УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА КОСОВСКА МИТРОВИЦА

УНИВЕРЗИЛ ФАКУЛТЕТ Т КОСОБО	ГЕТ У ПРИШ Емничких Смпил гоза	ТИНИ НА УКА ИЦА
примька	22.03.	2022-
OPF JEIMI		вредност
277	/1	

Доставити: Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици и Комисији за контролу квалитета докторских студија студијског програма Машинско инжењерство

Предмет: Сагласност ментора и предлог за именовање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Миливоја Јовановића

Кандидат Миливоје Јовановић испунио је све услове предвиђене студијским програмом докторских студија и Правилником о докторским студијама. Кандидат има објављене неопходне научне радове из уже научне области из које је тема докторске дисертације. Овим дајем сагласност да кандидат Миливоје Јовановић, испуњава све услове за одбрану докторске дисертације под насловом "Истраживање утицаја променљивог оптерећења и грешке типа прслине на процену интегритета заварених компонената процесне опреме за повишене радне температуре", и обраћам се Наставнонаучном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици као и Комисији за контролу квалитета докторских студија студијског програма Машинско инжењерство, са захтевом за именовање Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

За чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације предлажем:

- 1. др Зијах Бурзић, научни саветник, Војнотехнички институт Београд председник;
- 2. др Ивица Чамагић, ванредни професор, ФТН Косовска Митровица ментор, и
- 3. др Живче Шаркоћевић, ванредни професор, ФТН Косовска Митровица члан.

У Косовској Митровици, 22.0**%**2022. године

Ментор: др Ивица Чамагић, ванр. проф.

Mausiant

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ СА ПРИВРЕМЕНИМ СЕДИШТЕМ У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Миливоје С. Јовановић

ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПРОМЕНЉИВОГ ОПТЕРЕЋЕЊА И ГРЕШКЕ ТИПА ПРСЛИНЕ НА ПРОЦЕНУ ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОМПОНЕНАТА ПРОЦЕСНЕ ОПРЕМЕ ЗА ПОВИШЕНЕ РАДНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ

Докторска дисертација

Косовска Митровица, 2022

UNIVERSITY OF PRISTINA TEMPORARY SETTLED IN KOSOVSKA MITROVICA

FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES

Milivoje S. Jovanović

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF VARIABLE LOAD AND CRACK- TYPE FAULTS ON ASSESSMENT OF INTEGRITY OF WELDED COMPONENTS OF PROCESS EQUIPMENT FOR INCREASED OPERATING TEMPERATURES

Doctoral Dissertation

Kosovska Mitrovica, 2022.

Комисија за одбрану:

Ментор:	др Ивица Чамагић, ванредни професор,
	Факултет техничких наука, Косовска Митровица
Чланови комисије:	др Зијах Бурзић, научни саветник,
	Војнотехнички институт, Београд
	др Живче Шаркоћевић, ванредни професор,
	Факултет техничких наука, Косовска Митровица

Датум одбране:

Идентификациона страница докторске дисертације

I Аутор					
Име и презиме: Миливоје Јовановић					
Датум и место рођења: 02.08.1970. у Гњилану					
Садашње запослење:					
Академија струковних студија косовско метохијска Одсек Урошевац у					
Лепосавићу, асистент у настави					
II Докторска дисертација					
Наслов: ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПРОМЕНЉИВОГ					
ОПТЕРЕЋЕЊА И ГРЕШКЕ ТИПА ПРСЛИНЕ НА ПРОЦЕНУ					
ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОМПОНЕНАТА ПРОЦЕСНЕ ОПРЕМЕ					
ЗА ПОВИШЕНЕ РАДНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ					
Број поглавља: 6					
Број страница: 250					
Број слика и дијаграма: 197					
Број табела: 28					
Број библиографских података: 128					
Установа и место где је рад израђен:					
Факултет техничких наука, Косовска Митровица					
Научна област (УДК):					
Ментор: др Ивица Чамагић, ванредни професор, Факултет техничких наука,					
К. Митровица					
III Оцена и одбрана					
Датум пријаве теме: 05. 03. 2020. године					
Број одлуке и датум прихватања заснованости теме докторске					
дисертације:					
Бр.253/1, 15.03.2020. године					
Комисија за оцену подобности теме и кандидата:					
др Ивица Чамагић, ванредни професор, ФТН, Косовска Митровица					
др Зијах Бурзић, научни саветник, Војнотехнички институт, Београд					
др Живче Шаркоћевић, ванредни професор, ФТН, Косовска Митровица					
Комисија за оцену докторске дисертације:					
др Зијах Бурзић, научни саветник, Војнотехнички институт, Београд					
др Живче Шаркоћевић, ванредни професор, ФТН, Косовска Митровица					
др Ивица Чамагић, ванредни професор, ФТН, Косовска Митровица					
Комисија за одбрану докторске дисертације:					
др Зијах Бурзић, научни саветник, Војнотехнички институт, Београд					
др Живче Шаркоћевић, ванредни професор, ФТН, Косовска Митровица					
др Ивица Чамагић, ванредни професор, ФТН, Косовска Митровица					
Датум одбране дисертације:					

ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПРОМЕНЉИВОГ ОПТЕРЕЋЕЊА И ГРЕШКЕ ТИПА ПРСЛИНЕ НА ПРОЦЕНУ ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОМПОНЕНАТА ПРОЦЕСНЕ ОПРЕМЕ ЗА ПОВИШЕНЕ РАДНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ

Апстракт

Компоненте процесне опреме које раде у условима повишеног притиска и температуре су критичне у неком постројењу јер по правилу имају високе радне параметре. Посебно имајући у виду да је већина процесне опреме (пре свега пароводи) у употреби дуже од пројектованог радног века. Проблем представљају и заварене компоненте, код којих не сме да се искључи могућност постојања грешака типа прелина. У случају постојања грешака потребно је прецизно проценити интегритет компоненте и донети одлуку о њеној даљој експлоатацији. Због тога је порастао значај продужења радног века и ревитализације, као начина да се старија постројења задрже у погону. При томе се под ревитализацијом подразумева осигурање потпуног искоришћења века, помоћу селективне замене компонената са другим модерније пројектованим.

Процена интегритета процесне опреме за повишене радне температуре и притиске заснива се на коректно утврђеним експлоатационим особинама материјала и заварених спојева и сакупљању података о условима експлоатације. Такође, заснива се на примени одговарајућих параметара механике лома и процедура које обезбеђују поређење тзв. сила раста прслине са отпорношћу материјала на раст прслине. У случају заварених компонената изложених повишеној температури и притиску, примена параметара механике лома на процену њиховог интегритета је још значајнија јер дефинише понашање хетерогеног материјала у присуству грешака типа прслине. Значајно је и познавање параметара који дефинишу понашање материјала у условима деловања променљивог оптерећења (параметри раста заморне прслине и високоциклични замор). Допунски подаци о понашању завареног споја се добијају ударним испитивањима (енергија лома епрувете са зарезом), али се та карактеристика користи само као упоредна величина при избору материјала и не може се директно користити за прорачун напона. Она описује локално понашање материјала, на које утиче концентрација напона у виду зареза.

Легирани Cr-Mo челик ознаке SA 387 Gr. 91 је намењен за израду посуда под притиском, паровода и гасних инсталација у хемијској и петрохемијској индустрији, као и термоенергетским постројењима, које раде у условима повишене температуре, повишеног притиска и корозионе средине. Због својих изразито добрих механичких особина, као и одличне отпорности на присуство и пропагацију прслине у експлоатационим условима, његовом применом оствариће се и значајна уштеда у материјалу у односу на конвенционалне челике. Успешна примена овог челика зависи од степена погоршавања својстава основног метала током заваривања.

Очекује се да основни допринос ове дисертације буде у имплементацији изведених истраживања, као и у дефинисању основних параметара и критеријума прихватљивости, који ће омогућити сигурност у експлоатацији компоненти постројења процесне опреме намењене за рад у условима деловања променљивог оптерећења, повишеног притиска и повишених температура.

Кључне речи: легирани челик, прслина, замор, динамичка чврстоћа, енергија стварања прслине, енергија ширења прслине, жилавост лома у условима равне деформације, коефицијенти Парисове једначине.

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Наука о материјалима

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF VARIABLE LOAD AND CRACK- TYPE FAULTS ON ASSESSMENT OF INTEGRITY OF WELDED COMPONENTS OF PROCESS EQUIPMENT FOR INCREASED OPERATING TEMPERATURES

Abstract

Components of process equipment that operate in the conditions of high pressure and temperature are critical in a plant because, as a rule, they have very high operating parameters, especially having in mind that most of the process equipment (primarily steam lines) have been in use for longer than the projected service life. Welded components are also a problem, where the possibility of crack-type faults must not be excluded. In the case of faults, it is necessary to accurately access the integrity of the component and make a decision on its further exploitation. Due to that, the importance of extending the working life and revitalisation have increased, as the way to keep older plants in operation. Revitalisation refers to ensuring the complete utilisation of working life by selectively replacing components with contemporary ones.

The assessment of the integrity of process equipment for increased operating temperatures and pressures is based on correctly determined exploitation properties of materials and welded joints and on collection of data on operating conditions. In addition, it is also based on the application of appropriate parameters of fracture mechanic and procedures that provide the comparison of so-called crack growth force with the material resistance to crack growth. In the case of welded components exposed to increased temperature and pressure, the application of parameters of fracture mechanics to the assessment of their integrity is even more important because it defines the behaviour of heterogeneous material in the presence of crack-type fault. It is also important to know the parameters that define the behaviour of materials under the conditions of variable load (parameters of fatigue crack growth and high-cyclic fatigue). The Additional data on the behaviour of welded joint are obtained by impact testing (crack energy of test tube with notch), but this property is also used only as the comparative quantity for the selection of material and cannot be directly used for the calculation of tension. It describes local behaviour of the material, which is influenced by the tension concentration in the form of notch.

Alloying Cr-Mo steel, SA 387 Gr. 91 is used for the manufacture of pressure vessels, steam lines and gas installations in chemical and petrochemical industry, as well

as in thermal power plants that operates under conditions of increased temperature, increased pressure and corrosive environment. Due to its extremely good mechanical properties, as well as to excellent resistance to the presence and propagation of crack in operating conditions, its application will lead to significant savings in material compared to conventional steels.

It is expected that the main contribution of this thesis will be in the implementation of conducted research, as well as in the defining of basic parameters and acceptance criteria, which will provide safety in the operation of components of process equipment plants intended for the operation under conditions of variable load, increased pressure and increased temperatures.

Keywords: alloying steel, crack, fatigue, dynamic strength, crack initiation energy, crack propagation energy, fracture toughness in conditions of flat deformation, coefficients of the Paris equation.

Scientific field: Mechanical Engineering

Narrow scientific field: Science of materials

Изјава захвалности

Овај рад је настао након вишегодишњег интересовања аутора за заварене спојеве компонената процесне опреме на повишеним радним температурама, њихов интегритет и дужину радног века.

Аутор дисертације се овим путем захваљује ментору проф. др Ивици Чамагићу, на стрпљењу и огромној помоћи, при изради ове дисертације, као и осталим члановима комисије проф. др Живчету Шаркоћевићу, др Зијаху Бурзићу. Посебно се захваљујем проф. др Александру Седмаку, који је несебично својим знањем, дугогодишњим искуством у овој области, подршком, допринео изради ове дисертације.

Захваљујем се и тиму са Војно-Техничког Института у Београду где је одрађен експериментални део истраживања овог доктората.

Такође се захваљујем својим колегама са Академије косовско метохијске Дејану Живковићу спец. струк. инж. саобр. и др Јелени Рајовић на помоћи око техничких детаља, превода, моралној и људској подршци.

На крају велико хвала на подршци мојој породици, првенствено супрузи Јасмини, деци Ањи и Андрији, мојим родитељима и осталима.

Ову докторску дисертацију посвећујем својој породици Јовановић.

Косовска Митровица, 2022.

Аутор

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
 Предмет докторске дисертације Циљеви истраживања 	1 4
2. ЛЕГИРАНИ ЧЕЛИЦИ ОТПОРНИ НА ПУЗАЊЕ	6
 2.1. Легирани челици класе Р/Т91 2.1.1. Термичка обрада и физичке особине челика SA 387 Gr. 91 (Р91) 2.1.2. Механичке особине на повишеним температурама 2.1.3. Отпорност на оксидацију 	.11 .14 .15 .20
3. ЗАВАРЉИВОСТ И ЗАВАРИВАЊЕ ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА ПРЕДВИЂЕНИ ЗА РАД НА ПОВИШЕНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА	X 21
 3.1. Општи проблеми заварљивости	.22 .24 .25 .25 .25 .28
 3.1.2. Аладне прелине 3.1.3. Ламеларне прслине (Ламеларни лом) 3.1.4. Прслине настале при термичкој обради (жарење) 3.2. Структурни и фазни преображаји у челику при заваривању 	.28 .35 .36 37
 3.2.1. Узроци појаве различитих микроструктура при заваривању 3.2.2. Макроструктура завареног споја 3.2.3. Микроструктура спојева заварених поступцима топљења 	.38 .40 41
3.2.3.1 Зона топљења 3.2.3.2 Зона утицаја топлоте 3.3. Заварљивост легираног челика SA 387 Gr. 91 (P91)	41 43 48
 3.4. Избор процеса заваривања легираног челика Р91 3.4.1. Додатни материјал 3.4.2. Предгревање 	.50 .54 56
 3.4.3. Заваривање 3.4.4. Термичка обрада након заваривања	.57 .59 .62
 3.4.6. Утицај заваривања и термичке обраде на механичке особине	.62 .62 .63
5.4.0.5 Енергија удара (ударна жилавост)4. ПОГОДНОСТ ЗА УПОТРЕБУ - ПРОЦЕНА ИНТЕГРИТЕТА КОНСТРУКЦИЈА	
 4.1. Механика лома заварених спојева	.68 .72 .79 .79

