са продуктивним базама података, када се појављују најразличитији сценарији потребе да се разне инстанце додатно окарактеришу да се са таквим једним “флег”-ом омогући њихов сасвим специјалан третман у прорачуну, приказу, сортирању итд. Атрибут Comment_State је стандардан атрибут служи за опционалан опис (constraint NULL) који је нарочито у оваквом случају веома користан да на правом месту опише, о каквој ознаци се у датом случају ради. Последњи атрибут: Signal_CreateDate садржи „печат” датума и времена.

Однос кардиналности табеле T_State са мноштвом других, претходно описаних табела, је увек 1:n, при чему потенцијално велики број инстанци других табела, референцира само неколико појединачних инстанци табеле T_State. Оваква табела, у почетку коришћења базе података, обично има само две вредности, 0 и 1, а обично тек касније, у току продуктивног рада и током читавог низа година, долази до уношења неколико додатних инстанци.

Табела T_Image

Ова табела служи да складишти податке о фотографијама или другом електронско графичком материјалу, за сврхе разних табела унутар базе података DBKTUD.

Њен примарни кључ је назван ID_Image, типа је bigint и генерише се помоћу IDENTITY, NOT NULL, почев од броја 7001 са порастом од 1. Други атрибут, Name_Image (NOT NULL), садржи назив „слике”, типа је nvarchar, а у овом специјалном случају треба да послужи за уписивање не само имена електронског фајла, већ и трага “path”, на рачунару, где је изведено физичко складиштење датотеке. Трећи атрибут, Comment_Image садржи додатни опис. Атрибут Image_CreateDate садржи „печат” датума и времена. Однос кардиналности табеле T_Image са табелом T_Measurement је 1:n.

Табела T_User

Описом табеле T_User завршава се опис последње, треће области табела релационе базе података DBKTUD. Ову трећу област табела, као што је већ речено, сачињавају табеле које се тичу мерне опреме, фотографских документационих снимака, корисничких података и стања. Намена јој је да складишти податке о корисницима софтверске апликације, а смисао тога у продуктивном погону оваквих апликација, је пре свега регулисање права приступа софтверској апликацији. Овакав „security feature” омогућава да део потенцијалних корисника који на неки начин дођу до „линк”-а апликације, најпре уопште не могу да се „улогују”, све док администратор експлицитно не унесе појединачне кориснике у базу података, конкретно у ову табелу. Друга намена ове табеле је та да се специјално унутар табеле T_Measurement запише који је корисник био надлежан за складиштење података о појединачном мерењу. Једно могуће проширење ове табеле, као и могуће проширење бизнис логике апликације, би било то да се уведу диференцирани нивои права приступа, па да појединачне групе корисника могу да виде и користе веће или мање делове функционалности апликације. Примарни кључ табеле T_User је атрибут ID_User, типа uniqueidentifier, што стоји за UUID односно за “Universally Unique Identifier”. Ради се о стандарду који је створио гремијум “Open Software Foundation” OSF. Намера иза тога је постизање могућности означавања у оквиру подељених структура, без да је за то потребна нека централна координација. Сходно том стандарду који је документован у оквиру ISO/IEC 11578:1996 “Information technology – Open Systems Interconnection – Remote Procedure Call (RPC)” и као посебни стандард ISO/IEC 9834-8:2005, UUID је ознака која се састоји од 16 бајта, подељено у пет група. Пример: F7F67514-9B08-4922-B72E-A091451BE43. И ако једнозначност такве ознаке није гарантована, свеукупан могући број кључева је толико велики да вероватноћа генерисања два иста кључа практично конвергира ка нули.

Следи група атрибута: NameFamily_User, NameFirst_User, LoginName_User, Email_User и Password_User, који чине уобичајане атрибуте за овакве ситуације. Атрибут Comment_User, типа nvarchar, служи за опционалне коментаре о кориснику. Четврти атрибут Characteristics_Device је типа nvarchar и може да прими опционалан текст о карактеристикама уређаја, такође до 400 знакова. Атрибут Material_CreateDate је уобичајени „печат” датума и времена, чије је име constrainta “df_T_User_CreateDate”. Последњи атрибут и ове табеле је атрибут ID_State. Однос кардиналности табеле T_User у односу на T_Measurement је 1:n, јер разне инстанце из табеле T_Measurement потенцијално користе, од случаја до случаја, инстанцу једног те истог корисника из табеле T_User.

3.2.2 WEB апликација

WEB апликација која се приказује у овом раду специјално је развијена да омогући генерисање дијаграма за потребе визуализације резултата мерења која су изведена у оквиру примене KTUD методе, и омогућавање потенцијалним удаљеним корисницима да путем Интернета добију могућност увида у дијаграме који су резултат коришћења KTUD методе. Ова могућност има посебан значај када се KTUD метода користи у научно – истраживачке сврхе. У функционалном смислу апликација омогућава приказ дводимензионалних и тродимензионалних дијаграма мерења, а осим тога и упоређења појединих дводимензионалних дијаграма. На слици 3.28. је приказан изглед основног прозора разматране WEB апликације.

АПЛИКАЦИЈА ЗА ПРИКАЗ ДИЈАГРАМА
КВАДРОФОНСКЕ ТРАНСМИСИОНЕ УЛТРАЗВУЧНЕ ДЕФЕКТОСКОПИЈЕ
У ПРИМЕНИ НА ДИРЕКТНО ЛАСЕРСКИ СИНТЕРОВАНИМ
МАТЕРИЈАЛИМА

2D дијаграми	Изаберите основно мерење: -изаберите основно мерење-
3D дијаграми	Изаберите врсту сигнала: -изаберите врсту сигнала-
Поређење 2D дијаграма	Цртање дијаграма
2D приказ сигналних облика	

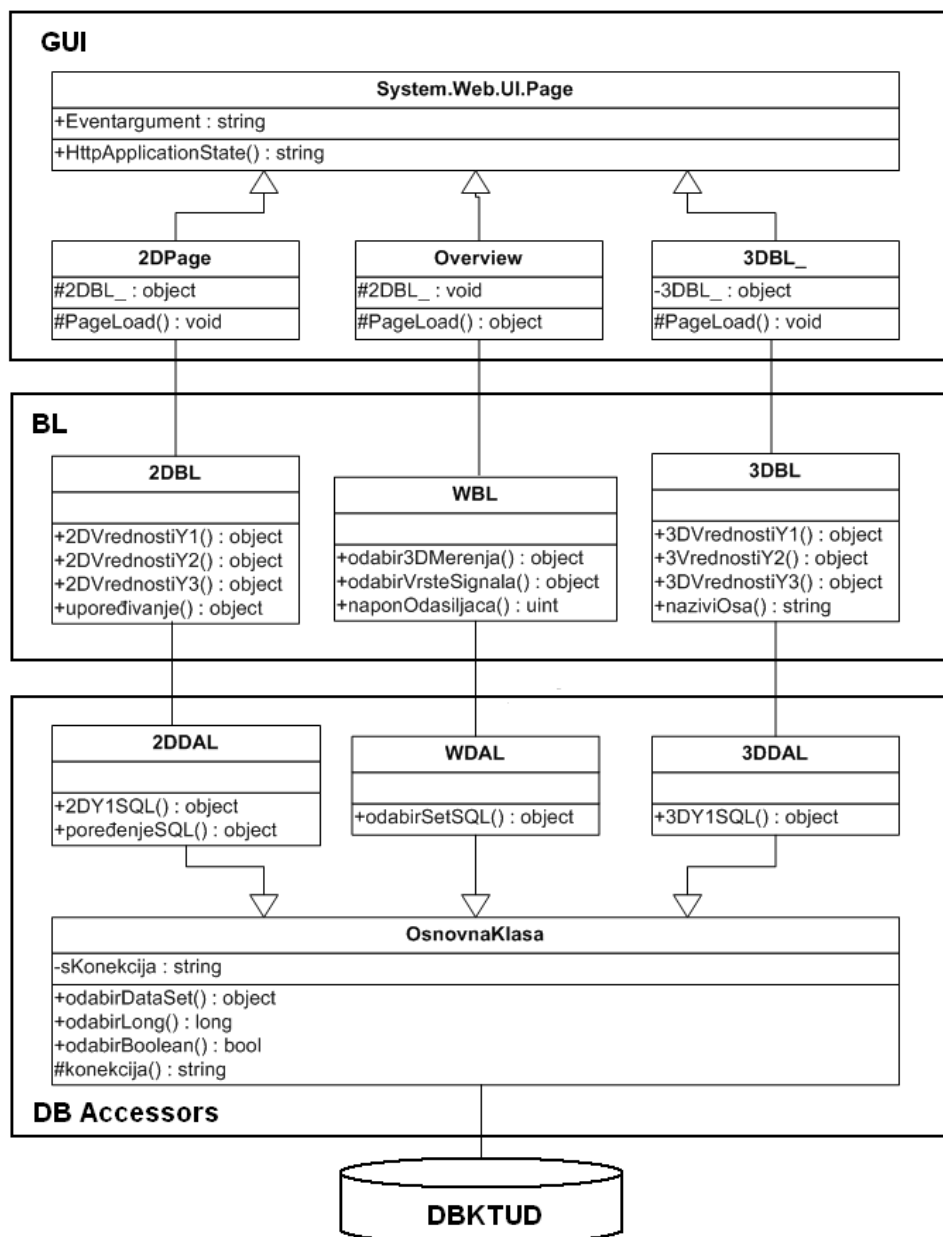
УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА ЧАЧАК

Слика 3.28 Приказ основног прозора WEB апликације за приказ мерних дијаграма у оквиру KTUD методе.

Дијаграми генерисани у оквиру ове апликације приказани су у четвртој глави овог рада. Они се рендерују на основу великог броја података који су резултати мерења која су унета у базу података DBKTUD, а која је описана у претходном поглављу. Категорије могућих дијаграма су сходно експерименталном концепту овог рада: „Резултати и анализа резултата мерења на узорку AlSi12 без дефекта”, „Резултати и анализа резултата мерења на узорку AlSi12 са дефектом”, „Резултати и анализа резултата мерења на узорку AlMg3 без дефекта” и „Резултати и анализа резултата мерења на узорку AlMg3 са дефектом”, а за сваку од ове четири наведене категорије се у датом контексту на корисничкој површини може изабрати врста сигналног облика и

вредност сигнала побуде. У складу са тим на слици 3.29. је приказана UML структура софтверске архитектуре апликације за приказ мерних података у оквиру KTUD методе.

Након избора корисника, притиском на линк „Цртање дијаграма”, генерише се дијаграм у .pdf формату. Софтверске развојне технолошке платформе на којима је заснована ова апликација су оперативни систем Microsoft Windows XP Professional SP 3 Version 9, програмерско развојно окружење Microsoft Visual Studio Team System 2008, програмски језик: C# .NET Framework 3.5 [She06], а платформа претходно описане базе података је Microsoft SQL Server 2008 R2 Version 10 са Microsoft SQL Server Management Studio. Интернет претраживач је Microsoft Internet Explorer 8.0.



Слика 3.29 UML дијаграм софтверске архитектуре апликације за KTUD методу.

Ова апликације се заснива на принципу структурирања у облику вишеслојне архитектуре слојева са јаком програмском кохезијом [Far08] у смислу архитектуре хоризонталних слојева и вертикалних специјализованих модула, као што је то приказано на слици 3.29. Предност овакве архитектуре је знатно побољшање степена прегледности, што је од изузетно великог значаја код великог обима софтверских апликација. Осим тога, након извршене измене унутар једног слоја, лакше је могуће поуздано мењати и тестирати програм, а специјализованост имплементисања функционалности за извођење прецизно дефинисаних појединачних задатка, доводи до високог степена перформантности целокупне апликације. Горњи слој, у смислу хоризонталне поделе функционалности означен је са “GUI” (Graphical User Interface), који се такође назива и “Presentation tier” или „Presentation layer”, осим задатака графичког приказа, служи и за интеракцију са корисницима, пре свега за избор варијанти дијаграма који треба да се прикажу.

Следећи слој хоризонталне поделе је означен са BL, што стоји за “Business layer”, а задаци су имплементирање примена математичких алгоритама или неки други поступци уградње логике, валидације или слично. Доњи од три хоризонтална слоја је слој “DB Accessors”, који је специјализован за приступ бази података. То је слој унутар кога се говори не само програмским језиком C#, већ и са програмским језиком база података SQL. Овај слој приступа релационој бази податка DBKTUD. Приликом реализације пројекта софтверске архитектуре ове апликације, након извршене поделе функционалности на хоризонталне слојеве, додатно је изведена вертикална подела слојева на појединачне модуле (одн. компоненте), од којих сваки има свој, још у већој мери специјализован задатак. У вези са оваквим поступком се у информатици користи појам „јака кохезија”. Приказана детаљнија архитектура на хоризонталном нивоу GUI садржи следећа три модула: “2DPage”, “Overview” и “3DBL”. Слика 3.29 је изведена помоћу језика UML који осим приказа појединачних модула, пружа и додатне могућности. У овом случају је примењен дијаграм класа.

Тако се види да су модули “2DPage”, “Overview” и “3DBL” приказани симболима класа. Сваки од њих је имплементиран на основу истоимене програмске класе, која свака за себе садржи потребне функције, које се у жаргону објектно оријетисаног програмирања називају методе. Сва три модула се користе поступком наслеђивања (inheritance) тако што наслеђују потребну инфраструктуру приступа web-у, од стандардне класе за “System.Web.UI.Page”. Модул “2DPage” је намењен приказу дводимензионалних дијаграма, задатак модула “3DBL” је опхођење са

тродимензионалним дијаграмима, а модул “Overview” служи да омогући прегледе и избор опција приказа. Иначе, у контексту слоја GUI се налази фајл „web.config” који служи за потребе конфигурације GUI слоја без да је за потребе измене конфигурације потребно поновно компајлирање кода. Фајл „web.config” није класа, већ стандардни фајл WEB апликације, тако да није приказан унутар UML дијаграма слике 3.29. Архитектура на хоризонталном нивоу „BL” садржи три модула модула: “2DBL”, “WBL” и “3DBL”. Свака од ова три модула кореспондира са претходно наведеним модулима слоја GUI, при чему је сваки од њих предвиђен за имплементацију потребних алгоритама, логике и валидације. Детаљнија архитектура на слици 3.29, на хоризонталном нивоу “DB Accessors”, приказује модуле “2DDAL”, “WDAL” и “3DDAL”. Након што је UML дијаграм један дијаграм класа, види се да модули “2DDAL”, “WDAL” и “3DDAL”, приказани симболима класа, поступком наслеђивања (inheritance), користе потребну инфраструктуру приступа бази података од класе „OsnovnaKlasa”. Модул “2DDAL” је намењен селектирању податка за дводимензионалне дијаграме и имплементирању SQL-функционалности упоређивања 2D-дијаграма, задатак модула “3DDAL” је добављање података за тродимензионалне дијаграме, а модул “WDAL” служи да омогући селекцију избора опција приказа.

У прилогу рада приказани су делови софтверског кода разматране WEB апликације. Делови кода су класе “ModulPristupBazi_OsnovnaKlasa”, затим софтверски код класе “DAL_3D” модула специјализованог за тродимензионалне дијаграме са функцијама као што су одабир мерења, одабир мерења за упоређивање, одабир врста сигнала, одабир напона одашиљача, узимање вредности Y1, Y2 и Y3, узимање вредности за приказивање мерења итд.

Такође је приложен и програмски код горњег слоја који садржи функције за одабир мерења са адекватним функцијама површине апликације које реагују на селектоване промене које позивају модуле доњих слојева.

Мogućност приступа резултатима истраживања KTUD методе путем Интернета, за заинтересоване кориснике широм света реализована је на сајту www.ktud.rs.

4.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ МЕРЕЊА KTUD

У овом поглављу су приказани резултати експерименталног и аналитичког истраживања односно поступци мерења, која су изведена унутар истраживања са циљем доказивања тезе, да се применом фреквенција од само неколико десетина kHz помоћу KTUD методе може продрети кроз материјал, чије су карактеристике висока порозност и шупљикавост, а специјално кроз материјал који је синтерован методом директног ласерског синтеровања метала.

Централни део овог поглавља су резултати мерења који су остварени над узорком AlSi12 произведеног DLСM поступком, а након тога следи поглавље које се односи на мерења над стандардним индустријским узорком AlMg3.

За реализацију дефектоскопа заснованог на KTUD методи, потребно је проћи кроз читав низ конструкторских одлука. У том смислу је потребно испитати физичке феномене који се појављују у контексту ултразвучне трансмисије, а нарочито оне феномене, који су од примарног значаја за дефектоскопију помоћу дефектоскопа који се заснива на квадрофонској трансмисионој ултразвучној дефектоскопији KTUD. Изузетно је важно пронаћи начин за постизање оптималне ефикасности у смислу што јасније реакције мерног система на дефекте који се налазе унутар испитаног узорка. Осим тога, важно је постићи најбољу могућу поузданост и продорност KTUD методе, а истовремено спречити или минимирати изворе грешака мерења и решити питање калибрације система, а све то уз помоћ што јефтинијих компоненти.

Да би се остварила предност ниске цене KTUD дефектоскопа, потребно је искористити што више механичких, електронских и других компоненти које се на тржишту могу набавити по изузетно ниским ценама. Најчешћи разлог за ниску цену компоненти, је тај, што се оне употребљавају у неким можда сасвим другим облицима примене, у великом броју.

Пратећи такав принцип селекције компоненти, избор за ултразвучне главе пада на пиезокерамике који су у широкој употреби. Пиезокерамике које су употребљене за мерења која се приказују у овом раду, су PZT керамике од олово цирконијум титаната $PbZrTiO$, а које се користе у кавитационим коритима. Њихова резонантна фреквенција износи 45 kHz .

Да би се истражило под којим условима и са каквим конкретним механичким и електронским конструкционим решењима је могуће постићи најјаснију реакцију мерног система KTUD методе, на дефекте који се налазе унутар узорка који се испитује и како постићи најбољу могућу ефикасност, поузданост и продорност KTUD методе, значајан аспект представљају експериментална мерења и анализа феномена који стоје у релацији са интензитетом механичког притиска којим су подвргнуте пријемне ултразвучне главе.

Што се тиче ефикасности у смислу што јасније реакције система на евентуалне дефекте, као и што се тиче цене употребљених компоненти, циљ је постићи што веће пријемне амплитуде, које су у идеалном случају толико високе да их није потребно додатно појачавати пред улазак у аналогно дигитални конвертор. Избегавање додатног појачања сигнала пред улазак у A/D конвертор, има ефекат избегавања деформација које уноси појачивач, а побољшава се и свеукупан однос сигнала и шума и додатно се штеде трошкови појачивачке компоненте.

Једна од нестабилности, која у пракси има значајног удела у проблематици калибрације, је неједнакост амплитуда напона сигнала пријемних ултразвучних глава P_i условљена неуједначеним механичким притисцима на њих. Висина притиска на одашиљачку ултразвучну главу S_1 такође утиче на висину амплитуда пријемних сигнала, али ова околност није од примарног значаја у смислу калибрације дефектоскопа, због подједнаког утицаја на мерне резултате све четири пријемне мерне главе. Узорак својом тежином плус тежином притисака затега над пријемним главама, лежи на одашиљачкој глави, па је тиме имплицитно познат ред величине притиска над одашиљачком главом.

Експериментална истраживања се усмеравају на проналажење математичке функције зависности амплитуда напона сигнала пријемне ултразвучне главе од механичког притиска. У идеалном случају, проналази се опсег механичког притиска, унутар кога тај притисак може да варира, а да то не изазива знатне измене амплитуда напона унутар пријемних глава, што је једна од теза овог рада. Када се ова математичка функција пронађе, опруге унутар механизма пријемних ултразвучних глава могу се

димензионисати тако, да изазивају механички притисак који је увек у оптималном опсегу, а све то са малим улагањем у механичку прецизност.

Ако се у оквиру експерименталних истраживања покаже да нема таквог оптималног опсега, онда је неопходно извести конструкцију механизма пријемних ултразвучних глава уз избор опруга чије су толеранције толико мале да разлика механичких притисака које оне изазивају буду минималне. Овакво повећање прецизности конструкције као и знатно смањења толеранција механичких опруга, доводи до повећања трошкова компоненти KTUD дефектоскопа. Такво повећање је супротно тежњи у смислу постизања ефикасности уз остваривање ниске цене коштања KTUD дефектоскопа. Тиме се види од коликог је значаја истраживање утицаја механичког притиска на амплитуде напона сигнала пријемних ултразвучних глава.

За проналажење математичке функције зависности амплитуда напона сигнала пријемне ултразвучне главе од механичког притиска, постоји још једна додатна мотивација која утиче на развој дефектоскопа заснованог на KTUD методи. Наиме, ако се решење проблема калибрације не би остварило на неки од претходно описаних начина, онда би решења могла тј. морала да буду изведена тако, да се описана конструкција KTUD дефектоскопа прошири. То би се учинило тако, што би се у сваку пријемну ултразвучну главу додатно уградила по једна мерна јединица механичког притиска. Таква додатна мерна јединица би представљала модул који већ постоји као индустријски серијски производ, а његова цена набавке је релативно ниска. Излазни електрични сигнали ових мерних јединца би се додатно укључили у улазне информације микроконтролера KTUD дефектоскопа. На тај начин би било могуће да се измерене разлике притисака, математички компензују током спровођења калкулације у микроконтролеру.

У оквиру поступка истраживања, тј. серија мерења зависности амплитуда напона сигнала пријемне ултразвучне главе од механичког притиска, изведена су додатна истраживања која су овом приликом стојала на располагању. Она се односе на испитивање утицаја висине напона ултразвучног сигнала којом се напаја одашиљач S_1 на висину напонских амплитуда генерисаних од стране пријемних ултразвучних глава P_i , а осим тога је изведено и испитивање утицаја облика електричних сигнала којом се напаја одашиљач S_1 .

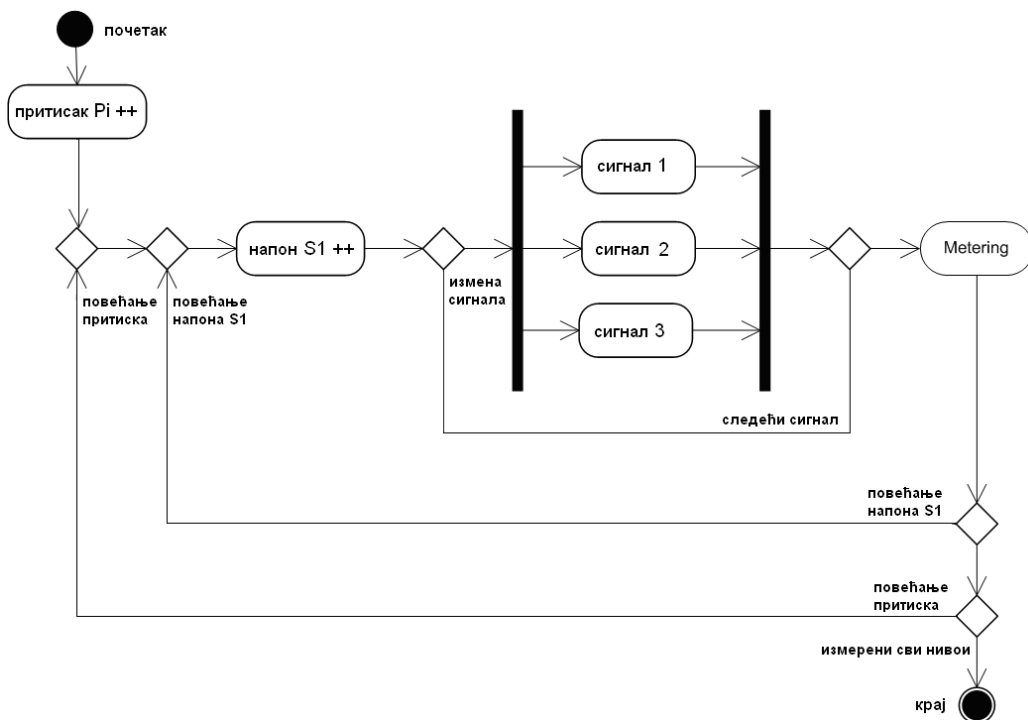
Сврха уношења додатних параметара у експериментални поступак, је упознавање ефеката који стоје у вези са варијацијама тих додатних параметара. При овом је мотивација, да се покуша проналажење опсега и врсте параметара који потпомажу

проналажењу што бољег система калибрације. У том смислу је коришћен сет напона, који без додатних улагања, у нормалном случају стоје на располагању од стране генератора функције, а то су напони од 6 V , 9 V , 15 V и $19,75\text{ V}$. До висине напона од $19,75\text{ V}$ се дошло тако, што је то био максималан излазни напон овде примењеног генератора функције. Такође су поред стандардног синусног облика излазног електричног сигнала генератора функције, искоришћени и остали уобичајени сигнални облици: правоугаони и троугаони.

Резултати овог поглавља, поред наведеног, имају још једну додатну оправданост. То је, да доказују једну даљу тезу, да за дефектоскоп који се заснива на методи KTUD, није потребно наношење никаквог контактеног средства, између ултразвучних сензора и узорка материјала. Јер, сва мерења чији се резултати показују у овој глави, изведена су без икаквог контактеног средства.

4.1 Поступак мерења и анализа резултата

Поступак мерења који је практикован у оквиру овде изведених експеримената, започиње подешавањем почетног механичког притиска (који је у тој фази мали), над пријемном ултразвучном главом која се испитује. Затим се као први облик електричног сигнала генератора функције, изабере синусоида и подеси се почетна амплитуда напона побуде извора S_1 од 6 V .



Слика 4.1 Дијаграм поступка мерења утицаја механичког притиска.

Извор напона фреквенције 45 kHz је генератор функције G_1 . Након тога се вредност интензитета механичког притиска унесе у мерни протокол, па помоћу осцилоскопа, на који је прикључена дата пријемна глава, чита прва вредност амплитуде која је под овим околности генерисала пријемна ултразвучна глава. Поступак мерења приказан је на слици 4.1.

Одржавајући механички притисак над мерном главом, констатним, пошто је сигнални облик промењен на правоугаони облик, изводи се следеће мерење. После регистровања добијене мерне вредности амплитуде напона пријемне мерне главе (а одржавајући механички притисак још увек на истој почетној, ниској вредности) изводи се промена облика напајања извора S_1 на троугаони сигнал, па се у мерни протокол унесе и овај резултат.

Даљи поступак тече тако, што се напон побуде S_1 повиси на 9 V и тиме се изведе још једна „петља” промене облика сигнала побуде. Треба истаћи и то, да се у овој фази извођења експеримента, вредност механичког притиска још увек не мења. Наставак поступка тече тако што се напон побуде S_1 повећа на 15 V , након чега се изводи петља од три мерења са три облика сигнала: синусоиде, правоугаоника и троугаоника. Последња петља од три мерења се изведе када се напон побуде повиси на $19,7\text{ V}$ и када се читају мерне вредности које одговарају облицима сигнала синусоиде, правоугаоника и троугаоника. Овим је окончан први блок мерења на нивоу почетног механичког притиска.

Затим се по први пут на пријемној глави повећава механички притисак за један корак, а та вредност притиска се региструје као почетак другог блока мерења. Овај, други блок мерења аналогно првом блоку, садржи четири „петље” мерења које припадају напонима сигнала побуде од 6 V , 9 V , 15 V и $19,75\text{ V}$. За сваки од четири напонска нивоа промене се сва три сигнална облика, приликом чега се региструју вредности аплитуда напона пријемне ултразвучне главе P_i . Мерење се наставља повећавањем механичког притиска на пријемну главу, све док не достигне максималну вредност која је предвиђена, у конкретном случају приближно $120\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$.

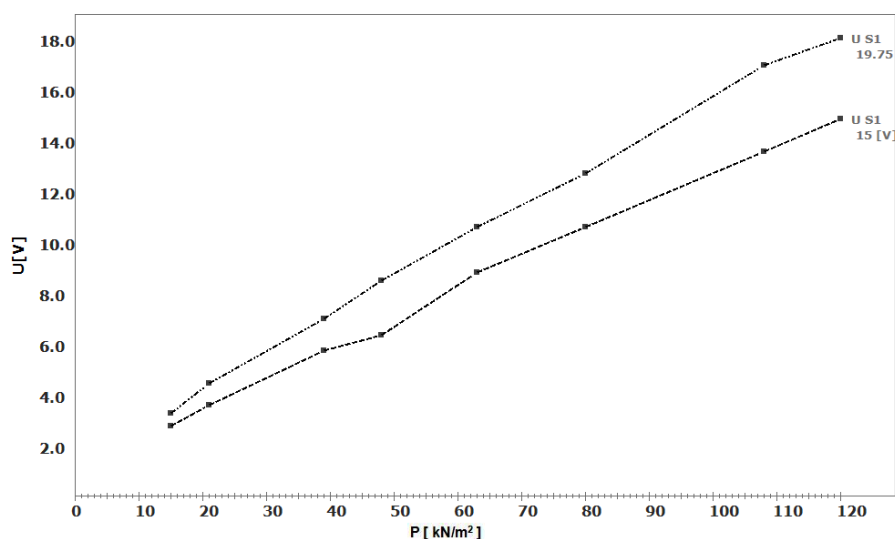
Део дијаграма на слици 4.1, са ознакама „сигнал 1” до „сигнал 3”, је „петља” унутар које се изводе промене сигналних облика: синусоиде, правоугаоника и троугаоника. Промене унутар „блокова” мерења настају повећањем напона напајања одашиљача S_1 , што је на истом дијаграму означено са „ S_1 ++”.

Блок промена, који се налази околу наведене „петље“, представља подешавање механичког притиска на пријемну мерну главу, што је означено са „ P_i++ ”.

Мерења овде описаним поступком су изведена најпре над ултразвучном главом испод које се није налазио никакав дефект, а затим је аналогним поступком изведена серија експерименталних мерења над ултразвучном главом, испод које се налазио уграђен дефинисани дефект.

Процес анализе резултата, почевши од поглавља 4.4.1 „Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорак AlSi12 без дефекта“, почиње тако што се најпре приказује главни дијаграм са три осе. На x -оси се увек налазе вредности механичког притиска p на дату пријемну ултразвучну главу P_i .

На y -оси се приказују вредности амплитуда напона које под датим условима генерише пријемна ултразвучна глава P_i , док се на z -оси исписују амплитуде напона побуде главе одашиљача S_1 . Након тога следе дијаграми који воде ка сегментирању добијених графикана, као и нумеричка анализа - фитовање.

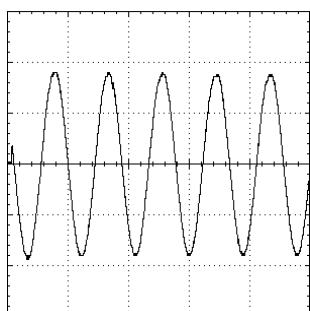


Слика 4.2 Дијаграм провере линеарности пиезокерамике.

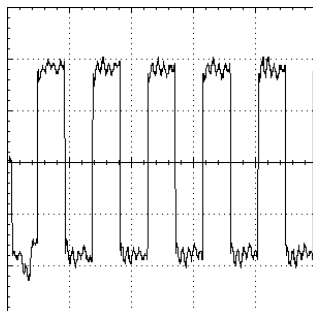
Пре него што су изедени главни експерименти чији се резултати овде приказују, извршена је провера каква је реакција саме пиезокерамике ултразвучне главе на промене притисака, без учествовања узорка у експерименту. Идеалан резултат оваквог припремног експеримента јесте да пиезокерамика која се користи, сама не уноси девијације. Ако би и саме пиезокерамике уносиле нелинеарности, онда би то компликовало даљу анализу резултата и представљало сметњу налажења оптималног решења за реализацију дефектоскопа заснованог на KTUD методи.

Практична реализација ове провере је текла тако, да су две пиезокерамике постављене директно једна на другу. Доња пиезокерамика имала је функцију одашиљача S_1 на који је прикључен генератор функције, који је као и код свих осталих експеримената генерисао ултразвучну фреквенцију од 45 kHz . Најпре би се као напон побуде подесило 15 V , те се механички притисак на горњу пиезокерамику повећавао корак по корак. При томе су регистровани појединачни извршени притисци и амплитуде напона, која је генерисала горња пиезокерамика, која функционише као пријемник. У следећој серији мерења притисак је смањен на почетну вредност, као напон побуде подешено је $19,75\text{ V}$, те се изводило постепено повећавање притиска. Резултати прве две итерације су приказане на слици 4.2. Такав поступак се практиковао и за напоне од 6 V и 9 V .

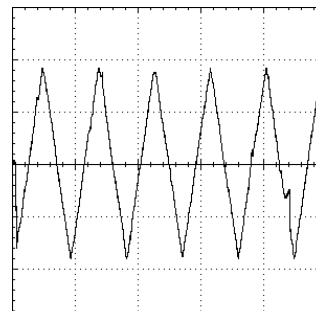
Ова мерења су изведена аналогно за сва три сигнална облика, и резултат је подједнака линеарност. Веома задовољавајући закључак који се из овог експеримента може извести је да употребљене пиезокерамике не уносе нелинеарности у изведене експерименте.



Слика 4.3 Сигнал синусоидног напона побуде главе одашиљача S_1 .



Слика 4.4 Сигнал правоугаоног напона побуде главе одашиљача S_1 .



Слика 4.5 Сигнал троугаоног напона побуде главе одашиљача S_1 .

Слике 4.3, 4.4 и 4.5 приказују осцилоскопске снимке синусоидног, правоугаоног и троугаоног сигнала побудних напона, којима је одашиљачка ултразвучна глава S_1 током експерименталних мерења снабдевана напонам из генератора функције, фреквенцијом од 45 kHz . За приказане снимке коришћен је дигитални осцилоскоп типа Owon PDS 5022S.

4.2 Својства испитиваног узорка AlSi12

Главна експериментална мерења, чији се резултати приказују, изведена су над узорком AlSi12, који је произведен директним ласерским синтеровањем (DLSM методом) на Фраунхофер институту у Немачкој, граду Аугсбургу [FRA]. Елемент тј. узорак је конкретно произведен помоћу постројења „SLM 250HL” немачке компаније „SLM” [SLM], које је приказано на слици 4.6.



Слика 4.6 SLM 250HL систем, производ фирме SLM.

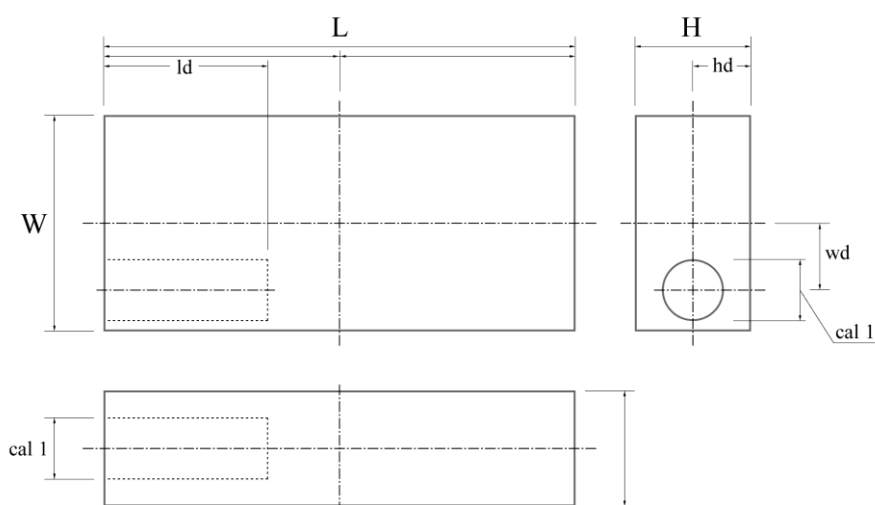
Систем SLM 250HL се састоји од разних модула, тако да се поједини сектори могу посебно одржавати или мењати. У горњем десном делу отвореног ормана се види простор за изградњу елемента, чија је ефективна унутрашња величина облика коцке основе од 250 mm. SLM у постројења ове серије уграђује патентирану аутоматичку бидирекционалног снабдевача металним прахом.



