

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Информатика у инжењерству

Предмет: Програмски језици

Број индекса: 38/2016

Драган М. Станојевић
Рачунарска симулација заварених и
лепљених спојева
завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Ненад Грујовић

2. _____

3. _____

Датум
одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Објасни основе физике и моделирање процеса заваривања.
- Објасни основе физике и моделирање лепљивих спојева.
- МКЕ моделирање и симулација заварених и залепњених структура.
- Упореди резултате симулација са експерименталним подацима.

Препоручена литература:

1. **Мајсторовић А., Јовановић М.,** *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1995. год
2. **Радивој Поповић, Душан Шотра,** *Заваривање и спајање материјала*, Висока техничка школа струковних студија 2015.год.
3. **Kojić, M., Slavković, R., Živković, M., Grujović, N.,** (2011). PAK-S: Program for FE Structural Analysis, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Kragujevac

Крагујевац, мај 2019

Ментор:

Проф. Др Ненад Грујовић

Садржај

1. Увод.....	7
2. Машински спојеви	8
3. Основи технике заваривања.....	10
3.1 Алуминијум и његове легуре.....	10
3.2 Примена алуминијума у индустрији.....	11
3.3 Припрема алуминијума за заваривање	13
3.4 Технологија заваривања алуминијума.....	15
3.4.1 TIG поступак заваривања алуминијума.....	15
3.4.2 MIG поступак заваривања алуминијума.....	17
3.4.3 Заваривање обложеном електродом.....	19
3.4.4 Гасно заваривање алуминијума.....	21
3.5 Додатни материјал за заваривање алуминијума	22
3.6 Заваривање узорак за експеримент	23
4. Основи технике залепљених спојева	25
4.1 Улога лепкова.....	25
4.2 Адхезионе силе	27
4.3 Кохезионе силе.....	27
4.4 Квашење.....	28
4.5 Лепљење узорак	29
5. Механички модел.....	33
5.1 Механички модел заварених спојева	33
5.1.1 Испитивање затезањем.....	34
5.1.2 Испитивање савијањем.....	34
5.1.3 Тврдоћа.	35
5.2 Механички модел залепљених спојева	36
6. Нумерички модел.....	42
6.1 Нумеричка анализа заосталих напона при заваривању.....	43
6.2 Симулација заварених спојева у софтверу Simufact Welding.....	44
6.3 Симулација заварених спојева у софтверу FEMAP.....	46
6.4 Моделирање и симулација залепљених спојева	48
7. Закључна разматрања	58
8. Литература.....	59

Резиме

У овом раду описане су главне карактеристике две најзаступљеније технологије спајања материјала, које се вековима користе, у разним гранама индустрије. Разматране су технологија заваривања и технологија лепљења, као и прорачуни везани за спојеве добијене овим технологијама. Применом методе коначних елемената (МКЕ) извршена је анализа ове две технологије на примеру реалног индустријског процеса. На основу производних потреба извршено је упоређивање добијених резултата експерименталних испитивања са резултатима добијеним нумеричким методама (МКЕ).

Кључне речи: заваривање, лепљење, МКЕ нумеричка симулација, експериментална испитивања.

Abstract

This paper describes the main features of the two most common materials joining technologies that have been used in various industries for centuries. Welding technology and bonding technology are discussed as well as calculations related to the joints obtained by these technologies. Through FEM numerical simulation, the analysis of these two technologies was carried out on the example of a real industrial process. Based on production needs, a comparison of simulated processes with actual test results was made.

Keywords: welding, bonding, FEM numerical simulation, experimental testing

1. Увод

Услед развоја производних система, а посебно грана индустрије у којима се захтева поузданост и економичност херметичких и нераздвојних спојева, долази до све веће примене технологија заваривања и лепљења.

Циљ овог рада је да се изврши приказ технологија спајања машинских склопова са детаљним описом. Уз детаљни опис изведених експеримената који се примењују у производним процесима. Нумеричка анализа и симулација процеса изведена је у програмским пакетима FEMAP и SIMUFACT који се користе за симулирање поменутих процеса. Рад се састоји из два дела: теоретског и практичног.

Први део рада обухвата опис спојева у машинској индустрији са посебним нагласком на нераздвојиве типове веза. У другом делу две најзаступљеније технологије добијања нераздвојивих спојева технологије лепљења и заваривања. У следећем делу су описане главне карактеристике Алуминијума и његових легура као материјал који се данас у све већем броју користи за изградњу у инжењерству и грађевинарству.

Следећи део рада представља поглавље у којем је описан сам процес добијања узорак залепљених и заварених спојева који након самог процеса бивају подвргнути механичким испитивањима. Приказано је и коришћење софтвера за анализу методом коначних елемената којима се симулирају ова два процеса.

Други део завршног рада представља поређење резултата добијених експерименталним испитивањем и резултата добијених софтверима за анализу методом коначних елемената.

2. Машински спојеви

Задатак машинских спојева је да машинске делове, подсклопове и склопове повежу међусобно у јединствену целину у циљу обезбеђења одговарајућег односа у склопу, односно машинском систему, преношења оптерећења, кретања, итд. Машински спојеви имају задатак да испуне низ услова, као што су: преношење оптерећења уз обезбеђење одговарајуће чврстоће склопа, међусобну покретљивост или непокретљивост спојених делова, одговарајућу крутост односно еластичност споја, раздвојивост или нераздвојивост, херметичност и др. [1]

Машински спојеви могу бити остварени на више начина и то:

- Физичко хемијским спајањем материјала делова у нераздвојиву целину посредством молекуларних сила (заваривање, лепљење и лемљење).
- Трењем између додирних површина спојених делова, услед чега се у току остваривања везе или у раду мора између њих остварити притисак односно одговарајућа нормална сила (пресовани спојеви, стезни спојеви, итд.).
- Обликом, где спојени делови својим обликом преносе оптерећења и остварују везу (ожлебљени спојеви, спојеви клином без нагиба, зглобне везе, итд.).
- Комбиновани спојеви трењем и обликом (клин са нагибом).

Класификација машинских спојева може се извршити на различите начине, Док је класификација технологија спајања у машинству извршена у две групе: раздвојиве и нераздвојиве спојеве. Акценат је стављен на завареним и залепљеним спојевима из групе нераздвојивих спојева који ће детаљније бити разматрани у наредном поглављу.

Раздвојиви спојеви су чврсти или еластични спојеви машинских делова који се по потреби могу раздвојити и поново спојити, без оштећења делова споја. У ову групу спадају навојни, стезни и жлебни спојеви, спојеви клином, чивијама и прстеновима, зглобни и еластични спојеви. [1]

Нераздвојиви спојеви су чврсти, непокретни спојеви машинских делова који се, једном спојени, не могу без разарања раздвојити. У ову групу спадају [2]:

- Заковани спојеви, спојеви два елемента посредством трећег (заковица) и не могу се раздвојити без разарања елемента за везу. Због тога се сврставају у групу нераздвојивих спојева, а често се комбинују са лепљењем.
- Заварени спојеви, спојеви који се остварују посредством топлоте, растапањем и сједињавањем основног материјала са или без додатка материјала (електроде). Постоји низ начина и поступака заваривања и сматра се да је у машинству најзаступљенија технологија спајања. Као енергија за стварање топлоте код заваривања користе се хемијска, електрична, механичка и др. Осим метала могу се заваривати и термопластичне масе.

- Залемљени спојеви, спојеви два метала у чврстом стању истопљеног додатног материјала лема, чија је температура топљења нижа него код основног материјала. Основна разлика у односу на заваривање је што се при лемљењу не топе ивице основног материјала него се топи само додатни материјал. Спој се остварује, првенствено, узајамном дифузијом између истопљеног лема и основног материјала и у мањој мери адхезијом. Лемљењем се могу спајати скоро све врсте метала. Јефтинији је начин спајања од заваривања, лакше се изводи али је знатно мања јачина споја у односу на заваривање.
- Залепљени спојеви, спојеви остварени посредством лепка. Последњих година се све више примењује спајање лепљењем свих чврстих делова, од којих су један или оба метали, углавном помоћу синтетичког лепка.
- Цилиндрични спојеви са јаким преклопом, спојеви два чврста елемента који су спојени посредством силе и након растављања споја више се не може остварити првобитна чврстоћом споја.

3. Основи технике заваривања

Заварени спојеви представљају основни начин спајања елемената у нераздвојиву везу. Делови који се заварују обично су из истих или сродних материјала, који имају приближно једнаку температуру топљења, али могу бити и разнородни материјали. Поред челика, под посебним условима могу се заваривати и неки обојени метали (Cu, Al) [3].

Обим примене заварених спојева код израде машинских елемената и металних конструкција стално расте, јер поступци заваривања постају све квалитетнији и данас је већ могуће постићи да механичка својства заварених спојева буду једнака онима која има сам основни материјал, а често чак и боља.

Заварене конструкције у машиноградњи имају предност пред ливеним, уколико се ради о појединачној производњи. Заварени спојеви омогућавају да се материјал конструкције оптимално искористи с обзиром на чврстоћу; односно облик конструкције лакше се прилагођава оптерећењу, како би се повећала чврстоћа. Заварене конструкције су у просеку и до 30 % лакше од ливених [3].

Недостатак заварених спојева пре свега је у томе што на месту спајања долази до локалног загревања материјала и неравномерног издужења и скупљања, што приликом хлађења узрокује појаву заосталих напона и напрезања. Деформације који би се накнадно јавиле могу се смањити одабиром погодног смера и редоследом заваривања, а чак потпуно одстране накнадном термичком обрадом. Недостатак заварених спојева је и у томе што зависе од субјективних околности, обучености мајстора који заварује, радних услова и радног окружења и сл.

3.1 Алуминијум и његове легуре

Алуминијум је хемијски елемент са симболом Al и атомским бројем 13. У периодном систему елемената спада у метале III главне групе, познату и као групу бора, раније звана група земних метала. Алуминијум је сребренасто-бели лаки метал. Иако не спада у племените метале, са водом из ваздуха, реагује само површински, изграђујући заштитни пасивизирајући слој на површини метала [3].

Температура топљења алуминијума је 660 °C а испарења је 2467 °C са специфичном тежином 2.7 kg/dm³. Тачка топљења алуминијум оксида је 2060 °C. Алуминијум има изузетно велику тврдоћу, и представља након дијаманта најтврђи материјал.

Изузетно брзо и јако везује кисеоник и одузима га од других метала. Нпр. при термитном заваривању, помешају се прахови оксида гвожђа и алуминијума. При загревању, алуминијум се везује за кисеоник из гвожђа а све је праћено реакцијом у којој се ослобађа велика температура, па је та хемијска реакција довољна да истопи гвоздени прах и крајеве калупа, и да их завари, а оксид алуминијума исплива на површину као шљака [3].



Слика 3.1.1. *Плоче од алуминијума 6082 [6]*

Комерцијални инготи чистог алуминијума су чистоће 99.5%, а могу бити даље рафинисани на 99.99%. Чист алуминијум нема велику чврстоћу али се за повећање чврстоће користи легирање са разним елементима. Легуре алуминијума се деле на легуре за ливење и легуре за гњечење. Ливење може бити у калупима и под притиском. Легура алуминијума има шест пута већу термопроводљивост од челика, па је због добре термопроводљивости и термичка дилатација легура алуминијума два пута већа од оних код челика. Алуминијум није магнетичан. Приликом загревања алуминијум, не мења боју, Па треба обратити посебну пажњу приликом обраде како не би дошло до повреда услед могуће појаве високих температура у самом материјалу [3].

3.2 Примена алуминијума у индустрији

Због своје мале густине и високог односа чврстоће, алуминијум се често употребљава у околностима где је неопходно смањити тежину, на пример код транспортних машина, да би се смањила њихова тежина а самим тим и потрошња горива. То се нарочито односи на свемирске летелица и авионе. Осим њих, значај алуминијума је порастао и у шинској и ауто индустрији. У прошлости, алуминијум није имао широку примену у аутомобилској индустрији услед високе цене, слабог заваривања делова од алуминијума као и проблематичне отпорности на замор материјала. Већ 1930-их година неке америчке компаније су користиле алуминијум да би смањиле тежину војних аутомобилских возила. При градњи мањих и средњих јахти, отпорност алуминијума према корозији је изузетно важна, јер се он штити од корозије стварајући танки заштитни слој оксида на површини. Једна од особина које су изузетно битне у погледу модерних начина производње јесте и

могућност рециклирања алуминијума. Могуће је добити више типова легура, у облику одливака, отковака, екструдираних профила, лимова [3].

Због велике топлотне проводљивости, легуре се користе за посуде за кување у домаћинству, али и за клипове у моторима са унутрашњим сагоревањем. На слици 3.2.1. приказана је конструкција вагона од алуминијума.



Слика 3.2.1. Шасија шинског возила од алуминијума [6]

Алуминијум је добар електрични проводник. По једном граму масе, боље проводи електричну струју од бакра, али заузима већу запремину од њега, те је по квадратном центиметру попречног пресека проводника бакар бољи проводник. Док је бакар мање реактиван и може се лакше обрађивати од алуминијума, проводници од алуминијума се користе само у случајевима где је неопходно смањити тежину проводника [3].

Алуминијум се нарочито користи као електрични проводник за струју у електричној мрежи, када се ради о масивним и проводницима великог попречног пресека као што су струјне шине и каблови за уземљење. У овом погледу алуминијуму се показао јефтинијим од бакра [3].

Алуминијум није погодно користити код конструкција које захтевају контакт, јер се због притиска унутар контакта долази до пластичне деформације (пузања) материјала. Осим тога, током времена се пасивизира стајањем на ваздуху. Након дужег складиштења или интензивнијег додира са водом, тај пасивни слој оксида се задебља, онемогућавајући рад контаката. Током 1960-их, алуминијумски контакти су се користили у електричним прекидачима у грађевинским објектима, што је понекад доводило да због неодговарајућих спојева дође до кратких спојева или чак пожара [3].

3.3 Припрема алуминијума за заваривање

Потребне су две операције: уклањање масноће и прљавштине са површине и затим скидање, најчешће делимично, оксида са површине, и то тим редом.

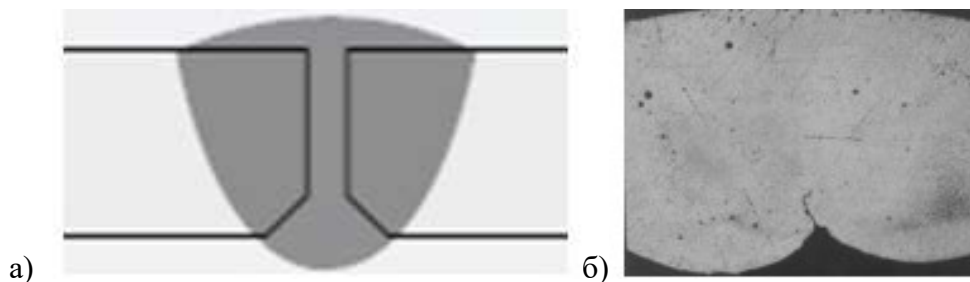
Најчешће се масноћа и прљавштина скидају индустријским ацетоном или неким благим алкалним раствором, при чему је неопходно водити рачуна због запаљивости ацетона. Ако је сам заварени спој веома битан, препорука је чишћење са три крпе, једна за другом. Пазити да не заостане нешто ацетона, јер може да се запали при заваривању, или ако се користи неки варничећи алат [2].

Оксид алуминијума се најчешће скида четком са оштрим чекињама од нерђајућег челика или грубом турпијом од тврдог метала. Могуће је користити и хемијска средства која су за то намењена. Четкати само у једном правцу да би се избегло утрљавање делића оксида у алуминијум. Четку користити само док је оштра, само за алуминијум и ни за шта више. Не притискати превише, јер је потребно само разбити оксидни слој, а никако утрљати честице оксида у меки алуминијум. После неких осам сати чишћења четку очистити ацетоном колико је могуће. Чистити само зону заваривања и блиску околину а не цео комад [10].



Слика 3.3.1. Припрема плоче за заваривање [6]

Чишћење и скидање оксида је најбоље извести пре самог заваривања, јер се оксидни слој тренутно формира преко чистог метала и постаје током времена све дебљи. Тренутно се ствара дебелина од неких 1,5-4 nm, а током времена достиже 25-50 nm. Сам оксид је електрични изолатор али због мале дебљине могуће је упалити електрични лук на њему. По могућности, ивице жљеба истурпијати, а код сучеоног споја ивице корене стране такође оборити да би се избегло скупљање оксида по централној линији шава [2].



Слика 3.3.2. а) Изглед завара са обореном ивицом, б) Прслина услед необорене ивице [6]

Ако се не уклони барем већи део површинског оксида, при заваривању може доћи до великих проблема. Рецимо, да се код танких лимова „направи рупа“ а не метално купатило, услед топлоте алуминијум пређе у течно стање али површински оксид не, па дође до промене унутрашњости а површински оксидни омотач прати нови облик. Оксид који се јавља изазива нестабилност лука, меша се као чврсто тело са растопљеним металом, а пошто је оксид порозан, у њему увек има влаге (нарочито су овоме склони оксиди магнезијума у легурама типа AlMg), самим тим се у растопљени метал уноси пре свега водоник који је касније крив за порозност метала шави, за касније цурење флуида, за прслине, мању чврстоћу [2].