4.1.2.2 Фактор интензитета напона	81
4.1.3. Примена параметара механике лома на употребну спремност	
заварених спојева	83
4.2. Анализа замора са становишта механике лома	94
4.2.1. Концепт линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ)	95
4.3. Процена интегритета конструкција	101
4.3.1. Пројектна СТОД крива	102
4.3.2. Дијаграми анализе лома	103
4.3.3. BS 7910 процедура	105
4.3.3.1 Оцена опасности од отказа	. 106
4.3.3.2 Напони које треба анализирати	. 109
4.3.3.3 Ulteria nojabe noma	. 111
4.3.4. HOCTYHAK SINTAP - Structural IN LEGITLY Assessment Procedures	119
4.3.4.1 CИСТЕМАТСКИ УВОД IIW SS1 1093-8, 5 ДЕЛОВА И SINTAP	. 119
4.3.4.2 Поступци за оцену интегритета конструкција SINTAP	. 120
4.5.5. Процена преостале чврстопе и радног века	124
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО	129
5.1 Основни материјал	130
5.1. Основни материјал 5.2. Избор оптималне технологије заваривања и поступак заваривања	130
5.2. Испотивање завареног споја легораног челика SA 387 Gr 91	134
5.4. Испитивање квалитета завареног споја ИБР метолама	137
5.5. План узорковања епрувета за испитивање	139
5.6. Макро и микроструктурно испитивање завареног споја	
5.7. Технолошка испитивања - испитивање савијањем	
5.8. Испитивање тврлоће	
5.9. Испитивање попречним затезањем	
5.10. Ударна испитивања компоненти завареног споја	
5.10.1. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ОМ	
5.10.2. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у МШ	160
5.10.3. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ЗУТ	165
5.11. Одређивање жилавости лома при равној деформацији Ки	170
5.11.1. Резултати одређивања К _{Iс} епрувета са зарезом у ОМ	177
5.11.2. Резултати одређивања К _{Ic} епрувета са зарезом у МШ	182
5.11.3. Резултати одређивања К _{Iс} епрувета са зарезом у ЗУТ	186
5.12. Динамичка испитивања завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91.	190
5.12.1. Испитивања променљивим оптерећењем	190
5.12.2. Одређивање параметара раста заморне прслине	195
5.12.2.1 Одређивање параметара раста заморне прслине код епрувета с	a
врхом заморне прслине у ОМ	. 200
5.12.2.2 Одређивање параметара раста заморне прслине код епрувета с	a
врхом заморне прслине у МШ	. 206
5.12.2.3 Одређивање параметара раста заморне прслине код епрувета с	a
врхом заморне прслине у ЗУТ	. 211
5.13. Фрактографски преглед преломних површина	216
6. ЗАКЉУЧАК	221
ЛИТЕРАТУРА	224

ПРЕГЛЕД ОЗНАКА	235
ПРЕГЛЕД СЛИКА	
ПРЕГЛЕД ТАБЕЛА	

1. УВОД

1.1. Предмет докторске дисертације

Компоненте процесне опреме које раде у условима повишеног притиска и температуре су критичне у неком постројењу јер по правилу имају високе радне параметре. Њихов отказ представља опасност не само по рад постројења већ и по средину која их окружује. Посебно имајући у виду да је већина процесне опреме (пре свега пароводи) у употреби дуже од пројектованог радног века. Проблем представљају и заварене компоненте, код којих не сме да се искључи могућност постојања грешака типа прелина. У случају постојања грешака потребно је прецизно проценити интегритет компоненте и донети одлуку о њеној даљој експлоатацији. Због тога је порастао значај продужења радног века и ревитализације, као начина да се старија постројења задрже у експлоатацији. Под ревитализацијом подразумевамо осигурање потпуног искоришћења века, помоћу селективне замене компонената са другим модерније пројектованим. Основни приступ у ревитализацији је процена преосталог радног века, [1, 2].

Процена интегритета процесне опреме за повишене радне температуре и притиске заснива се на коректно утврђеним експлоатационим особинама материјала и заварених спојева и да се сакупе подаци о условима експлоатације. Такође, заснива се на примени одговарајућих параметара механике лома и процедура које обезбеђују поређење тзв. сила раста прслине са отпорношћу материјала на раст прслине. У случају заварених компонената изложених повишеној температури и притиску, примена параметара механике лома на процену њиховог интегритета је још значајнија јер дефинише понашање хетерогеног материјала у присуству грешака типа прслине. Значајан практичан проблем представљају и компоненте изражених кривина (на пример колена цевовода) код којих често долази до отказа у неповољним условима експлоатације.

Употребни век процесне опреме је условљен добром конструкцијом, материјалом одговарајућих особина и квалитета, квалитетно изабраном и добро спроведеном технологијом заваривања и прикладном технологијом у производњи, под условом да оптерећења буду у складу са очекиваним. Значајни подаци о томе треба да се добију и из анализе експлоатацијских оштећења. Праћење промена на конструкционим материјалима и њиховим завареним спојевима у условима експлоатације се практично спроводи током целокупног радног века, и то при планираним и ванредним ремонтима, за потребе реконструкције и ревитализације процесне опреме у случају хаваријских отказа. Праћење и контрола особина конструкцијских материјала и заварених спојева код високотемпературски оптерећених делова, изложених и високом притиску, представља основни показатељ поузданости њиховог рада, [1, 2].

Уважавајући горе наведено, очигледно да је неопходна детаљнија анализа утицаја хетерогености завареног споја и експлоатационих услова (врста оптерећења, повишени радни притисак и температура) на интегритет компонената процесне опреме. Како је код оваквих заварених спојева у присуству прслина неминовна појава пластичне деформације, било локално или у целом пресеку, то је за анализу њиховог понашања неопходна примена метода еластопластичне механике лома (ЕПМЛ), као што је Ј интеграл, али и познавање параметара који дефинишу понашање материјала у условима деловања променљивог оптерећења (параметри раста заморне прслине, високоциклични замор).

Према томе, за експлоатацијску сигурност компоненти процесне опреме као и за процену интегритета и преосталог века, најважније су карактеристике, које описују појаву и раст прслина под утицајем променљивог оптерећења. Појаву заморних прслина услед локалне концентрације напона на неизбежним конструкцијским прелазима и променама попречних пресека још увек није могуће описати неким једноставним зависностима оптерећења, напона, карактеристика материјала и величине попречног пресека, па се користе емпиријски изведене зависности, по правилу условљене обимним експерименталним и лабораторијским испитивањима. Опште прихваћена карактеристика у том случају је заморна чврстоћа или тзв. "safe-life" принцип у оквиру кога се применом Велерове криве одређује век компоненте без прслине. У складу са тим, пројектовање делова заварених конструкција на основу могућег замора материјала засновано је на коришћењу заморне чврстоће и искуственим препорукама, изведеним из анализе отказа делова у експлоатацији и обимних испитивања. Појава заморне прелине условљава да се даље понашање материјала око врха прслине разматра на основу микромеханичког аспекта уместо глобалног аспекта, односно по принципу

конструисања са сигурношћу од лома (тзв. "fail-safe" принцип) код кога се век одређује као период раста прслине од неке почетне величине до величине прслине која је критична у односу на крти лом.

Другим речима, прикупљена сазнања о расту заморне прслине су омогућила да се са довољном сигурношћу, утврди преостали век компоненте са прслином и на тај начин процени да ли компонента може да ради до следеће контроле. У складу са тим, чак и најодговорније компоненте се не замењују пре него што се редовним контролама открију прслине или сличне грешке.

Процена интегритета било које конструкције захтева познавање силе раста прелине, изражене преко одговарајућих параметара. Поступци одређивања силе раста прелине су познати у једноставнијим проблемима, као што су хомогени материјали, док је утицај хетерогености структурних и експлоатационих карактеристика компоненти завареног споја, још увек предмет истраживања. Најважији поступци за процену интегритета (BS 7910, ETM) су укључени у тзв. SINTAP (Structural Integrity Assessment Procedure), [3-5]. Због тешкоћа у тумачењу значаја завареног споја, ове процедуре по правилу занемарују његов утицај, а уколико га узимају у обзир, онда је геометријска конфигурација сувише поједностављена. Тако нпр. у инжењерској процедури ETM заварени спој се узима у обзир, али само за пролазне прелине, док за праксу најважније, површинске прелине, нису обухваћене. Осим ових, постоје још неке значајне процедуре, као нпр. EPRI, код којих је међутим ситуација практично иста. Наведена процедура је погодна за анализу компонената које раде на повишеним температурама, али је веома тешко анализирати хетерогене материјале и компликованије геометрије.

Имајући у виду наведене недостатке постојећих процедура, с једне стране, и изражену потребу за ефикасном и довољно општом проценом интегритета заварених компонената процесне опреме изложених повишеној радној температури, с друге стране, предмет ове докторске дисертације је модификација и уопштавање постојећих поступака за процену интегритета како би се омогућила њихова поуздана примена. У циљу верификације резултата процедуре која ће бити успостављена, користиће се експериментална истраживања одговарајућих узорака. Биће урађен велики број стандардних епрувета са циљем да се дефинишу основне карактеристике испитиваног материјала и завареног споја. Епрувете ће бити дефинисане на основу важећих стандарда понаособ за свако испитивање. Исто тако ће се урадити и одређени број комплексних епрувета у циљу дефинисања експлоатацијских својстава испитиваног материјала и завареног споја.

Значај ових истраживања посебно добија на тежини имајући на уму актуелне трендове ревитализације процесне опреме односно термоенергетских постројења, а о чему данас пише више еминентних научних радника из Европе и света. Због тога се у новије време велика пажња поклања испитивањима самих постројења процесне опреме, а све у циљу процене интегритета и преосталог века коришћења, што показују и бројна истраживања из те области, [1-21]. Ови радови као и многи други омогућавају свеобухватан приступ проблему процене интегритета и преосталог века коришћења процесне опреме намењених за рад на повишеним температурама.

1.2. Циљеви истраживања

Основни циљеви истраживања у оквиру ове дисертације је да се на основу извршених механичко експлоатацијских-испитивања на собној и радној температури изврши избор критеријума прихватљивости грешака у основном материјалу и компонентама завареног споја, што представља основни услов за поуздану процену интегритета и преосталог века процесне опреме у току експлоатације. Исто тако, допринос ће бити и у оцени особина заварених спојева испитивањем епрувета са прслином. На основу добијених резултата испитивања биће анализиран утицај експлоатационих услова на понашање основног материјала и завареног споја челика за рад на повишеним температурама при деловању статичког и променљивог оптерећења, и дат практичан допринос побољшању квалитета заварених спојева, а све у циљу ревитализације и продужења радног века виталних компоненти постројења процесне опреме израђених од легираних челика за рад на повишеним температурама.

Методе које ће у току истраживања бити примењене су теоријско-аналитичке и експерименталне, и биће верификоване обимним експерименталним истраживањима узорака без и са грешком типа прслине.

Полазна основа за ове методе истраживања ће бити већ постојећи поступци за процену интегритета и преосталог века конструкције, који ће бити модификовани тако да могу да обухвате проблеме хетерогених материјала (компоненте завареног споја), повишених температура и присуство грешака типа прслина. Такође, биће допуњени експлоатационим испитивањима на повишеној температури, а све у циљу ревитализације и продужења радног века виталних компоненти постројења процесне опреме израђених од легираних челика за рад на повишеним температурама.

Основна хипотеза од које се полази је да у случају заварених спојева компонената израђених од легираног челика SA 387 Gr. 91 (P91) изложених радном оптерећењу и повишеној температури, проблеми у експлоатацији се по правилу јављају у компонентама заварених спојева. Анализу проблема отежава хетерогеност структурних и механичких особина појединих подручја заварених спојева и њихово понашање у експлоатацији.

Након дугогодишње експлоатације процесне опреме поставља се питање стања основног материјала, компоненти завареног споја и саме процесне опреме, као и питање да ли је на основу обимних експерименталних истраживања могуће дати процедуру којом се може извршити процена интегритета и преосталог радног века појединих компоненти процесне опреме намењених за рад на повишеним температурама.

Параметри механике лома као што су критични фактор интензитета напона и раст заморне прслине da/dN, могу да се примене на анализу понашања заварених компонената процесне опреме изложених експлоатационим условима (присуство грешке типа прслине, повишени притисак, променљиво оптерећење и повишена температура), а могуће је применити ове изразе и при процени интегритета ових конструкција.

На основу презентираног предмета, циља, као и метода истраживања и испитивања, очекује се да основни допринос ове дисертације буде у имплементацији изведених истраживања, као и у дефинисању основних параметара и критеријума прихватљивости који ће омогућити сигурност у експлоатацији компоненти постројења процесне опреме намењене за рад у условима деловања променљивог оптерећења, повишеног притиска и повишених температура.

2. ЛЕГИРАНИ ЧЕЛИЦИ ОТПОРНИ НА ПУЗАЊЕ

Примена челика намењених за израду посуда под притиском, паровода и сл., и који раде у условима повишених температура и притисака, условљена је општим захтевима за погонску сигурност и поузданост самих конструкција. То се пре свега односи на групу челика предвиђених за израду паровода на термоенергетским постројењима (цевоводи намењени за рад у условима повишеног притиска и температуре) и који припадају групи челика за рад на повишеним температурама.

Пароводи спадају у високо одговорне конструкције, које раде у сложеним условима утицаја пузања, високоцикличног, нискоцикличног и термичког замора на повишеним температурама. Због тога су пароводи, односно материјал од кога су израђени пароводи, заједно са својим завареним спојевима, подложни оштећењу које се акумулира током експлоатације и које може да доведе до лома, [22]. Основни узрок деградације својстава материјала паровода огледа се у међудејству пузања и замора материјала (високоцикличног, нискоцикличног и термичког замора).

Иако пароводи у највећем делу свог радног века раде у релативно стационарном режиму, број стартова представља, за оцену стања, врло важан податак. Дилатације на пароводу услед радне температуре, могу представљати, услед термичког замора, узрок иницирања прслина у критичним зонама унутар компоненти завареног споја (МШ и ЗУТ). Не треба заборавити ни заостале напоне услед заваривања који се могу суперпонирати са радним напонима и такође могу бити одговорни за иницирање прслина, [23, 24].

Као још један могући узрок иницирања прслина у пароводима потребно је поменути и корозију, која је резултат деловања радног флуида, односно напонску корозију, [25, 26]. Ипак, највећи утицај на појаву оштећења односно радни век материјала има евентуална појава пузања, [27]. Све напред наведено наглашава значај паровода као конструкције пре свега због чињенице да у случају хаваријелома најчешће долази до људских жртава и великих материјалних штета.

Основни критеријум за избор челика за пароводе представљају радни услови. Експлоатација материјала паровода остварује се при температурама 0,45-0,55T топљења и малим радним оптерећењима (радни напон R << Rp0,2). Одступања од режима у процесу експлоатације су мала (или би требала да буду мала), што омогућава да њихове услове експлоатације сматрамо блиским условима стационарног пузања, а саме пароводе-објектом погодним за анализу процеса који одређују дуготрајност метала у условима пузања. Основно својство челика за пароводе, дакле, представља отпорност према пузању и лому, у току задатог времена, тј. отпорност при раду на повишеним температурама. Највећа вредност овог својства постиже се рационалном комбинацијом легирања и термичке (термомеханичке) обраде. При томе је циљ да се поред захтеваних својстава, за дате услове, обезбеди и потребна стабилност структуре, која у суштини одређује поузданост рада посматраног конструкцијског елемента током његове експлоатације, [28].

Развој челика намењених за израду паровода у термоелектранама, условљен је стално присутним захтевом за повећање снаге термоблокова, као и општим захтевима за погонску сигурност и поузданост. Најновији из генерације челика за рад на повишеним температурама и високим притисцима, а уједно и отпоран на корозију је челик ознаке SA 387 Gr. 91 (у даљем тексту P91), превасходно намењен за пароводе и цевоводе у термоелектранама. Тенденција да зид цеви паровода буде што мање дебљине за захтевани притисак паре, може се остварити само са челиком одговарајућих карактеристика. У таб. 2.1 су дати подаци о потребним дебљинама зида цеви паровода до данас најчешће коришћених челика, у зависности од снаге термоблока, [22].

За поузданост и сигурност паровода термоблокова нарочито је важно да се прорачуном обухвате коректно утврђени параметри својстава материјала и да се сакупе подаци о параметрима током израде, као и подаци о условима експлоатације.