Слика 4.7. Узорак AlSi12 за експериментална мерења израђен постројењем SLH 250HL.

Систем за снабдевање заштитним гасом, који се на слици види испод простора за изградњу, одликује ниска потрошња и механика за турбулентно и ламинарно струјање гаса, а осим тога опремљен је патентираним заштитним сигурносним системом и

системом за гашење пожара. У изведби за Фраунхофер Институт, у овом уређају је уграђен „Ytterbium-Faser” ласер серије YLR, снаге 400 W. Ласер је нове генерације и располаже са јединственом комбинацијом велике прецизности и високог степена корисног дејства. Систем 250HL је опремљен 3D CAD софтвером „Magics AutoFab”, који је тренутно водећи софтвер за овакве примене на тржиштима западне Европе. Софтвер омогућава учитавање великог броја различитих CAD формата, података у облику „Standard Transformation Language” и „Slice process” података. Слика 4.7. показује фотографију узорка AlSi12. На слици 4.8. су назначене димензије узорка AlSi12, које износе: $H = 30 \text{ mm}$, $W = 86 \text{ mm}$, $L = 121 \text{ mm}$, $hd = 15 \text{ mm}$, $wd = 21,5 \text{ mm}$, $ld = 45 \text{ mm}$, $cal 1 = 16 \text{ mm}$.



Слика 4.8 Скица димензија узорка AlSi12.

Табела 4.1 показује податке везане за тему синтеровања овог елемента (опсег величине зрна праха, дебљина појединачних слојева, температура и атмосфера синтеровања и сл.). Табела 4.2. показује механичка својства узорка AlSi12.

Табела 4.1 Подаци о процесу синтеровања узорка AlSi12.

	Вредност	Јединица
Легура AlSi12		
Величине зрна праха	16 - 63	μm
Дебљина појединачног слоја	50	μm
Температура синтеровања	575	$^{\circ}\text{C}$
Атмосфера синтеровања	Аргон	
Тврдоћа (HV)	105	HV
Ћелијска структура	квадратна	
Величина ћелијске структуре	1	mm

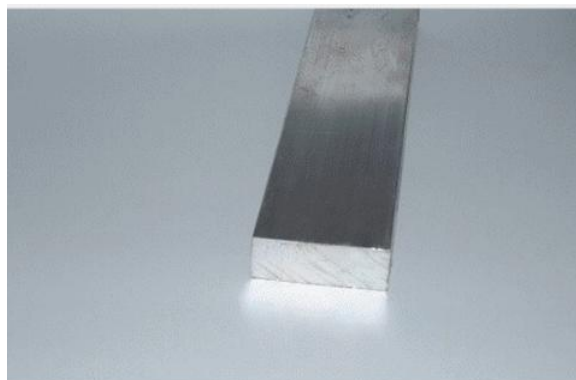
Табела 4.2. Механичка својства узорка *AlSi12*.

Особина	Вредност	Јединица
Легура	<i>AlSi12</i>	
Е-modul	60	kN/m^2
Граница течења (R_p)	270	N/m^2
Затезна чврстоћа (R_m)	340	kN/m^2
Релативно издужење (A)	2,7	%
Густина	1,09	g/cm^3

4.3 Својства узорка *AlMg3* за упоредна мерења

Упоредна експериментална мерења чији се резултати приказују у другом делу ове главе, изведена су над узорком *AlMg3*, који је стандардни индустријски производ који се налази у широкој примени у производњи машинских делова у разним областима индустрије (делови за ваздухопловство, орбиталне сателите итд.).

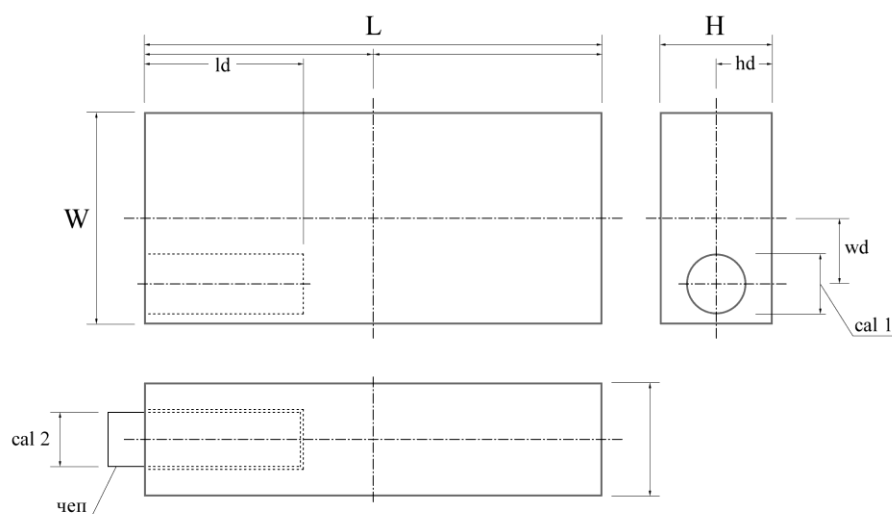
Узорак употребљен за експеримент, произведен је од пресоване шипке (сл. 4.9.):



Слика 4.9 Испитивани узорак *AlMg3*, производ фирме „*Alinoxmetall*”.

На слици 4.10. су назначене димензије узорка *AlMg3*, које износе: $H = 29\text{ mm}$, $W = 85\text{ mm}$, $L = 120\text{ mm}$, $hd = 14,5\text{ mm}$, $wd = 21,25\text{ mm}$, $ld = 45\text{ mm}$, $cal1 = 16\text{ mm}$.

Димензија cal2 износи 15,99 mm као пречник чепа који је израђен од идентичног материјала као и сам узорак, и који се може померати дуж прореза, а који има сврху симулације различитих запремина дефеката.



Слика 4.10 Скица механичких димензија узорка AlMg3.



Слика 4.11 Узорак AlMg3 за упоредна експериментална мерења.

Слика 4.11 показује фотографију израђеног узорка AlMg3, а Табела 4.3. показује механичка својства узорка AlMg3:

Табела 4.3 Механичка својства узорка AlMg3.

	Вредност	Јединица
Легура AlMg3		
Модул еластичности (E)	70	kN/m^2
Граница течења (R_p)	80	N/m^2
Затезна чврстоћа (R_m)	240	N/m^2
Релативно издужење (A)	14	%
Густина	2,67	g/cm^3
Тврдоћа (HB)	50	HB

4.4 Резултати и анализа резултата мерења над узорком AlSi12

У овом поглављу се детаљно презентују експериментални резултати, као и анализа резултата мерења над узорком AlSi12. Прво се приказују резултати мерења утицаја механичког притиска на узорак без дефекта, а затим резултати мерења са дефектом. Увек се прво приказује 3D дијаграм мерења изведених над узорком AlSi12, а затим се коментарише његова дводимензионална верзија. При овоме се улази у појединости тока дијаграма и наводе се битне вредности притисака и амплитуда напона пријемних ултразвучних глава. Затим следе графици мерења појединих напонских нивоа подељени на сегменте. За те графике је спроведена нумеричка анализа. Анализиране су карактеристичне тачке унутар токова дијаграма и спроведено фитовање.

Циљ анализе је пре свега налажење опсега механичког притиска унутар кога притисак може да варира а да то не изазива знатне измене амплитуда напона унутар пријемних ултразвучних глава.

Одсечак „Резултати мерења утицаја механичког притиска без дефекта” је подељен на три дела који се тичу мерења са синусним обликом сигнала, са правоугаоним обликом сигнала и са троугаоним обликом сигнала.

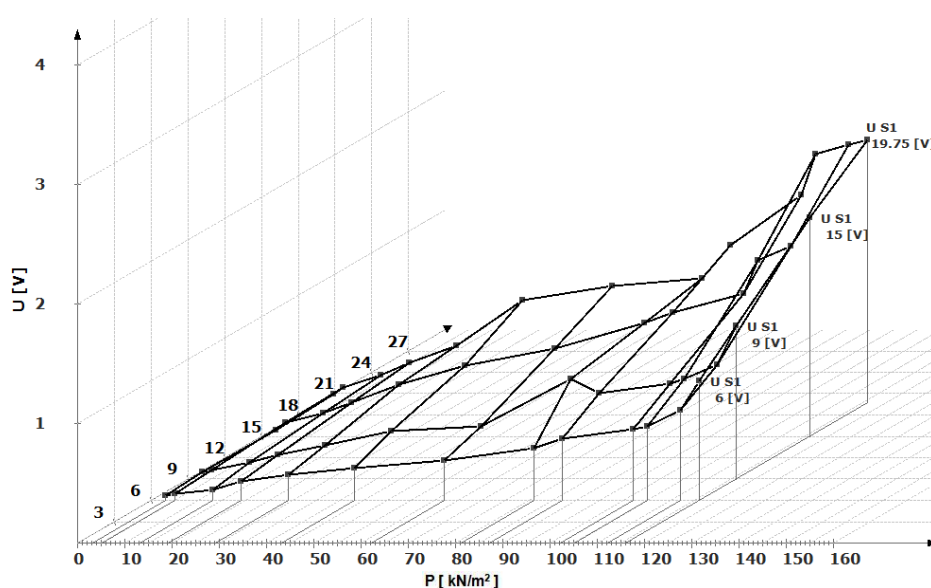
У одсечку „Резултати мерења са дефектом” се поступа аналогно, а иза њега се налази одсечак „Упоредивање резултата мерења”. Аналогно претходном поступку и овај је одсечак подељен у делове упоређивања мерења са синусним обликом сигнала, са правоугаоним обликом сигнала и са троугаоним обликом сигнала. Овде се пореде резултати експеримента мерења амплитуда пријемних ултразвучних глава које се налазе над сегментом који не садржи дефект са амплитудом одговарајуће пријемне ултразвучне главе над сегментом који садржи уграђени дефект. Ови дијаграми представљају комбинацију одговарајућих дводимензионалних графика из поглавља презентације резултата и анализе резултата мерења AlSi12. Анализа упоређења ових графика има за задатак да нађе одговор на питање да ли су унутар укупног тока оба графика, вредности амплитуда напона које генерише пријемна ултравучна глава изнад сегмента без дефекта веће од амплитуда изнад сегмента са дефектом.

Овим се добија доказ да је дефектоскопија високо порозног и шупљикавог материјала који је синтерован DLSM методом могућа применом методе квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије KTUD.

4.4.1 Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорак AlSi12 без дефекта

Мерења на узорку AlSi12 са синусним обликом сигнала

На слици 4.12. је приказан 3D дијаграм мерења изведених над узорком AlSi12 и то оних резултата добијених синусним обликом сигнала побуде S_1 . На x -оси се налазе вредности механичког притиска p на пријемну ултразвучну главу P_2 ($kN \cdot m^{-2}$). Пријемна ултразвучна глава P_2 се налази над квадрантом узорка који не садржи дефект, а на y -оси приказане су вредности амплитуда напона (V), које под датим условима генерише пријемна ултразвучна глава P_2 . На z -оси су приказане амплитуде напона побуде одашиљачке главе S_1 .

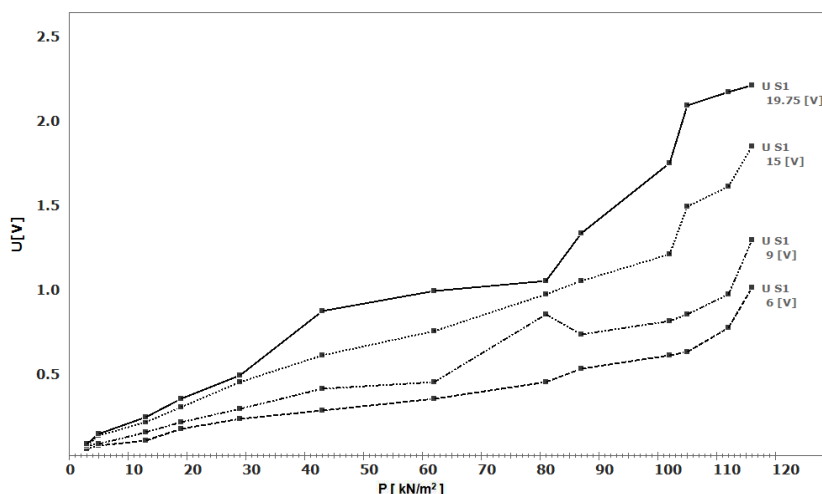


Слика 4.12 3D дијаграм напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, синусни сигнал S_1 .

Дијаграм 4.13. је дводимензионална верзија дијаграма 4.12. где су напони којим се напајала одашиљачка ултразвучна глава S_1 (6 V, 9 V, 15 V и 19,7 V) забележени респективно. Са дијаграма се види да сва четири напонска нивоа одашиљачке ултразвучне главе S_1 , у региону вредности притисака p до $30 kN \cdot m^{-2}$ доводе до генерисања напонских амплитуда пријемне ултразвучне главе P_2 , које не прелазе 0,5 V.

При почетном притиску од $3 kN \cdot m^{-2}$, амплитуде напона измерене на глави P_2 износе само 0,04 V до 0,07 V. Када се притисак на P_2 повећава изнад $30 kN \cdot m^{-2}$, све до крајње вредности $116 kN \cdot m^{-2}$, амплитуда напона на глави P_2 почиње приметно да расте. Када разматрамо експеримент при напону од 6 V одашиљача S_1 , амплитуда има изразито линеаран пораст, све до притиска до $105 kN \cdot m^{-2}$, а даљим повећањем

притиска долази до приметно већег нагиба пораста амплитуде напона на глави P_2 . При максималном притиску од $116 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона који под овим условима генерише P_2 , износи 1 V . Када се одашиљач S_1 напаја напоном од 9 V , пораст амплитуде напона на глави P_2 има веома сличан ток као у претходном случају, када је напон побуде износио 6 V и то све до притиска $112 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, а затим долази до већег нагиба пораста амплитуде напона на глави P_2 . При притиску од $112 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, генерише се амплитуда напона на глави P_2 у износу од $0,96 \text{ V}$, а при максималном притиску од $116 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_2 достиже $1,28 \text{ V}$. Споменута линеарност има једно мерно одступање при вредности притиска од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, када очитана амплитуда напона на глави P_2 износи $0,84 \text{ V}$. Интерполирана втрдноост амплитуде напона на глави P_2 би износио $0,65 \text{ V}$.



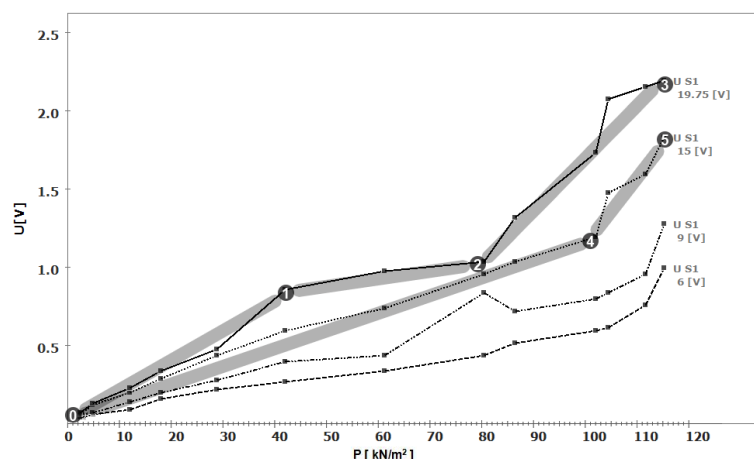
Слика 4.13 Напон на глави P_2 у зависности од притиска, $AlSi12$ без дефекта, синусни сигнал S_1 .

У итерацији мерења под напоном S_1 од 15 V постижу се приметно веће амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_2 . И у овом случају постоји изражена линеарност, све до притиска у износу од $102 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. Може се рећи да се унутар овог опсега притисака, под наведеним напоном одашиљача S_1 од 15 V , постиже готово идеална линеарност. Даљим повећањем притиска, ситуација се приметно мења. Док је амплитуда напона на глави P_2 при притиску од $102 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ износила само $1,2 \text{ V}$, даљим повећањем притиска за само $14 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ (што је повећање од само 12%), максимална амплитуда напона коју генерише пријемна ултразвучна глава P_2 , порасте за преко 50% , са $1,2 \text{ V}$ на $1,84 \text{ V}$. Повећање напона побуде одашиљачке ултразвучне

главе S_1 на $19,75\text{ V}$, под притиском све до $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, у поређењу са дијаграмом побуде од 15 V , не доводи до знатног повећања генерисане амплитуде напона у P_2 . Ситуација се значајно мења даљим повећањем притиска до $116\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. Ако би се појединачна мерна тачка под притиском од $105\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ изузела из серије мерних вредности, онда би се добила линеарност која у опсегу притиска од $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $116\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ даје опсег амплитуда напона на глави P_2 од $1,04\text{ V}$ до $2,2\text{ V}$.

За изведена мерења на узорку AlSi12, над квадрантом који не садржи дефект, са синусним обликом сигнала побуде одашиљача S_1 може се рећи да напони побуде од 15 V и $19,75\text{ V}$, у поређењу са резултатима генерисаних амплитуда под условима напона побуде од 6 V и 9 V , доводе до знатно бољих резултата, у смислу да се постижу амплитуде напона на излазима пријемних глава око 2 V (тачније $1,84\text{ V}$ код побуде 15 V и $2,2\text{ V}$ код побуде $19,75\text{ V}$), што је атрактивно за даљу обраду мерних сигнала.

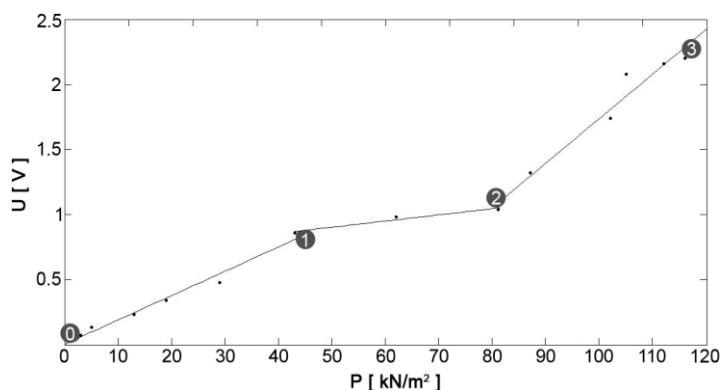
Из тог разлога се нумеричка анализа добијених вредности (тј. фитовање) врши само над дијаграмима који потичу од серија мерења добијених при амплитудама напона побуде од 15 V и $19,5\text{ V}$.



Слика 4.14 Сегменти дијаграма напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, синусни сигнал.

На слици 4.14. су маркирани графици мерења напонских нивоа од 15 V и $19,7\text{ V}$, подељени на сегменте, за које је изведена нумеричка анализа. Ради постизања могућности даљег једнозначног референцирања карактеристичних позиција, овде су учртани симболи у облику малих кругова, са бројчаним ознакама.

Слика 4.15. показује фитовање између позиција 0, 1, 2 и 3.



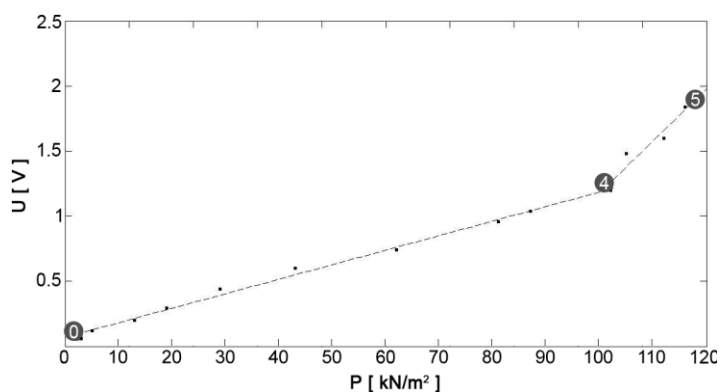
Слика 4.15 Карактеристичне тачке напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, 19,75 V, синусни сигнал.

Формула која је добијена фитовањем, за сегменте од 0 до 1, од 1 до 2 и од 2 до 3, дата је следећим изразом:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.1)$$

Коефицијенти за сегмент од 0 до 1 износе: $a_1 = 0.0187$, $a_0 = 0.0036$, за сегмент од 1 до 2: $a_1 = 0.0047$, $a_0 = 0.6663$ и за сегмент од 2 до 3: $a_1 = 0.0343$, $a_0 = -1.6871$.

Слика 4.16. показује фитовање између тачака 0, 4 и 5.



Слика 4.16. Карактеристичне тачке напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, 15 V, синусни сигнал.

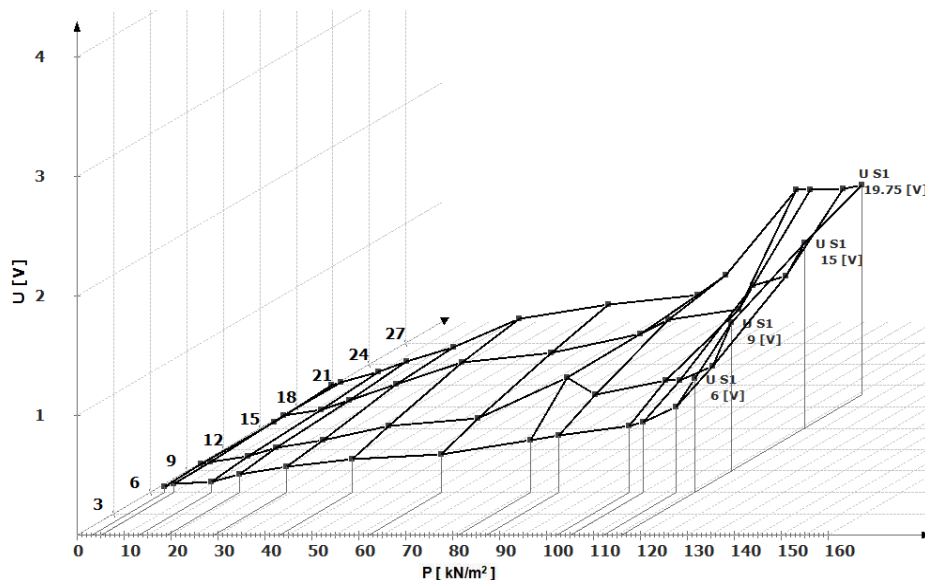
Формула која је добијена фитовањем за сегменте од 0 до 4 и од 4 до 5, је:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.2)$$

при чему коефицијенти износе за сегмент од 0 до 4: $a_1 = 0.0112$, $a_0 = 0.0695$ и за сегмент од 4 до 5: $a_1 = 0.0398$, $a_0 = -2.8023$.

Мерења на узорку AlSi12 са правоугаоним обликом сигнала

Дијаграм 4.17. је 3D приказ мерења узорка AlSi12 над квадрантом узорка који не садржи дефект, са том разликом у односу на претходни случај, да се одашиљачка глава S_1 овде напаја правоугаоним обликом сигнала побуде.



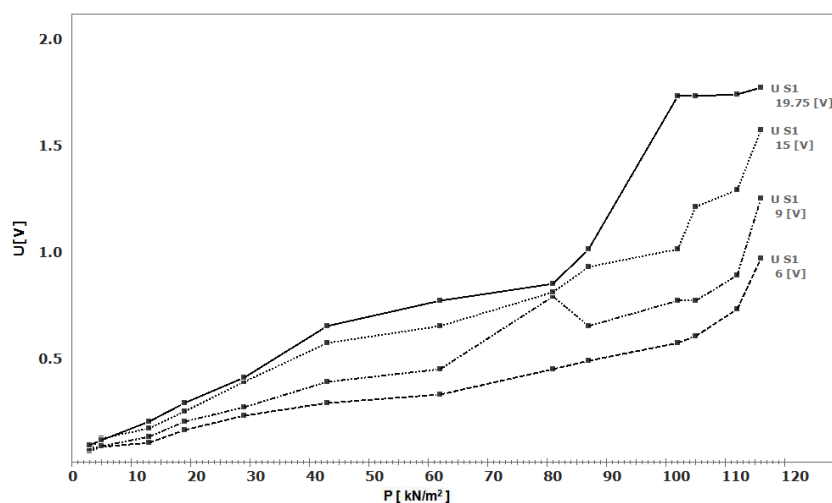
Слика 4.17. 3D дијаграм напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, правоугаони сигнал S_1 .

На x -оси је приказан механички притисак p на пријемну главу P_2 у $kN \cdot m^{-2}$, а на y -оси се налазе одговарајуће вредности амплитуда генерисаних напона пријемне ултразвучне главе P_2 . На z -оси приказане су појединачне амплитуде напона напајања одашиљача S_1 .

Дијаграм 4.18 је 2D верзија дијаграма 4.17. Дијаграм приказује како под одговарајућим напонима побуде одашиљача S_1 , а при почетном притиску p од $3 kN \cdot m^{-2}$ долази до генерисања амплитуде напона (U) пријемне ултразвучне главе P_2 у износу од око $0,05 V$. Дијаграм који одговара напону побуде S_1 интензитета од $6 V$, показује линеарност амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_2 све до притиска од $102 kN \cdot m^{-2}$. Унутар овог опсега промене притисака, амплитуда напона на глави P_2 линеарно расте од $0,05 V$ до $0,56 V$.

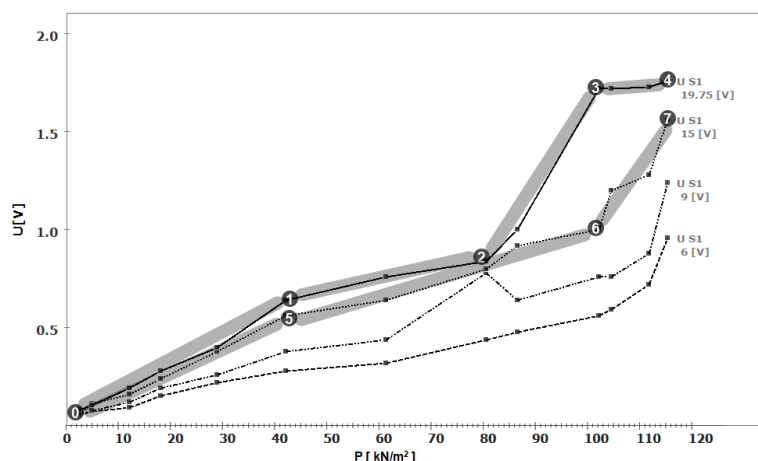
Даљим повећањем притиска долази до већег нагиба пораста амплитуде напона пријемника P_2 . При максималном притиску од $116 kN \cdot m^{-2}$, напон на глави P_2 достиже амплитуду од $0,96 V$. Дијаграм који одговара напону побуде S_1 интензитета од $9 V$, је веома сличан дијаграму мерења под напоном побуде S_1 од $6 V$, са тим што при

наведеном притиску од $102 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ настаје амплитуда напона на глави P_2 од $0,76 \text{ V}$, а при притиску од $116 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_2 достиже $1,24 \text{ V}$.



Слика 4.18 Напон на глави P_2 у зависности од притиска, AlSi12 без дефекта, правоугаони сигнал S_1 .

При притиску од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ постоји мерна тачка која одступа. Побуда од 15 V доводи до приметно веће амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_2 . У овом случају се примећује изражена линеарност, све до притиска од $102 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, а амплитуда напона главе P_2 при овом притиску износи 1 V .



Слика 4.19 Сегменти дијаграма напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, правоугаони сигнал S_1

Даљим повећањем притиска долази до измена: почев од притиска од $102 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, па све до $116 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ може се говорити о знатно већем нагибу, такође линеарног тока, а максимални напон на глави P_2 при притиску од $116 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ износи $1,56 \text{ V}$. Мерења напонам побуде S_1 од $19,75 \text{ V}$ показују комплекснији дијаграм: препознатљиве су

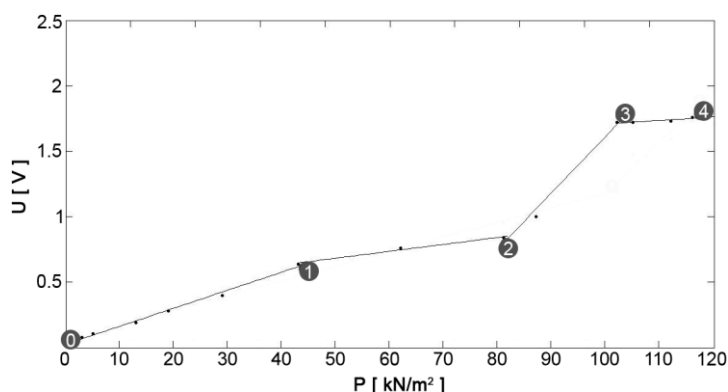
карактеристичне тачке које одговарају притисцима од $43 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ и $102 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, где долази до јасних измена. У опсегу притисака од $43 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ добија се линеарна зависност са релативно малим нагибом. Затим, у опсегу притисака од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $102 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ добија се измењен ток, са знатно повећаним нагибом (амплитуда напона на глави P_2 тада достиже вредност $1,72 \text{ V}$). Даље повећање притиска скоро да више не мења износ генерисаних амплитуда. Притисак све до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, у поређењу са дијаграмом напона побуде од 15 V , не доводи до знатног повећања амплитуде напона на глави P_2 . Све до овог притиска линеарност је изражена. Ситуација се значајно мења даљим повећањем притиска, све до $116 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ где амплитуда напона на глави P_2 достиже $2,2 \text{ V}$. Над квадрантом који не садржи дефект, са правоугаоним обликом сигнала побуде S_1 , напони побуде од 15 V и $19,75 \text{ V}$, у поређењу са резултатима напона побуде од 6 V и 9 V , доводе до знатно квалитетнијих резултата у смислу већих амплитуда напона на глави P_2 .

На слици 4.19 су маркирани графици мерења напонских нивоа од 15 V и $19,7 \text{ V}$, који су као и у случају мерења са синусним сигналом побуде, подељени у сегменте за које је изведена нумеричка анализа. Уцртане су карактеристичне тачке од 0 до 7.

Слика 4.20 показује графике настале фитовањем мерених вредности из области сегмената између карактеристичних позиција 0, 1, 2, 3 и 4. Формула добијена фитовањем, за сегменте 0 до 1, 1 до 2, 2 до 3 и 3 до 4 гласи:

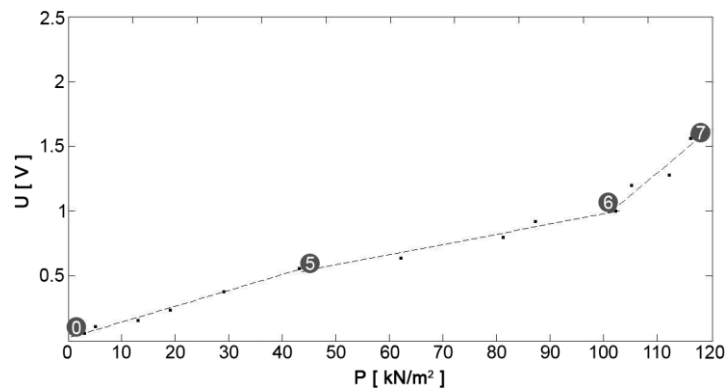
$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.3)$$

при чему коефицијенти износе: за сегмент 0 до 1: $a_1 = 0.0138$, $a_0 = 0.0253$, за сегмент 1 до 2: $a_1 = 0.0053$, $a_0 = 0.4204$, за сегмент 2 до 3: $a_1 = 0.0431$, $a_0 = -2.6903$ и за сегмент 3 до 4: $a_1 = 0.0026$, $a_0 = 1.4468$.



Слика 4.20 Карактеристичне тачке напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, $19,75 \text{ V}$, правоугаони сигнал.

Слика 4.21. показује фитовање сегмената између тачака 0, 5, 6 и 7.



Слика 4.21 Карактеристичне тачке напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, 15 V ,
правоугаони сигнал

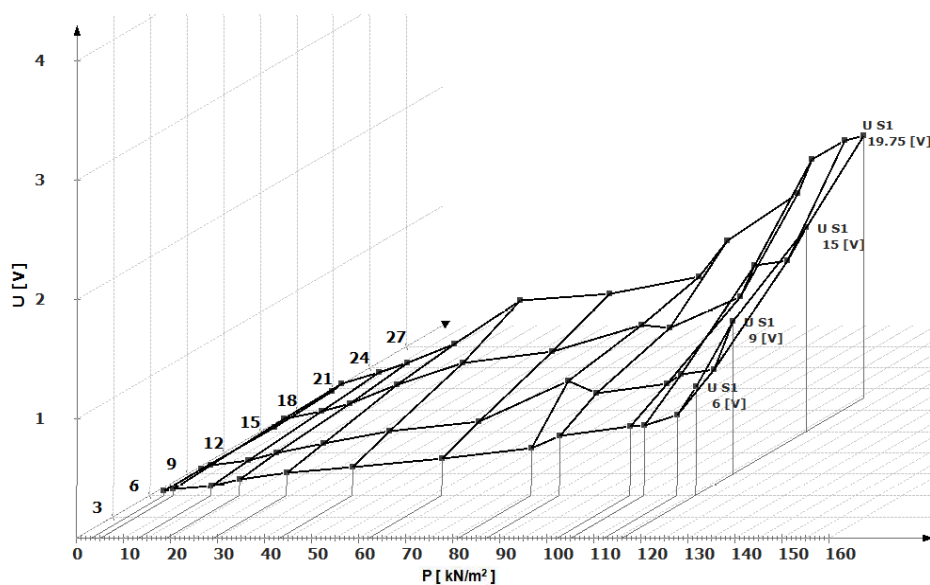
Формула добијена фитовањем за сегменте 0 до 5, 5 до 6 и 6 до 7 гласи:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.4)$$

Коефицијенти износе: за сегмент 0 до 5: $a_1 = 0.0123$, $a_0 = 0.0233$, за сегмент 5 до 6:
 $a_1 = 0.0079$, $a_0 = 0.1917$, за сегмент 2 до 3: $a_1 = 0.0344$, $a_0 = -2.4787$.

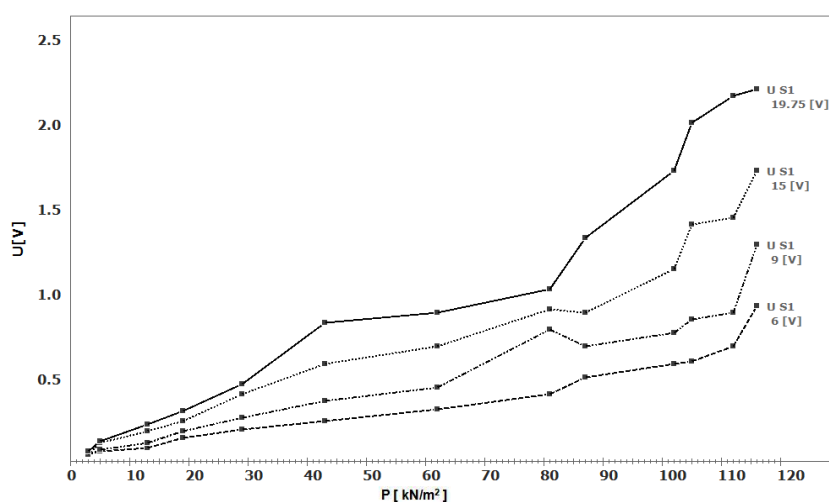
Мерења на узорку AlSi12 са троугаоним обликом сигнала

Дијаграм 4.22. је последњи 3D приказ мерења узорка AlSi12 у серији мерења над квадрантом узорка који не садржи дефект. Овде се одашиљачка глава напаја троугаоним обликом сигнала. Као и у свим досадашњим дијаграмима, на x -оси приказани су притисци на глави P_2 док се одговарајуће вредности амплитуда напона на глави P_2 и извору S_1 као и до сада налазе на y , односно z –оси, респективно.



