

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Емина С. Џиндо

**РАЗВОЈ ПРСЛИНЕ ЗАВАРЕНИХ
ХЕТЕРОГЕНИХ СПОЈЕВА**

докторска дисертација

Београд, 2018.

UNIVERSITY OF BELGRADE FACULTY OF
MECHANICAL ENGINEERING

Emina S. Dzindo

**MODEL ANALYSIS OF COMPLEX SPATIAL
STRUCTURES' STRENGTH**

Doctoral Dissertation

Београд, 2018

Ментор докторске дисертације

др Зоран Радаковић, редовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије за одбрану докторске дисертације

др Зоран Радаковић, редовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

др Александар Седмак, редовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

др Гордана Бакић, ванредовни професор

Универзитет у Београду, Машински факултет

др Катарина Чолић, научни сарадник

Иновациони центар Машинског факултета у Београду

др Љубица Миловић, ванредовни професор

Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Датум одбране

Београд, 2018

ПРЕДГОВОР

За реализацију овог рада захваљујем:

- проф. др Александру Седмаку на корисним саветима у току израде тезе
- проф. др Зорану Радаковићу на заједничком публикавању више радова који су били од значаја за израду тезе
- др Благоју Петровском при разматрању теме и помоћи у току израде исте
- свим члановима комисије проф. др Гордани Бакић, проф. др Љубици Миловић, др Катарини Чолић на корисним саветима и корекцијама при изради дисертације
- посебну захвалност дугујем колеги Симону Седмаку на изузетном колегијалном односу и несебичној помоћи на уложеном труду током израде симулације завареног хетерогеног споја
- породици, пријатељима, свим колегама и сарадницима на подршци свих ових година а посебно велико хвала пријатељу и колеги Влади Гашићу

Аутор

СПИСАК СЛИКА

Слика 1.1 Шематски приказ методологије истраживања

Слика 1.2 Полазна идеја

Слика 2.1а Изглед прелома брода „Liberty”

Слика 2.1б Изглед прелома брода „Liberty”

Слика 2.2 Основни облици померања елемената које обухвата врх прслине

Слика 2.3 Расподела нормалног напона у околини врха прслине

Слика 3.1 Прслина по целој дебљини у бесконачно широкој плочи изложеној довољно удаљеном затезном напону

Слика. 3.2 Типови прслина у завареном споју метала

Слика 3.3 Шематски приказ J отпорност криве за жилав материјал

Слика. 3.4 Утицај пластичности на поље напона у врху прслине - течење малих размера

Слика 3.5 Утицај пластичност на поље напона у врху прслине еласто-пластичност

Слика 4.1 Зоне завареног споја

Слика 4.2 Могући изглед профила попречног пресека завареног споја

Слика 4.3 Врх хладне прслине

Слика 4.4 Пример хладне прслине настале у зони утицаја топлоте

Слика 4.5 ЗУТ

Слика 4.6 Основни материјал

Слика 4.7 Појављивање топлих прслина обзиром на однос пенетрације и ширина прслине према садржају угљеника у шаву

Слика 4.8 Компактне епрувете за затезање

Слика 4.9 Област појаса посуде под притиском

Слика 4.10 Прслина у прирубници главе одвода која је изазвала заморни лом завареног споја пумпе

Слика 4.11 Проблеми са квалитетом заварених спојева услед неодговарајућих прелаза, непоклапања и пракси у заваривању цеви великог пречника

Слика 5.1 Schaefflerov дијаграм

Слика 5.2 Структуре у жареном челику при загревању и хлађењу током заваривања

Слика 5.3 Структуре у хладноваљаном челику при загревању и хлађењу током заваривања

Слика 5.4 Шематски приказ KHZ дијаграма за учљенични челик

Слика 6.1 SUMITEN 80

Слика 6.2 Заварени спој SUMITEN-а жицом INOX R 19/9 Nb

Слика 6.3 Мерење издужења преко три екстензометра

Слика 6.4 Епрувета SM 80-1 знатно веће жилавости док је код SM 80-2 лом скоро скроз крт

Слика 6.5 Епрувета типа затезне плоче за испитивање понашања завареног споја и његових конституената при затезању

Слика 6.6 Дијаграм зависности силе и издужења у односу на померањенападне линије силе

Слика 6.7 Зависност J интеграла од пораста дужине прслине материјала SM80 BM SP 80-1

Слика 6.8 Зависност CTOD од пораста дужине прслине материјала SM80 BM SP 80-1

Слика 6.9 Епрувета за савијање у три тачке

Слика 6.10 Затезна плоча са прслинама

Слика 6.11 Зависност $CTOD$ од пораста дужине прслине

Слика 6.12 Зависност силе и издужења у односу на $CMOD$ и LLD

Слика 6.13 Зависност $CMOD$ од померања нападне линије силе

Слика 6.14 Дијаграм зависности силе и издужења у односу на померање нападне линије силе

Слика 6.15 Зависност J интеграла од пораста дужине прслине

Слика 6.16 Гранични услови, оптерећења и мреже: горе – OM модел, средина – симетрични заварени спој, доле – асиметрични заварени спој

Слика 6.17 Напонско стање у моделу OM

Слика 6.18 Пластичне деформације у моделу OM

Слика 6.19 Померања у моделу OM

Слика 6.20 Напонско стање у моделу са симетричним спојем

Слика 6.21 Пластичне деформације у моделу са симетричним спојем

Слика 6.22 Померања у моделу са симетричним спојем

Слика 6.23 Напонско стање у моделу са асиметричним спојем

Слика 6.24 Пластичне деформације у моделу са асиметричним спојем

Слика 6.25 Померања у моделу са асиметричним споје

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1 Фактори интензитета напона за неке једноставне геометрије

Табела 4.1 Примери врста прлина

*Табела 6.1 Затежне карактеристике челика SUMITEN 80P и његових спојева
заварених под прашком*

Табела 6.2 Резултати испитивања ВМ SM80

Табела 6.3 Подаци за TPB J-TEST, SP U-1, андермечинг, WM

Табела 6.4 Подаци за симулацију завареног споја

ОЗНАКЕ

K_{Ic} ,	критични фактор интензитета напона
Y	бездимензиони фактор геометрије,
a	дужина прслине
σ_c	критично напрезање,
E	модул еластичности,
γ	енергија површинског напона-потребна да се створе две нове површине прелома
K_I, K_{II}, K_{III}	фактор интензитета напона за облике I, II и III
G	сила развоја прслине
J	J интеграл
σ_{ij}	тензор напона
k	константа,
f_{ij}	бездимензиона функција од θ
θ	поларна координата
$CTOD$ (<i>Crack Tip Opening Displacement</i>)	отварање врха прслине
r_y	Ирвинова корекција услед пластичности
m	бездимензиона константа
Π	потенцијална енергија
U	деформациона енергија
W_s	рад спољних сила
R_e	напон течења
R_m	затезна чврстоћа
ЛЕМЛ	линеарно-еластична механика лома
GTAW (<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>)	заваривање TIG поступком
EBW (<i>Electron Beam Welding</i>)	заваривање електронским зраком
J_{Ic}	жилавост лома
σ_{SR}	средњи напон
$\sigma_A = F_A / A$	амплитуда динамичке чврстоће епрувете

N_D	гранични број циклуса
N	број циклуса који испитивана епрувета издржи до појаве прелине
σ_N	динамичка издржљивост
σ_D	динамичка чврстоћа
КХЗ	континуално хлађење при заваривању

Садржај

1. УВОД.....	1
1.1 Основи механике лома, преглед литературе.....	2
1.2 Заварени спојеви, преглед литературе.....	3
1.3. Жилавост лома, преглед радова.....	4
1.4. Посуде под притиском, преглед литературе.....	6
2. ОСНОВИ МЕХНИКЕ ЛОМА.....	10
2.1. Теоријске основе основних параметара механике лома.....	10
2.1.1 Хаварије заварених конструкција.....	11
2.2. Примена параметара механике лома на употребну спремност заварених спојева.....	14
2.3 Основни облици образовања површина прелома.....	17
3. ПРСЛИНЕ У ЗАВАРЕНИМ СПОЈЕВИМА.....	21
3.1. Дефиниција и настанак прслина.....	21
3.2.Подела прслина према позицији.....	24
3.2.1. Криве отпорности на раст прслине.....	25
3.2.2 Стационарне прслине.....	26
3.3. Контролисани раст прслине.....	27
3.3.1. Ограничење врха прслине у случају течења великих размера.....	27
3.3.3 Примена и пројектовање.....	30
4. ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ПОСУДЕ ПОД ПРИТИСКОМ.....	32
4.1. Заварене конструкције посуде под притиском и оцена њихове сигурности у раду.....	32
4.1.1 Хетерогеност механичких особина и микроструктуре завареног споја.....	34
4.1.2 Заварене конструкције и оцена њихове сигурности у раду.....	35
4.1.3. Оцена сигурности заварених спојева.....	36
4.2. Теоријска анализа утицаја андермечинга и мисмечинга.....	37
4.3 Настајање различитих микроструктура код заваривања.....	40
4.4. Грешке у изради заварених спојева.....	43
4.4.1. Хладне прслине (закаснеде хладне прслине).....	45
4.4.2 Избегавање настајања прслина.....	46
4.5. Савијање у три тачке.....	50
4.6. Испитивање реалних посуда под притиском.....	51
4.6.1 Примери врста прслина у посудама под притиском.....	51
4.6.2. Одређивање динамичке чврстоће.....	53

5. ОСОБИНЕ И ПОНАШАЊЕ МИКОЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА	56
5.1. Микролегирани конструкциони челици	56
5.2. Структурне промене аустенитно феритном завареном споју	59
6. ЕКСПЕРИМЕНТ	65
6.1. Заварени спојеви конструкцијских челика	65
6.1.1. Раст прслине и лом заварене конструкције	65
6.2. Утицај прслине на чврстоћу завареног споја	73
6.3 СИМУЛАЦИЈА ЗАВАРЕНОГ СПОЈА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА	92
7. ЗАКЉУЧАК	101
Литература	104
БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ АУТОРА	110
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада	112
Изјава о коришћењу	113

Резиме

Експериментално анализирање раста прслине у појединим конституентима заварених спојева комплексно легиранних челика високе чврстоће на епруветама и у реалним конструкцијама, као и утицај раста прслине на сигурност завареног споја управо је циљ овог рада. Да би се омогућило заваривање таквих конструкцијских челика, додатни материјал за заваривање се пројектује тако да метал шава након заваривања има нешто мању чврстоћу од основног метала (андермечинг ефект). У тако завареном споју до пластичног течења ће доћи прво у металу шава. Тек након ојачавања МШ до нивоа границе течења ОМ долази до пластичног деформисања ОМ. Циљ овог рада је да се покажу нумерички модели, допринос анализи проблема из референтне области који се састоји управо у могућности да се на брз и релативно једноставан начин развоја модела који ће на меродаван начин представити реално понашање епрувета, у погледу концентрације напона и поља деформацијатом релевантних оптерећења. Нумеричком анализом могуће је приказати и ширење прслине, односно промена њене дужине у односу на иницијалну вредност од 2.3 mm. Ови резултати се такође могу искористити и као основа за будућа истраживања, која би могла да се баве испитивањем понашања оваквих епрувета на заморно оптерећење, с обзиром да су посуде под притиском (област примене оваквих материјала) управо изложене оваквом оптерећењу и најчешће отказују услед истог.

Дакле, прво су примењене метода коначних елемената као нумеричка метода, као и две експерименталне методе метода мерних трака и метода за дигиталну корелацију слика. Детаљно је сакупљена, проучена и систематизована научна литература из области везана за све аспекте ове дисертације. Анализирана је разлика у понашању завареног споја као целине и његових конституената и затезањем су испитане епрувете са металом шава мање и веће чврстоће у односу на основни метал што је важно и за оцену отпорности према ширењу прслине, даје основне податке о понашању материјала при оптерећивању. Са циљем доказивања ове претпоставке, прво су .на основу експерименталних резултата, урађена је нумеричка симулација

понашања епрувете при савијању у три тачке применом софтверског пакета ABAQUS.

Методом коначних елемената је доказана задовољавајућа заварљивост челика са металом шава ниже чврстоће (андермечинг) и отпорност према прслинама и кртом лому. Показана је могућности да се на брз и релативно једноставан начин развије модел који ће на меродаван начин представити реално понашање епрувета, у погледу концентрације напона и деформисања током експеримента. Из ових модела се такође може јасно видети и напредовање прслине, односно промена њене дужине у односу на почетну вредност.

Дефинисана је процедура за експерименталну анализу а на основу добијених резултата потврђено је да напони и пластичне деформације достижу највеће вредности на месту деловања оптерећења, као и у врху прслине, што је и било очекивано. Експерименталним испитивањима показано је да максималне вредности пластичних деформација појављују на месту деловања оптерећења у симетричном моделу, врху прслине у ОМ моделу и тачно изнад зареза у асиметричном моделу. Пластичне деформације у врху прслине у прва два модела су имале вредности око 0.225, док је у случају асиметричног модела пластична деформација врха прслине била значајно мања. су приказани нумерички модели, допринос анализи проблема из референтне области, који се састоји управо у могућности да се на брз и релативно једноставан начин развије модел који ће на меродаван начин представити реално понашање епрувета, у погледу концентрације напона и поља деформацијатокм релевантних оптерећења. Нумеричком анализом могуће је приказати и ширење прслине, односно промена њене дужине у односу на иницијалну вредност од 2.3 mm. Ови резултати се такође могу искористити и као основа за будућа истраживања, која би могла да се баве испитивањем понашања оваквих епрувета на заморно оптерећење, с обзиром да су посуде под притиском (област примене оваквих материјала) управо изложене оваквом оптерећењу и најчешће отказују услед истог разлога.

Кључне речи: заварени хетерогени спој, андермечинг, метода коначних елемената, чврстоћа, нумеричка симулација, пластичне деформације, метода мерних трака,

Научна област: Област техничких наука, машинство

Ужа научна област: Технологија материјала, механика лома

УДК 621.791.05-025.25:669.15-194]:539.42(043.3)

621.791.05-025.25:669.15-194.56'7(043.3)

621.791.05-025.25:669.15-194]:519.688(043.3)

CRACK DEVELOPMENT IN HETEROGENEOUS WELDED JOINTS

Abstract

The main goal in this research is the experimental crack growth analysis for certain welded joint constituents of complex high strength alloyed steels, concerning both the specimens and real structures, as well as the influence of crack growth on the safety of the welded joint. In order to perform the welding of such structural steels, the welding filler material is designed to obtain a somewhat lower value of the weld metal strength than the strength of the parent metal (PM) (undermatching effect). The onset of plastic flow in this type of welded joint occurs initially in the weld metal (WM). Thus, plastic deformation in the PM does not occur until the deformation hardening of the WM reaches the plasticity limit of the PM.

First, the finite element method is applied as a numerical tool, followed by two experimental methods: the strain gauge method, and the digital image correlation method. Literature connected to all the disciplines concerning this research has been collected, studied and systematized in detail. The difference in the welded joint behaviour as a whole and its constituents has been analysed through tension testing of specimens produced with both overmatched and undermatched weld metal, which is important for assessing the crack growth resistance, since it brings major results on the material behaviour of the loaded structure. In the effort to prove this assumption, at first - based on experimental results the numerical simulation is performed by applying ABAQUS software on three-point bending specimen behaviour.

The application of the finite element method has proved an acceptable weldability of the undermatched steel weld and the resistance to crack growth and brittle fracture. The possibilities for a fast and relatively simple model development are shown, representing competent realistic specimen behaviour, both concerning stress concentrations and deformation fields in external loading experimental conditions. These models clearly depict the crack propagation.

The procedure for experimental analysis is defined, and based on the results obtained, the stresses and plastic deformations have been confirmed to reach the highest levels at locations of acting loads and crack tips, as has been expected. Experimental tests have shown that the maximal values of plastic deformation appear at locations of applied loading in the symmetrical model, crack tip in the PM model, and instantly

above the groove in the asymmetrical model. Plastic deformation values of around 0.225 appeared in the crack tip of the first two models, while the plastic deformation in the crack tip was significantly smaller in case of the asymmetrical model.

The goal in this work is to perform numerical modelling and present contributions to problem analysis in the referent field, composed of possibilities for fast and relatively simple model development, presenting a competent realistic specimen behaviour – concerning the stress concentrations and deformation fields upon conditions of external loading. Numerical analysis may describe the crack propagation, or its extension from the initial 2.3 mm value. These results may also be used as the basis for further research, dealing with the specimen behavior in fatigue loading, since i.e. pressure vessels (manufactured with these materials and this technology) are similarly loaded and exhibit failures as a result.

Keywords: heterogenous welded joint, undermatching, finite element method, strength, numerical simulation, plastic deformation, strain gauge method

Scientific field: technical science field

Narrow scientific field: materials and technology, fracture mechanics

UDC number 621.791.05-025.25:669.15-194]:539.42(043.3)

621.791.05-025.25:669.15-194.56'7(043.3)

621.791.05-025.25:669.15-194]:519.688(043.3)

1. УВОД

Смисао механике лома најбоље илустрије изрека познатог немачког научника А. Kochendorfera:

"Филозофија механике лома значи живети са грешком у конструкцијама, али њима тако овладати да не могу довести до катастрофа"

Механика лома представља дисциплину у којој је неизбежно повезивање теоријских разматрања са експерименталним резултатима, са једне стране, са појавом ломова и хаварија у експлоатацији конструкција, са друге стране. [1] Дефинисање нових испитивања за одређивање величине параметара како би се оценила склоност ка развоју прслина и критични услови брзог развоја лома такође је омогућила механика лома.[2] Она се односи и на истраживање услова развоја прслина али обухвата у ширем смислу и део отпорности материјала који се односи на завршну фазу процеса деформисања под дејством оптерећења. Параметри механике лома, као што су критична величина фактора интензитета напона, померење отвора прслине и Рајсов контурни интеграл [3] настали су из теоријских анализа и математичких модела различитих облика тела са прслином. Представљају оптерећење и геометрију конструкције, укључујући геометрију прслине (са једне стране) а својство материјала, тј. његову отпорност на раст прслине, (са друге стране).

Да би се потпуно упознало понашање материјала, потребно је упоредити његове особине у тренутку уградње и после одређеног времена експлоатације. Одређивање основних параметара механике лома се заснива на дефинисању концентрације напона у околини врха прслине. Једно од опште прихваћених правила за коришћење аналитичких метода при одређивању основних параметара механике лома је теза о аутономности прслине или концепт сличног понашања.[4] Теза о аутономности је заснована на претпоставци да поље напона у околини врха прслине зависи од вредности средњих напона, еластичних својстава материјала и облика прслине. Ова теза је прихватљива уколико је К-зона мала у односу на димензије прслине [5], где се под К-зоном подразумева област у околини врха

прслине у којој може да се примењује теорија асимптотског напонског поља, другим речима, К-зона је сингуларно доминантна област.

1.1 Основи механике лома, преглед литературе

Механика лома је дефинисала параметре и увела нове методе испитивања, а све у циљу да се што боље одреди склоност ка развоју прслина, критичних услова брзог развоја лома, отпорности материјала ка брзој пропагацији прслине, или другим речима, да се оцени понашање материјала и сигурност конструкције у присуству прслина или других сродних грешака. У раду [6] описани су стандардни поступци одређивања параметара механике лома заварених спојева испитивањем епрувета са прслином: жилавости кома KIc , отварања прслине $CTOD$ и J интеграла, независног од путање. Анализирана је жилавост лома одређена испитивањем J интеграла завареног споја челика \check{C} 4730 и утицај хетерогености структуре и механичких особина. У раду [7] је дат општи приступ одређивању преостале чврстоће и века конструкције применом параметара механике лома. Посебно су анализирани механизми настанка и раста оштећења, као што су замор, пузање и корозија. Као примери за илустрацију описаних процедура, анализирани су колектори паре у термоелектрани и дискови млазних мотора. Такође су анализиране посуде под притиском и заварени спојеви, као типични примери конструкција чији интегритет треба проценити.

У раду [8] испитана је епрувета ради анализе понашања прслина у завареним спојевима посуда под притиском израђеним од микролегираног челика, применом параметара механике лома. Челик NIOMOL 490K је намењен за израду заварених конструкција изложених динамичком оптерећењу и ниској температури, због чега, осим довољне чврстоће, мора имати и прихватљиву жилавост. Овај рад треба да допринесе развоју основних параметара и критеријума прихватљивости грешака типа прслина код посуда под притиском намењених за рад у условима ниских температура и агресивних средина.

У раду [9] приказан је део резултата комплексне експерименталне анализе (мерење тврдоће, испитивање затезањем глатких и зарезаних епрувета, ударна жилавост, микроструктура и фрактографија) два ниско легирана, заварљива челика високе чврстоће, затезне чврстоће σ_m око 900 МПа, произведена

различитим поступцима. Такође су приказани резултати испитивања инструментираним клатном у подручју температура између +20 до -100°C, у којима је разматрана енергија за иницијацију и раст прслине. Анализа је открила значајну разлику у енергији удара потребној за лом у зависности од микроструктуре и температуре испитивања, што је праћено различитим односима енергије иницијације и раста прслине и разликама у изгледу површине прелома.

1.2 Заварени спојеви, преглед литературе

У случају заварених спојева, наведени параметри механике лома морају узети у обзир хетерогеност материјала карактеристичне за заварене спојеве, о чему ће више бити речи у наредним поглављима овог рада.

Проблем прслина у завареним конструкцијама датира дуги низ година и привлачи велику пажњу истраживача у свету јер доводи до учестаности њиховог отказа и хаварија заварених конструкција. Механика лома је на прелазу од чисто кртог лома ка квази-кртом (жилаво кртом) лому морала да проучава и деформацију која претходи лому. Са повећањем примене метала у конструкцијама повћава се и учестаност ломова. Забележени су бројни случајеви појаве лома који су увек привлачили пажњу пројектаната и произвођача материјала. Докторска дисертација [10] бави се проучавањем понашања завареног споја нисколегираног челика повишене чврстоће NIONIKRAL 70 услед дејства нискоцикличног замора. Помоћу ове две криве су израчунате цикличне карактеристике за оцену понашања материјала и параметри нискоцикличног замора за прорачун заморног века. Због стицања шире слике о настајању и развоју заморних прслина у завареном споју, као хетерогеној структури због своје геометријске несавршености услед заваривања, урађена су испитивања помоћу еласто-пластичне механике лома. Универзални параметар J интеграл и његова критична вредност J_{Ic} су примењени за прорачун отпорности ка стварању прслине. У раду [11] је приказана анализа изложена примени линеарно еластичне механике лома на предвиђање раста заморне прслине на примеру површинских прслина код челика BS 4360-50D и у металу шава његовог сучеоног завареног споја при савијању у 4 тачке. За прорачун распона фактора интензитета напона коришћена су решења у анализи Скота и Торпа. Развијени су рачунарски програми за ово предвиђање. Предвиђање профила прслине је показало да се коначни лом епрувете јавља када је прслине

дуж површина достигла ивичне стране епрувете. Облици профила зависе од дебљине, ширине и почетне конфигурације прслине.

У раду [12] је анализирана могућност примене микромеханичког приступа у симулацији раста прслине при жилавом лому. Заваренвањем спојева различите ширине и структуре остварена је преносивост калибрисаних параметара са глатке епрувете на епрувету са почетном прслином. Мисмечинг ефекат је анализиран разматрањем овермеч (ОМ) и андермеч (УМ) з аварених спојева. Утицај геометрије је узет варирањем ширине завареног споја. У раду [13] приказане су величине које утичу на заварљивост, с посебним освртом на заварљивост микролегираних челика и челика за побољшавање. Проведена су испитивања симулацијом топлинског заваривачког циклуса на симулатору типа Smitweld TCS 1405, и методама Имплант i Теккен у сврху утврђивања склоности микролегираних и побољшаних челика хладним прслинама

У раду [14] је установљен концепт спремности за употребу и примени на FA спојеве, као критична места у завареним конструкцијама и добијен је прецизан одговор на питање о интегритету FA заварених спојева. Основне хипотезе су базиране на концепту ЕПМЛ, који укључује претпоставку о стаблином расту прслине при изједначењу силе раста прслине и одговарајуће отпорности материјала, и нестабилном расту прслине када сила раста прслине постане већа од отпорности материјала.

У раду [15] предложен је поступак одређивања преостале носивости на бази параметара механике лома који омогућава процену погодности суда за даљу експлоатацију, уколико је у њему утврђена аксијална прслина одређених димензија. Како се изведени рад односи на заварене цилиндричне судове са аксијалном прслином, то изгледа оправдано даље развијање поступка ради примене на друге облике судова (сферне) и за друге облике и положаје грешака.

1.3. Жилавост лома, преглед радова

Чврстоћа и жилавост нису једнозначни појмови је и потребно их је дефинисати фундаменталним механичким осабинама материјала, које представљају дијаграм напон-деформација за макроскопски напонсаки елемент, за разне степене троосности напрезања, за разне температуре и брзине деформације, све до

лома. Када кажемо чврстоћа обично се подразумева затезна чврстоћа која, код дуктилних метала, представља пластичну нестабилноа. Код лома материјала целисходан је израз ломна чврстоћа, ако говоримо о кртом, жилавом и мешовитом лому. Такође је и граница еластичности карактеристика чврстоће. Појам жилавости обично је у вези са отпором материјала према нестабилном ширењу прслине. Међутим, овај отпор је компликоване природе због троосног напонског стања, па га је у основи боље узети за еласто-пластични рад, добијен интеграцијом дијаграма испитивања метала за једноосно напонско стање све до лома. У раду [16] су приказане методе за одређивање динамичке жилавости лома, KIc . Методе динамичког J интеграла, и еквивалента енергије су експериментално потврђене испитивањем челика \check{C} 5432 и \check{C} 4734. Овај рад представља допринос у овладавању методама које дефинишу понашање материјала у динамичким условима раста прслине. Примена ових метода заједно са осталим методама за одређивање параметара механике лома представља значајан допринос истраживању понашања конструкцијских материјала у присуству прслине У раду је приказано како примена једначина и испитивање механике лома у овом случају јасно показују да прслине у ЗУТ учвршћења не угрожавају сигурност сферног резервоара у експлоатацији. Даља експлоатација ипак није допуштена јер је условљено скидање учвршћења и локално отклањање прслина брушењем до 20 mm дебљине са благим прелазом чиме је смањен степен сигурности на 1,2 што је било прихватљиво.[17]

Отпорност материјала на нестабилни раст прслине се у оквиру линеарно еластичне механике лома, представља критичном вредношћу фактора интензитета напона у условима равнoг стања деформације KIc , односно својством материјала названим жилавост лома. Код хомогених материјала процедура одређивања жилавости лома у условима равнoг стања деформације је детаљно и прецизно установљена у стандарду ASTM E 399. [18]

У раду [29] анализиран је утицај геометрије (положај прслине, димензије и облик завареног споја, димензија узорка) и хетерогености материјала на понашање и оцену интегритета заварених плоча. Експерименталном анализом обухваћене су плоче са малом и великом површинском прслином, која се налазе на различитим местима у завареном споју. За решавање овог проблема примењене су анализе

тродимензионалним коначним елементима, а добијени резултати су упоређени са експериментом чиме је омогућен детаљнији увид у понашање заварене плоче као и могућност процене интегритета.

1.4. Посуде под притиском, преглед литературе

У раду [19] је дат приказ поступка испитивања целог резервоара за течни CO₂ и праћења стања заварених спојева нових прикључака током експлоатације. Резервоар је израђен од микролегираног челика повишене чврстоће NIOVAL 47, а прикључци од високолегираног аустенитног челика. Новоуграђени заварени спојеви су испитани методама без разарања у циљу утврђивања њихове експлоатацијске сигурности. Својства материјала феритно-аустенитног споја намећу ограничења у примени ових испитивања, па је неопходно коришћење допунских метода (реплика, мерења тврдоћа). Показано је да је само тако могуће добити довољно података за поуздану процену сигурности спојева у експлоатацији.. У раду [20] су показано да су изведена испитивања и анализе имала за циљ истраживање деловања заосталих напона од заваривања и других утицајних фактора на понашање посуде под притиском са површинском прслином и анализу погодности примене плочастих епрувета и појединих нумеричких приступа за предвиђање критичне силе развоја прслине за заварену посуду са површинском прслином. СМОД је погодан параметар механике лома за процену понашања прслине у завареном споју направљеног од метала израженог нивоа пластичности. Термичка обрада након заваривања повољно утиче на понашање завареног споја са прслином у еластичној области и при прелазу у пластично понашање захтеваној поузданости за дати режим оптерећења. У раду [21] анализирани су резултати испитивања посуда под притиском-сферних реуервоара изграђених од ситнозрних микролегираних челика. Посебна пажња је посвећена налазима који говоре да вишекратно испитивање хладним воденим притиском опреме у експлоатацији може бити узрочних појава прслина, посебно када је испитани притисак једнак притиску прописаном за нову опрему. У раду [22] анализиран је интегритет сферних резервоара за амонијак (запремине 1000 m³, пречника 12400 mm, дебљина зида 30 mm, зато што су откривене прслине на линији стапања, дужине до 300 mm, различите дубине. Директним мерењем J интеграла одређене су J - R криве за два

положаја врха прслине (финозрни и грубозрни ЗУТ). Ове криве су упоређене са силама раста прслине, добијеним аналитички, да би се проценила критична вредност притиска. У раду [23] приказана су два различита механизма лома танкозидних заварених посуда под притиском израђених од челика исте дебљине зида (8mm). До кртог лома је дошло при првом испитивању притиском гасовитим азотом резервоара од конструкционог челика S355J2G3 (EN 10025), чија је прелазна температура -20°C . Због преоптерећења и пораста температуре током вожње механизмом жилавог лома је отказала цистерна за превоз амонијака на возилу, израђена од финозрног конструкционог челика TSt 460 (DIN EN 10113-2). У оба случаја, иако су испољени различити механизми лома, почетна прслина се појавила у зони утицаја топлоте завареног споја. У раду [24] приказане су прслине IV групе које се јављају у завареним спојевима челика отпорних на пузање, које су уочене код челика са 9–12% хрома. због повећане брзине формирања шупљина у присуству честица крупнозрних карбида у финозрним и интеркритичним жареним подручјима зоне утицаја топлоте. Проблем се може елиминисати термичком обрадом поновном аустенитизацијом и отпуштањем, али је то ретко изводљиво и зато се компоненте морају пројектовати тако да се узме у обзир смањење чврстоће пузања и века. У раду [25] је дат преглед и основна обележја новог и општег приступа стандардизацији и техничком усаглашавању за опрему под притиском. За опрему под притиском, компоненте које су нераздвојиво спојене и које доприносе отпорности на притисак и компоненте које су му директно изложене, морају бити изведене од стране квалификованог особља према одговарајућим радним процедурама. У раду [26] испитана су два модела, на моделима посуда под притиском, израђених од шавних цеви од челика X55, један са прслином у металу шаву, други са прслином у ЗУТ. Резултати испитивања су указали на већу отпорност на раст прслине у случају посуде са прслином у ЗУТ. За тај случај је разматрана не симетрија својстава материјала, чему је прилагођена и експериментална процедура. Код оба модела се показало да су у укупном J интегралу доминантни затезно-савојни чланови. У раду [27] је показано да је за правилну оцену поузданости коришћена метода математичке статистике и развијени модели поузданости за \log -нормалну и Вејбулову расподелу. Унутар интервала померања свака крива замора има припадајућу вероватноћу која може

осциловати унутар подручја поузданости. Он даје конзервативнију граничну брзину раста прслине од модела Вејбулове расподеле.

У раду [28] је приказана практична примена механике лома на настанак и раст заморних прслина у конструкцијама завареним применом фриксионог заваривања мешањем (FSW). Посебан нагласак је дат на танкозидне структуре од легура алуминијума. Разматран је раст прслине у неојачанамим и ојачаним конструкцијама. При томе је коришћена нумеричка метода базирана на коначним елементима, тзв. проширена метода коначних елемената. Анализиран је раст прслине у FSW споју, кроз зоне споја. При томе је коришћен софтвер Abaqus, као и Морфео за приказ добијених података.

Увођење заварљивих челика високе чврстоће за израду цевовода доноси значајне уштеде, али се захтева отпорност према прслинама, нарочито према кртом лому, основног метала, метала шава и зоне утицаја топлоте што је приказано у овом раду [29]. За цевовод хидроелектране “Бајина Башта” је коришћен заварљив челик високе чврстоће (до 700 МПа називног напона течења), па је инвеститор тражио доказе о његовој отпорности према прслинама и кртом лому. Приказани су резултати испитивања модела цевовода и заварених спојева, којима је доказана задовољавајућа заварљивост челика са металом шава ниже чврстоће (андермечинг) и отпорност према прслинама и кртом лому. Модел цевовода пуне размере је произведен од заварљивог нисколегираног челика високе чврстоће SUMITEN 80P (SM 80P) што је приказано у раду [30]. Челик SM 80P припада групи челика који имају затезну чврстоћу изнад 800 МПа и напон течења изнад 700 МПа. Затезне карактеристике су последица каљења и отпуштања, стога се приликом процеса заваривања мора испоштовати одговарајућа процедура

У раду [31] показано је да је заједничка карактеристика финозрних конструкционих челика низак % С и легирајућих елемената (микролегирање и нисколегирање), висок степен чистоће (низак % Р и S) и ситнозрна структура, што укупно обезбеђује добру жилавост и код повећаних и високих вредности механичких особина. У вези са овим карактеристикама је добра способност заваривања. Под појмом финозрни челик подразумева се челик са величином феритног зрна ≤ 6 .