Оксид се може уклонити хемијски, јаким растворима па се ређе користе. Та средства садрже хлориде и флуориде и па могу изазвати корозију метала ако се не уклоне после третмана. Могуће је користити заваривање у хелијуму где се великим струјама постиже топљење оксида али због велике цене, хелијум се у пракси избегава. За даљу заштиту од корозије и због естетике, ради се тзв. Анодизација, а тај слој је 1000 пута дебљи од оног првобитног. Овај слој задаје велике проблеме при заваривању [10].

Назнаке да је алуминијум прљав или није уклоњен оксид:

- Лук је нестабилан.
- Жица која се код TIG поступка додаје се не растапа.
- Често се при заваривању танког алуминијума, уместо стапања ивице једна за другу, између њих се формира рупа. До овога долази услед тога што: Количина топлоте је довољна да растопи алуминијум испод оксидне превлаке, али не и оксидну превлаку, која се понаша као мембрана, или као балон са водом, онда алуминијум мења облик под топлотом а мембрана оксида прати његов облик.

3.4 Технологија заваривања алуминијума

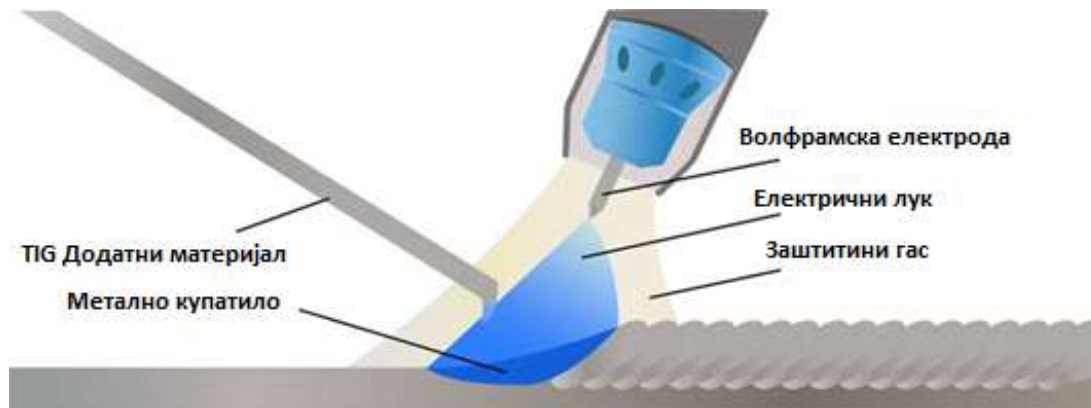
Заваривање је процес израде нераздвојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна и механичка енергија, а по потреби и додатни материјал

Заваривање алуминијума је могуће гасно-пламеним поступком, обложеним алуминијумским електродама, TIG, MIG поступком, електроотпорно као и неконвенционалним поступцима (трењем, ултразвук, ласер, електронски сноп).

3.4.1 TIG поступак заваривања алуминијума

TIG заваривање алуминијума је један од доминантних поступака заваривања, нарочито у условима када је важно постићи одређену естетику, код танких делова, прецизних спојева итд. Долази до замене TIG поступка MIG поступком долази услед појаве напредних функција електронске контроле лука.

Овде треба напоменути да је за заваривање TIG-ом потребно имати AC/DC апарат, јер алуминијум се заварује у AC режиму. AC режим значи да струја у луку мења поларитет. У општем случају фреквенција AC струје лука прати фреквенцију струје из мреже што у европским мрежама износи 50 Hz. Разлог за ово је природа алуминијума тј. оксидни слој као и природа TIG заваривања.



Слика 3.4.1. TIG поступак заваривања [10]

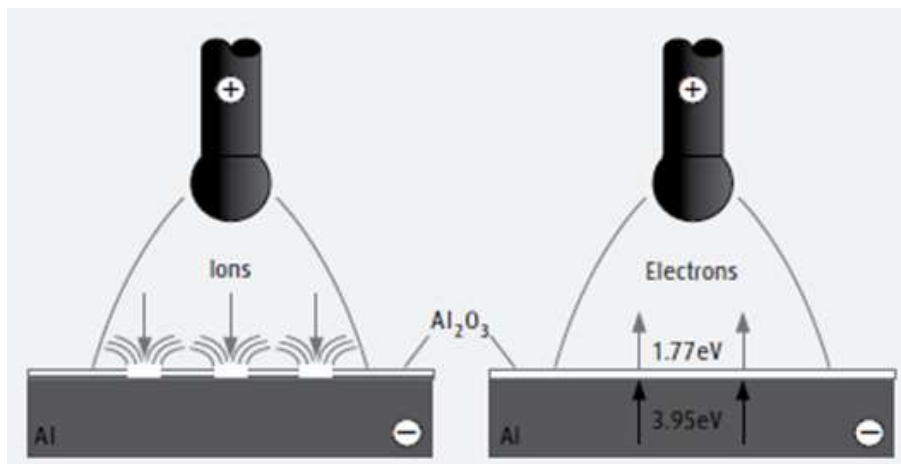
Код TIG заваривања, када је електрода на минус полу сматра се да се у основни материјал уноси 70% топлоте лука а 30% иде на волфрам. Када је електрода на плус полу, случај је обрнут, 70% топлоте иде у волфрам, а 30% у основни материјал. У конкретном случају то значи да је уваривање тј. пенетрација у материјал већа када је електрода на минус полу. Међутим, ако би се заваривало само на минус полу у гасу аргону, топлота не би била довољна да, разбије нити да растопи оксидни слој, већ би га уносила у метал шав. При заваривању на плус полу дешава се да се оксидни слој разбија и разбацује ван места заваривања. Ранија теорија је била да електрони чистог алуминијума ударају у оксидни слој и разбијају га. Нова теорија (стара теорија није могла да објасни како електрони који

практично немају масу могу нешто да разбију) показује да јони гаса, који имају масу а тиме и знатну кинетичку енергију, ударају и разбијају оксидни слој [2].



Слика 3.4.2. Заваривање TIG-ом у производним условима [6]

Да би се елиминисале поменуте карактеристике плус/минус пола, користи се наизменична струја за заваривање алуминијума аргоном, у једној фази када је електрода на плус полу, јони гаса разбијају оксид, а када је електрода на минус полу, следи растапање основног материјала и дубоко уваривање.



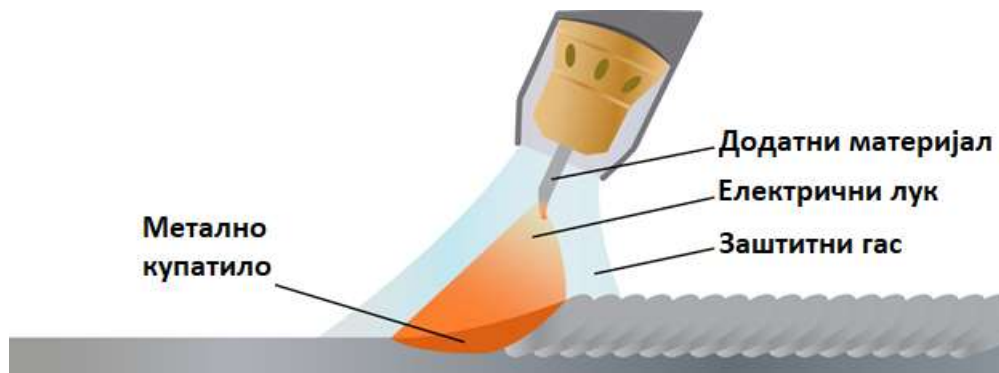
Слика 3.4.3. Директна поларизација код TIG поступка [2]

Слика 3.4.3. показује разбијање оксидног слоја јонима када је електрода на плус полу, а друга показује потенцијал јонизације оксида алуминијума и чисте легуре испод. Нова теорија каже да електрони не разбијају оксид јер немају масу а са друге стране, потенцијал јонизације саме легуре је већи од потенцијала јонизације оксида. Ово доводи до парадокса. Чист метал, укључујући и онај у растопљеном стању је лош емитер електрона. Зато препоруку за скидање оксида не треба схватити буквално јер ако се сав оксид уклони, лук ће постати нестабилан. Из разлога стабилности лука, потребно је да остане нешто оксида после чишћења [2].

3.4.2 MIG поступак заваривања алуминијума

MIG заваривање алуминијума се показао као повољан поступак нарочито данас када електроника преузима контролу над електричним луком и појавом пулсног заваривања и његових варијација (пулс- у једном моменту је струја јако велика, реда величине 300А, у другом 80А, просечна 180А, а разливање је као да се ради нормалним спреј режимом са 250А, што ће рећи, унос топлоте је мали, могуће је заваривање у вертикали, разливање и пенетрација су одлични, укупан негативни утицај уноса топлоте и зона утицаја топлоте је мања, самим тим и већа чврстоћа споја).

MIG заваривање је првобитно било намењено заваривању алуминијума. Ако се сетимо да постоје четири најчешћа типа MIG/MAG заваривања (кратким спојем, спрејом, пулсом, крупнокапљичастом), заваривање алуминијума се не може радити кратким спојем јер је унета топлота, тј. лук који се пали и гаси је хладан и не може довољно истопити ни основни материјал нити утопити капљицу са жице, нити се оксид може очистити, већ се ради у спреју и пулсу [10].



Слика 3.4.4. MIG поступак заваривања [10]

Спреј се користи за дебљине веће од 3 mm, а данашњи пулсни апарати већ могу радити и дебљине од 1.0 mm. Спреј је струја малих капљица, мањих од пречника жице, које теку од жице ка растопљеном металу на основном материјалу. Проблем са спрејом је велики унос топлоте и опасност од прогоревања материјала па се препоручује за дебљине изнад 3 mm. Проблем у производњи представља и вођење жице кроз точкиће, поликабл и дизну.

Уколико се вођење обавља уз помоћ само два чврстоћа, велика је вероватноћа да ће чврстоћи гњечити жицу, правити је овалном и правити велики проблем при заваривању. Зато је најбоље имати четири чврстоћа да би се сила распоредила на четири тачке уместо на две и тиме притисак на жицу био мањи и избегло се гњечење жице. Треба знати нпр. да су $AlMg5$ и $AlMg3$ тврде а да су $Al95.5$, $AlSi5$ и $AlSi12$ меке жице. Практично ове прве још и могу да се гурају са два чврстоћа ако је пречник 1.2 mm, мада када је 1.0 mm већ има проблема са два чврстоћа. Меке жице 1.0 mm је готово немогуће гурати са два чврстоћа. Врло скупи апарати имају посебне тзв. push-pull пиштоље, тако да се на самом пиштољу налазе два чврстоћа који вуку а чврстоћи на апарату гурају жицу. Данашњи апарати са четири чврстоћа и мерама опреза дају сасвим задовољавајуће гурање жица 1.0 mm и 1.2 mm [10].

Бужир мора бити тефлонски да би трење са жицом било што мање као и да се избегне да класични спирални челични бужир оштети жицу. Препорука је да дужина поликабла за заваривање алуминијума буде што мања а током заваривања пазити да поликабл буде што је могуће више прав.

У принципу, све жице које постоје за TIG, постоје и у MIG верзији. Пазити на то да жице $AlSi$ боље проводе струју од жица $AlMg$ (зато на пулсним апаратима увек постоји посебан програм за $AlSi$ жице и посебан за $AlMg$ жице).

Боље је радити праволинијско вођење. Избежавати широка њихања јер се тако избегавају налепљивања, порозност итд. При заваривању тањег алуминијума, у једном моменту повећати брзину и по потреби стати јер се део засићује топлотом и омекшава у великој зони, што доводи до прогоревања и омекшавања, тј. пада чврстоће.

У озбиљним производним системима данас се најчешће користе MIG заваривањем алуминијума, користи модерне инверторске пулсне MIG апарате. Све раније наведено важи и за заваривање у пулсу, осим у случају подешавања брзине жице и волтаже, које регулише сам апарат. До заваривача је да изабере само дебљину материјала, пречник жице и гас, а компјутер сам према програму у њему производи пригодан лук. Неки апарати су направљени на основу експеримената а неки на основу копирања ових првих. Препорука је, због саме цене пулсног апарата, извршити тестирање апарата у одговарајућим производним условима у одређеном временском периоду (често је довољан један производни дан).[10]

При пулсном заваривању јавља се једна врста таласања растопљеног што може бити повољно у смислу одвођења гасова тј. спречавања или смањивања порозности. При оваквом заваривању лук је стабилан па је могуће идеално заварити танке лимове и до 1 mm. Квалитетнији апарати имају програме где се танки лимови могу радити дебљим жицама, нпр. жицом 1.2 mm се заварује лим од 1.0 mm, Што појефтиније производни процес, али и мањи унос оксида јер дебља жица има мањи однос оксидиране површине према својој запремини.



Слика 3.4.5. Успешно заваривање MIG поступком [6]

Препоруке за успешно MIG пулсно заваривање би биле [2]:

- Пулс је благотворан поступак за заваривање легура алуминијума. Укупна унесена топлота је мања него код спреја а тиме се смањује и омекшавање материјала тј. губитак чврстоће. При томе је потпуно стабилан, без прштања и са потпуном пенетрацијом.
- Радити са амперажама на горњем лимиту а са што краћим луком који је стабилан да би енергија плазме била већа а тиме се избегло налепљивање и побољшало чишћење зоне заваривања.
- Пулс је одличан за заваривање вертикално навише.
- Пулс „вибрира и таласа“ метално купатило што побољшава избацивање гасова који праве порозност.

3.4.3 Заваривање обложеном електродом

Заваривање обложеним електродама је веома сложен и компликован процес па као такав се избегава у производним условима. Чињеница је да постоји четири типа алуминијумских електрода (чист Al, AlMn, AlSi5 и AlSi12, од којих је ова последња најчешће коришћена). Облога електроде садржи соли тј. хемију за растварање оксида као и елементе за стабилизацију лука и заштиту од атмосфере.

Заваривање обложеном електродама :

- Не могу сви РЕЛ апарати заваривати са алуминијумским електродама, потребан је добар пригодан уграђени топли старт и резерва радног напона.
- Када се лук упали и поведе се електрода, њено трошење је такво да се мора уносити у метал шав (нарочито она од 2.5 мм).
- Јако је тешко разазнати шта се дешава у металном купатилу, тек по прекидању заваривања и уклањању шљаке види се резултат.
- Порозност је веома извесна код овог поступка.
- Шљака често остаје у металу шава.
- Шљака је иначе корозивна и потребно ју је темељно одстранити

На основу стандарда SRPS EN ISO 9606-2: (који описује процедуру атестације заваривача за заваривање алуминијума) услед лоших перформанси РЕЛ поступака заваривања а високих захтева самог стандарда, није уопште могуће стандардизовати РЕЛ поступак. Другим речима, не постоји могућност да заваривач добије атест за заваривање алуминијума РЕЛ поступком.



Слика 3.4.6. Узорак урађен РЕЛ поступком [6]

3.4.4 Гасно заваривање алуминијума

Данас је заваривање алуминијума и легура гасно пламеним поступком потпуно застарело. Овај поступак изводи се жицама за TIG типа AlSi5 и AlSi12 и одговарајућим топитељом. Заварују се само легуре које се могу заваривати AlSi додатним материјалом. Овај поступак није заступљен у Србији.



Слика 3.4.7. Заваривање алуминијума гасним поступком са обложеном електродом [6]

3.5 Додатни материјал за заваривање алуминијума

Жице за MIG заваривање се према начину прављења могу поделити на оне прављење од рециклираног алуминијума и оне прављење од чистог алуминијума. Додатни материјал направљен од чистог алуминијума се сматра бољим за наше тржиште јер се добијају из руде у неколико европских рудника. Касније се прерађују, легирају у строго контролисаним процесима. При извлачењу жице у току производње користе се дијамантски алати. Жице се током процеса извлачења воде кроз систем ваљака и уреза и подмазују на одговарајући начин како би се смањило трење. Подмазивање које се користи током производње, одстрањује се хемијским или ултразвучним чишћењем, пре самог намотавања.



Слика 3.5.1. Додатни материјал у додавачу Fronius-овог апарата за заваривање [6]

Жице добијене директно из руде, тј. од чистог алуминијума, бријане при калибрацији, као и ултразвучно чишћење, дају далеко боље перформансе при заваривању. Лук је стабилнији (нема флукуација лука због лошег хемијског састава, нема сагоревања хемикалија заосталих после чишћења), нема опиљака у додавачу (лошије жице се много круне, јер су храпаве), због контролисаног хемијског састава механичка својства метала шава су боља.

При производњи добрих и квалитетних жица се врши њихово микролегирање различитим елементима нпр. Zr, Ti, Sr. Микролегирање се врши због десоксидације метала шава као и повећање центара кристализације тј. што има више центара кристализације (очвршћавања) то ће бити ситније зрно и механичка својства боља (већа чврстоћ и жилавост).