Челици предвиђени за израду паровода енергетских постројења припадају групи челика за рад на повишеним температурама, који задржавају захтеване особине до температуре 600°С, а посебно и да су отпорни на корозију при повишеној температури. При томе се на смањивање брзине непожељног процеса пузања, до кога долази у току рада челика на повишеним температурама и под дејством напрезања, утиче погодним избором састава и структуре челика.

		Највећа дебљина зида цеви, mm						
Паровод	Челици		Снага	блока		12	00 MW	
		150 MW	300 MW	650 MW	600 MW	Цеви	Фазонски Комади	
Цанајна рана	15 Mo 3	30	-	-	-	-	-	
папојна вода	WB36	-	25	50	35	40	70	
Хладна међупре- грејана пара	15 Mo 3	-	-	-	-	30	45	
	14 MoV 6 3	-	-	40	-	45	90	
Топла	10 CrMo 9 10	20	25	-	-	60	150	
међупрегрејана	X20 CrMoV 12-1	-	-	-	25	30	60	
пара	SA 387 Gr. 91 (P91)	-	-	-	25	30	50	
	14 MoV 6 3	30	-	-	-	-	-	
	10 CrMo 9 10	-	55	-	-	-	-	
Свежа пара	X20 CrMoV 12-1	-	-	45	50	65	160	
	SA 387 Gr. 91 (P91)			40	45	60	150	

Табела 2.1. Челици за пароводе термоелектрана и одговарајуће дебљине зида

Утицај сваког легирајућег елемента на карактеристике CrMoV челика је приказан у таб. 2.2, [23].

У енергетским постројењима за производњу паре у почетку су коришћени угљенични челици. Како су се временом постављали захтеви за вишим температурама предгрејане паре и већим притисцима, то се постепено прелазило на употребу легираних челика. Развој челика за рад на повишеним температурама започео је у суштини додатком 0,25% Мо, а потом и Cr i V, да би се шездесетих година стигло до 12% Cr у челику. Челици, који се користе у котлоградњи за израду паровода, предгрејача паре и других делова који су изложени дуготрајном дејству напрезања при температурама не вишим од 600°C, припадају групи перлитних, мартензитних (беинитних) или мартензитно-феритних челика, [23]. Заједничко за све ове челике је да се њихова структура састоји из α -чврстог раствора и карбида различитог типа и порекла.

Легирајући	
Елемент	у гицај на особине Спуто у челика
Угљеник (С)	Генерално, са повећањем садржаја С повећава се затезна чврстоћа и напон течења, такође долази до смањења ударне жилавости и способности деформисања. Садржај угљеника који је дефинисан стандардом (око 0,2%), неповољно утиче на заварљивост, па су приликом заваривања овог челика потребне посебне мере.
Силицијум (Si)	Повећање садржаја Si, условљава повећање затезне чврстоће и напона течења челика. Преко садржаја од 2% смањује се способност деформисања, док више од 1,2% неповољно утиче на заварљивост. <i>Stan-dardom</i> је дефинисан максималан садржај Si од 0,50%, чиме он заправо представља примесу и не утиче битније на механичке карактеристике.
Манган (Mn)	Смањивањем садржаја Mn испод 0,5%, затезна чврстоћа се знатно смањује, али се повећава ударна жилавост. Склоност ка закаљењу се повећава при садржајима Mn изнад 1%, док је заваривање отежано.
Фосфор (Р) и Сумпор (S)	Са повећањем садржаја Р і S, долази до смањења затезне чврстоће, ударне жилавости и до повећања кртости. Погоршава се заварљивост, јер се повећава склоност према сегрегацијама.
Хром (Cr)	Релативно висок садржај хрома доприноси отпорности овог челика на корозију. Такође у интервалу од 10 do 12% Сг долази до повећања отпорности према оксидацији, посебно на повишеним температурама. Повећањем садржаја Сг повећава се способност деформисања, док неповољно утиче на ударну жилавост.
Молибден (Мо)	Утиче на повећање затезне чврстоће, напона течења и способности деформисања, такође утиче на повећање ударне жилавости. Са повећањем садржаја Мо, побољшавају се механичке особине на повишеним температурама, спречава кртост и побољшава корозиона отпорност и прокаљивост.
Никал (Ni)	Повећањем садржаја Ni у челику повећава се затезна чврстоћа, напон течења и жилавост, а незнатно смањује способност деформисања. Присуство Ni, утиче на отпорност према корозији и према оксидацији на повишеним температурама.
Ванадијум (V)	Са повећањем садржаја V, повећава се затезна чврстоћа, отпорност према старењу и отпорност према оксидацији на повишеним температурама.

Табела 2.2. Утицај легирајућих елемената на особине CrMoV челика

Како пароводи треба да раде веома дуго без замене, а при томе не смеју да се значајније пластично деформишу, то њихову основну карактеристику представља граница пузања за задату температуру при деформацији од 1% за 10000 или чак 100000-200000 часова (σ_{1/10000}, σ_{1/10000}, σ_{1/200000}).

Челици предвиђени за рад на повишеним температурама најчешће садрже мање од 0,20% С, будући да се од њих пре свега израђују цеви које се сучеоно заварују. Челици перлитног типа су нисколегирани, у просеку садрже око 0,12% С, 0,5 до 1% Сг и 0,3 до 0,5% Мо. Присуство мале количине Мо повећава температуру рекристализације ферита, а тиме и ватроотпорност челика, аналогно, али слабије изражено дејство показује и Сг. Ванадијум, који улази у састав неких од челика из ове групе, води уситњавању зрна и повећању ватроотпорности. После хлађења на ваздуху постиже се перлитна структура са карбидима М₃С-типа, а после каљења у уљу-мартензит и беинит.

Челици перлитног типа се, због ограничене ватроотпорности, не примењују у постројењима чија је радна температура виша од 550-600°С. Са повећањем садржаја хрома повећава се ватроотпорност, а челици прелазе у мартензитну групу. Ови челици се кале на ваздуху или у уљу. После каљења се отпуштају на температури која је виша од радне температуре. При отпуштању се стварају специјални карбиди, чија је брзина коагулације мања од оне за карбиде цементитног типа. Додатак W, Mo i V у челик са 9-12% Сг повећава његову ватроотпорност. При већем садржају алфагених елемената повећава се удео ферита у овим мартензитно-феритним челицима, што може негативно да утиче на особине.

Неопходна чврстоћа легираних челика који раде у условима повишених температура (до 600°С) постиже се комплексним легирањем, најчешће хромом, молибденом, ванадијумом, ниобијумом и волфрамом. Ови елементи, који су склони образовању карбида, имају ограничену растворљивост у фериту. Садржај сваког од присутних елемената, са изузетком хрома, не прелази 1%. У зависности од температуре експлоатације користе се челици легирани са једним или са више елемената, при чему је састав челика сложенији што је радна температура виша.

2.1. Легирани челици класе Р/Т91

Деведесетих година прошлог века у Италији су почели са развојем високохромног феритног челика за пароводе и цеви, радне ознаке Р/Т91, да би већ 1994. године уследио развој легираног челика ознаке Р/Т91 са додатком 1% Волфрама (W), [29]. Овај нови европски челик новоустановљене ознаке Е911 уведен је у оквиру програма COST 511.

Наставак истраживања је био усмерен на развој феритних челика за пароводе и цевоводе где би температура паре ишла до 650°С. Међутим, овај покушај развоја није дао успешан резултат, јер освојене легуре NF616 (9Cr-0.5Mo-1.8W Nb) и HCM12A (11Cr-0.4Mo-2W-Cu V Nb) су се показале као задовољавајуће до 625°С. Разлог неуспеха се огледао у томе да су уочени озбиљни проблеми превременог лома на завареним спојевима, посебно у ЗУТ, [30].

У исто време у Француској се појавио високохромни феритни челик ознаке EM12 (9Cr-2Mo), који је првенствено био намењен за цевоводе. Имао је дуплекс микроструктуру са δ-феритом што му је дало добре ударне карактеристике (висока енергија удара). Такође, у Немачкој је развијен челик X20 (12Cr-1Mo или X20CrMoV12-1), који је широм света коришћен за цевоводе и пароводе. Добра особина овог челика је потпуна мартензитна микроструктура, али је зато његова чврстоћа пузања нижа него код челика EM12 на температурама преко 520°C, и тешко се заварује првенствено због високог садржаја угљеника.

И коначно, крајем прошлог века у ОАК Ridge National Laboratory у САД је развијен модификовани челик 9Cr-1Mo, легуре ознаке T91 за цеви под притиском, и легуре ознаке P91 за пароводе и сабирне цеви, [31]. Легирани челик ознаке P/T91 има микроструктуру отпуштеног мартензита стабилизовану карбидима типа $M_{23}C_6$ са даљим ојачавањем захваљујући молибдену у чврстом раствору и финој расподели талога карбонитрида типа (MX) богатих ванадијумом (V) и ниобијумом (Nb). Због садржаја V i Nb ови челици се сврставају у групу микролегираних челика.

Главна примена легираног челика Р/Т91 је у термоелектранама на фосилна горива за израду цеви прегрејача и догрејача, сабирних цеви и паровода (линија свеже паре и повратне паре), као и код пећи у петрохемијској индустрији. Код савремених термоелектрана на фосилна горива, коришћење легираног челика Р/Т91 омогућава рад са већим параметрима паре, односно, постиже се већа ефикасност постројења. Европска искуства показују да се легирани челик Р/Т91 примењује у котловима (прегрејача и догрејача) у којима температура паре иде до 600°С. Ван котла (пароводи и сабирне цеви) дозвољава се температура паре од 610°С.

Најважније особине легираног челика Р/Т91 у односу на до тада коришћене челике за рад на повишеним температурама су висока вредност напона течења, добра корозиона постојаност, значајна отпорност на оксидацију (без појаве оксидног слоја), и добра отпорност на пузање. Поред добрих механичих карактеристика на повишеним температурама, за овај челик, а генерално и за целу групу ових челика, важна је и заварљивост. Веома је битно да заваривање не утиче на њихову отпорност на корозију, пузање као и генерално на механичке особине, [32].

Боља чврстоћа лома пузањем челика Р91 омогућава инжењерима пројектовање компонената (паровода и сабирних цеви) значајно тањих зидова у поређењу са нпр. челиком Р22, чак до 50% смањење дебљине зидова у зависности од радне температуре, сл. 2.1, [33].



Слика 2.1. Поређење дебљине зида цеви различитих челика при истим

конструкционим условима

Смањење дебљине зида смањује и топлотни градијент у зиду цеви током старта и прекида рада, што спречава настанак заморних прслина које су представљале велики проблем код дебелозидних компонената направљених од челика Р22. Зато се широм света сабирне цеви израђене од челика Р22 са прслинама, замењују новим од легираног челика Р91. Легирани челик ознаке Т91 такође може бити алтернатива аустенитним челицима прегрејача и догрејача паре уколико се пројектни захтеви правилно примене [33].

У таб. 2.3 приказан је хемијски састав челика SA 387 Gr. 91 (P91) према ASTM/ASME стандардима, [34-36], а у таб. 2.4 су дате декларисане механичке особине челика P91 на собној температури [34-36].

Табела 2.3. Хемијски састав челика SA 387 Gr. 91

С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Nb	Cu	Ν
0,08	0,30	0,20	max	max	8,0	max	0,85	0,18	max	0,06	max	0,03
0,12	0,60	0,50	0,015	0,01	9,5	0,40	1,05	0,25	0,04	0,10	0,1	0,07

Табела.2.4. Механичке особине челика SA 387 Gr. 91

Дебљина,	Напон течења,	он Затезна Издужење, Енергија удара, ња, чврстоћа, А. 97 гр. КV, J, min.				
t,mm	R _{p0,2} , MPa	R _m , MPa	A, %, min.	-20°C	0°C	20°C
< 60	445	585 - 760	18	27	34	40
60 <t<90< td=""><td>435</td><td>550 - 730</td><td>18</td><td>27</td><td>34</td><td>40</td></t<90<>	435	550 - 730	18	27	34	40

Преглед стандарда и начина означавања легираног челика класе 91 дат је у таб. 2.5.

Табела 2.5.	Упоредне ознаке и примењени стандарди за челик	P91 [34-36]
-------------	--	-------------

Држава	Ознака	Стандард
Србија	P91	SRPS EN 10216-2:2020
САД	T91	ASTM A213/A1016
САД	P91	ASTM A335/A999
САД	SA 387 Gr. 91	ASME A213
САД	SA 387 Gr. 91	ASME A335
Европски стандард	X10CrMoVNb9-1	EN 10216-2:2013 + A1:2019
Немачка	X10CrMoVNb9-1	DIN EN 10216-2:2002 + A2:2007
Велика Британија	Class 91	BS3059/3604
Француска	TU Z 10CDVNb 09-01	NF A 49-213

2.1.1. Термичка обрада и физичке особине челика SA 387 Gr. 91 (P91)

Да би у потпуности развио своје унапређене механичке особине челик Р91 захтева термичку обраду у виду нормализације и каљења. Нормализација се ради на температурама од 1040°C до 1099°C на ваздуху, а каљење од 730°C до 780°C такође на ваздуху. Челици са високим уделом хрома имају аустенитну или дуплекс (аустенитну и δ-феритну) структуру. Аустенитна структура се хлађењем на ваздуху и темперовањем мења у мартензитну. Мартензитна структура даје оптималне параметре чврстоће и тврдоће у поређења са дуплекс структуром. Из овога разлога челик Р91 не би требало подвргавати температурама при којима ће доћи до промене његове структуре. Међутим, то је немогуће избећи приликом заваривања. Мартензитним челицима са високим уделом хрома је пре заваривања потребно предгревање да не би дошло до појаве прслина и потребна им је термичка обрада после заваривања која се састоји у жарењу крте мартензитне структуре настале у зони топљења и зони утицаја топлоте.

Физичке особине легираног челика Р91 су дефинисане специфичним вредностима одређеним на собној температури и температури од 600°С, [36]:

- Модул еластичности, Е, представља однос напона и јединичног издужења у области еластичне деформације. Вредност је константна и може се израчунати из дијаграма напон-деформација. Вредности модула еластичности варирају од 210GPa на собној температури до 163GPa на температури од 600°C.
- Модул смицања, G, представља степен еластичности неког материјала при примени смицајне силе. Вредности модула смицања се крећу од 85GPa на собној температури и до 65GPa на температури од 600°C.
- Поасонов коефицијент, v, је попречно сужење по јединичној ширини подељено подужним издужењем по јединичној дужини. Поасонов коефицијент се повећава од 0,30 на собној температури до 0,33 на температури од 600°С.

Промена модула еластичности и модула смицања у зависности од температуре, је дата на сл. 2.2, [36].



Слика 2.2. Зависност модула еластичности и смицања од температуре за челик Р91

2.1.2. Механичке особине на повишеним температурама

Промена напона течења R_{p0,2} легираног челика P91 у зависности од температуре је приказана на сл. 2.3, а на сл. 2.4 промена чврстоће при пузању легираног челика P91 на 575 і 615°C, [36].

Деформација материјала, која се одвија под константним оптерећењем и на повишеној температури назива се пузање. Температура на којој се пузање јавља различита је код различитих материјала, али се генерално одвија на температури која је већа од половине температуре топљења. Пузање материјала се може описати кривом пузања, сл. 2.5, која углавном показује три стадијума, [37]:

- > примарни, кога карактерише опадање брзине пузања;
- > секундарни или стационарни, код кога је брзина пузања константна, и
- > терцијарни, код кога се нагло повећава брзина пузања и који води до лома.