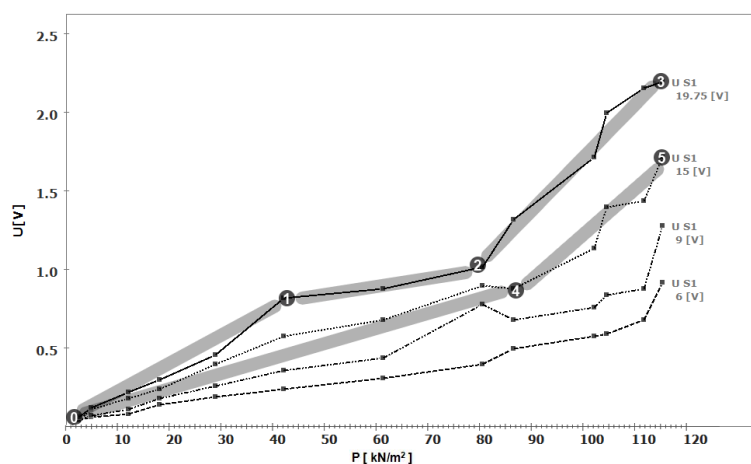
Слика 4.22 3D дијаграм напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, троугаони сигнал S_1 .

Дијаграм 4.23 је 2D верзија дијаграма 4.22. Напони напајања на извору S_1 се и овде налазе као ознаке по страни појединачних графика.



Слика 4.23 Напон на глави P_2 у зависности од притиска, AlSi12 без дефекта, троугаони сигнал S_1 .

Дијаграм који одговара напону побуде на извору S_1 интензитета од 6 V , показује линеарност амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_2 све до интензитета притиска од $112\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, при чему је приметна линеарност, од почетне вредности од $0,04\text{ V}$ па све до $0,68\text{ V}$. Једино последње повећање притиска, на $116\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, доводи до измене нагиба у смислу наглог пораста амплитуде напона на глави P_2 до вредности од $0,92\text{ V}$. Дијаграм напона побуде S_1 од 9 V је и у случају троугаоног облика сигнала побуде сличан дијаграму који је резултат мерења са амплитудом напоном побуде S_1 од 6 V . При притиску од $112\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_2 је $0,88\text{ V}$, а затим следи нагли пораст, када под притиском од $116\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на пријемнику достиже $1,28\text{ V}$. Повећање напона побуде S_1 на 15 V , у варијанти експеримента са троугаоним сигналом побуде, такође доводи до већих амплитуда напона пријемне ултразвучне главе P_2 . И у овом случају добија се линеарност све до притиска од $102\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, а амплитуда напона на глави P_2 под овим притиском износи $1,14\text{ V}$. Даље повећање притиска доводи до измена. Од притиска од $102\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ па све до $116\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, може се говорити о знатно већем нагибу, такође линеарне зависности, а максимални напон на глави P_2 тада износи $1,72\text{ V}$.



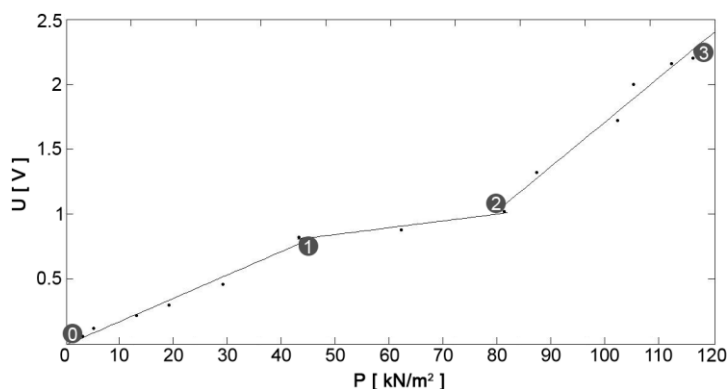
Слика 4.24 Сегменти дијаграма напона на глави P_2 , $AlSi12$ без дефекта, троугаони сигнал S_1 .

Мерења која одговарају напону побуде одашиљачке ултразвучне главе S_1 од $19,75\text{ V}$ показују комплекснију ситуацију: изражене су тачке притисака од $43\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ и $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, где долази до измена. У опсегу притиска до $43\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ нагиб је приметан и линеаран. При притисцима од $43\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ ток је линеаран са изузетно малим нагибом, а затим, изнад притиска од $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, постиже се измењен ток са

знатним нагибом и са максималним напонам од 2,2 V . Као и у варијантама мерења са синусним и правоугаоним облоком сигнала побудне одашиљачке ултразвучне главе, над квадрантом који не садржи дефект, напони побуде од 15 V и 19,75 V резултирају највећим амплитудама, па се и овде даље анализе дијаграма изводе над тим графицима.

На слици 4.24. су посебно назначени графици два напонска нивоа за које је изведена нумеричка анализа. Уцртане су ознаке од 0 до 5.

Слика 4.25 показује фитовање између карактеристичних тачака 0, 1, 2 и 3.



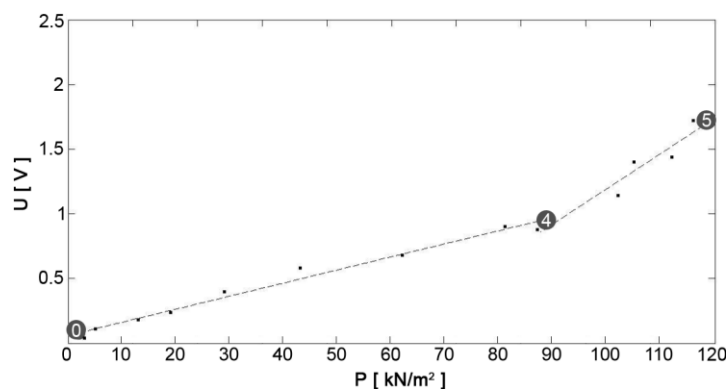
Слика 4.25 Карактеристичне тачке напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, 19,75 V , троугаони сигнал.

Формула за сегменте 0 до 1, 1 до 2 и 2 до 3 гласи:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.5)$$

при чему коефицијенти износе: за сегмент 0 до 1: $a_1 = 0.0180$, $a_0 = -0.0066$, за сегмент 1 до 2: $a_1 = 0.0053$, $a_0 = 0.5804$ и за сегмент 2 до 3: $a_1 = 0.0343$, $a_0 = -1.7071$.

Слика 4.26 показује фитовање за сегменте 0 до 4, и од 4 до 5.



Слика 4.26 Карактеристичне тачке напона на глави P_2 , AlSi12 без дефекта, 15 V , троугаони сигнал.

Формула за сегменте од 0 до 4 и од 4 до 5 гласи:

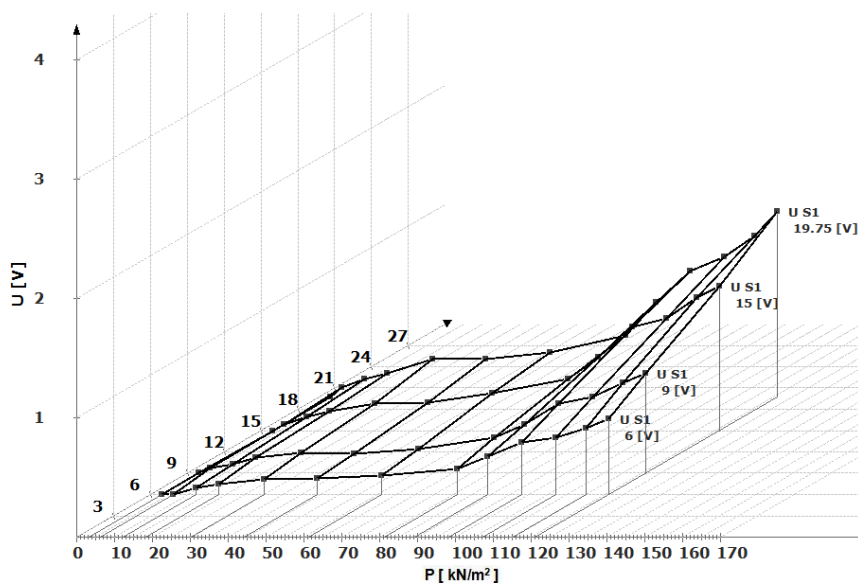
$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.6)$$

при чему коефицијенти износе: за сегмент од 0 до 4: $a_1 = 0.0101$, $a_0 = 0.0613$, а за сегмент од 4 до 5: $a_1 = 0.0273$, $a_0 = -1.5352$.

4.4.2 Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорак AlSi12 са дефектом

Мерења на узорку AlSi12 са синусним обликом сигнала

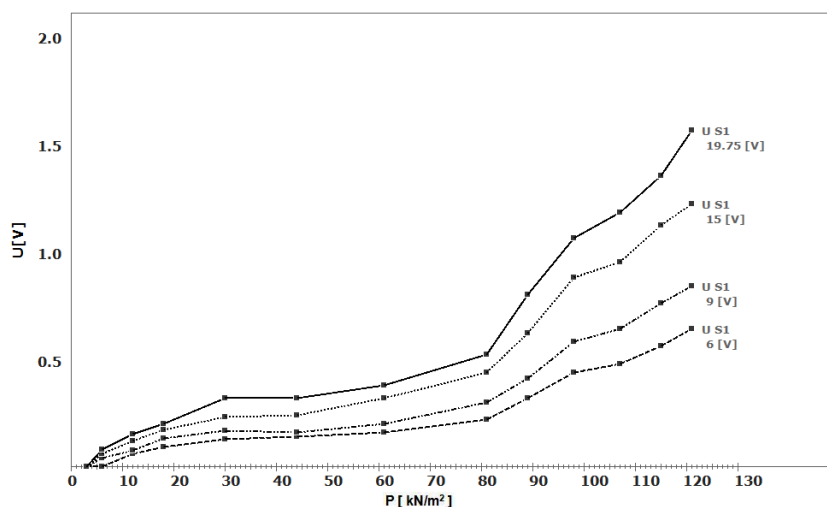
Аналогно приказима дијаграма резултата мерења над сегментом узорка AlSi12 без дефекта, прикази резултата мерења над сегментом који садржи дефект су дати најпре у 3D изведби, као што се види на слици 4.27. Такође су у истом редоследу најпре приказани мерни резултати добијени од напона напајања синусним обликом сигнала побуде одашиљачке главе S_1 . Пријемна ултразвучна глава над квадрантом узорка који садржи дефект, носи ознаку P_1 . На x -оси и овде је приказан механички притисак p над пријемном главом. Y -оса приказује амплитуде напона генерисаних у пријемнику P_1 , а на z -оси су приказане амплитуде напона на извору S_1 са вредностима 6 V , 9 V , 15 V и $19,7\text{ V}$.



Слика 4.27 3D дијаграм напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, синусни сигнал S_1 .

Дводимензионална верзија претходног дијаграма је приказана на слици 4.28. Дијаграми на сликама 4.27 и 4.28. приказују све четири вредности амплитуде напона на одашиљачу S_1 . Под притиском којим је подвргнута пријемна глава P_1 до $30\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_1 је минимално изнад од 0 V . Почев од притиска од $30\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ па све до $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, дијаграм који одговара амплитуди напона побуде S_1 од 6 V показује линеарност амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_1 . Унутар овог опсега промене притисака, амплитуда напона на глави P_1 линеарно расте од неких $0,13\text{ V}$ до $0,22\text{ V}$. Повећањем притиска изнад $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ долази до нешто већег нагиба

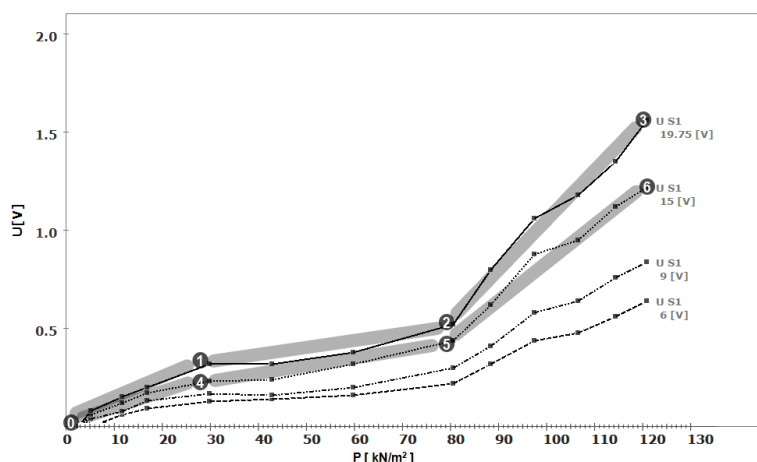
пораста амплитуде напона на пријемнику P_1 , а при максимално изведеном притиску од $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, овај напон износи $0,64 \text{ V}$.



Слика 4.28 Напон на глави P_1 у зависности од притиска, AlSi12 са дефектом, синусни сигнал S_1 .

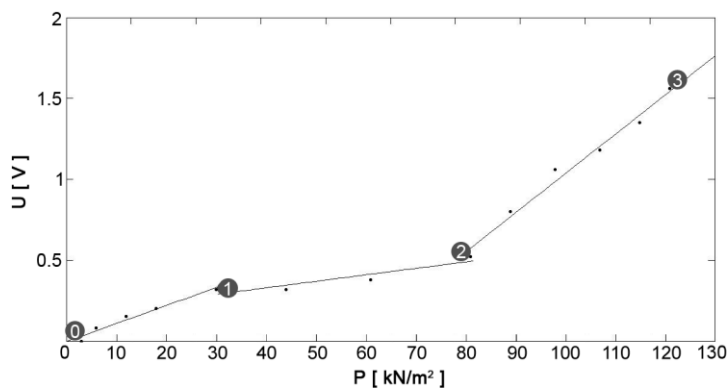
Дијаграм који одговара амплитуди напона побуде S_1 од 9 V има сличност са дијаграмом који је резултат мерења са амплитудом напоном побуде S_1 од 6 V . Овде под притиском од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ настаје напон на глави P_1 са амплитудом $0,3 \text{ V}$, а при притиску од $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на P_2 има интензитет $0,84 \text{ V}$. Излагањем ултразвучне главе S_1 напону од 15 V , постижу се већи напони пријемника P_1 . Линеарност је уочена када притисак пређе вредност од $44 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, што се наставља све до притиска од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ када амплитуда напона на глави P_1 износи $0,44 \text{ V}$. Даљим повећањем притиска долази до измене нагиба и до притиска од $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ постиже се знатно већи нагиб. Ток зависности је приближно линеаран, а највећа амплитуда напона на глави P_1 износи $1,22 \text{ V}$. Дијаграм експеримента под напоном S_1 од $19,75 \text{ V}$ показује приближну линеарност након повећања притиска изнад $44 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, што се наставља све до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ када амплитуда напона на глави P_1 износи $0,52 \text{ V}$. Даљим повећањем притиска уочава се измена нагиба тока генерисаних амплитуда напона на глави P_1 . Све до притиска од $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ постиже се знатно већи нагиб и приближна линеарност. Максимални напон P_1 под притиском од $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ износи $1,56 \text{ V}$. За изведена мерења на узорку AlSi12, над квадрантом који садржи уграђени дефект, са синусним правоугаоним обликом сигнала побуде S_1 , напони побуде од 15 V и $19,75 \text{ V}$, у поређењу са резултатима напона побуде од 6 V и 9 V , доводе до знатно

већих амплитуда, па ће се као и у случају анализе мерења над квадрантом који не садржи дефект, анализа добијених вредности извести помоћу дијаграма који одговарају напонима одашиљача S_1 од 15 V и 19,75 V . Слика 4.29. приказује графичку обраду претходних дијаграма у смислу да су графици мерења напонских нивоа од 15 V и 19,7 V , означени и подељени у сегменте, за које ће се извести нумеричка анализа.



Слика 4.29 Сегменти дијаграма напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, синусни сигнал S_1 .

На слици 4.30 је приказано фитовање сегмената између тачака 0, 1, 2 и 3.



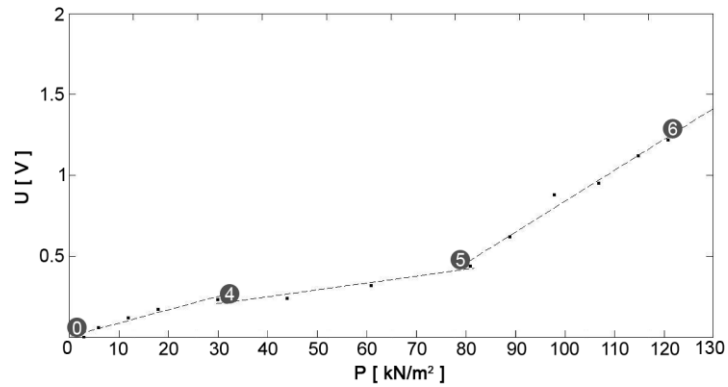
Слика 4.30. Карактеристичне тачке напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, 19,75 V , синусни сигнал S_1 .

Формула добијена фитовањем, за сегменте 0 до 1, 1 до 2 и 2 до 3 гласи:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.7)$$

Коефицијенти износе: за сегмент 0 до 1: $a_1= 0.0111$, $a_0= -0.0031$, за сегмент 1 до 2: $a_1= 0.0040$, $a_0= 0.1689$ и за сегмент 2 до 3: $a_1= 0.0242$, $a_0= -1.3907$.

Слика 4.31. приказује фитовање сегмената између тачака 0, 4, 5 и 6.



Слика 4.31 Карактеристичне тачке напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, 15 V, синусни сигнал S_1 .

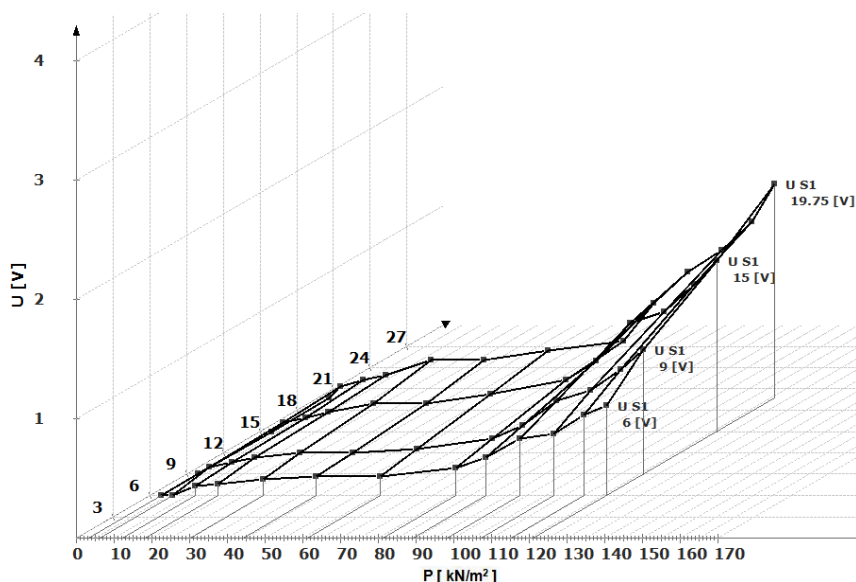
Формула за сегменте 0 до 4, 4 до 4 и 5 до 6:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.8)$$

Коефицијенти износе: за сегмент 0 до 4: $a_1 = 0.0082$, $a_0 = 0.0031$, за сегмент 4 до 5: $a_1 = 0.0042$, $a_0 = 0.0795$ и за сегмент 5 до 6: $a_1 = 0.019$, $a_0 = -1.0729$.

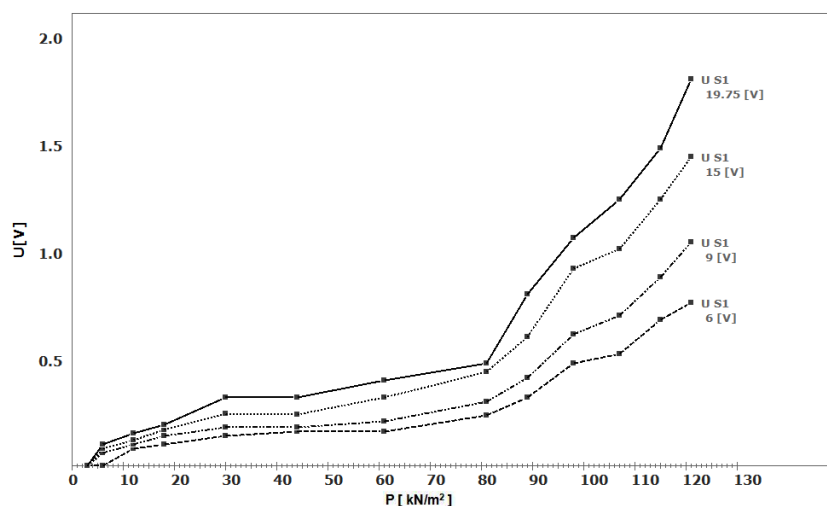
Мерења на узорку AlSi12 са правоугаоним обликом сигнала

На слици 4.32. следи 3D дијаграм мерења узорка AlSi12 над квадрантом узорка са дефектом испод P_1 , са правоугаоним обликом сигнала напајања одашиљачке главе.



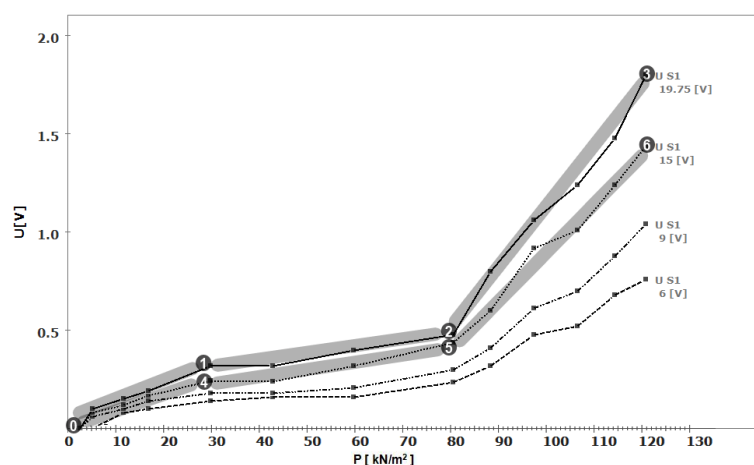
Слика 4.32 3D дијаграм напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, правоугаони сигнал S_1 .

Слика 4.33 приказује 2D верзију дијаграма 4.32. Притиском од $6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, остварују се амплитуде напона на глави P_1 мало већи од нуле и износе максимално $0,1 \text{ V}$. Повећањем притиска амплитуда напона на глави P_1 , почне да се линеарно повећава све до $30 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ и овде се достижу максимални напони на P_1 , од $0,14 \text{ V}$ до $0,32 \text{ V}$. Даљим повећањем притиска од $30 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ па све до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, пораст амплитуде напона на глави P_1 мења ток и све до притиска од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ такође је линеаран, али је нагиб мањи него до притиска од $30 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. За напон побуде од 6 V , амплитуда напона на глави P_1 која одговара притиску од $30 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ износи $0,14 \text{ V}$, а при притиску од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ повећа се на $0,23 \text{ V}$. За напон побуде од 9 V , амплитуда напона на глави P_1 унутар истог опсега притисака повећа се са $0,18 \text{ V}$ на $0,3 \text{ V}$. При побуди од 15 V настаје повећање амплитуде напона на глави P_1 од $0,24 \text{ V}$ на $0,44 \text{ V}$, а нивоу побуде од $19,75 \text{ V}$ одговара пораст са $0,32 \text{ V}$ на $0,48 \text{ V}$. Притисак од $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ је карактеристична позиција, јер овде долази до даље измене нагиба и то до знатног повећања, а ток је такође линеаран.



Слика 4.33 Напон на глави P_1 у зависности од притиска, AlSi12 са дефектом, правоугаони сигнал S_1 .

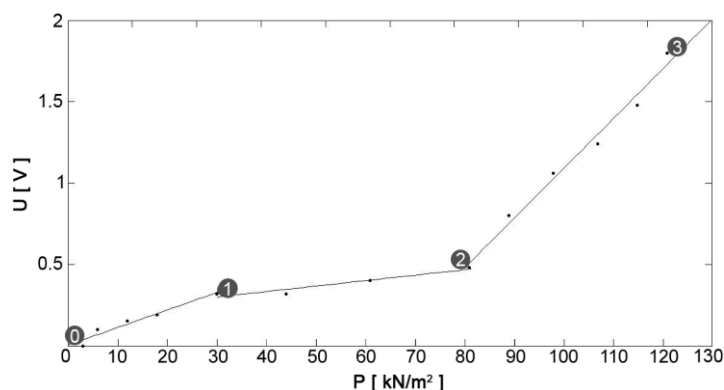
До притиска од $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ генерисани напон на глави P_1 , узрокован побудом од 6 V , повећа се са $0,23 \text{ V}$ на $0,76 \text{ V}$, а побуда од 9 V изазива линеаран пораст интензитета напона на глави P_1 са $0,3 \text{ V}$ на $1,04 \text{ V}$. Исто повећање притиска, до $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, са побудом S_1 од 15 V , резултира повећањем амплитуде напона на глави P_1 са $0,44 \text{ V}$ на $1,44 \text{ V}$, а побуда од $19,75 \text{ V}$ изазива такође линеаран пораст амплитуде напона на глави P_1 са $0,48 \text{ V}$ на $1,8 \text{ V}$.



Слика 4.34 Сегменти дијаграма напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, правоугаони сигнал.

Као и код претходних експеримената, на следећој слици, 4.34, приказани су графици мерења, где су дијаграми амплитуда напонских нивоа одашиљача од 15 V и $19,7 \text{ V}$. Овде су означени сегменти за које ће се извести фитовање, са знаком симбола од 0 до 6.

Слика 4.35. показује фитовање функције сегмената између тачака 0, 1, 2 и 3.



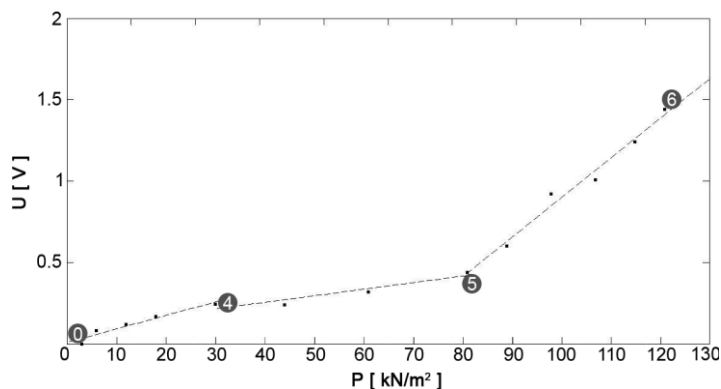
Слика 4.35. Карактеристичне тачке напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, 19,75 V ,
правоугаони сигнал.

Формула добијена фитовањем, за сегменте 0 до 1, 1 до 2 и 2 до 3 гласи:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.9)$$

Коефицијенти имају следеће вредности: за сегмент 0 до 1: $a_1 = 0.0107$, $a_0 = 0.0050$,
за сегмент 1 до 2: $a_1 = 0.0034$, $a_0 = 0.1988$ и за сегмент 2 до 3: $a_1 = 0.0305$, $a_0 = -1.9667$.

Слика 4.36. показује фитовање сегмената између тачака 0, 4, 5 и 6.



Слика 4.36 Карактеристичне тачке напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, 15 V ,
правоугаони сигнал

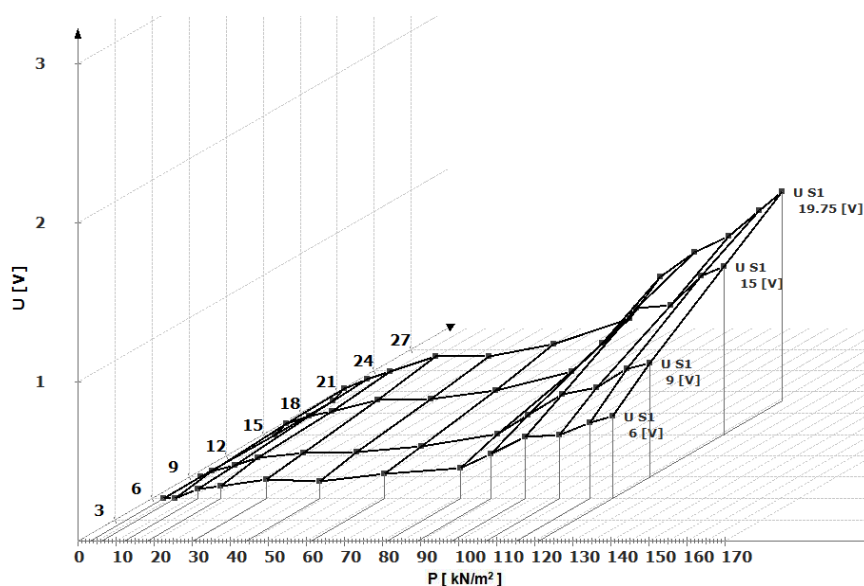
Формула за сегменте 0 до 4, 4 до 5 и 5 до 6 дата је следећим изразом:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.10)$$

а коефицијенти имају вредности: за сегмент 0 до 4: $a_1 = 0.0083$, $a_0 = 0.0080$,
за сегмент 4 до 5: $a_1 = 0.0040$, $a_0 = 0.0932$ и за сегмент 5 до 6: $a_1 = 0.0243$, $a_0 = -1.5373$.

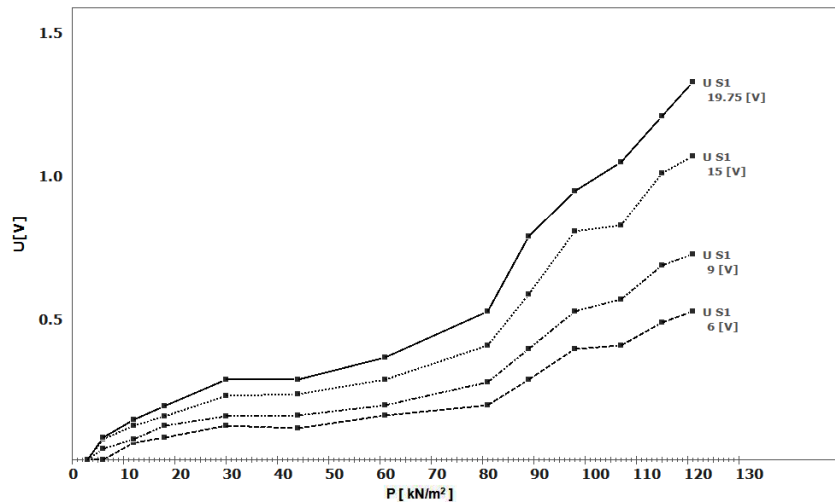
Мерења на узорку AlSi12 са троугаоним обликом сигнала

Дијаграм на слици 4.37 приказује резултате мерења када је одашиљачка глава нападана троугаоним обликом сигнала.



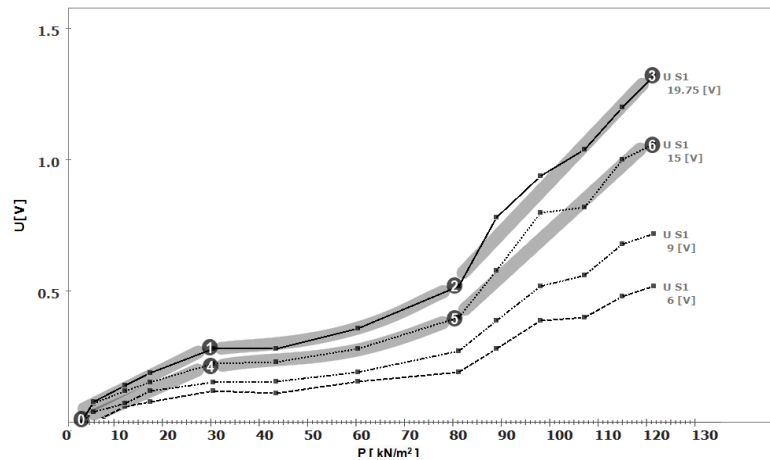
Слика 4.37 3D дијаграм напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, троугаони сигнал S_1 .

Дијаграм 4.38 је 2D верзија дијаграма 4.37. Ови дијаграми најпре приказују како се под притиском на глави P_1 у износу од $6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ генеришу амплитуде напона само незнатно изнад нуле. Даљим повећањем притиска, генерисани амплитуде напона на глави P_1 почињу да се линеарно повећавају, све до притиска од $30 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. Овде се достижу максимални напони од $0,12 \text{ V}$ до $0,28 \text{ V}$. Повећањем притиска од $30 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ до $81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, пораст амплитуда напона на глави P_1 је и даље линеаран, али мења ток и нагиб је мањи. При напону побуде од 6 V , генерисана амплитуда која одговара притиску од $30 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ износи $0,12 \text{ V}$, а при притиску од $81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ повећа се на $0,19 \text{ V}$. Под напоном побуде од 9 V амплитуда се повећа са $0,15 \text{ V}$ на $0,27 \text{ V}$. Код побуде од 15 V настаје повећање од $0,22 \text{ V}$ на $0,4 \text{ V}$, а побуди од $19,75 \text{ V}$ одговара пораст са $0,28 \text{ V}$ на $0,52 \text{ V}$. И код овог експеримента је притисак од $81 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ карактеристична тачка где долази до измене и повећања нагиба при такође линеарном току. Све до притиска од $121 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ амплитуда генерисаног напона у P_1 , узрокован побудом од 15 V , повећа се са $0,4 \text{ V}$ на $1,06 \text{ V}$, а побуда од $19,75 \text{ V}$ доводи до пораста амплитуде напона са $0,52 \text{ V}$ на $1,32 \text{ V}$.



Слика 4.38 Напон на глави P_1 у зависности од притиска, AlSi12 са дефектом, троугаони сигнал S_1 .

Као и код претходних експеримената, на слици 4.39, приказани су графици мерења, где су дијаграми амплитуда напонских нивоа одашиљача од 15V и 19,7V. Означени су сегменти за које ће се извести фитовање са назнаком симболима од 0 до 6.



Слика 4.39 Сегменти дијаграма напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом, троугаони сигнал.

Слика 4.40. приказује фитовање сегмената између карактеристичних тачака од 0 до 3. Формула фитовања за сегмент 0 до 1 дата је следећим изразом:

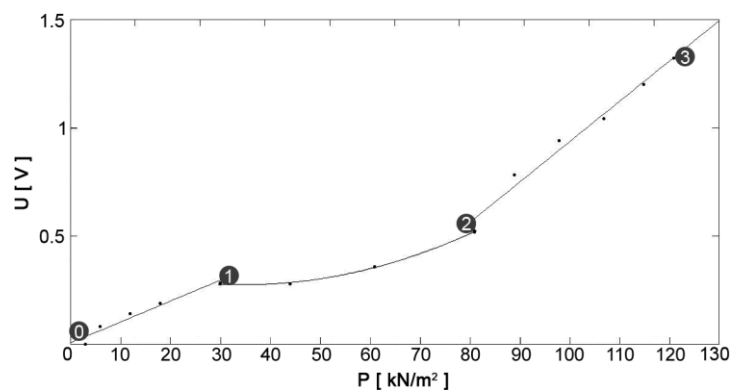
$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.11)$$

Коефицијенти износе: $a_1 = 0.0097$, $a_0 = 0.0043$.

Формула фитовања за сегмент 1 до 2 дата је изразом:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.12)$$

Коефицијенти износе: $a_2 = 0.00011378$, $a_1 = -0.007853$ и $a_0 = 0.41094$.



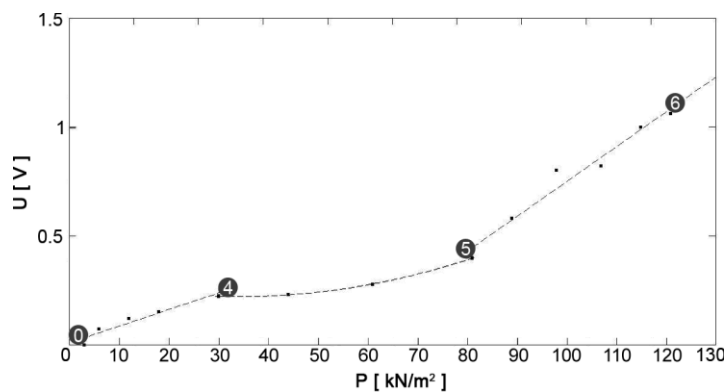
Слика 4.40. Карактеристичне тачке напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом 19,75 V , троугаони сигнал

Формула фитовања за сегмент 2 до 3 дата је изразом:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.13)$$

Коефицијенти износе: $a_1 = 0.0187$, $a_0 = -0.9329$.