3.6 Заваривање узорака за експеримент

При експерименталном испитивању коришћене су две плоче од алуминијума (AL) из серије 6082 легура алуминијума са магнезијумом и силицијумом. Ове легуре се најчешће срећу као екструдирани профили и лимови. Први избор за заваривање је жица AlMg5 која је развијена за заваривање серије бxxx.

Пре заваривања потребно је очистити регије које се заварују и тако уклонити оксид алуминијума који постоји. За уклањање оксида коришћена је брусница са фином брусном плочом.

Након што су очишћене, плоче поставити у положај који се заварује. У овом случају реч је о угаоном завару који се по стандарду EN ISO 6947 ради у РВ положају (хоризонтални положај заваривања). Величина угаоног завара је $a=3\text{mm}$. Поступак је изведен у хали АММ Manufacturing са заваривачем који има дугогодишње искуство у заваривању алуминијума. Као апарат коришћен је TransPlus Synergic 400i произвођача Fronius са додатним материјалом Union AlMg4.5Mn произвођача Bohler пречника жице 1.2 mm. Као заштитни гас коришћен је I3-ArHe са уделом хелијума од 30 %. У табели 3.6.1. дати су параметри са којима је изведено једнопролазно заваривање експеримента

Табела 3.6.1. Приказ параметара за заваривање [6]

Пролаз	1
Поступак EN ISO 4063	131
Пречник ДМ (mm)	Ø 1.2
Струја (A)	130
Брзина жице (m/min)	7.7
Напон (V)	21.3
Лук	-10
Баланс	/
Врста Струје	DC+
Брзина заваривања (cm/min)	54
Пренос метала	puls

На слици 3.6.1 приказано је постављање комада у положај и причвршћивање стегом. Количина унете енергије узима у обзир утицај ефикасности процеса на енергију која заправо досеже радни комад да формира завар. Количина унете енергије Q рачуна се по следећем обрасцу:

$$Q = \eta \frac{U \times I \times 60}{v \times 1000} = 2.461 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right] \quad (3.6.1)$$

где је U - електрични напон (V), I - струја (A), v - брзина заваривања, η – коефицијент термичке ефикасности

На слици 3.6.1 приказано је постављање комада у положај у који се заварује где је вертикална плоча позиционирана хефтовима како се не би померала и хоризонтална причвршћена стегом док је са друге стране одрађено заваривање.



Слика 3.6.1. Приказ експеримента након заваривања [6]

4. Основи технике залепљених спојева

Лепљење као поступак спајања два чврста тела примењено је још у давној прошлости. За њега се знало врло рано у историји људског друштва и тешко је утврдити да ли су се људи пре служили лепљењем или закивањем ексера за причвршћивање два парчета дрвета. У гробници фараона Тутанкамона нађен је ковчег од кедровине у чијем спајању је коришћен лепак животињског порекла, вероватно претеча туткала пре 3000 година. Интересантно је да су те лепљене везе данас исто тако чврсте као и у време њиховог настанка [4].

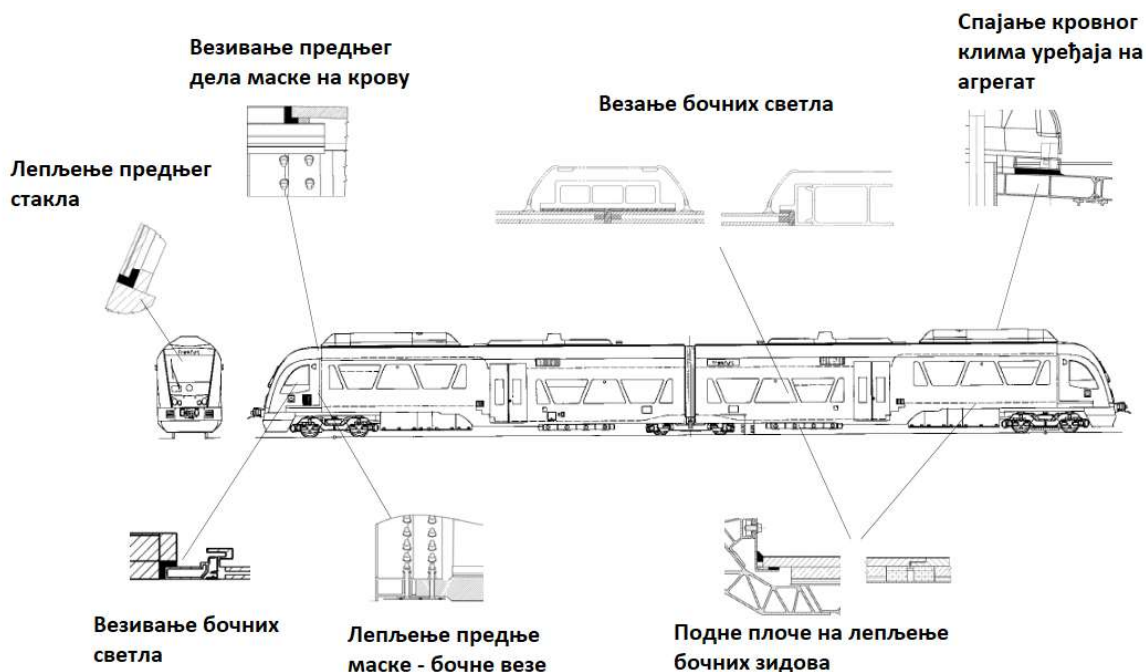
Лепак представља супстанцу која је способна да слепи два иста или различита материјала, дајући јаку везу. Синоними за лепак су „адхезив“ и „везиво“, па се равномерно користе у нашем језику.

Лепљење је процес формирања нераздвајивог споја између основних материјала који се налазе у чврстом стању. Лепљење се користи како за спајање истородних материјала, тако и за спајање разнородних материјала. У овом поглављу су наведене предности и недостаци лепљења у односу на друге поступке спајања, поделе лепкова према различитим критеријумима, технологија израде залепљених спојева, као и испитивање квалитета залепљених спојева [4].

4.1 Улога лепкова

Добијање залепљене везе се заснива на појави адхезије - деловања физичких и хемијских веза лепка са различитим материјалима. Учинак адхезије је максималан када је добро квашење површина лепком, слично механизму настанка залемљеног споја. Осим силе адхезије, битна је сила кохезије лепка, која зависи од врсте лепка. Све до почетка прошлог века једини лепкови већег значаја су били животињског или биљног порекла и користили су се за лепљење порозних материјала. Казеински лепкови (животињског порекла) користили су се у току Другог светског рата за лепљење дрвених оквира авиона. Ови лепкови нису отпорни на утицај влаге.

Наведена ограничења примене природних лепкова условила су развој нових врста лепкова на бази синтетичких смола и других материјала. Фенолформалдехиди су биле прве синтетичке смоле за лепљење дрвета. Касније су фенолним смолама додати синтетички еластомери - каучуци. Од 1950. године започело се са коришћењем епоксидних смола. Савременим проналасцима је омогућена примена нових типова синтетичких смола којима се додају разноврсни састојци тако да се добијају јаки и трајни лепкови за повезивање површина делова које је раније било тешко или немогуће залепити [4].



Слика 4.1.1. Примена лепљења у индустрији [6]

Предности лепљења су следеће:

- могућност повезивања разнородни материјали израда сложених облика из делова у случајевима када друге методе нису ефикасне, равномерна распоређеност оптерећења по читавом пресеку,
- смањена маса конструкције
- естетика готовог производа (елиминише се употреба закивака и заварених спојева),
- равномерно распоређено оптерећење по читавом пресеку,
- могућност спајања материјала који би се приликом заваривања и лемљења разорили,
- велика способност апсорпције и пригушена вибрација,
- бржа и јефтинија израда,
- не пропуштају воду, отпорни на корозију и не мењају својства материјала који се лепе

Недостаци лепљења су:

- недовољна чврстоћа споја,
- процес везивања може да буде компликован, јер је потребна специфична површинска припрема делова, одређена температура, влага и притисак, релативно дуго време сушења, као и одговарајућа конструкција споја да би се смањила напрезања,
- осетљивост споја на температуре, топлоту, хемијске реагенсе и биолошка оштећења.

Имајући у виду предности и недостатке, лепкови су нашли примену при спајању разнородних материјала: метала, пластике, дрвета, метала који међусобно кородирају,

гвожђа са бакром или месингом и за израду слојевитих структура (сендвич конструкције) [4].

Одговарајућим лепковима могу се спајати различити материјали, као што су комбинације метала, пластике, гуме, дрвета, метала који кородирају међусобно, гвожђа са бакром и месингом, израда слојевитих структура и друго. Са тог становништва лепљење као поступак спајања има ширу примену од других поступака спајања, Нарочито има широку примену у гумарској, кожној, текстилној, дрвопрерађивачкој индустрији и другим областима рада [4].

Пројектовање неког дела или конструкције у било којој грани индустрије захтева познавање карактеристика залепљених спојева (предности и недостаци), врсте спојева у смислу изводљивости, познавање процеса лепљења као и врста и могућности лепкова.

4.2 Адхезионе силе

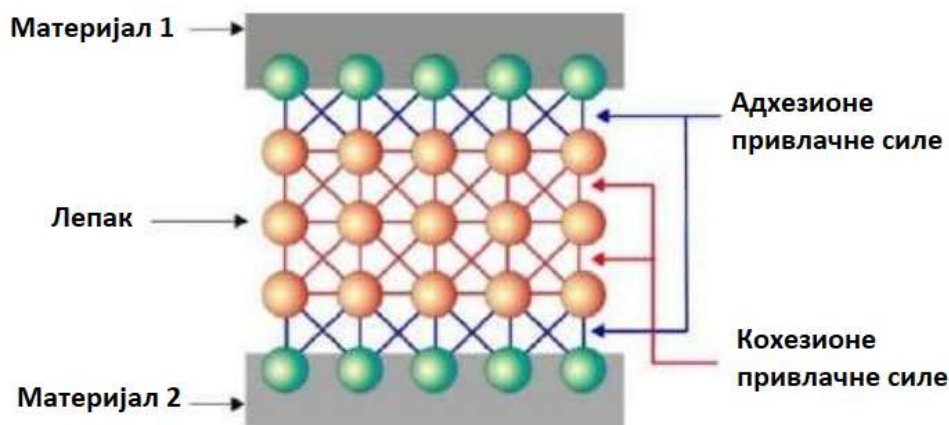
Веома је тешко тачно дефинисати адхезију и до сада не постоји потпуна дефиниција адхезије. Следећу дефиницију је предложио Wu: Адхезија се односи на стање у којем се два материјала различите структуре држе спојем уз помоћ блиског међуповршинског контакта уз помоћ којег се механичке силе или рад може пренети кроз међуфазне површи. Међуповршинске силе које држе две фазе заједно могу да проистекну из Ван дер Валсових привлачних сила, хемијске везе, или електростатичког привлачења.

Механичка чврстоћа система одређена је не само међуповршинским силама, већ и механичким својствима међуповршинске зоне и материјала који се спаја. Услед ових интеракција долази до везивања адхезива за површину подлоге. Силе привлачења између различитих врста молекула називају се адхезионим силама које се јављају на граници фаза. Специфичан случај адхезије јесте тзв. аутоадхезија, која се успоставља када два предмета од истог материјала дођу у контакт и када је привлачење (спој) последица сила интеракције исте врсте молекула да не би дошло до адхезије између два предмета неопходно је да адхезив квази те предмете и да молекули адхезива остваре међумолекулске интеракције са молекулима материјала [12].

4.3 Кохезионе силе

Силе привлачења исте врсте молекула у унутрашњости једног материјала називају се кохезионе силе. Ипак, у примеру фигуре од песка, адхезиона сила сама по себи не би била довољна да сачува формирани облик. Веза успостављена између молекула воде и површинског слоја молекула зрнаца песка, ма колико она била јака, не би могла да очува интегритет фигуре, без присуства још једне силе. Ова сила такође делује на молекуларном нивоу. То је кохезиона сила. Она делује између молекула воде и одржава их на окупу [12].

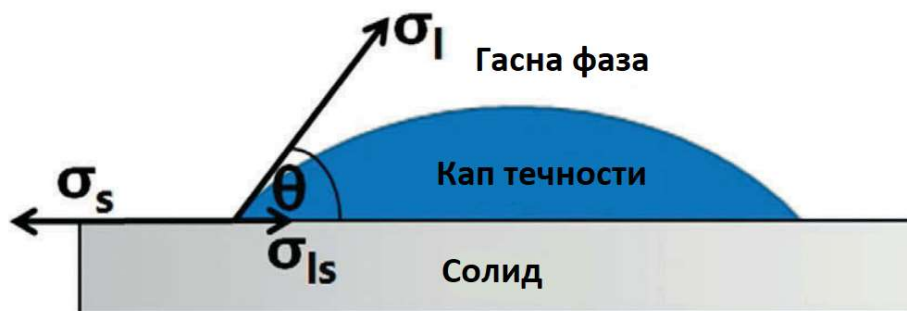
Присуство кохезионе силе у природи је очигледно. Кохезиона сила формира капљице воде. На исти начин на који вода својим присуством омогућава да се зрнца песка држе на окупу, тако и лепак својим присуством обезбеђује да два чврста објекта, делови неке машине, трајно задрже жељени положај. На слици 4.2.1. приказан је модел који објашњава физичке основе технологије спајања делова лепљењем. У међупростор између два објекта, објекат А и објекат Б, уноси се одређена количина лепка у течном стању. Адхезионе везе између молекула лепка и делова који се спајају (означене плавом бојом) и кохезионе везе између молекула лепка (означене црвеном бојом) делују на ове објекте и успостављају између њих механичку везу [12].



Слика 4.3.1. Приказ деловања адхезивних и кохезивних сила[12]

4.4 Квашење

Да би се успоставила адхезиона веза између лепка и објекта који се лепе, неопходно је да буде испуњен један специфични услов. Тај услов односи се на међусобни однос адхезионих и кохезионих сила. Адхезиона сила која делује између молекула течности и молекула материјала објекта који се спајају лепљењем мора да буде већа од кохезионе силе која истовремено делује између суседних молекула течности. Уколико је то случај кажемо да течност кваси материјал објекта који се спајају [12].



Слика 4.4.1. Квашење подлоге[12]

Угао квашења материјала се одређује из следећих једначина:

$$\sigma s = \sigma l \times \cos \theta + \sigma ls \quad (4.4.1.)$$

$$\cos \theta = (\sigma s - \sigma ls) \div \sigma l \quad (4.4.2.)$$

где је: σs - површински напон супстрата, σl – површински напон течног адхезива, σls – међуповршински напон између течног адхезива и чврстог супстрата, θ – угао квашења.

Добро квашење и добро простирање адхезива по супстрату постиже се при нижим угловима квашења ($\theta < 90^\circ$), када је $\sigma_{ls} < \sigma_s$. делимично квашење настаје на високим вредностима угла θ ($90^\circ < \theta < 180^\circ$). Спајање адхезива и супстрата може бити последица специфичне и механичке адхезије. Специфична адхезија је резултат интеракције између молекула адхезива и супстрата.

Механичка адхезија је последица продирања адхезива у површинске поре супстрата чиме се успоставља веза преко формираних клинова, који заједно са специфичном адхезијом доприносе већој јачини споја [12].

Управо се то дешава код фигура од песка. Критичан физички захтев је задовољен - вода кваси зрнца кварцног песка. Насупрот томе, када би зрнца песка била израђена од парафина, описани принцип лепљења не би функционисао и фигура би се распала. Може се без ризика од претеривања констатовати да претходно објашњени феномени интеракције материје на молекуларном нивоу представљају основу на којима почива свеукупна природа, градећи кроз чудесне молекуларне интеракције механизме различите сложености, укључујући и онај најсложенији - живот. Инжењери су, користећи ове физичке принципе, изградили моћну технологију спајања делова лепљењем, прилагођену за примену у савременој индустријској производњи.

За лепљење се користе разне врсте лепкова којима се премазују површине додира пре спајања, а могу се користити и облоге за лепљење. На основу избора одговарајућег лепка, а према упутству произвођача потребно је обавити процес лепљења, водећи рачуна о свим операцијама у процесу лепљења [12].

4.5 Лепљење узорака

Лепљењем се најчешће спајају неметални материјали, легуре лаких метала. Изузетно брз развој у хемијској индустрији, довео је до тога да не постоји ограничење у примени лепкова и лепљених спојева. Спој обезбеђује сила атхезије између лепка и залепљеног елемента. Подразумева се да сила кохезије унутар лепка буде јача од поменуте атхезије. При формирању лепљеног споја требало би тежити да сам спој буде изложен смицању [12].

Припрема површине се врши како би се обезбедила површина која је чиста и активна за лепљење и подразумева скидање прљавштине, масноће и површинске корозије са

површине материјала који се лепи. За то се користе течности (изопропанол, етанол, СИКА Ремовер, итд) и користе се брусни папири (шмиргле) различитих вредности храпавости у зависности од квалитета површине који се захтева. За фино брушење се користи Сцотцх Брите. Након обраде површине брусним папиром се такође врши чишћење течностима (етанол, ремовер, изопропанол).