Слика 2.3. Промена вредности напона течења од температуре за легирани

челик Р91



Слика 2.4. Чврстоћа при пузању легираног челика Р91 на 575 i 615°С

Брзина пузања у области другог стадијума назива се и минималном брзином пузања за дате услове температуре и напона, и повећава се како са повећањем напона, тако и са повећањем температуре. Израженост појединих стадијума и могућност њиховог раздвајања поред врсте материјала зависи и од температуре и примењеног напона. Код легираног челика Р91, као што се може видети са сл. 2.6, примарни стадијум пузања је слабо изражен, док кривом доминира секундарни стадијум, [36].

Уколико се мери само деформација, која се одвија на повишеној температури, у питању је испитивање на пузање при константом оптерећењу и константној температури. Код ове врсте испитивања, користе се релативно ниска оптерећења, јер је циљ да се избегне терцијарно пузање.



Слика 2.5. Шематски приказ стадијума пузања



Слика 2.6. Крива пузања за легирани челик Р91

Постоје и испитивања која се изводе до лома, то су тзв. тестови пузања до лома, и код њих се поред деформације, мери и време које протекне до лома. Ова врста тестова се врши у циљу одређивања утицаја повишене температуре, на дужи

временски период. Подаци добијени из испитивања се углавном презентују као функција логаритма напона и логаритма минималне брзине пузања. Дијаграм на коме су приказане чврстоћа при пузању или чврстоћа лома при пузању, представљају још један, начин приказивања података прикупљених при испитивању.

Чврстоћа при пузању, представља оптерећење, на одређеној температури које изазива минималну брзину пузања од 0,0001%/h или 0,001%/h.

Чврстоћа лома при пузању, је оптерећење на одређеној температури које изазива лом при 10000, 100000 или 200000 h, сл. 2.7, [36].

Испитивања на пузање трају дуг временски период. Неки тестови трају и до 100000 h, или приближно 11,5 година. Све ово чини оваква испитивања веома скупим, а податке који се прикупе веома драгоценим. Чињеница да постоји Аренијусова зависност између брзине пузања у оквиру секундарног стадијума и температуре, допринела је настанку многих временско-температурних параметара који су развијени у циљу предвиђања преосталог века неке конструкције за времена која су далеко дужа од испитиваних. Ови параметри такође дају могућност поређења понашања различитих материјала.



Слика 2.7. Чврстоћа лома при пузању у зависности од темпратуре за легирани челик Р91

Познато је да је пузање термално активиран процес и секундарно пузање се може описати једначином типа:

$$(Q/R)_{\sigma} = T(B + lnt) \tag{2.1}$$

Индекс σ указује на то да активациона енергија Q зависи од примењеног напона, t је време потребно да се достигне било која деформација ε, а B је константа за дати степен деформације ε, и има различите вредности код различитих материјала.

Једначина 2.1 назива се Ларсон-Милеровом једначином а величина T(B + lnt) Ларсон-Милер-овим параметром, по ауторима, [38], који су показали да се помоћу исте може корелирати температура са временом, потребним за појаву лома, под дејстовом одређеног напона. Експериментална истраживања, [38], показала су да константа В има вредности у интервалу 15 до 25, зависно од врсте материјала, и да код приближних прорачуна, за константу В обично се узима средња вредност 20.

Веома је битно да приликом коришћења овог параметра, на температурама, на којима се процењује време до лома, не наступају било какве структурне промене, јер у противном може доћи до озбиљних грешака. Једначину 2.1 су Ларсон-Милер још 1952. године модификовали и дали у облику:

$$P(\sigma) = (20 + \log t_r) T/1000$$
(2.2)

Овај облик једначине је саставни део стандарда ASTM E139-11, [38], и која је основа за конструисање кривих временске чврстоће.

Примена наведених параметара омогућава одређивање временске чврстоће на изабраној температури за дужи временски период према подацима о кратковременској чврстоћи на високој температури. Међутим, пожељно је добијање података о временској чврстоћи при неком дужем времену на температури на којој се прогнозира ова чврстоћа. Чак и у овом случају екстраполација која превазилази најдуже време до лома више од 10х не може се сматрати коректном. Лако је пронаћи примере где екстраполација доводи до погрешних предвиђања века појединих компоненти.

2.1.3. Отпорност на оксидацију

Отпорност на оксидацију, челика који су изложени повишеним температурама, зависи од тога, да ли ти челици поседују неки легирајући елемент који може створити оксидни слој на површини и на тај начин га заштитити од даље оксидације. Потребна су два услова која морају бити задовољена. Први, да се тај елемент налази у значајној концентрацији у кристалној решетци, и други, да брзина дифузије тог или тих елемената (оксидациону отпорност неком металу може пружити и више легирајућих елемената истовремено) буде довољно велика. Хром је елемент који обезбеђује добру отпорност према оксидацији. На слици 2.8, [39] може се видети како хром утиче на отпорност према оксидацији.





Дата је завистност за челик Č. 7400 са 1% Cr, челика Р91 који садржи 9% Cr, и за високо легирани челик X20, који садржи 12% Cr. Из приложених дијаграма је видљиво да повећањем садржаја Cr значајно опада масени губитак материјала, као резултат оксидације.

3. ЗАВАРЉИВОСТ И ЗАВАРИВАЊЕ ЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА ПРЕДВИЂЕНИХ ЗА РАД НА ПОВИШЕНИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

Са развојем индустрије појавила се и потреба за новим материјалима побољшаних карактеристика. Као одговор на постављени изазов почиње се са истраживањима, а потом и производњом челика за конструкције изложене повишеним температурама.

Наведене конструкције захтевају употребу специјалних врста челика са унапређеним карактеристикама прилагођеним константној изложености повишеним температурама. Реч је о феритним челицима са побољшаном отпорношћу на пузање, односно напредним хром-молибденским челицима. Да би нови челици били успешно коришћени у пракси морало се приступити пажљивом проучавању њихове структуре од које директно зависе њихове механичке карактеристике. Циљ је, приликом обраде, задржати повољне механичке особине ових врста челика, као и приликом експлоатације од њих израђених конструкција.

За несметано коришћење унапређених челика у пракси било је потребно урадити низ истраживања у циљу праћења њиховог понашања приликом заваривања. На овај начин се дошло до смерница којих се потребно придржавати да би напредни хром-молибденски челици били оптимално искоришћени. Дат је јасан алгоритам начина рада за заваривање ових материјала приликом којег се не ремети њихова структура, а тиме ни њихове унапређене механичке особине.

Поштовањем процедуре заваривања унапређених челика добијају се квалитетне и сигурне конструкције спремне за дугогодишње коришћење упркос отежаним експлоатационим условима о којима је овде реч, о конструкцијама изложеним повишеним температурама.

Метални материјал се сматра заварљивим у одређеном степену, за дати процес и за дату примену, ако се заваривањем постиже континуитет метала при одговарајућем поступку заваривања, у коме спојеви заварених делова одговарају техничким условима, како у односу на њихове локалне карактеристике, тако и у односу на њихов утицај на конструкцију коју они образују. Имајући у виду сложеност појма заварљивости, она се у литератури ближе дефинише према подручју примене па се тако користе и дефиниције, [40]:

- Металуршка изучава физичко-хемијске промене у металу у процесу
 заварљивост заваривања, а испитује се преко посебно дефинисаних заварених спојева уз познат режим заваривања или симулацијом режима заваривања на основном металу.
- Физичка се бави способношћу материјала да образује хомогене спојеве
 заварљивост при било ком поступку заваривања. Такву заварљивост имају практично све техничке легуре и чисти метали, а и велики број комбинација метал-неметал.
- Технолошка изучава техничко-економске показатеље и дефинише под
 заварљивост којим се условима може добити заварени спој траженог квалитета, од датог материјала, уз коришћење расположивих техничких поступака и најмањи утрошак рада и времена. Због изузетно важног практичног значаја појам технолошке заварљивости се данас све више изједначује са појмом заварљивости.

У суштини, заварљивост скоро равноправно зависи од материјала, услова производње заварених конструкција и од конструкцијских решења, односно посредно од подобности материјала за заваривање, могућности заваривања и поузданости заварене конструкције.

3.1. Општи проблеми заварљивости

Сигурно је напредак у технологији заваривања, увођење нових поступака заваривања и програмираних термичких режима, многе материјале лоше заварљивости превео у материјале задовољавајуће заварљивости. Остаје чињеница да уколико је материјал квалитетнији, то је број података који одређују заварљивост већи, а њихове међусобне корелације сложеније.

Квалитет заварених спојева у великој мери одређује експлоатацијску сигурност и економичност конструкције. Присуство грешака у завареним спојевима, неиспуњење тражених особина, облика и хомогености шава, односно особина и хомогености метала у ЗУТ, може пореметити чврстоћу и друге експлоатацијске карактеристике конструкције. У условима израде заварене конструкције, грешке настају доста често. Њихов број је реални показатељ рационалности примењеног технолошког процеса, погодности и услова коришћења материјала који се заварује, стручности кадра, постојања неопходних услова које захтева радно место заваривача, оптималност и техничка спремност опреме и прибора, односно општег техничког нивоа производње. У зависности од узрока појављивања, грешке се могу поделити у две групе.

У прву групу спадају грешке везане за металуршке, термичке и хидродинамичке појаве, које прате процес растапања, формирања и кристализације истопљеног метала и очвршћавање завареног споја. То су кристализационе и хладне прслине у металу шава и у ЗУТ, поре, троска, флокне, одступање од захтеване чврстоће и пластичности метала шава и завареног споја, а такође и нежељене промене у особинама ЗУТ.

Другу групу чине грешке формирања шава (непровари, зарези, налепљивање, прогоревање, кратери, несиметрично постављање угаоних шавова, смањење димензија шава). Настајање ових грешака је обично условљено неправилним технолошким поступком, нарушавањем режима рада, неисправношћу опреме, стручношћу ниском извршилаца, лошом припремом неправилним И конструкцијским састављањем И припајањем, неприступачношћу места заваривања и неправилним попуњавањем жлеба. Методе испитивања које би комплексно окарактерисале појам заварљивости не постоје, већ се за оцену заварљивости користи низ испитивања од којих свако одређује једну или другу страну овог појма.

У процесу кристализације метала шава, под утицајем напона затезања насталих при заваривању, могу настати прелине које су једна од најчешћих грешака заварених спојева. Под дејством унете топлоте при заваривању долази до промене структуре основног материјала који се граничи са шавом. Ове промене, заједно са присутним напонима затезања, могу довести до образовања топлих и хладних прелина у ЗУТ. Одређивање отпорности метала у ЗУТ према образовању прелина је други вид испитивања заварљивости. Металуршки процеси, који се дешавају у металу шава и ЗУТ могу изазвати склоност ка прелазу у крто стање. Испитивање отпорности основног метала, зоне утицаја топлоте, метала шава, као и завареног
споја у целини према прелазу у крто стање, представља треће подручје испитивања заварљивости, [41].

Прслине настају као последица топлотних и металуршких процеса и најопасније су грешке у завареним спојевима. Прслине у завареним спојевима челика се по правилу разврставају на, [42]:

- ▶ топле (вруће) прслине;
- ➤ хладне прслине;
- ▶ ламеларне прслине, и
- ▶ прслине од жарења.

3.1.1. Топле прслине

Топле прелине представљају места раздвајања материјала, која се појављују како у металу шава, тако и у ЗУТ и настају на солидус температури, или нешто испод ње, сл. 3.1, [42]. Као доња гранична температура за њихово настајање узима се 0,5 Т_t (Т_t је тачка топљења у К). Раздвајање материјала је интеркристално, чиме се јасно разликује од прелина, које настају при нижим температурама и имају транскристални ток, као што је случај са хладним прелинама.



Слика 3.1. Топографија топлих прслина у завареном споју, 1-подужне у шаву и ЗУТ зони, 2-попречне прслине у шаву и ЗУТ зони, 3-попречне прслине по дебљини основног материјала

Топле прслине се деле у две групе: кристализационе и подсолидусне (ликвационе). Кристализационе топле прслине, настају у температурном интервалу између ликвидус и солидус линија, када у материјалу постоје и чврста и течна фаза (ТИК област). Овај тип прслина се посебно јавља код легура са великим интервалом очвршћавања, а код легура са малим интервалом очвршћавања и чистих метала могу да настану само ликвационе прелине. Кристализационе топле прелине настају када је затезање управно на границе зрна довољно велико да направи дисконтинуитет дуж граница зрна у области делимичне кристализације, или у подручју течног филма, [42]. Ликвационе прелине настају првенствено услед присуства нискотопљивих сегрегација по границама зрна.

У односу на правац шава топле прслине могу бити уздужне и попречне. Уздужне прслине се могу простирати по оси шава на месту споја стубичастих кристала или између суседних зрна.

При ручном електролучном (REL поступак) заваривању прслине излазе или не излазе на површину шава, док при заваривању под троском кристализационе прслине се пружају, по правилу, у средњем делу шава и не излазе на његову површину, што је условљено специфичностима кристализације овог шава. Површина прслине, која се појављује по површини шава, обично је обојена, тј. странице су покривене танким слојем оксида.

3.1.1.1 Топле прслине у металу шава

Топле прслине у металу шава су обично релативно дугачке, не тако разгранате и доста отворене. Најчешћи узрок њиховог настајања је повећана концентрација сумпора и низак садржај Mn у металу шава, када се по границама растућих кристалних зрна издваја једињење FeS, уместо уобичајеног једињења MnS типа. Једна од битних разлика ова два сулфидна једињења је што MnS има релативно високу температуру топљења (очвршћавања) -1610°С, док је температуру топљења FeS нижа од солидус температуре челика. Како и после очвршћавања металне основе челика остаје извесна количина растопа у виду FeS једињења по границама кристалних зрна, може да се сматра да су се створили предуслови за настајање топлих прслина, [41].

3.1.1.2 Топле прслине у ЗУТ

Топле прслине у ЗУТ се јављају у виду мреже по границама зрна, непосредно уз границу стапања, а узроци настајања могу да буду везани за технологију и параметре заваривања или металуршке процес у течном и чврстом стању. При разради технологије заваривања треба водити рачуна да отпорност металног шава против појаве кристализацијских прелина зависи од:

- величине и брзине пораста затезних напона који делују у периоду кристализације;
- хемијског састава метала шава који му одређује својства у периоду кристализације и за време снижене пластичности;
- облика растопљеног метала, који одређује правац раста стубичастих кристала, карактер њиховог међусобног додира и распоред међукристалних делова у односу на затезне напоне и карактер промене еласто-пластичне деформације, и
- ▶ величине примарних кристала.

У реалним условима заваривања практично је немогуће потпуно уклонити утицај затезних напона на метал који при заваривању кристалише. Зато је задатак смањити величину тих напона на износ који неће довести до појаве прслина. Ово се може постићи рационалним конструисањем спојева и елемената, смањењем броја укрштања шавова, избором оптималног типа и размака ивица, отклањањем непотребних преклопа.

Смањење затезних напона на минимум на рачун технолошких побољшања постиже се:

- ▶ претходним предгревањем радног комада;
- ▶ рационалним редоследом заваривања, и
- > избором оптималног поступка и режима заваривања.