У раду [32] су дате физичко-металуршке основе легирања челика за употребу на ниским температурама. Ови челици се најчешће користе за израду резервоара за складиштење течних гасова. Главни легирајући елемент Ni се додаје у количинама 2.25 до 9 %, у зависности од радне температуре. Размотрена су ограничења у избору додатних материјала и препоруке за заваривање.

Челик класе чврстоће, $0,2 > 690 \text{MPa}$, приказано у раду [33], омогућава и до два пута повећање уштеде у укупним трошковима. Ипак, употребу овога челика прате и одређени проблеми везани за ограничења постављена у пројектним стандардима везаним за неповољан однос напона течења и затезне чврстоће, смањене пластичности, затим карактеристична попуштена мартензитна структура, повећан угљиков еквивалент, те склоност ка хладним прслинама.

Актуелна је потреба да се на низу случајева покаже важење процедуре за оцену грешака према недавно развијеној „Процедури за оцену интегритета конструкција“ (СИНТАП), приказаној у раду [34]. У овом чланку се разматра примена опције СИНТАП мисмечинг (ниво II) на вишепролазни заварени спој нисколегираног челика високе чврстоће (HSLA). Понашање при лому је одређено коришћењем STOD епрувета за савијање са површинским и пролазним зарезом у средини метала шава изведеног у X жлебу. Утицај мисмечинга (M) у чврстоћи основног метала и метала шава и ширине шава (2H) треба узети у обзир у мисмечинг опцији процедуре СИНТАП, ако је $M > 1.1$

2. ОСНОВИ МЕХНИКЕ ЛОМА

2.1. Теоријске основе основних параметара механике лома

Интегритет конструкције са прслином се доказује поређењем силе раста прслине и отпорности материјала на раст прслине[35]. За већину конструкција ова научна дисциплина је достигла ниво инжењерске применљивости, јер су разрађене многобројне релативно једноставне теоријско-аналитичке методе процене сила раста прслине и стандардне експерименталне процедуре мерења отпорности материјала на раст прслине. Као најефикасније методе процене сила раста прслине могу да се наведу "Инжењерски приступ развијен" у Electric Power Research Institute (EPRI) у Америци, „Инжењерски модел обраде“ (ETM) развијен у Немачкој, [36], Стандардна процедура Јапанског заваривачког друштва JWES 2805, Дијаграм анализе лома (FAD) развијен у Енглеској, као и модели које су развијали појединци или групе истраживача – Кингов модел низа опруга, Ратвани-Ердоган-Ирвинов модел, и Рађу-Њуманов прорачун. Код свих размерно једноставних метода процене силе раста прслине постоје оганичења када се ради о понашању материјала или када је у питању геометрије прслине. Премда већина наведених метода узима у обзир пластично понашање материјала, још увек остаје оганичење које се односи на његову хомогеност тако да EPRI, JWES, FAD, King i REI не могу директно да се примене на хетерогене материјале као што су заварени спојеви, а модификације постају превише компликоване за инжењерску примену [37]. С друге стране, иако узима у обзир хетерогеност материјала преко разлике напона течења метала шави и основног метала (тзв. мисмечинга), ETM не може да се примени на површинске прслине јер нису изведене одговарајуће релације. Осим тога, ETM третира мисмечинг само као разлику напона течења метала и основног метала, не узимајући у обзир зону утицаја топлоте (ЗУТ), која сама по себи није хомогена. Коначно, ниједан од поменутих модела, па ни ETM, не узима у обзир ојачавање материјала у области пластичних деформација, које може да буде толико различито код нпр. разнородних заварених спојева, да на параметре механике лома утиче поједнако битно као и разлика у напону течења. [37]

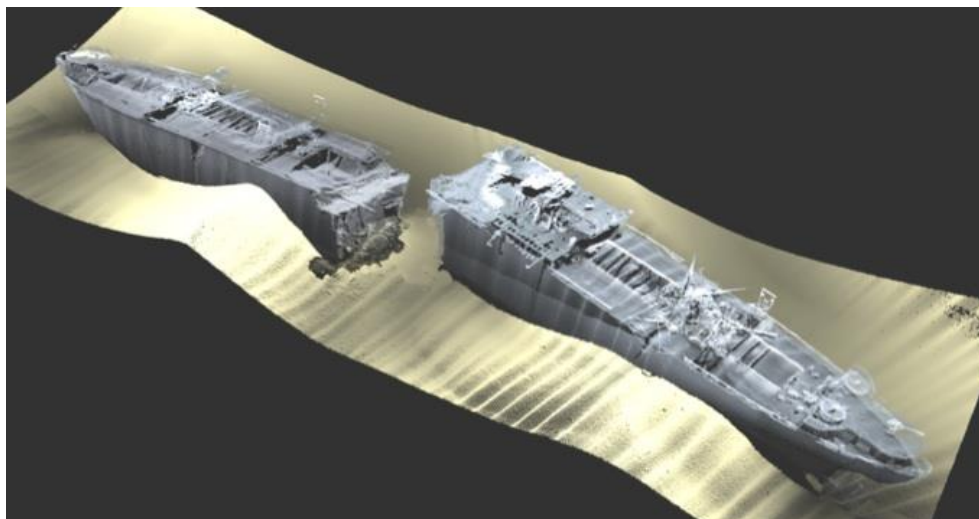
Да би се потпуно упознало понашање материјала, потребно је упоредити његове особине у тренутку уградње и после одређеног времена експлоатације. Одредивање основних параметара механике лома се заснива на дефинисању концентрације напона у околини врха прслине. Једно од опште прихваћених правила за коришћење аналитичких метода при одређивању основних параметара механике лома је теза о аутономности прслине или концепт сличног понашања. Теза о аутономности је заснована на претпоставци да поље напона у околини врха прслине зависи од вредности средњих напона, еластичних својстава материјала и облика прслине [38].

Механика лома је дефинисала параметре и увела нове методе испитивања, а све у циљу да се што боље одреди склоност ка развоју прслина, критичних услова брзог развоја лома, отпорности материјала ка брзој пропагацији прслине или другим речима да се оцени понашање материјала и сигурност конструкције у присуству прслина или других сродних грешака. У случају заварених спојева, наведени параметри механике лома морају узети у обзир хетерогеност материјала карактеристичне за заварене спојеве, о чему ће више бити речи у наредним поглављима овог рада [38].

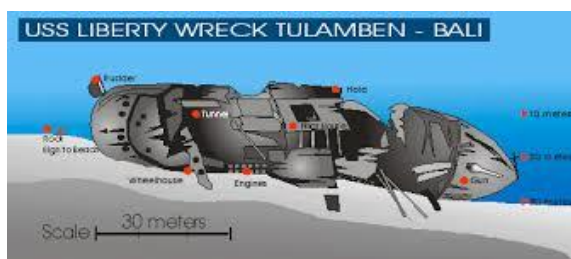
2.1.1 Хаварије заварених конструкција

Проблем прслина у завареним конструкцијама датира вековима и привлачи велику пажњу истраживача у свету јер доводи до учестаности њиховог отказа и хаварија заварених конструкција. Механика лома је на прелазу од чисто кртог лома ка квази-кртом (жилаво кртом) лому морала да проучава и деформацију која претходи лому. Са повећањем примене метала у конструкцијама повћава се и учестаност ломова. Забележени су бројни случајеви појаве лома који су увек привлачили пажњу пројектаната и произвођача материјала.

„Крти лом америчких бродова у завареној конструкцији „Либерти“ у Другом светском рату. Од 4694 заварене конструкције њих 1289 претрпело је тешке хаварије а 233 се сломило на два дела.“[39]



Слика 2.1а Изглед прелома брода „Liberty” [39]



Слика 2.1б Изглед прелома брода „Liberty” [39]

Грешке у завареним спојевима које су довеле до катастрофалних последица (нпр. брод „Liberty“, нафтна платформа „Alexander Kielland“, трајект „Естонија“) условиле су развој и примену механике лома, као научне дисциплине која изучава понашање материјала у присуству прлина. У оквиру ових истраживања заварени спојеви имају посебан значај, јер су топлотни и металуршки процеси при заваривању веома погодни за настанак прлина. „Катастрофална експлозија летелице Challenger 28.јануара 1986. године, због отказа једног прстена на једном од главних мотора. Материјал прстена није био предвиђен за рад при ниским температурама“[40]

„Хаварија нафтне платформе 'Alexander Kiellan' и трајекта 'Естонија' узрок треба да се тражи у погрешној процени значаја неких заварених спојева и њиховој лошој изradi. У случају нафтне платформе, хаварија која је 1980. године однела 123 живота је последица заморног лома по обиму попречног носача платформе“.[40]

„Основни узрок хаварије трајекта 'Естонија' 1994. године, када је погинуло 910 путника, је преоптерећење завареног споја ручице за затварање покретних врата изазвано непрописним руковањем (врата нису била потпуно затворена). Због овог преоптерећења, заварени спој, који је везивао ручицу за бродску конструкцију, се сломио, врата су се отворила и нагли доток воде је преврнуо и потопио трајект. У овом случају, као и код нафтне платформе, није се сматрало да је наведени спој од битног значаја, па његовој изradi није посвећена потребна пажња“.[40]

Кључно питање у оваквим истраживањима је да ли ће прлина у условима типичним за неку заварену конструкцију мировати, у ком случају је конструкција безбедна, или ће расти и евентуално довести до њеног лома. У овом другом случају раст прлине може да буде спор и стабилан, ако га прате пластичне деформације испред врха прлине, или брз и нестабилан, ако пластичних деформација практично нема. Нестабилан раст прлине изазива крти лом и изучава се у оквиру линеарно еластичне механике лома, док се стабилан раст прлине изучава у оквиру еласто-пластичне механике лома јер изазива жилав лом. У сваком случају примењују се одговарајући критеријуми лома, који се добијају из енергетске равнотеже оптерећеног тела са прслином, поређењем параметара механике лома са одговарајућим својствима материјала. Тако се у оквиру линеарно еластичне механике лома пореди фактор интензитета напона са жилавшћу лома, а у оквиру еласто-пластичне механике лома отварање прлине или J интеграл са њиховим критичним вредностима.[40]

Одредивање основних параметара механике лома се заснива на дефинисању концентрације напона у околини врха прлине. Једно од опште прихваћених правила за коришћење аналитичких метода при одређивању основних параметара механике лома је теза о аутономности прлине или концепт сличног понашања. Теоријско одређивање параметара механике лома представља сложен математички задатак, посебно код конструкција са сложеном геометријом и условима оптерећења. Аналитичко одређивање параметара механике лома попут: фактора интензитета напона K , J - интеграла, отварања врха прлине CTOD (Crack Tip Opening Displacement), је могуће само у малом броју случајева. Код решавања проблема са сложеном геометријом и сложеним условима оптерећења неопходно је користити нумеричке методе прорачуна. [41]

У последњих двадесет година метода коначних елемената је нашла примену како у разним областима механике тако и у механици лома. Развиле су се нове научне дисциплине које су засноване на нумеричким методама и прорачунима као што су прорачунска механика, прорачунска динамика флуида, прорачунска термодинамика, прорачунска механика лома, оштећења, замора.

Један од практичних циљева примене методе коначних елемената у прорачунској механици лома је да се одреди концентрација напона око врха прслине тј. фактори интензитета напона (FIN) који уједно представљају меру механичког стања прслине. Други примари циљ примене методе коначних елемената у прорачунској механици лома је да се предвиди могуће ширење прслине све до појаве лома. [41] Иницијација заморних прслина се јавља на хетерогеним местима у материјалу која су повољна за образовање грешки, независно од тога да ли су оне примарно постојала (укључујући, гасне поре, локално слабе тачке у микроструктури) или су настала током деловања периодично променљивог оптерећења. Уклањање примарно неповољних места из структуре материјала може да доведе до значајног повећања заморног века.

2.2. Примена параметара механике лома на употребну спремност заварених спојева

Основни параметри механике лома, као што су фактор интензитета напона, отварање врха прслине и J интеграл, представљају с једне стране оптерећење и геометрију тела са прслином, а с друге стране, под одређеним условима, критичне величине ових параметара представљају својства материјала. У случају заварених спојева и конструкција, одређивање параметара механике лома је у суштини исто као код основног материјала, али постоје и значајне разлике везане за хетерогеност материјала, односно различита својства у металу шава, ЗУТ и основном металу, а од значаја може да буде и утицај заосталих напона.

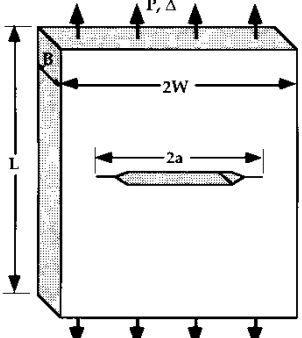
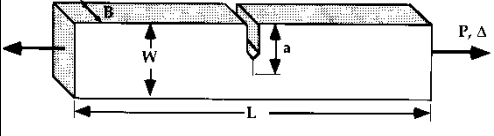
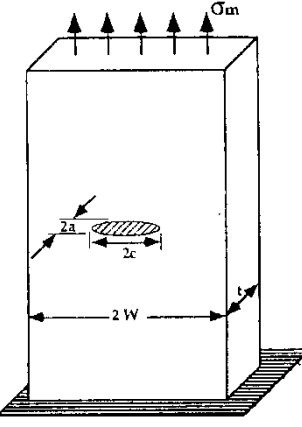
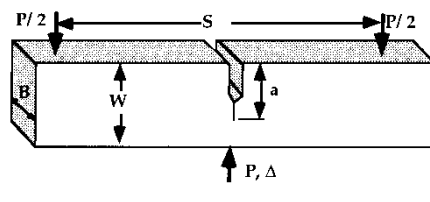
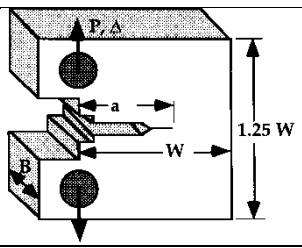
Према енергетском критеријуму Грифита, прслина у неком телу расте нестабилно уколико је сила раста прслине (брзина ослобађања енергије) већа од отпорности материјала на раст прслине. У оквиру линеарно еластичне механике лома, сила раста прслине се идентификује са фактором интензитета напона:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.1)$$

где је Y бездимензиони фактор геометрије, σ -удаљени напон, a дужина прслине. За неке најједноставније примере бездимензиони фактор геометрије је дат у таб. 2.1, а велики број примера важних за практичну примену је дат у одговарајућим приручницима. Ако заварена конструкција не може да се сведе на једноставне случајеве геометрије и оптерећења, онда је потребна детаљнија анализа напонског стања нумеричким методама, нпр. методом коначних елемената.

Отпорност материјала на нестабилни раст прслине се у оквиру линеарно еластичне механике лома представља критичном вредношћу фактора интензитета напона у условима равног стања деформације, K_{Ic} односно својством материјала названим жилавост лома. Код хомогених материјала процедура одређивања жилавости лома у условима равног стања деформације је детаљно и прецизно установљена у стандарду ASTM E 399. [18]

Табела 2.1 Фактори интензитета напона за неке једноставне геометрије [41]

	фактор интензитета напона K_I
	$\frac{P\sqrt{\pi a}}{BW} \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}}$
	$\frac{P\sqrt{a}}{BW} \left[1,99 - 0,41 \frac{a}{W} + 18,7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 38,5 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 53,8 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$
	$\sigma_m F \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}, \quad F = (M_1 + M_2 \lambda^2 + M_3 \lambda^4) g f_w, \quad \lambda = 2a/t,$ $f_w = \sqrt{\sec \left(\frac{\pi c}{2W} \sqrt{\lambda} \right)}, \quad g = 1 - \frac{\lambda^4 \sqrt{2,6 - 2\lambda}}{1 + 4\lambda} \cos \phi $ $M_2 = \frac{0,05}{0,11 + \left(\frac{a}{c} \right)^{1,5}}, \quad M_3 = \frac{0,29}{0,23 + \left(\frac{a}{c} \right)^{1,5}}, \quad M_1 = 1$ $Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65}, \quad f_\phi = \left[\left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right]^{1/4}$ <p style="text-align: center;">za $a/c < 1$</p>
	$\frac{PS\sqrt{a}}{BW^2} \left[2,9 - 4,6 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 37,6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 - 38,7 \left(\frac{a}{W} \right)^6 \right]$
	$\frac{P\sqrt{a}}{BW} \left[29,6 - 185 \frac{a}{W} + 656 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1017 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 63,9 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right]$

Истраживања су показала да је меродавно подручје најниже жилавости, односно подручје изразитог понашања материјала.

A.A. Griffith [41] 1920. год извршио је експеримент са стаклом које се ломи крто без готово и најмање деформације и извео је зависност између ширења прслине и оптерећења користећи енергетски концепт

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad 2.2$$

где су σ_{ε} - критично напрезање, E -модул еластичности, γ - енергија површинског напона-потребна да се створе две нове површине прелома, a - дужина прслине при стању раванског напрезања

Према њему, важну улогу при ширењу прслине игра концентрација напона у непосредној околини врха прслине. Као квантитативна мера концентрације напона у околини врха прслине уводи се величина интензитета напона: K_I , K_{II} и K_{III} [42]

G.R. Irwin [43] педесетих година уочава да важну улогу при развоју пукотине игра и пластична деформација. Дефинише нове величине: G – сила раста прслине као и K – фактор интензитета напона који ће касније бити основа механичких истраживања

$$G = \frac{K^2}{E} \quad 2.3$$

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad [Nmm^{-3/2}] \quad 2.4$$

Шездесетих година XX века појављују се нови, фундаментални радови из механике лома. Најзначајнији међу њима су радови Rice-а (1968) засновани на дефинисању J интеграла и анализи његових особина. Теорија заснована на коришћењу J интеграла развијена је са циљем да се успостави квантитативна мера појаве нестабилног ширења прслине. Развија се критеријум лома заснован на примени J интеграла.

2.3 Основни облици образовања површина прелома

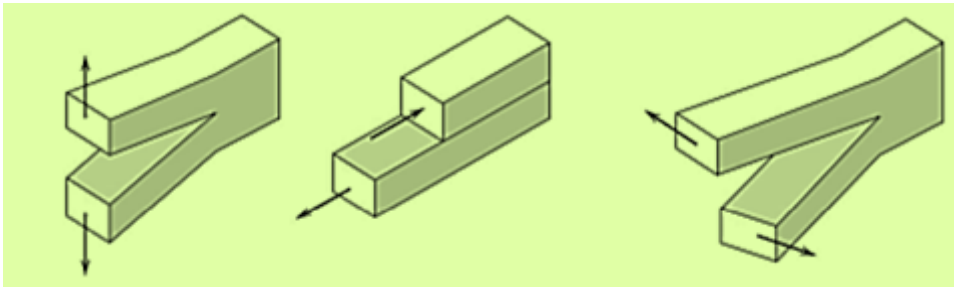
Расподела напона у близини врха прслине зависи од облика образовања површине прелома пошто раздвојене површине прслине представљају

непотерећене границе напругнутог тела. Три основна облика развоја прсине и образовање површине прелома приказани су на слици 2.2

I облик Цепање (отварање) дефинисано је повлачењем две поврчи страна прсина у вертикалним смеровима у у-правцу при чему се у x-y и x-z равни остварују симетрична деформациона стања

II облик Смичући облик у равни дефинисано је померањем једне површине прелома по другој у истој равни али у супротним смеровима

III облик Смичући облик ван равни дефинисано је тако да две површи страна прсина клизају једна преко друге у z-правцу где се у x-y и x-z равни остварује антисиметрично деформационо стање



Слика 2.2 Основни облици померања елемената које обухвата врх прсине

Најопаснији ломови јављају при развоју прсине цепањем те је за тај облик развоја лома дефинисано испитивање и одређивање фактор интензитета напона који одређује величину компоненти напона при једноликој расподели напона [40]

$$K = k\sqrt{2\pi} \left[\text{MPa}\sqrt{\text{m}} \right] \quad 2.5$$

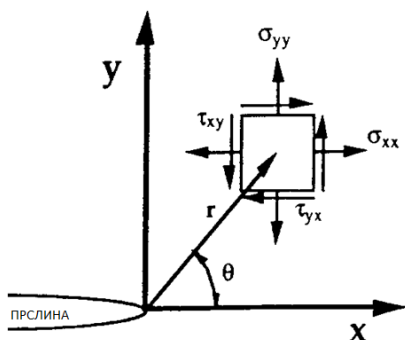
k – константа се може заменити фактором интензитета напона K који дефинише напон, деформације и померања око врха прсине пошто је пропорционалан напонима у тој зони те се у зависности од врсте оптерећења обележава са K_I , K_{II} или K_{III} .

Сва три облика развоја прслине могу се сврстати у раван проблем Теорије еластичности пошто припадају било равнoј деформацији или генералисаном равном стању напона. [40]

За одређене конфигурације са прслином изложене спољашњим силама, могуће је извести изразе у затвореној форми за напоне у телу, претпостављајући да је понашање материјала изотропско, линеарно еластично. Westergaard [44], Irwin, Sneddon и Williams, су међу првима објавили таква решења. Ако дефинишемо осу поларних координата са почетком у врху прслине (слика 2.2), може се показати да је поље напона у било ком линеарно еластичном напрслном телу дато преко [45]

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad 2.6$$

где је σ_{ij} тензор напона, r и θ су дефинисани, на слици 2.2, k је константа, и f_{ij} је бездимензиона функција од θ .



Слика 2.3 Расподела нормалног напона у околини врха прслине [46]

Термини вишег значаја зависе од геометрије, али решење за било коју дату конфигурацију садржи водећи израз који је пропорционалан $1/\sqrt{r}$. Како $r \rightarrow 0$, водећи израз тежи бесконачности (∞), али други термини задржавају коначне вредности или се приближавају нули (0). Стога се напон у близини врха прслине мења са $1/\sqrt{r}$, без обзира на конфигурацију напрслог тела. Такође се може показати да се померај у близини врха прслине не мења са \sqrt{r} .

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(II)} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(II)}(\theta)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(III)} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(III)}(\theta)$$

Са аспекта теорије еластичности, два важна захтева уколико су испуњена омогућавају формулисање диференцијалних односно парцијалних једначина које дефинишу функционалну зависност између напона и деформација.

Први услов који мора бити испуњен је равнотежа напона, други је компатибилност деформација. Уствари да би био испуњен први услов тело као целина мора бити у равнотежи, односно локални напони у телу морају бити у равнотежи. Ово условљава успостављање релација између компонената тензора напона. Други захтев који мора бити испуњен је услов компатибилности. Испуњавање услова компатибилности доводи до дефинисања релација између компонената тензора деформација.[43]

Код проблема мешовитог оптерећења, индивидуални доприноси компоненте датог напона се сабирају: $\sigma_{ij}^{(\text{total})} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)}$

3. ПРСЛИНЕ У ЗАВАРЕНИМ СПОЈЕВИМА

3.1. Дефиниција и настанак прслина

Прслина је шупљина у телу, ограничена са две напрамне површине међусобног растојања много мањег од њене друге две димензије, настала без уклањања материјала.

Прслина може настати (или постојећа прслина може расти) само ако одређени процес доводи до тога да тотална енергија опада или остаје константна. Због тога се критични услови за лом могу дефинисати као место где се дешава раст прслине под равнотежним условима, без укупне промене тоталне енергије.

Две фазе могу се одвојити у процесу лома:

1. Постепени прелаз почетне грешке у субмикроскопски, микроскопски и макроскопски губитак хомогености кроз појаву прслине, и њен стабилни развој.
2. Критично (нестабилно) стање прслине и њен брзи развој до потпуног раздвајања (лома)

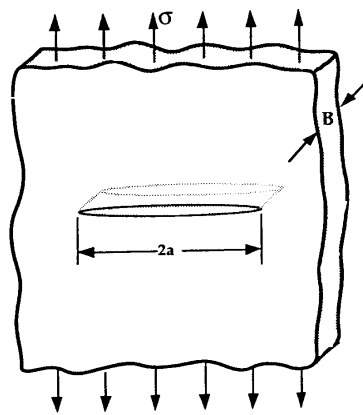
Пошто је потребно време за развој пластичне деформације, брзина деформације је мала, док нестабилни лом може да буде потпуно крт и развија се веома брзо (понекад и тренутно). Фаза на крају лома после пластичне деформације може бити краткотрајна. Последице брзог развоја лома може имати катастрофалне последице, пошто се локални поремећај у кратком времену преноси на читаву конструкцију. Величина допуштеног напона није непосредно повезана са појавом лома, па је потребно познавати услове у којима се развија лом (посуде под притиском дебелих зидова, бродови у експлоатацији). Структура неких материјала је таква да је њихов лом крт у свим условима оптерећења и експлоатације. Код већине конструкцијских материјала појави кртог лома погодују следећи услови где је велика брзина оптерећења, таква да нема довољно времена за пластичну деформацију; - концентрација напона, због које је напон течења локално прекорачен; - експлоатација на температурама нижим од температуре кртости; за неке челике се температура кртости достиже и при атмосферским условима.[47]

Чврстоћа, издужење, тврдоћа су механичке карактеристике које постају недовољно поуздане у односу на лом те се уводе карактеристике, које дефинишу жилавост материјала (ударна жилавост по Шарпију) и жилавост лома.

Прслине настају у процесу ливења, ковања, пресовања, исправљања, заваривања, лемљења, обраде скидањем струготине, при термичкој обради и у току галванских процеса. У експлоатацији се лом јавља из прслина у условима кртог стања, из заморних прслина при променљивом оптерећењу, пузањем при дужем раду на повишеним температурама, при корозији и истовременом дејству корозије и механичког оптерећења (напонска корозија) [47]

Прслине се посматрају као елипсе неправилног облика са две осе $2a$ и $2b$.

Плоча је изложена константном напону σ , са прслином дужине $2a$ (слика 3.1).



Слика 3.1 Прслина по целој дебљини у бесконачно широкој плочи изложеној довољно удаљеном затезном напону [40]

Ширина плоче је $\gg 2a$ и преовлађује равно стање напона. Како би повећали величину прслине, довољна потенцијална енергија мора бити доступна на плочи, да прекорачи површинску енергију материјала.

Griffith-ов модел је базиран на равнотежи укупне енергије: да би дошло до лома енергија нагомилана у структури мора бити довољна да прекорачи површинску енергију материјала. Пошто лом подразумева прекидање веза, напон на атомском нивоу мора бити \geq од кохезионог напона.[40]

Долази до повећања Griffith-ове равнотежне енергије за прираштај у подручју прслине dA и у равнотежним условима изражена је као:

$$\frac{dE}{dA} = \frac{d\Pi}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0 \quad 3.1$$

где је E тотална енергија, Π потенцијална енергија добијена услед унутрашње енергије деформације и спољашњих сила, а W_s је рад потребан за формирање нових површина [40]

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW_s}{dA} \quad 3.2$$

Уочава се разлика између површине прслине (crack area) и површине лица прслине (surface area). Површина прслине је дефинисана као пројектована површина прслине, али како прслина укључује две одговарајуће површине, површина лица прслине је $=2A$.

У случају када је напон при лому за елиптичну прслину уграђену у материјал, Griffith-ов модел базира се на равнотежи укупне енергије. Енергија нагомилана у структури мора бити довољна да прекорачи површинску енергију материјала како би дошло до лома. Пошто лом подразумева прекидање веза, напон на атомском нивоу мора бити \geq од кохезионог напона. Повећање локалног напона може бити остварено услед грешака у материјалу [40]

До настанка лома долази из више разлога. На пример, храпавост микроскопске површине на врху прслине би могла проузроковати довољну концентрацију локалног напона да настане лом. Друга могућност, је оштра микропрслина близу врха макроскопске прслине са конаџним полупреџником зареза. Макроскопска прслина повећава напон у околини микропрслине, која се развија када она задовољава Griffith-ову једначину. Микропрслина се спаја са великом прслином, која се затим развија, ако је Griffith-ов критеријум глобално задовољен. [40]

Прслина може настати (или постојећа прслина може расти) само ако одређени процес доводи до тога да тотална енергија опада или остаје константна. Због тога се критични услови за лом могу дефинисати као место где се дешава раст прслине под равнотежним условима, без укупне промене тоталне енергије.

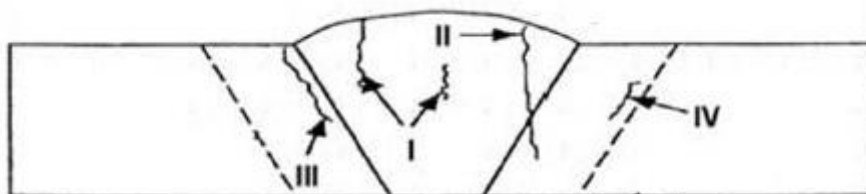
Анализом кртог понашања тела са прслином механика лома је отворила нове могућности у обезбеђењу сигурности металних конструкција. Стандардима BS 7448 Part-1 [48] и ASTM E399 [18] за одређивање жилавости лома при равној деформацији, KIc , процес развоја линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ) је заокружен до њене примене на реалне конструкције.

Испитивање епрувета са прслином показује локално понашање материјала око врха прслине и полази од претпоставке да је материјал епрувете довољно хомоген, што значи да се резултати локалног понашања могу третирати глобално, односно да се могу непосредно прењети на одговарајућу конструкцију.

3.2. Подела прслина према позицији

Прслине у завареним спојевима се деле према позицији. па се прслине типа I и II јављају се у металу шава. Тип I је ограничен на метал шава, док Тип II може да се шири изван метала шава у основни материјал. [49]

Прслине типа III се јављају у крупнозрном ЗУТ-у. Прслине Типа IV настају и расту у уској зони ЗУТ-а, у непосредној близини границе ОМ/ЗУТ. Прслине Типа IV представљају најопаснији облик прслине јер доводе до највеће брзине формирања празнина, што доводи до бржег лома, у поређењу са испитивањем пузања у случају незаварених, хомогених епрувета. [49]



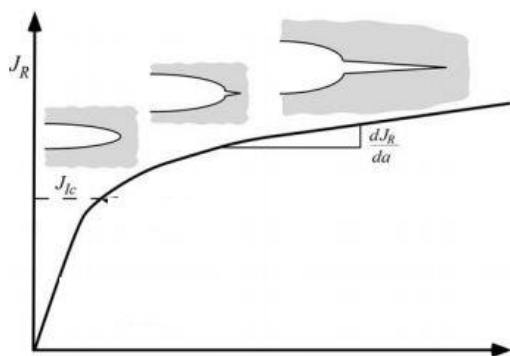
Слика. 3.2 Типови прслина у завареном споју метала [49]

Прслине типа IV јављају се у интеркритичној области ЗУТ-а у завареним компонентама, које раде у условима пузања. Вршена су испитивања једносног пузања на завареним епруветама од материјала P91, са различитим конфигурацијама жлеба, тј. са једним У- жлебом и двоструким У - жлебом. Дошло је до закључка да је до лома у свим епруватама у регији Типа IV, и да су прслине такође биле Типа IV. Применом методе коначних елемената, предвидели су положај оштећења који је одговарао експерименту. Научници Hyde и Sun су такође предвидели лом типа IV у завареним цевима од легуре CrMoV применом анализе механике оштећења коначним елементима. Открили су да оштећења настају у областима близу спољних површина цеви и да напредују ка унутра. [49] Такође су спровели низ анализа коначним елементима применом Кацханов модела [50] оштећења и открили да је вредност коришћена за фактор вишеосног напонског стања, α , од великог значаја при предвиђању локације лома и века

компонената направљених од заварених спојева од челика са виском садржајем Cr. Tabuchi је проучавао утицај процеса заваривања на лом Типа IV поређењем лома пузањем у унакрсно завареној једноосној епрувети исеченој из спојева заварених методама GTAW (Gas Tungsten Arc Welding - гасно лучно заваривање tungstenom) и EBW (Electron Beam Welding - заваривање електронским зраком). Открили су да је у случају оба заварена споја, до лома дошло у регијама Типа IV.[49]

3.2.1. Криве отпорности на раст прслине

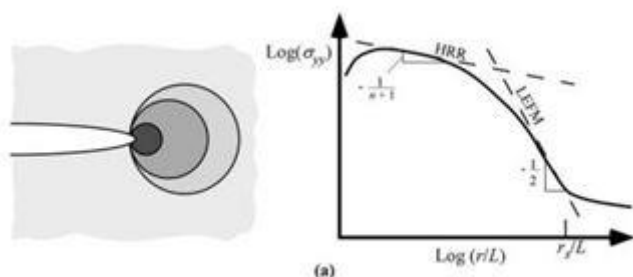
У многи материјалима високе жилавости неће се јавити катастрофалан лом при одређеној вредности J или CTOD. Овакви материјали ће пре показати растућу R криву, код које се вредности J и CTOD повећавају са растом прслине. У случају метала, растућа R крива је обично везана за раст и срастање микро-празнина.[49]



Слика 3.3. Шематски приказ J отпорност криве за жилав материјал [49]

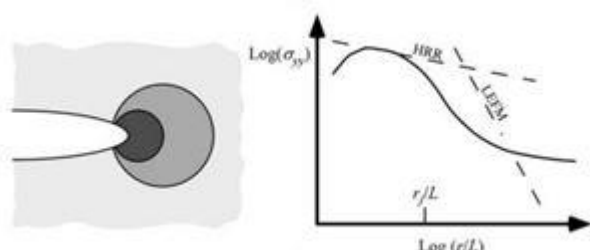
На слици 3.3 У почетној фази деформације, R крива је скоро вертикална; присутан је незнатан раст криве услед затупљивања. Са повећањем вредности J интеграла, долази до локалног лома у материјалу на врху прслине, и прслина наставља да напредује. Услед раста R криве, почетни раст прслине је обично стабилан, али нестабилност се може јавити у каснијим фазама. Мерење жилавости лома J_{Ic} је дефинисано близу иницијације стабилног раста прслине. Прецизан тренутак у коме почиње раст прслине је обично лоше дефинисан. Као последица тога, дефиниција вредности J_{Ic} је у великој мери произвољн, слично као и граница течења при деформацији од 0.2%. Одговарајућа вредност CTOD близу иницијације стабилног раста прслине је обележено са d_i према Америчким и Британским стандардима испитивања. [49]

3.2.2 Стационарне прррррррр



Слика. 3.4. Утицај пластичности на поље напона у врху прррррррр - течење малих размера, [49]

На слици 3.4 је шематски приказан утицај пластичности на напоне у врху прррррррр; $\log(\sigma_{yy})$ је приказан у односу на нормализовану удаљеност од врха прррррррр. Карактеристична размера дужине L одговара величини конструкције; на пример, L може представљати дужину лигамента без прррррррр. Приказан је случај течења мале размере, где су услови у врху прррррррр окарактерисани са K и J . Ако се претпостави монотонно, квазистатичко оптерећење, област у којој доминира J појављује се у пластичној зони, где еластични сингуларитет више не важи. Област коначне деформације јавља се на удаљености једнакој приближно $2a$ од врха прррррррр, где присуство великих деформација чини ХРР теорију неважећом. У течењу малих размера, K једнозначно карактерише услове у врху прррррррр, упркос чињеници да сингуларитет не постоји све до самог врха прррррррр. На сличан начин, J једнозначно карактерише услове у врху прррррррр упркос томе што пластичност деформације и претпоставка о малим деформацијама не важе унутар области коначних деформација.