Уколико се лепи површина која је лакирана или се лепи стакло, керамика, тј. површине које имају малу површинску енергију, врши се чишћење површине течностима и активација површине (Пуросил, отворени пламен, плазма, итд.). Потребно је напоменути да се након чишћења и наношења ремовера, површина оставља 10 минута (време одветравања) пре даљег рада на њој [6].



Слика 4.5.1. Уклањање нечистоћа са алуминијума [6]

На претходно обрађену површину се наносе активатор и прајмер. Најпре се наноси активатор и чека се 10 минута време одветравања, након чега се наноси пример за који време одветравања износи 5 минута. Обе супстанце се наносе одговарајућим сунђерима на површину и у монослоју како би се површина што боље лепила. Након одговарајућег времена одветравања започиње процес наношења лепка.



Слика 4.5.2. Наношење активатора на подлогу [6]

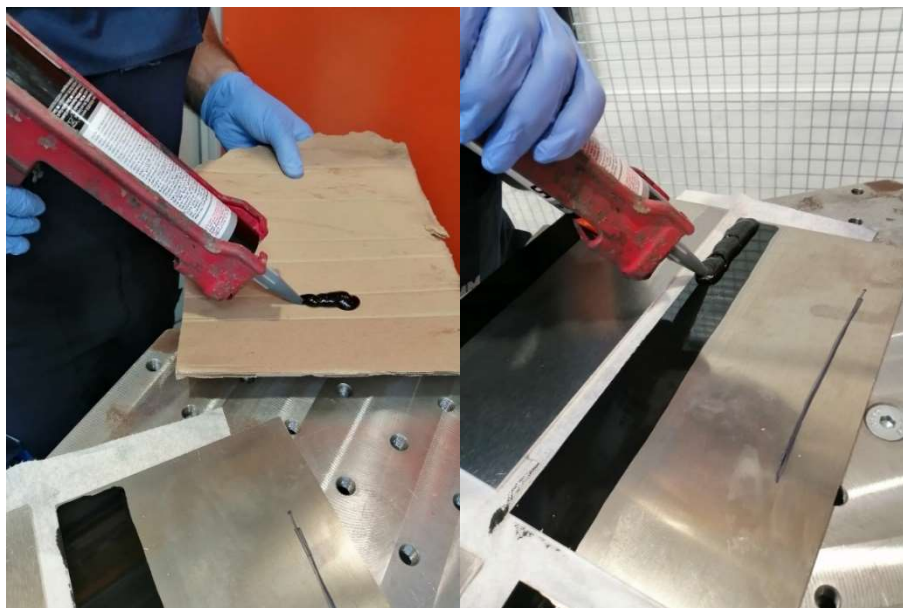


Слика 4.5.3. Наношење прајмера на подлогу [6]

Наношење лепка се врши одговарајућим средствима за наношење (пиштољима) који могу бити механички, пнеуматски или електрични. Употреба одређене врсте пиштоља зависи од количине и врсте лепка који се наноси. Уколико се користе лепкови за навоје (анаеробни лепкови) њихово наношење се врши из њиховог паковања.

Приликом отварања новог паковања лепка, неопходно је истиснути одређену количину лепка и не користити је за спајање. Лепак се наноси у једном потезу (гусеници), и уколико дође до прекида гусенице, исту не треба наставити већ се нова гусеница поставља поред. Дебљина лепка је прописана техничком документацијом, као и облик гусенице која се наноси на површину и то зависи од намене лепљеног споја. спајане делове одговарајућим

алатом (шпакна). Уколико постоји потреба лепљени део се загрева у одговарајућим пећима након чега се одлаже да лепљени спој очврсне (просечно време очвршћавања лепка је 24 h). Након тога се таквим делом може манипулисати и може се контролисати.



Слика 4.5.4. Наношење лепка на подлогу [6]

Лепљење се врши у просторијама са контролисаном температуром и влажношћу ваздуха. У просторији где се врши лепљење је забрањена употреба алата који варниче. Просторија мора имати вентилацију ради добре проветрености услед коришћења хемикалија, такође прашина лоше утиче на квалитет лепљеног споја. Радници који врше лепљење морају носити заштитне наочаре и заштитне рукавице (хируршке рукавице), маске и мантиле или кецеље које спречавају да хемикалије или лепак дођу у контакт са кожом.

На радном месту морају бити истакнута упозорења да се ради са хемикалијама, и морају бити истакнута обавештења о коришћењу одговарајуће заштитне опреме. Такође, осталим радницима није дозвољен приступ у овај део производње ради спречавања излагања овим материјама. За одлагања ових материјала морају постојати одвојене канте/контејнери пошто ове материје не спадају у класичан отпад, те се у складу са тим морају одлагати на одговарајући начин.

5. Механички модел

Механичке особине, говорећи уопштено, карактеришу понашање материјала под дејством сила које изазивају напрезање у материјалу. Утврђују се посебним поступцима испитивања узорака који су направљени од материјала предвиђеног за израду машинских елемената и других конструкционих делова или од самог машинског елемента. У групи механичких особина спадају: чврстоћа, еластичност, пластичност, жилавост, тврдоћа, отпорност против трошења - хабања и отпорност на трење [11].

Чврстоћа материјала је отпор који пружа материјал при деловању спољних сила. Код метала и легура (чврстих и хомогених тела) деловање силе споља распоређује се подједнако по целом пресеку материјала. Зависно од начина и смера деловања спољашњих сила на материјал, чврстоћа може бити: на затезање, притисак, на савијање, смицање, увијање или торзију и извијање [11].

Поједини машински елементи и конструкције могу бити истовремено изложени двома врстама или већем броју врста напрезања (нпр., притисак и савијање). Таква напрезања називамо сложеним напрезањима. У стручним приручницима и свакодневној пракси као карактеристика материјала најчешће се наводи његова затезна чврстоћа. Затезна чврстоћа представља максимално оптерећење (по јединици површине првобитног пресека (нормалног на силу затезања) које материјал може издржати [11].

Еластичност је особина материјала да након престанка деловања спољашњих сила које су изазвале одређену промену облика и димензија прими поново свој првобитни облик и димензије. Деформација која остаје у материјалу и након престанка оптерећења назива се пластична деформација. Напрезање које лежи на граници еластичних и пластичних деформација називамо граница еластичности [11].

5.1 Механички модел заварених спојева

Механичко-технолошка испитивања метала и заварених спојева су један од најважнијих, ако не и најважнији сегмент провере квалитета материјала. Основна сврха ових испитивања је да се експерименталним путем утврде својства, коришћењем узорака који најбоље репрезентују или сам материјал или полуфабрикат и конструкцију израђену од испитиваног материјала. Како је развој метода испитивања метала и заварених спојева, историјски посматрано, текао упоредо са освајањем нових легура и усавршавањем поступака заваривања, тако су значајно расли и захтеви за испитивањем на рационалан начин, и уз обезбеђење максималне сличности са експлоатацијским условима. У том смислу, готово сва испитивања која се изводе на основном металу, изводе се и на завареном споју.

Начин и обим испитивања је условљен експлоатацијским условима основног метала и заварених спојева, и ти услови су, на данашњем степену развоја технике, веома разнолики [11].

5.1.1 Испитивање затезањем

Разлика механичких испитивања заварених спојева, у односу на испитивања основног материјала, је чињеница да је заварени спој геометријски и микроструктурно нехомоген. Због тога се испитивања прилагођавају испитивању зоне утицаја топлоте (ЗУТ) и/или метала шави (МШ). Посебност су и технолошке пробе заваривости у циљу утврђивања отпорности на настанак прлина у завареним спојевима у граничним условима заваривања [11].

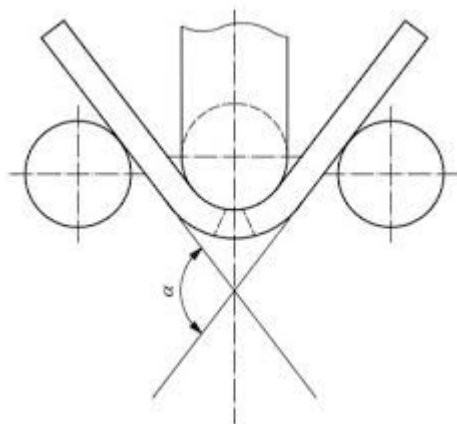


Слика 5.1.1. Испитивање затезањем на глодалици [7]

5.1.2 Испитивање савијањем

Епрувете и поступак испитивања савијањем на сучеоним спојевима дефинисани су стандардима ЕН 910 (Welded butt joints in metallic materials - Bend test) и АWC Б4. 0М: 2000 (Standard Methods for Mechanical Testing of Welds). Епрувете се савијају помоћу трна или ваљка. Зависно од поступка савијања користе се различити алати за савијање у три тачке и

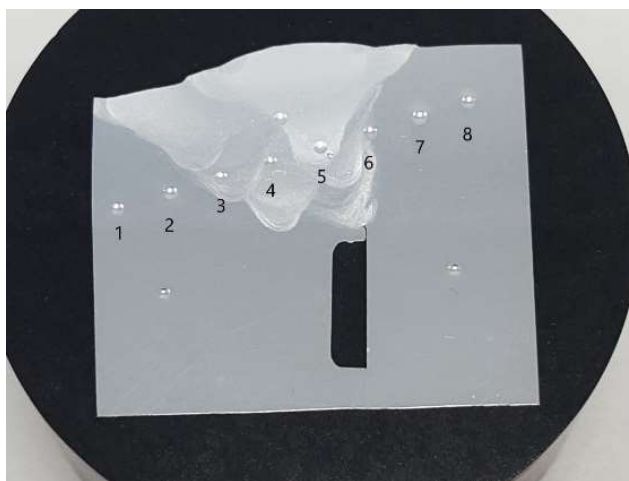
алат за савијање око вретена. Најчешће се при испитивању користи савијање помоћу трна или ваљка пречника $4t$ са критеријумом - углом савијања од 120° , изузев у случају када је мала дуктилност основног или додатног материјала која условљава друга ограничења. За испитивање на савијање користи се више типова епрувета чији изглед и димензије су такође дефинисане наведеним стандардима. У зависности од места на коме се уводи оптерећење у односу на сучеоно заварени спој разликује се попречно или подужно савијање, које може бити савијање лица метала шав, корена метала шав и бочно савијање [11].



Слика 5.1.2. Испитивање савијањем. [11]

5.1.3 Тврдоћа.

Тврдоћа материјала је отпор којим се једно тело супротставља продирању другог тела у његову површину. Величина и димензије тврдоће за један те исти материјал зависе од примене методе одређивања тврдоће.



Слика 5.1.3. Испитивање тврдоће завареног алуминујума [7]

Испитивање тврдоће се врши према стандардима ЕН 1043-1 ((Welded joints in metallic materials - Hardness testing) и ЕН 1043-2 (Destructive tests on welds in metallic materials - Hardness test - Part 2: Microhardness testing on welded joints). Примењује се Викерс метода

ХВ 5 и ХВ 10. Отисци се изводе у МШ, ЗУТ и основном материјалу (ОМ), тако да се добију и региструју подручја вредности на завареном споју. Испитивање даје и везане линије, при чему једна од њих треба да буде највише 2 mm испод површине. Типски примери поступка мерења тврдоће на завареном споју су дати на слици 5.1.3. По везаним линијама потребно је да постоји најмање по три отиска за сваку од зона: МШ, ЗУТ (обе стране) и ОМ (обе стране). Први отисак у ЗУТ мора бити што ближи линији стапања метал шава и основног материјала [11].

5.2 Механички модел залепљених спојева

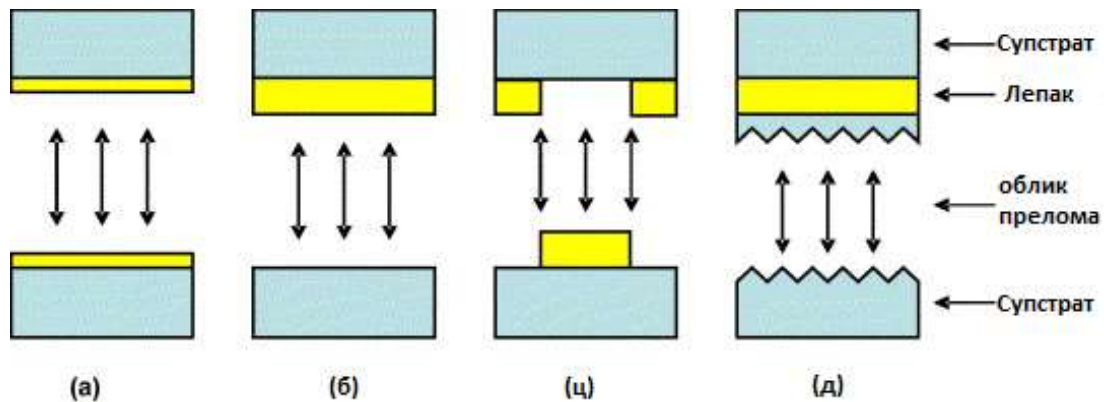
Приликом испитивања адхезије неопходно је обратити пажњу на механизам адхезивног лома који нам показује јачину адхезије и самог адхезива. Врста пожељног механизма лома зависи од начина употребе адхезива.

Постоје три могућа механизма нарушавања адхезионог споја:

- Структурни лом – је унутрашњи лом материјала супстрата у непосредном пределу споја. Структурни лом указује на то да су адхезионе и кохезионе силе адхезива јаче него унутрашње (структурне) везе у материјалу супстрата.
- Адхезиони лом – је лом који настаје као резултат раздвајања супстрата и адхезива. Ова врста механизма указује на слабе адхезионе силе у односу на кохезионе силе адхезива и структурне силе материјала супстрата.
- Кохезиони лом – је унутрашњи лом самог адхезива. Механизам кохезивног лома условљен је силама кохезије – тј. међумолекулским силама у адхезиву. Кохезивни лом указује на добро успостављену адхезију

Слика 5.2.1. шематски илуструје поменуте механизме са специфичним случајевима који се дешавају приликом отказивања адхезивног споја. Први случај показује карактеристичан адхезиони лом који се простира дуж осе адхезива који показује равномерну расподелу кохезионих сила које су значајно слабије од успостављених адхезионих сила (кохезиони лом). Отказ, када се кохезиони лом ближи међуфазној граници са супстратом указује на неравномерну расподелу кохезивних сила услед појаве дефекта у самом адхезиву или приликом његовог наношења.

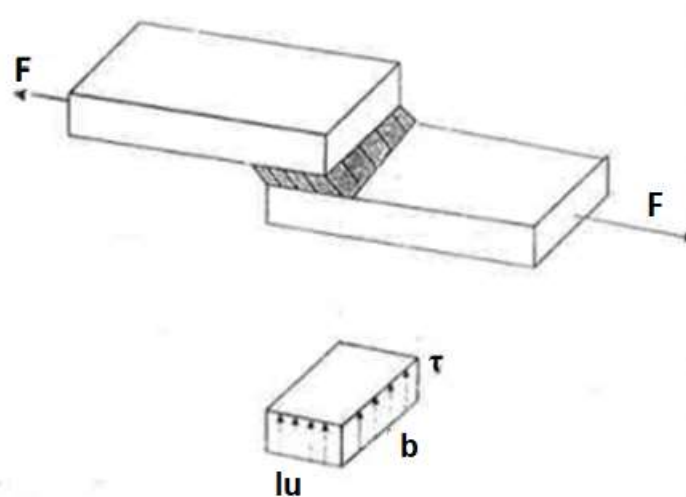
Чист адхезиони лом показује знатно слабије адхезионе силе у односу на кохезивне. Ова врста механизма може указати на потребно побољшање адхезије. Приликом изједначавања адхезионих и кохезионих сила у споју долази до лома од једне до друге мађуфазне границе што дефинише комбиновани адхезивно-кохезивни лом [12].



Слика 5.2.1. а) Кохезиони лом, б) Адхезиони лом, ц) Комбиновани лом, д) Лом у супстрату [12]

Уколико се код комбинованог лома продужава део путање уз међуфазну границу, постоји неравномерна расподела адхезионо – кохезивних сила тј. адхезивни лом заузима већи удео у свеукупном механизму. Структурни механизам представља лом у супстрату па је углавном непожељан лом приликом раздвајања материјала, а између осталог показује да адхезив носи веће оптерећење него супстрат [12].

Формулисање прорачуна нормалних напона при затезању залепљеног споја, разлагање напона приказано је на слици 5.2.2.