Многобројним испитивањима установљено је да хемијски састав метала шава показује значајан утицај на састав структурних компонената, а самим тим и на постојаност према образовању кристализационих прелина.

Промена хемијског састава метала шава у смислу смањења садржаја неповољних и повећања садржаја корисних елемената је један од основних приступа у технологији, усмереној на повећање отпорности шава на топле прслине. Промена хемијског састава метала шава у жељеном правцу при заваривању челика датог састава постиже се:

 променом додатног материјала који садржи незнатне количине неповољних и повишене количине повољних елемената;

- смањењем учешћа основног метала у металу шава уз повећање учешћа додатног материјала на рачун одговарајућих поступака и режима заваривања (мала јачина струје, рад са два лука), и
- применом облоге, односно прашкова, који садрже повољне легирајуће елементе.

При заваривању угљеничних, легираних и других челика може доћи до образовања кристализационих прслина у ЗУТ, које се најчешће простиру по границама зрна. Вероватноћа образовања прслина расте при раду са основним металом смањене чврстоће и при повећаном уносу енергије заваривања. У том случају примећује се и пораст зрна што погодује настанку прслина овог типа (ликвационе прслине). Механизам образовања прслина у ЗУТ разликује се од механизма образовања прслина у металу шава. Прслине се у овом случају развијају по границама зрна основног метала кратковремено загрејаног изнад температуре солидуса, [41].

Највећи утицај на настанак топлих прелина има хемијски састав челика (C, S и Mn, и у мањој мери Si), облик шава и предгревање. На сл. 3.2a је приказан утицај садржаја C, S и Mn, на сл. 3.2б утицај садржаја C и коефицијента облика шава, а на сл. 3.2в утицај предгревања, у зависности од садржаја C, [41].

Као што се са ових слика види, наведени утицаји су међусобно зависни, али општа је правило да су челици са већим садржајем С i S, а мањим садржајем Мп, склонији настанку топлих прслина, као и заварени спојеви са малим коефицијентом облика, или са изразито великим коефицијентом облика (код челика са већим садржајем С), док предгревање значајно смањује опасност од настанка топлих прслина. Утицај наведених хемијских елемената се огледа првенствено у деловању еутектикума Fe-FeS, чија је тачка топљења 985°С, који се таложи на границама зрна и знатно повећава склоност челика ка стварању топлих прслина. С друге стране, Mn, који има већи афинитет ка S od Fe, образује MnS (укључци глобуларног облика), чиме спречава образовање штетног еутектикума и смањује склоност челика ка топлим прслинама. Повећани садржај С је неповољан због смањења пластичности челика.



Слика 3.2. Различити утицаји на склоност челика ка настанку топлих прслина, а) састав челика, б) облик шава и садржај С, в) предгревање и садржај С

Често се проверава осетљивост према топлим прслинама по изразу, [41]:

$$HCS = \frac{C \times \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}\right) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V}$$
(3.1)

уз критеријум да су челици чија је затезна чврстоћа већа од 700MPa осетљиви према топлим прслинама ако је HCS (Hot Cracking Sensitivity) веће од 2, односно ако је HCS веће од 4 код челика чија је затезна чврстоћа испод 700MPa.

3.1.2. Хладне прслине

У процесу загревања и хлађења метала при заваривању, његова температура, степен деформације и интензитет напона непрекидно се мењају. Паралелно се мењају и особине метала, односно постоји висок степен зависности између његове пластичности, чврстоће и температуре. Хладне прслине настају у металу шава или ЗУТ, најчешће при крају хлађења завареног споја, испод 300°С. Према правцу у односу на осу шава хладне прслине се деле на попречне и подужне, по правилу су унутаркристалне, иако њихов раст често почиње по границама зрна. Схематски приказ најчешћих хладних прелина у угаоним и сучеоним спојевима је дат на сл. 3.3, [43].



Слика 3.3. Схематски приказ хладних прслина у угаоним и сучеоним спојевима

Код заваривања ниско и средње легираних челика хладне прслине настају као последица деловања три фактора, од којих ни један сам није довољан да изазове прслину. Ти основни фактори су:

- микроструктура (нарочито појава мартензитне структуре);
- > садржај дифундованог водоника, и
- > заостали напони који прате процес заваривања.

Утврђено је да појава хладних прслина зависи од услова заваривања: дебљине радног комада, унете енергије при заваривању, температуре радног комада. Под одређеним условима челик може постати закаљив, односно при заваривању ЗУТ или метал шава могу прећи потпуно или делимично у мартензит. Што се тиче утицаја водоника, одавно је познато да рад са ниско водоничним базичним електродама или у заштитној атмосфери инертних или сувих и пречишћених активних гасова даје спојеве без хладних прслина. До сличног закључка се дошло и у односу на деловање напона, пошто је пракса показала да су заварени спојеви без сопственог напона далеко мање осетљиви на појаву хладних прслина. Потребно је размотрити утицајне факторе који прате појаву хладних прслина у завареним спојевима. То су пре свих, [43]:

А) Хемијски састав основног метала

Хемијски састав основног метала је изражен кроз фактор микроструктуре, јер код ниско и средње легираних челика непосредно уз сам спој долази до стварања мартензитне структуре. Ова мартензитна структура настаје у тзв.

неуравнотеженим условима, дакле при неуравнотеженом загревању до температуре каљења, односно до температуре трансформације, неуравнотеженим брзинама хлађења, скоро увек са температуром која је знатно виша од температуре која се примењује у термичкој обради, са временима која прате фазне преображаје, а знатно су краћа него код термичке обраде, значи са једном нестабилном структуром на коју посебан утицај има хемијски састав, [43].

Б) Дебљина основног материјала

У разматрању утицаја дебљине основног метала преплићу се утицаји сва три основна фактора. Јавља се различита структура изазвана нехомогеним режимом загревања и хлађења, односно непотпуном прокаљивошћу по пресеку, јавља се повећани садржај дифундованог водоника изазван присуством грешака око којих се окупља и са умањеном брзином дифузије кроз повећан пресек, и коначно напони који се повећавају са порастом дебљине основног метала, [43].

Ц) Унета топлота при заваривању

При заваривању унету топлоту прате сва три основна фактора. Од количине унете топлоте зависи максимална температура до које се метал у шаву и ЗУТ загрева, и брзине загревања и хлађења. Зависно од енергетског режима заваривања јавиће се различите структуре, односно различите тврдоће. То се најбоље види ако се упореде два дијаграма изотермалног разлагања израђена за исти састав челика, али за различиту температуру аустенитизације. Значи за различите брзине хлађења добијају се различите структуре, односно различите тврдоће. Свакако да унета количина топлоте утиче на садржај дифундованог водоника у металу шава. Што је већа количина унете топлоте, односно што је спорије хлађење, пошто се ради о дифундованом водонику, његово напуштање места окупљања (грешке у структури) директно је везано за услове хлађења. Од количине унете топлоте директно зависи апсолутни ниво термичких напона који прате локално загревање, [43].

Д) Околина

Када се разматра утицај околине мисли се пре свега на релативну влажност и температуру предгревања, односно на утицај дифундованог водоника.

Е) Додатни материјал

Додатни материјал је на првом месту када се анализирају носиоци дифузионог водоника преко кога он стиже у заварени спој, али се, када је у питању избор додатног материјала, може утицати и на напонско стање.

Ф) Поступак заваривања

И поступак заваривања делује слично као и додатни материјал. Ако заварујемо REL поступком садржај водоника ће бити знатно већи него ако заварујемо MIG поступком, а за исти облик жлеба и исту унету количину топлоте.

Г) Облик завареног споја

Променом параметара заваривања (јачине струје, напона, густине струје, брзине заваривања) мења се облик и количина течног метала, односно облик завареног споја а тиме и облик и величина напонског поља.

Х) Неметални укључци

Коначно, за осетљивост према појави хладних прслина битна је чистоћа основног метала, јер су укључци и други облици нечистоћа места окупљања водоника, а то су и концентратори напрезања, одакле по правилу крећу прслине.

У односу на време појављивања, хладне прслине се често зову закаснеле, јер се најчешће непосредно код заваривања не примећују. Улогу и значај временског фактора треба истаћи, пошто се овај феномен одиграва на собној температури или на температури која је блиска собној. Постоји велики број једначина по којима се одређује вредност еквивалента угљеника, али се све могу свести на облик, [43]:

$$CE = C + \frac{1}{a}Mn + \frac{1}{b}Si + \frac{1}{c}Cr + \dots$$
 (3.2)

где је: С, Мп, Si, Cr, - садржај елемената у челику;

1, 1, 1, - коефицијент који показује колико је утицај посматраног елемента слабији од утицаја угљеника.

Једначине предложене од стране различитих истраживача разликују се једна од друге по коефицијентима који карактеришу утицај легирајућих елемената. Ове разлике су последица различито постављених циљева, различитих услова рада и различитих основних материјала. Сматра се да на вредност коефицијената битан утицај показује брзина хлађења у критичном интервалу температуре. Често се користи формула Међународног института за заваривање (МИЗ).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mo}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{15}$$
(3.3)

Поред еквивалента угљеника за процену отпорности челика на појаву хладних прелина као веома важан фактор узима се садржај дифундованог водоника.

При заваривању челика, део основног метала у ЗУТ прелази у аустенит који се при хлађењу у зависности од брзине хлађења трансформише у неку од структурних компонената. Која ће структурна компонента бити доминантна зависи од састава основног метала и услова заваривања (количина унете топлоте, дебљина радног комада, почетна температура, температура околине). Све ове промене структуре одигравају се сукцесивно дуж завареног споја а цели тај циклус може бити схематски представљен. Пресек шава је приказан на сл. 3.4, [43].





Површине 1 и 4 представљају основни метал и метал шава, који су загрејани до аустенитног подручја. Изотерме ТМ и ТШ представљају температуре трансформације метала у ЗУТ и у шаву, док површине 2 и 5 представљају већ трансформисани или скоро трансформисани метал у ЗУТ и у шаву, [43].

За дати специфични облик термичког циклуса заваривања, сл. 3.5, [43], (брзо загревање до врло високих температура, краткотрајна аустенитизација) неопходно је да се знају криве трансформације при континуалном хлађењу за различите услове заваривања. Основни параметри циклуса загревања и хлађења метала у ЗУТ су:

- максимална температура загревања;
- ▹ брзина загревања кроз температурно подручје 700-1000°С;
- ➢ брзина хлађења кроз температурно подручје 800-500°С;
- ▶ време загревања од Ас₃ до максималне температуре, и
- ➢ време хлађења од максималне температуре до температуре Аг₃.





Ради једноставнијег одређивања и коришћења кривих трансформација, често се прибегава упрошћавању тако што се сматра да је брзина хлађења у подручју температура трансформације челика константна преко читаве ЗУТ. На тај начин је могуће, ако се знају брзине хлађења које одговарају сваком услову заваривања, да се предвиди начин трансформације у ЗУТ, а посебно је значајно што је могуће одредити услове заваривања који доводе до делимичне или потпуне мартензитне трансформације у ЗУТ.

Како је садржај легирајућих елемената, а нарочито угљеника, у основном металу и металу шава различит, то је температурно подручје између T_m и T_š проширено и могућност дифузије водоника после трансформације метала шава је повећана, сл. 3.4.

Интересантно је анализирати каква је улога предгревања у овим случајевима. Утврђено је да предгревање, чак и ако не спутава мартензитну трансформацију, изазива успорено хлађење, што обезбеђује бржу дифузију водоника и истовремено смањује кртост. Исти или чак јачи ефект има накнадно грејање када се изводи испод М_f тачке, а ако се овоме дода и ефект отпуштања, који се при томе јавља, онда је успех још и већи. Код заваривања истовремено са деловањем трансформације и водоника ствара се сложено напонско поље које потиче од неравномерне расподеле температуре, пратеће трансформације, спољњих укрућења и осталих секундарних узрока, као што су сопствена тежина, еластична веза између делова, остали суседни навари и завари, спајање у недељиве целине. Било какво да је порекло напона који се јавља у завареном споју, може се закључити на бази мерења да су они приближно једнаки граници течења основног метала или метала шава.

Брзина хлађења је један од кључних параметара на који може да се утиче да би се избегао настанак хладних прслина. Наиме, ако је брзина хлађења мања од критичне, чиме се избегава мартензитна трансформација, добија се материјал који има довољну отпорност на настанак и раст прслина. Други суштински важан параметар је количина дифундованог водоника, јер ако водоника нема у довољној количини онда хладне прслине не могу да настану. Стога се као основне мере спречавања појаве хладних прслина примењују предгревање (или неки други начин смањења брзине хлађења) и сушење електрода, тј. отклањање влаге из додатног материјала. Предгревањем се такође утиче на смањење заосталих напона, нарочито максималног затезног напона, јер се смањује неравномерност скупљања при хлађењу (мања је разлика у температури основног метала и метала шава).

Утицај предгревања на брзину хлађења се види посредно на сл. 3.6, [43], где је приказана промена тврдоће у ЗУТ, и на сл. 3.7, [43], где је утицај приказан параметарски, преко кривих зависности брзине хлађења од линијске енергије заваривања (криве 1 и 1' се односе на заваривање без предгревања, а криве 2 и 2' на заваривање са предгевањем).



Слика 3.6. Промена тврдоће по дебљини споја 1 - без предгревања, 2 - са

предгревањем

Осим тога, на сл. 3.7, [43], је параметарски приказан и утицај дебљине основног метала на брзину хлађења (криве 1 и 2 се односе на мању, а криве 1' и 2' на већу дебљину).



Слика 3.7. Утицај предгревања, линијске енергије и дебљине на брзину хлађења

3.1.3. Ламеларне прслине (Ламеларни лом)

Посебну врсту прслина које се јављају у ЗУТ или у основном металу непосредно уз линију споја, ако је деловање напона у правцу дебљине лима, чине прслине назване ламеларни лом. Појава прслина овог типа је непосредно везана за присуство неметалних укључака, па се оне најчешће простиру паралелно површини лима, степенасто следећи распоред самих укључака, сл. 3.8, [43].



Слика 3.8. Положај ламеларне прслине према завареном споју

Ниска пластичност челика у правцу дебљине лима, условљена количином, обликом и распоредом, пре свега, сулфидних, пластично деформисаних укључака, је основни узрок појаве ламеларног лома.

Посебно код челика умирених, односно дезоксидисаних металним алуминијумом, појава манган сулфида, који је најчешће носилац сумпора, диктира ниво осетљивости према појави ламеларног лома. Одређивањем чврстоће, а посебно контракције, на епруветама у правцу дебљине лима, може се успоставити корелација са садржајем сулфида, односно са нивоом присутног сумпора, а тиме и опасност од појаве ламеларног лома, [43].

3.1.4. Прслине настале при термичкој обради (жарење)

Анализе о појави прслина у току процеса израде заварених конструкција биле би непотпуне ако би се изоставиле прслине које се могу јавити у завареним конструкцијама подвргнутим термичкој обради или само жарењу ради смањења заосталих напона, што се по правилу примењује и код CrMoV челика за пароводе. Ове прслине се у односу на механизам настајања и пут простирања деле у две групе.