Слика 4.41. приказује фитовање сегмената између тачака 0, 4, 5 и 6.



Слика 4.41 Карактеристичне тачке напона на глави P_1 , AlSi12 са дефектом 15 V , троугаони сигнал.

Формула фитовања за сегмент 0 до 4 дата је следећим изразом:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.14)$$

Коефицијенти износе: $a_1 = 0.0076$, $a_0 = 0.0091$.

Формула фитовања за сегмент 4 до 5 дата је изразом:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.15)$$

Коефицијенти износе: $a_2 = 0.0001$, $a_1 = -0.0055$, $a_0 = 0.3174$.

Формула фитовања за сегмент 5 до 6 дата је изразом:

$$U = a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.16)$$

Коефицијенти износе: $a_1 = 0.0160$, $a_0 = -0.8512$.

4.4.3 Упоредивање резултата мерења на узорку AlSi12

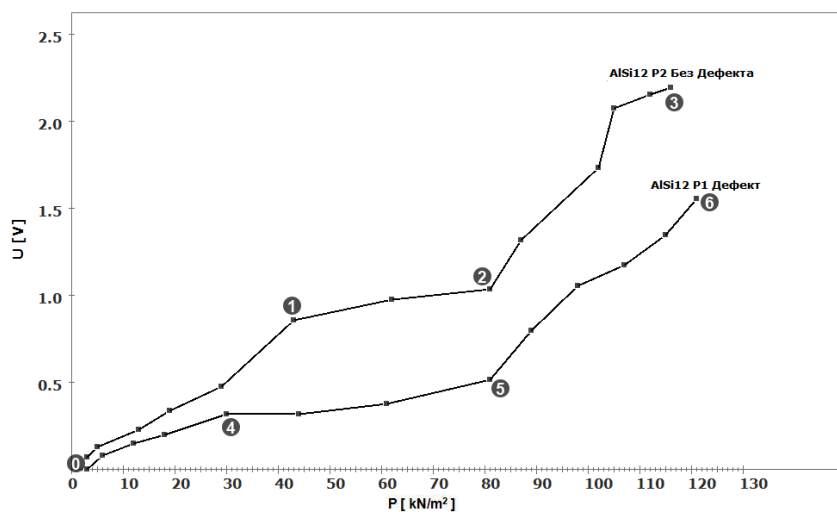
У презентацији резултата, до сада су показана мерења код узорка AlSi12 у експериментима са и без дефекта, уз промене притиска над одашиљачком ултразвучном главом, уз промене облика сигнала и амплитуда напона којом је она напајана. Приликом међусобних поређења резултата мерења код узорка AlSi12, могуће су разне комбинације, а има посебног смисла да се пореде резултати мерења AlSi12 без дефекта са резултатима мерења AlSi12 са дефектом. У презентацији и анализи појединачних упоређења, циљ је да се провери прихватљивост мерења. Прихватљиво је када резултати мерења без дефекта у упоређењу са резултатима мерења са дефектом, покажу како су унутар целокупног тока појединачних графика, вредности амплитуда напона које генерише пријемна ултравучна глава изнад квадранта са дефектом заиста мање од амплитуда напона изнад квадранта узорка који не садржи дефект. Даљи важан циљ упоређивања мерења је да се докаже да је могуће пронаћи опсег механичког притиска на ултразвучне главе, унутар кога притисак може да у што већој мери варира, а да то изазива што мање измене амплитуда напона унутар пријемних глава. На графицима је тада функција $U(p)$ линеарна а нагиб праве треба да је што мањи. Додатно је пожељно, да и у случају када нема дефекта и у случају када има дефекта постоји што шира област притисака када су оба графика приближно паралелна.

Сва мерења која се овде упоређују, изведена су без употребе контактних средстава. На крају овог поглавља ће се приказати и коментарисати упоредно дијаграми за сва три различита облика сигнала напајања одашиљачке ултразвучне главе S_1 : синусни, правоугаони и троугаони, при чему ће сваки од ове три врсте дијаграма приказати ситуацију исте амплитуде напона побуде и над истим квадрантом узорка. Код упоређења сигналних облика постоје разне комбинације, с обзиром на четири вредности амплитуде напона побуде изнад квадранта без дефекта и исто толико за квадрант са дефектом. Пошто су резултати ове врсте упоређивања веома слични, у овом поглављу ће се приказати само два случаја.

Упоредивање мерења на узорку AlSi12 са синусним обликом сигнала

Дијаграм на слици 4.42 је први у категорији међусобних упоређења резултата мерења над узорком AlSi12. Овде се пореде резултати експеримента мерења амплитуда напона пријемне ултразвучне главе над сегментом који не садржи дефект са амплитудом напона пријемне ултразвучне главе над сегментом који садржи уграђени дефект. Овај дијаграм представља комбинацију одговарајућих дводимензионалних

графика из поглавља презентације резултата мерења над узорком AlSi12 са синусним обликом сигнала и напоном од 19,75 V .



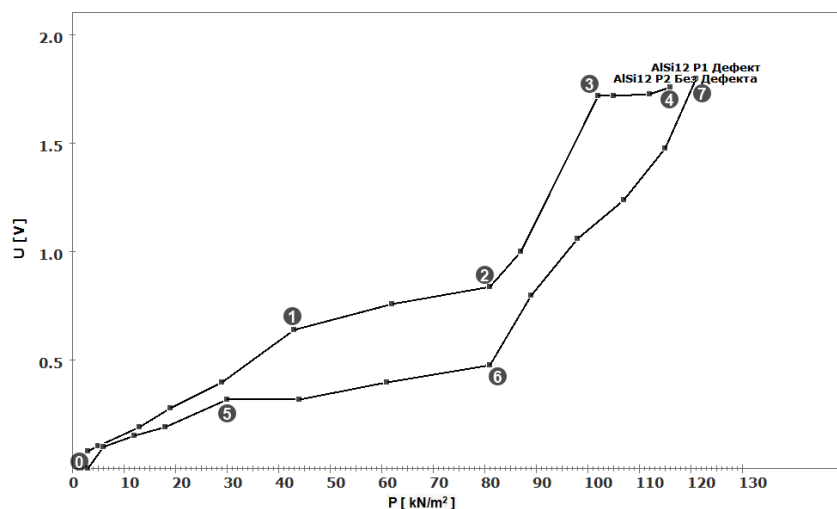
Слика 4.42 Упоредњење напона на пријемној глави за узорак AlSi12 без дефекта и са дефектом, 19,75 V , синусни сигнал.

Крива са ознакама 0-1-2-3 представља резултате мерења над сегментом без дефекта, а крива испод ње који носи ознаке 0-4-5-6, представља резултате мерења над сегментом са дефектом. Упоредњење ова две криве показује да су унутар целокупног тока оба графика, вредности амплитуда напона које генерише пријемна ултравучна глава изнад сегмента без дефекта веће од амплитуда изнад сегмента са дефектом. Ово је доказ примарне хипотезе овога рада да је процена исправности високо порозног и шупљикавог материјала који је синтерован методом директног ласерског синтеровања, могућа применом методе квадрофонске трансмисионе ултразвучне дефектоскопије KTUD. Са циљем налажења опсега механичког притиска на ултразвучне главе, унутар кога притисак може да се мења, а да то изазива само мале измене амплитуда напона унутар пријемних глава и да је тај опсег примењив, како у случају када узорак не садржи дефект, тако и у случају када узорак садржи дефект, уочљив је изузетно повољан опсег притисака између тачака 1 и 2 за и опсег притисака између тачака 4 и 5. Ради се о опсегу од $43 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. На позицији притиска од $43 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на пријемнику која одговара сегменту без дефекта има вредност $0,86 \text{ V}$, а при истом притиску, измерена амплитуда пријемника која одговара сегменту са дефектом износи $0,32 \text{ V}$, што значи да уграђени дефект уноси разлику амплитуда пријемника од $0,54 \text{ V}$. На другом крају уоченог опсега притисака ($81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$) амплитуда пријемника која одговара сегменту без дефекта има вредност $1,04 \text{ V}$, а при истом притиску, измерена амплитуда пријемника која одговара сегменту са дефектом износи $0,52 \text{ V}$, што значи да уграђени дефект уноси разлику амплитуда пријемника од

0,52 V . Додатно је повољно да на овом опсегу притисака постоји приближна паралелност горњег и доњег тока графика. То доводи до закључка да је унутар опсега притиска од $43 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, разлика пријемних амплитуда настала услед присуства дефекта приближно константна и износи око 0,5 V .

Упоредивање мерења на узоку AlSi12 са правоугаоним обликом сигнала

На слици 4.43 је приказан дијаграм упоређења мерења над узорком AlSi12. Ради се о комбинацији одговарајућих дводимензионалних графика за које је урађено фитовање, из поглавља презентације резултата и анализе резултата мерења AlSi12 са правоугаоним обликом сигнала и напоном од 19,75 V . График са ознакама 0-1-2-3-4 представља резултате мерења над сегментом без дефекта а график испод њега, са ознакама 0-5-6-7, представља мерене резултате над сегментом са дефектом. И у овом случају су амплитуде напона ултразвучних глава сегмента без дефекта, веће од амплитуда напона над сегментом са дефектом. Повољни опсег притисака налази се између тачака 1 и 2 и тачака 5 и 6, а повољно је и то што су у опсегу притиска од $43 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, горњи и доњи ток приближно паралелни.

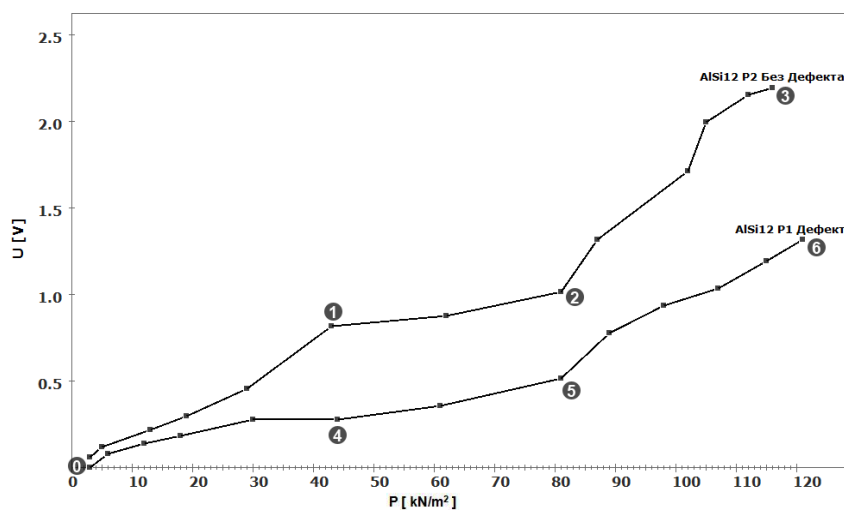


Слика 4.43 Упоредивање мерења напона на пријемној глави за узорак AlSi12 без дефекта и са дефектом, 19,75 V , правоугаони сигнал.

Упоредивање мерења на узорку AlSi12 са троугаоним обликом сигнала

На слици 4.44. је приказан дијаграм упоређења мерења над узорком AlSi12. Овај дијаграм је комбинација одговарајућих дводимензионалних графика за које је урађено фитовање, из поглавља презентације резултата и анализе резултата мерења AlSi12, са троугаоним обликом сигнала и напоном од 19,75 V . График са ознакама 0-1-2-3-4 представља резултате мерења над сегментом без дефекта а график испод њега, са ознакама 0-5-6-7, представља мерене резултате над сегментом са дефектом. Упоредивање

показује да су и у овом случају амплитуда напона пријемних ултразвучних глава изнад сегмента без дефекта, веће од амплитуда напона над сегментом са дефектом.

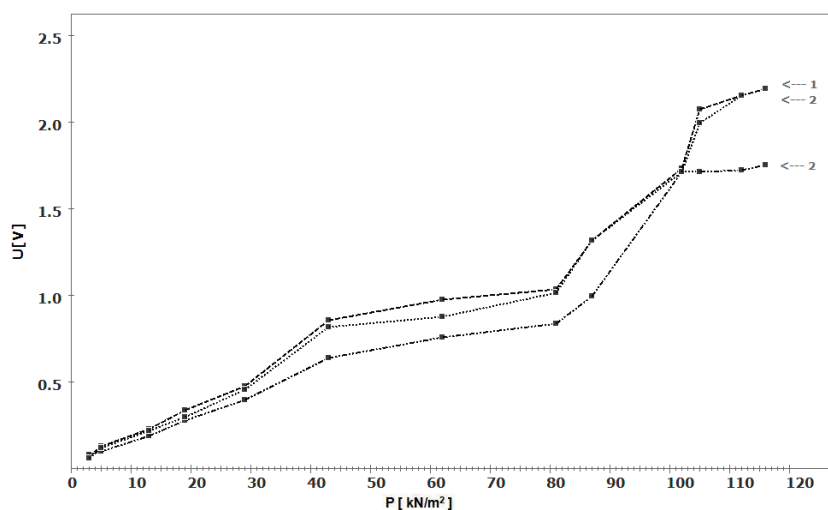


Слика 4.44 Упоређење напона на пријемној глави за узорак AlSi12 без дефекта и са дефектом, 19,75 V , троугаони сигнал.

Повољан опсег притисака на ултразвучној глави унутар кога може доћи до варирања, а да то не изазива знатне измене амплитуда напона пријемних глава, је између тачака 1 и 2 и тачака 4 и 5. Повољно је и то што су у опсегу притиска од $43 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, горњи и доњи ток функције приближно паралелни.

Упоређивање различитих сигналних облика мерења на узорку AlSi12

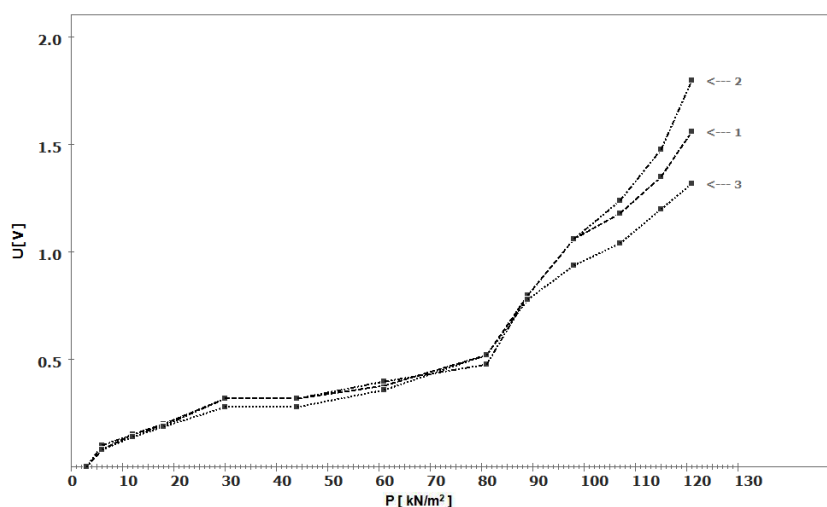
Тема овог поглавља је упоређивање резултата сва три примењена облика сигнала напајања одашиљачке ултразвучне главе: синусоиде, правоугаоника и троугла, тј. њихов утицај на амплитуде напона пријемних глава.



Слика 4.45 Упоређење напона на пријемнику P_2 за сва три облика сигнала (1-синусни, 2-правоугаони и 3-троугаони), AlSi12 без дефекта, 19,75 V .

Потребно је нагласити, да мерне вредности које се у овој врсти дијаграма приказују, нису неке нове вредности које до сада нису биле приказане.

Досадашња анализа резултата експеримената је показала, да су најповољнији токови графика, у смислу токова са најмањим нагибом и највећим амплитудама напона на пријемнику, добили при амплитуди напона побуде од $19,75\text{ V}$. Зато ће се у овом поглављу упоређења сигналних облика, коментарисати дијаграм упоређења мерења код узорка AlSi12 без дефекта који је приказан на слици 4.45 и дијаграм упоређења мерења код узорка AlSi12 са дефектом, који је приказан на слици 4.46.



Слика 4.46 Упоређење напона на пријемнику P_1 за сва три облика сигнала (1-синусни, 2-правоугаони и 3-троугаони), AlSi12 са дефектом, $19,75\text{ V}$.

У оба случаја напон побуде одашиљачке ултразвучне главе износи $19,75\text{ V}$. Унутар дијаграма су графици различитих сигналних облика означени са: 1-синусни, 2-правоугаони и 3-троугаони сигнални облик. Из оба дијаграма се види да вредности амплитуда напона које генерише пријемна ултравучна глава, како изнад квадранта са дефектом тако и изнад квадранта без дефекта, у случају узорка AlSi12 немају велике разлике. Изнад квадранта без дефекта разлика амплитуда унутар опсега од $43\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ износи око $0,2\text{ V}$, а свега око $0,04\text{ V}$ када има дефекта.

Анализа која се тиче сва три сигнална облика, унутар опсега од $43\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, показује изузетно повољан ток код оба графика, приближно линеарног и са ваома малим нагибом.

4.5 Резултати и анализа резултата мерења над узорком AlMg3

У претходном поглављу 4.4 „Резултати и анализа резултата мерења на узорку AlSi12“, су представљени резултати истраживања на материјалу AlSi12, као представнику материјала над којима се спроводе најактуелнија истраживања. Зато је аналогно поступку мерења над узорком AlSi12 изведен комплетан експериментални и аналитички поступак над упоредним узорком који је типичан представник конвенционалних алуминијумских легура AlMg3. Овај материјал се налази у широкој примени у производњи машинских делова за ваздухопловство, орбиталне сателите и у другим индустријским областима.

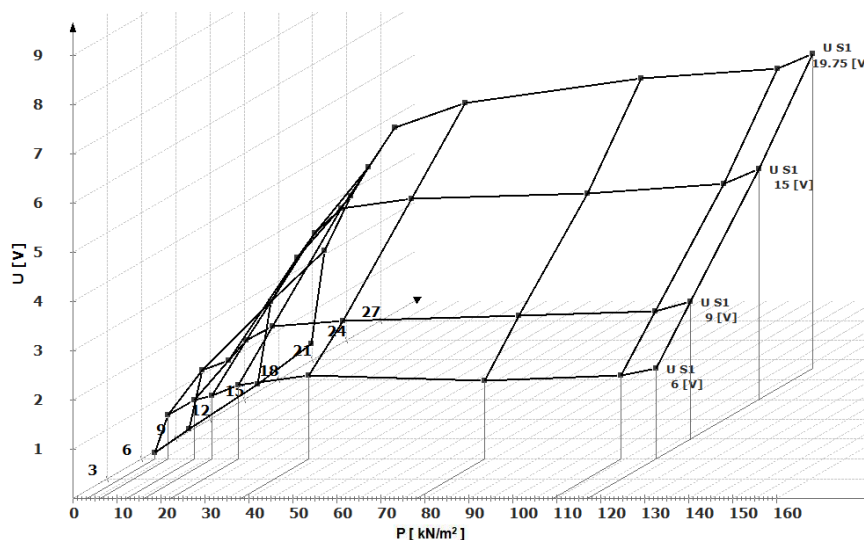
Аналогно поглављу „Резултати и анализа резултата мерења на узорку AlSi12“, и у овом поглављу се детаљно презентују експериментални резултати и анализа резултата мерења над узорком AlMg3. Ово поглавље најпре приказује резултате мерења утицаја механичког притиска без дефекта, а затим резултате мерења са дефектом. И овде се прво приказује 3D дијаграм мерења изведених над узорком а затим се ближе коментарише дводимензионална верзија. Такође се прецизирају детаљи различитих напонских нивоа подељени на сегменте и показује се њихово фитовање.

Одсечак „Резултати мерења утицаја механичког притиска без дефекта“ се дели на три дела који се тичу мерења са синусним, правоугаоним и троугаоним обликом сигнала. У одсечку „Резултати мерења са дефектом“ се поступа аналогно. Посебност овог поглавља у поређењу са одговарајућим поглављем о материјалу AlSi12, је део „Резултати мерења утицаја механичког притиска са дефектом“. Ради се о томе да је код материјала AlMg3, за разлику од AlSi12, било могуће уградити чеп и тиме су изведене симулације разних запремина дефекта. На тај начин се дошло се до веома вредних додатних закључака о способностима KTUD методе и дефектоскопа који се базира на њој. Овде се презентирају резултати тих експеримената, и то у стандардној подели на дијаграме три сигнална облика.

4.5.1 Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорку AlMg3 без дефекта

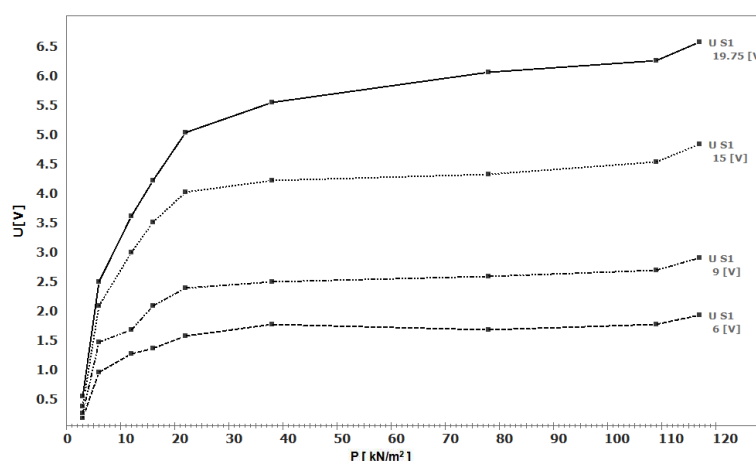
Мерења на узорку AlMg3 са синусним обликом сигнала

Резултати експерименталних мерења синусним обликом сигнала побуде изведених над узорком AlMg3, приказани су на слици 4.47. у облику 3D дијаграма.



Слика 4.47 3D дијаграм напона на глави P_2 , AlMg3 без дефекта, синусни сигнал S_1 .

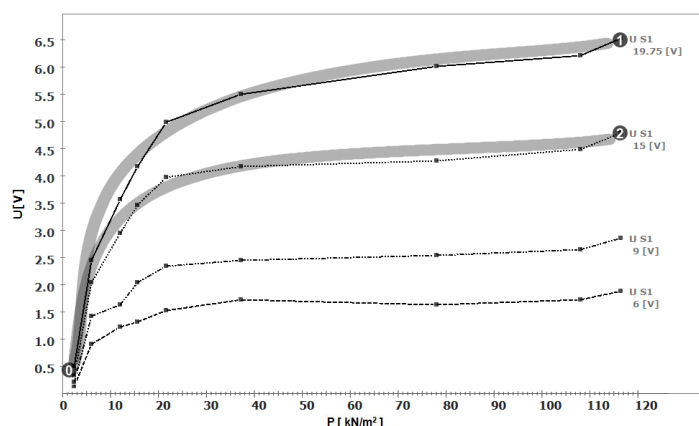
Као и код мерења узорка AlSi12 и код узорка од конвенционалне легуре алуминијума AlMg3, пријемна ултразвучна глава P_2 се налази над квадрантом узорка који не садржи дефект, па се на u -оси приказују вредности амплитуда напона које под датим условима генеришу на глави P_2 . На z -оси се налазе амплитуде напона напајања одашиљачке главе S_1 .



Слика 4.48 Напон на глави P_2 у зависности од притиска, AlMg3 без дефекта, синусни сигнал S_1 .

Дводимензионална верзија овог дијаграма је приказана на слици 4.48. Амплитуде напона од 6 V, 9 V, 15 V и 19,7 V под којима је стајала одашиљачка глава

S_1 забележене су респективно. Дијаграми показују, како сва четири напонска нивоа одашиљачке ултразвучне главе S_1 одмах након повећања притисака изнад $6 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ доводе до приметно растућих амплитуда напона пријемне ултразвучне главе P_2 . Већ при притиску од $12 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуде напона на глави P_2 износе $1,2 \text{ V}$ до $3,5 \text{ V}$. Даљим повећањем притиска на глави P_2 до $22 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона пријемне ултразвучне главе P_2 и даље брзо расте. При напону од 15 V главе S_1 и притиску од $22 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на P_2 износи $3,9 \text{ V}$, а при напону S_1 од $19,75 \text{ V}$ и истом притиску, амплитуда напона на P_2 је $4,9 \text{ V}$.



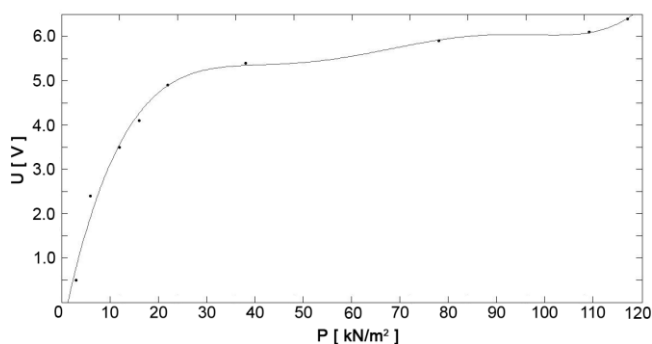
Слика 4.49. Сегменти дијаграма напона на глави P_2 , $AlMg3$ без дефекта, синусни сигнал.

Након тога, при даљем повећању притиска регистрован је благ пораст амплитуда напона на P_2 , све до максималног притиска који је у овом експерименту примењен, од $117 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. При притиску од $38 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона пријемне ултразвучне главе P_2 , под 15 V побуде достиже $4,1 \text{ V}$, а под побудним напонем од $19,75 \text{ V}$, амплитуда напона на глави P_2 износи $5,4 \text{ V}$. Под истим притиском, када се одашиљач S_1 напаја напонем од 6 V , амплитуда напона на P_2 износи $1,7 \text{ V}$, под напонем побуде од 9 V , P_2 генерише $2,4 \text{ V}$. При максималном притиску од $117 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на P_2 под 15 V побуде достиже $4,7 \text{ V}$ а под $19,75 \text{ V}$ побуде, амплитуда напона на P_2 износи целих $6,4 \text{ V}$. На истом нивоу притиска од $117 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, када се S_1 напаја са 6 V , амплитуда напона генерисаног на P_2 има вредност од само $1,85 \text{ V}$, а под 9 V , глава P_2 генерише напон од $2,8 \text{ V}$. Амплитуде напона генерисаних у пријемној глави P_2 , под напонима побуде од 15 V и $19,75 \text{ V}$ достижу знатно веће интензитета него под напонима побуде од 6 V и 9 V , што је разлог да се даља анализа добијених вредности (тј. фитовање) изведе над мерењима добијених са амплитудама напона побуде од 15 V

и 19,75 V. На слици 4.49 су графици мерења напонских нивоа од 15 V и 19,75 V подељени на сегменте за које је изведена нумеричка анализа. Ради постизања могућности даљег једнозначног референцирања карактеристичних позиција уцртани су симболи у облику малих кругова са бројчаним ознакама аналогно поступку код материјала AlSi12. Слика 4.50. показује фитовање сегмената између карактеристичних тачака 0 и 1, што одговара сегменту дијаграма 4.49. при напону S_1 од 19,75 V. Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 1 гласи:

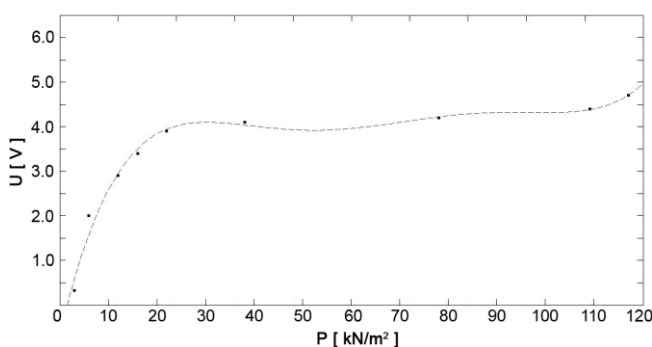
$$U = a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.17)$$

при чему коефицијенти износе: $a_4 = -3.3792e-007$; $a_3 = 9.6734e-005$; $a_2 = -0.0096174$; $a_1 = 0.39661$ и $a_0 = -0.14234$.



Слика 4.50 Фитовање напона на глави P_2 , сегмент од 0 до 1, AlMg3, без дефекта, 19,75 V, синусни сигнал.

Функција фитовања на сегменту између карактеристичних тачака 0 и 2 приказана на слици 4.51 је веома слична са функцијом између карактеристичних тачака 0 и 1.



Слика 4.51. Фитовање напона на глави P_2 , сегмент од 0 до 2, AlMg3, без дефекта, 15 V, синусни сигнал.

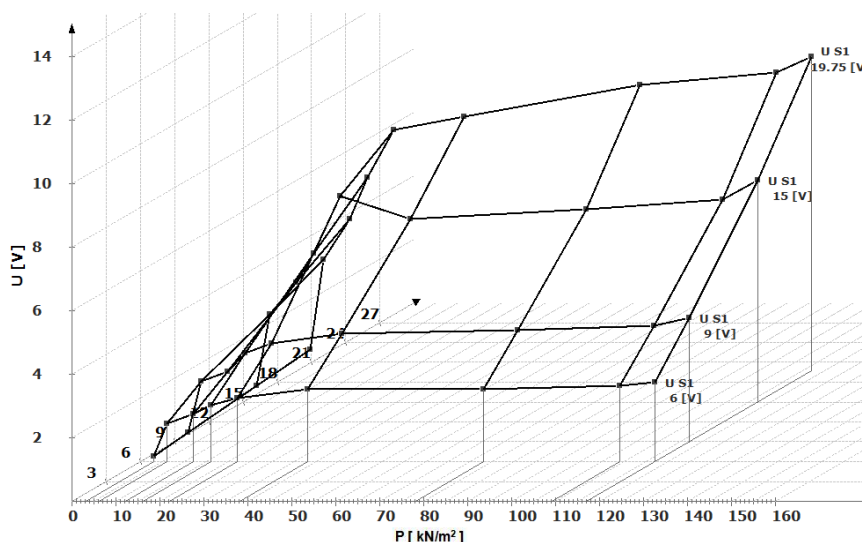
Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 2 гласи:

$$U = a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.18)$$

при чему коефицијенти износе: $a_5 = 6.3718e-009$; $a_4 = -2.2013e-006$; $a_3 = 0.00028632$; $a_2 = -0.017214$; $a_1 = 0.47238$; $a_0 = -0.68318$.

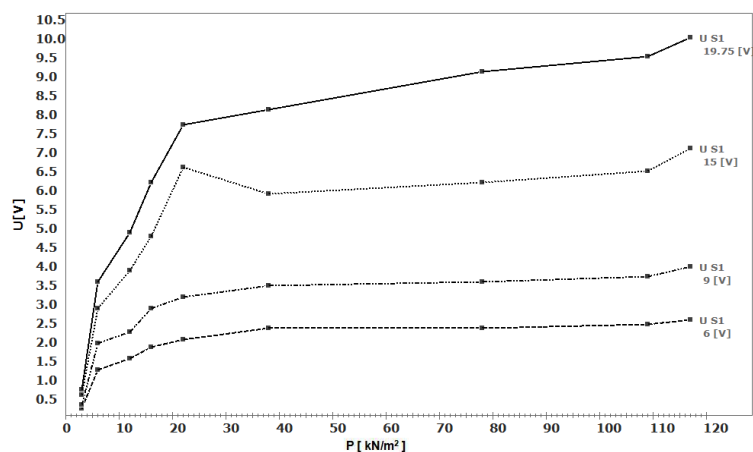
Мерења на узорку AlMg3 са правоугаоним обликом сигнала

На слици 4.52 дат је 3D приказ мерења узорка AlMg3 над квадрантом узорка који не садржи дефект. Овог пута се ултразвучна глава напаја правоугаоним обликом сигнала побуде. Механички притисак на пријемну главу P_2 је приказан по x -оси, на y -оси су приказане вредности генерисаних амплитуда пријемне ултразвучне главе P_2 , а на z -оси су амплитуде напона напајања одашиљача S_1 .



Слика 4.52 3D дијаграм напона на глави P_2 , AlMg3 без дефекта, правоугаони сигнал S_1 .

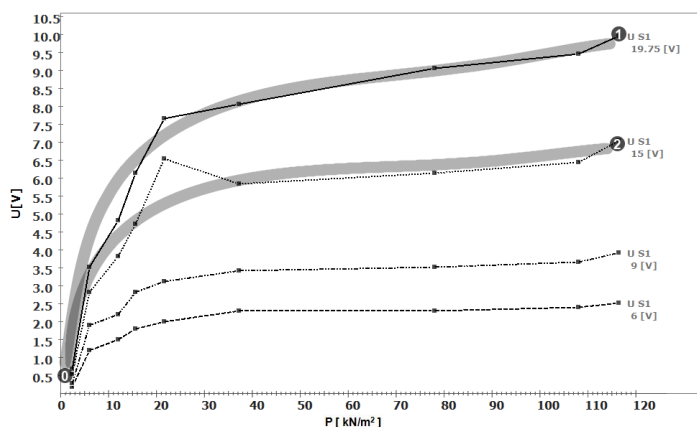
Дводимензионална верзија дијаграма 4.52 је приказана на слици 4.53, при чему су напони напајања ултразвучне главе забележени респективно.



Слика 4.53 Напон на глави P_2 у зависности од притиска, AlMg3 без дефекта, правоугаони сигнал S_1 .

На дијаграмима се види како при одговарајућим напонима побуде одашиљача S_1 , већ након минималног повећања притиска долази до великог пораста амплитуде

пријемника P_2 . Тако при притиску од $3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_2 износе од $0,19 \text{ V}$ до $0,68 \text{ V}$. При напону од 15 V главе S_1 и притиску од $22 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, глава P_2 генерише $6,5 \text{ V}$, а при истом притиску и напону на S_1 од $19,75 \text{ V}$, амплитуда напона на глави P_2 достиже $7,6 \text{ V}$. При повећању притиска од $22 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ па све до максималног притиска од $117 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ регистрован је благ пораст амплитуда напона на глави P_2 . При притиску од $38 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона пријемне ултразвучне главе P_2 , под 15 V побуде достиже $5,8 \text{ V}$, а под напоном побуде од $19,75 \text{ V}$, амплитуда напона на глави P_2 достиже 8 V . Под истим притиском, од $38 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, када се одашиљач напаја са 6 V , амплитуда напона на глави P_2 износи $2,3 \text{ V}$, а под напоном побуде од 9 V , глава P_2 под овим притиском генерише напон од $3,4 \text{ V}$.

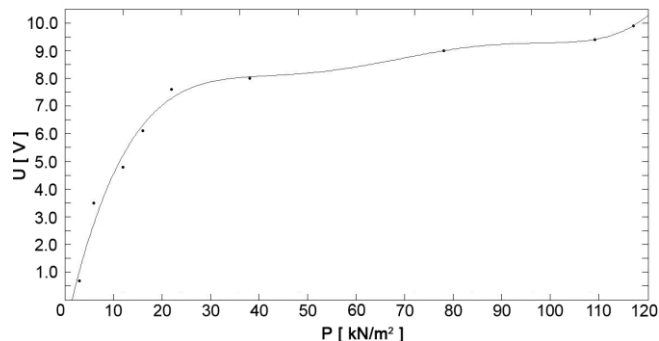


Слика 4.54 Сегменти дијаграма напона на глави P_2 , $AlMg3$ без дефекта, правоугаони сигнал S_1 .

При максималном притиску од $117 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_2 под 15 V побуде достиже 7 V а под $19,75 \text{ V}$ побуде, амплитуда на глави P_2 износи $9,9 \text{ V}$. При истом притиску, $117 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, када се S_1 напаја са 6 V , напон на глави P_2 има интензитет $2,5 \text{ V}$, а под 9 V , глава P_2 генерише напон од $3,9 \text{ V}$. Као и у свим варијантама експериментисања до сада, и у овој варијанти амплитуде напона побуде од 15 V и $19,75 \text{ V}$ у поређењу са резултатима амплитуде напона побуде од 6 V и 9 V доводе до већих интензитета напона на глави P_2 . Стога се као и у случају анализе мерења синусним сигналом, нумеричка анализа мерних резултата изводи на основу дијаграма који одговарају амплитудама напона на извору S_1 од 15 V и $19,75 \text{ V}$.