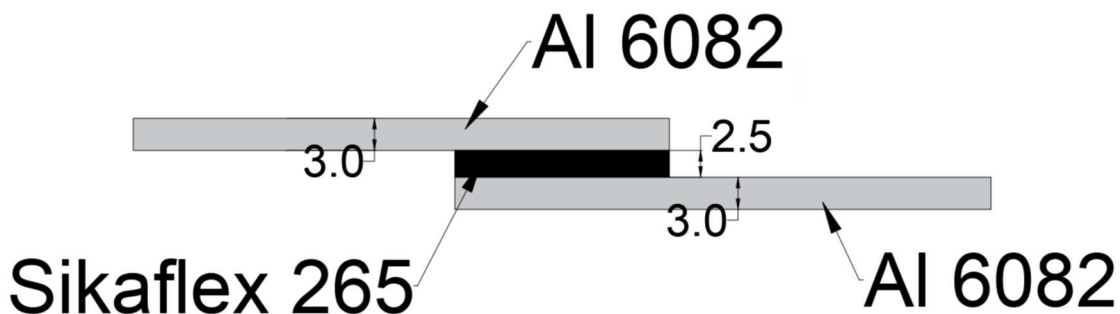
Слика 5.2.2. Деловање сила при смицању залепљеног споја[5]

У једначини је приказан однос оптерећења са дужином преклапања и ширином спајаних делова

$$\tau = \frac{F}{l_u \cdot b} \quad (5.2.1.)$$

где је τ - напон при смицању, F - оптерећење, l_u - дужина преклапања, b - ширина спајаних делова.

У овом поглављу приказано је испитивање залепљеног споја на кидање. Испитивање је извршено у институту IMW који је у оквиру MIND PARKA а чија је примарна делатност истраживање и развој у области техничко-технолошких наука. За експеримент је узет узорак од претходно залепљене алуминијумске епрувете Сикафлекс лепком приказ епрувете дат је на слици 5.2.3.



Слика 5.2.3. Приказ епрувете која се кида

Експеримент је изведен на универзалној машини за испитивање затезање, притискивање и савијањем SHIMADZU AG-X. Максимална сила за тестирање је 300 kN док је опсег брзина којим се могу вршити експерименти од 0,0005 mm/min до 500 mm/min. Машина омогућава континуално и циклично задавање оптерећења током испитивања. На слици 5.2.4. приказано је постављање узорка у чељусти кидалице [7].



Слика 5.2.4. Узорак постављен у чељусти кидалице [7]

Резултати добијени испитивањем приказани су на слици 5.2.5. Добијени резултати показују да је максимална сила коју је епрувета издржала једнака 2927.45 N померање епрувете при деловању ове силе износило је 8.1%. На графику се види однос напона [МПа] и деформације епрувете које је изражено у процентима.

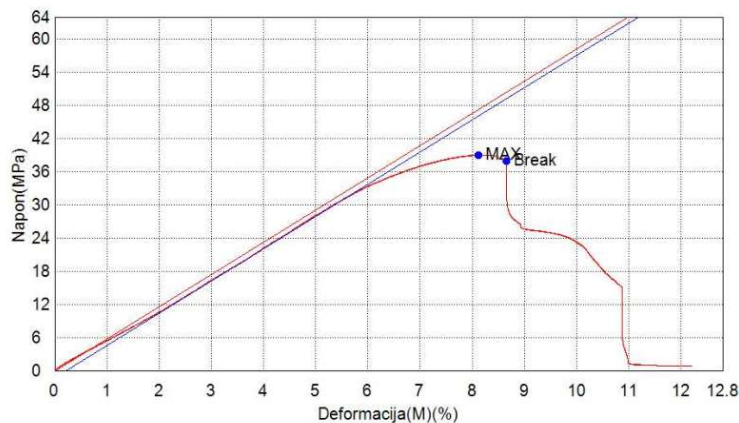
IMW INSTITUT

Podaci o ispitivanju:

Laboratorija	Laboratorija za mehaničko metalografska ispitivanja
Metoda ispitivanja	Ispitivanje zatezanjem
Standard	SRPS ISO
Materijal	Zalepljeni spoj
Vrsta epruvete	Pločasta epruveta
Temperatura	24°C
Mašina za ispitivanje	AG-X/MST-X/X-Type
Broj serija:	1
Komada/serija:	1
Operator	Nikola Marinković
Oznaka uzorka	MMK.19.086
Šifra izveštaja	3-1
Datum ispitivanja	13/08/2019
Datum izveštaja	13/08/2019

Evidencioni broj:	00003/19
Obrazac broj:	1

Name	Rp	Deformacija (M) Rp	Rm	Maksimalna Sila	Deformacija Rm	Sila (K)	Rk	Deformacija (M) (K)
Parameters	0.2 %	0.2 %	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	MPa	%	MPa	N	%	N	MPa	%
1 - 1	10.5985	2.01851	39.0326	2927.45	8.12478	2846.96	37.9594	8.65810
Average	10.5985	2.01851	39.0326	2927.45	8.12478	2846.96	37.9594	8.65810
Standard Deviation	---	---	---	---	---	---	---	---
Range	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



Komentar: Ispitivanje zatezanjem zalepljene epruvete, debljina lepljenje: a0=2.5mm ; sirina: b0=30mm:

Izveštaj izradio:

Kontrolisano:

Odobrio:

Слика 5.2.5. Резултати добијени кидањем епрувете [7]

Затезна чврстоћа материјала је максималан напон којим се материјал може оптеретити затезањем, а да притом не дође до лома. Дефиниција лома може да варира у зависности од материјала и методологије извођења експеримента. Аналитичким прорачуном то је однос силе F , кроз површину A :

$$\tau_b = \frac{F}{A} \quad (5.2.2.)$$

Еластичност је својство чврстих тела (материјала) да под утицајем спољашње силе мењају свој облик или запремину и да се, након престанка њеног деловања, враћају у првобитан. Код гуме и других полимера, еластичност је узрокована истезањем полимерних ланаца примењеном облик

$$\tan \gamma = \frac{v}{d} \quad (5.2.3)$$

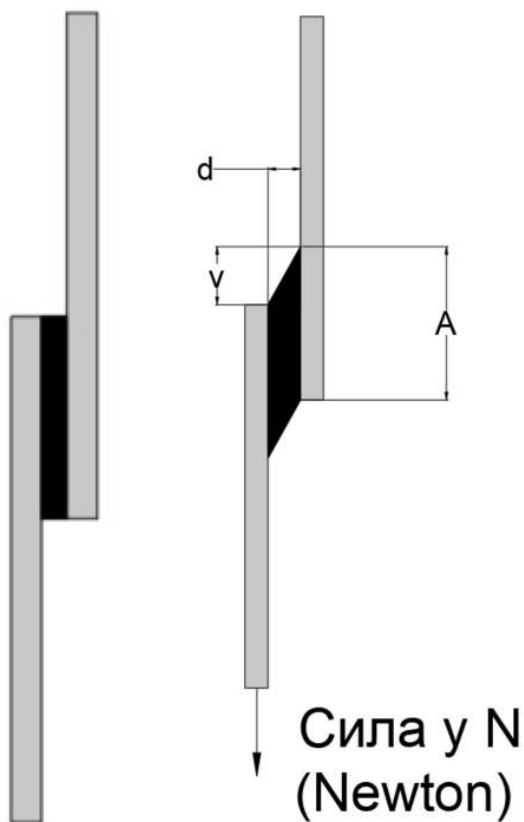
где је v - издужење залепљеног споја, d – дебљина лепка.

За гумасте материјале као што су еластомери, нагиб дијаграма напрезања се повећава са напонам, тако да је гуму прогресивно све теже даље истезати, док се за већину метала градијент смањује при веома високим напонима, тако да они прогресивно постају све растегљивији.

Чврстоћа је способност материјала да разгради напоне пластичном деформацијом и на тај начин повећава отпорност материјала на крхки лом. Мера жилавости материјала је утицај лома. Способност материјала да се пластично деформише, пре него што се догоди лом, назива се дуктилност. Ово својство се понекад назива и деформабилношћу, пластичношћу, еластичношћу и под притиском оптерећења и окретности. Супротно томе, (непријатно) својство материјала да се ломи без претходне пластичне деформације назива се крхкост. Чврстоћа је, дакле, мерило дуктилности. Стога материјали мале жилавости нису дуктилни, али крхки [12].

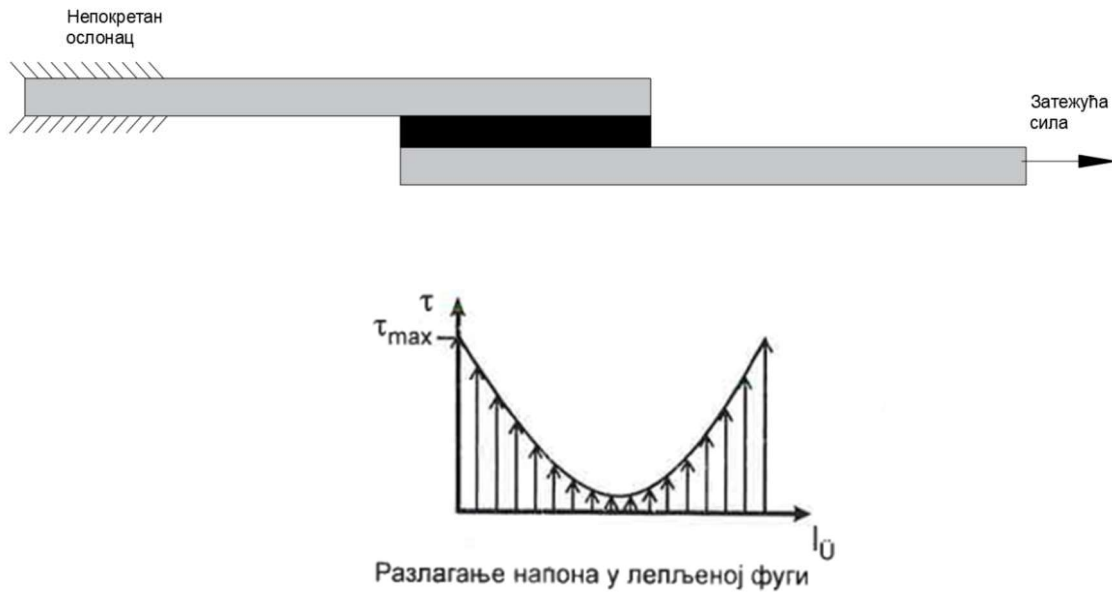
$$G = \frac{\tau}{\tan \gamma} \quad (5.2.4.)$$

На слици 5.2.6. приказана је растерећена и оптерећена епрувета на којој су дате димензионе карактеристике које фигуришу у аналитичком рачуну за одређивање еластичности материјала.



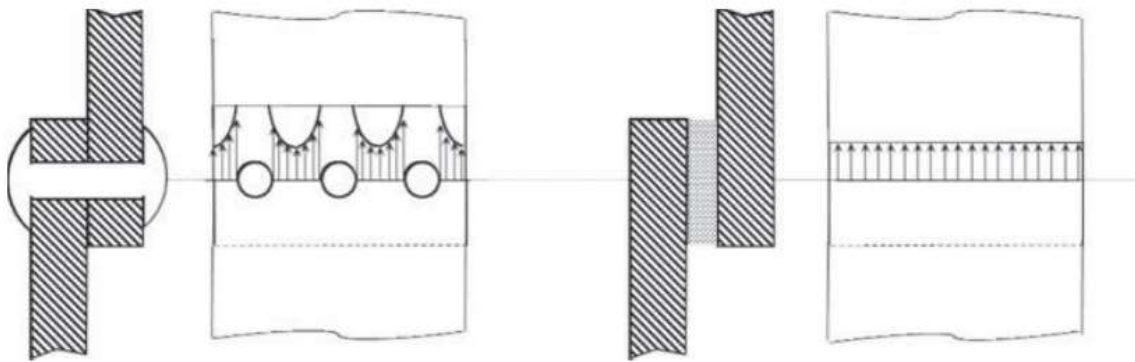
Слика 5.2.6. Епрувета пре и након оптерећења

Расподела напона кроз пресек залепљеног споја при деловању аксијалне затежуће силе приказан је на слици 5.2.6.



Слика 5.2.7. Расподела напона при затезању

Код залепљеног споја расподела напона је континуална кроз цео спој што се може видети на следећој слици где је направљено поређење између закованог споја и залепљеног споја, где се јасно види да залепљени спој боље разлаже деловање затежучих сила.

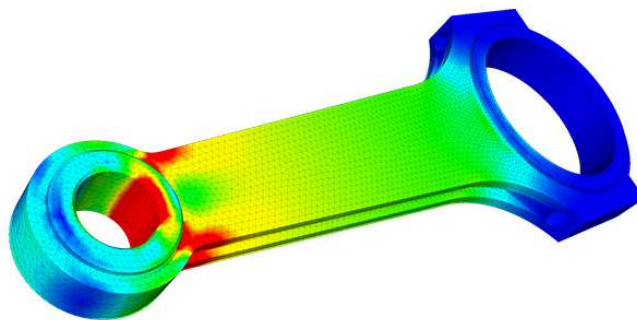


Слика 5.2.8. Упоређивање расподеле напона код залепљеног и занитованог споја [5]

6. Нумерички модел

Метода коначних елемената је поступак нумеричког решавања инжењерских проблема и проблема математичке физике. Могу је користити све врсте инжењера, дизајнера и менаџера.

Метода коначних елемената анализира структуре и израчунава: напонска поља, поља померања, температурна поља, проток течности, транспорт масе итд. Посматрани домен континуума се дели на поддомене коначних димензија који се називају коначним елементима и заједно чине мрежу коначних елемената. Коначни елементи су међусобно повезани у коначном броју тачака који се називају чворовима. Стање променљиве поља у сваком коначном елементу се описује помоћу интерполационих функција. Интерполационе функције представљају везу између вредности променљиве поља у било којој тачки коначног елемента и вредности променљиве поља у чворовима. Постоје четири основна типа МКЕ: директна, варијациона (метода сила, метода деформација, мешовита метода), метода резидуума и метода баланса енергије [14].



Слика 6.1. Резултати прорачуна методом коначних елемената – распоред поља поља напона [14]

Процедура решавања проблема методом коначних елемената састоји се из пет корака. Први корак представља идентификацију проблема, а након тога се врши дефинисање елемената (други корак). Трећи корак подразумева формирање једначина елемената. Повезивање формираних једначина елемената представља четврти корак. Последњи корак у процедури решавања проблема методом коначних елемената је нумеричко решавање глобалних једначина [14].

Најважнија и најдуготрајнија фаза у процесу анализе МКЕ је припрема анализе или препроцесирање. Квалитет операција моделирања обављених у овој фази у великој мери утиче на квалитет резултата анализе.

Избор типа коначног елемента један је од најважнијих корака у примени методе коначних елемената и утиче на добијање тачних резултата. Основне особине без којих је немогуће дефинисати коначне елементе су: облик, број и врста чворова, број и врста степени слободе у појединим чворовима, као и врста интерполационих функција [14].

6.1 Нумеричка анализа заосталих напона при заваривању

Тачан прорачун заосталих напона при заваривању није могућ због недостатка детаљних, тачних података о расподели температуре током заваривања. Унета количина топлоте се одређује приближно, и због тога, као и због промена топлотне проводљивости и механичких особина тешко је добити довољно тачан прорачун заосталих напона. Само за једноставне спојеве и тачно утврђене термичке услове заваривања могу се прорачуном добити вредности заосталих напона, сагласне са измереним вредностима, које су најпоузданије. Ипак, развој нумеричких метода је потребан да се предвиди, нпр. да ли је потребно предгревање или погревање, или да се оцени осетљивост према водоничним прслинама. За моделирање еластичних и пластичних деформација, због којих долази до заосталих напона у завареним спојевима, потребна је сложена еласто-пластична анализа. Последњих година је постигнут значајан напредак у развоју компјутерске технике са ослоном на методу коначних елемената (МКЕ) за прорачун заосталих напона, чак и за релативно сложене облике, и сагласност теоријских предвиђања и мерења је све боља.