Прву групу чине прслине које се јављају при ниским температурама (200°С -300°С) и последица су загревања до температура жарења. Због неравномерног распореда температуре по дебљини долази до појаве изражених затезних напона који се често сабирају са заосталим напонима, тако да могу довести до појаве прслина на местима концентрације напрезања. Ова врста прслина је карактеристична за заварене спојеве челика склоног деформационом старењу, односно за конструкције израђене од нисколегираних челика високе чврстоће, код којих је остварена изузетно неповољна крутост. Карактеристика ових прслина да се простиру кроз зрна (транскристално), што на свој начин указује на микромеханизам њиховог ширења, сл. 3.9, [44].

Другу групу чине прслине које се простиру по границама зрна (интерктистално), а настају у високотемпературном подручју жарења, сл. 3.10, [44]. Са металуршког аспекта, структурни услови који погодују појави овог типа прслина су знатно сложенији. Наиме, непосредно уз линију споја, због изузетно високе температуре долази до разградње структуре основног метала, поготову ако је овај ојачан поступком излучивања карбида, нитрида или карбонитрида, уз одговарајући пораст зрна. Због изражених дифузионих процеса талози прелазе у зрно и ојачавају га, уз истовремено слабљење границе зрна. Прслине се јављају у тренутку када резерва пластичности на границама зрна постане мања од деформације пузања, коју изазивају унутрашњи напони или спољашње оптерећење, [35-43].



Слика 3.9. Прслина услед поновног загревања, нисколегирани CrMoV челик са грубозрним ЗУТ



Слика 3.10. Прслина услед поновног загревања, високолегирани CrNi челик

Препоруке за спречавања настанка прслина жарења су, [44]:

- избегавати челике легиране ванадијумом, а имати у виду и неповољан утицај
 Nb, Ti, Mo, Cr и Cu;
- смањити укрућења заварене конструкције или применити термичку обраду појединих заварених спојева пре израде осталих спојева, и
- контролисати брзину загревања при жарењу и/или почети загревање пре завршетка хлађења завареног споја, са тзв. прелазне ("interpass") температуре.

3.2. Структурни и фазни преображаји у челику при заваривању

Механичке, технолошке и употребне особине челика и заварених спојева су одређене структуром која се обично састоји од више микроконституената. Заваривање челика је повезано са загревањем и хлађењем метала, протицањем структурно-фазних преображаја, промене температурског и напонског поља. У циљу контролисања и остваривања жељене структуре неопходно је знати законитости њеног образовања.

3.2.1. Узроци појаве различитих микроструктура при заваривању

Теоријски би метал, у зони завареног споја, требао да има исти комплекс особина као и основни метал, односно исти ниво чврстоће, пластичности, жилавости, отпорности на крти лом, исту топлотну постојаност и отпорност према корозији, итд. Међутим, то није случај, чак шта више, у завареном споју као целини може да се јави значајна разлика у наведеним својствима. Методе оцене наведених особина заварених спојева у многоме су аналогне методама оцене одговарајућих особина металних материјала. При оцени својстава заварених спојева треба имати у виду извесне посебности, које су у вези са термо-деформационим циклусом заваривања као и променом микроструктуре и фазног стања метала у зони око шава.

Да би могла да се дефинише оцена својстава у појединим зонама завареног споја неопходно је знати како долази до стварања тих зона. Познато је да се сви поступци заваривања могу сврстати у две осоновне категорије које чине поступци заваривања топљењем и поступци заваривања притиском. Суштинска разлика између ове две категорије поступака је у количини топлоте унете у зону заваривања која се, пошто су метални материјали добри проводници топлоте, кондукцијом преноси и на околни материјал који директно не учествује у процесу заваривања. Са повећањем количине унете топлоте расте и температура загревања околног материјала као и његова ширина, сл. 3.11, [45].



Слика 3.11. Расподела температура при заваривању топљењем

Пошто при примени поступака заваривања топљењем мора да дође до топљења ивице жлеба, јасно је да ће материјал у околини жлеба да буде загрејан до веома високих температура које се, иначе, не постижу при поступцима заваривања притиском. Зависно од поступка заваривања топљењем, односно количине топлоте и концентрисаности извора топлоте, област загревања основног материјала у околини жлеба је различита. При примени гасног заваривања остварује се највећа област загревања зато што је за овај поступак карактеристична веома мала концентрисаност, односно велико расипање извора 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 шава 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, [45].

Другим речима, 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 посебности 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 посебностима. Зоне које се јављају у завареним спојевима су: зона метал-шава (вар), зона стапања (фузиона зона), зона утицаја топлоте (ЗУТ) и зона основног метала, сл. 3.12, [45].



Усвојено је да се под зоном утицаја топлоте подразумева област у основном материјалу која је претрпела структурне промене у односу на полазну структуру материјала.

3.2.2. Макроструктура завареног споја

Могући изглед профила попречног пресека завареног споја може да се сврста у једну од пет следећих категорија приказаних на сл. 3.13, [45]. У прве три категорије метални спој се образује при контакту течног и чврстог стања материје, док се задње две категорије остварују при контакту у чврстом стању.

Спој течно-чврсто (1,2, 3). После макронагризања претходно припремљеног, брушењем и полирањем, попречног пресека завареног споја могу да се уоче четири, по боји различите зоне:

- Зона метала шава која је образована очвршћавањем растопљеног металног купатила и која је у литератури позната као зона топљења;
- Уска област зоне стапања (фузиона зона) која се налази непосредно на граници зоне топљења;

- Зона утицаја топлоте (ЗУТ) у којој се јављају структурне промене у основном материјалу зависно од времена држања на релативно високој температури, поступка заваривања и режима хлађења. После извођења тврдог лемљења ЗУТ је релативно мале ширине зато што је температура загревања нижа, и
- Зона основног метала који треба да буде са непромењеном структуром, мада у овој области може да дође до појаве заосталих напона и евентуалног кривљења и витоперења завареног споја.



Слика 3.13. Могући изгледи профила попречног пресека завареног споја

Спој чврсто-чврсто (4). Овакви спојеви се образују у прелазној зони са делимичним топљењем ивица које се заварују или без њиховог топљења. У оваквим случајевима зона топљења потпуно одсуствује док зона утицаја топлоте може понекад да се јави.

3.2.3. Микроструктура спојева заварених поступцима топљења

3.2.3.1 Зона топљења

Зона топљења или област метал шава се добија попуњавањем претходно припремљеног жлеба растопљеним додатним материјалом, који зависно од поступка заваривања као и врсте и дебљине материјала који се заварује може да буде у виду необложене жице (GZ, MIG, MAG, TIG, EPP) и обложене жице (REL). Као што је познато постоје и поступци заваривања код којих се не користи додатни материјал за попуњавање жлеба, већ се топе ивице основног материјала чијим се очвршћавањем остварује заварени спој. Да би дошло до образовања зоне топљења неопходно је да и додатни материјал којим се врши попуњавање жлеба и ивице основног материјала који се заварују буду загрејани изнад ликвидус температуре за дати материјал, што у случају челика значи изнад А5 температуре.

Растопљени метал очвршћава у правцу највећег градијента температуре, односно у правцу у коме је одвођење топлоте највеће. Очвршћавање, у случају заваривања истородних материјала, увек започиње на кристалним зрнима основног материјала која нису претрпела топљење, сл. 3.14, а раст је епитаксијални у правцу простирања најгушће пакованих равни, [46].

Пошто код свих легура метала који могу да се заварују топљењем постоји и зона у којој је материјал загрејан између ликвидус и солидус температуре где се течна и чврста фаза налазе у равнотежи, јасно је да ће примарно очвршћавање управо почети на кристалним зрнима у овој зони која су у чврстом стању. Ова зона је иначе позната као зона стапања. С обзиром да се у овој зони јавља мешање стопљеног метал шава и основног метала, у случају заваривања разнородних метала у овој области се издваја и прелазна област која се одликује специфичном расподелом хемијских елемената и особина.



Слика 3.14. Епитаксијални раст кристалних зрна при очвршћавању

По завршетку очвршћавања метал шав има карактеристичну структуру ливења. Реални услови очвршћавања су такви да шав, нарочито у слоју који последњи очвршћава, има изразиту дендритну структуру за коју је карактеристична појава ликвације-локалне хемијске нехомогености због недостатка времена за дифузију атома легирајућих елемената а у циљу изједначавања хемијског састава у оквиру једног зрна.

3.2.3.2 Зона утицаја топлоте

У зони утицаја топлоте, при загревању и хлађењу током заваривања, може да се одвија читав низ фазних и структурних преображаја. Под фазним преображајима се подразумевају преображаји са образовањем нових фаза које се од претходних разликују по атомско-кристалној структури, особинама а често и саставом. При структурним преображајима се јавља промена густине и прерасподела грешака кристалне решетке, легирајућих елемената и примеса, промена структуре постојећих фаза која се односи на образовање нових граница и раст зрна као и коагулација и сфероидизација фаза. Најсложенија промена микроструктуре при заваривању се јавља код челика, јер је за њега карактеристично одвијање и структурних и фазних трансформација. У оквиру разматрања преображаја челика при загревању и хлађењу током заваривања занемарена је појава, у веома уском интервалу, δ-ферита на високим температурама.

Преображаји у челику при загревању-полазна структура жареног угљеничног челика. Са порастом температуре при загревању током заваривања подеутектоидног угљеничног челика долази до следећих преображаја, сл. 3.15, [46]:

- 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 Аз 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), и
- изнад А4 линије настаје делимично топљење по границама аустенитних зрна (зона непотпуног топљења).



Слика 3.15. Структуре у жареном челику при загревању и хлађењу током заваривања

Преображаји у челику при загревању-полазна структура хладно деформисаног угљеничног челика. При загревању током заваривања подеутектоидног челика у хладнодеформисаном стању чија је структура такође феритно перлитна али са издуженим, деформисаним зрнима, јављају се следећи преображаји, сл. 3.16, [46]:

- на температурама изнад 0,4.Тт (температура рекристализације) почиње рекристализација феритне основе, стварају се центри за кристализацију нових недеформисаних зрна који расту, тако да је за ову област карактеристично постојање полигоналних равноосних зрна ферита;
- по достизању А1 температуре почиње образовање аустенита из перлита;
- између А1 и А3 структуру чине крупнија зрна ферита и ситнија зрна аустенита;
- изнад Аз температуре структуру чине ситна зрна аустенита;
- испод А4 температуре услед високе температуре односно прегревања јавља се у структури веома крупно и грубо зрно аустените, и

код челика подложних старењу при загревању испод температуре рекристализације може да дође и до тзв. сопственог старења услед издвајања секундарних фаза.

Преображаји у челику при хлађењу. При хлађењу, после изведеног заваривања, у зони утицаја топлоте се образује коначна структура завареног споја. У оквиру зоне утицаја топлоте јављају се три, сл. 3.15в, односно четири зоне, сл. 3.16в, са структурама које се међусобно разликују не само по изгледу већ и по особинама.

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 на угљенику, 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 трансформишу у мартензит. Зона предгревања која се састоји од крупноигличастог 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 споја 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, [47].

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.





Слика 3.16. Структуре у хладноваљаном челику при загревању и хлађењу током заваривања

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.

Зона рекристализације се јавља само у случају када полазна структура има деформисана зрна која су на температурама испод А1 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 већини 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, [47]. 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.

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 (КХконтинуално хлађење), и то прилагођени за заваривање (КХЗ-континуално хлађење при заваривању), сл. 3.17, [47], који боље описују реалне услове хлађења при заваривању.



Слика 3.17. Шематски приказ КХЗ дијаграма за угљенични челик

Дијаграми континуалног хлађења при заваривању су засновани на много вишој температури аустенитизације од КХ дијаграма, а криве хлађења се добијају помоћу симулатора термичких циклуса заваривања, [48].

Ови дијаграми су специфични за сваки челик, а за њихово добијање је потребно дуго време и компликован експеримент, што значајно ограничава њихову примену. На дијаграму на сл. 3.17 су нацртане три криве хлађења (A, B и C), којима се добијају три типичне структуре: мартензитна (брзина хлађења већа од критичне, директна трансформација аустенита у мартензит, крива A), 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 дијаграма је посебно важна код нисколегираних челика повишене чврстоће и омогућава да се дефинише потребна количина унете топлоте да би се добила одговарајућа структура завареног споја.

3.3. Заварљивост легираног челика SA 387 Gr. 91 (P91)

Појам заварљивост, обухвата све захтеве у погледу квалитета заварених спојева, као и услове под којима је могуће остварити пројектовани квалитет заварених спојева и целе конструкције. Заварљивост зависи од основног и додатног материјала, услова израде заварених конструкција и од квалитета конструкционог решења. Од свих утицајних фактора на заварљивост приоритет има основни материјал. Квалитет заварених спојева у великој мери одређује сигурност у експлоатацији и економичност конструкције. Присуство грешака у завареним спојевима, и одсуство захтеваних механичко-технолошких особина, може пореметити експлоатационе карактеристике заварене конструкције.

Код истраживања заварљивости основног материјала неопходно је извести експериментално заваривање узорака по одабраним енергетским параметрима и методама за испитивање заварљивости, а затим извршити испитивање епрувета заварених спојева и на основу добијених резултата испитивања као и теоријских сазнања дефинисати постигнути ниво квалитета у погледу заварљивости.

Код изучавања заварљивости и развоја технологије заваривања утврђено је да су утицајне величине које дефинишу квалитет завареног споја различите, па се и заварљивост најпоузданије дефинише посматрањем одређених величина или појава. Ово је допринело да се заварљивост дефинише према појавама у завареном споју које настају у моменту његовог формирања или у току експлоатације. Заварљивост материјала зависи од три групе параметара, металуршких, технолошких и конструкционих.

За оцену заварљивости примењују се различите методе испитивања, како аналитичке тако и експерименталне. Обим испитивања, избор стандардних и специјалних метода за оцену заварљивости микролегираних челика зависи од

намене конструкције, нивоа квалитета и особина одабраног основног и додатног материјала.

Основни критеријум заварљивости је одсуство прслина и делова материјала завареног споја повећане склоности према кртом лому. Прслине настају у различитим етапама израде заварених конструкција и један су од основних узрока снижења експлатационе сигурности производа. Са повећањем чврстоће и степена легирања савремених челика, са једне стране, повећава се вероватноћа појаве прслина, а са друге стране смањују се дозвољене величине грешака у условима кртог или другог облика лома. Да ли ће доћи до појаве прслина при изради заварене конструкције веома су битне неке особине основног материјала. О томе се изузетно води рачуна при пројектовању и производњи основног материјала намењеног за израду конструкција поступцима заваривања.

Од многих напредних хром-молибденских челика намењених за рад у условима повишених температуре и отпорности на корозију, у пракси је за конструкције изложене повишеним температурама данас значајну употребу нашао челик SA 387 Gr. 91 (P91). Разлог овоме је висока температурна проводљивост, низак коефицијент топлотног ширења, велика чврстоћа и корозиона отпорност на повишеним температурама, [49].

Легирани челик P91 је погодан за израду паровода у термоелектранама. Пошто се испоручује у облику челичних плоча постоји могућност израде цеви великих пречника, већих него код уобичајено коришћених сличних материјала за ову намену. Користи се како за посуде под притиском, тако и за вентилационе системе, нафтна постројења, као и за остале елементе хемијске и процесне индустрије.