Дијаграм 4.54 показује маркиране графике мерења напонских нивоа од 15 V и 19,7 V за које је изведено фитовање. Ради једнозначног референцирања карактеристичних позиција и овде су уцртани симболи са бројчаним ознакама.

Дијаграм 4.55. показује график фитовања за сегмент од 0 до 1.



Слика 4.55 Фитовање напона на глави P_2 , сегмент од 0 до 1, AlMg3, без дефекта, 19,75 V, правоугаони сигнал.

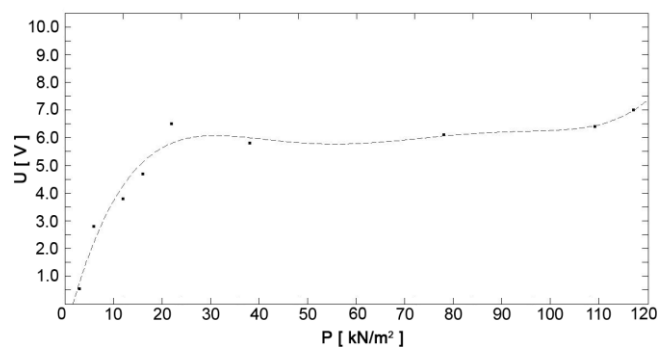
Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 1 гласи:

$$U = a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.19)$$

а одговарајући коефицијенти су: $a_5 = 9.4137e-009$; $a_4 = -3.2748e-006$; $a_3 = 0.00043144$; $a_2 = -0.0267$; $a_1 = 0.79288$; $a_0 = -1.113$.

И у овој варијанти, фитовање између тачака 0 и 2 је веома слично претходном, с том разликом да је у области притисака од $22 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ до $109 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ боља линеарност.

Слика 4.56. показује график настао фитовањем на сегменту од 0 до 2.



Слика 4.56 Фитовање напона на глави P_2 , сегмент 0 до 2, AlMg3, без дефекта, 15 V, правоугаони сигнал.

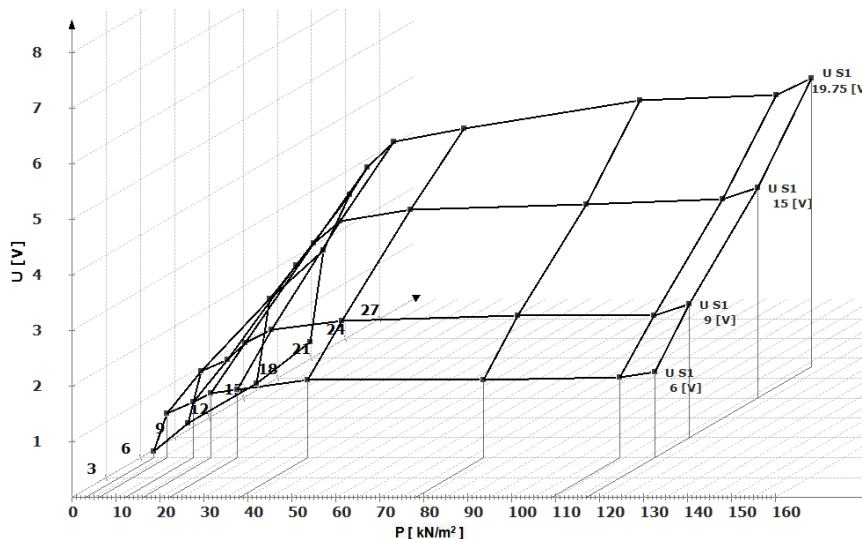
Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 2 гласи:

$$U = a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.20)$$

Овде коефицијенти износе: $a_5 = 8.6136e-009$; $a_4 = -3.0021e-006$; $a_3 = 0.00039701$; $a_2 = -0.024454$; $a_1 = 0.68969$; $a_0 = -1.1046$.

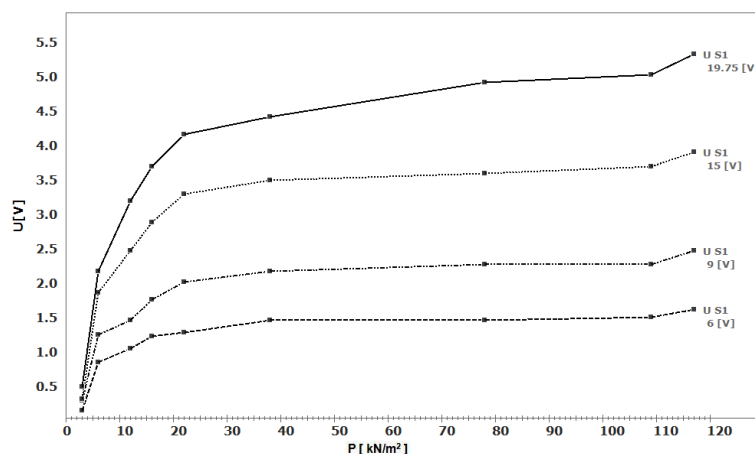
Мерења на узорку AlMg3 са троугаоним обликом сигнала

Дијаграм 4.57 је 3D приказ мерења на узорку AlMg3 у варијанти експерименталних мерења, када се одашиљачка ултразвучна глава напаја троугаоним обликом сигнала.



Слика 4.57 3D дијаграм напона на глави P_2 , AlMg3 без дефекта, троугаони сигнал S_1 .

И у овој варијанти мерења пораст амплитуде напона на пријемнику P_2 је регистрован већ при малим вредностима притиска.



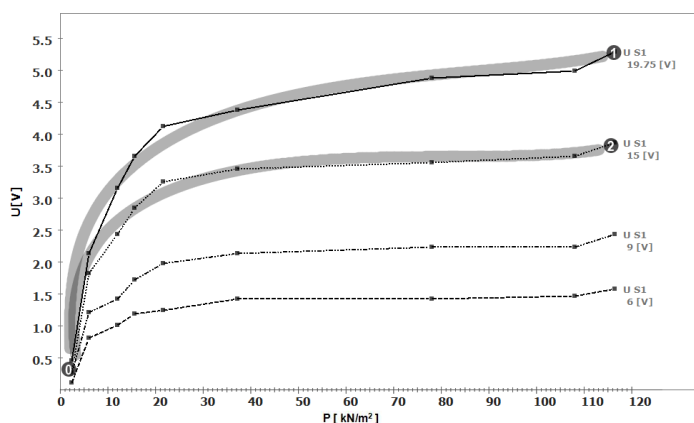
Слика 4.58 Напон на глави P_2 у зависности од притиска, AlMg3 без дефекта, троугаони сигнал S_1 .

При притиску од $22 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, амплитуда пријемне ултразвучне главе P_2 , под напонам побуде на S_1 од 6 V достиже 1,2 V, а под напонам побуде на S_1 од 9 V, глава P_2 генерише 1,9 V. Под истим притиском, када се одашиљач S_1 напаја напонам од 15 V, напон пријемника P_2 износи 3,2 V, а при напону побуде од 19,75 V, глава P_2

генерише 4 V . При максималном притиску који је овде примењен, од $117\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, напон на глави P_2 уз 15 V побуде, има интензитет од $3,8\text{ V}$ а при $19,75$ амплитуда напона на глави P_2 износи $5,2\text{ V}$. На истом нивоу притиска, када се извор S_1 напаја са 6 V , амплитуда напона на глави P_2 износи $1,55\text{ V}$, а при 9 V , глава P_2 генерише $2,4\text{ V}$. Амплитуде напона генерисаних у пријемној глави P_2 , при напонима побуде од 15 V и $19,75\text{ V}$ и овде достижу знатно веће интензитете него при напонима побуде од 6 V и 9 V .

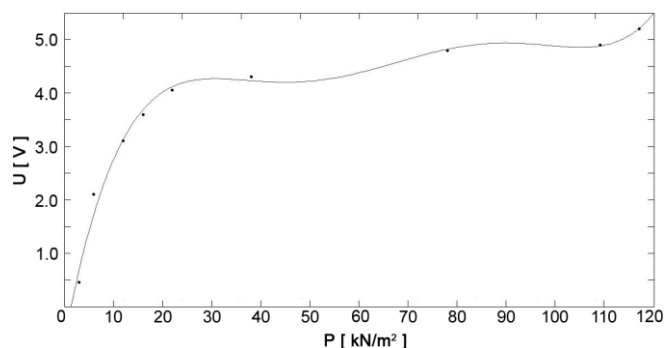
2D верзија дијаграма зависности напона од притиска измереног на глави P_2 је приказана на слици 4.58.

На слици 4.59. су приказани графици мерења напонских нивоа од 15 V и $19,7\text{ V}$ подељени на сегменте од 0 до 1 и од 1 до 2, за које су изведена фитовања.



Слика 4.59 Сегменти дијаграма напона на глави P_2 , $AlMg3$ без дефекта, троугаони сигнал S_1 .

Слика 4.60, показује фитовање између тачака 0 и 1, када амплитуда напона на одашиљачу S_1 износи $19,75\text{ V}$.



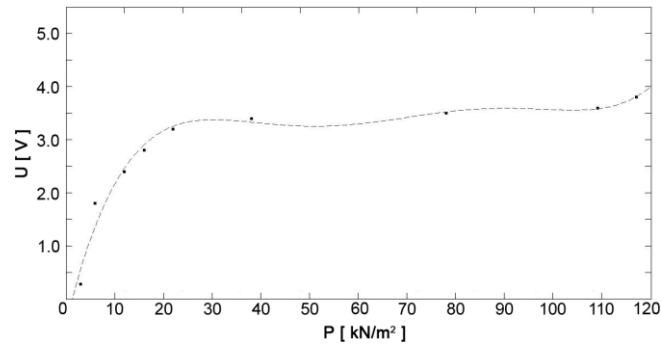
Слика 4.60 Фитовање напона на глави P_2 , сегмент од 0 до 1, $AlMg3$, без дефекта, $19,75\text{ V}$, троугаони сигнал.

Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 1 дата је изразом:

$$U = a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.21)$$

а одговарајући коефицијенти су $a_5= 7.6391e-009$; $a_4= -2.5844e-006$, $a_3= 0.00032571$;
 $a_2= -0.018795$; $a_1= 0.49817$; $a_0= -0.64751$.

Слика 4.61. показује фитовање између карактеристичних тачака 0 и 2.



Слика 4.61 Фитовање напона на глави P_2 , сегмент од 0 до 2, $AlMg3$, без дефекта, 15V, троугаони сигнал.

Формула добијена фитовањем за сегмент од 0 до 2 је:

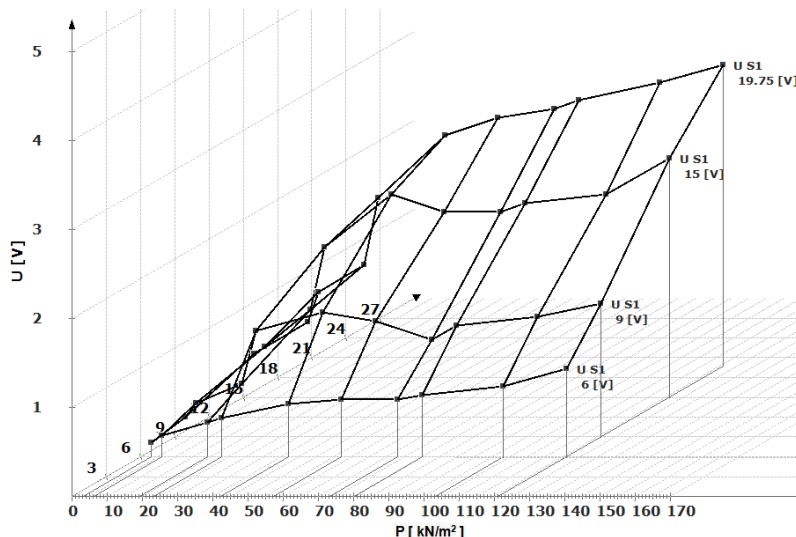
$$U = a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.22)$$

а одговарајући коефицијенти износе: $a_5= 5.2692e-009$; $a_4= -1.8152e-006$; $a_3= 0.00023473$;
 $a_2= -0.014007$; $a_1= 0.38199$; $a_0= -0.47241$.

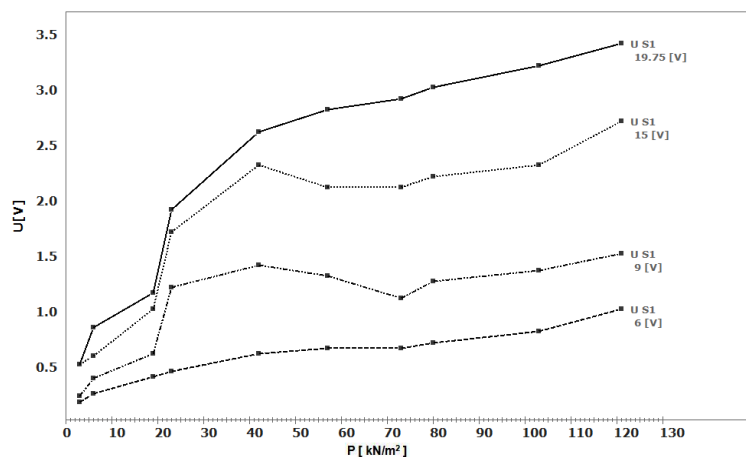
4.5.2 Резултати мерења утицаја механичког притиска на узорку AlMg3 са дефектом

Мерења на узорку AlMg3 са синусним обликом сигнала

Резултати мерења на узорку AlMg3 који садржи дефекат, приказани су на 3D дијаграму 4.62. Дводимензионална верзија је дата сликом 4.63.



Слика 4.62 3D дијаграм напона на глави P_1 , AlMg3 са дефектом, синусни сигнал S_1 .

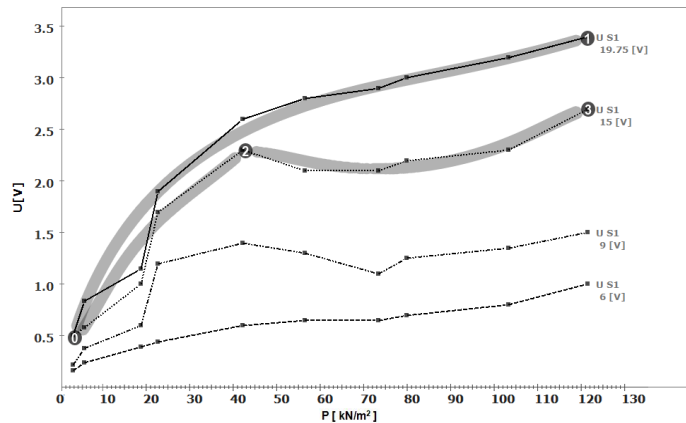


Слика 4.63 Напон на глави P_1 у зависности од притиска, AlMg3 са дефектом, синусни сигнал S_1 .

Док су амплитуде напона на глави P_1 које одговарају напонима побуде на извору S_1 од 6 V и 9 V и у овој експерименталној варијанти мали, амплитуде напона на глави P_1 које одговарају побудама од 15 V и 19,75 V су знатно веће. При максималном притиску од $121 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_1 која одговара 15 V побуде, достиже 2,7 V, а при напону побуде од 19,75 V, амплитуда напона на глави P_1 износи

3,4 V . При амплитуди напона побуде на извору S_1 од 15 V , почев од $57 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $103 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ уочен је веома повољан опсег притисака за које је график линеаран са малим нагибом.

Слика 4.64. приказује графике који одговарају напонским нивоима на извору S_1 од 15 V и 19,7 V . Подела на сегменте 0-1 и 0-2-3 је направљена ради извођења нумеричке анализе.

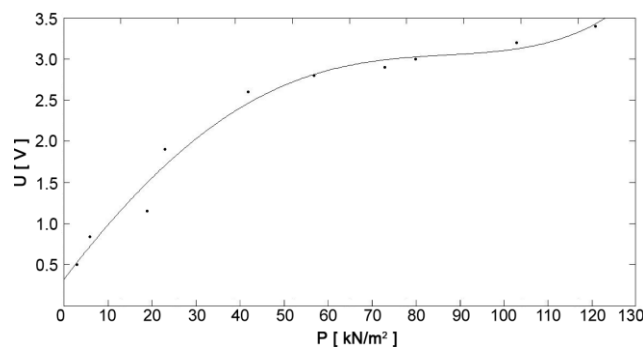


Слика 4.64. Сегменти дијаграма напона на глави P_1 , AlMg3 са дефектом, синусни сигнал.

Слика 4.65. показује фитовање на сегменту 0-1. Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 1 дата је изразом:

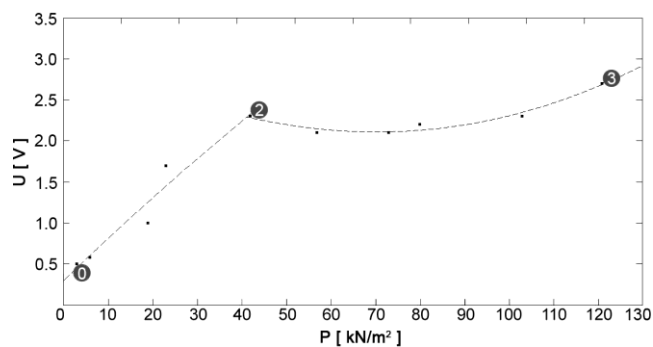
$$U = a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.23)$$

чији су коефицијенти: $a_4 = 2.7687e-008$; $a_3 = -3.5106e-006$; $a_2 = -0.00034336$; $a_1 = 0.069555$; $a_0 = 0.32088$.



Слика 4.65 Фитовање напона на глави P_1 , сегмент од 0 до 1, AlMg3, са дефектом, 19,75 V , синусни сигнал.

На дијаграму 4.66 је приказано фитовање за сегменте од 0 до 2 и од 2 до 3.



Слика 4.66 Фитовање напона на глави P_1 , сегменти од 0 до 2 и од 2 до 3, AlMg3, са дефектом, 15 V, синусни сигнал.

Формула фитовања за сегмент од 0 до 2 дата је изразом:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.24)$$

при чему су коефицијенти: $a_2 = -9.4715e-005$; $a_1 = 0.05229$; $a_0 = 0.29453$.

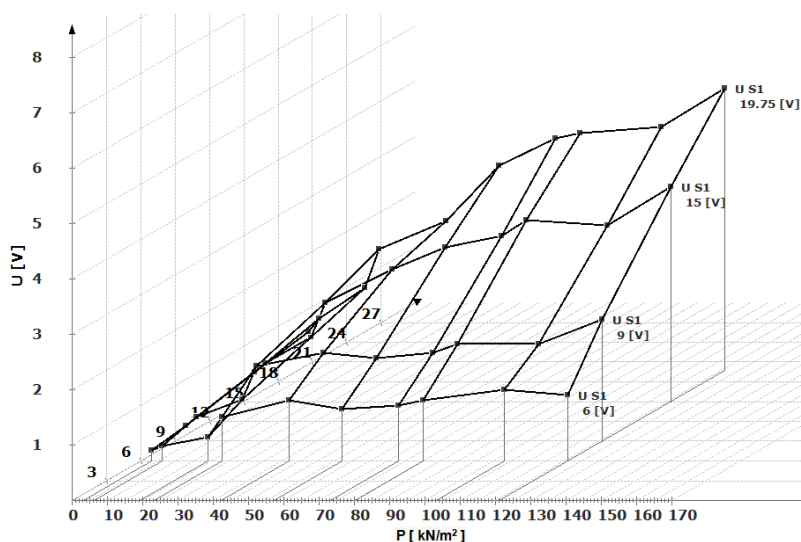
Формула фитовања за сегмент од 2 до 3 дата је изразом:

$$U = a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.25.)$$

а одговарајући коефицијенти износе: $a_3 = 1.3366e-007$; $a_2 = 0.00019047$; $a_1 = -0.028803$; $a_0 = 3.1457$.

Мерења на узорку AlMg3 са правоугаоним обликом сигнала

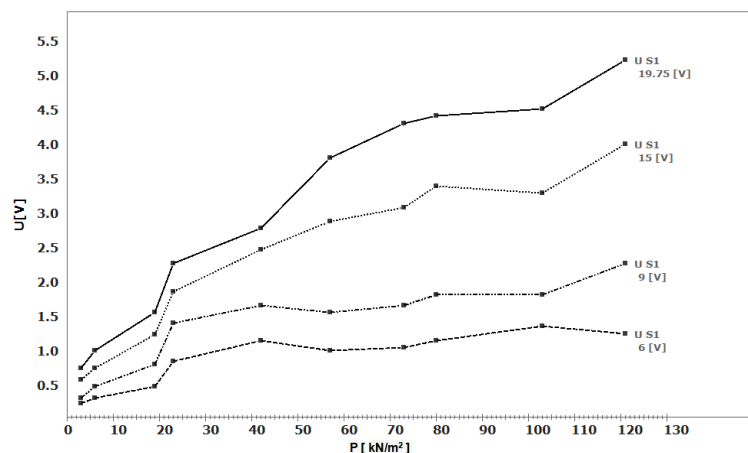
На слици 4.67 се налази 3D дијаграм као приказ мерења на узорку AlMg3 над квадрантом узорка који садржи дефект испод пријемне ултразвучне главе P_1 . Дводимензионална верзија дијаграма 4.67. је приказана на слици 4.68. У овој варијанти ултразвучна глава се напаја правоугаоним сигналним обликом. Токови пораста амплитуда напона у пријемној глави P_1 при различитим напонима побуде одашиљача S_1 имају доста сличности. Разлика је углавном у амплитудама генерисаних напона пријемних ултразвучних глава. Тако на пример при напону главе S_1 од 6 V и притиску од $23 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_1 износи 0,8 V, а при истом притиску и напону напајања S_1 од 9 V, напон на глави P_1 има амплитуду од 1,35 V.



Слика 4.67 3D дијаграм напона на глави P_1 , AlMg3 са дефектом, правоугаони сигнал S_1 .

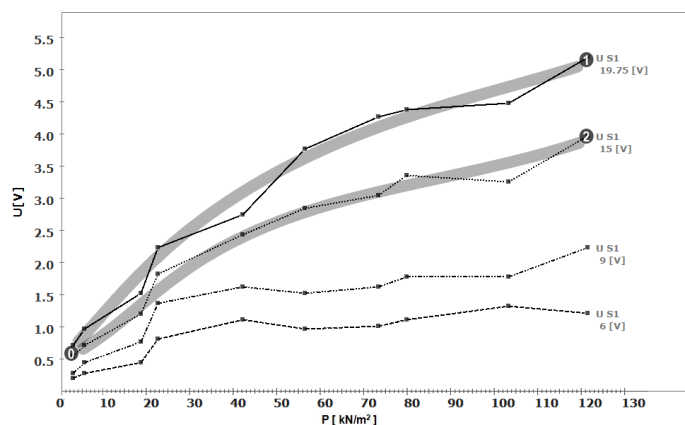
При напону од 15 V главе S_1 и притиску од $23 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_1 износи 1,8 V, а при истом притиску и напону S_1 од 19,75 V, амплитуда напона на глави P_1 достиже 2,2 V. При напону од 6 V главе S_1 и притиску од $73 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_1 износи 1 V, а при истом притиску и напону S_1 од 9 V, напон на глави P_1 има амплитуду од 1,6 V. При напону од 15 V главе S_1 и притиску од $73 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_1 износи 3 V, а при истом притиску и напону S_1 од 19,75 V, амплитуда напона на глави P_1 достиже 4,2 V. При максималном притиску од $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_1 при побуди од 15 V достиже 3,9 V а при побуди од 19,75 V амплитуда напона на глави P_1 износи

5,1 V . При истом притиску, $121 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, када се S_1 напаја са 6 V , амплитуда напона на глави P_1 је 1,2 V , а при побуди од 9 V , глава P_1 генерише максимални напон од 2,2 V . И у овој варијанти експерименталних мерења, амплитуде напона побуде од 15 V и 19,75 V у поређењу са резултатима добијених при амплитудама напона побуде од 6 V и 9 V , доводе до већих амплитуда напона на глави P_1 . Стога се као и у случају анализе мерења синусним сигналом, нумеричка анализа резултата изводи на основу дијаграма који одговарају амплитудама напона на S_1 од 15 V и 19,75 V .



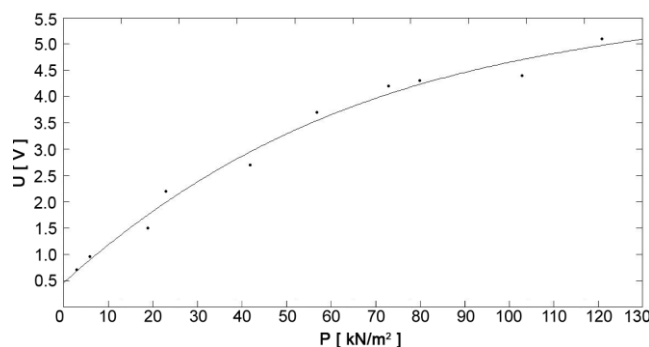
Слика 4.68 Напон на глави P_1 у зависности од притиска, *AlMg3* са дефектом, правоугаони сигнал S_1 .

Дијаграм 4.69. показује маркиране графике мерења при амплитудама напонских нивоа на извору S_1 од 15 V и 19,7 V за које је изведено фитовање.



Слика 4.69 Сегменти дијаграма напона на глави P_1 , *AlMg3* са дефектом, правоугаони сигнал.

Дијаграм 4.70. показује график за сегмент од 0 до 1, што одговара амплитуди напона побуде на извору S_1 од 19,75 V .



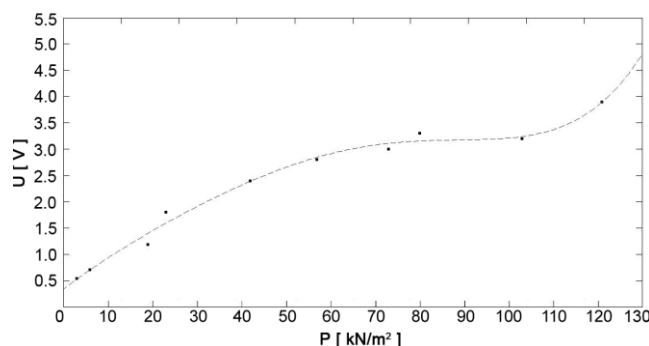
Слика 4.70 Фитовање напона на глави P_1 , сегмент од 0 до 1, AlMg3, са дефектом, 19,75 V , правоугаони сигнал.

Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 1 дата је изразом:

$$U = a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.26)$$

при чему су коефицијенти: $a_3 = 1.0364e-006$; $a_2 = -0.00044845$; $a_1 = 0.076469$; $a_0 = 0.45105$.

Дијаграм 4.71 показује график за сегмент од 0 до 2, што одговара амплитуди напона побуде на извору S_1 од 15 V .



Слика 4.71 Фитовање напона на глави P_1 , сегмент од 0 до 2, AlMg3, са дефектом, 15 V , правоугаони сигнал.

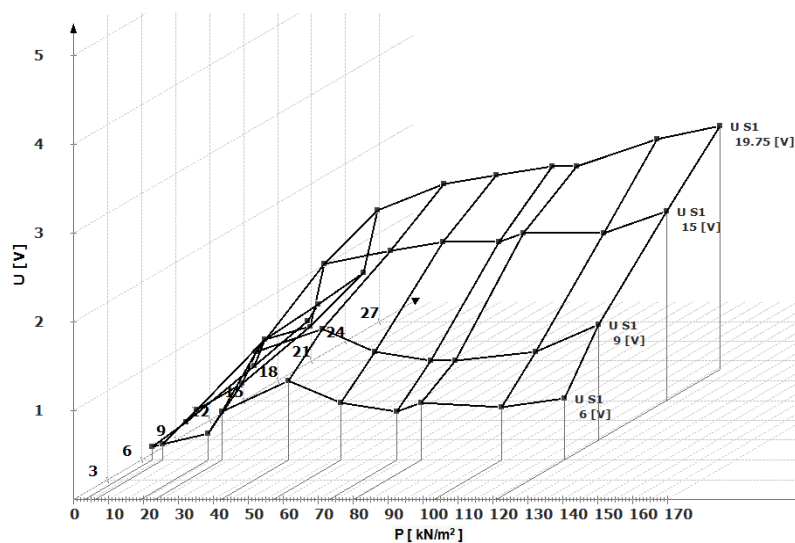
Формула добијена фитовањем, за сегмент од 0 до 2:

$$U = a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.27)$$

а одговарајући коефицијенти износе: $a_5 = 8.2514e-010$; $a_4 = -1.806e-007$; $a_3 = 1.2848e-005$; $a_2 = -0.00066651$; $a_1 = 0.065047$; $a_0 = 0.33141$.

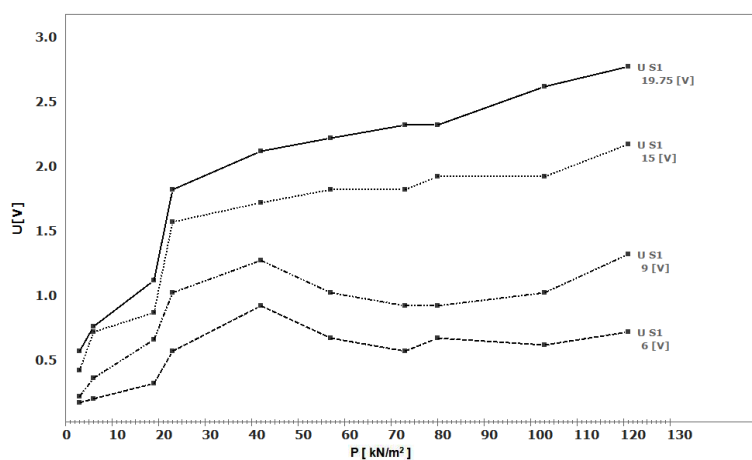
Мерења на узорку AlMg3 са троугаоним обликом сигнала

Последњи 3D приказ мерења на узорку AlMg3 у серији мерења над квадрантом са дефектом је приказан дијаграмом 4.72.



Слика 4.72 3D дијаграм напона на глави P_1 , AlMg3 са дефектом, троугаони сигнал S_1 .

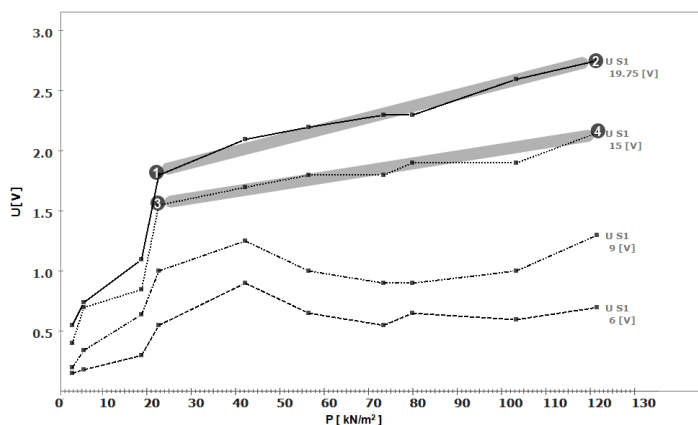
Дијаграм 4.73. је 2D верзија дијаграма 4.72.



Слика 4.73 Напон на глави P_1 у зависности од притиска, AlMg3 са дефектом, троугаони сигнал S_1 .

При амплитудама напона одашиљачке ултразвучне главе од 15 V и 19,75 V графици амплитуда напона које генерише пријемник су веома слични. Са друге стране, амплитуде напона одашиљачке ултразвучне главе од 6 V и 9 V, резултирају такође веома сличним графицима амплитуда напона на пријемнику. Међутим, разлика ова два пара дијаграма настаје код вредности притиска од $23 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$. Тако при напону главе S_1 од 6 V и притиску од $23 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_1 износи 0,55 V, а

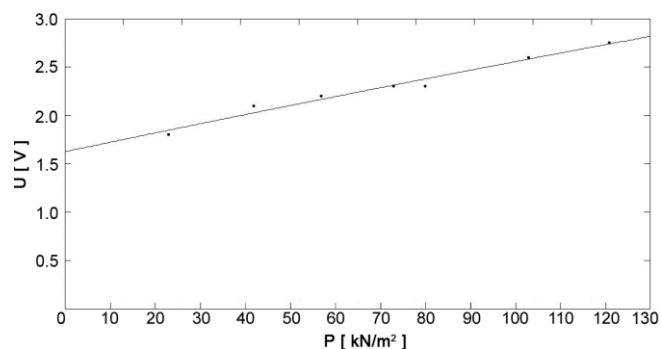
при истом притиску и напону S_1 од 9 V , напон на глави P_1 има амплитуду од 1 V . При напону главе S_1 од 15 V и притиску од $23\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_1 износи $1,5\text{ V}$, а при истом притиску и напону S_1 од $19,75\text{ V}$, напон на глави P_1 има амплитуду $1,8\text{ V}$. Након што се притисак на глави P_1 повиси на $57\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, при напону главе S_1 од 6 V , амплитуда напона на глави P_1 износи $0,65\text{ V}$, а при истом притиску и напону главе S_1 од 9 V , напон на глави P_1 има амплитуду 1 V . При напону главе S_1 од 15 V и притиску од $57\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ амплитуда напона на глави P_1 износи $1,8\text{ V}$, а при истом притиску и напону S_1 од $19,75\text{ V}$, напон на глави P_1 има амплитуду $2,2\text{ V}$. За амплитуде напона побуде од 15 V и $19,75\text{ V}$, почев од притиска од $23\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ па све до максималног притиска од $121\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, график амплитуде пријемне главе је скоро линеаран.



Слика 4.74 Сегменти дијаграма напона на глави P_1 , $AlMg3$ са дефектом, троугаони сигнал.

Амплитуде напона пријемне главе при напонима S_1 од 15 V и $19,75\text{ V}$ знатно су веће од оних које одговарају напонима побуде од 6 V и 9 V . Стога се као и у свим претходним случајевима, нумеричка анализа резултата изводи на основу дијаграма који одговарају напонима на извору S_1 од 15 V и $19,75\text{ V}$. На слици, 4.74. су приказани графици за мерења обављена при овим амплитудама напона. На слици су уцртани симболи се бројевима од 1 до 4 за означавање сегмената за које се изводи фитовање.

Дијаграм 4.75. показује график за сегмент од 1 до 2, што одговара амплитуди напона побуде на извору S_1 од 19,75 V .



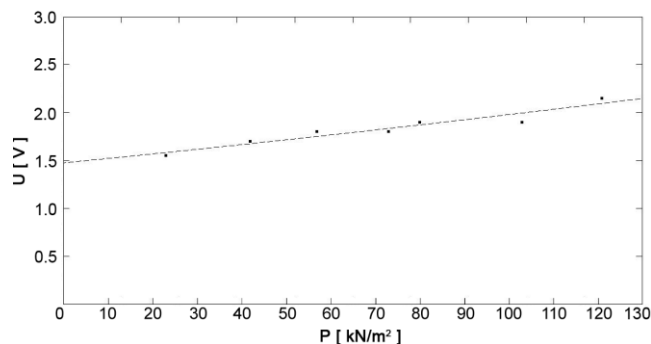
Слика 4.75 Фитовање напона на глави P_1 , сегмент 1 до 2, AlMg3, са дефектом, 19,75 V , троугаони сигнал.

Формула добијена фитовањем, за сегмент од 1 до 2 дата је изразом:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.28)$$

Одговарајући коефицијенти су: $a_2 = -4.5547e-006$; $a_1 = 0.0097698$; $a_0 = 1.6241$.

Дијаграм 4.76. показује график за сегмент од 3 до 4, што одговара амплитуди напона побуде на извору S_1 од 15 V .



Слика 4.76 Фитовање напона на глави P_1 , сегмент од 3 до 4, AlMg3, са дефектом, 15 V , троугаони сигнал.