Слика 3.5. Утицај пластичност на поље напона у врху прррррррр еласто-пластичност [49]

У случају течења већих размера слика 3.5 зоне коначних деформација постаје значајна у поређењу са L , и више не постоји област једнозначно окарактерисана J интегралом. Механика лома са једним параметром престаје да важи у случају течења већих размера, и критичне вредности J показују зависност од величине и геометрије.[49]

У одређеним конфигурацијама, K и J зоне су занемарљиво мале, и немогуће је описати понашање помоћу једног параметра, осим у случају веома малог оптерећења. На пример, плоча оптерећена на затезање са прслином која пролази кроз целу њену дебљину се не може описати једним параметром, било да се ради о K или J .

У случају течења малих размера, $r_s = r_j$, међутим, r_s нестаје у тренутку кад пластична зона обухвати зону у којој доминира еластични сингуларитет. Зона у којој доминира J обично траје дуже од зоне еластичног сингуларитета.

3.3. Контролисани раст прслине

Према аргументима о димензијама датим у претходном делу текста, J -контролисани услови су присутни у врху стационарне прслине (оптерећене монотono и квазистатички), под претпоставком да је област великих деформација мала у односу на раванске димензије тела са прслином. Стабилни раст прслине, међутим, уводи још једну димензију дужине, тј. промену дужине прслине у односу на почетну вредност.[49]

J интеграл неће увек карактерисати услове у врху прслине у случајевима када је присутан значајан раст прслине у односу на раванске димензије. Претходни раст прслине не би требало да има неповољан утицај у чисто еластичном материјалу, с обзиром да локална поља у врху прслине зависе само од тренутних услова. Међутим, претходна историја утиче на напоне и деформације у алсто-пластичним материјалима. Можемо очекивати да теорија J интеграла падне у случају комбинације значајне пластичности и раста прслине.[50]

3.3.1. Ограничење врха прслине у случају течења великих размера

У случају течења малих размера, један параметар (нпр. K , J или CTOD) је довољан да се окарактеришу услови у врху прслине и може се користити као

критеријум лома независан од геометрије. Механика лома са једним параметром престаје да важи у присуству изражене пластичности, и жилавост лома зависи од величине и геометрије испитиване епрувете.[51]

Применом теорије линије клизања како би се проценио напоне у великом броју различитих конфигурација у случају равног стања деформације и условима потпуне пластичности, досло је до неких од резултата. Према анализи линије клизања, плоча за затезање са дубоким зарезима са обе стране, одржава висок ниво троосности у условима потпуно пластичним условима, тако да су услови у врху прслине слични онима у случају течења малих размера.

Плоче са ивичном прслином изложена савијању показала су нешто мањи пораст напона, Плоча са централном прслином изложена чистом затезању није у стању да одржи значајнију троосност у условима потпуне пластичности.

Ови резултати указују на то да, у случају материјала у којима се не јавља очвршћавање у условима потпуног течења, напони близу врха прслине нису јединствени, већ зависе од геометрије. Према уобичајеним приступима механике лома, поља напона и деформација на већим удаљеностима од врха прслине могу зависити од геометрије, али претподставља се да поља близу врха прслине имају сличну форму у свим конфигурацијама које се могу свести на један параметар. Претпоставка о једном параметру очигледно не важи за материјале без очвршћавања у условима потпуне пластичности, стога што поља близу врха зависе од конфигурације. Жилавост лома, без обзира на то да ли је описана са J , K или $CTOD$, такође мора зависити од конфигурације. [51]

Говорећи о ограничавању заварљивости метала или легура, најважнија је склоност основног материјала ка појави прслина у зони под утицајем топлоте. Постоје две групе прслина које су изазване различитим узроцима, често независним једних од других:

1. Прслине у материјалу шава, које се могу образовати у овој зони завареног споја, у вези су са квалитетом додатног материјала или електроде као и са условима извршења шавова и присуством грешака, укључака, мехурова, итд.
2. Прслине у основном материјалу образују се у зони под утицајем топлоте или у граници растапања а условљене су недовољном заварљивошћу основног

материјала или факторима крутости. У неким случајевима долази до распрострањања прслине из једне зоне у другу.[52]

До њиховог образовања најчешће долази при тешпературама око 200°C, а у неким случајевим а чак и после више часова после извршења завареног споја.

3.3.2 Појава прслина у материјалу шава и основном материјалу

У току очвршћавања јављају се микропрслине које се у зони растапања, углавном, претварају у прслине под утицајем напрезања или услед рада ширења и скупљања. [51]

У колико је растојање између завариваних лимова веће од 4 до 5 mm, појава прслина је веома велика. Прслине се најлакше јављају при брзом одвајању електроде од шава и малој запремини додатног материјала. Да би се избегло образовање прслина у кратеру потребно је смањити напоне скупљања у материјалу шава иза кратера, снижењем брзине хлађења одговарајућим предгревањем. Такође могуће је смањењем утицаја размицања ивица жлеба испред кратера при томе смањујући растојање између завариваних лимова. Могуће је повећати и количину додатног материјала или повећати храњење кратера материјалом продужним топљењем електроде.[52]

Прслине у основном материјалу, настале у зони под утицајем топлоте, као и у граници растапања, могу да буду различитог изгледа. Када се нађу у непосредној близини границе растапања, локализоване су у ограниченим запреминама и ретко избијају на површину. Вертикалне прслине, јављају се ређе. Попречне прслине јављају се услед недовољног квалитета основног материјала или високих сопствених напрезања. Узроци настанка прслина могу бити обични (на које утичу корозија или без напрезања, механички замори, грешке у лиму, присуство напона услед ваљања или обликовања, итд.) и металуршки (хемијски састав основног материјала, образовање сопствених нарона, присуство водоника). Утицај водоника при стварању прслина је пример водоничне кртости при температурама око 200°C.[51]

3.3.3 Примена и пројектовање

Основна карактеристика материјала при пројектовању је напон. Код пројектовања при усвајању материјала већег напона течења R_e , тј. веће затезне чврстоће R_m , добијају се мање димензије дела. Код савремених челика високе чврстоће који имају напон течења близак затезној чврстоћи, напон течења дефинише се напоном одређеним за усвојену величини пластичне деформације (нпр. $R_{p0.2}$). Однос напона течења и искуственог степена сигурности, није довољно поуздан са становишта захтева у погледу чврстоће.[53]

Еластична и пластична деформација се односе на читаву компоненту, односно на њена макроскопска подручја. Када стварни напон, услед концентрације напона, локално достигне ниво напона течења, тада се пластична деформација изражава само локално (не мора бити нарушена хомогеност и компактност дела). До непотпуног или потпуног лома може доћи при великом спољњем оптерећењу. Под непотпуним ломом подразумева се губитак хомогености и интегритета услед постојања прслине услед чије развијености није се није досло до потпуног лома. Потпуни лом се може подразумевати губитак раздвајање компоненте на најмање две независне целине, уз губитак функционалности.

Почетак лома и лом указују нам на изражен локални карактер око врха прслине, те структура материјала више испољава утицај на развој лома него на развој деформације. Почетак и развој лома у коолерацији је са појавом испред и у близини врха прслине (локано гледајући), тј. у подручјима веома малих димензија (микрометра) у односу са макроскопским димензијама компоненте (десетина милиметара). С обзиром да је развој прслине лом, тада је макро лом епрувете и компоненте условљен локалним процесима (укупна отпорност конструкцијског елемента зависи од локалних поремећаја). Појава прслине или непотпуног лома допуштена је након поузданог утврђивања да се настанак прслине неће угрозити интегритет конструкције нити ће се развити до потпуног лома. Развој лома је појава јасно одвојена од појаве деформација. Није их могуће раздвојити (услед непотпуног лома).

У реалним материјалима и пре дејства оптерећења. могу постојати заостали напони, почетне деформације и места прекида хомогености. Нехомогеност је последица многих поремећаја структуре материјала (нечистоће, укључци,

празнине и дислокације), нехомогеност и грешке споја (код заварених конструкција) и то су места настанка прслина и почетка лома. [53]

Подела лома може бити на крти и пластични пошто обухвата утицај деформације која претходи лому. Тада се могу уочити два гранична случаја. Први се односи на лом који настаје у делу чија је деформација у потпуности еластична (чист крти лом чији је прелом добијен искључиво цепањем и који одговара равном стању деформације). Други представља лом настао након изражене пластичне деформације (потпуног раздвајања дела) сужавањем попречног пресека. Тада је површина прелома врло мала, услед претходног клизања које припада просторној деформацији. Код ова два гранична случаја срећу се мешовити ломови којима претходе и еластичне и пластичне деформације те се карактеришу жилавашћу (представља утрошену енергију за развој лома).

Две фазе процесу лома које се могу одвојити су:

1. Постепени прелаз почетне грешке у субмикроскопски, микроскопски и макроскопски губитак хомогености кроз појаву прслине, и њен стабилни развој.
2. Критично (нестабилно) стање прслине и њен брзи развој до потпуног раздвајања (лома)

Развој пластичне деформације изискује време те је брзина деформације мала. Нестабилни лом може бити потпуно крт и развија се веома брзо па чак и тренутно, тако да завршна фаза лома после пластичне деформације може бити краткотрајна. При брзом развоју лома локални поремећај у кратком времену преносе се на читаву конструкцију. Структура неких материјала је таква да је њихов лом крт у свим условима оптерећења и експлоатације.

Узроци појаве и почетног развоја постојеће прслине су различити и могу се јавити у свим фазама израде материјала и компоненте, као и у експлоатацији. Настају у процесу пресовања, исправљања, ливења, ковања, заваривања, лемљења, обраде скидањем струготине, при термичкој обради и у току галванских процеса. Такође, лом се јавља из прслина у условима кртог стања, заморних прслина при променљивом оптерећењу, пузањем при дужем раду на повишеним температурама, при корозији и истовременом дејству корозије и механичког оптерећења (напонска корозија).

4. ЗАВАРЕНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ПОСУДЕ ПОД ПРИТИСКОМ

4.1. Заварене конструкције посуде под притиском и оцена њихове сигурности у раду

Када се говори о оцени интегритета заварене конструкције проблем настаје услед нехомогености структуре материјала уграђеног у конструкцију. Главни фактори понашања завареног споја са прслином су хетерогеност материјала, метал шав, зона утицаја топлоте, основни метал, заостали напони, ометена деформација (констраинт), несавршеност геометрије (однос димензија завареног споја, ширине метала шав и дужине и дубине површинске прслине). Поставља се питање како открити прслину, одредити њену величину и положај и оценити значај постојеће прслине за сигуран рад заварене конструкције.[55]

Примена заварених конструкција од велике је важности у савременој индустријској производњи до чије примене је дошло се развојем поступака као и развојем челика погодних особина. Развојем заварених конструкција развијали су се и поступци за оцену сигурности заварених спојева, [56]

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. Заваривањем је могуће спајање метала са металом, неметала са неметалом и метала са неметалом, али се у практичном смислу подразумева спајање метала са металом. Данас се сматра да је 98% поступака заваривања освојено и примењено у пракси, укључујући лемљење, као што је дефинисано у стандарду ISO 4063 (EN 24063) [57]. Поступци заваривања могу да се поделе на поступке топљењем и поступке притиском, при чему у прву групу спадају они поступци код којих се процес спајања одвија топљењем и очвршћавањем на месту споја, а у другу групу они поступци код којих се процес спајања одвија без топљења. Осим тога, поступци заваривања се често деле према извору енергије: електрична (лук, отпор, снап), хемијска (пламен, експлозив, термити), механичка (притисак, трење, ултразвук) и остале (нпр. светлост). [58]

Посебно треба обратити пажњу на хетерогеност особина завареног споја а то су основни метал (ОМ), метал шав (МШ) и зона утицаја топлоте (ЗУТ). Примена нових челика условила је познавање својстава њихове зоне утицаја топлоте ради

оцењивања сигурности конструкције како на локалном тако и на глобалном нивоу. Међутим, прслине по свим стандардима спадају у неприхватљиве грешке. Сама израда заварених конструкција без грешке скоро је немогућа и условљава непотребно високу цену.

Данас су развијени поступци процене значаја прслина у конструкцијама, што подразумева детаљно познавање структуре и особина завареног споја, нарочито зоне утицаја топлоте. Одступања у свакој од наведених фаза може довести до појаве грешке у завареном споју које могу бити прихватљиве, под одређеним условима, и не прихватљиве.

Заварени спој као комплексна и хетерогена структура представља критично место у завареној конструкцији. Због тога у највећем броју случајева, сигурност заварене конструкције се процењује на основу особина завареног споја као целине, и особина свих његових саставних делова. Најчешће се за оцену понашања завареног споја пореде особине основног метала, зоне утицаја топлоте и метала шави, али се у бројним случајевима понашање завареног споја као целине разликује од понашања метала шави, зоне утицаја топлоте и основног метала. [56]

Епрувете механике лома су епрувете са прслинама, а прслине се у завареним спојевима јављају као најкритичније грешке.

Потпуна карактеризација заварених спојева са аспекта експлоатацијских својстава, подразумева и сагледавање њиховог понашања у присуству грешака, тј. оцену њихове отпорности према иницирању и развоју прслине као најопасније врсте грешке.

Заварени спојеви су прикладни за: пренос сила, момената савијања и момената увијања; јефтино повезивање елемената конструкција, за употребу на високим температурама; израду непропусних спојева. [56]

Развој заварљивих конструкцијских челика започиње крајем 20-их година XX. века. У почетку производње таквих челика основни циљ био је повећање чврстоће, односно границе развлачења. Међутим, полазећи од све наглашенијих потреба за уштедом материјала и енергије у последње време све се већи значај усмерава према жилавости, заварљивости и способности обликовања. За све модерне високочврсте заварљиве челике карактеристично је да су микролегирани

с ниобијумом, ванадијумом, титанијумом или неким другим микролегирајућим елементом. Разлика у односу на уобичајен састав конструкцијских челика је у релативно ниском садржају угљеника и додатку микролегирајућег елемента.

Основни проблем при спајању метала и легура је заварљивост (лемљивост и лепљивост), укључујући и склоност ка настајању прелина услед структурних преображаја и образовања нових фаза услед дејства спољних напрезања односно сопствених напона изазваних технолошким процесом. Технологију заваривања у односу на друге технологије прате знатно већи сопствени напани и деформације, нарочито при заваривању делова већих дебљина и примене различитих додатних материјала. Основни проблеми заварљивости метала и легура свде се на њихова својства која се траже после заваривања. Коначна својства за дати материјал зависе од процеса и појава који настају у основним зонама завареног споја:

- у шаву, где се материјал потпуно топи и меша са додатним материјалом а затим очвршћава,
- у прелазној зони - зони стапања - полуистопљеног материјала,
- у зони утицаја топлоте (ЗУТ), где се основни материјал мења услед загревања и хлађења у чврстом агрегатном стању.

Најважнији део при експлоатацији на који је потребно осврнути се је квалитет завареног споја, затим контрола и ремонт заварене конструкције. Пројектовање челичних конструкција врши се коришћењем што мање масе материјала како се не би угрозила локална сигурност конструкције. Напон течења као параметар пројектовања те конструкција мање масе подразумева примену челика већег напона течења, што решава проблема њихове заварљивости [56].

4.1.1 Хетерогеност механичких особина и микроструктуре завареног споја

Методe за процену конструкционих грешака у хомогеном материјалу, самим тим и оцена интегритета конструкција хомогених структура, детаљно су разрађени и дати у форми приручника.

Проблем настаје када је потребно оценити интегритет заварене конструкције због изразите нехомогености структуре материјала уграђеног у конструкцију. На понашање завареног споја (ЗС) са прслином утиче више чинилаца: [59]

- хетерогеност материјала - метал шава (МШ), зона утицаја топлоте (ЗУТ), основни метал (ОМ), – заостали напони (услед заваривања и геометријских несавршености),
- ометена деформација
- несавршеност геометрије (однос димензија завареног споја, ширине метала шава и дужине и дубине површинске прслине).

Када разматрамо сигурност и поузданост таквог завареног споја изложеног деловању спољашњег оптерећења, проблему прслина треба прићи са два аспекта: најпре треба открити прлину (и друге грешке), одредити њену величину и положај, а потом оценити значај постојеће прслине за сигуран рад заварене конструкције, [58], а све у складу са тим да се постигне што бољи економски ефекат.

4.1.2 Заварене конструкције и оцена њихове сигурности у раду

Заварене конструкције заузимају важно место у савременој индустријској производњи. До њихове масовне примене дошло се развојем поступака заваривања с једне стране, и развојем челика погодних особина са друге стране. Увођење и развој заварених конструкција су од самог почетка праћени неповерењем у њихову експлоатацијску сигурност, па су се, са развојем поступака заваривања, паралелно развијали и поступци за оцену сигурности заварених спојева [56].

Проблем квалитета завареног споја остаје најважнији део на који се обраћа пажња при експлоатацији и контроли и ремонту заварене конструкције. Без обзира на хаварије које су претрпеле, примена заварених конструкција постаје све интензивнија, а развој се усмерава на поступке заваривања, додатне материјале за заваривање, усавршавање поступака контроле квалитета заварених спојева, развој и увођење нових материјала, као и све детаљније поступке прорачуна.

Захтев при пројектовању челичних конструкција је да се оне изведу уз утросак што мање масе материјала, а да притом не буду угрожене ни општа ни локална

сигурност конструкције. Као параметар при пројектовању, још увек се користи напон течења, стога конструкција мање масе подразумева примену челика већег напона течења, а увођење таквих челика условљава решавање проблема њихове заварљивости. Из тога произилази да се избор челика заварене конструкције своди на оптимално решење у погледу функционалности конструкције, њене масе, сигурности у експлоатацији и прикладности за заваривање. [56]

4.1.3. Оцена сигурности заварених спојева

Сигурности конструкција у току рада може се сагледати као:

1. Материјал хомогене структуре, када у њему нема грешака, изложен је униформном оптерећењу. Сигурност конструкције постиже се ако је највећи напон који делује на неку компоненту конструкције мањи од одговарајуће особине материјала, најчешће напона течења, одређеног аксијалним затезањем епрувете. Уводи се степен сигурности који обезбеђује да радни напон буде мањи од напона течења.
2. Материјал хетерогене структуре без грешака а различитих особина његових конституената (случај ЗС), изложен униформном оптерећењу, ако се као меродаван материјал узме структура материјала најнижих механичких особина, тада се сигурност конструкције се своди на варијанту 1.
3. Материјал хомогене структуре и механичких особина, са дисконтинуитетом у виду прслине. Сигурност конструкције се може оценити приступом линеарно еластичне механике лома (ЛЕМЛ), када се око врха прслине развија врло мала пластично деформисана зона у поређењу са димензијама компоненте и величином прслине, или, пак, приступом еласто- пластичне механике лома (ЕПМЛ), када је пластично деформисана зона велика.
4. Материјал хетерогене структуре, коју карактеришу разлике у механичким особинама, са дисконтинуитетом типа прслине (на пример, у ЗС). За оцену сигурности такве конструкције потребно је познавати механичке особине и отпорност према прслинама меродавних структура, а то су структуре у којима се налази врх прслине и структуре кроз које ће се прслина развијати. [56]

4.2. Теоријска анализа утицаја мисмечинга

Као што је немогуће избећи грешке у ЗС, немогуће је и не рачунати са хетерогеношћу материјала ЗС, па је неопходно да се утицају хетерогености на интегритет заварене конструкције посвети дужна пажња. У практичном смислу, утицај хетерогености материјала се најчешће своди на утицај мисмечинга,[59], односно на утицај разлике напона течења метала шави и основног метала. Најчешће се сматра да се утицај хетерогености материјала првенствено одражава на отпорност материјала на раст прслине (жилавост лома), а да мисмечинг утиче на силу раста прслине.

Код овермечинга пластична деформација простире се само у ОМ, што је по правилу повољнија варијанта јер ОМ има мање грешака или захвата обе области док се при андермечингу пластична деформација може да се ограничи на метал шави или може да се шири и по делу основног метала. Овермечинг спој без прслина (на пример код нисколегираних челика повишене чврстоће) некада је тешко направити па је андермечинг једино преостало решење. Одговорни ЗС захтевају упоредну анализу обе варијанте. Сила течења завареног споја одговара минималној вредности силе у оба случаја [61].

Утицај мисмечинга и хетерогености материјала није увек могуће раздвојити. Несиметрично отварање уста и врха прслине може се сматрати на првом месту утицајем мисмечинга јер се за ирачунавање отварања врха прслине (CTOD) узима количник напона течења ОМ и МШ. [61]

Употреба конструкционих челика високе чврстоће омогућава значајне уштеде у трошковима набавке, производње, уградње и испитивања заварених челичних конструкција. Управо челик класе чврстоће $R_{p0,2} > 690$ МПа омогућава и до два пута већу уштеду у укупним трошковима. Ипак, употребу овога челика прате и одређени проблеми у ограничењима постављеним у пројектним стандардима (кодовима) у погледу неповољног односа напона течења и затезне чврстоће, смањене пластичности, затим карактеристичне попуштене мартензитне структуре, повећаног угљиковог еквивалента, те склоности ка хладним прслинама. Зато је код ове класе челика потребно изводити нешто шира испитивања ради поузданије карактеризације заварених спојева.

Употребом челика високе чврстоће са напоном течења већим од 690МПа могуће је и до два пута смањити масу, а тиме и трошкове набавке, производње, уградње и испитивања челичне конструкције. Са друге стране, високочврсти челици имају одређене неповољне особине у поређењу са челицима ниже чврстоће. То су пре свега смањења пластичност (или дуктилност), захтеване карактеристике жилавости, и битно смањен однос напона течења и затезне чврстоће. Иако релативно успешно изводиво, заваривање ових челика је више захтевно, обзиром на повишен угљеник, мартензитну структуру, и тиме повећану осетљивост на хладне пррлине, те коначно потребу за предгревањем или чак термичком обрадом након заваривања. Челици изразито високе чврстоће углавном нису присутни или чак нису дозвољени за употребу у доступним пројектним стандардима за челичне конструкције. Ово је посебно истакнуто обзиром на њихов неповољан однос напона течења и затезне чврстоће. Једине карактеристике жилавости које се као обавезне и јасне узимају у обзир при пројектовању одговорних челичних конструкција су карактеристике ударне жилавости. Тако, да би се стекло више сигурности у примени високочврстих челика, стандардна испитивања затезањем и ударом морају бити праћена са одговарајућим испитивањима параметара механике лома. Ово је посебно битно обзиром на чињеницу да су од скоро развијене врло ефикасне методе (процедуре) процене интегритета и пројектовања различитих типова конструкција, базиране на познавању параметара механике лома.[62]

Када се CTOD мери директно може да се јави проблем али утицај мисмечинга на измерену вредност остаје. Када имамо овермечинг и ОМ, удаљена деформација достиже велике вредности, а вредност J интеграла је ограничен, у оба случаја андермечинга, ситуација је обрнута-удаљена деформација ограничена, а J интеграл достиже велике вредности. Ово је логична последица комбинованог дејства пластичне деформације и пррлине, тако што се код овермечинга пластична деформација развија првенствено у ОМ, а код андермечинга у МШ, при чему присуство пррлине у МШ троши енергију на J интеграл, уместо на развој пластичне деформације.[62]

Велика пррлина прекрива утицај мисмечинга, тако да деформација остаје ограничена, а J интеграл достиже подједнако велике вредности.

Механика лома је омогућила квантитативну анализу интегритета заварених конструкција.

Интегритет ЗС обезбеђују материјал довољне чврстоће и довољне жилавости, ограничен ниво оптерећења и ограничена величина прслине, уколико је има.

Услов за развој лома као основна поставка механике лома формулисан је неједначином:

$$\text{сила развоја прслине} > \text{отпорност материјала према прслинама} \quad (4.1)$$

сила развоја прслине = ϕ (оптерећење, геометријски облик машинског дела, величина, гео-метрија и положај грешке) отпорност материјала према прслинама (структура и особине материјала, радна температура, брзина деформације и ометена деформација –констраинт)

ЛЕМЛ (Линеарно еластична механика лома) користи се код сразмерно малих пластично деформисаних зоне у околини врха прслине у поређењу са величином машинског дела и саме прслине. [63]

Говорећи о ЛЕМЛ, сила развоја прслине представља се фактором интензитета напона KI (FIN), а отпорност материјала према прслинама критичном вредношћу фактора интензитета напона KI_c , названом још и жилавост лома при равној деформацији.

Ако се величина пластично деформисане зоне око врха прслине не може да се занемари у односу на величину посматраног машинског дела примењујемо ЕПМЛ (Еластопластична механика лома). [46]

J интегралом или отварањем врха прслине CTOD (Crack Tip Opening Displacement) представља се сила развоја прслине док је отпорност материјала према прслинама представљена критичном вредношћу J_c названом мером жилавости лома или критичним отварањем δ_c (CTOD_c).

Основна релација механике лома у условима ЕПМЛ је:

$$J \geq J_c \quad 4.2$$
$$CTOD \geq CTOD_c$$

Развој прслина у материјалу код пузања испитује се на СТ (Compact Tension) епруветама са зарезом, при константном оптерећењу и константној температури.

Зарез на епрувети симулира присуство иницијалне прслине у неоштећеном материјалу настале при изради компоненте или настале током експлоатације неким механизмом различитим од пузања (на пример замором, или напонском корозијом). Механика лома пружа оцену значаја и предвиђа развој такве прслине у условима пузања, али није у стању да пружи поуздано предвиђање развоја прслине у материјалу хомогено оштећеном процесом кавитације при деловању пузања.

4.3 Настајање различитих микроструктура код заваривања

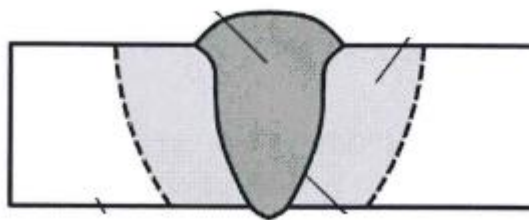
Како би дефинисали оцену својства појединих зона завареног споја морамо знати како до стварања тих зона долази. Поступци заваривања могу се поделити на поступке заваривања топљењем и поступке заваривања притиском. Ралика је у количини унете топлоте у зону заваривања која се кондукцијом преноси и на околни материјал који не учествује директно у процесу заваривања температура загревања околног материјала и његова ширина расту повећањем количине унете топлоте.

Током заваривања, основни материјал најближи жлебу се загрева скоро до температуре топљења а са удаљавањем од ивице жлеба температура опада све до слоја материјала чија се температура уопште није мењала. На тај начин се у зони основног материјала око шави ствара градијент температуре у интервалу од температуре топљења па до било које температуре у зони основног материјала на одређеном растојању од ивице жлеба. При хлађењу споја, по завршетку заваривања, свака зона се хлади са температуре на коју је претходно загрејана и са различитом брзином хлађења. Пошто део материјала у околини жлеба трпи загревање и хлађење током заваривања, то значи да је неминовно очекивати у тој области, независно од врсте материјала која се заварује, одређене промене у структури материјала а самим тим и особинама. Структурне промене које могу да се јаве при загревању и хлађењу металних материјала при заваривању су раст и огрубљавање кристалних зрна, рекристализација, алотропске трансформације, еутектоидно разлагање, растварање и таложење секундарних фаза. Поред структурних промена и дејства напонског и термичког градијента, често се, у зони материјала која је под утицајем топлоте, јавља и хемијска нехомогеност [64].

Заваривање металних материјала је повезано са протицањем сложеног комплекса промене фазног и структурног стања метала као последице услова уношења топлоте, неравномерног топлотног поља, локалних загревања, специфичних услова хлађења, итд. Величина брзине загревања и хлађења одређује особености протицања фазних преображаја, а присуство градијента температуре и напона различитост у процесима фазних и структурних преображаја по зонама. На тај начин специфични процеси при загревању и хлађењу заварених спојева одређују нека битна карактеристична својства завареног споја, која у крајњој линији одређују његова експлоатациона својства.

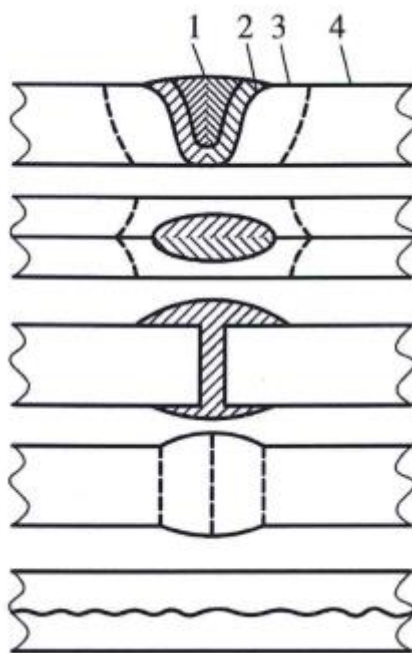
Код заварених спојева, који се образују заваривањем топљењем, може да се уочи постојање неколико зона које се разликују по хемијском саставу, макро и микро структури и по другим особеностима. Зоне које се јављају у завареним спојевима су: зона метал шави (вар), зона стапања (фузиона зона), зона утицаја топлоте (ЗУТ) и зона основног метала (ОМ) [64].

На слици 4.2 приказана је могући изглед профила попречног пресека завареног споја сврстаних у једну од пет категорија. Код прве три категорије метални спој образује се при контакту течног и чврстог стања материје док се четврта и пета категорија остварују при контакту у чврстом стању.