Штавише, убраја се у погодне материјале за израду посуда у нуклеарним електранама као део будућег одлагања радиоактивног отпада или делова нуклеарних реактора. Његов мали садржај молибдена и никла доприноси мањој склонисти ка активацији приликом зрачења у односу на стандардне нерђајуће аустенитне челике, [49].

Наведене особине постигнуте су кроз помно осмишљено легирање. Удео легирајућих елемената је избалансиран тако да се добију оптималне механичке

карактеристике, али и да изабрана структура да најбољи одговор приликом заваривања.

Легирани челик P91 је изабран због његове добре отпорности на пузање на повишеној температури. Али, током заваривања ова особина се смањује. Са повећањем % Cr од 1 до 12% микроструктура метала шава и ЗУТ варирају од феритне до у потпуности мартензитне. Заварени спојеви могу, такође, садржати извесну количину δ-ферита. Заварени спој постаје веома тврд. Предгревања немају толико утицаја на тврдоћу шава. Због високе способности отврдњавања P91 шавови су подложни хладним прелинама.

Дакле, Р91 челици захтевају одмах после завршетка заваривања термичку обраду после заваривања (ТОПЗ). ТОПЗ се изводи на оптималној температури. За велике дебљине завареног споја ако се ТОПЗ не ради на оптималној температури, особине отпорности на пузање ће бити лоше. Каљење на ваздуху Р91 челика се врши да би се произвео темперовани мартензит у комбинацији са ванадијум нитридом, ниобијум царбонитридом и честицама карбида типа M₂₃C₆.

Састав зоне стапања одређују хемијски састав метала, додатног материјала и проценат разблаживања. ЗУТ је поред зоне спајања која има различиту микроструктуру и механичке особине од основног материјала и метала шава. Код испитивања на лом услед пузања ЗУТ се ломи на нижим напонима као тип IV прелом. Омекшана зона и зона ситнозрних честица имају мању отпорност пузања него основни материјал, па заварени спојеви постају осетљиви на превремен лом услед пузања типа IV. ТОПЗ је од великог значаја за побољшање карактеристика шава у односу на лом типа IV. Примећено је да је локација лома завареног споја Р91 челика померена са метала шава на вишим напонима ка ситнозрном ЗУТ на нижим напонима.

3.4. Избор процеса заваривања легираног челика Р91

Избор процеса заваривања за Р91 челика зависи од положаја заваривања, дебљине, додатног материјала, флукса, заштитног састава гаса и температуре и времена термичке обраде после заваривања (ТОПЗ). Могу се користити следећи процеси заваривања, [50, 51]:

> TIG - заваривање металном нетопљивом електродом у заштити инертног гаса;

- Е заваривање ручно електролучно заваривање обложеном електродом;
- > MAG заваривање металном топљивом електродом у заштити активног гаса;
- > MIG заваривање металном топљивом електродом у заштити инертног гаса;
- > Заваривање под троском, и
- > EPP електролучно заваривање под заштитним слојем прашка.

Ако упоредимо заваривање Р91 челика ТІG и Е поступком, тврдоћа метала шава је већа у случају ТІG поступка, али тврдоће ЗУТ и основног метала су мање у односу на REL процес. На сл. 3.18, [51, 52], је приказан профил тврдоће шава за оба процеса. ТІG процесом може се постићи жилавост метала шава до 220Ј на 20°С због велике чистоће микроструктуре и мањег садржаја апсорбованог кисеоника у металу шава. ТІG процес производи мали шав. Е поступком може се постићи жилавост од 50Ј до 95Ј на 20°С, након адекватне ТОПЗ. Стога Е процес може да се користи за постизање најмање жилавости вредности 47Ј према ISO 3580: 2017, [51, 52].



Слика 3.18. Профил тврдоће за REL- заваривање и TIG заваривање. Растојање на х-оси је у mm.

Заваривањем под троском добија се широк и разбацан опсег жилавости метала шава од 35Ј до 70Ј на 20°С. Тај процес може да произведе шавове који имају мање од захтеваних 47Ј. Заваривање под троском је погодно када је потребна висока продуктивност. ЕРР поступком се добија жилавост од 25Ј до 35Ј на 20°С. То је мање од потребне жилавости од 47Ј.

Дакле задовољавајућу ударну жилавост може постићи само ТОПЗ на 760°С током 4 до 5 сати. У ЕРР поступку садржај кисеоника у металу шава може бити од 600ppm до 1000ppm. Због овог се повећава тврдоћа и смањује жилавост. Да би смањили оксидацију садржај силицијума се повећава до 0,3%. Приликом заваривања ове легуре могу се користити заштитни гасови Ar-CO2 (80-20) i Ar-CO2 (95-5). Ово побољшава жилавост 10% и смањује ниво кисеоника мање од 100ppm. У таб. 3.1 дата је енергија удара и тврдоћа МШ за различите процесе заваривања према европским спецификацијама ISO 3580: 2017, а у таб. 3.2 су дате захтеване карактеристике МШ за Р91, [51, 52]:

Табела 3.1. Енергија удара и тврдоћа метала шава за различите процесе заваривања

Поступак	Тип	Дебљина,	Енергија	Летерална	Тврдоћа,
заваривања	додатног	mm	удара на	експанзија	HV10
	материјала		20°C, KV,	на 20°С,	
			J	mm	
TIG	Жица	2,4	100 - 240	2,0 - 2,5	240 - 260
	MCW	1,2	100 - 150	1,8 - 2,1	240 - 260
Е	Обложена	2,5, 3,2,	30 - 90	0,7 - 2,0	230 - 250
	електрода	4,0, 5,0		, ,	
EPP	Жица	2,4	30 - 70	0,5 - 1,0	240 - 260
	MCW	1,6	25 - 70	0,4 - 0,8	240 - 260
MIG/MAG	FCW	1,2	10 - 40	0,15 - 0,6	230 - 270
	MCW	1,2, 1,6	30 - 40	0,4 - 0,5	240 - 260

Тип Електроде	Спецификација	Заштитни гас	Затезна чврстоћа R _m , MPa	Затезна чврстоћа R _m , MPa	Издужење А, %	Енергија удара КV, J, на 20°C	Температура предгревања и међупролаза	Стање после заваривања	Процедура ТОПЗ
Основни материјал	16d		585-850	415	20	>41			730-780°C
Обложена електрода	EN 1599:1997; EcrM091B		585	415	17	47/38	200-300	TOII3	730-770°C 2 do 3 h
Чврста жица	EN 12070:1996; CrMo91		585	415	17	47/38	200-350	TOII3	750-760°C 3h
Обложена електрода и чврста жица	Gec Alhstrom 30/658							TOII3	
Обложена електрода	AWS A5 28-96 E90XX-B91		620	530	17	Није спецификовано	232-288	TOII3	730-760°C 1h
Чврста жица	AWS A5 28-96 ER90S-B9	Аргон 5% О ₂	620	410	16	Није спецификовано	150-260	TOII3	730-760°C 1h

Табела 3.2. Захтеване карактеристике метала шава за Р91

3.4.1. Додатни материјал

Подједнако као и за основни материјал, хемијски састав додатног материјала је изузетно битан. Искуство је показало да је најбоље користити додатни материјал сличног хемијског састава као и основни материјал.

Метал завара легираног челика Р91 са чисто мартензитном структуром, подвргнут високим температурама и брзом хлађењу у току заваривања садржи малу количину δ -ферита, и у металу завара као и у зони утицаја топлоте. С обзиром да структура б-ферита смањује отпорност на пузање и чврстоћу завареног споја, састав додатног материјала треба бити изабран тако да се минимизира δ -ферит у укупној структури. Одабир хемијског састава додатног материјала није подједнако захтеван задатак за различите процесе заваривања. Приликом примене TIG поступка заваривања није потребно радити са додатним материјалом истог хемијског састава као и основни материјал. Задовољавајуће карактеристике метала завара се постижу и са додатним материјалом који је сличног хемијског састава као и основни материал, [52]. Добар квалитет Р91 шава може се добити само ако је постигнут одговарајући хемијски састав метала шава. За Е заваривање електрода изабрана за легирани челик Р91 је Е-9015-В9-Н4. Садржи 0,08-0,13% С, 1,25% Мл, 0,3% Si, 0,1% S, 0,1 % P, 1% Ni, 8-10,5% Сг и 0,85-1,2% Мо. Додатни елементи су V, Cu, Al, Nb и N у малој количини. Поларитет заваривање изабран је DCEP. Главна предност ове електроде је да она садржи веома мало водоника. Подлога за електроде се строго препоручује. Иако Р91 материјал има проблем отврдњавања при заваривању, веома је осетљив на водоничне прслине, [52].

У таб. 3.3. дате су ознаке електрода које се користе за одређене поступке заваривања, [52].

Табела 3.3. Електроде за заваривање челика Р91 у зависности од поступка заваривања

Поступак заваривања	REL	TIG	EPP	Заваривање под троском
Ознака електроде	Chromet 9B9 E9015-B9	9CrMoV ER90S-B9	Supercore F91 E9171-B9	Cormet M91 9CrMoV EB9

За Е заваривање пожељне су E9015-B9 електроде. EKSKS15 тип електроде нема вишка Fe y праху у облози као EKSKS18 електрода, што елиминише један извор загађивача. Електроде за заваривање морају бити чисте да не би произвеле "кратер прслине". Две робне марке електрода и додатног материјала које имају јако мали проценат остатака су "Metrode Chromet 9B9" електрода и "Euroveld 9CrMoV" жица. Жица је погодана за TIG, MIG/MAG и EPP (са одговарајућом јачином струје), као што су "Lincoln MIL800H", "Lincoln 882", "Thissen Marathon 543", "Bavarska-Schveisstechnik VP380". Заваривање челика Р91 EPP поступком захтева још више пажње, јер многе жице за EPP не дају адекватну жилавост на 20°C. Једина жица за EPP поступак заваривања доследно обезбеђује више од FCAV жице да доследно обезбеђује више од 55J/kg апсорбоване енергије на 20°C је Метродеова "Supercore F91", [52].

Особине P91 заварених спојева у потпуности зависе од коректне хемијске анализе шава. Стога, веома се препоручује да се додатни материјал купи са извештајем о испитивању који показује стварну хемијску анализу за специфичне комбинације топлоте/лот те електроде. Поред тога, минимални садржај угљеника од 0,09%, минимум садржај ниобијума 0,03%, а најмање азота од 0,02% треба да обезбеде адекватне карактеристике пузања у металу шава.

Истраживања су показала да је приликом пројектовања хемијског састава електрода изузетно битно водити рачуна о количини ниобијума. Иако је његова количина битна за постизање одговарајуће отпорности на пузање, утврђено је да неповољно утиче на вредности чврстоће. Из овог разлога се његов процентуални удео у укупном хемијском саставу додатног материјала држи на дозвољеном минимуму. Дакле, количина ниобијума у додатном материјалу би требала бити мања него у основном и то у границама 0,04% - 0,08%.

Нешто нижи ниво ниобијума може се прихватити код електроде ако се дода титанијум; титанијум је ефикасна замена за ниобијум, али титанијум не би требало да прелази 0,010% јер реагује са азотом, смањујући ефикасност азота као појачивача чврстоће пузања. Поред тога, збир Mn + Ni не треба да прелази 1,5%. Манган и никл смањују температуру трансформације, и ако се пређе 1,5%, температура трансформације ће да падне испод 788°С, смањујући опсег у коме се термичке обраде могу урадити безбедно. С друге стране је установљено да никл

има повољан утицај на жилавост, па се предлаже да његова количина буде што већа, унутар дозвољених граница. Поред тога, M_f температура пада, повећава се могућност да се задржи аустенит после ТПЗО. Пошто је ово легура високог отврдњавања, подложна је водоничним прслинама. Зато се препоручује E9015-B9-H4 електрода. Ознака "H4" показује да је електрода излаже мање од 4ml водоника на 100 грама метала шава. Ово је електрода са заиста веома ниским садржајем водоника-управо оно што је најбоље за заваривање челика P91, [52].

3.4.2. Предгревање

Да би се установио ефекат предгревања било је потребно урадити низ експеримената. Ови експерименти су довели до основних сазнања о потребној температури предгревања у зависности од дебљине материјала који ће се заваривати.

Добијени резултати су сажети и представљени као смернице за праксу, [51]. На завареним спојевима завариваним са предгревањем на температуру до 205°С нису се појавиле прслине. Из тог разлога се препоручује да се комади дебљине изнад 12 mm (½ инча) предгревају минимално до температуре од 205°С. Минимална температура за комаде мање дебљине је 150°С. Препоруке Америчког друштва машинских инжињера (ASME) за температуре предгревања и температуре међупролаза за разне врсте челика из ове фамилије дате су у таб. 3.4, [51].

Легура	Температура предгревања, °С	Мах. температуре међупролаза, °С
P23	170	
P24		350
P91	202	
P92	205	
P122		250

Табела 3.4. Препоруке за температуре предгревања легираних челика класе Р

За комаде дебље од 12mm (¹⁄2 инча) температура предгревања не би смела пасти испод минималне температуре предгревања док се не заврши 2/3 завара и тек после одржавања температуре у вредности од 204°C у трајању од четири сата и

накнадног хлађења на ваздуху или тренутне накнадне термичке обраде на температури од 704 до 732°С, [51].

Углавном се ради са максималном температуром међупролаза од 300°С. Дозвољена је употреба и нижих температура, док су више температуре ограничене на 370 С. Максимална температура међупролаза помаже да не дође до појаве топлих пукотина. Наведено пуцање је последица присуства ниобијума и силицијума у додатном материјалу.

3.4.3. Заваривање

За заваривање ручним електролучним поступком најчешће се употребљавају E9015-B9 обложене електроде. Обложене електроде EXX15 немају додатни метални прах у облози као електроде EXX18, што отклања један од извора контаминације. Иако су произвођачи обложених електрода увидели потребу за израдом "чистијих" електрода типа E9018-B9, уколико се повремено појаве прслине у кратеру (познате и као "аномалије очвршћавања"), додатни материјал има превише остатака (нечистоћа) и треба га заменити, [53].

Посебну пажњу током заваривања треба обратити на појаву прслина у кратеру имајући у виду да постоји могућност да се у једној серији обложених електрода можда неће појавити прслине док ће се у другој, од истог произвођача појавити. Два трговачка назива обложених електрода и додатног материјала са малом количином остатака (нечистоћа) су "Metrode Chromet 9B9" електроде и "Euroweld 9CrMoV" електродна жица. Ова електродна жица је погодна за употребу приликом коришћења TIG, MIG/MAG и EPP поступка (уз одговарајући прашак, као што су "Lincoln MIL800H", "Lincoln 882", "Thyssen Marathon 543" и "Bavaria-Schweisstechnik WP380"). Заваривање челика Р91 пуњеним жицама захтева још већу пажњу пошто многе пуњене жице не пружају адекватну енергију удара на температури од 21°C, једина пуњена жица која задовољава овај критеријум је "Metrode's Supercore F91", [53].

Познавање тачног хемијског састава метала шава може да обезбеди веома сигурну прогнозу понашања завареног споја у експлоатацијским условима.

Приликом употребе ЕРР поступка, препоручује се употреба основног прашка јер употреба других типова прашка може довести до сагоревања угљеника и

дозволити смањење чврстоће и жилавости преко повећања нивоа кисеоника и азота у металу шава.