Једноставан облик једначине дат је формулом промене напона са променом температуре у близини завареног споја и облика:

$$\Delta\sigma = \alpha \times \Delta T \times E \quad (6.1.1.)$$

где је α коефицијент линеарног ширења, E је модул еластичности, а промена температуре ΔT зависи од топлотне проводљивости λ , специфичне топлоте по јединици запремине основног метала ρ , и споља унете топлоте, Q , која је за тачку (x, y, z) дата једначином:

$$\lambda(T) \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left\{ \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right\} + Q - \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (6.1.2.)$$

Величина $\Delta\sigma$ зависи од три термичка коефицијента, α , k и λ , и три материјалне карактеристике, α , E и σ_Y , а све се ове величине мењају са температуром. Сем тога, ако долази до фазних трансформација током хлађења, и оне доприносе кроз додатни фактор у једначини, који, у зависности од деформације издужења, може да се изрази једначином:

$$\varepsilon_d = \frac{5}{6} \frac{\Delta V}{V} \frac{\sigma}{\sigma_Y} \quad (6.1.3)$$

где се $\Delta V/V$ односи на издужење, σ је делујући напон, а σ_Y напон течења аустенита на температуре трансформације. Поступак прорачуна тада захтева да се одреди прираштај еласто-пластичне деформације у мрежи сегмената запремине у временском интервалу који одговара разматраном термичком циклусу. Укупни прираштај деформације за дати температурски интервал је дат матрицом:

$$\{d\varepsilon^T\} = \{\alpha\}dT \quad (6.1.4.)$$

где се $d\epsilon^T$ односи на деформацију термичког ширења. Ако је потребно да се $d\epsilon$ изрази преко чланова еластичног, ϵ^e , пластичног, ϵ^p , и термичког, ϵ^T , доприноса, може да се уведе следећа једначина:

$$\{d\epsilon^T\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^T\} \quad (6.1.5.)$$

и, на сличан начин, могу да се уведу друге материјалне и термичке променљиве. Прираштај напона се тада представља производом матрице, $[D]$, и прираштаја деформације, $d\epsilon$ [9]:

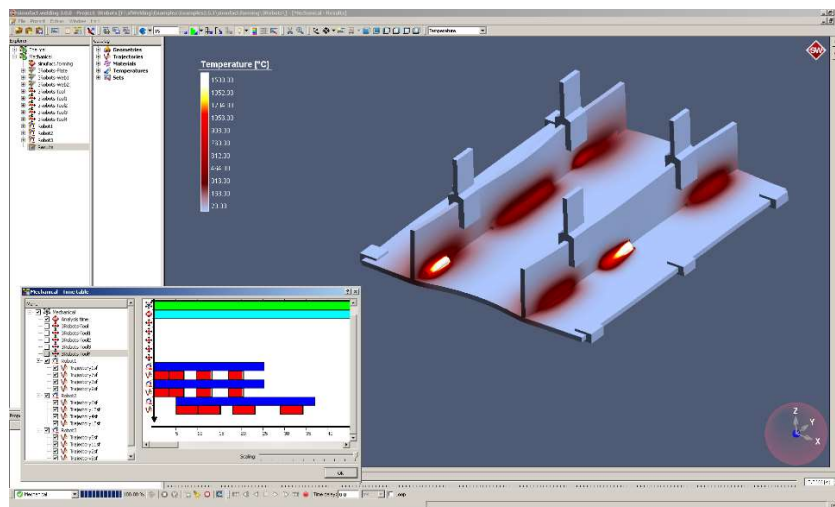
$$\{d\sigma\} = [D]\{d\epsilon\} \quad (6.1.6.)$$

6.2 Симулација заварених спојева у софтверу Simufact Welding

Simufact welding програм симулације заваривања омогућава стручњаку на пољу заваривања да ради без претходног знања о процесу симулације путем сопственог корисничког интерфејса. Simufact welding је софтверска апликација коју је развила компанија MSC-Software, а заснована је на методи коначних елемената и нуди могућности попут израчуна напона због технологије заваривања, изобличења и промене својстава материјала. Корисничко окружење карактерише прецизно структурно стабло процеса и објеката. Уобичајене функције као што су брзо и поуздано превлачење и испуштање, креирање модела такође има корисничко окружење. Опсежна контрола веродостојности, употреба унапред дефинисане базе података такође је део симулацијског програма Simufact welding. Simufact у потпуности ослобађа корисника од дугог уноса улазних параметара који су потребни за сложену анализу. Потпуна пажња посвећена је самом процесу заваривања.

Софтверска апликација омогућава приказ [13]:

- температуре
- заосталих напона
- промену криве у одређеним мерним тачкама у односу на почетне податке
- деформације у пресецима дела или целе компоненте у односу на почетне податке



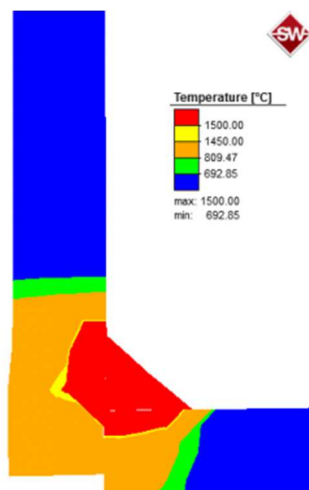
Слика 6.2.1. Приказ симулације у Simufact welding [13]

Simufact welding пружа одличне резултате у откривању критичних дисторзија које када се предвиде могу допринети у побољшању и оптимизацији алата за стезање. Програм нам омогућава да симулирамо различите правце и секвенце заваривања и тако унапред одредимо најпоузданији приступ заваривања [13].

На основу метода коначних елемената софтвер има могућност да истражи утицај затезања на изобличења заваривања и заостале напоне. Готово тестирање и процењивање различитих опција заваривања где долази до уштеде у самом процесу с обзиром да се избегавају скупи стварни покушаји [13].

На основу симулација спроведених у овом програму може се стећи знање о развоју зоне утицаја на топлоту у самом материјалу. Поред тога добија се и информација о понашању материјала током поступка заваривања што је јако битно због кориговања самих параметара.

Мана програма је та што сложени процеси током заваривања, индуковани луком или испаравањем метала у кључаници, нису узети у обзир. То значи да стабилност процеса и геометрија завареног шава нису резултат симулације, већ улазних параметара.



Слика 6.2.2. Приказ пресека завареног споја [13]

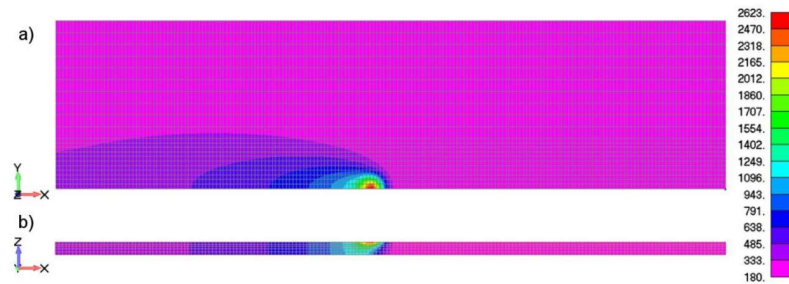
У овом приказу могуће је креирати попречне пресеке за визуализацију вредности резултата унутар тела. Легенда боја може се уређивати у смислу ограничења, боја и репрезентације и може се користити за приказ топлотних резултата као и изобличења, напрезања, чврстоће и материјалног стања. Распон легенде може се аутоматски прилагодити видљивим компонентама или компонентама без филета. Уз то, могуће је приказати позиције минималних и максималних вредности резултата у сваком кораку. Поред тога, положај извора топлоте или електрода у поступку заваривања на месту отпора може се приказати у сваком кораку [13].

6.3 Симулација заварених спојева у софтверу FEMAP

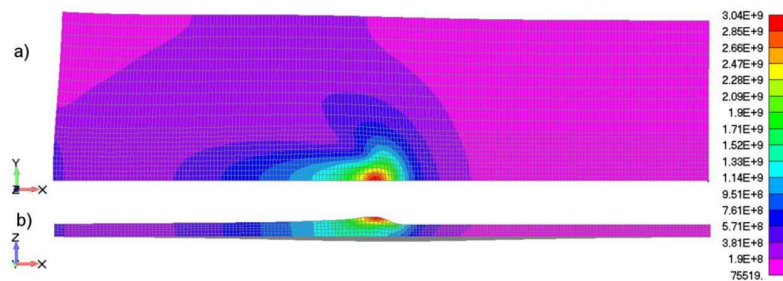
У овом поглављу је приказано симулирање процеса заваривања у софтверу FEMAP. FEMAP се користи за израду модела коначних елемената сложених инжењерских проблема и прегледа резултата решења који се добијају уз помоћ различитих солвера за обраду прорачуна.

Да би се извело симулирање завареног споја у FEMAP-у потребно је познавати термомеханичке особине споја који се користи. Основна верзија FMAP-a нема опцију узајамног рачунања ових карактеристика. Како би дошло до решења на факултету Инжењерских наука креиран је софтвер ПАК који нуди бројна решења из разичитих области. ПАК је програм опште намене за линеарну и нелинеарну статичку и динамичку анализу, провођење топлоте, ламинарно струјање флуида, солид-флуид интеракцију, струјање кроз порозне средине, спрегнуте проблеме, биомеханику, геомеханику, механику лома, механику оштећења и замор [16].

На сликама 6.3.1. и 6.3.2. приказана је термо-механичка анализе коришћењем спојених компоненти ПАКС и ПАКТ. У овом примеру показана је међусобна интеракција два одвојена софтвера, преко STL интерфејса, који нам омогућава крајње решење [15].



Слика 6.3.1. Температурно поље [15]



Слика 6.3.2. Напонско стање - деформисана конфигурација [15]

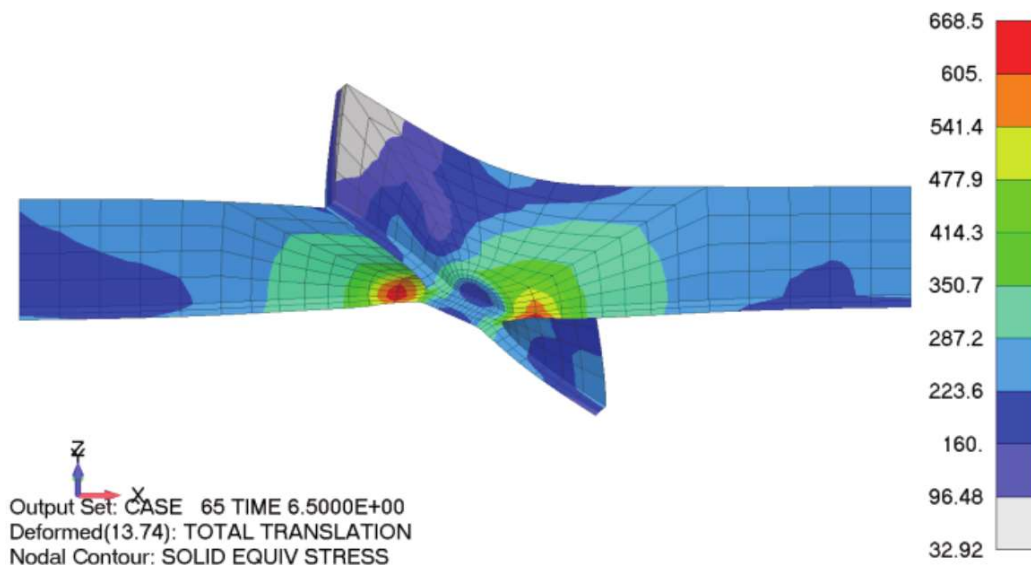
Промена температурног поља услед заваривања индукује појаву топлотних напрезања и напрезања на месту заваривања. Улед ове анализе може се уочити зона утицаја топлоте али се могу предвидети и деформације услед уноса енергије.

Наредни приказ симулација показује нелинеарну анализу тачкасто завареног споја, анализа је претходно праћена екперименталним кидањем епрувете, која је приказана на слици 6.3.3.



Слика 6.3.3. Епрувета тачкасто завареног споја [17]

Геометријска и материјална нелинеарна МКЕ анализа завареног споја разматра се коришћењем конститутивног модела великог напрезања вон Мисес-а уграђеног у ПАК софтвер [17], као што је приказано на слици 6.3.4.



Слика 6.3.4. Напонско стање - деформисана конфигурација [17]

Упоређивањем FEMAP-а и Simufact welding-а закључено је да FEMAP може да се користи за добијање резултата услед параметара који фигуришу у заваривању. Међутим са аспекта корисника у индустрији Simufact welding је наменски програм за заваривачку деалтност. Унос параметара за симулацију у Simufact-у је повољниј за корисника зато што се ради о инжењерским производним параметрима

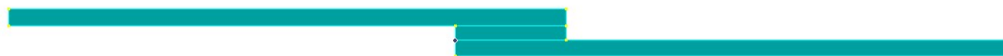
6.4 Моделирање и симулација залепљених спојева

Моделирање залепљеног споја и приказ кидана епрувете чија је технологија приказана у претходним поглављима, извршено је у већ описаном програмском пакету FEMAP. Оваква симулација се може приказати 2D као и 3D моделом. У овом поглављу биће представљени и упоређени резултати оба модела.

На почетку симулације моделирамо три површине две плоче од алуминијума и слој лепка који се користи као везиво између те две површине. У табели 6.4.1. су дате координате модела залепљеног споја, моделирање је извршено опцијом цртања површина. Коначан изглед исцртане геометрије је приказан на слици 6.4.1.

Табела 6.4.1. Координате геометрије модела

Прва алуминијумска плоча		
Координата број	По Х оси	По Y оси
1.	0	0
2.	0	-3
3.	100	-3
4.	100	0
Лепак		
Координата број	По Х оси	По Y оси
1.	0	0
2.	20	0
3.	20	2.5
4.	0	2.5
Друга алуминијумска плоча		
Координата број	По Х оси	По Y оси
1.	-80	2.5
2.	20	2.5
3.	20	5.5
4.	-80	5.5



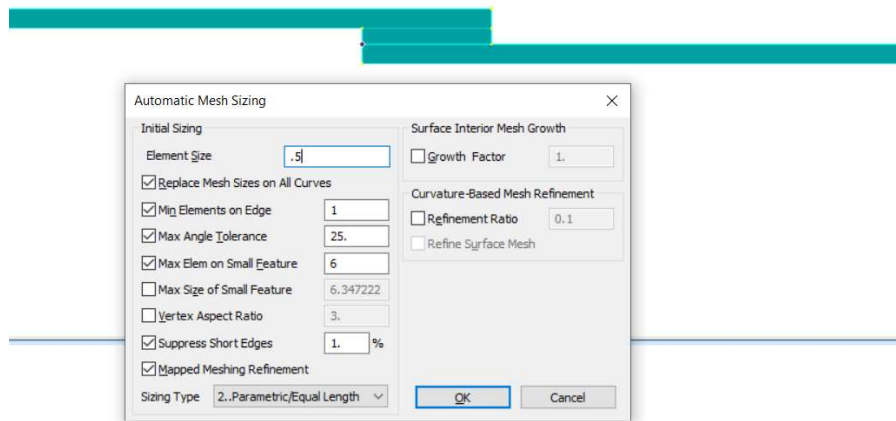
Слика 6.4.1. Модел површина залепљеног споја

Након моделирања геометрије залепљеног споја дефинишемо материјалне карактеристике лепка и алуминијума који је коришћен у експерименту. Модул еластичности и Поасонов коефицијент за материјал који је коришћен у експерименту дат је у табели 6.4.2.

Табела 6.4.2. Материјалне карактеристике

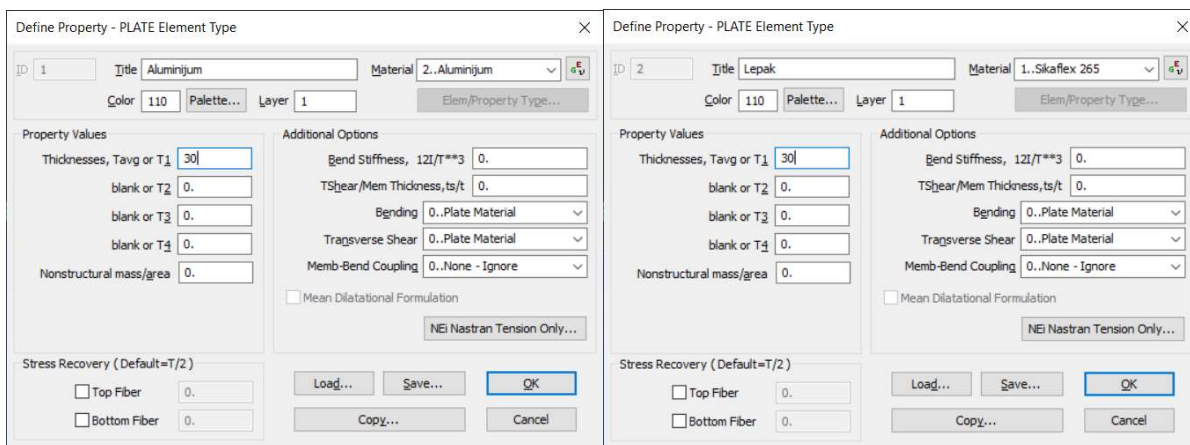
Материјал	Модул еластичности [Мра]	Поасонов коефицијент
Алуминијум	7.1e5	0.33
Сикафлекс 265	2.7	0.48

Након задавања материјалних карактеристика лепак и алуминијума, врши се креирање мреже коначних елемената. Приликом креирања мреже елемената у симулацији величина поделе износи 0,5 mm по елементу за све три измоделиране површине, као што је приказано на слици 6.4.2.



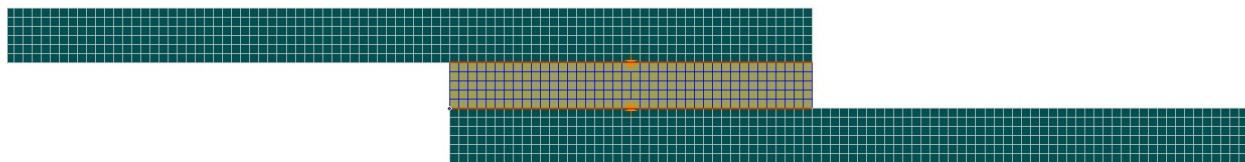
Слика 6.4.2. Подела модела на елементе

За креирање модела коначних елемената потребно је дефинисати својства материјала које користимо. На слици број 6.4.3. приказано је креирање особина коначних елемената. Задата ширина модела плоче је 30 mm.