Зоне завареног споја

Слика 4.1 Зоне завареног споја



Слика 4.2 Могући изглед профила попречног пресека завареног споја [55]

Код споја течно-чврсто могу се уочити четири различите зоне и то након макронагризања претходно припремљеног, брушењем и полирањем попречног пресека завареног споја [55]

- Зона метала шави (зона топљења) образована очвршћавањем растопљеног металног купатила
- Зона стапања (фузиона зона) непосредно а граници зоне топљења
- Зона утицаја топлоте (ЗУТ) где се јављају структурне промене у ОМ у зависности од времена држања на релативно високој температуре, затим поступка заваривања и режима хлађења
- Зона основног метала (ОМ) који би требало да буде са непромењеном структуром и ако овде може доћи до појаве заосталих напона

Спој чврсто-чврсто образује се у прелазној зони са делимичним топљењем ивица које се заварују али и без њиховог топљења. Зона топљења потпуно одсуствује у том случају док ЗУТ се може јавити понекад.[55]

4.4. Грешке у изради заварених спојева

Под грешкама се сматрају оне индикације које прелазе критеријуме прихватљивости за поједине типове грешака па се тако грешке у завареним спојевима које настају у изради могу се поделити према:[65]

1. Узроку настајања: конструкцијске грешке, металуршке грешке и технолошке грешке.
2. Врсти: плински укључци, укључци у чврстом стању, наљепљивање, недостатак провара, прслине и грешке облика и димензија.
3. Положају: унутрашње грешке, површинске и подповршинске грешке и грешке по целом пресеку.
4. По облику: компактне грешке, издужене грешке, оштре грешке (јако изражено зарезно деловања), заобљене грешке (мање изражено зарезно деловање), раванске грешке (може се занемарити трећа димензија грешке) и просторне грешке (узимају се у обзир све три димензије грешке).
5. По величини: мале грешке, грешке средње величине и велике грешке.
6. По бројности: појединачне грешке, учестале грешке и гнездо грешака.

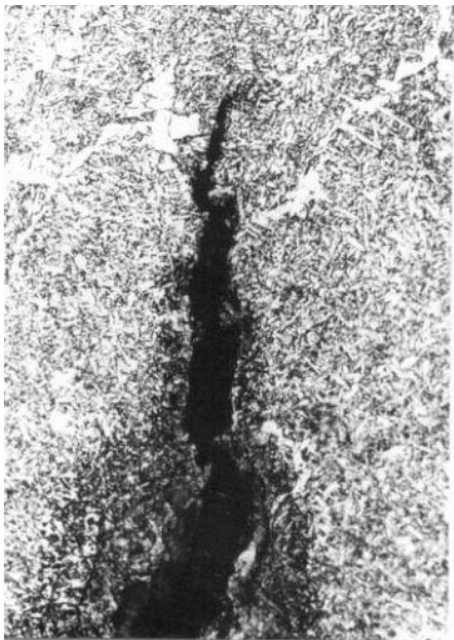
Конструкцијске грешке настају због лошег конструкцијског обликовања заварене конструкције (нпр. заваривање у неприступачном и скученом простору, лоше обликовање детаља на завареној конструкцији са гледи ништа динамичке издржљивости, и др.).[65]

Металуршке грешке везане су уз металуршке, термодинамичке и хидродинамичке кристализације и хлађења завареног споја. Грешке овог типа могу бити различите врсте прслина, поре, укључци, троска, превише закаљена структура и др.

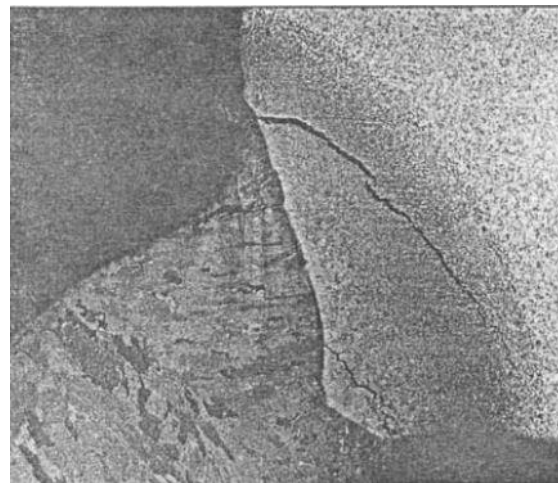
Технолошке грешке последица су лоше прописане технологије заваривања или да се квалитетно прописана технологија заваривања не проводи у потпуности при заваривању конструкције. Да би се осигурало провођење прописане технологије заваривања код одговорнијих заварених конструкција често пута је потребан напор (интерни и/или екстерни) и праћење како стабилности процеса заваривања, тако и квалитете рада појединих заваривача и погона.

Далеко најопасније грешке у изради заварених конструкција су прсине, а оне могу бити:

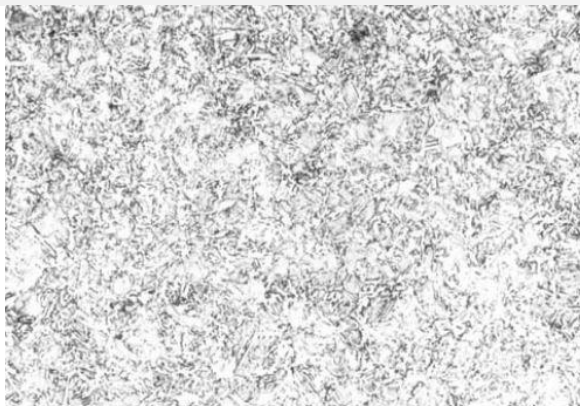
- хладне (Cold cracking),
- топле (Hot cracking),
- услед накнадне обраде (Post weld heat treatment cracking) и
- услед слојасог или ламеларног одвајања (Lamellar tearing)



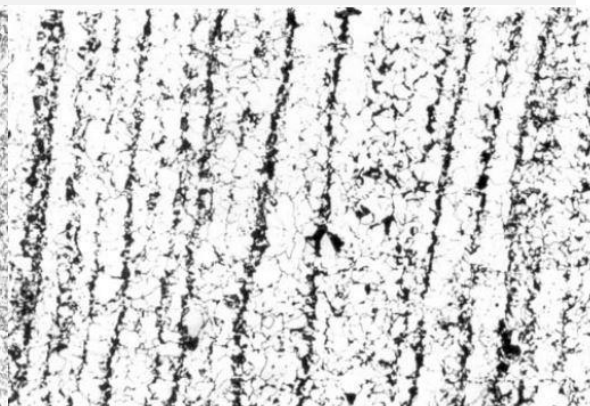
Слика 4.3 Врх хладне прсине



Слика 4.4 Пример хладне прсине настале у зони утицаја топлоте



Слика 4.5 ЗУТ



Слика 4.6 Основни материјал

Прслине се сматрају нај опаснијим грешкама у завареном споју. Смањују носиви пресек, чврстоћу завареног споја и чврстоћу завареног споја те нису допуштене у истом. Најчешће се срећу хладне прслине. Свака прслина у условима који погодују њеном ширењу може довести до отказа завареног споја или производа у експлоатацији.

4.4.1. Хладне прслине (закаселе хладне прслине)

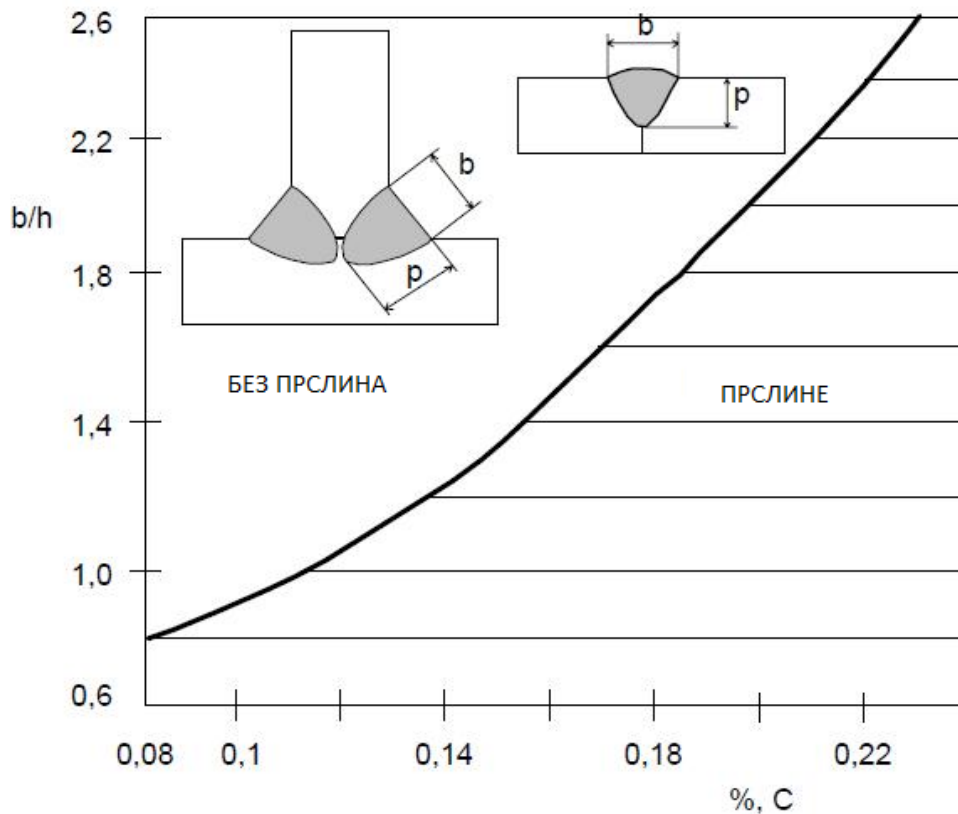
Могу бити уздужно или попречно положене на шав или на прелазу у основни материјал. У зависности од смера простирања могу бити лонгитудиналне (Л) и трансферзалне (Т) прслине. Узроци настајања хладних прслина су неповољан положај укључака у шаву, скупљања шава (деловање напрезања, постојање заосталих напона); структура метала шава; присутност водоника у шаву; код метала склоног очвршћавању, нарочито у ЗУТ-у; склоности материјала према каљењу.

Када говоримо о хладним прслинама, преломљена површина је светла док је код топлих прслина тамнија, долази до површинске оксидације јер настају на повишеним температурама.

Због утицаја високих притисака (при хлађењу водоник прелази у молекуларно стање) они се међусобно повезују у мању или већу прслину, посебно када још додатно делују високо напрезање настало због скупљања метала шава. Водоник долази у шав разлагањем влаге на високим температурама, у облози електроде или у заштитном плину али и из других нечистоћа на површини места шава као што су: влага, рђа масноћа. На површини лома се могу уочити тзв. ”рибље очи” и “пахуљице”. Та су места карактеристична јер се на њима накупио водоник који није дифундирао из завареног споја. Он представља дисконтинуитет у завареном споју, а то доводи до смањивања носивости пресека.

Последња фаза очвршавања метала шава код високих температура доводи до напрезања који шав не може издржати, што се сматра главним узроком настајања топлих прслина. Настајање топлих прслина може се објаснити на следећи начин:

- зону топљења попуњава део између страница жлеба, очвршавања швава започиње од страница које су хладније и иде према средини;
- ако надвлада скупљање у процесу између скупљања и очвршћавања, зрна материјала ће остати раздвојена у топлом стању- топла прслина;
- између зрна очврסлог материјала преостаје танки филм раствора у завршној фази очвршавања те се подручје скупља у смеру супротном од правца очвршавања.



Слика 4.7 Појављивање топлих прслина обзиром на однос пенетрације и ширина швава према садржају угљеника у шаву

4.4.2 Избегавање настајања прслина

Нестајање прслина се не може избећи, али се може смањити и деломично отклонити. При извођења конструкције треба радити са што мање уношења

додатног материјала и мањом чврстоћом завареног споја. Унос енергије (E) је битан за правилан избор поступка заваривања, параметара и осталих услова шава. За додатни материјал за заваривање потребна је препоруке за употребу произвођача додатних материјала. При заваривању челика потребно је узети електроде с базичном облогом и малим садржајем водоника, базично пуњење жице и базичне прашке. Место заваривања мора бити чисто од влаге и других нечистоћа.[56]

Најбитније је руковање и правилно сушење додатних материјала. Склоност хладним прслинама процењује се аналитички на основи различитих формула за еквивалент угљеника. Сви нелегирани и нисколегирани челици код којих еквивалент угљеник C_{ekv} .

$$C_{ekv} = C + Mn/6 + Ni/15 + Mo/4 + Cr/5 + Cu/13 + Si/26 + P/2 + V/5$$

Ако прелази вредност 0,45 склони су прслинама.

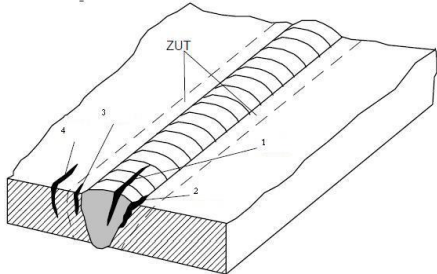
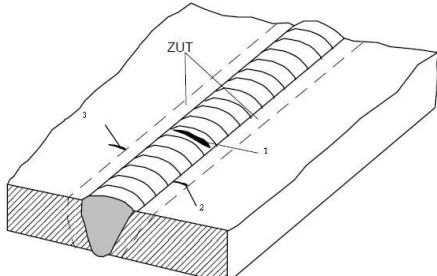
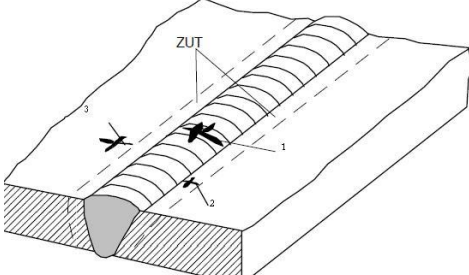
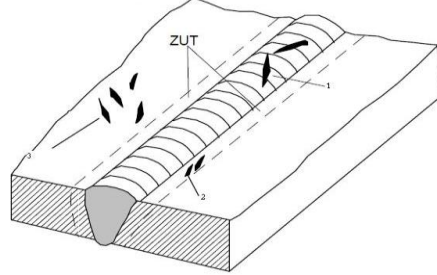
Да би се избегле прслине треба их прегрети пре заваривања и држати на одговарајућој температури током заваривања (температура између пролаза).

Визуелна контрола заварених спојева изводи се пре свих контрола помоћу одговарајућих лупа и осветљења. Површинске прслине и прслине кроз целу дебљину лима најбоље се откривају магнетском и методом пенетрантске контроле.

Према наведеним примерима и узрока настајања прслина, могу се поставити основна правила за избегавање настајања прслина:

- правилан избор поступка заваривања;
- правилан избор додатног материјала (додати детаљне препоруке произвођача);
- сушење електроде пре заваривања;
- избегавати оштећења површине материјала;
- проводити редослед заваривања који осигурава најмање заостале напоне;
- ограничити унос топлоте током заваривања и
- чистоћа у припреми споја за заваривање; по потреби вршити прегревавање и одржавање температуре

Табела 4.1 Примери врста прслина [52]

Врсте прслина		
<p>Уздужне прслине</p> 	<p>Прслина чији је главни правац паралелан са осом шав, (уздужно на шав) Може се налазити: - у шаву - на граници топљења - у зони утицаја топлоте (ЗУТ) -у основном материјалу, ван ЗУТ-а</p>	<p>1-Прслина са микроскопским димензијама 2-на граници топљења 3-у зони утицаја топлоте (ЗУТ) 4-у основном материјалу, ван ЗУТ-а</p>
<p>Правац попречан на осу шав</p> 	<p>Прслине чији је правац попречан на осу шав. Може се налазити: 1- у шаву 2-у зони утицаја топлоте (ЗУТ) 3-у основном материјалу, ван ЗУТ-а</p>	
<p>Прслине звездастог облика</p> 	<p>Прслине које полазе из исте тачке и зракасто се распростиру. Могу се налазити: 1- у шаву 2- у зони утицаја топлоте (ЗУТ) 3-у основном материјалу, ван ЗУТ-а</p>	
<p>Прслине у одвојеним групама</p> 	<p>Група одвојених прслина са различитом оријентацијом. Може се налазити: 1-у шаву 2-у зони утицаја топлоте (ЗУТ) 3-у основном материјалу, ван ЗУТ-</p>	

<p>Разгранате прслине</p> 	<p>е) Скуп прслина које су међусобно повезане и полазе из исте тачке Треба их разликовати од групе одвојених прслина и од прслина звездастог облика. Могу се налазити: - у шаву - у зони утицаја топлоте (ЗУТ) -у основном материјалу, ван ЗУТ-а</p>	
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Оштећења услед прслина се јављају на конструкцијама из више разлога. Један од њих је могућност да материјал садржи структурне грешке. Прслине се такође могу створити током фазе израде конструкције, или касније као резултат околних услова. Присутност таквих прслина или напуклина може значајно деградирати интегритет конструкције под деловањем примењених оптерећења и околних услова.[67]

Механика лома је техничка дисциплина која се заснива на дисциплинама примењене механике и науке о материјалима са сврхом разумиевања поља напрезања и деформације око врха прслине. Познавање поља напрезања и деформације помаже у обликовању поузданих и сигурних конструкција. Уобичајени концепти обликовања конструкције користе приступ у којем је чврстоћа материјала параметар на којем се темеље. Међутим, овај приступ не узима у обзир повишене односе напрезања узроковане постојањем прслина. Присутност таквих напрезања може довести до катастрофалних кварова конструкције.

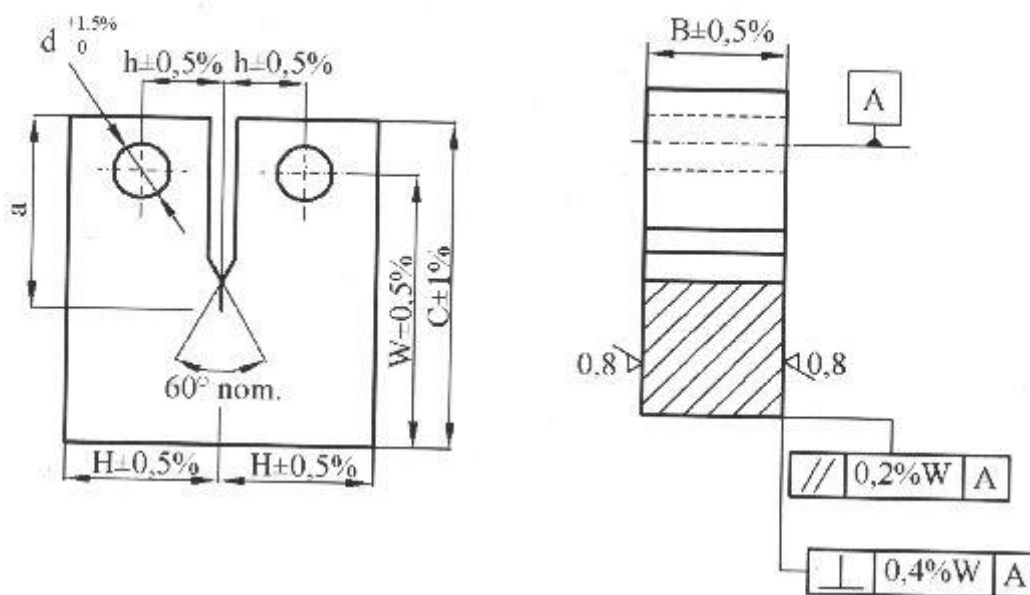
Механика лома објашњава утицај прслина или напуклина на стање конструкције. Обликовање конструкције уз приступ механике лома узима величину прслине као једну важну варијаблу, такође се за меродаван параметар материјала уместо чврстоће материјала узима постојаност на лом.

Анализа лома се уобичајено одвија или коришћењем енергетског услова или услова фактора интензитета напора. Када се користи енергетски услов, постојаност на лом се карактерише енергијом потребном за јединично повећање

прслине (промена отпуштене енергије). Када се користи услов фактора интензитета напрезања, постојаност на лом се карактерисе критичном вредношћу амплитуде поља напрезања и деформације. Ови изрази су под одређеним условима еквивалентни.

4.5. Савијање у три тачке

Да би се добила што потпунија слика о примени испитивања механике лома на заварене спојеве потребно је описати епрувете и указати на грешке и одступања која су при том могућа. Пре свега, предвиђено је да се епрувете механике лома испитују затезањем или савијањем.[63] Међу бројним облицима који су у различитим истраживањима коришћени, најширу примену су нашле епрувете за савијање у три тачке и компактне епрувете за затезање, слика 4.8.



Слика 4.8 Компактне епрувете за затезање [55]

Епрувета за савијање у три тачке (савијање силом) се показала веома прикладном за праксу, па се примењује у испитивањима сва три наведена параметра механике лома (K_{Ic} , δ , J). Компактна епрувета за затезање омогућава значајну уштеду материјала у поређењу са другим облицима епрувета, као и сразмерно мању силу за испитивање.[55]

Испитивања механике лома су веома сложена. Да би се добили што тачнији резултати све фазе испитивања су прецизно дефинисане и сви захтеви у погледу

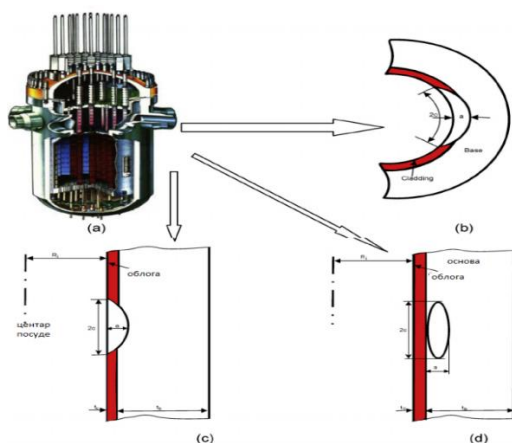
важења резултата морају да буду испуњени. При том се структура материјала, од кога су епрувете израђене, сматра хомогеном, што омогућава да дефиниције буду довољно прецизне. Ипак је потребно да се истакну могућа одступања у резултатима испитивања, како би се и она узела у обзир када се испитују епрувете са прслином из завареног споја, чија је структура хетерогена:

- утицај коначности димензија епрувета,
- одступања и грешке израде и припреме епрувета,
- одступања и грешке везане за процес испитивања, и
- одступања и грешке у анализи резултата испитивања.

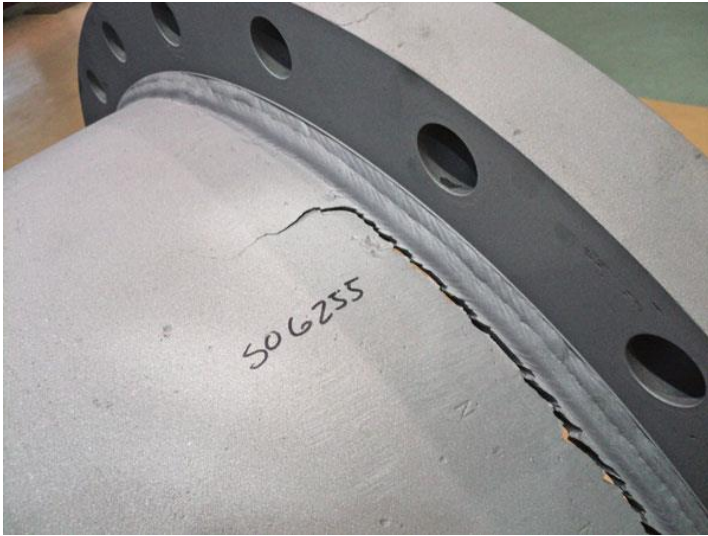
Први утицај на тачност резултата је коначност димензија епрувета. Параметри механике лома су првобитно дефинисани за танку плочу бесконачне дужине и ширине. Увођењем граничних услова због коначних димензија плоче морају се резултати кориговати, јер однос дужине прслине a и ширине плоче је коначна вредност и не може се занемарити као у случају бесконачне плоче. Тај се проблем решава тзв. калибрацијом [46]. Када је однос дужине прслине и ширине епрувете мали (близак нули,) важи основна једначина механике лома, којом се одређује фактор интензитета напона K .

4.6. Испитивање реалних посуда под притиском

4.6.1 Примери врста прслина у посудама под притиском



Слика 4.9 Област појаса посуде под притиском [68]



Слика 4.10 Прлина у прирубници главе одвода која је изазвала заморни лом завареног споја пумпе [68]



Слика 4.11 Проблеми са квалитетом заварених спојева услед неодговарајућих прелаза, непоклапања и пракси у заваривању цеви великог пречника [68]

Велики број делова и конструкција изложен је у току рада оптерећењима променљивим по величини, а често и по смеру. Услед дуготрајног дејства периодично променљивих оптерећења може да настане постепено разарање материјала. Та појава назива се замарање, а тако изазван прелом услед замора. Као основу за рационалније димензионисање делова изложених променљивим

оптерећењима потребно је изнаћи динамичку чврстоћу, тј. највећи напон који материјал може издржати без лома и при неограниченом броју промена оптерећења. Испитивање замарањем пружа могућност за њено одређивање.

Чврстоћа при променљивом оптерећењу зависи од читавог низа утицајних величина: квалитета и стања површине, евентуалних корозионих оштећења, фреквенције оптерећења, температуре, облика, димензија итд. Утицај облика је толико велики да се испитивања морају извести на самим конструкцијама под условима који су што је могуће више слични условима експлоатације.

Најмањи део функције оптерећење- време, који се периодично понавља, назива се циклус. Број циклуса у јединици времена представља фреквенцију (f). Амплитуда је апсолутна вредност половине алгебарске разлике горњег и доњег оптерећења. Карактеристичне величине при испитивању замарањем број циклуса n -број циклуса до одређеног момента посматрања. број циклуса до лома N -број циклуса који испитивана епрувета издржи до појаве прелине.

Динамичка чврстоћа (динамичка издржљивост) за N циклуса σ_N , односно напон τ_N је онај при којем епрувета издржава N циклуса до лома. Одређује се из Велеровог дијаграма замарања. Динамичка чврстоћа (динамичка издржљивост) σ_N , односно напон τ_N је онај који епрувета може издржати без лома и при неограниченом броју циклуса. Одређује се из Велеровог дијаграма замарања. Гранични број циклуса ND најмањи број циклуса после којег не настаје лом при неограниченом броју циклуса. Одређује се из Велеровог дијаграма замарања.

4.6.2. Одређивање динамичке чврстоће

Испитивање замарањем у циљу одређивања динамичке чврстоће може се вршити затезањем, притискивањем, савијањем или увијањем, или комбиновањем ових напрезања.

Облик и димензије епрувета за нормална испитивања прописују се одговарајућим стандардима у зависности од сврхе и начина испитивања замарањем. За посебна испитивања и заварене спојеве користе се специјални облици епрувета који требају да буду слични облику одговарајућег конструкционог дела, или се испитују сами конструкциони делови.

Поступак обраде епрувета не сме да измени структуру ни особине материјала. Нарочиту пажњу треба обратити квалитету храпавости површина епрувете. Оне морају бити брушене, евентуално и полиране и погодним средством заштићене од корозије. Број епрувета за једно испитивање може бити врло различит, у зависности од података који се траже. Учвршћивање епрувете у чељусти машине за испитивање замарањем треба да буде изведено пажљиво, тако да епрувета у току испитивања не би била изложена допунским оптерећењима или вибрацијама.

Начин оптерећивања зависи од врсте напрезања и мора да буде једнак за све епрувете у току једног испитивања. Фреквенција треба да буде тако одабрана да се избегне претерано загревање епрувете у току испитивања. Ако се загревање не може избећи, епрувету треба у току испитивања хладити погодним антикорозивним средствима. При посебним испитивањима епрувете или конструкционог дела, начин оптерећивања и фреквенција треба да што ближе одговарају радним условима.

За сваку епрувету региструје се број циклуса N при којем је настала прслина на епрувети. Смањење амплитуде напона врши се све до вредности при којој се епрувета не ломи ни пошто је издржала веома велики- гранични број циклуса N_D . Под граничним бројем циклуса N_D подразумева се најмањи број циклуса после којег не настаје лом ни при неограниченом броју циклуса. Пошто се вредност граничног броја циклуса N_D унапред не зна, при

$$\sigma_D = \sigma_{SR} \pm \sigma_A$$

где су:

$\sigma_{SR} = F_{SR} / A$ – средњи напон, $\sigma_A = F_A / A$ – амплитуда динамичке чврстоће епрувете.

Најмањи број циклуса после кога не наступа лом ни при неограниченом броју циклуса за дати напон, назива се гранични број циклуса (N_D).

Испитивањем је утврђена експоненцијална зависност између динамичке издржљивости σ_N и броја промена напона до разарања N . На основу напред изложеног произлази да ако је епрувета или машински део изложен променљивом радном напону, меродавни критични напон је динамичка издржљивост. То је напон који доведи до лома машинског дела или епрувете после N циклуса промена. За тачно цртање експоненцијалне криве у природном координатном

систему, потребан је релативно велики број тачака које се утврђују експериментално.

При трансформацији координата из природног у једноструки логаритамски координатни систем ова крива се преслика у праву линију. Како је права линија дефинисана са две тачке, то је и број потребних експеримената смањен односно сведен на испитивање само за два нивоа напона. Динамичка чврстоћа τ_D , односно напон τ_D може се исказати као напон састављен од збира средњег напона и највеће амплитуде напона који епрувета може издржати без лома и при неограниченом броју циклуса.

Према томе динамичка чврстоћа σ_D , односно τ_D може се исказати као напон састављен од збира средњег напона σ_{sr} , односно τ_{sr} и највеће амплитуде напона σ_A , односно τ_A , који епрувета може издржати без лома и при неограниченом броју циклуса.

Нумерички се динамичка чврстоћа може изразити двојачко:

- a) као симбол $\sigma_D = \sigma_{sr} \pm \sigma_A$ где $\sigma_{sr} + \sigma_A$ представља горњи гранични напон, а $\sigma_{sr} - \sigma_A$ доњи гранични напон, на пример $\sigma_D = 200 \pm 50 \text{ N/mm}^2$;
- b) као вредност горњег граничног напона, уз назначење средњег напона, на пример: $\sigma_D = 250 \text{ N/mm}^2$, при $\sigma_{sr} = 200 \text{ N/mm}^2$

5. ОСОБИНЕ И ПОНАШАЊЕ МИКРОЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА

5.1. Микролегирани конструкциони челици

Челици су су врло компликоване легуре железа и угљеника и других елемената, те су већ више хиљада година поред камена и дрвета најупотребљаванији конструкциони материјал, који се током дугогодишње употребе вековима стално усавршавао, како у процесу израде, прераде и термичке обраде, тако и повећањем количине и проширења подручија употребе. Њихова велика предност је потпуна способност рециклаже [36]

Прва генерација микролегираних конструкционих челика базирана је на С - Mn конструкционим челицима са високим садржајем С и Mn, којима су се додавали елементи V и Nb у стотим деловима % за смањење кристалног зрна и повећање напона течења и чврстоће, али се погоршавала жилавост и заварљивост челика. Код заваривања су потребне прилично високе температуре предгревања. Испитивања дејства абсорбованог водоника на тим челицима у агресивним медијима, показала су лошу отпорност на водоничну кртост и због чега долази до кртих ломова и на иначе врло жилавим конструкцијама. Друга генерација микролегираних конструкционих челика је пројектована тако да се избегну недостаци прве генерације. Угљеник је смањен са 0,20% на испод 0,10%, а у неким термомеханички ваљаним и контролисано хлађеним челицима чак на испод 0,05%. Главни легирајући елементи су Nb, Mo, Cr, Ni и Ti у минималним количинама. Понекад се додаје и V у хиљадитим деловима %. Са интензивним уситњавањем кристалног зрна поступком термомеханичког ваљања и убрзаног контролисаног хлађења одмах после завршетка ваљања, или понекад са коначним побољшањем, ови челици поред високих вредности напона течења и чврстоће, имају због ниског S_{ekv} одличну заварљивост и способност деформације на хладно. Испитивања дејства абсорбованог водоника на тим челицима у агресивним медијима потврдила су добру отпорност на водоничну кртост [36]

Микролегирани челик или ситнозрнати микролегирани челик повишене чврстоће (High-strength low-alloy steel или HSLA steel) је врста угљеничног челика који има повећану чврстоћу, уз истовремену уштеду легирајућих елемената, а остварује се применом поступка микролегирања. Микролегирање се користи првенствено код израде конструкцијских челика које карактерише висока граница

развлачења, задовољавајућа пластичност, незнатна склоност кртом лому, те добра заварљивост. Микролегирајући елементи углавном делују стварањем карбида NbC и VC, нитрида NbN и VN, те карбонитрида V(CN) и (Nb,V) (C,N), који спрјечавају раст аустенитног зрна..

Феритно-перлитно зрно биће ситније што је било ситније аустенитно зрно. За све модерне високочврсте заварљиве челике карактеристично је да су микролегирани с ниобијем, ванадијем, титанијем или неким другим микролегирајућим елементом. Разлика у односу на уобичајен састав конструкцијских челика је у релативно ниском садржају угљика и додатку микролегирајућег елемента. Садржај микролегирајућег елемента у микролегираним челицима износи од 0,01 до 0,1%, а садржај угљика је врло низак (0,02 - 0,20%). Микролегирајући елементи не мењају основну врсту челика тј. нелегирани челик остаје нелегиран, нисколегирани челик остаје нисколегиран.

Повишено напрезање течења микролегираних челика омогућује израду лакших конструкција, тако да су се ови челици употребљавају за израду мостова, грађевинских машина, ценовода за хидроелектране, ауто и вагон цистерни, у бродоградњи. [69]. У примени ових конструкција најчешће се јављају грешке типа прслина. Највећи број прслина откривен је на местима највећих напрезања, а најчешће у зони утицаја топлоте заварених спојева.