Формула добијена фитовањем, за сегмент од 3 до 4 дата је следећим изразом:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.29)$$

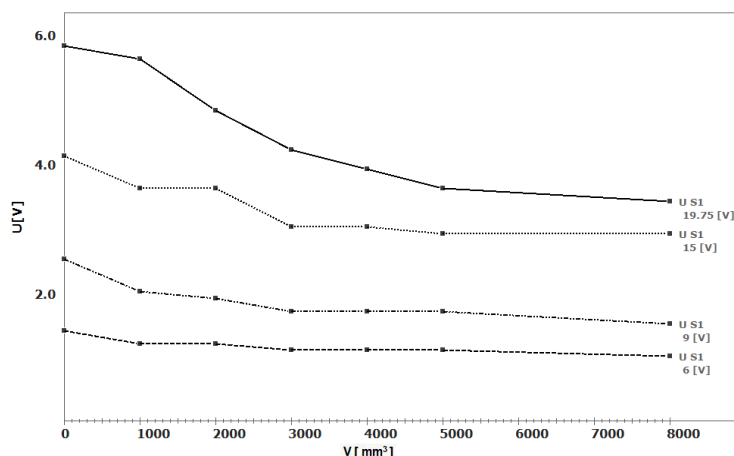
а коефицијенти износе: $a_2 = 4.4118e-006$; $a_1 = 0.0046056$; $a_0 = 1.4735$.

4.5.3 Резултати мерења утицаја дефекта на узорку AlMg3

У овом поглављу се презентују резултати експерименталних мерења која нису била изводљива над узорком од AlSi12. У узорак AlMg3 је као и у случају узорка AlSi12, уграђен дефект у облику бушотине, испод ултразвучне главе P_1 . Разлика у односу на узорак AlSi12 је та, што је у бушотину код узорка AlMg3 убачен чеп који се може померати дуж узорка. Овај чеп прецизних толеранција је израђен од идентичног материјала AlMg3 као и сам узорак. Користећи приказану поставку, изведена су појединачна мерења са циљем извођења симулације разних запремина дефекта.

Мерења утицаја дефекта на узорку AlMg3 са синусним обликом сигнала

Први дијаграм на слици 4.77. приказује резултате мерења када се одашиљачка ултразвучна глава S_1 побуђује синусним обликом сигнала. Појединачне запремине симулираних дефеката које следе из позиција на које је био извучен чеп, приказане су на V-оси (јединица мере је mm^3).



Слика 4.77 Зависност напона на глави P_1 од запремине дефекта, AlMg3, синусни сигнал S_1 .

Поред појединачних графика, амплитуде напона којима је напајана одашиљачка ултразвучна глава S_1 (6 V, 9 V, 15 V и 19,7 V) забележене су респективно.

На дијаграму слике 4.77. се види да свака појединачна запремина симулираног дефекта, кореспондира са одговарајућом вредношћу амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_1 .

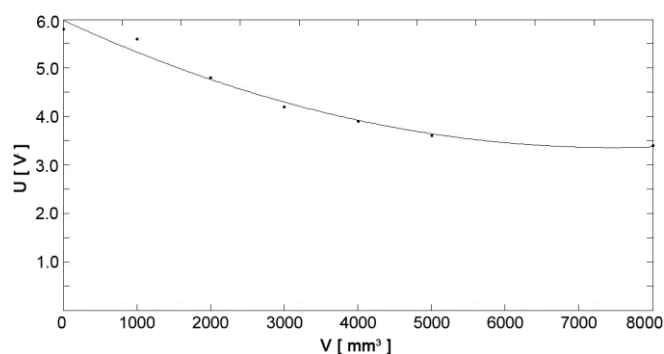
Када је чеп потпуно убачен у бушотину уграђеног дефекта, при амплитуди напона од 19,75 V одашиљачке ултразвучне главе S_1 и притиска на пријемну главу од $117 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$, амплитуда напона на глави P_1 је 5,8 V, а при истом притиску и напону на S_1 од 15 V, амплитуда напона на глави P_1 достиже 4,1 V. При истом притиску, при

напону S_1 од 9 V , амплитуда напона на глави P_1 износи $2,5\text{ V}$, док при напону одашиљача S_1 од 6 V амплитуда напона на глави P_1 износи $1,4\text{ V}$.

Када се чеп извуче на позицију при којој запремина симулираног дефекта унутар узорка, износи 1000 mm^3 , вредности амплитуда напона на извору S_1 и амплитуда напона на глави P_1 су: $(S_1\ 19,75\text{ V}, P_1\ 5,6\text{ V})$; $(S_1\ 15\text{ V}, P_1\ 3,6\text{ V})$; $(S_1\ 9\text{ V}, P_1\ 2\text{ V})$ и $(S_1\ 6\text{ V}, P_1\ 1,2\text{ V})$. Генерално, нижим амплитудама напона на извору S_1 оговарају и ниже амплитуде напона на глави P_1 .

Даљим извлачењем чепа, на позицију која симулира дефект запремине од 2000 mm^3 , при напону побуде на S_1 од $19,75\text{ V}$ амплитуда напона на глави P_1 знатно опадне (на $4,8\text{ V}$). У случају побудних напона 15 V , 9 V и 6 V , амплитуда напона на глави P_1 опада минимално. Извлачењем чепа на позицију која симулира дефект запремине од 3000 mm^3 , амплитуда напона на глави P_1 при напону побуде на S_1 од $19,75\text{ V}$ се и даље знатно смањује (на $4,2\text{ V}$). У случају побудних напона 15 V , 9 V и 6 V , амплитуде напона на глави P_1 и даље имају минимално слабљење. Овакав тренд се наставља, све до коначне позиције, где максимална симулирана запремина дефекта износи 8000 mm^3 . При напону побуде на извору S_1 од $19,75\text{ V}$ амплитуда напона на пријемнику P_1 износи $3,4\text{ V}$; ово је веома приметно смањење од око $2,4\text{ V}$ у односу на првобитно измерену вредност од $5,8\text{ V}$.

При напону побуде на извору S_1 од $19,75\text{ V}$, урађено је фитовање које је приказано на слици 4.78.



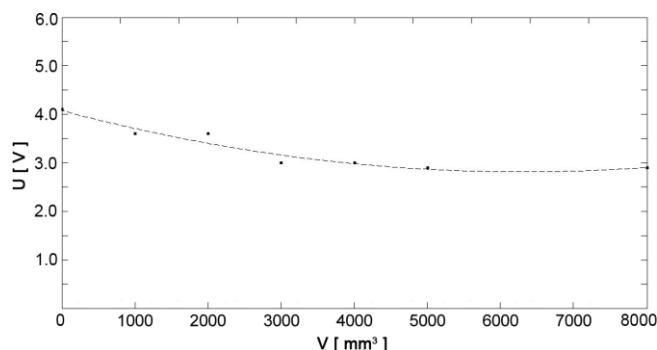
Слика 4.78 Фитовање напона на глави P_1 AlMg3, симулирани дефект, $19,75\text{ V}$, синусни сигнал.

Формула фитовања која одговара напону побуде од $19,75\text{ V}$ гласи:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.30)$$

При овоме коефицијенти износе: $a_2 = 4.7309\text{e-}008$; $a_1 = -0.00070488$; $a_0 = 5.9832$.

Слабљење амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_1 на симулиране запремине дефеката, при напону побуде на S_1 од 15 V , је приметно мање него при напону на S_1 од 19.75 V . Фитовање је приказано на слици 4.79.



Слика 4.79 Фитовање напона на глави P_1 $AlMg3$, симулирани дефект, 15 V , синусни сигнал.

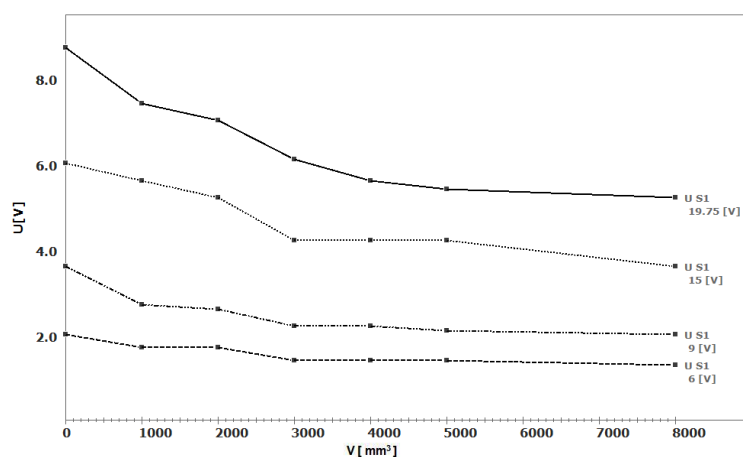
Формула фитовања која одговара напону побуде од 15 V гласи:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.31)$$

При овоме коефицијенти износе: $a_2 = 3.1788\text{e-}008$; $a_1 = -0.00040062$; $a_0 = 4.0759$.

Мерења утицаја дефекта са правоугаоним обликом сигнала

Дијаграм 4.80. приказује резултате експеримента мерења симулације дефекта у облику шупљине унутар узорка $AlMg3$ са напајањем на извору S_1 троугаоним обликом сигнала побуде.



Слика 4.80 Зависност напона на глави P_1 од запремине дефекта, $AlMg3$, правоугаони сигнал S_1 .

На дијаграму је показана амплитуда напона на глави P_1 . Када је чеп комплетно убачен у бушотину уграђеног дефекта при напону од $19,75\text{ V}$ побудне одашиљачке

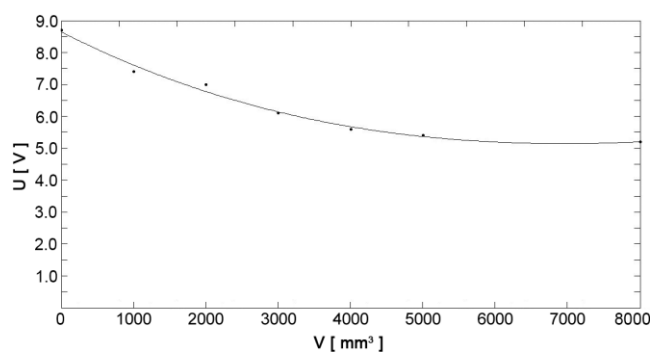
ултразвучне главе S_1 и притиска на пријемну главу од $117 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, глава P_1 генерише амплитуду напона од $8,7 \text{ V}$. При истом притиску, када је напон одашиљача S_1 од 15 V , амплитуда напона на глави P_1 износи 6 V . При напону на S_1 од 9 V амплитуда напона на глави P_1 износи $3,6 \text{ V}$, а при напону на S_1 од 6 V , глава P_1 генерише амплитуду напона од 2 V . Када се чеп извуче на позицију симулираног дефекта од 1000 mm^3 , вредности амплитуда напона на извору S_1 и амплитуда напона на глави P_1 су:

$(S_1 19,75 \text{ V}, P_1 7,4 \text{ V}); (S_1 15 \text{ V}, P_1 5,6 \text{ V}); (S_1 9 \text{ V}, P_1 2,6 \text{ V})$ и $(S_1 6 \text{ V}, P_1 1,7 \text{ V})$.

Даљим извлачењем чепа на позицију симулираног дефекта од 2000 mm^3 при напону на S_1 од $19,75 \text{ V}$, амплитуда напона на глави P_1 опада на вредност од 7 V . У случају побудних напона на S_1 15 V , 9 V и 6 V , амплитуде напона на глави P_1 опадају на $5,2 \text{ V}$, $2,6 \text{ V}$ и $1,6 \text{ V}$. Извлачењем чепа на позицију симулираног дефекта од 3000 mm^3 , при напону на S_1 од $19,75 \text{ V}$ амплитуда напона на глави P_1 и у овој варијанти мерења веома јасно опада, на $6,1 \text{ V}$. У случају побудних напона на S_1 15 V , 9 V и 6 V , амплитуде напона на глави P_1 и у овој варијанти мерења минимално опадају. Такав тренд се наставља до максималне позиције симулираног дефекта у износу од 8000 mm^3 (при напону побуде на S_1 од $19,75 \text{ V}$ амплитуда напона на глави P_1 је $5,2 \text{ V}$, што је смањење од око $3,5 \text{ V}$ у односу на првобитно измерених $8,7 \text{ V}$).

Слично као у варијанти мерења са синусним сигналом побуде и овде је при напону побуде на S_1 од 15 V , реакција у смислу слабљења амплитуде пријемне ултразвучне главе P_1 на симулиране запремине дефеката приметно мања него при напону на S_1 од $19,75 \text{ V}$.

Фитовање који одговара напону побуде на S_1 од $19,75 \text{ V}$, приказано је на слици 4.81.



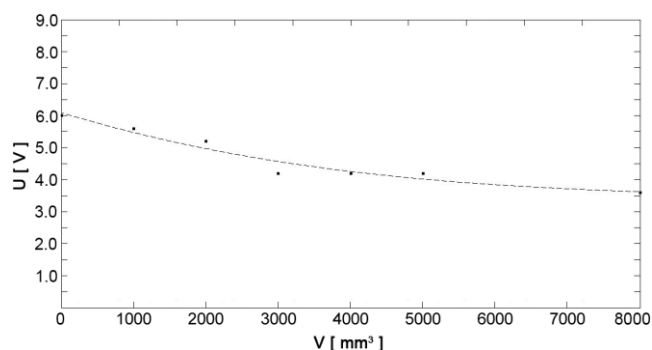
Слика 4.81 Фитовање напона на глави P_1 AlMg3, симулирани дефект, $19,75 \text{ V}$, правоугаони сигнал.

Формула фитовања која одговара напону побуде на S_1 од 19,75 V дата је следећим изразом:

$$U = a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.32)$$

При овоме коефицијенти износе: $a_3 = -2.9213e-012$; $a_2 = 1.1293e-007$; $a_1 = -0.0011466$; $a_0 = 8.6408$.

Фитовање које одговара напону побуде на S_1 од 15 V , приказано је на слици 4.82.



Слика 4.82 Фитовање напона на глави P_1 AlMg3, симулирани дефект, 15 V , правоугаони сигнал.

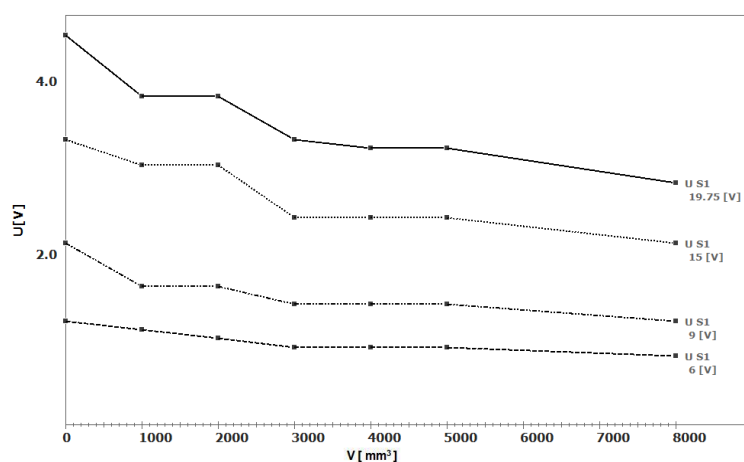
Формула фитовања која одговара напону побуде на S_1 од 15 V дата је изразом:

$$U = a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.33)$$

Коефицијенти фитовања износе: $a_3 = -2.3423e-012$; $a_2 = 6.5838e-008$; $a_1 = -0.00068603$; $a_0 = 6.0958$.

Мерења утицаја дефекта са троугаоним обликом сигнала

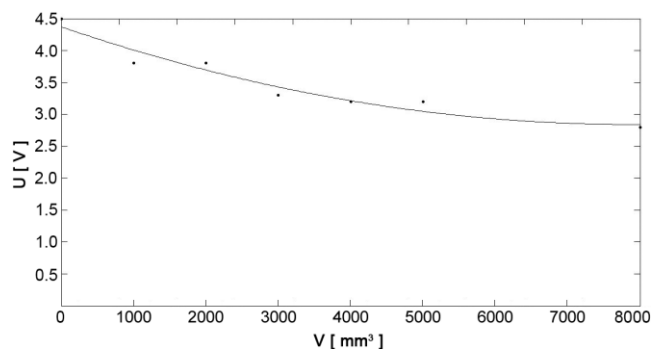
На дијаграму 4.83 су приказани резултати мерења са троугаоним обликом сигнала побуде.



Слика 4.83 Зависност напона на глави P_1 од запремине дефекта, AlMg3, троугаони сигнал S_1 .

Када је чеп комплетно убачен у бушотину уграђеног дефекта, при напону побуде одашиљачке ултразвучне главе S_1 од $19,75\text{ V}$ и притиску на пријемну главу од $117\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, глава P_1 генерише амплитуду напона од $4,5\text{ V}$. Када симулирана запремина дефекта износи максималних 8000 mm^3 , при напону побуде на S_1 од $19,75\text{ V}$, амплитуда напона на глави P_1 износи $2,8\text{ V}$.

Фитовање који одговара напону побуде на S_1 од $19,75\text{ V}$, приказано је на слици 4.84.



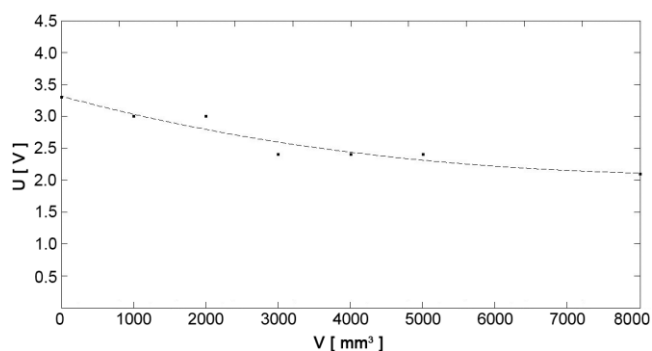
Слика 4.84 Фитовање напона на глави $P_1\text{ AlMg3}$, симулирани дефект, $19,75\text{ V}$, троугаони сигнал.

Формула фитовања која одговара напону побуде на S_1 од $19,75\text{ V}$ дата је изразом:

$$U = a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.34)$$

При овоме коефицијенти износе: $a_2 = 2.456\text{e-}008$; $a_1 = -0.00038745$; $a_0 = 4.3698$.

Фитовање који одговара напону побуде на S_1 од 15 V , приказано је на слици 4.85.



Слика 4.85 Фитовање напона на глави $P_1\text{ AlMg3}$, симулирани дефект, 15 V , троугаони сигнал.

Формула фитовања која одговара напону побуде на S_1 од 15 V дата је изразом:

$$U = a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 \quad (4.35)$$

а коефицијенти овде износе: $a_3 = -6.0016\text{e-}013$; $a_2 = 2.4426\text{e-}008$; $a_1 = -0.00030793$; $a_0 = 3.3169$.

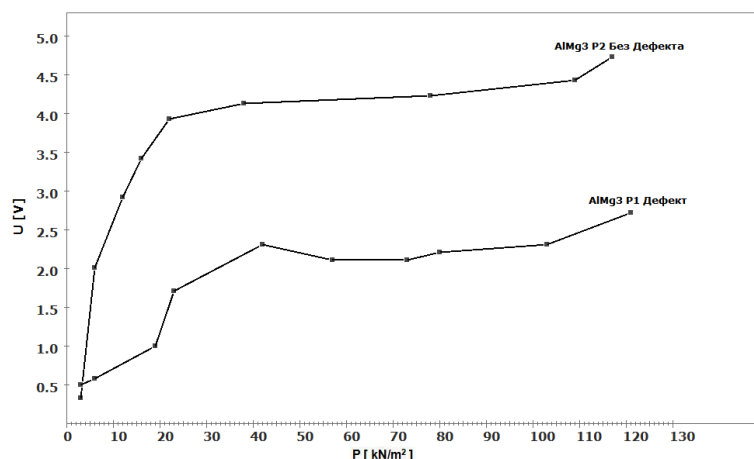
4.5.4 Упоређивање резултата мерења на узорку AlMg3

У презентацији резултата, до сада су показана мерења над узорком AlSi12 и упоредним узорком AlMg3, у експериментима са и без дефекта, уз промене притиска над одашиљачком ултразвучном главом, уз промене облика сигнала и амплитуда напона којом је она напајана. Унутар категорије међусобних поређења резултата мерења над узорком AlMg3, замисливе су разне комбинације, а има посебног смисла да се пореде резултати мерења AlMg3 без дефекта са резултатима мерења AlMg3 са дефектом. У презентацији и анализи појединачних упоређења, циљ је да се провери прихватљивост мерења. Прихватљиво је када резултати мерења AlMg3 без дефекта у упоређењу са резултатима мерења AlMg3 са дефектом покажу како су унутар целокупног тока појединачних графика, вредности амплитуда напона које генерише пријемна ултравучна глава изнад сегмента са дефектом заиста мање од амплитуда изнад сегмента узорка који не садржи дефект. Даљи циљ упоређивања мерења је да се докаже, да је могуће пронаћи опсег механичког притиска на ултразвучне главе, унутар кога притисак може да се мења, а да то изазива само мале измене амплитуда напона унутар пријемних глава и да је тај опсег примењив, како у случају када узорак не садржи дефект, а тако и у случају када узорак садржи дефект. Сва мерења која се овде упоређују изведена су без употребе контактних средстава, како у случају узорка од порозног материјала AlSi12, тако и у случају упоредног узорка од конвенционалне легуре алуминијума AlMg3.

Упоређивање мерења на узорку AlMg3 са синусним обликом сигнала

Дијаграм на слици 4.86 представља први дијаграм категорије међусобних упоређења резултата мерења над узорком AlMg3, где се пореде резултати мерења пријемне ултразвучне главе над сегментом који не садржи дефект са амплитудом пријемне ултразвучне главе над сегментом са дефектом. Овде се користи синусни облик сигнала побуде. И овај дијаграм је комбинација одговарајућих дводимензионалних графика за које је урађено фитовање. На слици 4.86. су приказани напони на пријемним главама код узорка AlMg3 са и без дефекта, 15 V, синусни сигнал. Са графика се види да су и код узорка од AlMg3, који је представник конвенционалних легура алуминијума, вредности амплитуда напона које генерише пријемна ултразвучна глава изнад сегмента без дефекта – знатно веће од амплитуда сегмента са дефектом. Код овог упоређења се опсег унутар кога измене притиска не уносе велике измене амплитуда напона пријемника, налази унутар вредности притиска од $42 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $103 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, а график функције у овом опсегу има најмањи нагиб при

напону побуде S_1 од 15 V , тојест мањи нагиб него при при напону од $19,75\text{ V}$, што је разлог презентације поређења у овом и у следећим поглављима упоређивања, управо за напон побуде од 15 V . На позицији притиска од $38\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда пријемника која одговара сегменту без дефекта има вредност $4,2\text{ V}$, а при $42\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ измерена амплитуда пријемника која одговара сегменту са дефектом износи $2,4\text{ V}$.

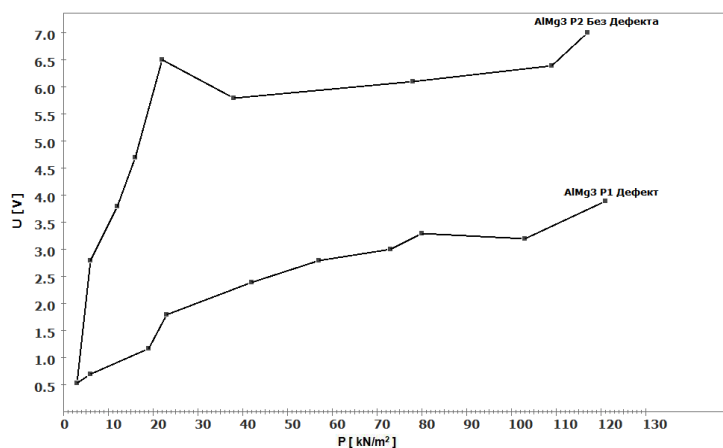


Слика 4.86 Упоређивање напона на пријемним главама код узорка AlMg3 са и без дефекта, 15 V , синусни сигнал.

При притиску од $109\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда пријемника која одговара сегменту без дефекта износи $4,5\text{ V}$, а на нивоу притиска од $103\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, измерена амплитуда пријемника која одговара сегменту са дефектом износи $2,2\text{ V}$. Повољно је што у широком распону притисака од $42\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $103\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ постоји приближна паралелност горњег и доњег тока графика, а разлика пријемних амплитуда коју уноси дефект, унутар овог опсега је скоро константна и у просеку износи око 2 V .

Упоређивање мерења на узорку AlMg3 са правоугаоним обликом сигнала

Слика 4.87. приказује упоређења резултата мерења над узорком AlMg3, где се пореде резултати мерења пријемне ултразвучне главе над сегментом који не садржи дефект са амплитудама које одговарају сегменту са дефектом. Овде су приказана мерења при амплитуди напона побуде на извору S_1 од 15 V . Код узорка без дефекта налази се опсег унутар кога измене притиска не уносе велике измене амплитуда напона пријемника, и то у опсегу од $58\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $103\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. На позицији притиска од $38\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, амплитуда пријемника која одговара сегменту без дефекта износи $5,8\text{ V}$, а при притиску од $109\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, ова амплитуда износи $6,2\text{ V}$. Приближна паралелност горњег и доњег тока графика постоји такође у распону притисака од 58 до $103\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$.



Слика 4.87 Упоређивање напона на пријемним главама код узорка AlMg3 са и без дефекта, 15 V , правоугаони сигнал.

Разлика пријемних амплитуда чији је узрок дефект, унутар наведеног опсега притисака је износи око 3 V .

Упоређивање мерења на узорку AlMg3 са троугаоним обликом сигнала

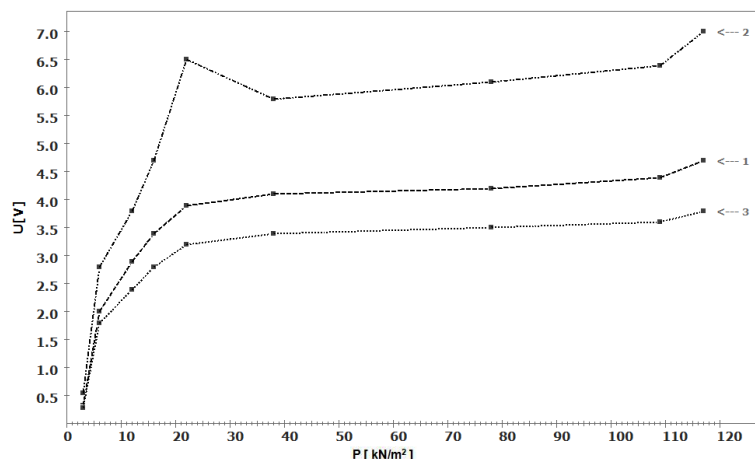
Упоређивање мерења AlMg3 са троугаоним обликом сигнала, као и у два претходна случаја поређења, најбоље резултате даје при амплитуди напона побуде од 15 V . Такође је исти и опсег унутар кога измене притиска не уносе велике измене амплитуда напона пријемника, од $58 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $103 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. Треба напоменути да се у поређењу са мерењима код синусне и правоугаоне побуде, постижу знатно мање амплитуде напона на пријемнику.

Упоређивање различитих сигналних облика мерења на узорку AlMg3

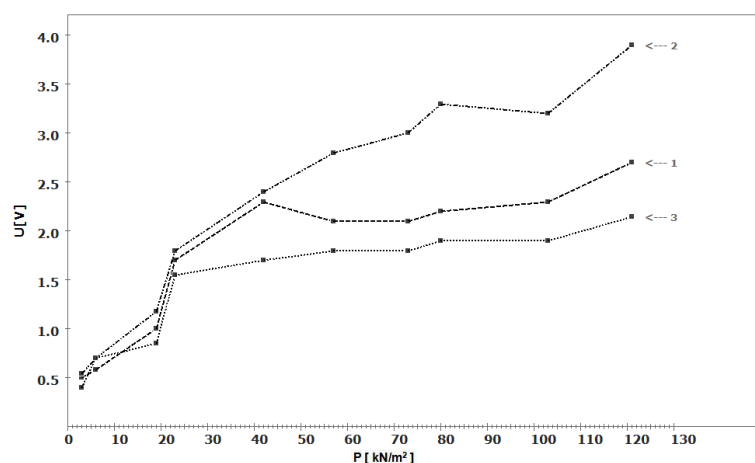
Аналогно поступку унутар поглавља испитивања и анализе сигнала код узорка AlSi12, унутар овог поглавља се директно упоређују манифестације различитих сигналних облика напајања одашиљачке ултразвучне главе (синусоиде, правоугаоника и троугаоника) на вредности амплитуда напона које генеришу пријемне ултразвучне главе код узорка AlMg3.

Унутар мерења која су изведена у оквиру овога рада постоји осам комбинација, с обзиром на четири амплитуде побудних напона и два карактера дефекта (квадрант са и без дефекта). Мерене вредности, које се овде приказују су исте оне које су биле приказиване у претходним поглављима али су овде сортиране по различитим сигналним облицима. Након што су претходна упоређивања мерења код узорка AlMg3 показала најбоље резултате при напону побуде од 15 V , овде се анализирају манифестације при овом напону побуде. Резултати мерења без дефекта приказани су на слици 4.88. а резултати мерења са дефектом приказани су на слици 4.89. Графици

различитих сигналних облика означени са: 1-синусни, 2-правоугаони и 3-троугаони сигнални облик. Из оба дијаграма се види да вредности амплитуда напона које генерише пријемна ултравучна глава, како изнад квадранта са дефектом, тако и изнад квадранта без дефекта, у случају узорка AlMg3 (за разлику од промена сигналних облика побуде код узорка AlSi12), показују знатне разлике.



Слика 4.88 Утицај сигналних облика на напон на пријемној глави P_2 код узорка AlMg3 без дефекта, 15 V, 1-синусни, 2-правоугаони и 3-троугаони сигнални облик.



Слика 4.89 Утицај сигналних облика на напон на пријемној глави P_1 код узорка AlMg3 са дефектом, 15 V, 1-синусни, 2-правоугаони и 3-троугаони сигнални облик.

Правоугаони сигнални облик доводи до највећих амплитуда унутар пријемних ултразвучних глава. Сигнални облик синусоиде се манифестује нешто мањим амплитудама пријемника, али је ток графика у варијантама са и без дефекта веома повољан. Примена троугаоног сигналног облика резултује најмањим амплитудама пријемних ултразвучних глава али са најбољом линеарношћу графика. Може се закључити, да испитивање оптималног сигналног облика побуде има конкретан значај и користи реализацији KTUD методе.

5.

ЗАКЉУЧАК

Предмет ове докторске дисертације представља развој дефектоскопа који функционише на принципу нове ултразвучне методе, названој квадрофонска трансмисиона ултразвучна дефектоскопска метода (KTUD метода), у примени на директно ласерски синтерованим материјалима (DLSM). Циљ рада је да пружи конкретан допринос контроли квалитета процеса производње DLSM производа, представљањем KTUD методе. Метода омогућава јефтину и ефикасну ултразвучну дефектоскопију елемената произведених DLSM поступком. Овим поступком се израђују чврсти, а уједно лагани, порозни, шупљикави елементи који се примењују у техници орбиталних сателита, технологији најмодернијих мотора и у авионској техници. Развој DLSM методе је покушај испуњавања захтева за економичнијом производњом малих серија машинских елемената и све комплекснијих геометрија (како спољашњих тако и унутрашњих) металних елемената. Тродимензионални елемент изграђује се на тај начин што се додаје један по један део запремине у облику танког слоја, чиме настаје порозан и шупљикав елемент, који је чврст и лак. За разлику од индиректног ласерског синтеровања метала, DLSM се састоји од само једног процесног корака што је предност директне методе јер се избегава проблематична процедура очвршћавања у пећи.

За потребе ултразвучне дефектоскопије чврстих тела најчешће је коришћена метода са само једном ултразвучном главом за емитовање и пријем сигнала (тзв. импулсна ехо техника). Метода ултразвучне дефектоскопије са одвојеним главама је до сада мало развијана (једна глава је одашиљач сигнала, а друга има улогу сензора за пријем сигнала). Дефектоскоп заснован на KTUD методи састоји се из једног модула за генерисање сигнала релативно ниских ултразвучних фреквенција и четири електронска мерна ланца за пријем и конверзију трансмисионих ултразвучних сигнала.

KTUD систем својим конструкционим, електронским и софтверским решењима ствара услове за ефикасну проверу квалитета материјала синтерованих DLSM

поступком. Један од основних захтева је да се обезбеди задовољавајућа продорност ултразвука која омогућава примену и код порозних и шупљикавих материјала. Примена релативно ниских ултразвучних фреквенција од само неколико десетина килохерца омогућава захтевану продорност сигнала неопходну за квалитетну дефектоскопију узорака материјала који не само да су сами по себи порозни већ и „хелијске геометрије” доприносе додатној „шупљикавости”. Применом поменутих фреквенција, избегнута је велика апсорпција у материјалу (као што је то случај код сигнала високих фреквенција примењених код ултразвучне импулсне ехо технике).

У случају да испитивани узорак материјала садржи дефект, највеће слабљење амплитуде ултразвучног сигнала манифестовано је у ултразвучној глави која је најближа дефекту. Регистрација оваквих амплитуда изведена је помоћу релативно једноставних и јефтиних аналогно дигиталних (А/D) конвертора. Ово је значајна предност КТУД методе јер су електронске компоненте (пре свега А/D конвертори из области масовне индустријске производње) због својих нижих радних фреквенција вишеструко јефтине од електронских елемената искоришћених код импулсне ехо методе. Тиме је отворен пут широкој примени дефектоскопа заснованог на КТУД методи, и у науци и у индустрији.

У опису патентна који је аутор ове дисертације пријавио код „Централног Завода за Патенте“ („Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA)“) у Минхену, Немачка у октобру 2010. год. је наведено: ***„проналазак се тиче апаратуре и поступка за дефектоскопију узорка материјала без разарања, излагањем узорка ултразвучним таласима и обрадом сигнала насталих трансмисијом ултразвука кроз узорак”*** (*„Vorrichtung und Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung eines Prüfgegenstands mittels Ultraschallwellen”*). Јула 2012. год **позитивно** је решен патентни захтев и додељен патент под бројем **10 2010 046 781**.

У дисертацији је најпре представљен начин функционисања КТУД методе, а затим њено електронско и софтверско решење. На крају су приказани резултати и дискусија испитивања на конкретним материјалима (AlSi12 из групе нових материјала и AlMg3 из групе конвенционалних материјала).

Електронска реализација КТУД методе представљена је са два блока. Први блок чини мерни ланац, док други блок представља систем за утврђивање координата пријемника ултразвучних сигнала.

Мерни ланац садржи генератор ултразвучних сигнала и четири гране састављене од пријемника ултразвучног сигнала, појачавача и А/D конвертора. Одашиљачка

ултразвучна глава се побуђује помоћу генератора функције који генерише напонски сигнал релативно ниске учестаности. За контролу овог сигнала користи се осцилоскоп и фреквенцметар. Ултразвук генерисан од стране предајника пролази кроз испитивани материјал и тада бива мање или више ослабљен по амплитуди, и са мањим или већим кашњењем стиже до пријемника. Пријемник конвертује механичке вибрације у напонски сигнал који се даље појачава и конвертује у дигитални сигнал. Ови напони се појачавају помоћу четири електронска адаптера. Излази сигналних адаптера се доводе преко А/D конвертора до рачунара који спроводи процесирање мерених сигнала.

Блок за утврђивање координата пријемника ултразвучних сигнала састоји се од предајника, пријемника и појачавача инфрацрвене светлости. Као извор инфрацрвене светлости коришћена је фотоћелија, док је као пријемник употребљен фотоотпорник. Појачавач је реализован као обичан инвертујући појачавач са операционим појачавачем.

За одашиљач ултразвучног сигнала и пријемне сензоре коришћени су пиезоелектрични (ПИЕ) елементи од олово цирконијум титанатне ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ $0 \leq x \leq 1$) електрокерамике. Коришћен је ултразвучни сигнал фреквенције 45 kHz чије се амплитуде, облик сигнала и трајање, могу софтверски дефинисати.