Слика 6.4.3. Дефинисање својства материјала

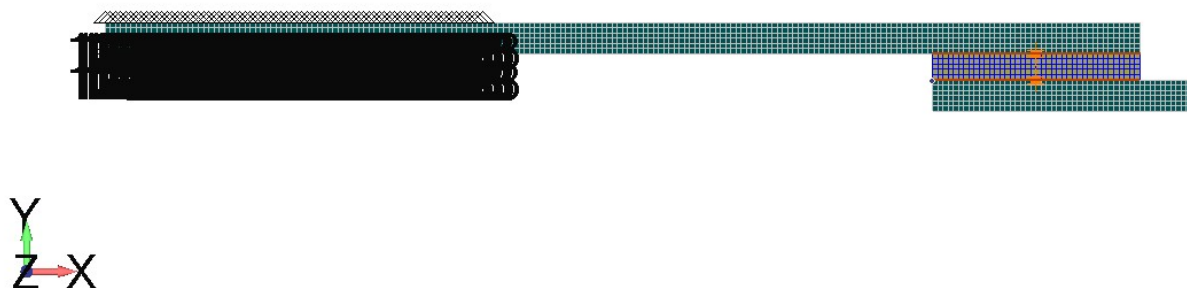
На слици 6.4.4. приказан је изглед модела подељен на мрежу коначних елемената. Елементи одговарајућих материјалних карактеристика представљени су различитим бојама. Алуминијум је приказан зеленом бојом, а лепак сивом.



Слика 6.4.4. Мрежа 2Д коначних елемената

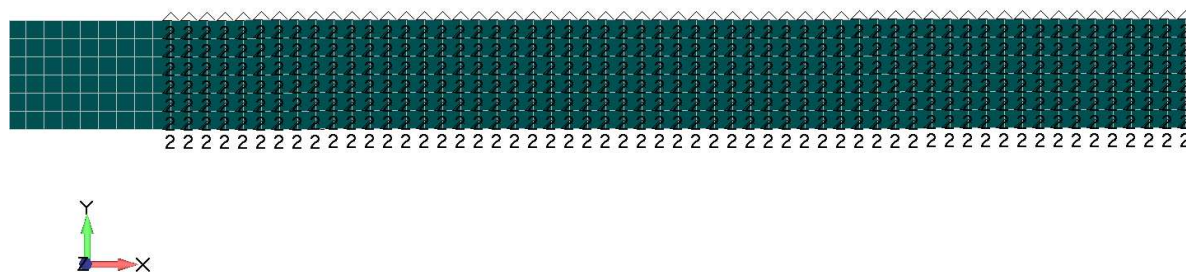
Пошто је сама спрувета на кидалици са једне стране фиксирана, тако је и симулирано, што је приказано на слици 6.4.5. Гранични услови у нумеричком моделу су ограничени по

ободу алуминијумске плоче која улази у чељусти кидалице, и задата су ограничења транслације по све три осе Декартовог координатног система.



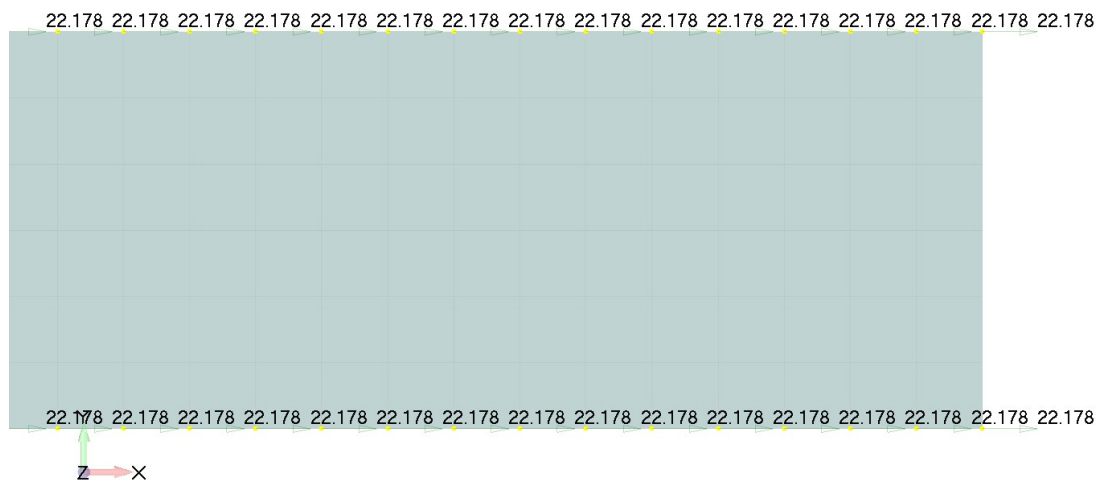
Слика 6.4.5. Гранични услови

С обзиром да је друга страна изложена вучном аксијалном силом која затеже епрувету потребно је ограничити и другу страну алуминијумске плоче, тако да нема кретања по Y правцу, као што је и приказано на слици 6.4.6.



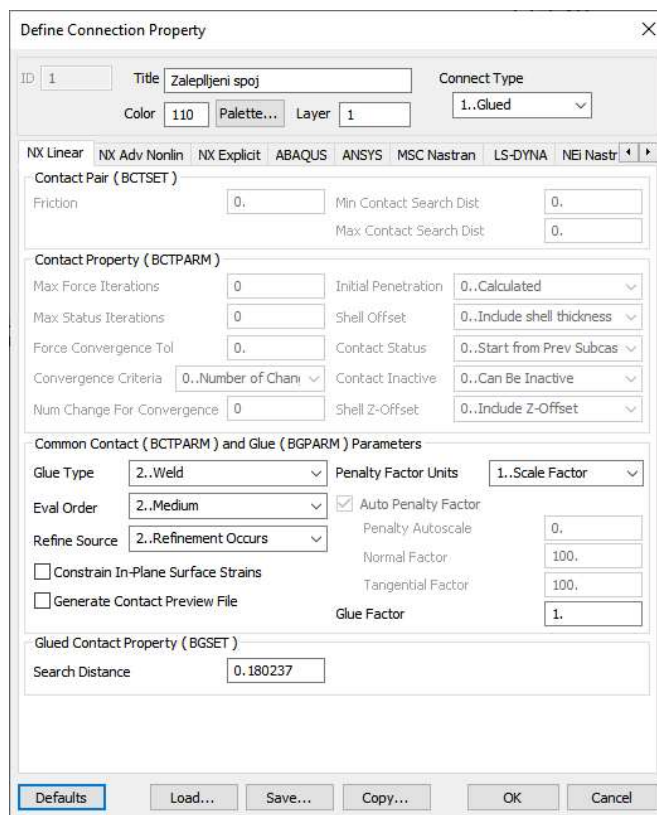
Слика 6.4.6. Гранични услови са стране деловања силе

У овој симулацији извршено је оптерећивање епрувете вучном силом од 2927.45N. То је максимална сила коју је узорак издржао при испитивању на кидалици (слика 5.2.5.). Сила је задата на чворове по ободу епрувете тј. месту причвршћивања чељусти. Како је селековано 132 чворова сила која делује се дели са укупним бројем чворова, тако да је задата сила по чвору 22.178N, као што је приказано на слици 6.4.7



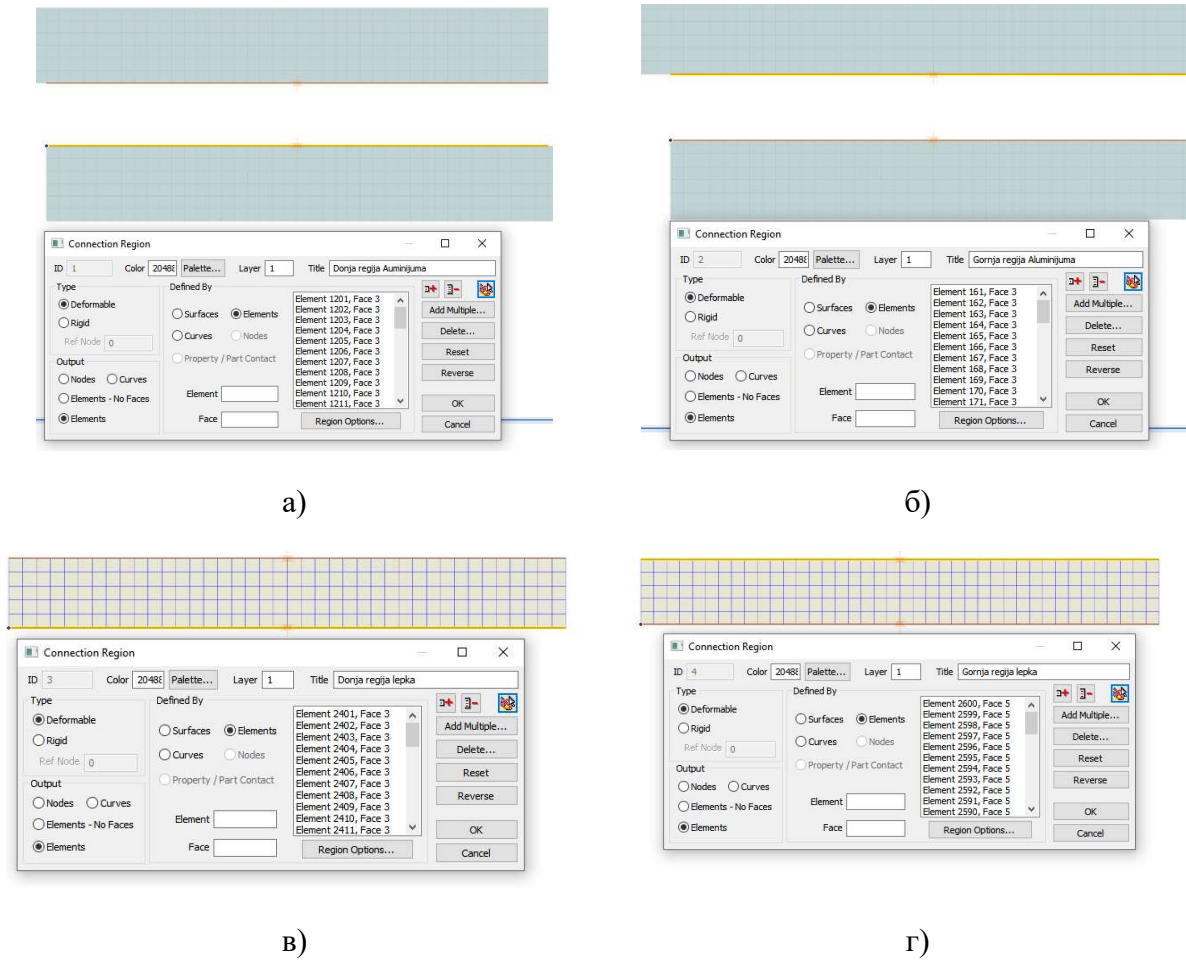
Слика 6.4.7. Задавање силе на другом крају епрувете.

У програмском пакету FEMAP постоји опција за одабир врсте споја између делова који се спајају. Као што је приказано на слици 6.4.8. у опцији „Define Connection Property“ дефинисани су параметри залепљеног споја.



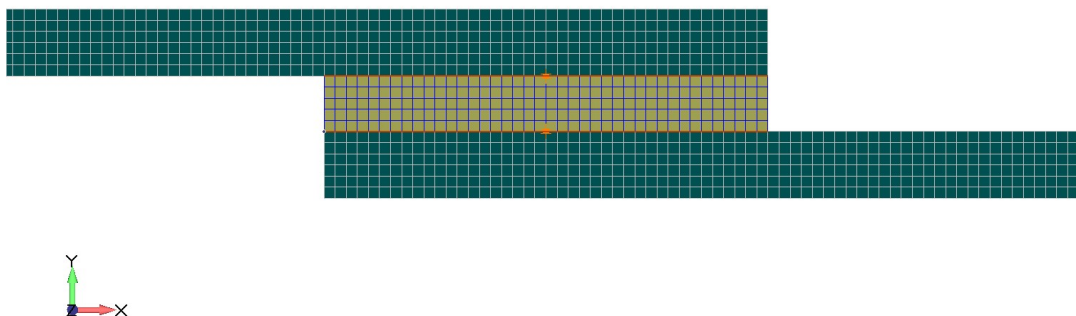
Слика 6.4.8. Дефинисање својства конекције

Након дефинисања својства контакта потребно је дефинисати и регије које ће бити спојене претходно направљеном везом. На слици 6.4.9. приказан је одабир страна површина које ће представљати региона везивног споја.



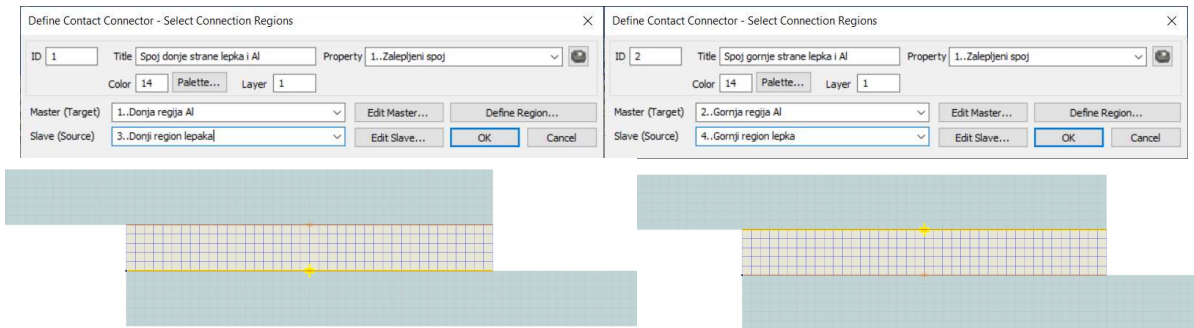
Слика 6.4.9. а) Доња регија алуминијумске плоче, б) Горња регија алуминијумске плоче, в) Горња регија лепка, г) Доња регија лепка

Коначан изглед региона, које ће у наредном кораку бити спојене, приказан је на слици 6.4.10. та регија претставља идеалан спој адхезива и супстрата.



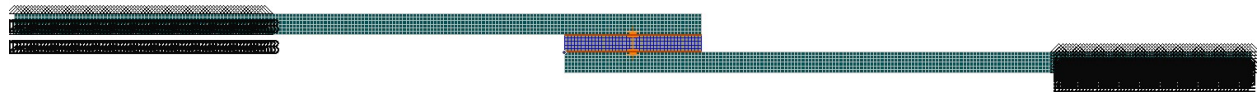
Слика 6.4.10. Коначан изглед залепљених регија

Следећи корак је додељивање својства контакта са регијама које су међусобно повезане, као што је приказано на слици 6.4.11.



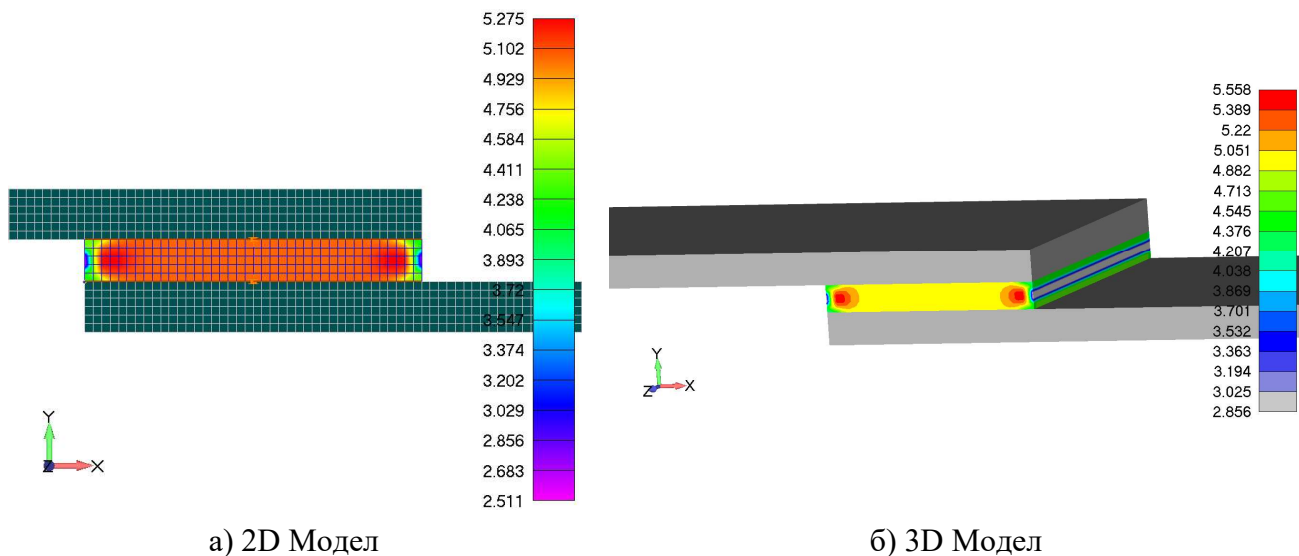
Слика 6.4.11. Повезивање регија са залепљним спојем

На слици 6.4.13. је приказан коначан модел епрувете. Епрувета је потпуно дефинисана и спремна за анализу



Слика 6.4.12. Коначан изглед модела пре симулације

Након завршетка анализе потребно је приказати резултате. Поред 2D модела одрађен је и 3D модел. На слици 6.4.13. приказано је деловање смичућих напона у адхезиву залепљеног споја.