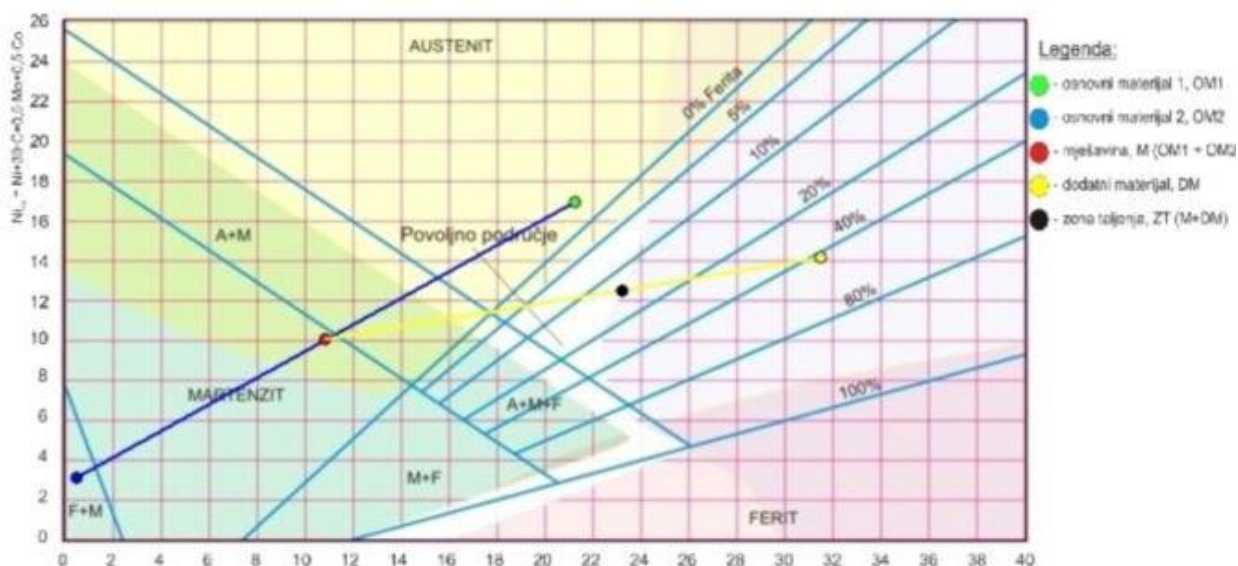
Три групе микролегираних челика разликују се зависно о постигнутом напрезању течења и то:

- микролегирани челици с напрезањем течења (граница развлачења) до 550 МПа, које се постиже након ваљања и нормализације,
- микролегирани челици с напрезањем течења до 1500 МПа, које се постиже након побољшања (каљење + попуштање),
- микролегирани челици под називом ултрачврсти челици с напрезањем течења изнад 1500 МПа, које се постиже термомеханичким контролираним ваљањем. [69]

Хемијски састав МШ уз ОМ је последица хемијских састава ОМ, ДМ и степена њиховог мешања. Идући ка средини шава удео ОМ у МШ се смањује па се хемијски састав МШ тежи хемијском саставу ДМ. Ово је утолико више изражено уколико се заварују дебљи материјали код којих је и лице шава шире. На основу

овога се може закључити и да лева и десна страна хетерогених спојева неће имати исти хемијски састав због разлика у хемијским саставима ОМ. Промене хемијског састава МШ се могу очекивати и по његовој висини. Само у кореном делу шава, хемијски састав МШ је последица истовременог мешања оба ОМ и ДМ и, у ствари, се једино он може одредити на начин описан у претходном пасусу. Идући ка лицу шава удео ДМ у МШ се повећава па се хемијски састав МШ приближава хемијском саставу ДМ. [14]

Ако се имају у виду хемијски састави микролегираних и аустенитних нерђајућих челика и хемијски састави ДМ који се користе за њихово међусобно заваривање и напред наведена разматрања може се, опет уз помоћ Шефлеровог дијаграма, сл. 5.1, прецизније предвидети структура у појединим деловима МШ и њихова евентуална склоност ка појави грешака. Тако нпр. у делу МШ ка микролегираном челику може да се очекује појава једне зоне која, поред високог садржаја легирајућих елемената има и повишен садржај С, Р и S и у којој су зато могуће појаве мартензита и с њим у вези хладних прелина, топлих прелина и повећана склоност ка интеркристалној корозији. У средини МШ се може појавити повећана количина δ -ферита која повећава кртост због издвајања σ -фазе, у случајевима избора ДМ са већим Cr еквивалентом или се могу појавити топле прелине у случају недовољне количине δ -ферита, у случајевима избора ДМ са већим Ni еквивалентом..



Слика 5.1. Schaefflerov дијаграм [69]

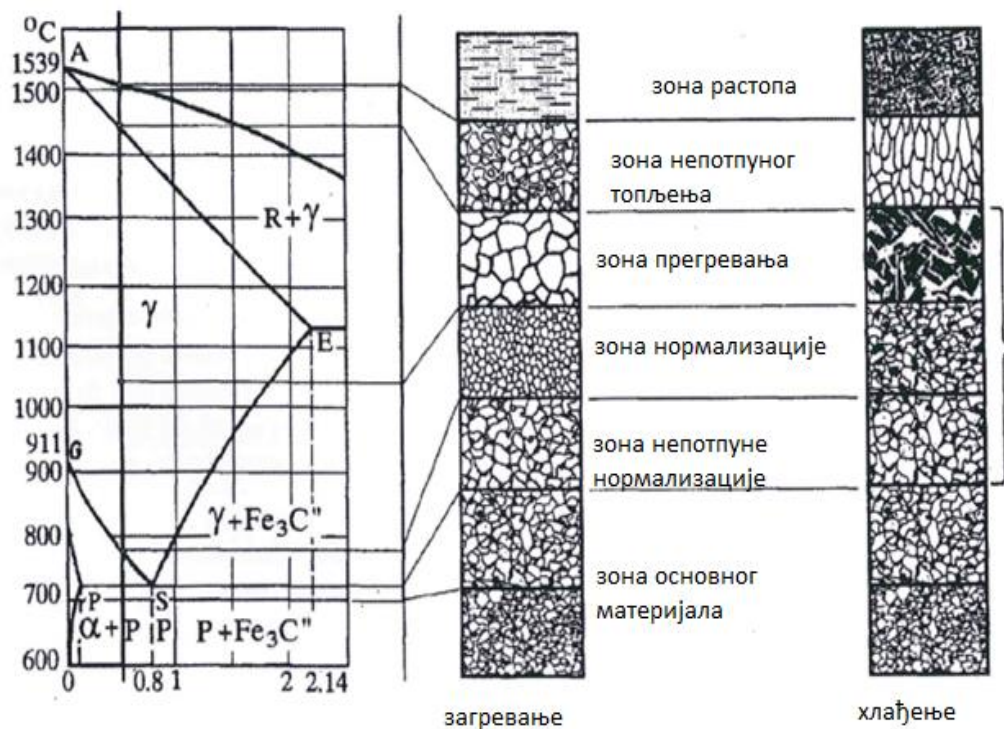
Када је реч о хетерогеним АФ спојевима поступак оцене сигурности је сложенији у односу на хомогене спојеве и зато што разлике у неким њиховим особинама смањују поузданост утврђивања оствареног квалитета споја методама ИБР.

5.2. Структурне промене аустенитно феритном завареном споју

Услед дејства термичког циклуса при заваривању (загревање или хлађење) настају различите структурне промене, зависно од поступка и параметара заваривања, као и од врсте и стања основног метала. У случају нискоугљеничног жареног челика могу да настану зона растопа, зона непотпуног топљења, зона прегревања, зона нормализације, зона непотпуне нормализације и зона основног материјала, а у случају хладноваљаног челика настаје још и зона рекристализације. [71]

При загревању подеутектоидног жареног челика уочљиво је следеће, сл. 5.2.

загревањем до А1 линије феритно-перлитна структура и даље доминира, али феритно зрно постаје све крупније (зона основног материјала); између А1 и А3 линија структура се састоји од крупнозрног ферита и ситнозрног аустенита (зона непотпуне нормализације); изнад А3 линије аустенитизација је завршена (зона нормализације); област која је најближа ивицама растопљеног жлеба је загрејана скоро до солидус А4 линије, па је у њој доминантан крупнозрни аустенит (зона прегревања); изнад А4 линије настаје делимично топљење по границама аустенитних зрна (зона непотпуног топљења).



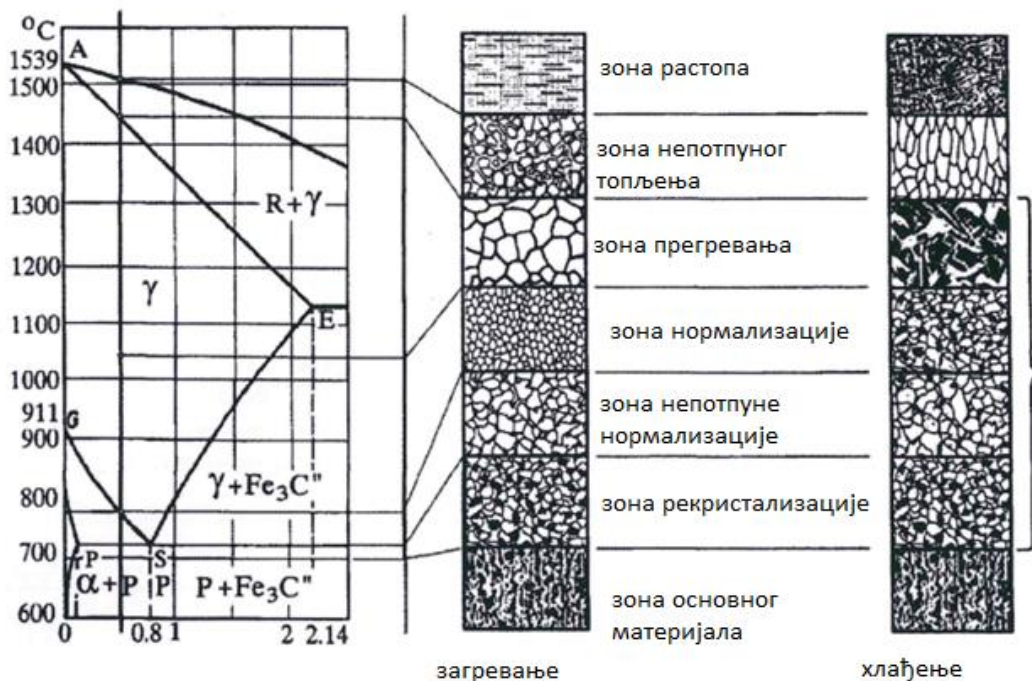
Слика 5.2. Структуре у жареном челику при загревању и хлађењу током заваривања [71]

При хлађењу подеутектоидног жареног челика настају следеће зоне:[71]

- зона непотпуног топљења, која настаје у области између солидус и ликвидус линије и одликује се усмереним кристалним зрнима, у правцу најбржег одвођења топлоте;
- зона прегревања, која настаје у области крупнозрног аустенита и има нехомогену расподелу угљеника, тако да у областима сиромашним угљеником постоје услови за настанак крупноигличасте феритне фазе (Видманштетенова структура), док у областима богатим угљеником може да настане мартензит;
- зона нормализације, која настаје у области ситнозрног аустенита под условима који одговарају истоименој термичкој обради;

Зона непотпуне нормализације (делимичне прекристализације), која настаје у области мешовите феритно-аустенитне структуре, одликује се феритом крупнијег зрна и перлитом ситнијег зрна; при хлађењу подеутектоидног хладноваљаног

челика осим наведених зона, настаје још и зона рекристализације, која је јавља у области деформисаних зрна.



Слика 5.3. Структуре у хладноваљаном челику при загревању и хлађењу током заваривања [71]

Прва зона, која је означена као зона прегревања, се образује хлађењем из области крупног и грубог аустенитног зрна. Због брзине загревања при заваривању настала крупна аустенитна зрна се не одликују хомогеном расподелом угљеника, већ постоје области у оквиру једног зрна које су значајно осиромашене угљеником, односно области у којима је садржај угљеника висок. При хлађењу, у осиромашеним областима аустенитног зрна на угљенику су створени услови за образовање феритне фазе која има специфичан крупноигличасти изглед.

Ферит оваквог изгледа је познат као Видманштетенова структура. Области у аустенитном зрну које су обогаћене на угљенику се у екстремном случају трансформирају у мартензит. Зона прегревања која се састоји од крупноигличастиг Видманштетеновог ферита и мартензита се одликује високом тврдоћом и повећаном кртости односно смањеном жилавости услед чега

представља повољно место за појаву прслина. Пошто присуство ове зоне неповољно утиче на перформансе завареног спој а неопходно је по заваривању применити одговарајућу термичку обраду за побољшање својстава. У случају легираних челика, а зависно од легирајућих елемената зона прегревања у оваквом структурном облику може да одсуствује [71].

Друга зона је позната као зона нормализације а настаје хлађењем из области ситнозрнастог аустенитног зрна. Према температури са које се врши хлађење и према брзини којом се врши хлађење ова зона одговара условима који се примењују при термичкој обради нормализације по којој је ова зона и добила име. Хлађењем завареног споја у овој области се образује ситнозрнаста феритно-перлитна структура са веома повољном комбинацијом особина.

Зона непотпуне нормализације или делимичне прекристализације се образује хлађењем из двофазне феритно-аустенитне области. Ферит, као структура стабилна и на собној температури, не подлеже трансформацији, а зрна по величини одговарају онима која су настала при загревању. Ситнозрнасти аустенит подлеже перлитној трансформацији, па ову зону чине крупнија феритна зрна и ситнија перлитна зрна. Ова зона се такође одликује повољном комбинацијом особина. [71]

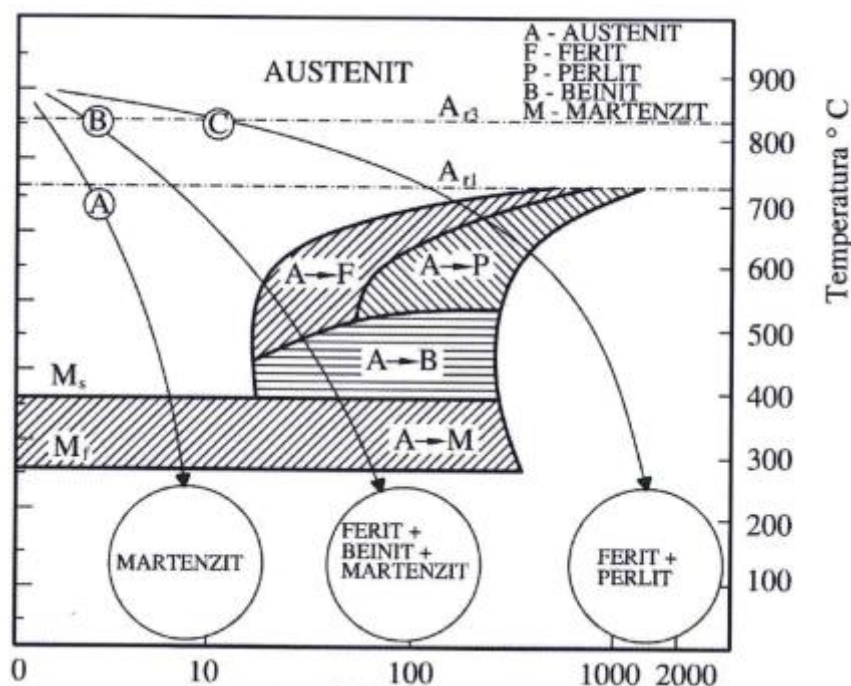
Зона рекристализације се јавља само у случају када полазна структура има деформисана зрна која су на температурама испод Ал линије претрпела рекристализацију.

Због могуће појаве веома различитих структурних области нарочито у оквиру зоне утицаја топлоте, при заваривању се строго води рачуна о томе која врста челика се заварује, који се поступак заваривања користи, које параметре заваривања треба одабрати посебно са аспекта брзине загревања и хлађења. У већи ни случајева, да би се избегле нежељене последице, заварени спојеви се подвргавају накнадној термичкој обради која има за циљ не само побољшање својстава већ и смањење заосталих напона од заваривања [57]

У зони основног материјала могућа је појава старења, иако се код обе врсте челика структура по правилу не мења испод линије А1. Ова појава је последица активирања слободних интерстицијских примеса N и C у фериту, а по механизму активирања разликују се термичко и деформационо старење. Старењем може да

се смањи жилавост и повиси температура преласка у крти лом, што ову зону чини непожељном у завареном споју.[39]

Структурне промене при хлађењу челика се у принципу анализирају помоћу ТТТ дијаграма. С обзиром на специфичности процеса заваривања (континуално хлађење), уместо ТТТ дијаграма користе се дијаграми континуалног хлађења (КХ – континуално хлађење), и то прилагођени за заваривање (КХЗ – континуално хлађење при заваривању), који боље описују реалне услове хлађења при заваривању. Дијаграми континуалног хлађења при заваривању су засновани на много вишој температури аустенитизације од КН дијаграма, а криве хлађења се добијају помоћу симулатора термичких циклуса заваривања. Ови дијаграми су специфични за сваки челик, а за њихово добијање је потребно дуго време и компликован експеримент, што значајно ограничава њихову примену. Количина унете топлоте да би се добила одговарајућа структура завареног споја.



Слика 5.4. Шематски приказ КХЗ дијаграма за учљенични челик [71]

На дијаграму на сл. 5.4 су нацртане три криве хлађења (А, В и С), којима се добијају три типичне структуре: мартензитна (брзина хлађења већа од критичне, директна трансформација аустенита у мартензит, крива А), феритно-беинитно-

мартензитна (брзина хлађења обезбеђује пролазак кроз подручја трансформације аустенита у ферит, беинит и мартензит, крива В) и феритно-перлитна (брзина хлађења мала, постоји само трансформација аустенита у ферит и перлит, крива С). Примена КХЗ (континуално хлађење при заваривању) дијаграма је посебно важна код нисколегираних челика повишене чврстоће који омогућава да се дефинише потребна количина унете топлоте да би се добила одговарајућа структура завареног споја. [39]

6. ЕКСПЕРИМЕНТ

6.1. Заварени спојеви конструкцијских челика

У раду експериментално је анализиран раст прслине у појединим конституентима заварених спојева комплексно легираних челика високе чврстоће на спруветама и у реалним конструкцијама, као и утицај раста прслине на сигурност завареног споја. Коришћени су челици SUMITEN 80P као и спој заварен под прашком М38 жицом US 80B као у постојећем испитивању. Примена нисколегираног челика високе чврстоће 800 МПа границе течења 700 МПа и затезне чврстоће 800 МПа тада је коришћена за израду цевовода. На основу ових података заварена су плоче и исечене спрувете за потребна испитивања и то за савијање у три тачке.

Прслине у завареним спојевима не могу се искључити, па утицај раста прслина мора бити анализиран при разматрању сигурности када је реч о конструкцији. При оцени носивости конструкције са прслином неопходни су подаци о понашању прслине при њеном ширењу кроз материјал конструкције и кроз његове заварене спојеве.

Савремени конструкцијски челици имају побољшане механичке карактеристике у поређењу са класичним челицима, што је постигнуто применом нових сазнања у производњи челика (уситњавање зрна, микролегирање, термомеханичка обрада). Данас се заварене конструкције са успехом израђују и од челика границе течења 700 МПа и више. Увођење челика повишене и високе чврстоће за заварене конструкције је условљено задовољавајућим решењима проблема, који се појављују при њиховом заваривању.

6.1.1. Раст прслине и лом заварене конструкције

Анализа сигурности конструкције у односу на прслину треба да одговори на питања под којим се граничним условима оптерећења постојећа прслина, одређене величине и положаја, неће даље развијати као и на који ће се начин прслина ширити и до које се величине може допустити раст прслине (достизањем услова потребним за раст прслине).

Откривањем прслине или грешке након одређеног периода експлоатације треба анализирати могуће механизме раста прслине до њене критичне величине и услове под којима ће доћи до лома када се достигне критична величина прслине; да критични раст прслине може бити последица агресивне средине (корозија), чији се утицај додатно повећава при дејству великих оптерећења (напонска корозија) или последица дејства променљивог оптерећења нивоа еластичних напона (замор) или нивоа напона течења (малоциклични замор). Велика је опасност ако се стекну услови за развој кртог лома, што се контролише величином критичног фактора интензитета напона (живавост лома при равној деформацији) K_{Ic} . Битна је карактеристика таквог лома равно стање деформације.

Искуство из експлоатације цевовода хидроелектрана указује на могуће процуривање после стабилног раста прслине или распуцавање у случају кртог лома. Увођење заварљивих челика високе чврстоће за израду цевовода доноси значајне уштеде, али се захтева отпорност према прслинама, нарочито према кртом лому, основног метала, метала шави и зоне утицаја топлоте.

За цевовод хидроелектране је коришћен заварљив челик високе чврстоће SUMITEN 80 (до 700 МПа називног напона течења). Приказани су резултати испитивања модела цевовода и заварених спојева, методом коначних елемената је доказана задовољавајућа заварљивост челика са металом шави ниже чврстоће (андермечинг) и отпорност према прслинама и кртом лому.



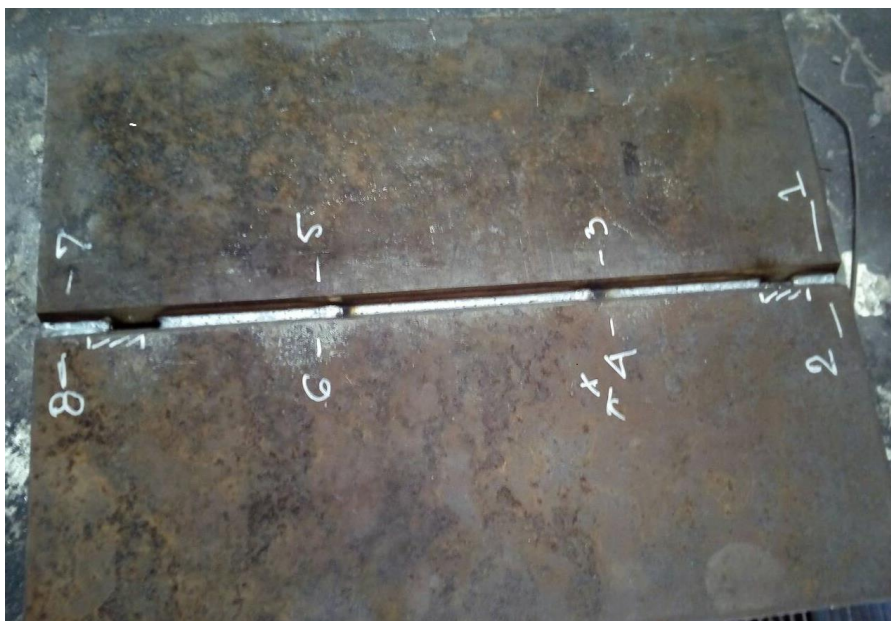
Слика 6.1 SUMITEN 80

Сферни резероари су изведени од челика NIOVAL 47 који је мање затезне чврстоће и напона течења од SUMITEN 80.

Сигурност заварених спојева у великој мери одређује експлоатациону сигурност и економичност конструкције. Присуство грешака у завареним спојевима, неиспуњење тражених својстава, облика и хомогености шави, као и својстава и хетерогености у ЗУТ, може пореметити чврстоћу и друге експлоатацијске карактеристике конструкције.

Аустенитна базична електрода за заваривање нерђајућих Cr и CrNi челика, за заваривање челика високе чврстоће и слабе заварљивости коришћена је за међусобно спајање разнородних челика, за наваривање међуслојева који служе за изравнавање и одстрањивање напона, те за наваривање корозионо постојаних и на хабање отпорних навара. Завари су немагнетни, отпорни на оксидацију до температуре 800°C, жилави до температуре -100°C и отпорни на настанак прелина. Заварени спој као комплексна и хетерогена структура представља критично место у завареној конструкцији. Због тога у највећем броју случајева, сигурност заварене конструкције се процењује на основу особина завареног споја као целине, и особина свих његових саставних делова.

Најчешће се за оцену понашања завареног споја пореде особине основног метала, зоне утицаја топлоте и метала шави, али се у бројним случајевима понашање завареног споја као целине разликује од понашања метала шави, зоне утицаја топлоте и основног метала.



Слика 6.2 Заварени спој SUMITEN-а жицом INOX R 19/9 Nb

Основни принцип при пројектовању заварених конструкција је да чврстоћа метала шави (МШ) буде већа од чврстоће основног метала (овермечинг ефект). То значи да ће до пластичног течења прво доћи у основном металу (ОМ), а да ће до течења метала шави (МШ) доћи тек када је основни метал ојачао до нивоа границе течења метала шави. Понашање зоне утицаја топлоте (ЗУТ) у оптерећеном завареном споју (ЗС) је условљено њеним малим запреминским уделом, као и хетерогеношћу структуре и различитим механичким особинама појединих подручја ЗУТ. Добро изведен заварени спој, пројектован на принципу веће чврстоће МШ, при преоптерећењу се жилаво ломи у основном металу.

Са увођењем нисколегираних челика високе чврстоће, примена принципа веће чврстоће МШ може довести до појаве хладних прелина при заваривању. Да би се то избегло, што значи да би се омогућило заваривање таквих конструкцијских челика границе течења изнад 700 МПа, додатни материјал за заваривање се пројектује тако да метал шави након заваривања има нешто мању чврстоћу од основног метала (андермечинг ефект). У тако завареном споју до пластичног течења ће доћи прво у металу шави. Тек након ојачавања МШ до нивоа границе течења ОМ долази до пластичног деформисања ОМ.

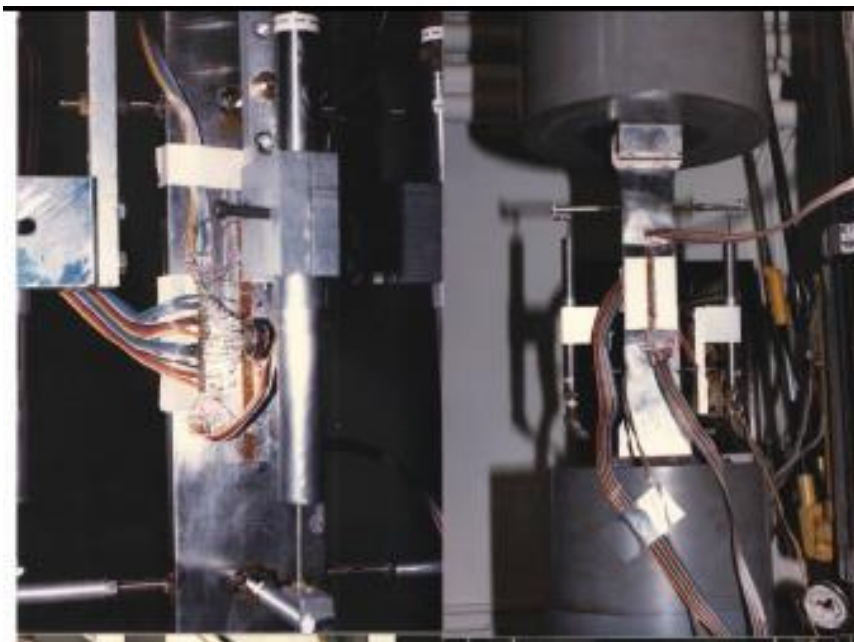
Табела 6.1. Затезне карактеристике челика SUMITEN 80P и његових спојева заварених под прашком

Основни метал		
Правац испитивања	Напон на граници течења Rp _{0,2} МПа	Затезна чврстоћа Rm, МПа
Ваљање управно	761-779	>806

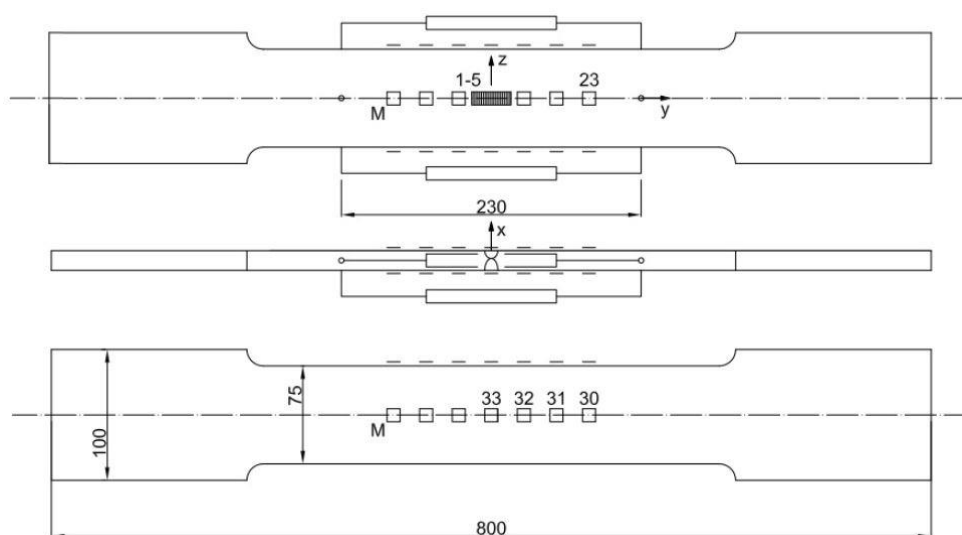
б. Спој заварен под прашком М38 жицом US 80B("Кобе Steel" - Јапан) [71]				
Метал шави			Заварени спој	
Граница течења Rp _{0,2} МПа	Затезна чврстоћа Rm, МПа	Издужење при лому A ₅ %	Граница течења Rm, МПа	Затезна чврстоћа Rm, МПа
585	771		628	769

У табели 6.1 су дати основни подаци о затезним карактеристикама челика SUMITEN 80P и његовог споја завареног под прашком. С обзиром на крајњи циљ оцене отпорности према ширењу прелине у реалној конструкцији, постављен у

овом испитивању, основна пажња је посвећена челику SUMITEN 80P и његовом уобичајеном споју, завареном под прашком, са метал шава ниже чврстоће од ОМ.



Слика 6.3 Мерење издужења преко три екстензометра



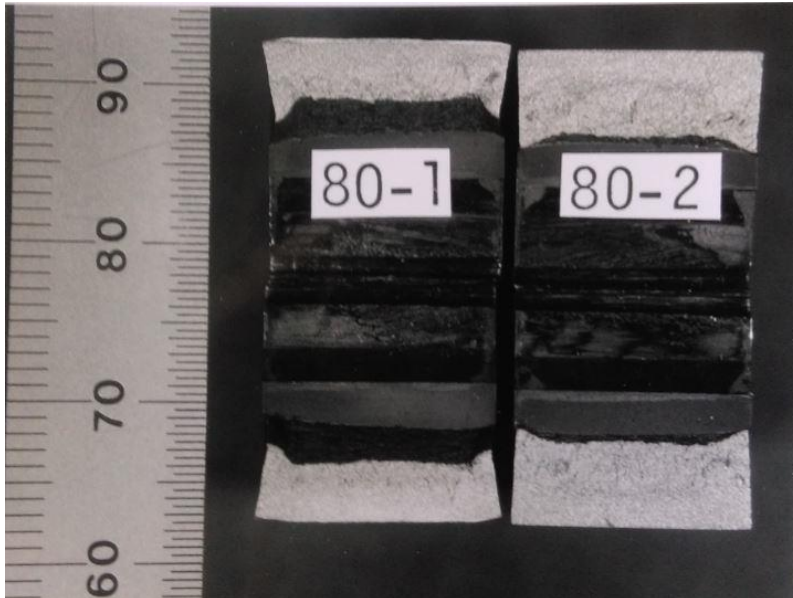
Слика 6.4 Епрувета типа затезне плоче за испитивање понашања завареног споја и његових конституената при затезању

Анализирана је разлика у понашању завареног споја као целине и његових конституената и затезањем су испитане епрувете са металом шава мање и веће чврстоће у односу на основни метал. Ово испитивање је важно и за оцену отпорности према ширењу прслине, јер даје основне податке о понашању материјала при оптерећивању. Епрувета за ово испитивање приказана је на сл.6.4. Издужења су мерена глобално, преко 3 екстензометра (Linear Variable Difference Transducer - ЛВДТ) на мерној дужини 228 mm, и локално, преко мерних трака (М) постављених у различитим подручјима завареног споја (ОМ, ЗУТ, МШ). Напон је исказан односом силе и почетне по врши не попречног пресека. Деформација f је праћена мерним тракама (локално, у средини епрувете и завареног споја - ЛС, и у тачки удаљеној од средине - РС) и мерачима издужења (екстензометрима) - ЛВДТ, који показују просечно издужење епрувете на мерној дужини 228 mm.