Развијено је неколико варијанти анализе сигнала у KTUD методи :

- диференција (разлика) стабилних електричних напона (заснована је на разлици интензитета ултразвучних таласа два пријемника); предност ове варијанте је поуздан једнозначан мерни резултат а потребне електронске компоненте су јефтине, што је и основни разлог да су резултати презентовани у овој дисертацији добијени применом ове варијанте,
- диференција (разлика) времена распрострањања ултразвучних таласа у деловима материјала где не постоје дефекти и у деловима где дефеката има,
- упоређење сигнала пријемних ултразвучних сензора са референтним сигналом побуде (сигнал сваке пријемне главе се упоређује директно са стартним тренутком сигнала емитованог са побудне главе); овај поступак карактерише изузетно велика брзина детекције, јер су мерена времена много пута краћа од времена код варијанте диференције стабилних електричних напона. Упоређивање сигнала се може спровести праћењем подешене вредности амплитуде напона или праћењем прве препознатљиве периоде осцилације.

Недостатак свих варијанти анализе времена распрострањања ултразвучних таласа је потреба за квалитетним А/D конверторима високе резолуције. То изазива трошкове

који су многоструко већи него ког варијанте диференције стабилних електричних напона.

Значајан аспект у применљивости KTUD методе представља развијена софтверска подршка. Њена основна намена везана је за потребу памћења релевантних података добијених у процесу испитивања материјала. У почетној фази током развоја методе креирана софтверска подршка коришћена је и за визуелизацију и графичко представљање резултата мерења ради лакше и брже оцене ваљаности методе и њене применљивости. Имајући у виду потребу да оцену ваљаности методе врше и истраживачи лоцирани ван лабораторије непосредног извођења експеримента, развијену софтверску подршку је могуће користити у окружењу Интернета. На тај начин су створени услови да се развијена софтверска подршка може користити за Интернет дистрибуцију резултата мерења спроведених при дефектоскопији материјала применом KTUD методе.

Експериментална истраживања су се односила на услове под којима је могуће постићи најјаснију реакцију мерног система на дефекте унутар узорка, тј. на питања, како постићи најбољу могућу ефикасност, поузданост и „продорност“ KTUD методе. Повећање ефикасности система се постиже са што већим амплитудама пријемних напона које су у идеалном случају такве да их није потребно додатно појачавати пред улазак у А/D конвертор (овим се избегава деформација сигнала коју уноси појачивач, побољшава се свеукупан однос сигнал-шум и штеди се на трошковима појачавачких компоненти).

Приказани су најпре резултати и дискусија примене KTUD методе код узорка материјала AlSi12 (у облику паралелопипеда) са целуларном структуром. Узорак је добијен DLSM поступком на Фраунхофер Институту, Аугсбург, Немачка. Упоредна анализа експеримената спроведена је над стандардним индустријским узроком материјала AlMg3 истог облика.

Експериментална истраживања су најпре била усмерена на одређивање зависности амплитуда напона сигнала пријемне ултразвучне главе од притиска. Одређиван је опсег унутар којег притисак може да варира, а да то не изазива знатне измене амплитуда напона унутар пријемних глава. То је био један од циљева овог рада јер се на основу ове зависности механизми пријемних ултразвучних глава димензионишу тако, да је притисак увек у оптималном опсегу, а све то са најмањим улагањима у механичку прецизност.

Током серија мерења зависности амплитуда напона сигнала пријемне ултразвучне главе од притиска, изведена су и испитивања утицаја амплитуде напона ултразвучног сигнала којим се напаја одашиљач S_1 на амплитуде напона генерисаних од стране пријемних ултразвучних глава P_i . Мотив је био проналажење опсега за што бољи систем калибрације. Коришћен је сет напона, који стоје на располагању од стране генератора функције (амплитуде напона од 6 V , 9 V , 15 V и $19,75\text{ V}$). Осим тога изведена су и испитивања утицаја облика електричног сигнала којим се напаја одашиљач S_1 . Поред стандардног синусног облика искоришћени су и остали уобичајени сигнални облици: правоугаони и троугласти. Пре него што су изведени главни експерименти, извршена је провера реакције ПИЕ елемента на промене притиска, без учествовања узорка у експерименту. Ова мерења су изведена аналогно за сва три сигнална облика, а резултат је подједнака линеарност. Веома задовољавајући закључак је изведен: употребљене пиезокерамике не уносе нелинеарности у експерименталне резултате.

Поступак мерења који је реализован током експеримената, започињао је подешавањем почетног притиска (који је у тој фази мали), над пријемном ултразвучном главом која се испитује. Први облик електричног сигнала генератора функције је синусоида са почетном-најнижом амплитудом напона побуде извора S_1 од 6 V . Одржавајући притисак над мерном главом констатним, извођено је следеће мерење генерисане амплитуде напона са преосталим амплитудама напона побуде од 9 V , 15 V и $19,75\text{ V}$. Потом је мењан сигнални облик нападања извора S_1 најпре на правоугаони а затим и на троугласти сигнал. Након тога је на пријемној глави повећан притисак за један корак, и аналогно напред приказаном сценарију, спроведне четири „петље” мерења са амплитудама напона побуде од 6 V , 9 V , 15 V и $19,75\text{ V}$ при чему су мењана сва три сигнална облика. Мерења су настављана регистровањем амплитуде напона пријемне ултразвучне главе P_i при повећавању притиска, све док није достигнута максимална вредност притиска на пријемну главу (око $120\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$).

Прво су приказивани резултати мерења на узорку AlSi12 без дефекта, а затим резултати мерења истог узорка са дефектом. Анализом је одређиван опсег унутар кога притисак може да варира а да то не изазива знатне измене амплитуда напона пријемних ултразвучних глава што је био и један од главних циљева спроведених експеримената.

Анализа резултата је спроведена најпре приказом главног 3D дијаграма (притисак, амплитуда напона који генерише пријемна ултразвучна глава P_i , амплитуда напона

побуде главе одашиљача S_1). Након тога су приказани сегментирани графици и спроведена нумеричка анализа - фитовање. Уочено је да су при свим мерењима регистроване амплитуде генерисаних напона на сензорским главама при амплитудама напона побуде од 15 V и $19,75\text{ V}$ знатно веће од оних регистрованих при 6 V и 9 V . Зато су све анализе изведене помоћу дијаграма који одговарају амплитудама напона на одашиљачу S_1 од 15 V и $19,75\text{ V}$.

Упоређивање резултата мерења добијених код узорка AlSi12 без дефекта и са дефектом спроведено је са циљем да се нађе одговор на питање да ли су при свим вредностима притисака амплитуде напона које генерише пријемна глава изнад сегмента без дефекта веће од амплитуда напона пријемне главе изнад сегмента са дефектом. Овим би се доказало да је дефектоскопија високо порозног и шупљикавог материјала произведеног DLСM методом могућа уз примену КТUD методе. С обзиром на постављени циљ одређивања опсега унутар кога може доћи до варијације притиска а да то изазове мале измене амплитуда напона унутар пријемних глава (график функције $U(p)$ је линеаран са малим нагибом), пожељно је да у оба случаја (када нема дефекта и када има дефекта) постоји што шира област притисака када су оба графика приближно паралелна.

Све наведене претпоставке су потврђене анализом експерименталних резултата. На пример, упоређивањем резултата код узорка AlSi12 добијених без дефекта и са дефектом, амплитуда напона које генерише пријемна ултразвучна глава изнад сегмента без дефекта је већа од амплитуде напона главе изнад сегмента са дефектом (унутар опсега притисака од $43\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ до $81\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ разлика амплитуда напона настала услед присуства дефекта је приближно константна и износи око $0,5\text{ V}$).

Спроведено је и упоређивање резултата сва три примењена облика сигнала напајања одашиљачке главе: синусоиде, правоугаоника и троугла. Амплитуде напона које генерише пријемна ултравучна глава при различитим облицима сигнала изнад квадранта са дефектом су скоро идентичне, док изнад квадранта без дефекта разлика амплитуда износи свега око $0,2\text{ V}$.

Аналогно поступку мерења над узорком AlSi12 изведен је комплетан експериментални и аналитички поступак над упоредним узорком који је типичан представник конвенционалних алуминијумских легура AlMg3 (овај материјал се налази у широкој примени у производњи машинских делова за ваздухопловство, орбиталне сателите и др.). Такође су најпре приказани резултати мерења утицаја притиска код

узорка без дефекта, а затим резултати мерења код узорка са дефектом. И овде су презентирани резултати експеримената за сва три сигнална облика.

Међутим, код узорка материјала AlMg3, је за разлику од AlSi12, уграђен чеп прецизних димензија од истог материјала који омогућава извођење симулација различитих запремина дефекта. Резултати тих експеримената су приказани у свим верзијама сигналних облика, па се на тај начин дошло до веома вредних података о перформансама KTUD дефектоскопа.

Најпре је уочено да при амплитуди напона побуде одашиљачке главе S_1 од 15 V, графици функција имају мањи нагиб него при напону од 19,75 V, па су анализе рађене при напону на S_1 од 15 V. Уочено је и да је амплитуда напона глава изнад сегмента без дефекта знатно већа од амплитуда напона главе изнад сегмента са дефектом, а опсег унутар кога измене притиска не уносе велике измене амплитуда напона пријемника, је између $38 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ и $109 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$. Разлика пријемних амплитуда коју уноси дефект, унутар овог опсега је скоро константна и износи око 2 V за синусни сигнал, 2,2 V за троугласти сигнал, а око 3 V за правоугаони сигнал.

На основу ових података додатно је спроведена анализа утицаја различитих сигналних облика напајања одашиљачке ултразвучне главе (синусоиде, правоугаоника и троугла) на вредности амплитуда напона које генеришу пријемне ултразвучне главе код узорка AlMg3. У обе варијанте (узорак без дефекта и са дефектом а при амплитуди напона побуде од 15 V) правоугаони сигнални облик доводи до највећих амплитуда напона пријемних ултразвучних глава. Сигнални облик синусоиде се манифестује нешто мањим амплитудама пријемника, али је ток графика $U(p)$ у варијантама са и без дефекта веома повољан. Примена троугластог сигналног облика резултује најмањим амплитудама пријемних ултразвучних глава али са најбољом линеарношћу графика. Из наведене анализе се може закључити, да испитивање оптималног сигналног облика побуде има велики значај и користи карактеризацији KTUD методе.

Показано је да се код KTUD дефектоскопа сва мерења могу успешно извести без употребе контактне средства између ПИЕ елемената и површине испитиваних узорка што је очигледна и велика предност у односу на импулсну ехо технику. Употреба контактних средстава је код импулсне ехо технике обавезна, што је велики проблем када се испитују порозни и шупљикави материјали.

На основу свега напред наведеног показано је :

- да је конструкција ефикасног дефектоскопа могућа је са релативно малим улагањем у апаратуру употребом електронских компоненти које се масовно

производе: конвенционалних А/D конвертора и ПИЕ елемената кавитационих ултразвучних апарата,

- да је могуће постићи ефикасну дефектоскопију високо порозног и шупљикавог материјала, са реалтивно малим улагањем у механичку прецизност при позиционирању ултразвучних сензора; у ту сврху одређен је опсег оптималних притисака сензора на површини узорка,
- да је могуће ефикасно и поуздано обавити мерења без употребе контактнoг средства на додирној површини сензор – узорак.

На овај начин је остварена могућност, да се применом КТUD методе побољша контрола квалитета серијске производње узорака високо порозних и шупљикавих материјала добијених DLSM технологијом. Осим тога, развијена је и специјално пројектована релациона база података и наведено софтверско решење.

Експериментална истраживања су изведена код узорка AlSi12 као представника савремених материјала, и над узорком AlMg3, који представља конвенционални материјал. Како би се добили одговори утицаја запремине дефеката код узорка AlSi12, који садржи ћелијске структуре, било би неопходно израдити низ узорака који би се разликовали једино у величини уграђених дефеката.

Треба напоменути да је број легура над којима се врше актуелна истраживања и унапређење DLSM методе веома велики. То значи да би се за практичну употребу дефектоскопа заснованог на КТUD методи у индустрији морао извести читав низ нових експериментална истраживања по аналогiji са испитивањима обављеним у оквиру ове дисертације. Том приликом би требало водити рачуна о габаритима узорака над којима би се изводила дефектоскопија, а у неким случајевима би била неопходна и улагања у нова конструкциона решења самог дефектоскопа. Наставак истраживања би се могао односити и на оптимизацију дефектоскопа у примени код узорака још комплексније геометрије коју често имају индустријски производи.

Усавршавање дефектоскопа на основу КТUD методе, могло би ићи ка трансформацији приказаног стационарног дефектоскопа ка мобилном дефектоскопу или чак дефектоскопу који би био реализован у облику интелигентног сензора. Таква конструкција би била могућа, пре свега због веома лаганих основних делова оваког сензора. Овакви интелигентни сензори би се могли користити нпр. за контролу стања материјала авиона или сателита, уз могућност алармирања током лета. Наведене варијанте могу бити предмет наставка истраживања и усавршавања овде приказане КТUD методе и реализованог дефектоскопа.

6.

ЛИТЕРАТУРА

- [Ask84] D.R. Askeland, „The Science and Engineering of Materials“, PWS Publishers, Belmont, California, USA, 1984
- [Are08] T. Arens, F. Hettlich, Ch. Karpnger, U. Kockelkorn, K. Lichtenegger, H. Stachel, „Mathematik“. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg, 2008
- [Aul90] B.A. Auld, „Acoustic Fields and Waves in Solids“, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida U.S.A, 1990
- [Bad95] B. Badrinarayan, „Study of the Selective Laser Sintering of Metal-Polymer Powders“, The University of Texas at Austin, USA, Austin, Dissertation, 1995
- [Bar02] R. Barkmann, C.-C. Gluer, „Associations between parameters of ultrasound transmission and structural parameters of cortical bone“, Ultrasonics Symposium, Proceedings. IEEE; Volume: 2; DOI 10.1109/ULTSYM.2002.1192611; 2002 Page(s): 1649 - 1652
- [Bar06] S. Barrett, D. Pack, „Microcontrollers Fundamentals for Engineers and Scientists (Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems)“, Morgan and Claypool Publishers, Washington, 2006
- [Bar07] O. Barbian, „Handbuch Automatisierte Ultraschall-Prüfsysteme“, Dvs Media, Düsseldorf, 2007
- [Bea97] J. Beaman, J. Barlow, D. Bourell, R. Crawford, „Solid Freeform Fabrication. A New Direction in Rapid Manufacturing.“, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997
- [Ben02] M. Benz, „Ultraschall zur Erfassung innerer Freiformgeometrien auf Werkzeugmaschinen“, Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2002
- [Ber11] H. Bernstein, „Mikrocontroller in der Elektronik: Mikrocontroller programmieren und in der Praxis einsetzen“, Franzis Verlag, München, 2011
- [Ber49] L. Bergmann, „Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik“, Hirzel Verlag, Leipzig, 1949

- [Ber54] L. Bergmann, „Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik“, Hirzel, Leipzig, 1954
- [Bha87] A.B. Bhatia, „Ultrasonic Absorption: An Introduction to the Theory of Sound Absorption and Dispersion in Gases, Liquids, and Solids“, Dover Publications Inc., Mineola, New York, USA, 1987
- [Bos04] H. Bossel, „Systeme, Dynamik, Simulation, Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme“, Books on Demand, Nordenstedt, 2004
- [Bou09] T. Bouden, S. Dib, K. Aissaous, M. Grimes, „Signal processing methods for materials defects detection“, Ultrasonics Symposium (IUS), IEEE International; Digital Object Identifier: 10.1109/ULTSYM.2009.5441482; 2009 Page(s): 1 - 4
- [Bow11] C.R. Bowen, P.F. Giddings, A.I.T. Salo, H.A. Kim, „Modeling and characterization of piezoelectrically actuated bistable composites“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Dept. of Mech. Eng., Univ. of Bath, Bath, UK September 2011. Volume: 58 Issue: 9, Bath, 1737 - 1750
- [Bra10] G. Branner, „Modellierung transiente Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren“, Technische Universität München, München, 2010
- [Bul09] H.J. Bullinger, „Technology Guide: Principles, Applications, Trends“, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [Bur93] S. Burkhardt, „Parallele Rechnersysteme und Anwendung“, Verlag Technik GmbH, Berlin - München, 1993
- [Cel05] J. Celko, „SQL Programming Style“, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 2005
- [Cha95] S. Chatterjee, B. Price, G. Lorenzen, „Praxis der Regressionsanalyse“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 1995
- [Chi05] Chi-Hung Huang, Chien-Ching Ma, Yu-Chih Lin, „Theoretical, numerical, and experimental investigation on resonant vibrations of piezoceramic annular disks“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control; Volume: 52, Issue: 8; Digital Object Identifier: 10.1109/TUFFC.2005.1509779; 2005, Page(s): 1204 - 1216
- [Coo96] C. Cooke, „An Introduction To Experimental Physics“, CRC Press, Florida, USA, 1996
- [Cor87] H.W. Corsepius, „Ultraschall-Prüftechnik für Praktiker“, Holzmann Verlag, Bad Woerishofen, 1987
- [Cre96] L. Cremer, M. Heckl, „Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen“, Springer-Verlag Berlin GmbH & Co. K, Berlin, 1996
-

-
- [Czy07] G. Czycholl, „Theoretische Festkörperphysik“, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Dav12] L. Davidson, „Pro SQL Server Relational Database Design and Implementation“, APress, New York, 2012
- [DDI06] „Materialprüfnormen für metallische Werkstoffe 2: Zerstörungsfreie Prüfungen, Volumenverfahren, Durchstrahlungsprüfung, Ultraschallprüfung“, Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [DIN97] DIN 19226, „Leittechnik - Regelungstechnik und Steuerungstechnik“, Beuth Verlag, Berlin, 1997
- [Dec88] C. Deckard, „Selective Laser Sintering“, The University of Texas at Austin, USA, Austin, Dissertation, 1988
- [Del04] S. Delorme, J. Debus, „Ultraschalldiagnostik“, Thieme, Stuttgart, 2004
- [Deu95] V. Deutsch, M. Vogt, „Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen“, Dvs Media, Düsseldorf, 1995
- [Deu97] V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt, „Ultraschallprüfung. Grundlagen und industrielle Anwendungen“, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [Die00] K.H. Dietsche, M. Ohsmann, „Mikrocontroller Handbuch. Grundlagen, Hardware und Programmierung“, Elektor Verlag, Sande, 2000
- [Die06] V.C. Dietrich, „Ultraschall-Kurs: Organbezogene Darstellung von Grund-, Aufbau- und Abschlusskurs. Nach den Richtlinien von KBV, DEGUM, ÖGUM und SGUM“, Deutscher Ärzte-Verlag, Köln, 2006
- [Döh05] V. H. Döhler, „Informationsgewinn durch Messung“, Expert-Verlag, Renningen, 2005
- [Don80] I. Donald, „Ultraschall in der medizinischen Diagnostik“, Walter de Gruyter, Berlin, 1980
- [DPMA] „Nemački Centralni Zavod za Patente“ („Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA)“) kao odeljenje „Nemačkog Saveznog Ministarstva Pravosuđa“, Berlin, <http://www.dpma.de/amt/>
- [Dun88] R.A. Dunlap, „Experimental Physics: Modern Methods“, Oxford University Press, Oxford, USA, 1988
- [Eis66] F. Eisenkolb, „Einführung in die Werkstoffkunde“, VEB Verlag, Berlin, 1966
- [Evj06] B. Evjen, „Professional ASP.NET 2.0“, Wiley & Sons, Inc., San Francisco, 2006
- [Fae02] J. Faehrer, „Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinteringprozesses“, Technische Universität München, München, 2002
- [Far07] F.M. Farmer, „Electrical Measurements in Practice“, Dodo Press, Gloucester, UK, 2007
-

- [Far08] J. Farrell, „Microsoft Visual C#: An Introduction to Object-Oriented Programming“, South Western Educ Publishing, Cincinnati, 2008
- [Far10] M. Farina, L. Galleani, P. Tavella, S. Bittanti, „A control theory approach to clock steering techniques“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Politec. di Milano, Milan, Italy October 2010. Volume: 57 Issue:10, 2010, 2257 - 2270
- [Flu66] S. Flugge, „Handbuch Der Physik/Encyclopedia of Physics: 49 (Part 1)“, Springer-Verlag, Berlin, 1966
- [Flu71] S. Flugge, „Handbuch Der Physik/Encyclopedia of Physics: 49 (Part 3)“, Springer-Verlag, Berlin, 1971
- [FRA] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Projektgruppe Augsburg, Germany.
- [Gad00] D.V. Gadre, „Programming And Customizing the AVR Microcontroller“, McGraw-Hill Professional, New York City, 2000
- [Geb07] A. Gebhardt, „Generative Fertigungsverfahren.“, Hanser, München, 2007
- [Ger96] R. German, „Sintering Theory and Practice“, Wiley & Sons, New York, 1996
- [Ges06] J. Gessert, G.W. Moore, M.E. Schafer, „Development of a Novel Hand-Held Ultrasonic Probe Test Device“, Ultrasonics Symposium, IEEE; Digital Object Identifier: 10.1109/ULTSYM.2006.410; 2006, Page(s): 1622 - 1624
- [Gil02] D.W. Gill, „Building Web Applications with C#“, RC Press Inc., N.Y., 2002
- [Gli02] M. Glinka, „Thermoakustische Ultraschall-Leistungsmesser: Modellierung und Experiment“, Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2002
- [Gob06] J. Gobrecht, „Werkstofftechnik - Metalle“, Oldenbourg Verlag, München, 2006
- [Gol05] Lj. Golubović, „Električna merenja neelektričnih veličina“, Tehnički fakultet u Čačku, Čačak, 2005
- [Gol95] H.D. Golde, „Ultraschall - Metallschweißen“, Moderne Industrie, Landsberg, 1995
- [Got07] G. Gottstein, „Physikalische Grundlagen der Materialkunde“, Springer, Berlin, 2007
- [Gri02] A.M. Grishin, V.P. Denysenkov, „Broad band microwave probe for nondestructive test of dielectric coatings“, IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Dept. of Condensed Matter Phys., R. Inst. of Technol., Stockholm, Sweden. ISSN : 1099-4734 28 May-1 June 2002 91 – 93

-
- [Grm07] J. Grman, R. Ravas, L. Syrova, „The Role of Wavelet Analysis in the Nondestructive Defectoscopy by Eddy-Currents“, Radioelektronika, 2007. 17th International Conference Issue Date : 24-25 April 2007., Montreal, 2007 Slovenska Technicka Univ. Bratislave, Bratislava. ISBN: 1-4244-0821-0 1 - 3
- [Hag11] M. Hagiwara, S. Takahashi, T. Hoshina, H. Takeda, T. Tsurumi, „Analysis of nonlinear transient responses of piezoelectric resonators“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, ISSN: 0885-3010. Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology September 2011. Volume: 58 Issue:9, 1721 - 1729
- [Hau91] A. Haug, F. Haug, „Angewandte Elektrische Messtechnik. Grundlagen, Sensorik, Messwertverarbeitung“, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1991
- [HBM] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 64293 Darmsatdt, Germany
- [Heg09] J. Hegemann, „Simulation und Bewertung von Porosität in CFK mit Ultraschall“, Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2009
- [Hen07] B. Henrich, „Partikelbasierte Simulationsmethoden in Pulvertechnologie und Nanofluidik“, Universität Freiburg, Freiburg, Dissertation, 2007
- [Him10] G. Himunzowa, „Iterative Feedback Tuning into Microcontroller: Investigations into Implementation of Iterative Feedback Tuning Algorithm into Microcontroller“, LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, 2010
- [Hof97] R. Hoffmann, „Signalanalyse und Erkennung“, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [Hüb95] K.H. Hübner, „Ultraschallprüfung. Grundlagen - Geräte - Anwendungen“, Springer Verlag, Berlin, 1995
- [Jän08] K. Jänich, „Vektoranalyse“, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [Jin12] D. Jin, S.Lin, „Advances in Computer Science and Information Engineering“ Springer Verlag, Berlin, 2012
- [Kan07] K. Kant, „Microprocessors and Microcontrollers - Architecture, Programming and System Design“, Prentice-Hall of India Pvt.Ltd, New Delhi, 2007
- [Käs08] K.H. Käse-Kaßbaum, „Analytische Geometrie“, Käse-Kaßbaum, Uetersen, 2008
- [Kha04] V.S. Khandetsky, V.V. Gerasimov, „Research of electrodynamic processes in defectoscopy of composites“, 10th International Conference on Issue Date : Sept. 14-17, 2004., Dnepropetrovsk, 2004. Department of Radio Physics of DNU, Naukova 13, Dnepropetrovsk 49050, Ukraina. ISBN: 0-7803-8441-5 283 - 285
- [Koc00] G. Koch, K. Loney, „Die Oracle 8 Referenz“, Carl Hanser Verl., Muenchen, 2000
- [Kof05] M. Kofler, B. Oeggl, „MySQL 5 Programmier-Techniken“, Addison-Wesley, Amsterdam, 2005
-

- [Kom08] V. Kompis, „Composites with Micro- and Nano-Structure: Computational Modeling and Experiments“, Springer Verlag, Berlin, 2008
- [Kos10] P. Kosmol, „Optimierung und Approximation (de Gruyter Lehrbuch)“, Gruyter, Berlin, 2010
- [Kra86] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, „Werkstoffprüfung mit Ultraschall“, Springer, Berlin, 1986
- [Kre94] H. Kremer, W. Dobrinski, „Sonographische Diagnostik. Innere Medizin und angrenzende Gebiete“, Urban & Fischer Verlag, München, 1994
- [Kru05] J. P. Kruth, P. Mercelis, J. van Vaerenbergh, L. Froyen, M. Rombouts, „Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting“, Rapid Prototyping Journal 11 (2005) 1, p. 26 - 36.
- [Kut06] H. Kuttruff, „Acoustics: An Introduction“, Routledge Chapman & Hall, New Ed, Abingdon, Oxon, UK, 2006
- [Kut88] H. Kuttruff, „Physik und Technik des Ultraschalls“, S. Hirtzel Verlag, Stuttgart, 1988
- [Lan09] K.J. Langenberg, R. Marklein, K. Mayer, „Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall“, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2009
- [Leh85] W. Lehfeldt, „Ultraschall kurz und bündig. Physikalische Grundlagen und Anwendungen“, Vogel Verlag Und Druck, Würzburg, 1985
- [Ler09] R. Lerch, „Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen“, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2009
- [Ler10] R. Lerch, „Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren“, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2010
- [Lev10] P. Levesque, M. Sawan, „Novel low-power ultrasound digital preprocessing architecture for wireless display“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Polystim Neurotechnologies Lab., Ecole Polytech. de Montreal, Montreal, QC, Canada March 2010. Volume: 57 Issue:3
- [Lie10] Liexiang Fan, Hsu, S.J., Zeng, X.J., Chi-Yin Lee, Sutedja, R., Kook, J., Sekins, K.M., „A method for automated detection of high intensity focused ultrasound (HIFU) beams in 3D space“, IEEE; Ultrasonics Symposium (IUS), Digital Object Identifier: 10.1109/ULTSYM.2010.5935457; 2010, Page(s): 471 - 474
- [Lin08] S. Link, „Einflüsse von Ultraschall auf Zellen im Gewebeverband“, Vdm Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2008
- [Lud94] S. Luding, „Models and Simulations of Granular Materials“, Universität Freiburg, Freiburg, Dissertation, 1994
-

-
- [Mac05] M. Macht, „Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping“, Diss TU München, 1999
- [Mac99] M. MacDonald, M. Szpuszta, „ASP.NET 2.0 in C#“, Berkeley USA, Berkeley, 2005
- [Meh07] A. Mehta, „Granular Physics“, Cambridge University Press, Cambridge, 2007
- [Mei05] M. Meindl, „Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing“, Technische Universität München, München, Dissertation, 2005
- [Mei99] W. Meiners, „Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe“, Diss., RWTH Aachen, Nemačka, 1999
- [Mey86] E. Meyer, E.G. Neumann, „Physikalische und Technische Akustik.“, Vieweg Friedr. + Sohn Ver, Wiesbaden, 1986
- [Mil04] D. Milošević, M. Brković, „Računarstvo i Informatika“, Tehnički fakultet Čačak, Čačak, Serbia, 2004
- [Mil87] R. Millner, „Wissenspeicher Ultraschalltechnik“, VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1987
- [Mit05] N. Mitrović, „Senzori fizički principi i primene“, Tehnički fakultet u Čačku, Čačak, 2005
- [Moe07] E. Moeller, „Handbuch Konstruktionswerkstoffe. Auswahl, Eigenschaften, Anwendung“, Hanser Fachbuchverlag, Leipzig, 2007
- [Mor87] B. Morgenstern, M. Rübél, W. Kreysch, „Ultraschall- Diagnosegeräte“, TÜV Media GmbH, Köln, 1987
- [Mös09] M. Möser, „Technische Akustik (VDI-Buch)“, Springer Verlag, Berlin, 2009
- [Müh08] T. Mühl, „Einführung in die elektrische Messtechnik: Grundlagen, Messverfahren, Geräte“, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- [Mül04] K.P. Müller, „Raumgeometrie: Raumphänomene - Konstruieren - Berechnen“, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004
- [Mül96] K.P. Müller, „Lehrbuch Oberflächentechnik“, Vieweg Verlagsgesellschaft, Wiesbaden, 1996
- [Nak11] K. Nakamura, „Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications“, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, 2011
- [Nel93] J. Nelson, „Selective Laser Sintering, a Definition of the Process and an Empirical Sintering Model“, Diss., The University of Texas at Austin, USA 1993.
-

- [Nie02] M. Niemann, „Signalverarbeitung in der Ultraschall-Durchflußmessung“, Shaker Verlag GmbH, Aachen, 2002
- [Nit05] M. Nitschke, „Geometrie: Anwendungsbezogene Grundlagen und Beispiele“, Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG, München, 2005
- [Oli78] A.A. Oliner, „Acoustic surface waves (Topics in applied physics ; v. 24)“, Springer-Verlag, Berlin, 1978
- [Ove03] C. Over, „Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und titan TiAl6V4 mit „Selective Laser Melting“, RWTH Aachen, Aachen, 2003
- [Par80] M. Parrinello, A. Rahman, „Crystal-Structure and Pair Potentials - A Molecular-Dynamics Study“, Phys. Rev. Lett. 45, 1980
- [Pat09] G. Patitz, „Zerstörungsfreie Untersuchung an altem Mauerwerk: Radar, Ultraschall und Seismik in der Baupraxis“, Beuth, Berlin, 2009
- [Per10] Pérez, N., Andrade, M.A.B., Buiocchi, F., Adamowski, J.C., „Identification of elastic, dielectric, and piezoelectric constants in piezoceramic disks“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Volume: 57 , Issue: 12; Digital Object Identifier: 10.1109/TUFFC.2010.1751; 2010 , Page(s): 2772 – 2783
- [Per65] W. Perry, R. Mason, „Physical acoustics“, Volume III: PART B - Lattice Dynamics“, Academic Press, Waltham, Massachusetts, USA, 1965
- [Pet91] Č. Petrović, D. Đorđević, „Osnovi tehnologije elektrotehničkih materijala“, Naučna knjiga, Beograd, 1991
- [Pfe99] W. Pfeiffer, „Elektrische Meßtechnik“, Vde-Verlag, Berlin, 1999
- [PIC] PI Ceramic GmbH, Lindenstrasse, 07589 Lederhose, Nemačka
- [Pie11] T. Pientka, „Raumgeometrie“, Grin Verlag, San Francisco, 2011
- [Pot09] C. Potthast, J. Wallaschek, „Numerische und experimentelle Untersuchung eines Ultraschall- Schlagbohrwerkzeugs“, PZH, Garbsen, 2009
- [Ran96] M. Randall, M. Randell, „Sintering Theory and Practice“, Wiley & Sons, Inc., San Francisco, California, USA, 1996
- [Rau00] T. Rauber, G. Rüniger, „Parallele und verteilte Programmierung“, Springer Verlag, Berlin, 2000
- [Rhe00] Rhee, S., Shrout, T.R., Ritter, T.A., Thumm, M., „Investigation of high frequency (2.45 GHz, 30 GHz) processing of Pb-based piezoelectrics for ultrasound transducers“, Ultrasonics Symposium, 2000 IEEE; Volume: 2; Digital Object Identifier: 10.1109/ULTSYM.2000.921489; Publication Year: 2000 , Page(s): 81 - 984 vol.2
-

-
- [Rot98] A. Roth, „Das Mikrocontroller-Applikations - Kochbuch“, mitp, Remscheid, 1998
- [Rug02] J. Ruge, „Signalanalyse und Erkennung“, Vieweg Verlag, Braunschweig, 2002.
- [Sch08] G. Schmidt, C. Görg, „Kursbuch Ultraschall: Nach den Richtlinien der DEGUM und der KBV“, Thieme, Stuttgart, 2008
- [Sch06] H. Scheid, „Elemente der Geometrie“, Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 2006.
- [Sch07] E. Schrüfer, „Elektrische Meßtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen“, Hanser Fachbuchverlag, Leipzig, 2007
- [Sct07] W. Schatt, K.P. Wieters, B. Kieback, „Technologie und Werkstoffe“, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [Sch10] G. Schmitt, „Mikrocomputertechnik mit Controllern der Atmel AVR-RISC-Familie: Programmierung in Assembler und C - Schaltungen und Anwendungen“, Oldenbourg wissenschaftsverlag, München, 2010
- [Sch71] A. Schönhage, „Approximationstheorie“, De Gruyter, Berlin, 1971
- [Sch83] W. Schober, „Mit Echolot und Ultraschall“, Herder, Freiburg, 1983
Lizenzausgabe edition Leipzig
- [Sch86] W. Schober, „Mit Echolot und Ultraschall“, Herder Verlag GmbH, Freiburg, 1986
- [Sch88] W. Schatt, „Pulvermatalurgie, Sinter- und Verbundstoffe“, VDI Verlag, Leipzig, 1988
- [Sch96] H. Schwartze, I. Schütze, „Konstruktive Raumgeometrie mit Computerhilfe“, Spektrum Akad. Vlg., Hdg., Heidelberg, 1996
- [She06] G. Shepperd, „Microsoft ASP .NET Schritt für Schritt“, Microsoft Press, Unterschleißheim, 2006
- [Sic94] T. Sickel, „Programming Microcontrollers in C“, LLH Technology Publishing, US, Eagle Rock, 1994
- [Sig07] M. Sigl, „Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns“, Diss., Technische Universität München, Nemačka, 2007
- [Sim96] G. Simpson, J. Blitz, „Ultrasonic Methods of Nondestructive Testing“, Springer, Dordrecht, Netherlands, 1996
- [SLM] SLM Solutions GmbH, Roggenhorster Straße 9c, 23556 Lübeck, Nemačka
- [Sor02] G. Sorge, „Faszination Ultraschall“, Teubner Verlag, Stuttgart, 2002
-

- [Ste00] J. Steinberger, J. Shen, K. Manetsberger, J. Muellers, „Compensation of Nonlinear Shrinkage of Polymer Materials in Selective Laser Sintering“, In: Bourell, D. L. et al.: Solid Freeform Fabrication Proceedings 2000, Austin, USA: Kluwer Academic Publisher 2000. p. 377-385.
- [Str09] J. Strobel, „Werkzeuge zur Charakterisierung der Kavitation in Ultraschall-Reinigungsbädern“, Der Andere Verlag, Köln, 2009
- [Sut84] V. Sutilov, P. Hauptmann, „Physik des Ultraschalls“, Springer, Berlin, 1984
- [Thu98] M. Thumm, W. Wiesbeck, S. Kern, „Hochfrequenzmesstechnik, Verfahren und Meßsysteme“, Teubner Verlag, Stuttgart, 1998
- [Ung10] T. Ungerer, „Mikrocontroller und Mikroprozessoren (eXamen.press)“, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 2010
- [Way01] R. Waymire, „Microsoft SQL Server“, Sams Publishing, Indianapolis, 2001
- [Wea11] V.P.M. Weaver, M.G. Cain, T.M. Correia, M. Stewart, „Electromechanical coupling and temperature-dependent polarization reversal in piezoelectric ceramics“, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Nat. Phys. Lab., Teddington, UK September 2011. Volume: 58 Issue:9, Teddington, 1730 - 1736
- [Wed07] B.D. Wedlock, J.K. Roberge, „Electronic Components and Measurements“, Prentice Hall, New Jersey, USA, 2007
- [Wei97] C. Weissmantel, C. Hamann, „Grundlagen der Festkörperphysik“, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [Wie04] J. Wiegmann, „Softwareentwicklung in C für Mikroprozessoren und Mikrocontroller“, Huethig GmbH, Heidelberg, 2004
- [Wie09] J. Wiegmann, „Softwareentwicklung in C für Mikroprozessoren und Mikrocontroller: C-Programmierung für Embedded-Systeme“, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2009
- [Wit04] J. Witte, „Programmieren in C#“, Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2004
- [Woh09] T. Wohlers, „Wohlers Report 2009: State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report“, Fort Collins, Colorado, USA: Wohlers Associates 2009
- [Won08] A. Wonisch, „Entwicklung und Anwendung partikelbasierter Simulationstechniken“, Universität Freiburg, Freiburg, Dissertation, 2008
- [Yu06] H.S. Yu, „Plasticity and Geotechnics, Advances in Mechanics and Mathematics“, Springer Verlag, Berlin, 2006
- [Zae06] M. F. Zäh, „Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien“, Hanser Verlag, München, 2006

7.