Слика 6.4.13. Расподела смичућих напона кроз адхезив [МПа]

Ако за адхезивни слој који има поделу пет елемената по Y оси направимо пет различитих група и у њих унесемо све елементе који су у низу одређеног индекса елемента по Y . Резултате представимо на графику 6.4.1., који приказује однос смичућег напона по елементу у одговарајућој позицији по X оси.

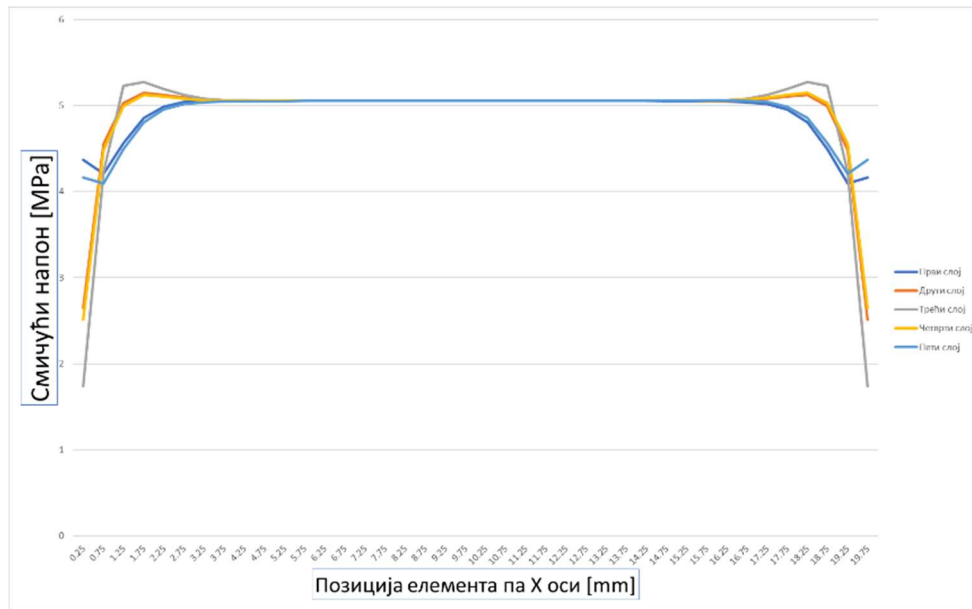


График 6.4.1. Расподела смичућег напона у лепку - 2D Модел

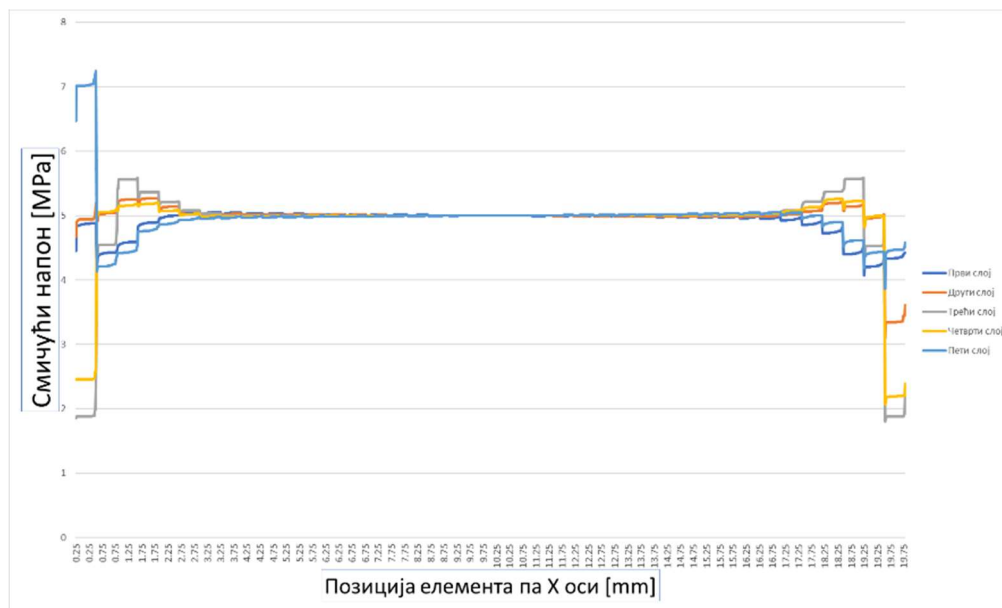
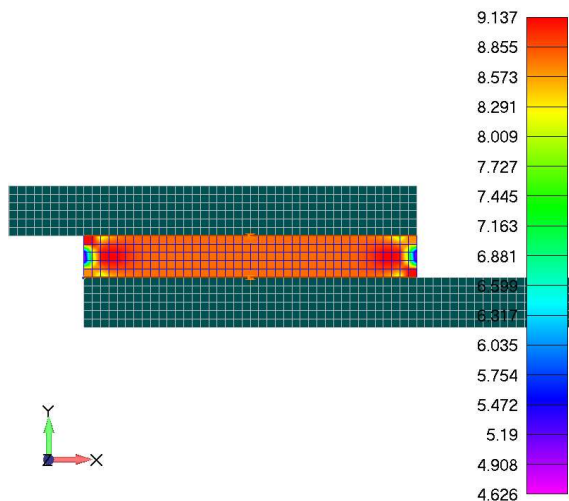
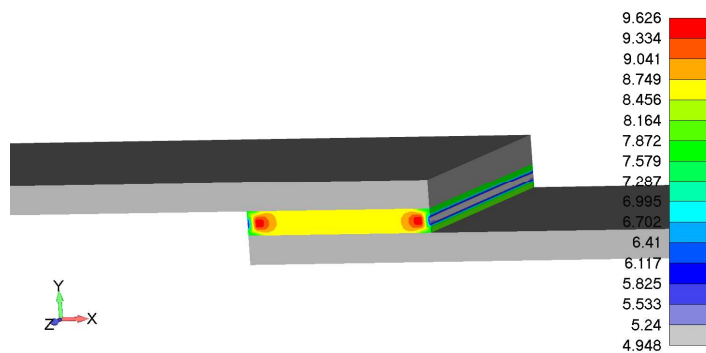


График 6.4.2. Расподела смичућег напона у лепку - 3D Модел

На слици 6.4.15. приказано је деловање „von Mises“ напона у самом адхезиву залепљеног споја.



а) 2D Модел



б) 3D Модел

Слика 6.4.14. Расподела напона у лепку [MPa]

На графику 6.4.2. одрађен је исти поступак као на графику 6.4.1. поделе елемената у групе. График 6.4.2. приказује зависност напона према елементу по X оси.

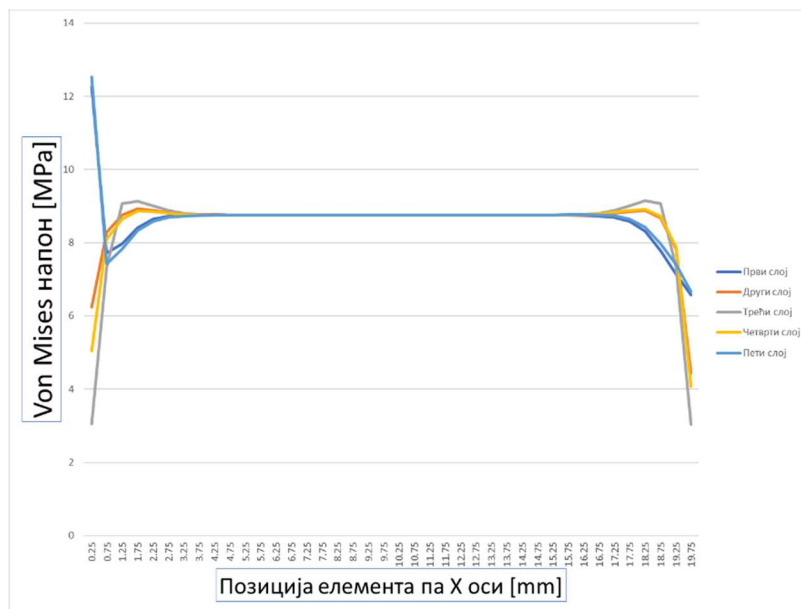


График 6.4.3. Вон Мисес напони кроз слојеве лепка - 2D Модел

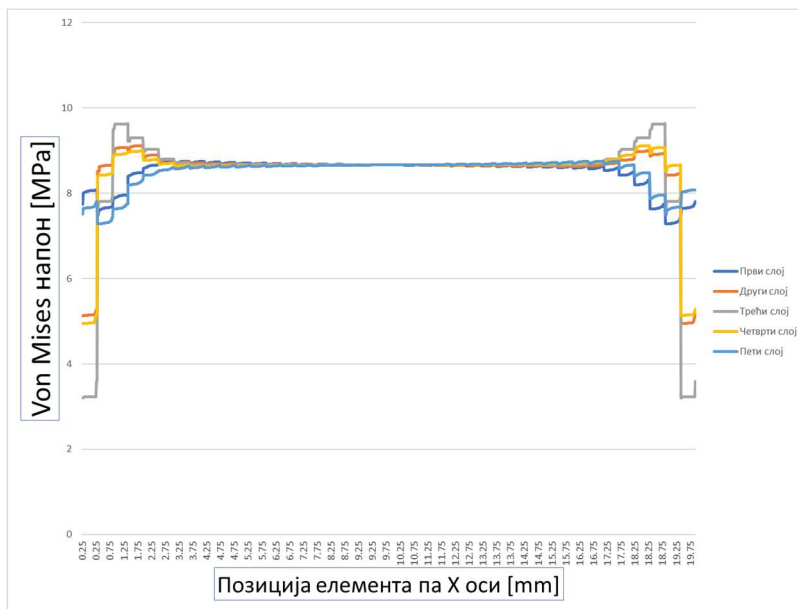
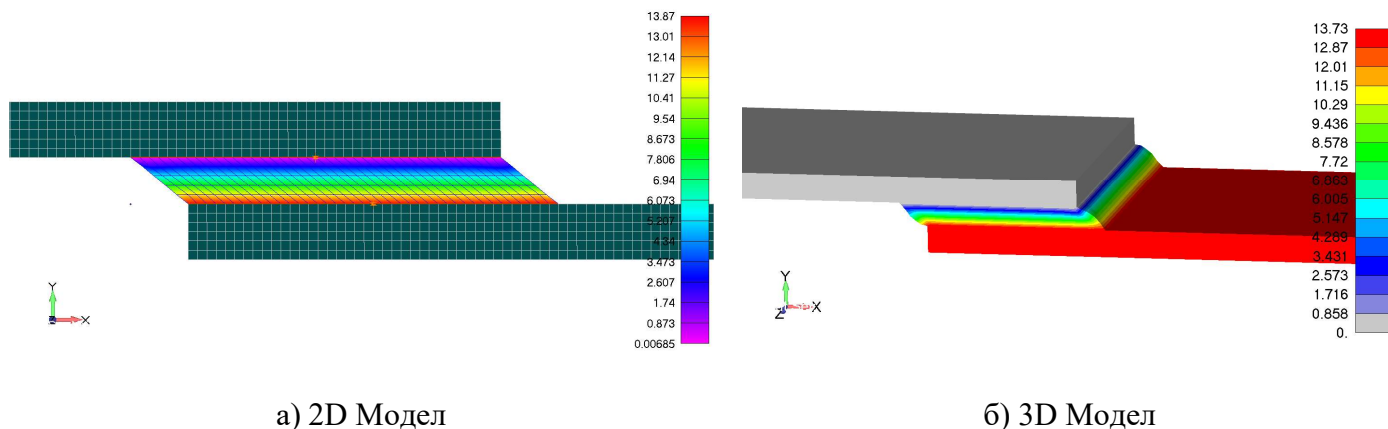


График 6.4.4. Вон Мисес напони кроз слојеве лепка - 3D Модел

Максимална транслација адхезива по X оси у залепљеном споју приказана је на слици 6.4.15.



а) 2D Модел

б) 3D Модел

Слика 6.4.15. Тотална транслација лепка [mm]

У овом поглављу анализирани су резултати свих извршених МКЕ нумеричких симулација. Такође, анализирано је и упоређивање резултата добијених аналитичком методом решавања проблема.

Код моделирања залепљеног споја према аналитичком решењу добијена вредност за смичући напон, с обзиром да је позната ширина и дужина залепљеног споја, износила је:

$$\tau = \frac{F}{lu \cdot b} = \frac{2927,45 \text{ [N]}}{20 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}} = 4,953 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad (6.4.1)$$

Након одрађене симулације, у FEMAP-у, истог случаја резултати су да је просечна вредност напона смицања код 2D модела једнака $\tau = 5,05 \text{ [MPa]}$ а код 3D модела резултат смицања је износио $\tau = 5,00 \text{ [MPa]}$.

7. Закључна разматрања

У овом раду је описан поступак заваривања, све популарнијег материјала, алуминијума. Заваривање је данас један од најзаступљенијих процеса спајања материјала па му се и придаје посебан део пажње. Посебан значај дат је детаљно описаној технологији заваривања алуминијума која се данас користи у индустрији. Такође, описане су и основне карактеристике алуминијума и његових легура с обзиром да је експлоатација алуминијума све више заступљена.

Поред технологије заваривања обрађена је и технологија лепљења која поред заваривања заузима велику улогу у спајању делова. Технологија лепљења је занимљива из разлога што пружа могућност спајања разнородних материјала и пружа одличне перформансе у самом споју. За обе технологије одрађен је експеримент спајања материјала. Након одрађених експеримената приказане су механичке особине тих спојева.

Такође је приказан нумеричка симулација залепљених и заварених спојева где су показани софтвери за решавање сложених напонских прорачуна. Модерни софтвери могу скоро у потпуности да симулирају одређене процесе тако да се данас у све већем броју користе пре почетка производње. Овакви софтвери нам омогућавају да предвидимо могуће грешке, утврдимо оптималне параметре уз временску и новчану уштеду смањивањем броја физичких испитивања и тестова.

Код геометрије залепљеног споја показана је вредност аналитичког прорачуна. Овакви резултати су приближни резултатима добијени нумеричком методом коначних елемената што потврђује валидност процеса симулирања. С обзиром да је аналитички метод доста бржи, у односу на нумерички метод, може се рећи да је при једноставним геометријским моделима аналитички приступ има предност због уштеде времена. Код геометрија сложених облика и сложених напонских стања коришћење аналитичке методе не би било могуће те су из тог разлога нумеричке методе неопходне.

8. Литература

- [1] **Милтеновић В.**, *Машински елементи – облици, прорачун, примена*, Универзитет у Нишу – Машински факултет, Ниш, 2006 год.
- [2] **Мајсторовић А., Јовановић М.**, *Основи заваривања, лемљења и лепљења*, Научна књига, Београд, 1995. год
- [3] **Википедија**, Интернет страница:
<https://sr.wikipedia.org/sr-ec/%D0%90%D0%BB%D1%83%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%98%D1%83%D0%BC>, приступљено 03.08.2019. год.
- [4] **Радивој Поповић, Душан Шотра**, Заваривање и спајање материјала, Висока техничка школа струковних студија 2015.год.
- [5] **Литература за европског специјалисту лепљења**, SVV Praha, s.r.o., Centrum Lepení Brno
- [6] **AMM Manufacturing**, MIND Park
- [7] **IMW Institut**, MIND Park
- [8] **FEMAP**, интернет станица:
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/femap.html>, приступљено 03.08.2019. год.
- [9] **Литература за инжењера заваривања**, Институт „ГОША“
- [10] **Praktikum REL i MAG/MIG zavarivanja**, Prof.dr Milorad Jovanović
- [11] **Зијаж Бурзић**, Савремене методе провере маханичко-технолошких особина заварених спојева, Војнотехнички институт ВЈ, 11000 Београд
- [12] **Утицај структуре адхезива и третмана материјала на јачину адх споја**, Наташа Томић
- [13] **Simufact.Welding**, интернет станица: <https://www.simufact.com/simufactwelding-welding-simulation.html>, приступљено 03.08.2019. год.
- [14] **Метод коначних елемената**, интернет станица:
https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method, приступљено 03.08.2019. год.
- [15] **V. Dunić , N. Busarac , D. Rakić , V. Slavković , R. Slavković , M. Živković**, Thermo-mechanical coupling procedure using partitioned approach - Application to arc welding simulation
- [16] **Kojić, M., Slavković, R., Živković, M., Grujović, N.**, (2011). PAK-S: Program for FE Structural Analysis, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Kragujevac
- [17] **Miroslav ŽIVKOVIĆ, Marina VUKOVIĆ, Vukić LAZIĆ, Vladimir MILOVANOVIĆ, Vladimir DUNIĆ, Dražan KOZAK, Dragan RAKIĆ**, Experimental and FE Modeling Investigation of Spot Welded Thin Steel Sheets