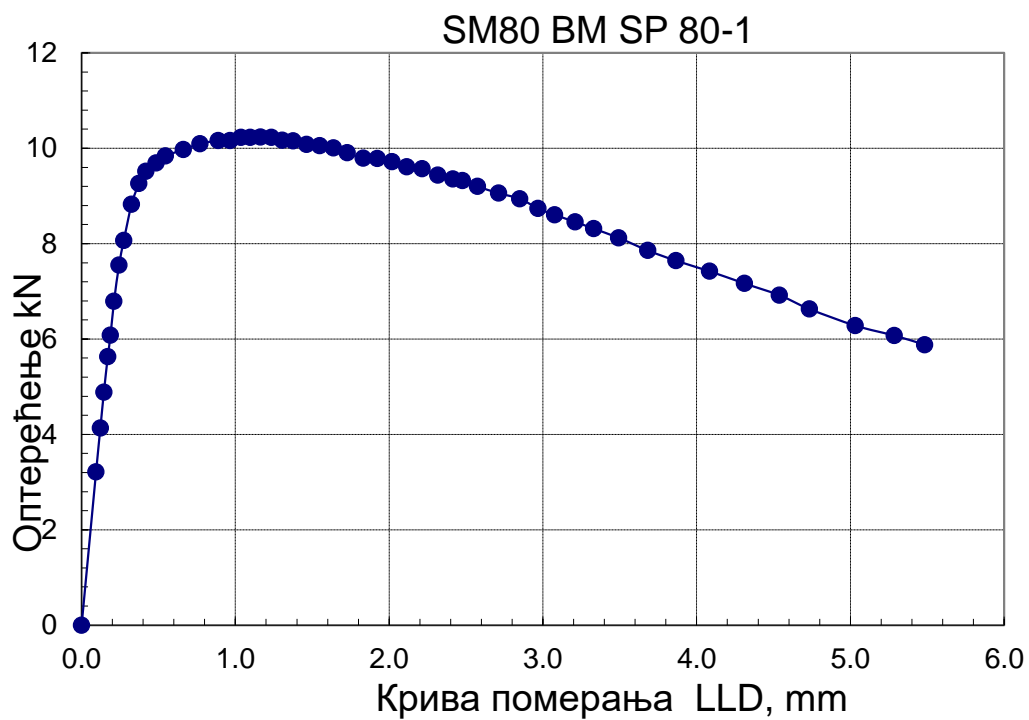
Понашање челика SUMITEN 80P [73] је оцењено као блиско еластично-идеално пластичном, са малом разликом напона течења и затезне чврстоће. Пошто је у питању глатка и довољно хомогена епрувета у испитивању ОМ, занемарљива је разлика показивања издужења мерне траке у средини и на удаљеном месту, па је и просечно показивање издужења помоћу екстензометара ЛВДТ готово исто као и појединачно показивање мерних трака. Овакво је понашање основног метала потврђено и при испитивању заварених спојева са металом шава ниже чврстоће, где се показивање удаљених мерних трака (РС) 23 и 30 односи на основни метал SUMITEN 80P. Метал шава са нормалним андермечинг ефектом има нешто нижу границу течења од основног метала, пројектовану тако да након делимичног ојачавања МШ дође и до пластичне деформације ОМ, па се даље пластична деформација развија у оба конституента.

До лома долази у металу шава, јер он има мању затезну чврстоћу од ОМ. За изражени андермечинг ефект затезна чврстоћа метала шава је осетно нижа од границе течења основног метала SUMITEN 80P, па је понашање ОМ еластично (удаљене тачке 23 и 30) све до лома епрувете у металу шава. Заварени спој са овермечинг ефектом је остварен заваривањем под прашком челика SUMITEN 60, називне границе течења 520 МПа и затезне чврстоће 600 МПа, жицом US 80B [70], намењеном за постизање нешто ниже чврстоће мт код заварених спојева челика

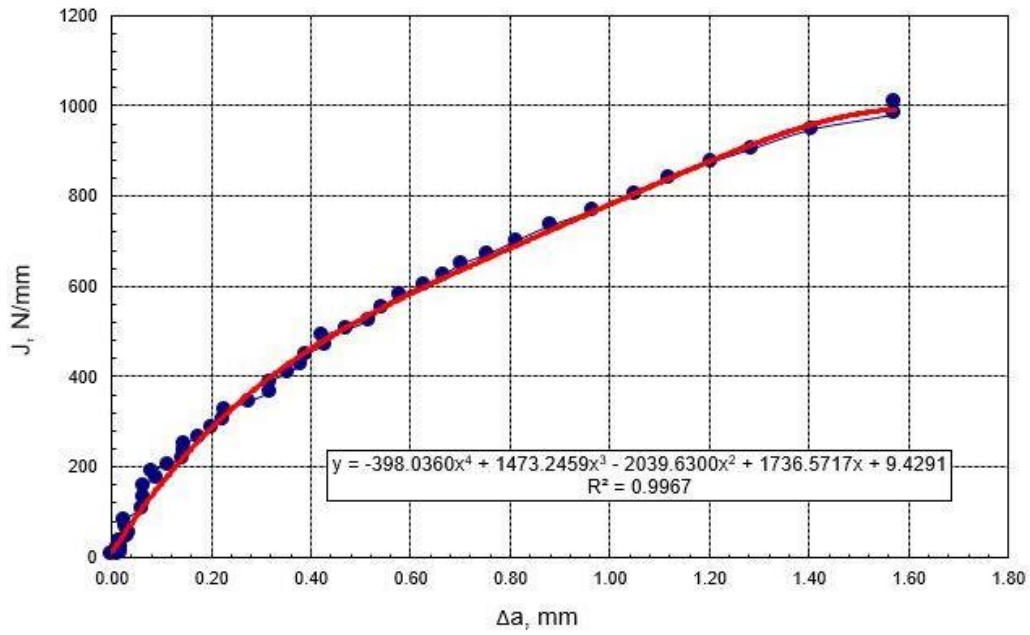
SUMITEN 80P. Због већег степена ојачавања метала шави и његове веће затезне чврстоће, до лома епрувете долази у ОМ.



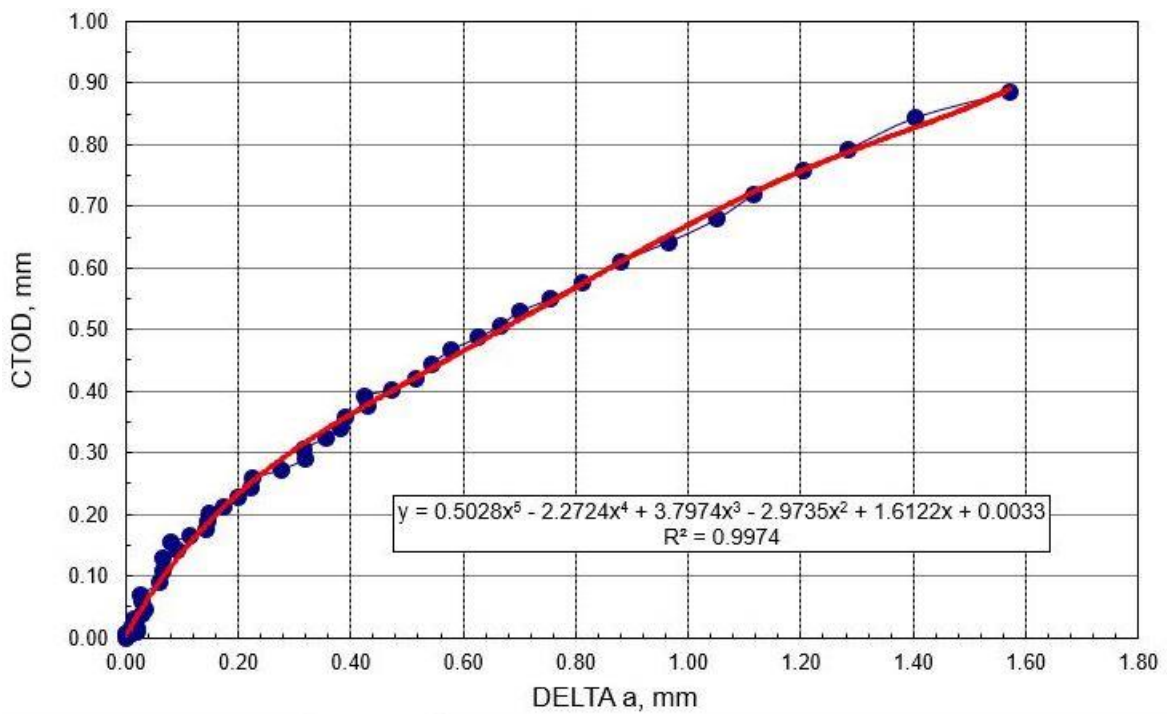
Слика 6.5 Епрувета SM 80-1 знатно веће жилавости док је код SM 80-2 лом скоро кроз крт.



Слика 6.6 Дијаграм зависности силе и издужења у односу на померање нападне линије силе



Слика 6.7 Зависност J интеграла од пораста дужине прслине материјала SM80 BM SP 80-1



Слика 6.8 Зависност CTOD од пораста дужине прслине материјала SM80 BM SP80-1

Понашање челика SUMITEN 80 је праћено мерним тракама 23 и 30 на епрувети из завареног споја и поново је добијена зависност напона блиска еластично-

идеално пластичној. И код споја са МШ веће чврстоће пластична деформација почиње у МШ, и када његовим ојачавањем достигне ниво границе течења ОМ, пластична деформација се преноси на читаву епрувету.

Карактеристично је деформацијско понашање конституената завареног споја. При нормалном односу чврстоћа МШ и ОМ за SUMITEN 80P - највеће деформације трпи МШ. У зони утицаја топлоте (ЗУТ) - мерне траке 1-5-постоје подручја великих деформација и ометених деформација, а при одређеном нивоу пластичних деформација МШ (мерна тачка 33) долази и до пластичних деформација ОМ (мерне траке 32-31-30). Код споја са изузетно ниском чврстоћом МШ поново се виде велике деформације у ЗУТ. Мерна трака 33 је отказала при деформацији од 2%, али су деформације на том месту увек биле највеће. Деформације у ОМ су еластичне све до лома епрувете у мт. У случају споја са мт веће чврстоће такође се види нехомогени распоред деформација, са најмањом деформацијом у ЗУТ, и са премештањем положаја највеће деформације из метала шава у основни метал при напону изнад 570 MPa

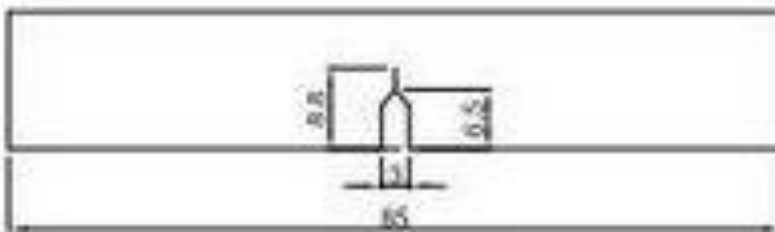
Испитивања затезањем заварених спојева су показала да су издужења неравномерно распоређена по појединим конституентима. На распоред деформација битно утиче однос чврстоће основног метала и метала шава. У свим комбинацијама пада у очи да у ЗУТ увек постоји подручје у коме су деформације најмање. Због тога је значајна анализа микроструктуре зоне утицаја топлоте, где су на малом подручју смештене готово све микроструктуре, које се у фазним трансформацијама добијају и то има утицаја на механичко понашање завареног споја.

6.2. Утицај прслине на чврстоћу завареног споја

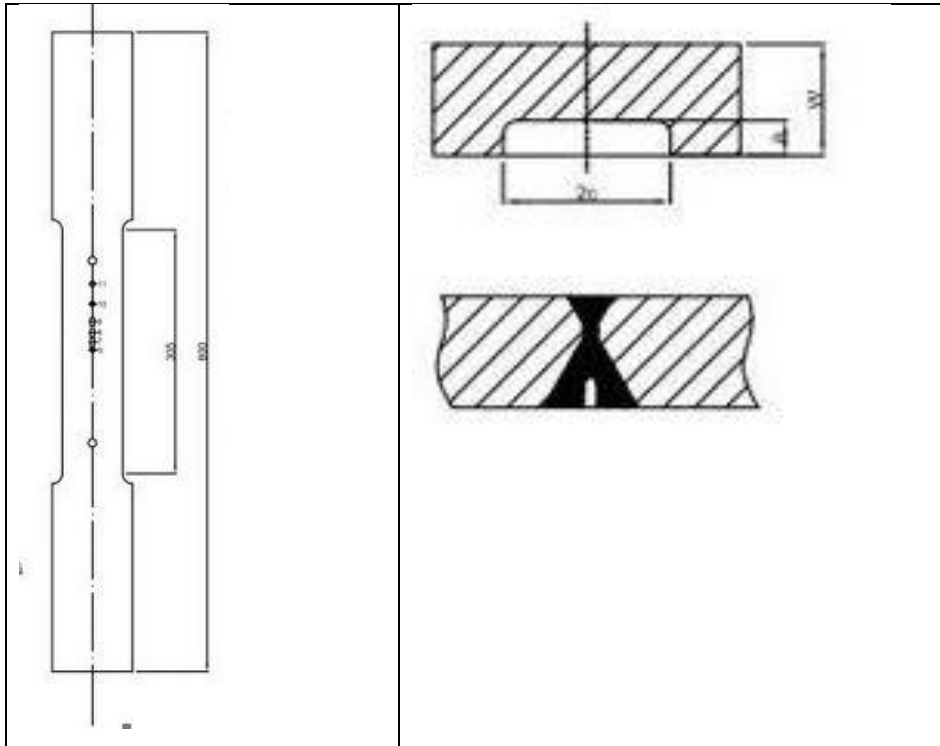
Утицај прслине на чврстоћу је експериментално анализиран на епруветама из ОМ и из све три наведене комбинације завареног споја, с тим што је прслина постављена у средини епрувете, односно завареног споја. Утицај прспине је праћен на дијаграмима у зависности просечног напона σ (сила подељена са површином пуног пресека) и просечне деформације ε (мерене преко 3 екстензометра ЛВДТ). Из добијених резултата и дијаграма види се да прслине на различите начине утичу на чврстоћу и дуктилност испитиваних затезних плоча.

Код основног метала мала прслина, која смањује површину попречног пресека за око 2,5%, не утиче на основни дијаграм зависности просечног напона и просечног издужења, док велика прслина, која смањује попречни пресек за око 13%, условљава незнатно смањење чврстоће и значајно смањење дуктилности, а епрувету чини попустљивијом. Највећи утицај је прслина исказала код епрувете са изразито слабијим металом шава. Ту је релативна носивост епрувете мања од оне која одговара преосталом пресеку, а издужење при лому представља само мали део одговарајуће величине код епрувете без прслине; ово је више изражено код епрувете са већом прслином. Код епрувете са металом шава нормалне чврстоће носивост епрувете углавном одговара површини смањеног пресека, али је пластичност епрувете осетно смањена.

На слици дата је приказ епрувете за савијање у три тачке.



Слика 6.9 Епрувета за савијање у три тачке



Слика 6.10 Затезна плоча са прслинама

Код епрувете са металом шава више чврстоће до просечне деформације од 0.02, што је око 7 пута веће од деформације течења, постојање прслине не утиче на облик зависности напон σ -деформација ϵ .

Види се да прслине у металу шава, ниже чврстоће, смањују чврстоћу а нарочито дуктилност завареног споја, Ово смањење дуктилности може, под одређеним условима, бити разлог превременог лома конструкције.

Посебну анализу у овом случају треба посветити концентрацији напона на врху прспине, која одговара успостављању троосног напонског стања, што је један од услова кртог лома. Концентрација напона, са друге стране, доприноси већој носивости материјала у околини врха прслине, јер је, због ометене деформације, активан већи пресек до појаве лома. J интеграл смо у овом раду усвојили као параметар механике лома за оцену утицаја прслине у различитим конституентима завареног споја. Величина J интеграла дата је у зависности од дужине прслине током њеног развоја при дејству монотонно растућег оптерећења.

Коришћене су две врсте епрувета: за савијање у три тачке, у складу са ASTM E813, и у облику затезне плоче.

У погледу положаја зареза и заморне прслине, стандард иде даље и дефинише различите варијанте за сучеони Х и К шав, као и једнопролазни шав. Захтеви за положај прслине су следећи:

- зарез треба поставити тако да раван заморне прслине буде паралелна са уздужном осом завареног споја
- врх прслине треба да се већом дужином налази у области која се испитује, да не би дошло до локалних оштећења у малој запремини материјала
- зарез се поставља у метал шава, линију стапања или ЗУТ. За утврђивање погодности избора додатног материјала испитује се метал шава.

Хетерогеност структуре и механичких особина заварених спојева усложњава проблем, пре свега у зависности од положаја врха заморне прслине и особина подручја кроз која се лом развија. Али, ако се заварени спој третира као конструкцијска целина, онда је од интереса одредити податке за најслабије место када је у питању локално испитивање, какво је одређивање параметара механике лома. Такође је јасно да при одређивању затезних карактеристика, нарочито затезне чврстоће, податак за заварени спој као целину мора да се прихвати као меродавнији за заварену конструкцију него појединачни резултат било за метал шава или за основни метал.

Епрувете за одређивање параметара механике лома се израђују из придружених проби, израђених на исти начин као и стварни производ. За плоче мање дебљине од 50 mm користе се епрувете пуне дебљине. Отпорност према развоју прслине у МШ и ЗУТ испитује се на епруветама са зарезом и заморном прслином. За оцену збирног утицаја свих подручја завареног споја (МШ, линија стапања и ЗУТ) и технолошких услова заваривања зарез се поставља тако да обухвата уску траку сва три подручја, при чему се косина врха остварује на дубини 1.5 – 2.5 mm.

Табела 2. Основни метал SM80

	Оптерећење	Издужење	Δa	CTOD	J	a	a/W	CMOD	J	LLD
B=0.5850mm	0.0000	0.0000	0.0000	0.000	0.00	8.7960	0.5850	0.000	0.000	0.0000
W=0.5863mm	3.2160	0.0940	0.0000	0.004	3.15	8.7960	0.5850	0.075	3.150	0.0940
S, mm	4.1320	0.1219	0.0000	0.006	5.43	8.7960	0.5850	0.098	5.430	0.1219
r=0.4	4.8840	0.1448	0.0127	0.007	7.88	8.8087	0.5858	0.116	7.880	0.1448
n=0.3	5.6270	0.1702	0.0203	0.010	10.51	8.8163	0.5863	0.136	10.510	0.1702
S, 0.5870mm	6.0810	0.1880	0.0127	0.020	12.61	8.8087	0.5858	0.150	12.610	0.1880
a ₀ , 0.5873mm	6.7880	0.2108	0.0203	0.014	16.29	8.8163	0.5863	0.169	16.290	0.2108
a ₀ /W ₀ , 0.5868	7.5530	0.2438	0.0127	0.019	21.72	8.8087	0.5858	0.195	21.720	0.2438
f(a ₀ /W)=0.5867	8.0650	0.2743	0.0178	0.023	26.09	8.8138	0.5861	0.219	26.090	0.2743
σ _{ys} =0.5890 MPa	8.8250	0.3251	0.0152	0.031	35.20	8.8112	0.5860	0.260	35.200	0.3251
E= 0.5894MPa	9.2610	0.3734	0.0305	0.039	44.83	8.8265	0.5870	0.299	44.830	0.3734
	9.5150	0.4191	0.0356	0.047	54.81	8.8316	0.5873	0.335	54.810	0.4191

	9.6930	0.4851	0.0279	0.059	67.95	8.8239	0.5868	0.388	67.950	0.4851
	9.8390	0.5461	0.0254	0.069	81.78	8.8214	0.5867	0.437	81.780	0.5461
	9.9730	0.6629	0.0610	0.089	106.65	8.8570	0.5890	0.530	106.650	0.6629
	10.0970	0.7696	0.0660	0.108	131.00	8.8620	0.5894	0.616	131.000	0.7696
	10.1600	0.8890	0.0660	0.129	157.44	8.8620	0.5894	0.711	157.440	0.8890
	10.1600	0.9652	0.0914	0.142	174.43	8.8874	0.5910	0.772	174.430	0.9652
	10.2310	1.0363	0.0813	0.155	189.84	8.8773	0.5904	0.809	189.840	1.0363
	10.2260	1.0973	0.1143	0.165	204.37	8.9103	0.5926	0.878	204.370	1.0973
	10.2350	1.1633	0.1422	0.176	218.06	8.9382	0.5944	0.931	218.080	1.1633
	10.2260	1.2344	0.1448	0.188	235.02	8.9408	0.5946	0.988	235.020	1.2344
	10.1690	1.3056	0.1473	0.201	250.61	8.9433	0.5948	1.044	250.610	1.3056
	10.1550	1.3767	0.1753	0.213	267.07	8.9713	0.5966	1.101	267.070	1.3767
	10.0840	1.4630	0.2007	0.228	285.81	8.9967	0.5983	1.170	285.810	1.4630

	10.0570	1.5494	0.2235	0.243	305.77	9.0195	0.5998	1.240	305.770	1.5494
	10.0040	1.6383	0.2261	0.258	324.68	9.0221	0.6000	1.311	324.680	1.6383
	9.9060	1.7272	0.2769	0.273	344.65	9.0729	0.6034	1.382	344.650	1.7272
	9.7910	1.8313	0.3200	0.291	367.06	9.1160	0.6062	1.465	367.060	1.8313
	9.7860	1.9228	0.3175	0.307	387.38	9.1135	0.6061	1.538	387.380	1.9228
	9.7150	2.0193	0.3556	0.323	408.04	9.1516	0.6086	1.615	408.400	2.0193
	9.6080	2.1158	0.3810	0.340	428.01	9.1770	0.6103	1.693	428.010	2.1158
	9.5730	2.2149	0.3912	0.357	448.85	9.1872	0.6110	1.772	448.850	2.2149
	9.4350	2.3165	0.4293	0.375	470.92	9.2253	0.6135	1.853	470.920	2.3165
	9.3550	2.4155	0.4242	0.392	491.58	9.2202	0.6132	1.932	491.580	2.4155
	9.3230	2.4765	0.4724	0.402	504.19	9.2684	0.6164	1.981	504.190	2.4765
	9.1990	2.5756	0.5156	0.419	524.15	9.3116	0.6193	2.060	524.150	2.5756
	9.0570	2.7127	0.5436	0.443	552.00	9.3396	0.6211	2.170	552.000	2.7127

	8.9410	2.8499	0.5791	0.467	579.49	9.3751	0.6235	2.280	579.490	2.8499
	8.7360	2.9693	0.6274	0.487	602.61	9.4234	0.6267	2.375	602.610	2.9693
	8.6030	3.0759	0.6655	0.505	623.45	9.4615	0.6292	2.461	623.450	3.0759
	8.4560	3.2106	0.7010	0.529	648.67	9.4970	0.6316	2.568	648.670	3.2106
	8.3140	3.3299	0.7544	0.549	671.08	9.5504	0.6351	2.664	671.080	3.3299
	8.1220	3.4925	0.8128	0.577	700.86	9.6088	0.6390	2.794	700.860	3.4925
	7.8560	3.6830	0.8814	0.610	734.66	9.6774	0.6536	2.946	734.660	3.6830
	7.6420	3.8659	0.9652	0.641	766.35	9.7612	0.6492	3.093	766.350	3.8659
	7.4200	4.0843	1.0516	0.679	803.10	9.8476	0.6549	3.267	803.130	4.0843
	7.1660	4.3104	1.1176	0.718	839.56	9.9736	0.6593	3.448	839.560	4.3104
	6.9170	4.5390	1.2040	0.758	875.28	10.0000	0.6650	3.631	875.280	4.5390
	6.6280	4.7346	1.2852	0.792	904.70	10.0812	0.6704	3.788	904.700	4.7346
	6.2810	5.0317	1.4046	0.843	947.79	10.2006	0.6784	4.025	947.790	5.0317

	6.0720	5.2857	1.5723	0.885	982.64	10.3683	0.6895	4.229	982.640	5.2857
	5.8810	5.4839	1.5723	0.921	1009.26	10.3683	0.6895	4.387	1009.26	5.4839

Табела 3. Подаци за савијање у три тачке, андермечинг, WM

	Оптерећење	Издужење	Попустљивост C	Δa	a	a/W	J (M-C)	CMOD
Андермечинг	kN	mm	mm/N	mm	mm		N/mm	mm
ТПБ	0.000	0.000		0.000	8.595	0.575	0.00	
B=14,935mm; W=14,961mm	3.216	0.089	1.9032E-05	0.000	8.595	0.575	2.98	-0.185
a ₀ =8,595mm; S=60mm	3.830	0.109			8.595	0.575	4.55	-0.168
f(a ₀ /W) =3.4282kN	5.227	0.152	1.9672E-05	0.084	8.679	0.580	8.93	-0.133
	6.383	0.203	1.9785E-05	0.097	8.692	0.581	15.41	-0.090
a ₀ /W=0,575	7.130	0.254	1.9762E-05	0.094	8.689	0.581	22.94	-0.048
	7.535	0.343	1.9758E-05	0.094	8.689	0.581	36.08	0.025
	7.678	0.427	1.9903E-05	0.112	8.707	0.582	50.44	0.095
	7.780	0.521	2.0053E-05	0.132	8.727	0.583	66.02	0.172
	7.909	0.625	2.0090E-05	0.135	8.730	0.583	83.36	0.259
	7.927	0.709	2.0299E-05	0.160	8.755	0.585	98.07	0.328
	8.042	0.805	2.0460E-05	0.180	8.775	0.587	114.88	0.408

	8.087	0.912	2.0148E-05	0.211	8.806	0.589	132.92	0.496
	8.056	1.016	2.0585E-05	0.196	8.791	0.588	151.13	0.582
	7.913	1.133	2.1021E-05	0.246	8.841	0.591	171.97	0.679
	7.913	1.250	2.1376E-05	0.287	8.882	0.594	192.11	0.776
	7.807	1.372	2.1799E-05	0.335	8.930	0.597	213.13	0.877
	7.704	1.509	2.2468E-05	0.406	9.002	0.602	236.25	0.990
	7.562	1.636	2.3086E-05	0.472	9.068	0.606	257.44	1.095
	7.469	1.778	2.3655E-05	0.528	9.123	0.610	281.08	1.213
	7.282	1.920	2.4519E-05	0.615	9.210	0.616	304.20	1.331
	7.082	2.078	2.5625E-05	0.716	9.311	0.622	328.71	1.461
	6.904	2.243	2.6534E-05	0.795	9.390	0.628	354.63	1.598
	6.712	2.390	2.7559E-05	0.881	9.476	0.633	376.70	1.720
	6.552	2.532	2.9204E-05	1.013	9.609	0.642	397.01	1.838
	6.370	2.692	2.9609E-05	1.044	9.639	0.644	419.95	1.970
	6.219	2.865	3.1081E-05	1.151	9.746	0.651	443.42	2.113
	6.156	3.025	3.1735E-05	1.196	9.791	0.654	465.49	2.246
	6.085	3.172	3.2369E-05	1.240	9.835	0.657	484.93	2.367
	5.983	3.335	3.3270E-05	1.298	9.893	0.661	506.29	2.502
	5.903	3.487	3.3869E-05	1.336	9.931	0.664	526.43	2.628
	5.805	3.645	3.4665E-05	1.384	9.979	0.667	546.57	2.759

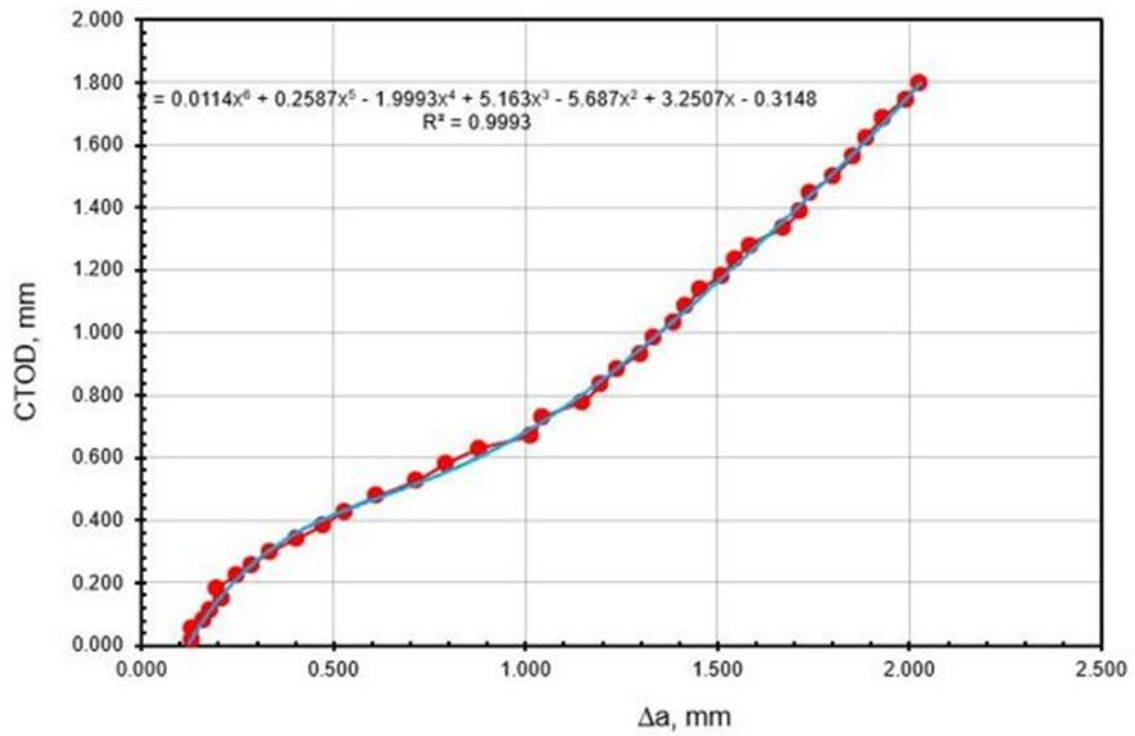
	5.720	3.787	3.5231E-05	1.420	10.015	0.669	564.61	2.876
	5.689	3.942	3.5834E-05	1.455	10.051	0.672	583.87	3.005
	5.596	4.094	3.6836E-05	1.511	10.106	0.676	602.79	3.131
	5.485	4.239	3.7468E-05	1.547	10.142	0.678	620.12	3.251
	5.413	4.384	3.8153E-05	1.585	10.180	0.680	637.99	3.370
	5.244	4.554	3.9798E-05	1.671	10.266	0.686	657.95	3.511
	5.173	4.719	4.0668E-05	1.715	10.310	0.689	676.34	3.648
	5.058	4.890	4.1216E-05	1.740	10.335	0.691	695.95	3.789
	4.960	5.047	4.2480E-05	1.801	10.396	0.695	713.29	3.919
	4.844	5.235	4.3561E-05	1.852	10.447	0.698	733.43	4.075
	4.733	5.418	4.4362E-05	1.887	10.482	0.701	752.52	4.226
	4.604	5.618	4.5455E-05	1.933	10.528	0.704	773.36	4.392
	4.488	5.789	4.6768E-05	1.989	10.584	0.707	790.70	4.533
	4.408	5.951	4.7775E-05	2.029	10.625	0.710	806.81	4.668

Табела 3. Подаци за савијање у три тачке, андермечинг, WM

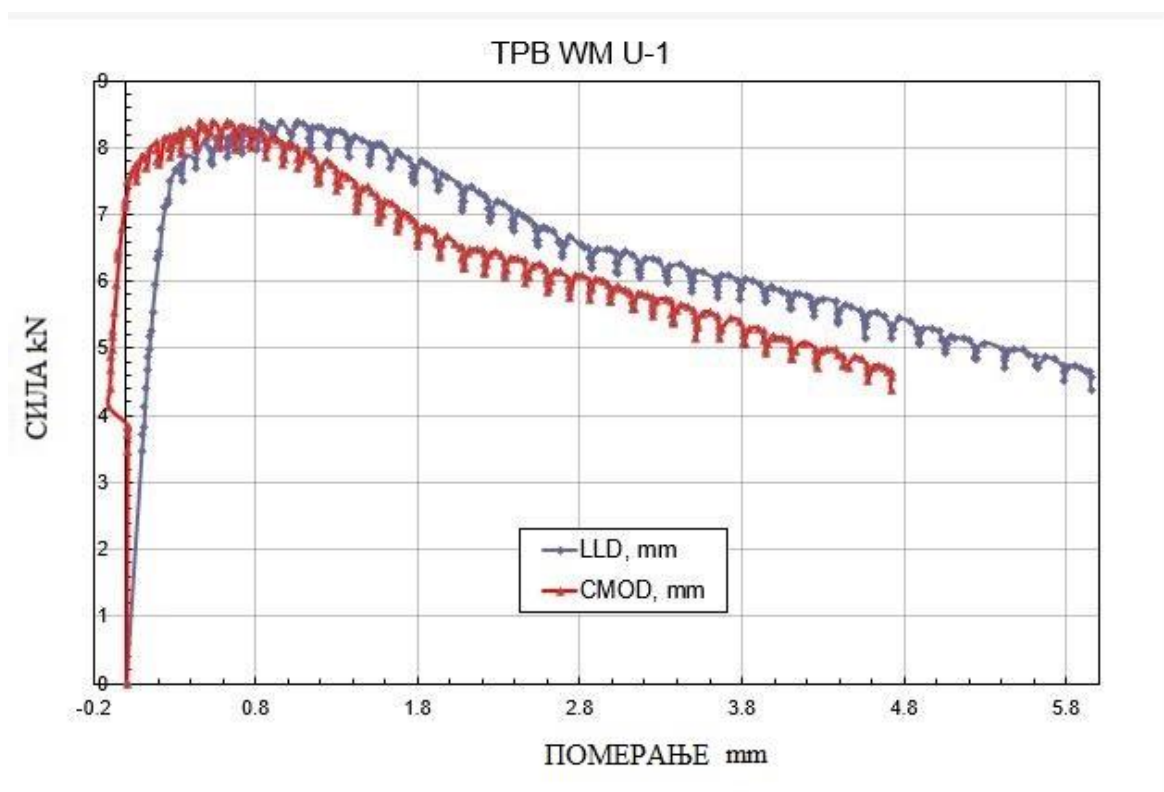
CMODel,	Vp(CMODpl)	CTODel	CTODpl	CTODtotal
mm	mm	mm	mm	mm
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.061	-0.246	0.002	-0.099	-0.097
0.000	-0.168	0.003	-0.068	-0.065
0.103	-0.235	0.006	-0.095	-0.089
0.126	-0.217	0.009	-0.087	-0.078
0.141	-0.189	0.011	-0.076	-0.065
0.149	-0.124	0.012	-0.050	-0.037
0.153	-0.058	0.013	-0.023	-0.011
0.156	0.016	0.013	0.007	0.020
0.159	0.100	0.014	0.040	0.054
0.161	0.167	0.014	0.067	0.081
0.165	0.243	0.014	0.098	0.112
0.163	0.333	0.014	0.134	0.148
0.166	0.417	0.014	0.168	0.182
0.166	0.513	0.014	0.206	0.220
0.169	0.607	0.014	0.244	0.258