ПРИЛОЗИ

7.1 Патентно писмо и додела патента KTUD дефектоскопа

(19)  Deutsches
Patent- und Markenamt



(10) DE 10 2010 046 781 B4 2012.11.08

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2010 046 781.2

(51) Int Cl.: G01N 29/26 (2006.01)

(22) Anmeldetag: 28.09.2010

(43) Offenlegungstag: 29.03.2012

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 08.11.2012

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Ebersold, Zoran, 86165, Augsburg, DE

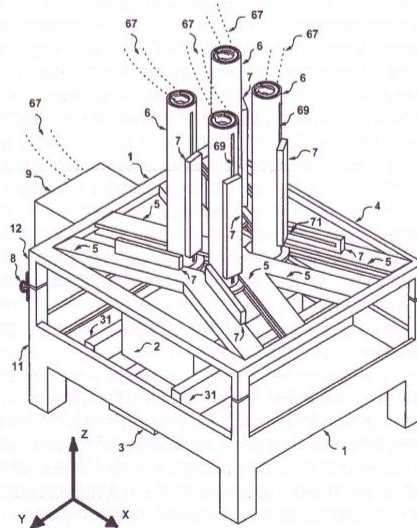
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

(72) Erfinder:
gleich Patentinhaber

DE 35 07 206 A1
DE 29 908 113 U1

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung eines Prüfgegenstands mittels
Ultraschallwellen**

(57) Hauptanspruch: Vorrichtung zur zerstörungsfreien Materialprüfung eines Prüfgegenstands (2) durch Beaufschlagen des Prüfgegenstands (2) mit Ultraschallwellen und Erfassen der den Prüfgegenstand (2) durchdringenden Ultraschallwellen bestehend aus einem Prüfkäfig (1) und einer Steuer- und Auswerteinheit (9), wobei der Prüfkäfig (1) so ausgebildet ist, dass er aus einem unteren Teil (11) und einem oberen Teil (12) besteht und der Prüfkäfig (1) mittels Scharnieren (8), die das untere Teil (11) und das obere Teil (12) verbinden, aufklappbar ist und im Boden (3) des Prüfkäfigs (1) ein Ultraschallsender (33) eingebaut ist, der den auf den Boden (3) des Prüfkäfigs (1) gelegten Prüfgegenstand (2) von der Unterseite mit Ultraschallwellen beaufschlagt, wobei an der Decke (4) des Prüfkäfigs (1) sich zwei paarweise angeordnete Führungsschienen (5) befinden, an denen vier Messköpfe (6) angebracht sind und laufen und positioniert werden können, und die Messköpfe (6) sich während des Schließens des aufklappbaren Prüfkäfigs (1) an die Oberfläche (21) des Prüfgegenstands...





Deutsches
Patent- und Markenamt

POSTANSCHRIFT Deutsches Patent- und Markenamt • 80297 München

Herrn Dipl.-Ing.
Zoran Ebersold
Quellenstraße 3
86165 Augsburg

HAUSANSCHRIFT Zweibrückenstraße 12, 80331 München

POSTANSCHRIFT 80297 München

KONTAKT Dr. Marcus Preisinger

TEL +49 89 2195-3059

FAX +49 89 2195-2221

INTERNET www.dpma.de

AKTENZEICHEN 10 2010 046 781.2

ANMELDER/INHABER Ebersold

IHR ZEICHEN

ERSTELLT AM 27.07.2012

Bitte Aktenzeichen und Anmelder/Inhaber bei allen Eingaben und Zahlungen angeben!

Erteilungsbeschluss

Auf die Patentanmeldung

10 2010 046 781.2

von

Ebersold, Zoran, 86165 Augsburg, DE

wird ein vom 29.09.2010 an laufendes Patent unter der Bezeichnung

**Vorrichtung und Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung eines Prüfgegenstands mittels
Ultraschallwellen**

mit den Unterlagen gemäß beigefügter Zusammenstellung der Publikationsunterlagen für die Patentschrift, die Bestandteil des Beschlusses ist, erteilt.

Das Patent führt die Nummer **10 2010 046 781**.

Die unter der Spalte „Änderungen“ in der Zusammenstellung der Publikationsunterlagen für die Patentschrift angegebenen Teile der Unterlagen sind als Beschlussbestandteil beigefügt.

Auf die beigefügte Rechtsmittelbelehrung wird hingewiesen.

Prüfungsstelle für Klasse G01N

Dr. Marcus Preisinger



Dieses Dokument wurde elektronisch signiert und ist ohne Unterschrift gültig.

Einschreiben durch Übergabe

Anlage(n)

DOKUMENTENANNAHME UND NACHTBRIEFKASTEN nur Zweibrückenstraße 12

HAUSADRESSE (FÜR FRACHT): Zweibrückenstraße 12, 80331 München

ZAHLUNGSEMPFÄNGER: Bundeskasse Weiden, Bk München, Kto.Nr.: 700 010 54, BLZ: 700 000 00, BIC (SWIFT-Code): MARKDEF1700, IBAN: DE84 7000 0000 0070 0010 54

A 9114 / 10.10

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

URKUNDE

über die Erteilung des

Patents

Nr. 10 2010 046 781

IPC
G01N 29/26

Bezeichnung
Vorrichtung und Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung eines Prüfgegenstands
mittels Ultraschallwellen

Patentinhaber
Zoran Ebersold, 86165 Augsburg, DE

Erfinder
Erfinder gleich Anmelder

Tag der Anmeldung
28.09.2010

München, den 08.11.2012



Die Präsidentin des Deutschen Patent- und Markenamts

Rudloff-Schäffer

7.2 Позив Одбора за дефектоскопију без разарања Савеза немачких инжењера (VDI)

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft



VDI-Gesellschaft Materials Engineering

Fachausschuss für anwendungsnahe zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung

Termin: Mittwoch, 28. September 2011, 10:30 – 16:00 Uhr
Ort: Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf – Raum: Alexisbad
Anlass: Fachausschusssitzung

Sitzungsleitung: Thomas Ullmann
Gastgeber: Achim Eggert

- 10:30 Begrüßung
- 10:35 Webseitengestaltung und Internetpräsenz des Fachausschusses
Frau Mäkinen/Herr Eggert in Diskussion mit den Ausschussmitgliedern,
Festlegung für weiteres Vorgehen
- 12:00 ***Quadrophonic Transmissional Ultrasonic Defectoscopy Method (QTUD)
for Materials Testing***
Präsentation: Zoran Ebersold, Hochschule Augsburg
- 12:45 Mittag
- 13:30 ***3D-Terahertz-Bildgebung verborgener Defekte in Kunststoff und Keramik***
Präsentation: Stefan Becker, Becker Photonik GmbH, Porta Westfalica
- 14:30 Planung für VDI-Expertenforum 2012
Terminoptionen, Titel/Schwerpunkte d. Veranstaltung, Vorträge bzw. einzuladende
Referenten, Werbemaßnahmen im Vorfeld, Unterstützung durch VDI-GME, etc.
- 15:45 Sonstiges
- Anstehende Termine/Veranstaltungen
 - Nächstes Treffen & weitere Aktionen
- 16:00 Ende

Kontakt für Rückfragen:
T. Ullmann, Tel. 0170-900 36 17, e-mail: thomas.ullmann@dlr.de

7.3 Изводи из софтверског кода

База података

```
CREATE TABLE T_State (
  ID_State          bigint IDENTITY(1,1) NOT NULL,
  Name_State       nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_State    nvarchar (400) NULL,
  State_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_State_CreateDate DEFAULT
  (getdate()),
  CONSTRAINT pk_T_State PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_State)
)

CREATE TABLE T_User (
  ID_User          uniqueidentifier NOT NULL,
  NameFamily_User  nvarchar (100) NOT NULL,
  NameFirst_User   nvarchar (100) NOT NULL,
  Loginname_User   nvarchar (100) NOT NULL,
  Email_User       nvarchar (100) NOT NULL,
  Password_User    nvarchar (100) NOT NULL,
  Comment_User     nvarchar (400) NULL,
  User_CreateDate  datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_User_CreateDate DEFAULT
  (getdate()),
  ID_State         bigint NULL,
  CONSTRAINT pk_T_User PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_User),
  CONSTRAINT fk_T_User_ID_State FOREIGN KEY (ID_State) REFERENCES T_State
  (ID_State)
)

CREATE TABLE T_Signal (
  ID_Signal        bigint IDENTITY(1,1) NOT NULL,
  Name_Signal      nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Signal   nvarchar (400) NULL,
  Signal_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Signal_CreateDate
  DEFAULT (getdate()),
  CONSTRAINT pk_T_Signal PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Signal)
)

CREATE TABLE T_Image (
  ID_Image         bigint IDENTITY(7001,1) NOT NULL,
  Name_Image       nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Image    nvarchar (400) NULL,
  Image_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Image_CreateDate DEFAULT
  (getdate()),
  CONSTRAINT pk_T_Image PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Image)
)
```

```
CREATE TABLE T_Strategy (
ID_Strategy          bigint IDENTITY(1,1) NOT NULL,
Name_Strategy        nvarchar (200) NOT NULL,
Comment_Strategy     nvarchar (400) NULL,
Strategy_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Strategy_CreateDate
DEFAULT (getdate()),
CONSTRAINT pk_T_Strategy PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Strategy) )

CREATE TABLE T_Device (
ID_Device            bigint IDENTITY(4001,1) NOT NULL,
Name_Device          nvarchar (200) NOT NULL,
Comment_Device       nvarchar (400) NULL,
Characteristics_Device nvarchar (400) NULL,
ID_Image             bigint NULL,
Device_CreateDate    datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Device_CreateDate
DEFAULT (getdate()),
ID_State             bigint NULL,
CONSTRAINT pk_T_Device PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Device)
)

CREATE TABLE T_Material (
ID_Material          bigint IDENTITY(3001,1) NOT NULL,
Name_Material        nvarchar (200) NOT NULL,
Comment_Material     nvarchar (400) NULL,
Characteristics_Material nvarchar (400) NULL,
ID_Image             bigint NULL,
Material_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Material_CreateDate
DEFAULT (getdate()),
ID_State             bigint NULL,
CONSTRAINT pk_T_Material PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Material)
)

CREATE TABLE T_Sample(
ID_Sample            bigint IDENTITY(5001,1) NOT NULL,
Name_Sample          nvarchar (200) NOT NULL,
Comment_Sample       nvarchar (400) NULL,
ID_Material          bigint NOT NULL,
Unit_Sample          nvarchar (50) NULL,
Length_Sample        int NULL,
Width_Sample         int NULL,
Height_Sample        int NULL,
Call_X               int NULL,
Call_Y               int NULL,
Cal2_X               int NULL,
Cal2_Y               int NULL,
ID_Image             bigint NULL,
Sample_CreateDate    datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Sample_Sample_CreateDate
DEFAULT (getdate()),
ID_State             bigint NULL,
CONSTRAINT pk_T_Sample PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Sample),
CONSTRAINT fk_T_Sample_ID_Material FOREIGN KEY (ID_Material) REFERENCES
T_Material (ID_Material) )
```

```
CREATE TABLE T_Measurement_Type (
  ID_Measurement_Type          int IDENTITY(1,1) NOT NULL,
  Type_Description             nvarchar(80) NOT NULL,
  Type_CreateDate              datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Type_CreateDate DEFAULT
  (getdate()),
  CONSTRAINT pk_T_Measurement_Type PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement_Type)
)

CREATE TABLE T_Measurement (
  ID_Measurement                bigint IDENTITY(100,1) NOT NULL,
  Name_Measurement              nvarchar (200) NOT NULL,
  Name_ImportFile               nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Measurement           nvarchar (400) NULL,
  X_Axis_Unit                   nvarchar (20) NULL,
  X_Axis_Label                  nvarchar (80) NULL,
  Y_Axis_Unit                   nvarchar (20) NULL,
  Y1_Axis_Label                 nvarchar (80) NULL,
  Y1_Axis_ID_Signal             bigint          NULL,
  Y2_Axis_Label                 nvarchar (80) NULL,
  Y2_Axis_ID_Signal             bigint          NULL,
  Y3_Axis_Label                 nvarchar (80) NULL,
  Y3_Axis_ID_Signal             bigint          NULL,
  Z_Axis_Unit                   nvarchar (20) NULL,
  Z_Axis_Label                  nvarchar (80) NULL,
  ID_Sample                     bigint NOT NULL,
  ID_Strategy                   bigint NULL,
  ID_Image                      bigint NULL,
  Measurement_CreateDate        datetime NOT NULL CONSTRAINT
  df_T_Measurement_CreateDate DEFAULT (getdate()),
  ID_UserCreate                 uniqueidentifier NULL,
  ID_State                      bigint NULL,
  ID_Measurement_Type           int NOT NULL,
  CONSTRAINT pk_T_Measurement PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Sample FOREIGN KEY (ID_Sample) REFERENCES
  T_Sample (ID_Sample),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Strategy FOREIGN KEY (ID_Strategy) REFERENCES
  T_Strategy (ID_Strategy),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Image FOREIGN KEY (ID_Image) REFERENCES T_Image
  (ID_Image),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_User FOREIGN KEY (ID_UserCreate) REFERENCES
  T_User (ID_User),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_State FOREIGN KEY (ID_State) REFERENCES T_State
  (ID_State),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Type FOREIGN KEY (ID_Measurement_Type)
  REFERENCES T_Measurement_Type (ID_Measurement_Type),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_Y1_Axis_ID_Signal FOREIGN KEY (Y1_Axis_ID_Signal)
  REFERENCES T_Signal (ID_Signal),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_Y2_Axis_ID_Signal FOREIGN KEY (Y2_Axis_ID_Signal)
  REFERENCES T_Signal (ID_Signal),
  CONSTRAINT fk_T_Measurement_Y3_Axis_ID_Signal FOREIGN KEY (Y3_Axis_ID_Signal)
  REFERENCES T_Signal (ID_Signal) )
```

```
CREATE TABLE T_Measurement_Device (
ID_Measurement      bigint NOT NULL,
ID_Device           bigint NOT NULL,
Measurement_Device_CreateDate      datetime NOT NULL
CONSTRAINT df_T_Measurement_Device_CreateDate DEFAULT (getdate()),
CONSTRAINT pk_T_Measurement_Device PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement,
ID_Device),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_Device_ID_Measurement FOREIGN KEY (ID_Measurement)
REFERENCES T_Measurement (ID_Measurement),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_Device_ID_Signal FOREIGN KEY (ID_Device)
REFERENCES T_Device (ID_Device) )
CREATE TABLE T_MeasurementDataXYZ (
ID_Measurement      bigint NOT NULL,
Measurement_Counter int NOT NULL,
X_Axis_Value        int NOT NULL,
Y1_Axis_Value       int NULL,
Y2_Axis_Value       int NULL,
Y3_Axis_Value       int NULL,
Z_Axis_Value        int NOT NULL,
CONSTRAINT pk_T_MeasurementDataXYZ PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement,
Measurement_Counter),
CONSTRAINT fk_T_MeasurementDataXYZ_ID_Measurement FOREIGN KEY (ID_Measurement)
REFERENCES T_Measurement (ID_Measurement),
)

CREATE TABLE T_State (
ID_State            bigint IDENTITY(1,1) NOT NULL,
Name_State          nvarchar (200) NOT NULL,
Comment_State       nvarchar (400) NULL,
State_CreateDate    datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_State_CreateDate DEFAULT
(getdate()),
CONSTRAINT pk_T_State PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_State) )
CREATE TABLE T_User (
ID_User             uniqueidentifier NOT NULL,
NameFamily_User     nvarchar (100) NOT NULL,
NameFirst_User      nvarchar (100) NOT NULL,
Loginname_User       nvarchar (100) NOT NULL,
Email_User          nvarchar (100) NOT NULL,
Password_User        nvarchar (100) NOT NULL,
Comment_User        nvarchar (400) NULL,
User_CreateDate     datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_User_CreateDate DEFAULT
(getdate()),
ID_State            bigint NULL,
CONSTRAINT pk_T_User PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_User),
CONSTRAINT fk_T_User_ID_State FOREIGN KEY (ID_State) REFERENCES T_State
(ID_State) )
```

```
CREATE TABLE T_Signal (
  ID_Signal          bigint IDENTITY(1,1) NOT NULL,
  Name_Signal        nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Signal     nvarchar (400) NULL,
  Signal_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Signal_CreateDate
  DEFAULT (getdate()),
  CONSTRAINT pk_T_Signal PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Signal)
)

CREATE TABLE T_Image (
  ID_Image           bigint IDENTITY(7001,1) NOT NULL,
  Name_Image         nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Image      nvarchar (400) NULL,
  Image_CreateDate  datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Image_CreateDate DEFAULT
  (getdate()),
  CONSTRAINT pk_T_Image PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Image) )

CREATE TABLE T_Strategy (
  ID_Strategy        bigint IDENTITY(1,1) NOT NULL,
  Name_Strategy      nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Strategy   nvarchar (400) NULL,
  Strategy_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Strategy_CreateDate
  DEFAULT (getdate()),
  CONSTRAINT pk_T_Strategy PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Strategy)
)

CREATE TABLE T_Device (
  ID_Device          bigint IDENTITY(4001,1) NOT NULL,
  Name_Device        nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Device     nvarchar (400) NULL,
  Characteristics_Device nvarchar (400) NULL,
  ID_Image           bigint NULL,
  Device_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Device_CreateDate
  DEFAULT (getdate()),
  ID_State           bigint NULL,
  CONSTRAINT pk_T_Device PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Device)
)

CREATE TABLE T_Material (
  ID_Material        bigint IDENTITY(3001,1) NOT NULL,
  Name_Material      nvarchar (200) NOT NULL,
  Comment_Material   nvarchar (400) NULL,
  Characteristics_Material nvarchar (400) NULL,
  ID_Image           bigint NULL,
  Material_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Material_CreateDate
  DEFAULT (getdate()),
  ID_State           bigint NULL,
  CONSTRAINT pk_T_Material PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Material)
)
```

```
CREATE TABLE T_Sample(  
  ID_Sample          bigint IDENTITY(5001,1) NOT NULL,  
  Name_Sample        nvarchar (200) NOT NULL,  
  Comment_Sample     nvarchar (400) NULL,  
  ID_Material        bigint NOT NULL,  
  Unit_Sample        nvarchar (50) NULL,  
  Length_Sample     int NULL,  
  Width_Sample      int NULL,  
  Height_Sample     int NULL,  
  Call_Sample       int NULL,  
  CallBoring_Sample int NULL,  
  Cal2_Sample       int NULL,  
  Cal2Boring_Sample int NULL,  
  ID_Image          bigint NULL,  
  Sample_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Sample_Sample_CreateDate  
  DEFAULT (getdate()),  
  ID_State          bigint NULL,  
  CONSTRAINT pk_T_Sample PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Sample),  
  CONSTRAINT fk_T_Sample_ID_Material FOREIGN KEY (ID_Material) REFERENCES  
  T_Material (ID_Material)  
)
```

```
CREATE TABLE T_Measurement_Type (  
  ID_Measurement_Type int IDENTITY(1,1) NOT NULL,  
  Type_Description    nvarchar(20) NOT NULL,  
  Type_CreateDate    datetime NOT NULL CONSTRAINT df_T_Type_CreateDate DEFAULT  
  (getdate()),  
  CONSTRAINT pk_T_Measurement_Type PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement_Type))
```

```
CREATE TABLE T_Measurement (  
  ID_Measurement      bigint IDENTITY(100,1) NOT NULL,  
  Name_Measurement    nvarchar (200) NOT NULL,  
  Name_ImportFile     nvarchar (200) NOT NULL,  
  Comment_Measurement nvarchar (400) NULL,  
  X_Axis_Unit         nvarchar (20) NULL,  
  X_Axis_Label        nvarchar (80) NULL,  
  Y_Axis_Unit         nvarchar (20) NULL,  
  Y1_Axis_Label       nvarchar (80) NULL,  
  Y1_Axis_ID_Signal   bigint      NULL,  
  Y2_Axis_Label       nvarchar (80) NULL,  
  Y2_Axis_ID_Signal   bigint      NULL,  
  Y3_Axis_Label       nvarchar (80) NULL,  
  Y3_Axis_ID_Signal   bigint      NULL,  
  Z_Axis_Unit         nvarchar (20) NULL,  
  Z_Axis_Label        nvarchar (80) NULL,  
  ID_Sample          bigint NOT NULL,  
  ID_Strategy         bigint NULL,  
  ID_Image           bigint NULL,  
  Measurement_CreateDate datetime NOT NULL CONSTRAINT  
  df_T_Measurement_CreateDate DEFAULT (getdate()),
```

```
ID_UserCreate          uniqueidentifier NULL,
ID_State               bigint NULL,
ID_Measurement_Type   int NOT NULL,

CONSTRAINT pk_T_Measurement PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Sample FOREIGN KEY (ID_Sample) REFERENCES
T_Sample (ID_Sample),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Strategy FOREIGN KEY (ID_Strategy) REFERENCES
T_Strategy (ID_Strategy),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Image FOREIGN KEY (ID_Image) REFERENCES T_Image
(ID_Image),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_User FOREIGN KEY (ID_UserCreate) REFERENCES
T_User (ID_User),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_State FOREIGN KEY (ID_State) REFERENCES T_State
(ID_State),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_ID_Type FOREIGN KEY (ID_Measurement_Type)
REFERENCES T_Measurement_Type (ID_Measurement_Type),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_Y1_Axis_ID_Signal FOREIGN KEY (Y1_Axis_ID_Signal)
REFERENCES T_Signal (ID_Signal),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_Y2_Axis_ID_Signal FOREIGN KEY (Y2_Axis_ID_Signal)
REFERENCES T_Signal (ID_Signal),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_Y3_Axis_ID_Signal FOREIGN KEY (Y3_Axis_ID_Signal)
REFERENCES T_Signal (ID_Signal)
)

CREATE TABLE T_Measurement_Device (
ID_Measurement        bigint NOT NULL,
ID_Device             bigint NOT NULL,
ID_Image              bigint NULL,
Measurement_Device_CreateDate    datetime NOT NULL CONSTRAINT
df_T_Measurement_Device_CreateDate DEFAULT (getdate()),
CONSTRAINT pk_T_Measurement_Device PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement,
ID_Device),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_Device_ID_Measurement FOREIGN KEY (ID_Measurement)
REFERENCES T_Measurement (ID_Measurement),
CONSTRAINT fk_T_Measurement_Device_ID_Signal FOREIGN KEY (ID_Device)
REFERENCES T_Device (ID_Device)
)

CREATE TABLE T_MeasurementDataXYZ (
ID_Measurement        bigint NOT NULL,
Measurement_Counter  int NOT NULL,
X_Axis_Value          int NOT NULL,
Y1_Axis_Value         int NULL,
Y2_Axis_Value         int NULL,
Y3_Axis_Value         int NULL,
Z_Axis_Value          int NOT NULL,
CONSTRAINT pk_T_MeasurementDataXYZ PRIMARY KEY CLUSTERED (ID_Measurement,
Measurement_Counter),
CONSTRAINT fk_T_MeasurementDataXYZ_ID_Measurement FOREIGN KEY (ID_Measurement)
REFERENCES T_Measurement (ID_Measurement))
```


Софтверски код класе ModulPristupBazi_OsnovnaKlasa

```
using System;
using System.Collections;
using System.Configuration;
using System.Data;
using System.Data.SqlClient;
using System.IO;

namespace BazaPodataka.OsnovnaKlasa
{
    public class ModulPristupBazi_OsnovnaKlasa
    {
        public bool UpisUBazuPodataka(String sSQLString)
        {
            bool povratak = false;
            SqlConnection sKonekcija = new SqlConnection(KonekcijaDB());
            SqlCommand komanda = new SqlCommand();
            komanda.CommandTimeout = 0;
            komanda.Connection = sKonekcija;
            sKonekcija.Open();
            komanda.CommandText = sSQLString;
            komanda.ExecuteNonQuery();
            povratak = true; sKonekcija.Close();
            return povratak; }

        public DataSet odabirIzBazeTipaDataSet(String sSQLString, String sTableName)
        {
            SqlConnection sKonekcija = new SqlConnection(KonekcijaDB());
            SqlDataAdapter daDataadapter = new SqlDataAdapter();
            DataSet povratakDS = new DataSet();
            SqlCommand komanda = sKonekcija.CreateCommand();
            komanda.CommandTimeout = 0;
            komanda.CommandText = sSQLString;
            daDataadapter.SelectCommand = komanda;
            sKonekcija.Open();
            daDataadapter.Fill(povratakDS, sTableName);
            sKonekcija.Close();
            return povratakDS; }

        public Int64 OdabirIzBazeTipaLong(String sSQLString)
        {
            SqlConnection sKonekcija = new SqlConnection(KonekcijaDB());
            Int64 povratakLong = -1;
            SqlCommand komanda = sKonekcija.CreateCommand();
            komanda.CommandTimeout = 0;
            komanda.CommandText = sSQLString;
            sKonekcija.Open();
            povratakLong = (Int64)komanda.ExecuteScalar();
            sKonekcija.Close();
            return povratakLong;}

        public Boolean OdabirIzBazeTipaBoolean(String sSQLString)
        {
            SqlConnection sKonekcija = new SqlConnection(KonekcijaDB());
```

```
Boolean povratak = false;
Object objekat = null;
SqlCommand komanda = sKonekcija.CreateCommand();
komanda.CommandTimeout = 0;
komanda.CommandText = sSQLString;
sKonekcija.Open();
objekat = komanda.ExecuteScalar();
povratak = Convert.ToBoolean(objekat);
sKonekcija.Close();
return povratak; }

protected String KonekcijaDB()
{ String NizS =
ConfigurationManager.ConnectionStrings["konekcijadbktud"].ConnectionString;
return NizS;
} } }
```

Софтверски код класе DAL_3D

```
using System;
using System.Data;
using System.Data.SqlClient;
using BazaPodataka.OsnovnaKlasa;

namespace Metode3D.DAL
{
    public partial class DAL_3D : ModulPristupBazi_OsnovnaKlasa
    {
        // odabiranje pojedinaènog merenja za prikaz u padajuæoj listi na GUI
        public DataSet odabir3DMerenja()
        {
            DataSet povratakDS;
            try
            {
                string upit = @"select * from T_Measurement where ID_Measurement_Type = 3
and Name_ImportFile like 'al%' and Name_ImportFile not like '%CEP%' order by
Name_Measurement";
                return povratakDS = odabirIzBazeTipaDataSet(upit, "Files");
            } catch (Exception e) { return null; }
        }

        // odabiranje vrsta signalnih oblika: sinusni, pravougaoni, testerasti
        public DataSet odabir3DVrstaSignala()
        {
            DataSet povratakDS;
            try { string upit = @"select ID_Signal, Name_Signal from T_Signal";
                return povratakDS = odabirIzBazeTipaDataSet(upit, "Signals");
            }
            catch (Exception e) { return null; } }

        // odabiranje vrednosti napona odasiljaca iz tabele T_MeasurementDataXYZ,
        // u zavisnosti od FileID
        public DataSet odabir3DNaponaOdasiljaca(int fileId)
        {
            DataSet povratakDS = new DataSet();
            try { string upit = @"select distinct(Z_Axis_Value) from T_MeasurementDataXYZ
where ID_measurement =" + fileId;
                return povratakDS = odabirIzBazeTipaDataSet(upit, "Values");
            }
            catch (Exception e) { return null; }
        }
    }
}
```

```

// uzimanje vrednosti napona za crtanje 3D iz tabele T_MeasurementDataXYZ, koje
// je generisala prijemna glava
// kada je napon pobude odašiljača S1 imao signalni oblik sinusoide
public DataSet uzimanje3DVrednosti_Y1(decimal ZAxisValue, int fileId, int tabela)
{
    DataSet povratakDS = new DataSet();
    try
    {
        string upit = "select X_Axis_Value as pritisak, Y1_Axis_Value as napon_pi, Z_Axis_Value
as napon_s1" +
" from T_MeasurementDataXYZ where Z_Axis_Value = " + ZAxisValue + "and ID_Measurement
='" + fileId + "'";
        return povratakDS = odabirIzBazeTipaDataSet(upit, "project" + tabela);
    }
    catch (Exception e) { return null; }
}

// uzimanje vrednosti napona za crtanje 3D iz tabele T_MeasurementDataXYZ, koje
// je generisala prijemna glava
// kada je napon pobude odašiljača S1 imao pravougaoni signalni oblik
public DataSet uzimanje3DVrednosti_Y2(decimal ZAxisValue, int fileId, int tabela)
{
    DataSet povratakDS = new DataSet();
    try
    {
        string upit = "select X_Axis_Value as pritisak, Y2_Axis_Value as napon_pi, Z_Axis_Value
as napon_s1" +
" from T_MeasurementDataXYZ where Z_Axis_Value = " + ZAxisValue + "and ID_Measurement
='" + fileId + "'";
        return povratakDS = odabirIzBazeTipaDataSet(upit, "project" + tabela);
    }
    catch (Exception e) { return null; }
}

// uzimanje vrednosti napona za crtanje 3D iz tabele T_MeasurementDataXYZ, koje
// je generisala prijemna glava
// kada je napon pobude odašiljača S1 imao testerasti signalni oblik
public DataSet uzimanje3DVrednosti_Y3(decimal ZAxisValue, int fileId, int tabela)
{
    DataSet povratakDS = new DataSet();
    try
    {
        string upit = "select X_Axis_Value as pritisak, Y3_Axis_Value as napon_pi, Z_Axis_Value
as napon_s1"
+ " from T_MeasurementDataXYZ where Z_Axis_Value = " + ZAxisValue + "and
ID_Measurement ='" + fileId + "'";
        return povratakDS = odabirIzBazeTipaDataSet(upit, "project" + tabela);
    }
    catch (Exception e) { return null; }
}

// uzimanje naziva merenja i oznaka osa u zavisnosti pojedinaènog odabranog
// merenja
public DataSet uzimanjeNazivaMerenjaIOsa(int fileId)
{
    DataSet povratakDS = new DataSet();
    try
    {
        string upit = @"select * from T_Measurement where ID_Measurement = '" + fileId + "'";
        return povratakDS = odabirIzBazeTipaDataSet(upit, "labels");
    }
    catch (Exception e) { return null; }
}
}
}
}

```

Софтверски код класе project3D

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Web;
using System.Web.UI;
using System.Web.UI.WebControls;
using System.ComponentModel;
using System.Data.SqlClient;
using System.Data;
using globalstructures;
using Metode3D.BusinessLogic;

namespace Materijali
{
    public partial class project3D : System.Web.UI.Page
    {
        private BL3DMetode bl_project;
        private DataSet dsMerenja;
        private DataSet dsSignali;
        // konstruktor
        public project3D()
        {
            bl_project = new BL3DMetode();
        }
        // events
        protected void Page_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            if (!IsPostBack) {
                ddl_Merenja.Items.Clear();
                ListItem liFile = new ListItem("-Izaberite osnovno merenje-", "0");
                ddl_Merenja.Items.Add(liFile);
                dsMerenja = new DataSet();
                dsMerenja = bl_project.odabir3DMerenja(); // dataset sa excehsheet-ovima
                if (ddl_Merenja.Items.Count == 1)
                {
                    foreach (DataRow dr in dsMerenja.Tables["Files"].Rows) {
                        ListItem li = new ListItem(dr["Name_Measurement"].ToString().Trim(),
                        dr["ID_Measurement"].ToString());
                        ddl_Merenja.Items.Add(li);
                    }
                }

                protected void ddl_Merenja_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
                {
                    if (ddl_Merenja.SelectedItem.Value != "0")
                    {
                        Session["s_osnovnoMerenje"] = Convert.ToInt32(ddl_Merenja.SelectedItem.Value);
                        Session["s_nazivMerenja"] = Convert.ToString(ddl_Merenja.SelectedItem.Text);
                        ddl_vrsteSignala.Enabled = true;
                        ddl_vrsteSignala.Items.Clear();
                        ddl_vrsteSignala.Items.Add("-Izaberite vrstu signala-");
                        dsSignali = bl_project.odabir3DVrstaSignala();
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

```

// uzimanje postojećih signala
DataRow[] drr = dsMerenja.Tables["Files"].Select("ID_Measurement = " +
ddl_Merenja.SelectedItem.Value);
    string id1 = "", id2 = "", id3 = "";
    if(drr[0]["Y1_Axis_ID_Signal"] != null)
        id1 = drr[0]["Y1_Axis_ID_Signal"].ToString();
    if (drr[0]["Y2_Axis_ID_Signal"] != null)
        id2 = drr[0]["Y2_Axis_ID_Signal"].ToString();
    if (drr[0]["Y3_Axis_ID_Signal"] != null)
        id3 = drr[0]["Y3_Axis_ID_Signal"].ToString();

// upisivanje signala u listu u zavisnosti od toga da li su ti signali korisćeni pri
// odabranom merenju
    if (id1 != "") { ListItem li1 = new ListItem();
DataRow[] dr1 = dsSignalni.Tables["Signals"].Select("ID_Signal = " + id1);
        li1.Text = dr1[0]["Name_Signal"].ToString();
        li1.Value = id1;
        ddl_vrsteSignalna.Items.Add(li1); }
    if (id2 != "") { ListItem li2 = new ListItem();
DataRow[] dr2 = dsSignalni.Tables["Signals"].Select("ID_Signal = " + id2);
        li2.Text = dr2[0]["Name_Signal"].ToString();
        li2.Value = id2;
        ddl_vrsteSignalna.Items.Add(li2); }
    if (id3 != "") {
        ListItem li3 = new ListItem();
DataRow[] dr3 = dsSignalni.Tables["Signals"].Select("ID_Signal = " + id3);
        li3.Text = dr3[0]["Name_Signal"].ToString();
        li3.Value = id3;
        ddl_vrsteSignalna.Items.Add(li3);
    } } else {
        ddl_vrsteSignalna.SelectedIndex = 0;
        ddl_vrsteSignalna_SelectedIndexChanged(null, null);
        ddl_vrsteSignalna.Enabled = false;
        crtanjeDiagrama.Enabled = false;    } }

protected void ddl_vrsteSignalna_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)
{ if (ddl_vrsteSignalna.SelectedIndex != 0) {
    Session["s_vrstaSignalna"] = Convert.ToDecimal(ddl_vrsteSignalna.SelectedItem.Value);
    generisanjeLinkaZaCrtanje(); }
    else crtanjeDiagrama.Enabled = false; }

private void generisanjeLinkaZaCrtanje()
{ crtanjeDiagrama.Enabled = true;
    int idMerenja = Convert.ToInt32(Session["s_osnovnoMerenje"]);
    string nazivMerenja = Convert.ToString(Session["s_nazivMerenja"]);
    decimal vrstaSignalna = Convert.ToDecimal(Session["s_vrstaSignalna"]);
crtanjeDiagrama.NavigateUrl = "newDiagram3D.aspx?vrstaSignalna=" + vrstaSignalna +
"&idMerenja=" + idMerenja + "&nazivMerenja=" + nazivMerenja;
} } }

```