0.170	0.707	0.013	0.284	0.298
0.173	0.817	0.013	0.329	0.342
0.175	0.921	0.012	0.370	0.383
0.177	1.036	0.012	0.417	0.429
0.179	1.152	0.012	0.464	0.475
0.181	1.280	0.011	0.515	0.526
0.183	1.415	0.010	0.569	0.580
0.185	1.535	0.010	0.618	0.627
0.191	1.646	0.009	0.662	0.672
0.189	1.781	0.009	0.717	0.726
0.193	1.920	0.008	0.772	0.781
0.195	2.050	0.008	0.825	0.833
0.197	2.170	0.008	0.873	0.881
0.199	2.303	0.008	0.927	0.934
0.200	2.428	0.008	0.977	0.985
0.201	2.557	0.007	1.029	1.036
0.202	2.675	0.007	1.076	1.083
0.204	2.801	0.007	1.127	1.134
0.206	2.925	0.007	1.177	1.183
0.205	3.045	0.007	1.225	1.232

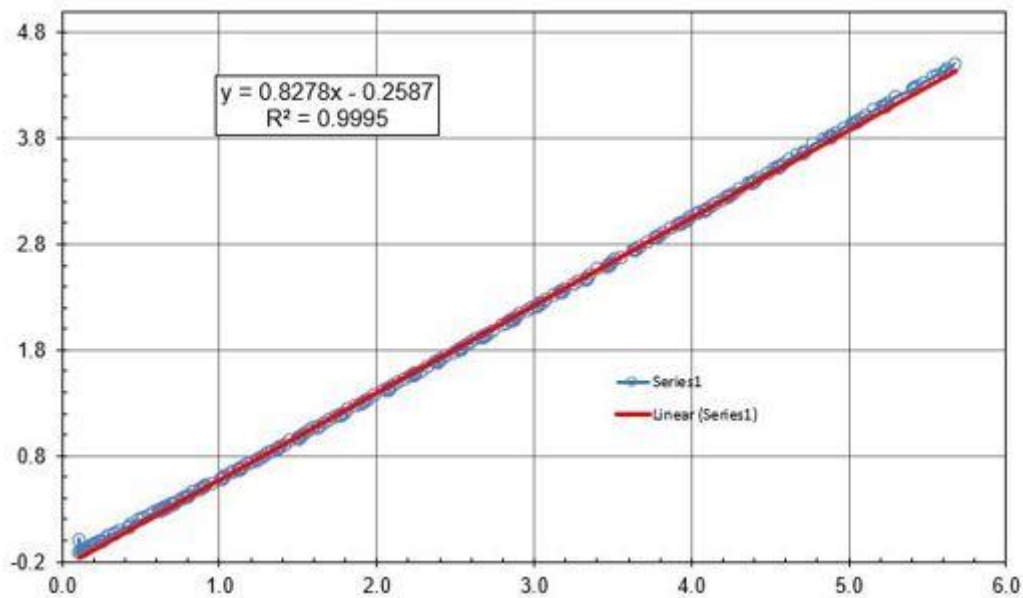
0.207	3.164	0.006	1.273	1.279
0.209	3.303	0.006	1.329	1.335
0.210	3.438	0.006	1.383	1.389
0.208	3.580	0.006	1.440	1.446
0.211	3.708	0.005	1.492	1.497
0.211	3.864	0.005	1.554	1.560
0.210	4.016	0.005	1.616	1.621
0.209	4.183	0.005	1.683	1.688
0.210	4.323	0.004	1.739	1.744
0.211	4.457	0.004	1.793	1.797



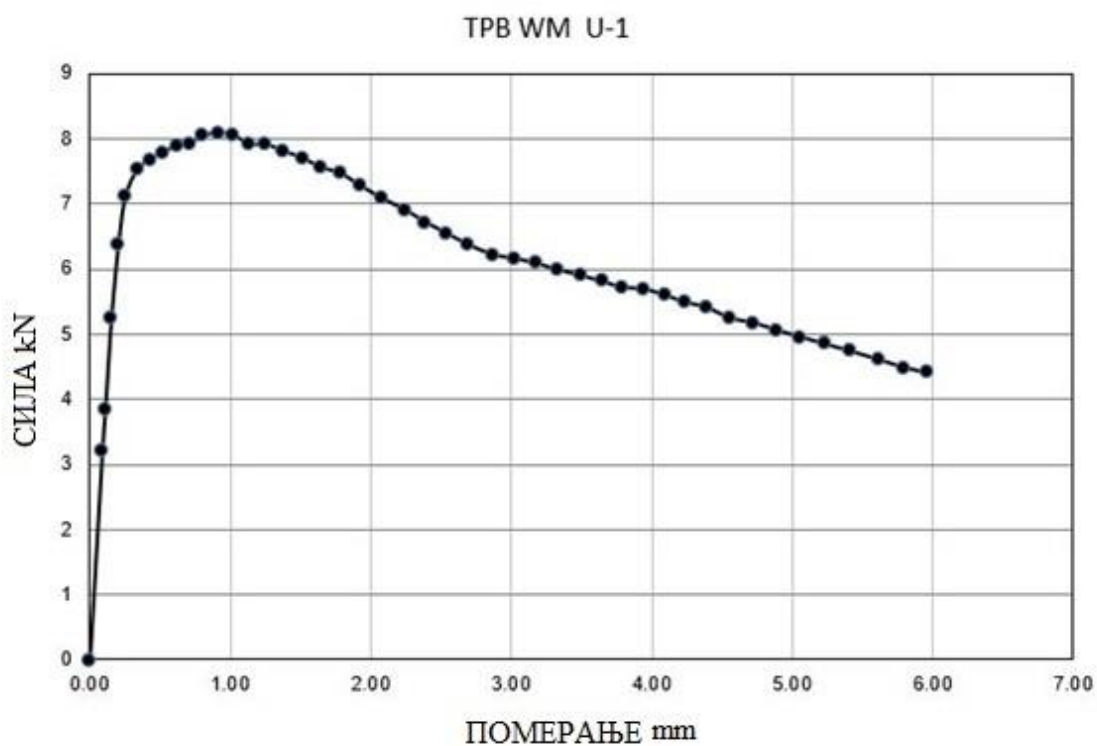
Слика 6.11 Зависност CTOD од пораста дужине прслине



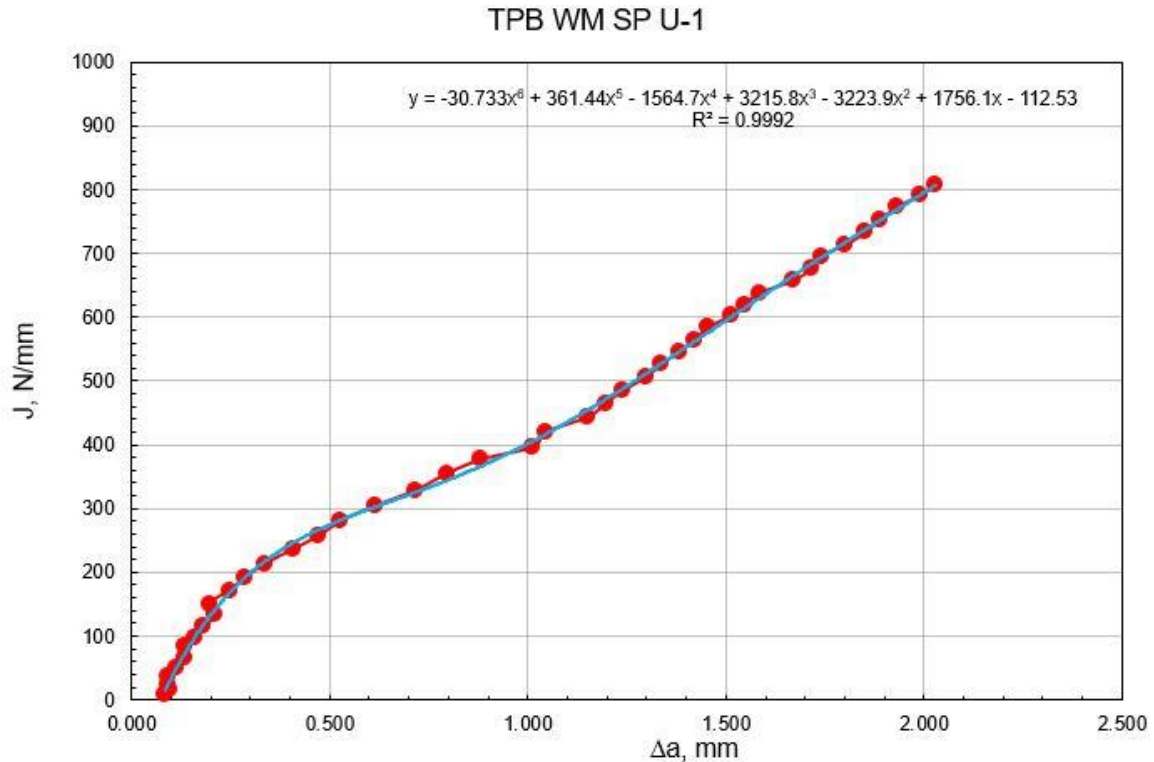
Слика 6.12 Зависност силе и издужења у односу на CMOD и LLD



Слика 6.13 Зависност $CMOD$ од померања нападне линије силе



Слика 6.14 Дијаграм зависности силе и издужења у односу на померање нападне линије силе



Слика 6.15 Зависност J интеграла од пораста дужине прслине

Подаци о испитивању епрувете за савијање су обрађивани према ASTM E813, али је крива отпорности материјала према ширењу прслине (J_R крива) продужена изван граница важења J_{Ic} , што значи да је усвојено напредовање прслине за више од 1,5 mm. Контура за директно одређивање J интеграла служи нам за праћење деформације при затезању епрувете, читавањем мерних трака.

Врх заморне прслине је био постављен у ЗУТ, да би се добио жељени однос дубине прслине и дебљине епрувете.

Отпорност према ширењу прслина конституената завареног споја приказана је преко J_R крива кривих отпорности, за основни метал SUMITEN 80P, за метале шави различитих чврстоћа и за ЗУТ завареног споја челика SUMITEN 80P са металом шави нормалне чврстоће. Стрм успон криве отпорности челика SUMITEN 80P указује на веома добра својства у односу на ширење прслине. Видимо сагласност резултата добијених са епруветама за савијање и са затезним плочама. Добра отпорност према прслинама је код овог челика добијена и при великом уделу дубине прслине у односу на дебљину.

Отпорност према ширењу прслине метала шави може се поредити са основним металом само за случај малих прслина у металу шави нормалне чврстоће. У свим

осталим примерима је отпорност метала шава према ширењу прслине мања него код основног метала. Сличност у понашању метала шава нормалне и више чврстоће може се приписати истој жици за заваривање под прашком (US 80B).

Хетерогеност структуре зоне утицаја топлоте условљава значајне разлике у отпорности према ширењу прслине. За однос U затезној плочи, отпорност према ширењу прслине у -ЗУТ може се поредити са оном код ОМ, али то није случај са малим односима код епрувете за савијање, где је у два случаја за односе и уочен скок у расту прслине.

При истој дужини прслине сагласни резултати добијени са затезном плочом и са епруветом за савијање. Овакво понашање љ криве упућује на могућност да се она прихвати као универзални показатељ понашања епрувете са прслином. За ово су, међутим, потребна даља испитивања и докази.

J_R крива користи при одређивањању носивости суда под притиском колико постоји прслина на њему. Услед развијања пластичне деформације може се применити J_R крива и то баш код андермечинга због концентрације напона у области метала шава.

6.3 СИМУЛАЦИЈА ЗАВАРЕНОГ СПОЈА ПРИМЕНОМ МЕТОДЕ КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

На основу претходно приказаних експерименталних резултата, урађена је нумеричка симулација понашања епрувете при савијању у три тачке, применом софтверског пакета ABAQUS [72]. Направљена су три модела, при чему је први представљао епрувету од основног материјала, док су преостали модели садржали и заварени спој. Други модел је урађен са прслином и зарезом у средини завареног споја, док је код трећег модела зарез (као и прслина) померен ближе зони утицаја топлоте. За сва три модела усвојена је почетна дужина прслине од 2.3 mm. Изглед и димензије епрувета одговарају претходно датим димензијама епрувете коришћене у експерименту. Сви модели су направљени као 2D.

Механичке особине за еластично и пластично понашање при нумеричкој симулацији су узете из литературе и дате у табели 5, за основни материјал и метал шава. На основу датих вредности граница течења за оба материјала, може се видети да је у питању очигледан андермечинг. Треба напоменути да су од свих вредности из литературе усвојене најниже, како би се осигурало да је прорачун на страни сигурности.

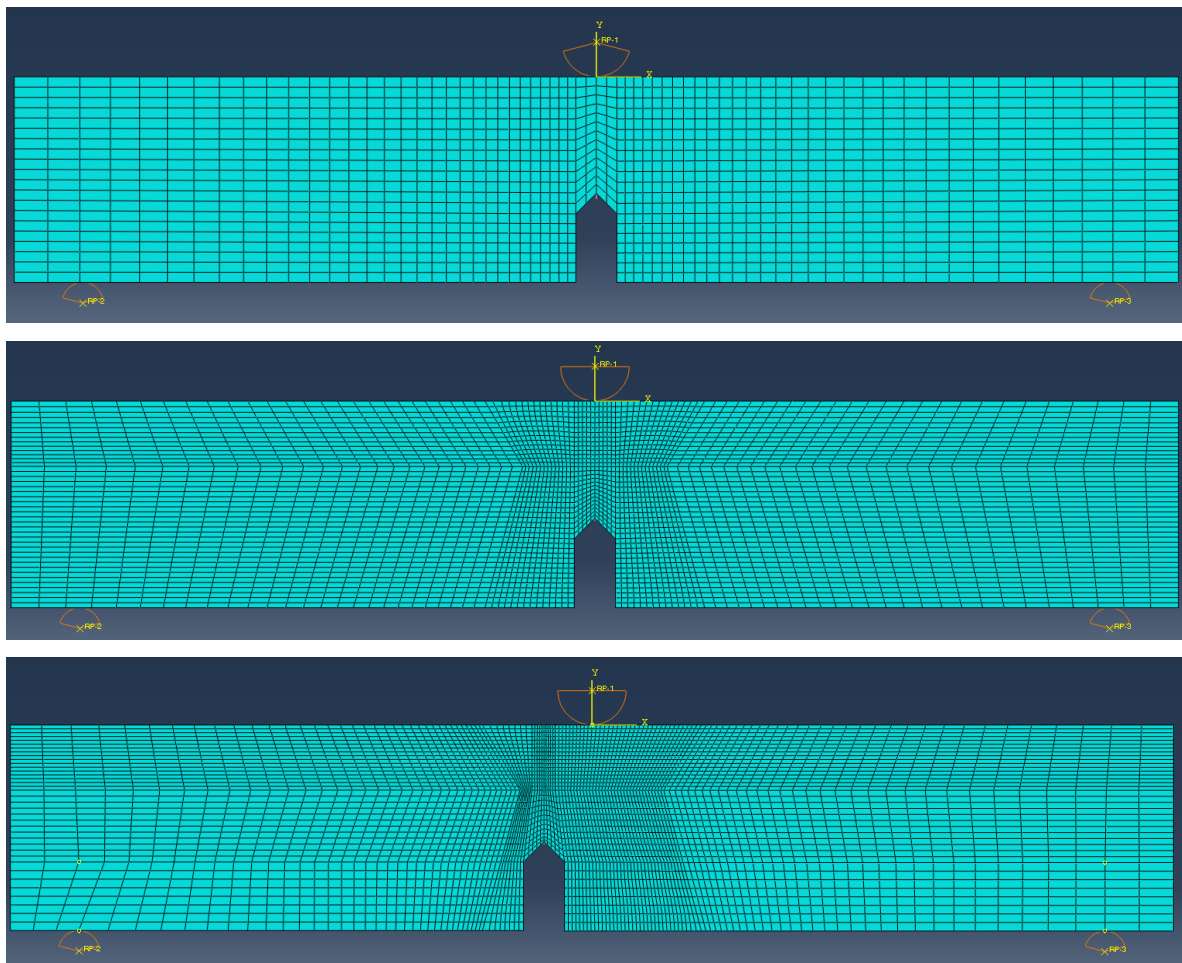
Табела 6.2. Подаци за симулацију завареног споја

Материјал	Напон на граници течења (MPa)	Затезна чврстоћа (MPa)	Издужење при лому (%)	Модул еластичности (MPa)	Поасонов коефицијент (-)
SUMITEN 80P	770	806	22	206000	0.3
M38 US 80B	585	771	21.5	210000	0.3

Гранични услови и оптерећење код сва три модели су задати на исти начин: Доњи леви и доњи десни крај епрувете су фиксирани дуж обе осе (уз омогућену ротацију). Оптерећење је такође задато у облику граничног услова по померању, које је одговарало максималним вредностима са одговарајућих дијаграма сила-померање за сва 3 случаја. Ове вредности су износиле:

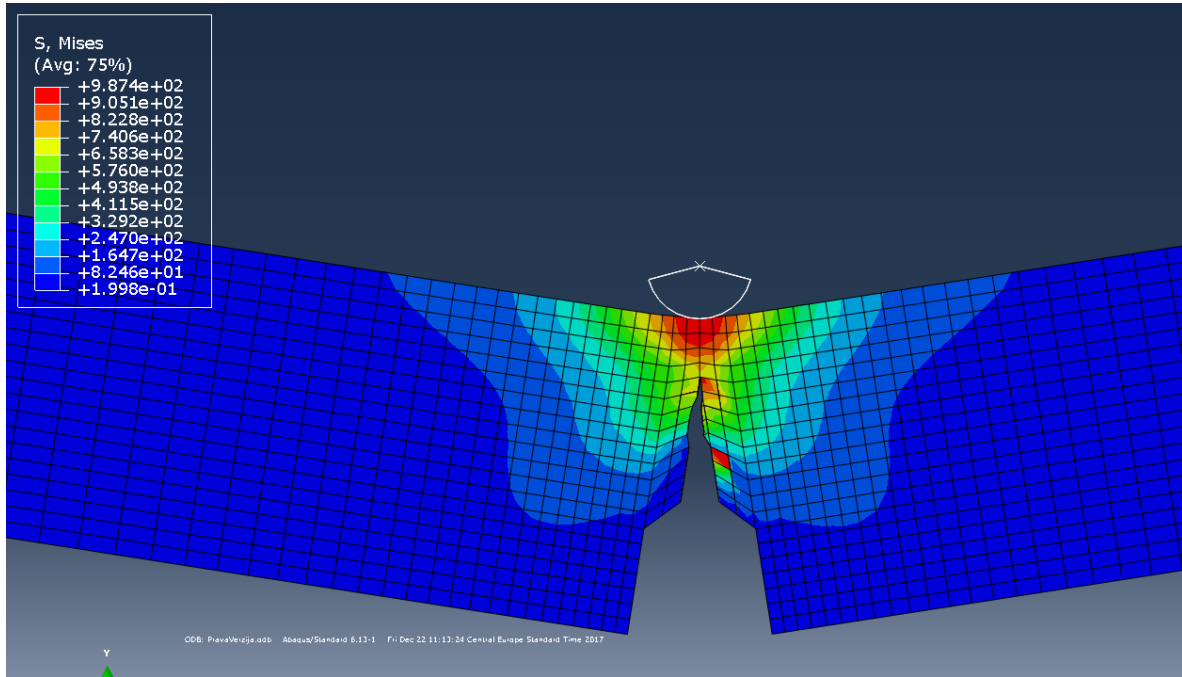
- 5.5 mm за први модел (основни материјал), на основу табеле 5
- 5.95 mm за други модел (заварени спој са симетричним зарезом), на основу дијаграма 6.15
- 4.0 mm за трећи модел (заварени спој са помереним зарезом), на основу дијаграма са слике 6.24

Гранични услови, оптерећења и мреже за сваки од 3 модела се могу видети на слици 6.16 испод. Коначни елементи у друга два случаја су приметно мањих димензија (гушћа мрежа) од оних из првог, услед присуства завареног споја и његове геометрије. Величина елемената у сва три случаја је одређена након већег броја симулација са различитим димензијама коначних елемената, како би се постигла одговарајућа конвергенција, с обзиром да су резултати добијени са елементима великих димензија били недовољно тачни, док је у случају превеликог броја елемената (а мањих димензија) било немогуће извршити прорачун до краја услед превелике сложености.

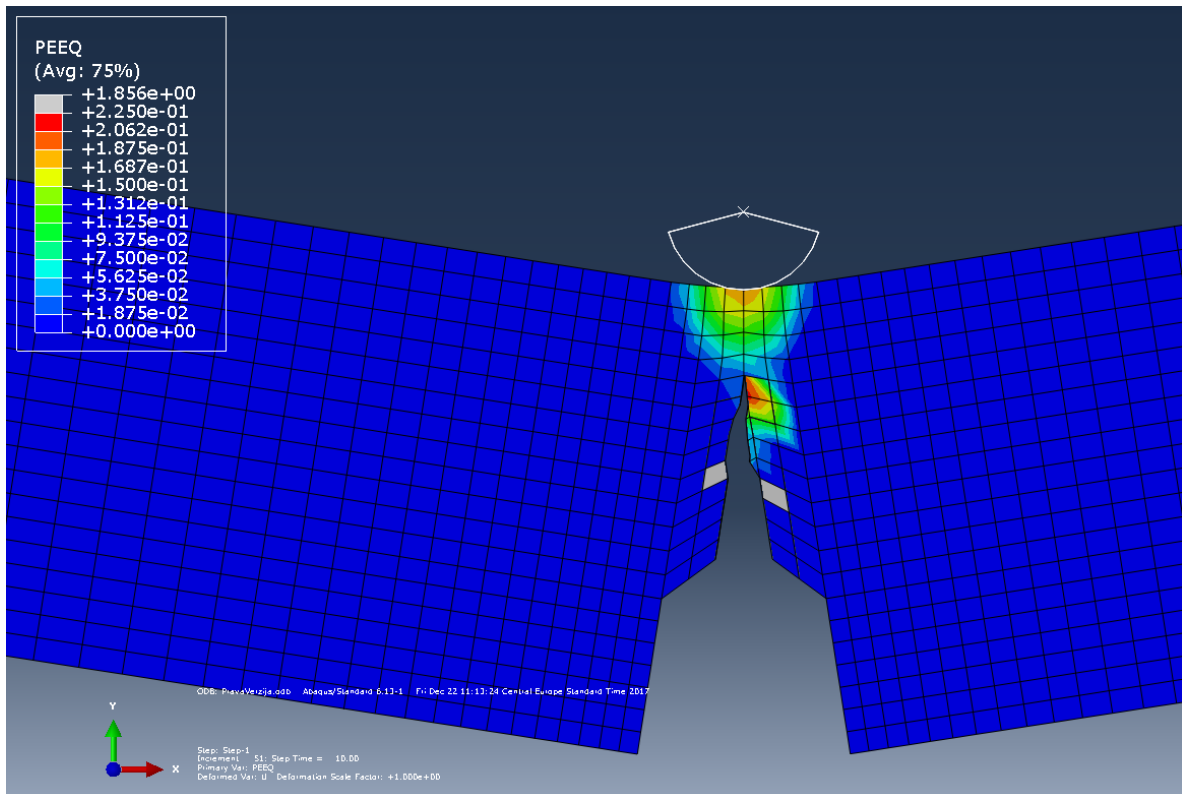


Слика 6.16 Гранични услови, оптерећења и мреже: горе – ОМ модел, средина – симетрични заварени спој, доле – асиметрични заварени спој

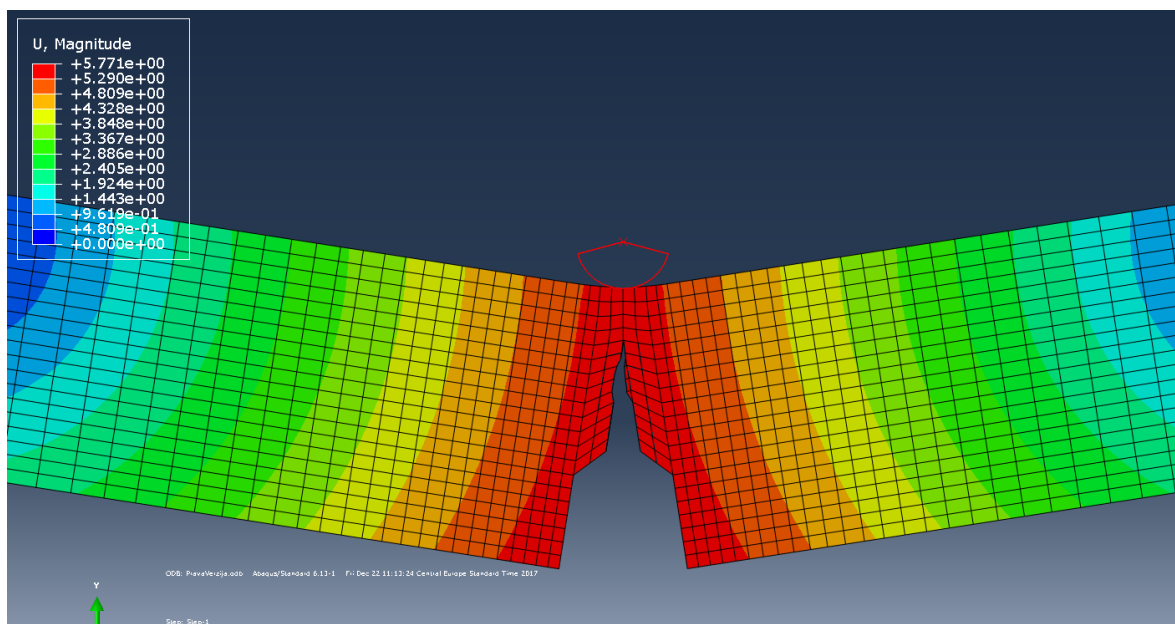
Резултати нумеричких симулација за сва три модела су приказани на сликама испод. Овде се могу видети расподеле напона, пластичних деформација и померања у моделима од ОМ, симетричним и асиметричним завареним спојем. Сви резултати су приказани за деформисан облик епрувете за савијање у 3 тачке.



Слика 6.17 Напонско стање у моделу ОМ



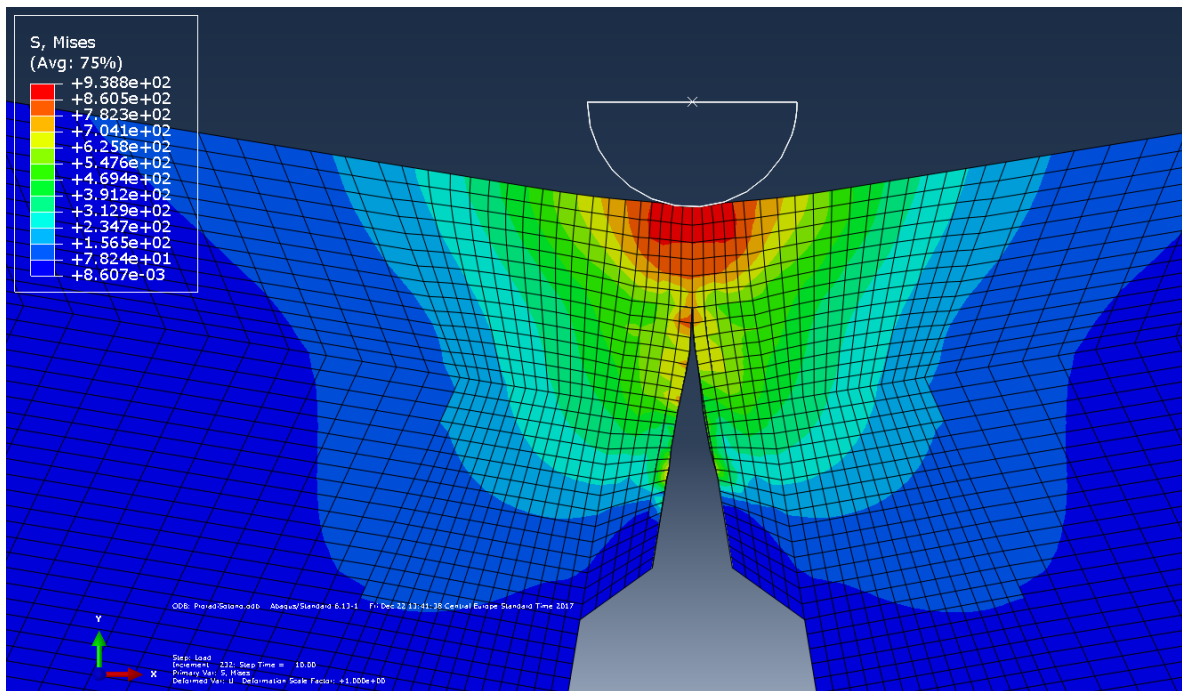
Слика 6.18 Пластичне деформације у моделу ОМ



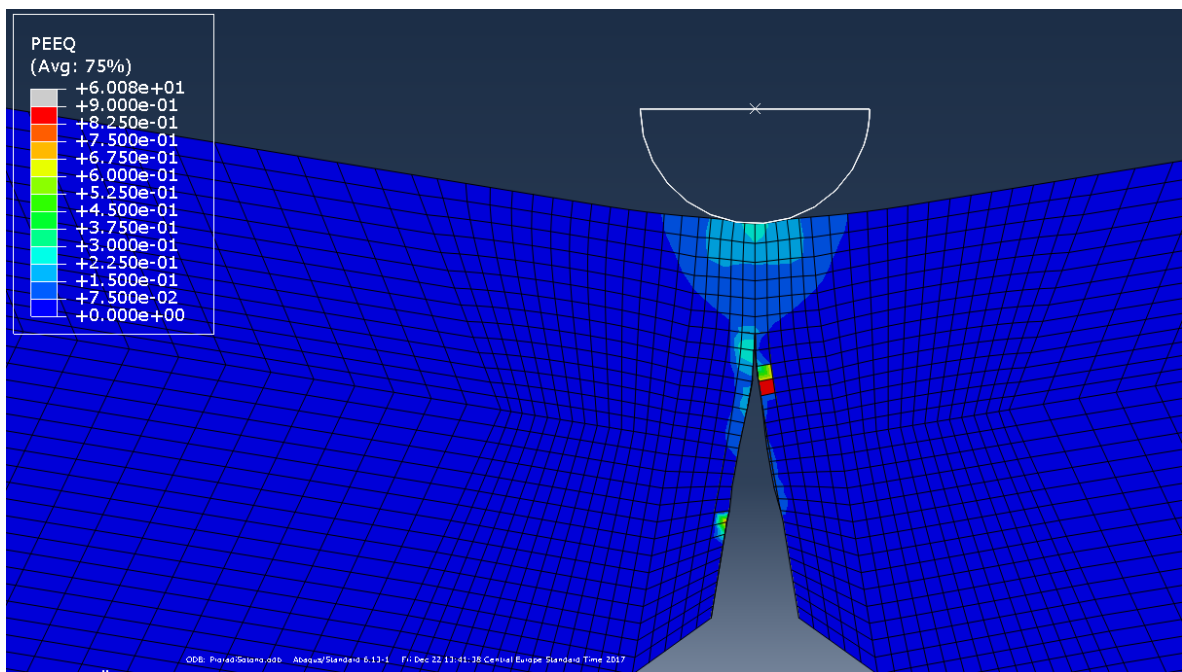
Слика 6.19 Померања у моделу ОМ

Као што се може видети из ових слика, напони и пластичне деформације достижу највеће вредности на месту деловања оптерећења, као и у врху прслине, што је и било очекивано.

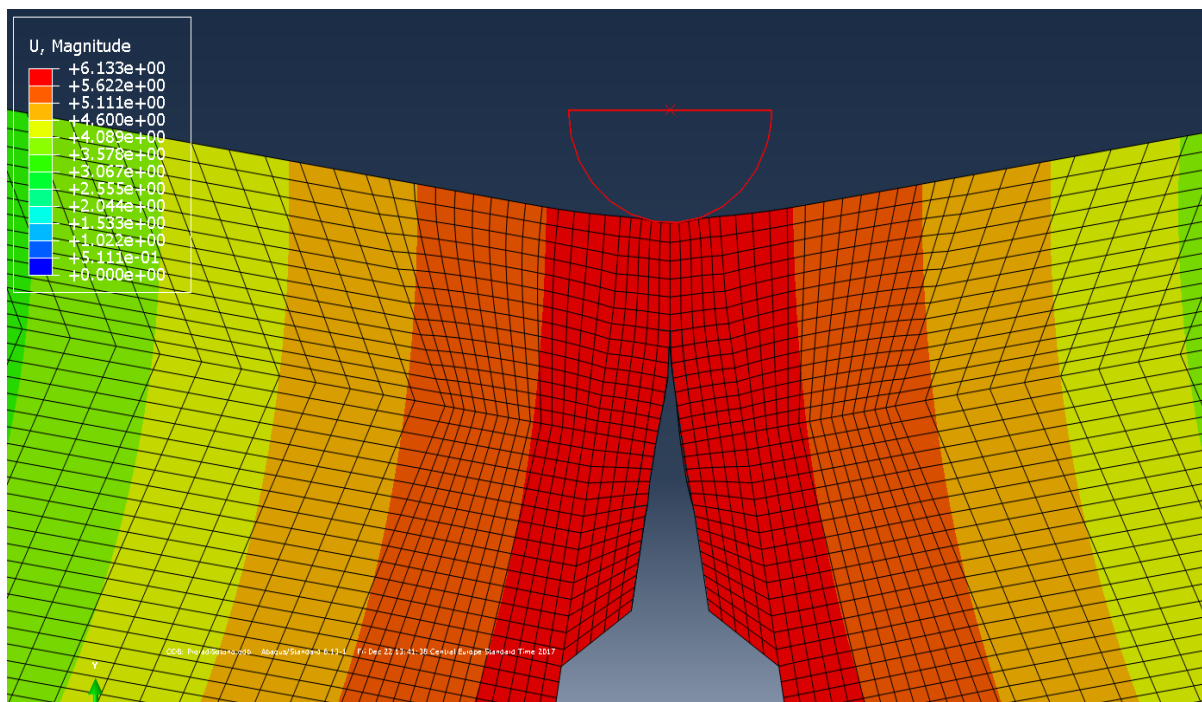
Максимално померање, односно угиб епрувете у случају модела епрувете од основног материјала је 5.771 mm, што је веома близу експериментално измерених 5.5 mm (разлика је око 5%). Такође треба нагласити да је ток деформације нумеричког модела у великој мери одговарао дијаграму сила-померање за ОМ – у почетку се епрувета полако савијала, до тренутка кад је померање достигло вредност од око 1 mm (која одговара вредности померања на дијаграму при којој се достиже максимална сила, односно чврстоћи на затезање). Након достизања ове вредности, епрувета је почела да се деформише значајно брже, услед губитка носивости и раста прслине, чија се дужина удвоstrучила у односу на почетну вредност.



Слика 6.20 Напонско стање у моделу са симетричним спојем

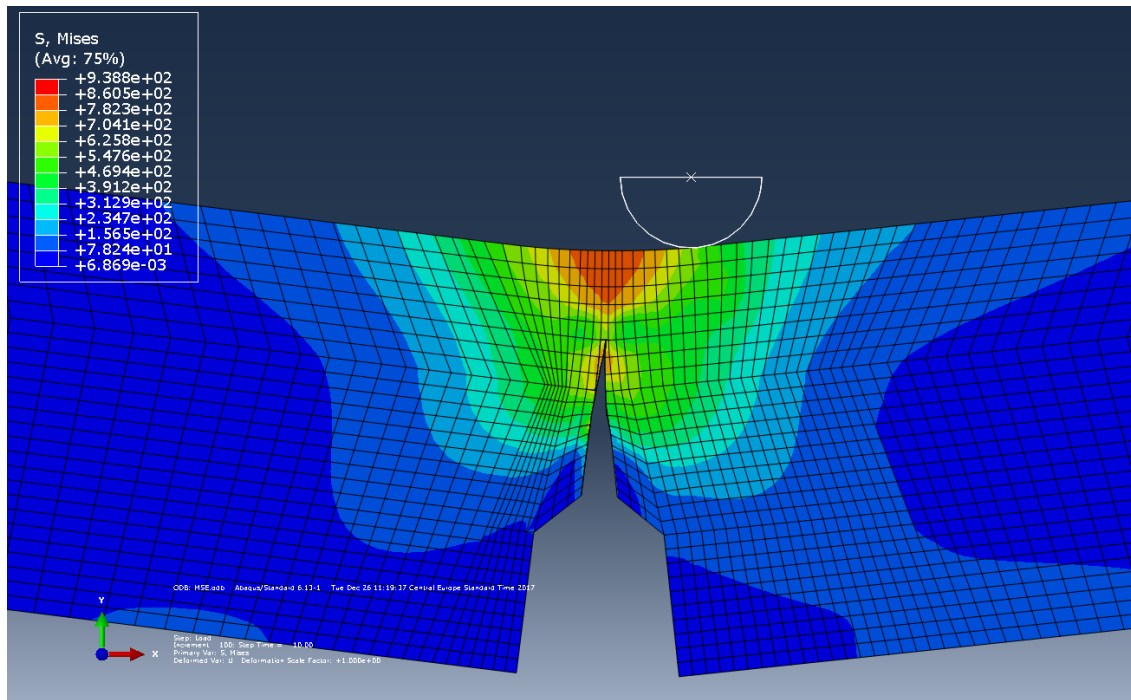


Слика 6.21 Пластичне деформације у моделу са симетричним спојем

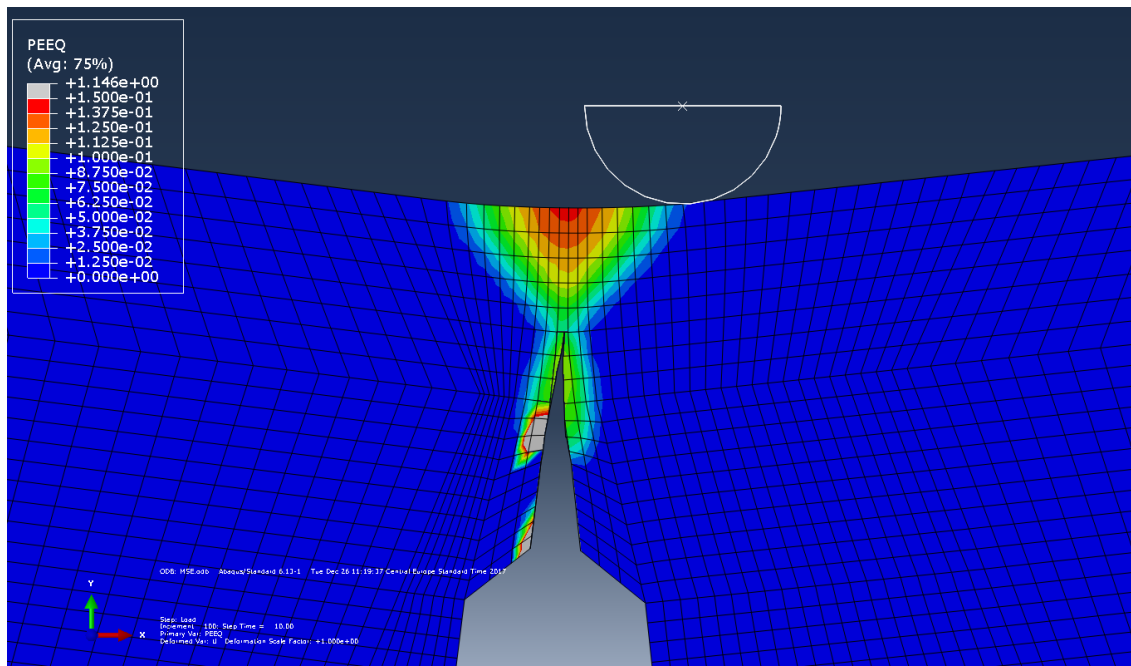


Слика 6.22 Померања у моделу са симетричним спојем

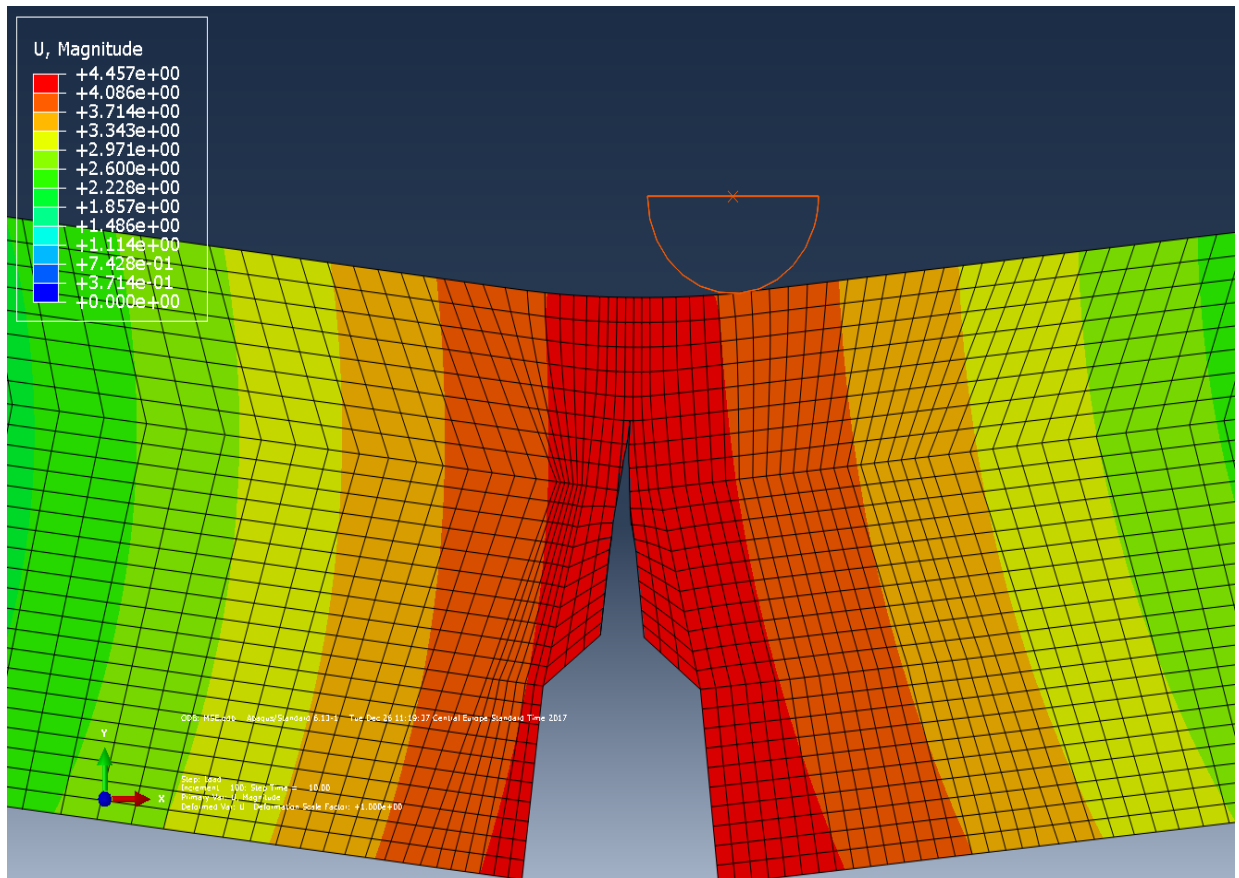
У случају епрувете са завареним спојем и зарером/прслином у средини, расподела напона и деформација је слична као и у првом случају, у погледу концентрације напона и максималних вредности пластичне деформације. Понашање при деформисању услед оптерећења је такође у великој мери одговарало понашању епрувете током експеримента, при чему је дошло до значајног пораста деформације при померању које је у великој мери одговарало максималној сили при експерименту. У овом случају, дужина прслине повећала се за нешто више од 3 mm.



Слика 6.23 Напонско стање у моделу са асиметричним спојем



Слика 6.24 Пластичне деформације у моделу са асиметричним спојем



Слика 6.25 Померања у моделу са асиметричним спојем

7. ЗАКЉУЧАК

Детаљно је сакупљена, проучена и систематизована научна литература из области везана за све аспекте ове дисертације. У оквиру дисертације урађено је следеће:

Анализирана је разлика у понашању завареног споја као целине и његових конституената и затезањем су испитане епрувете са металом шава мање и веће чврстоће у односу на основни метал што је важно и за оцену отпорности према ширењу прслине, је даје основне податке о понашању материјала при оптерећивању.

На основу експерименталних резултата, урађена је нумеричка симулација понашања епрувете при савијању у три тачке применом софтверског пакета ABAQUS.

Методом коначних елемената је доказана задовољавајућа заварљивост челика са металом шава ниже чврстоће (андермечинг) и отпорност према прслинама и кртом лому. Дефинисана је процедура за експерименталну анализу а на основу добијених резултата потврђено је да напони и пластичне деформације достижу највеће вредности на месту деловања оптерећења, као и у врху прслине, што је и било очекивано. Показано је да се максималне вредности пластичних деформација појављују на месту деловања оптерећења у симетричном моделу, врху прслине у ОМ моделу и тачно изнад зареза у асиметричном моделу.

Остварени научни допринос ове дисертације

Допринос ове симулације састоји се управо у могућности да се на брз и релативно једноставан начин развије модел који ће на меродаван начин представити реално понашање епрувета, у погледу концентрације напона и деформисања током експеримента.

У сва три модела у мањој или већој мери присутни елементи у којима је пластична деформација приметно већа него у околини, који се налазе или на граници прслине, или на месту њеног првобитног врха. Ово наводи на закључак да би ове моделе требало додатно оптимизовати, како би се утицај ових елемената што више смањио или уколико је могуће, елиминисао.

Нумерички модели су довољно прецизно и верно представили понашање епрувете оптерећене на савијање у три тачке, за три различита модела у смислу материјала (модел ОМ) и положаја зареза и прслине у завареном споју (симетрични

и асиметрични модели). Из ових модела се такође може јасно видети и напредовање прслине, односно промена њене дужине у односу на почетну вредност од 2.3 mm. Треба такође напоменути да је на ове величине у великој мери утицала и геометрија модела, као и хетерогеност епрувете у различитим случајевима. Наравно, што се постојећих модела тиче, остаје простора за њихово унапређење и даљу оптимизацију, како би се у будућности добијали квалитетнији резултати, који би били приближнији стварном стању ствари.

Циљ овог рада је да се покажу нумерички модели, допринос анализи проблема из референтне области, који се састоји управо у могућности да се на брз и релативно једноставан начин развоја модела који ће на меродаван начин представити реално понашање епрувета, у погледу концентрације напона и поља деформацијатом релевантних оптерећења. Нумеричком анализом могуће је приказати и ширење прслине, односно промена њене дужине у односу на иницијалну вредност од 2.3 mm. Ови резултати се такође могу искористити и као основа за будућа истраживања, која би могла да се баве испитивањем понашања оваквих епрувета на заморно оптерећење, с обзиром да су посуде под притиском (област примене оваквих материјала) управо изложене оваквом оптерећењу и најчешће отказују услед истог.

Код модела са зарезом / прслином, напони и пластичне деформације су поново највећи близу места деловања силе и/или у врху прслине. У овом случају померање је значајно мање (4.457 mm нумерички односно 4.0 mm експериментално), што је и очекивано, будући да је прслина померена у односу на правац деловања, односно у овом случају сила делује на „јачи“ попречни пресек. Такође се може уочити да прслина у овом случају напредује под одређеним углом (у прва два раст се одвијао у правцу Y осе), односно да скреће ка мест деловања силе. С обзиром да сила не делује директно на пресек где се налази зарез, промена дужине прслине није изражена као у случају симетричног модела, и њена вредност је приближнија моделу са ОМ (око 2.5 mm).

Концентрација напона најизраженија је у моделу ОМ, где он достиже вредности од 938 МПа у врху прслине и на месту деловања оптерећења. Најмање вредности су у моделу са асиметричним спојем услед међусобног положаја зареза/прслине и места деловања силе (860.5 МПа). Највећи раст прслине забележен је у моделу са

симетричним спојем, док је најмањи забележен у случају епрувете од ОМ, што је и било за очекивати, будући да се ради о андермечованом завареном споју.

Треба приметити да су у сва три модела умањој или већој мери присутни елементи у којима је пластична деформација приметно већа него у околини, који се налазе или на граници прелине, или на месту њеног првобитног врха. Ово наводи на закључак да би ове моделе требало додатно оптимизовати, како би се утицај ових елемената што више смањио или уколико је могуће, елиминисао.

Литература

- [1] J.R Rice, „Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks“, J. Appl. Mech.(Trans. ASME), Vol. 55, п.п 98-103, 1988
- [2] V.Kumar, M.D. German, C.F.Shih, „An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis“, EPRI Report NP-1931, 1981.
- [3] Rice, J.R., "Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture", A. Fundamentals, Editor, Academic Press, N.Y. p. 191-311, 1968.
- [4] Стевановић-Хендрих, К.Р., Л. Перић, Methods for solving problems of electroelastic piezoelectric bodies with defect applying spatial analysis in Matlab. Facta universitatis-series: Mechanics, Automatic Control and Robotics, 3(13): p. 511-532, 2003.
- [5] Šumarac, D. and D. Krajčinović, *Osnovi mehanike loma*. 1990 ASTM E 1152 - 91, "Standard Test Method for Determining J- R „Curve", Annual Book of ASTM Standards п.п 724, 1991.
- [6] З. Бурзић, Савремене методе провере механичко-технолошких особина заварених спојева – део 2*” п.п 151-158, Vol.3, 2002.
- [7] П. Агатоновић, „Различите стратегије одређивања чврстоће и века“, Интегритет и век конструкција, Vol.1, п.п 75-89
- [8] М. Мањго., А. Седмак, Б. Грујић, „Fracture and fatigue behaviour of NIOMOL 490K welded joint“, Интегритет и век конструкција, Vol. 8, п.п 149-158, 2008
- [9] Седмак, С., Утицај зареза и прслина на појаву лома при еластичној и пластичној деформацији, 1976,
- [10] С. Булатовић „Еласто-пластично понашање завареног споја од нисколегираног челика повишене чврстоће у условима нискоцикличног замора“, дисертација, Београд, 2014.
- [11] J.C. Radon, „Истраживање површинских заморних прслина“, Интегритет и век конструкција, Vol. 6, п.п 96-110, 2006.
- [12] М. Добројевић, „Симулација раста прслина у завареним спојевима“, Дисертација, 2006.
- [13] Б. Глишић., Daniele Inaudi, „Праћење интегритета мостова критичних у погледу лома“, Интегритет и век конструкција, Vol. 10, п.п. 135-141, 2010
- [14] Р. Јовичић, „Анализа утицаја прслина на интегритет феритно–аустенитних заварених спојева“, Дисертација, 2007.
- [15] Б. Петровски, „Одређивање преостале носивости суда под притиском са површинском прслином“, Дисертација, 1985

- [16] М. Бурзић, С. Седмак., З. Бурзић., М. Зрилић., Д. Јаковић., Д. Момчиловић, „Експериментално одређивање динамичке жилавости лома КИД, код металних материјала високе чврстоће“, Техничка дијагностика, п.п 28-39, Vol.2, 2003.
- [17] С. Седмак, „Експлоатацијске прслине у увареним спојевима посуда под притиском“, Летња школа механике лома-Механика лома заварених спојева, Аранђеловац, п.п 293-308, 1994.
- [18] ASTM, E 399-90:" Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials, Annual book of ASTM standards, Vol. 3, p.p 506-536, 1991
- [19] Р. Јовичић., Р. Прокић-Цветковић., О. Поповић, „Испитивања методама без разарања феритноаустенитних заварених спојева“, Интегритет и век конструкција, Vol. 3, п.п 119-128, 2005
- [20] Г. Ациев, , А. Седмак, „Оцена интегритета резервоара“, Интегритет и век конструкција, Vol. 3, п.п 93-98, 2003
- [21] Ј. Кураи., Б. Алексић, „Испитивање притиском као узрочник појаве прслина код опреме под притиском у експлоатацији“, Интегритет и век конструкција, Vol. 3, п.п 65-71 , 2003
- [22] Ациев, Т., А. Седмак, Ациев, Г., Арсић, М.А, „Оцена преостале чврстоће завареног сферног резервоара са прслином“, Интегритет и век конструкција, Vol. 2, п.п 20-22 , 2002.
- [23] Н. Филиповић., К. Герић, „Утицај услова оптерећења на лом завареног танкозидног резервоара“, Интегритет и век конструкција, Vol. 7, п.п 21-28, 2007.
- [24] Љ. Миловић, „Значај прслина у зони утицаја топлоте челика за повишене температуре“, Интегритет и век конструкција, Vol. 8, п.п 55-64, 2008
- [25] А. Бређан., Ј. Кураи, „Европска директива за опрему под притиском (пед) и интегритет конструкција“, Интегритет и век конструкција, Vol.3, 31-41, 2003.
- [26] А. Миловановић., А. Седмак., А. Милосављевић., З. Бурзић., Ж. Саркочевић, „експериментално истраживање понашања заварених посуда под притиском са прслином“, Интегритет и век конструкција, Vol.1., 9-12, 2000.
- [27] J. Legat., N. Gubeljak., Š. Primes, „Оцена поузданости и заморног понашања челика повишене чврстоће и њихових заварених спојева“, Шеста међународна летња школа механике лома, п.п 69-84, 1991.
- [28] Живојиновић, Д.Д., „Примена механике лома на процену интегритета заварених конструкција од легура алуминијума“, Машински Факултет Универзитет у Београду, 2013.

- [29] С. Седмак., А. Седмак, „Integrity of Penstock of Hydroelectric Powerplant“, Интегитет и век конструкција, Vol.5, п.п 59-70, 2005.
- [30] М.А.Аlgoool, „Утицај почетне пластичне деформације и заосталог напона на понашање завареног споја у присуству прелина“, дисертација, 2013.
- [31] М. Смиљанић, „ Заварљиви финозрни челици, Способност заваривања и заваривање“, Заваривање и заварене конструкције, п.п 155-164, 2006.
- [32] А. Радовић, „Могућности коришћења критеријума механике лома у оцени сигурности заварених спојева“, Летња школа механике лома-Механика лома заварених спојева, Аранђеловац, п.п 15-43, 1984.
- [33] И. Хајро, О. Пашић, З. Бурзић, „КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА НА ВИСОКОЧВРСТОМ КОНСТРУКЦИОНОМ ЧЕЛИКУ S690QL“, Заваривање и заварене конструкције, п.п 123-129, 2010.
- [34] Н. Губељак, Ј. Предан, И. Рак, Д. Козак, „Integrity assessment of hsla steel welded joint with mis-matched strength“, Интегритет и век конструкција, п.п 157–164, 2009.
- [35] К-Н.Schwalbe, *The Engineering Treatment Method for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures*, in *EFAM ETM-97*. 1997.
- [36] V. Kumar., M.D.German., C.F.Shih, „An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis“, EPRI Report NP-1931, 1981.
- [37] С. Седмак., Б. Петровски., В. Огаревић, „Post-Yield Crack Growth Analysis in Full-Scale Pressure Vessel Test in Mechanical Behaviour of Materials-V“, Proceedings of the Fifth International Conference ICM5, Pergamon Press, Oxford, Vol. 1. P.p 469-476, 1987.
- [38] Д. Шумарац., Д. Крајчиновић, Оснпви механике лома, 1990.
- [39] „Теретни бродови класе Liberty“, Наоружање, април 2017.
- [40] Седмак, С., Увод у механуику лома и конструисање са сигурношћу од лома. 1980.
- [41] Г. Јовићић., М. Живковић, С. Вуловић, „Прорачунска механика лома и замора“, Монографија, 2011.
- [42] А. А. Griffith, „The Phenomena of Rupture and Flow in Solids“, Publication: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 221, п.п 163-197, 1921.
- [43] Irwin, G.R., „Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate“. Spie Milestone series MS, **137**(167-170): p. 16, 1997

- [44] Westergaard, H., Bearing pressures and cracks. SPIE MILESTONE SERIES MS, 137: p. 18-22, 1997.
- [45] Hertzberg, R.W., Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 1989.
- [46] А. Седмак, Примена механике лома на интегритет конструкција, 2003.
- [47] Б. Факић., А. Бурић. Б. Муминовић, С. Томашевић, „Change of Physical-metallurgical Properties of Low-alloy Steel 16Mo3 in the Heat Affected Zone in Welding Processes MMA and MAG“, Trends in the Development of Machinery, TMT 2011.
- [48] BS 7448 - Part 1:1991, "Fracture mechanics toughness tests - Methods for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of metallic materials", 1991.
- [49] T.L. Anderson, „Fracture mechanics: fundamentals and applications“, 2005.
- [50] L.M. Kechan. Damage mechanics, Elsevier, p.p 477-478, 1996.
- [51] С. Седмак, „Утицај зареза и прлина на појаву лома при еластичној и плаастичној деформацији“, Дисертација, 1976
- [52] С. Бољановић, „Нумеричко моделирање преостале чврстоће структуралних елемената у присуству прлине при цикличним оптерећењима“, 2012.
- [53] Р. Бакић., Љ. Миловић., Р. Јовичић., С. Седмак., " Осигурање квалитета резервоара у експлоатацији после поправке прлина " Интегритет и век конструкција, Vol. 13, No.1, п.п 63-74, 2013.
- [54] K.H Schwalbe., U. Zerbst, Y.J.Kim., W. Brocks., A. Cornec., J. Heerens., H. Amstutz, „EFAM ETM 97-the ETM method for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures, comprising the versions ETM 97/1 and ETM 97/2“, 1 EFAM ETM 97, 1998.
- [55] И. Чамагић., Н. Васић., З. Васић., З. Бурзић., А. Седмак, „Compatibility of fracture mechanics parameters and fatigue crack growth parameters in welded joint behaviour evaluation“, Технички вијесник, Vol. 20, п.п 205-211, ISSN 1330-3651, 2013.
- [56] К. Герић, „Појава и раст прлина у завареним спојевима челика повишене чврстоће“, Докторска теза, 1997.
- [57] ISO EN Welding and allied processes-Nomenclature of processes and reference numbers (ISO 4063: 1998), 1998.
- [58] Џ. Кудумовић, „Заваривање и термичка обрада“, 1997К.Н. Schwalbe, „The Engineering Treatment Method for assessing the significance of crack-like defects in engineering structures“, EFAM ETM-97, 1997

- [59] Седмак, С., Б. Петровски, М. Драгић, Оцена преостале чврстоће заварених спојева са прслинама применом контурног интеграла, VII Стручно саветовање о ТЕ., Охрид 1985.,
- [60] Јарамаз, Д., Примена параметара еласто-пластичне механике лома на процену интегритета заварених конструкција са површинском прслином, Београд, Октобар 2002.
- [61] G.R. Irwin, „Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate“, Spie Milestone series MS, Vol. 137, п.п 167-170, 1997.
- [62] Љ. Миловић, „Анализа интегритета заварених компонената процесне опреме за повишене радне температуре“, Дисертација, 2008.
- [63] R. Foroughi, J.C. Radon, „Crack closure behavior of surface cracks under pure bending“, Mechanics of Fatigue Crack Closure- ASTM International, 1988.
- [64] Volčenko, V.N., et al., *Teoria svaročnih procesov*, V. Škola, Editor. 1988: Moskva.
- [63] JUS С.ТЗ.020. "Заваривање, класификација грешака у завареним спојевима изведеним топљењем метала (ISO 6520/1982), Службени лист, СФРЈ, 1982.
- [64] С. Седмак., А. Радовић., Л. Недељковић, The strength of welds in HSLA steel after initial plastic deformation. Pergamon Press Ltd, p. 435-446, 1979.
- [65] Ажман, С., М. Марчетич., Ј. Бернетич, „Using aspects for welded constructions of HSLA structural steels first generation with high Ceq and second generation with low Ceq“. Заваривање и саварене конструкције, 58(1): p. 23-30, 2013.
- [66] D. F. Socie „Fatigue of Welds“, 2010-2014
- [67] М. Чалопек „Хладне пукотине у завареним спојевима“, децембар 2015.
- [68] Ј. Кураи, Б. Алексић „Испитивање притиском као узрочник појаве прслина код опреме под притиском у експлоатацији“, Интегритет и век конструкција, Vol. 3, п.п 65-71, 2003.
- [69] М. Јовановић, В. Лазић, Д. Адамовић, Н. Ратковић Машински материјали, 2003
- [70] В. D. Olson "Prediction of Austenitic Weld Metal Microstructures and Properties", Welding Research Supplement, October, 1985.
- [71] Bhadeshia, H., L.-E. Svensson, and B. Gretoft, A model for the development of microstructure in low-alloy steel (Fe-Mn-Si-C) weld deposits. Acta Metallurgica, 33 (7): p. 1271-1283, 1985.

- [72] В. Грабулов., И. Блaчић., А. Рaдовић., С. Сeдмак, „Toughness and Ductility of High Strength Steels Welded Joints“, Интегритет и век конструкција, Vol. 8, п.п 181-190, 2008
- [73] Simulia Abaqus, Non-Linear Finite Element Analysis, Simulia instruction training, September, 2017

БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ АУТОРА

Емина Џиндо рођена је 14.02.1973. године у Београду. Након завршене основне школе уписала је Четрнаесту гимназију у Београду (природно-математички смер), коју је завршила 1992. године. Машински факултет Универзитета у Београду уписала је 1992. године. Дипломске академске студије завршила је 2003. Године.

Докторске академске студије уписала је 2009. године на истом факултету. Положила је све испите предвиђене програмом усавршавања. Осим обавезних предмета, положила је следеће изборне предмете: Механика лома, Нумеричка симулација процеса заваривања, Преношењ топлоте и супстанције, Пројектовање информационих система као и четири лабораторијска предмета (Истраживање и публикавање I, II, III и IV). Академске студије (M.Sc.) 2011. године са укупном просечном оценом 10/10.

На Машинском факултету била је запослена од 17.02.2004. године као библиотекар информатор. Од 2007 године ради у Иновационом центру Машинског факултета, д.о.о као докторант, сарадник истраживач.

Служи се свим програмима из пакета Microsoft Office, као и програмима за цртање, Catia, Solid Works. Говори енглески, а служи се руским језиком.

Учествује у раду на Иновационим пројектима 391-00-16/2017-16/38 Тип 1 "Развој иновативног поступка ласерског чишћења површина бакра и бакарних легура", 391-00-16/2017-16/35 „Иновативна технологија производње маскирног пигмента за потребе војне индустрије“, 391-00-16/2017-16 - Тип 1/39 „Конструкционо унапређење ротационих хваталки виљушкар у циљу редукације оштећења при руковању материјалом мале чврстоће“.

Аутор је и коаутор на више од 38 стручних и научних радова, од којих су 2 штампана у међународним часописима који имају импакт фактор на SCI листи.

Прилог 1.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Потписана Емина С. Џиндо

Број индекса D13-59/09

Изјављујем

Да је докторска дисертација пос насловом

РАЗВОЈ ПРСЛИНЕ У ХЕТЕРОГЕНИМ ЗАВАРЕНИМ СПОЈЕВИМА

- резултат сопственог истраживачког рада
- да предложена дисертација у целини није била предложена за добијање дипломе било које према студијским програмима других високошколских установа
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршила ауторска права и користила интелектуалну својину других лица

У Београду, 06.07.2018.

Потпис докторанда

**Прилог
2.**

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Емина С. Џиндо

Број индекса D13-59/09

Студијски
програм

Наслов рада РАЗВОЈ ПРСЛИНЕ У ХЕТЕРОГЕНИМ ЗАВАРЕНИМ
СПОЈЕВИМА

Ментор проф. др Зоран Рдаковић

Потписана Емина С. Џиндо

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предала за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 06.07.2018.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

РАЗВОЈ ПРСЛИНЕ У ХЕТЕРОГЕНИМ ЗАВАРЕНИМ СПОЈЕВИМА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предала сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучила.

1. Ауторство

2. Ауторство некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 06.07.2018.

1. Ауторство - Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. Ауторство – без прераде. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.