Техника заваривања је такође веома важна. Како су широки и равни спојеви најбољи, техника са благим њихањем и великом брзином заваривања треба да буде примењена. Удубљене спојеве треба избегавати, посебно приликом примене ЕРР поступка заваривања. Надвишење шава не треба да прелази 1/8 in (3,2 mm), за ручно електролучно и заваривање пуњеним жицама како би се поспешило отпуштање претходних пролаза. Ови услови заваривања треба да буду наведени у WPS листама како би се обезбедило исправно упутство за завариваче. Сами заваривачи треба да су обучени за извођење свих специфичних захтева из WPS листи.

Генерално Р91 челик се заварује са 205-290°С предгревањем и температуре међупролаза. Заварени спој се полако хлади на ваздуху до 95°С што је нешто мање од M_f температуре 100°С. Онда следи ТОПЗ. Мора се водити рачуна да ће се аустенит трансформисати у мартензит пре ТОПЗ, иначе ће трансформисати у мартензит након ТОПЗ што чини шав тврдим и смањује енергију удара. Код аутоматског заваривања корена користи се ТІG праћено са МІG или ЕРР да би се добила висока стопа производње. Заваривање широког равног шава са благим њихањем и великом брзином. Али посебна пажња је посвећена овом материјалу због његове високе осетљивост на водоничне прслине. ТОПЗ се изводи одмах после заваривања, [51].

Легирани челици са 9-12% Сг за електране се испоручују у нормализованом и отпуштеном стању. Препоручује се да се после заваривања спроведе поступак отпуштања, да би се што је више могуће репродуковала отпуштена мартензитна структура и да би се ослободио напон индуктован заваривањем. Комад који се обрађује се предгрева да би се избегле хладне прслине, после чега следи природно хлађење до температуре околине која је нешто испод М_f-температуре завршетка стварања мартензита.

На сл. 3.19 представљен је попречни пресек кроз заварени спој у цеви са великом дебљином зида, [54], израђеној од легираног челика 9-12% Сг. С обзиром да се од овог легираног челика могу правити висококвалитетни шавови, најчешће се за корени пролаз користи ТІG поступак заваривања, зато што је тај пролаз, као први физички спој између плоча компоненте, посебно осетљив на деформацију услед контракције. Исти поступак може да се користи и за испуну, али се ипак код сложених спојева често користи Е поступак или високопродуктивни поступци као што је поступак заваривања пуњеном жицом или ЕРР поступак заваривања дубоких шавова. Избор поступка може да зависи и од тога да ли ће се цев заваривати у радионици или на лицу места. Уместо Е поступка, може се применити поступак заваривања електронским снопом, [54].



А - корени пролаз - TIG Б - испуна - TIG/REL/ZŽP/EPP



3.4.4. Термичка обрада након заваривања

Један од кључних фактора за добијање задовољавајућих заварених спојева је термичка обрада после заваривања (ТОПЗ). Да би се добиле потребне вредности чврстоће изузетно је битно правилно жарење мартензитне микроструктуре. Да би жарење било исправно обављено потребно је одредити одговарајућу температуру и време трајања. За ову врсту челика је обавезна термичка обрада након заваривања на температури од 704°С. Пожељно је да се комадима дебљине веће од 12 mm (½ инча) термичка обрада након заваривања ради на температурама између 760-788°С. Чак и на цевима малог пречника у оквиру супергрејача, потребно је дуго време прогревања како би се формирала жељена структура завареног споја и осигурала адекватна жилавост за тестирање и каснији радни век. За мале цеви ТОПЗ се одвија на 750°С до 775°С, 2 сата, [55].
Термичком обрадом након заваривања на већим температурама се прекорачује температура почетка трансформације A_{c1} која износи 830°C. Већина произвођача ради термичку обраду након заваривања на температури од 760°C у трајању од 2h. Може се усвојити ТОПЗ циклус за P91 легирани челик као што је приказано у таб. 3.5, [55]. Када је одређен потребни период хлађења, мора се даље водити рачуна о следећим факторима: дебљина материјала, дужина временског периода у којем је метал завара био изложен топлоти и смањењу заосталог водоника.

Циклус ТОПЗ	Опис	Вредност	
1.	Брзина загревања	40°C/h	
2.	Температура задржавања	740-775°C	
3.	Време задржавања	2 – 8 h	
4.	Брзина хлађења	80°C/h	
5.	Температура растерећења	300°C	

Табела 3.5. Циклус термичке обраде после заваривања за легирани челик Р91

Циклус термичке обраде после заваривања (ТОПЗ) је приказан на сл. 3.20, [56].



Слика 3.20. Циклус термичке обраде после заваривања (ТОПЗ) за легирани челик Р91

Приликом спајања легуре са високим садржајем хрома са легуром са мањим садржајем Сг или са угљеничним челиком, угљеник из легуре са нижим садржајем Сг дифундује ка легури са вишим садржајем Сг током ТОПЗ. Ово ће довести до стварања меке зоне у челику са нижим садржајем Сг. Што је виша температуре ТОПЗ и што је дуже време прогревања то је и дифузија бржа и дуже се одвија што доводи до пораста меке зоне. Температура ТОПЗ за заваривање легираног челика Р91 са истим материјалом се подиже, док се приликом заваривања различитих врста материјала задржава на 705°С како би се нежељени ефекти свели на минимум, [55, 56].

По завршетку ТОПЗ, тврдоћа завареног споја треба да буде у опсегу од 200 до 275HВ. Тврдоћа до 300HВ може бити прихваћена али тврдоћа изнад 300HВ служи као показатељ да ТОПЗ није адекватна. Приликом испитивања тврдоће, спојеви изведени Е и ЕРР поступком треба да покажу више вредности тврдоће у односу на спојеве изведене MIG/MAG поступком или поступком са пуњеним жицама. Тврдоћа испод 175HВ указује на прегревање споја и такви спојеви треба да буду или замењени или цео део треба нормализовати и отпустити, [55, 56].

Чудан феномен се јавља код ове класе челика, а огледа се у појави прслина од напонске корозије у условима заваривања. Узрок појаве ових прслина још није у потпуности утврђен. Често се не дешава и по неколико дана од када је заварени спој охлађен до собне температуре, али исто тако се дешава. Ова појава се често везује и за спојеве који приликом хлађења влаже и задржавају кондензат на себи. Чини се да одржавање спојева који нису подвргнути ТОПЗ на температури изнад собне и у условима мале влажности спречава појаву ових прслина.

Посебан проблем представљају цеви које се фабрикују у радионицама које могу бити премештане унутар радионице и по неколико дана пре термичке обраде. Општа препорука је да се заварени спојеви на челицима ове класе што пре подвргну термичкој обради након заваривања. Нечистоће у облику расхладне течности за сечење, уља за подмазивање, маркера итд. могу довести до појаве транскристалних прслина, па их не треба користити у близини заварених спојева на овој врсти челика, [56].

3.4.5. Прекиди у загревању

Кад год је могуће, потребно је избегавати прекиде у термичкој обради. У овом случају се посебно мора водити рачуна о дебљини материјала. Заваривање материјала већих дебљина подразумева и веће вредности заосталих напона и веће брзине хлађења. Ово је посебно изражено док је жлеб мање попуњен (док је попуњен мањи део попречног пресека материјала) и док метал завара има мању дуктилност због великих брзина хлађења. Због свега наведеног је у случајевима када није могуће избећи прекиде приликом предгревања потребно држати се неколико препорука да би се добили задовољавајући заварени спојеви.

Препоруке се састоје у следећем:

- најмање ¼ дебљине треба бити попуњено заваривањем пре него што се прекине термички третман (предгревање), и
- температура предгревања се мора одржавати док се жлеб не испуни или док се не заврши накнадна термичка обрада по завршетку заваривања.

3.4.6. Утицај заваривања и термичке обраде на механичке особине

3.4.6.1 Тврдоћа

Тврдоћа у ЗУТ Р91 завареног споја је преко 350HV. Овај ниво тврдоће је гранична вредност тврдоћа за већину угљеничних челика. Разлози за овако високу тврдоћу шава су присуство легираних елемента и формирање мартензита у металу шава и ЗУТ. При овако високим тврдоћама уколико је водоник растворен у металу шава, може доћи до стварања водоничних прслина. Након ТОПЗ при температури од 750°C тврдоћа шава се смањује. Са повећањем трајања ТОПЗ од 2 сата до 6 сати тврдоће Р91 метала шава и ЗУТ ће се смањити због фазне трансформације из мартензитне у феритну. Као што је приказано на сл. 3.21, [54], са повећањем ТОПЗ температуре тврдоћа Р91 челика се смањује али брзина смањења тврдоће се редукује са порастом температуре од 750К до 1040К за 1 сат, [55, 56].



Слика 3.21. Утицај термичке обраде после заваривања на тврдоћу легираног челика Р91

3.4.6.2 Пузање

Многе цеви у термоелектранама су отказале због појаве пузања на повишеним температурама. Током рада цеви на повишеним температурама и притисцима, долази до појаве прелина типа IV у ЗУТ услед пузања. Испитивањем на пузање завареног споја P91 цеви на 625° С, уочена је појава прелина типа IV. Прелине су се јавиле у ЗУТ у близини основног метала. Међутим, правећи својства ЗУТ уједначеним и сличним основном металу, лом услед типа IV прелина на пузање може да се смањи. Са повећањем ТОПЗ од 600°С до 760°С, минимална и просечна брзина пузања се повећава. Након повећања ТОПЗ температуре изнад 820°С минимална и просечна брзина пузање се смањи је нагло порасла. Са порастом температуре ТОПЗ од 600°С и трајање 2 сата до 840°С и трајање 8 h брзина пузања се повећава и отпорност на пузање се смањује. Ако се заварени спој нормализује и хлади до 200°С и затим отпушта, добија се најнижа брзина пузања.

3.4.6.3 Енергија удара (ударна жилавост)

Енергија удара Р91 материјала као параметар отпорности на присуство прелина је врло битна код третирања хидростатичким притиском. У термоелектранама високи притисак паре је од суштинског значаја изнад 600°С.

Енергија удара Р91 метала шава се смањује врло брзо код заварених материјала. Овај мањак се може побољшати ТОПЗ. Примена ТОПЗ на 760°С током 3 часа побољшава жилавост до једнакости основног метала. Са порастом ТОПЗ трајања енергија удара се даље повећава. На сл. 3.22 је приказан ефекат ТОПЗ на енергију удара легираног челика Р91, [55, 56].



Слика 3.22. Утицај ТОПЗ на енергију удара легираног челика Р91

Генерално, утицај термичке обраде после заваривања (ТОПЗ), може се сублимирати кроз, [55, 56]:

- Процес заваривање и избор електрода утиче на микроструктуру и механичке особине Р91 челика;
- ТОПЗ побољшава микроструктуру и механичке особине Р91 челика. Производи хомогенију микроструктуру у металу шава и ЗУТ. То смањује осетљивост метала шава на прслине;
- Са порастом температуре и трајања ТОПЗ долази до темперовања Р91 челика. Дакле, производи се темперовани мартензит. Због његове тврдоће, затезне чврстоћа и дуктилност су смањени, енергија удара је повећана изнад 47J;
- Ако се повећа ТОПЗ температуре изнад ниже критичне температуре, брзина деформације пузања и дуктилност пузања се повећавају а време лома се

смањује. Локација лома се креће ка зони спајања. Таложење и раст карбидних честица расту са повећањем ТОПЗ температуре изнад А₁ линије;

- Повећање броја циклуса ТОПЗ не даје никакву значајну корист за механичка својства Р91 метала шава. Само ТОПЗ циклус са одговарајућом температуром и трајањем даје повољне резултате, и
- ТОПЗ на 750°С је најпогоднији за одржавање јединствене тврдоће метала, ЗУТ и метала шава. То нити повећава тврдоћу метала шава нити омекшава основни метал.

4. ПОГОДНОСТ ЗА УПОТРЕБУ - ПРОЦЕНА ИНТЕГРИТЕТА КОНСТРУКЦИЈА

Примена механике лома је донела значајне промене у инжењерској пракси. Као пример за илустрацију ове тврдње могу да се наведу проблеми са Аљаска цевоводом и примена принципа конструисања са сигурношћу од лома. У случају цевовода од Аљаске до САД по први пут су критеријуми механике лома прихваћени као меродавни, уместо превише конзервативних стандарда о дозвољеним грешкама у завареном споју. Наиме, када је испитивањем без разарања утврђен велики број грешака у кружним завареним спојевима, које је по тада важећим стандардима требало поправити, поставило се питање економске оправданости, односно техничке неопходности поправке. Стога је надлежна институција, на захтев компаније која је постављала цевовод затражила помоћ од Националног бироа за стандарде (tada National Bireau of Standards-NBS), данас Национални институт за стандарде и технологију (National Institute of Standards and Technology-NIST).

Детаљна анализа параметара механике лома, заснована на концепту отварања врха прслине, обухватила је с једне стране процену силе раста прслине, а с друге стране отпорност материјала (метал шава) на раст прслине. Резултати овог истраживања су званично прихваћени, па је обим поправке драстично смањен, чиме су избегнути непотребни трошкови, а такође и опасност од уношења нових грешака репаратурним заваривањем, [57].

Можда је најважније истаћи да је на основу овог истраживања закључено "да је анализа механике лома прихватљива основа за допуштени изузетак од постојећих стандарда под одређеним околностима, ако таква анализа даје убедљиву и конзервативну (сигурну) процену интегритета конструкције". Треба такође истаћи да се до овог нивоа примене механике лома дошло не само детаљним истраживањем у конкретном случају, већ и претходним, интензивним развојем механике лома као научне дисциплине, [57].

Други пример значајне промене у инжењерској пракси је прелазак са класичног принципа конструисања компоненти које раде у условима замора (тзв. "safe-life" принцип у оквиру кога се применом Велерове криве одређује век компоненте без прелине) на принцип конструисања са сигурношћу од лома (tzv. "fail-safe") код кога се век одређује као период раста прелине од неке почетне величине до величине прелине која је критична у односу на крти лом. Још израженије него у првом примеру, овде је од суштинског значаја био достигнути ниво механике лома као научне дисциплине, а посебно истраживања у вези са заморним растом прелине. Другим речима, прикупљена сазнања о расту заморне прелине су омогућила да се, са довољном сигурношћу, утврди преостали век компоненте са прелином и на тај начин процени да ли компонента може да ради до следеће контроле. У складу са тим, чак и најодговорније компоненте се не замењују пре него што се редовним контролама открију прелине или сличне грешке. При томе је компонента конструисана тако да у случају постојања прелине мање од минималне величине коју може да открије примењена метода испитивања без разарања, њен век буде већи од периода времена до следеће контроле, као што је схематски показано на сл. 4.1, [58].

Могућност примене овог принципа на дискове млазних мотора је анализирана у раду, [58], где је показано да би се у периоду од 20 година на 23 мотора остварила уштеда од милијарду долара у односу на првобитну варијанту са заменом дискова после прописаног радног века. Полазна основа за ово разматрање је била чињеница да је од 1000 замењених дискова, само један имао прслину дужине 0,75mm.



Слика 4.1. Шематски приказ конструисања са сигурношћу од лома

Јасно је, дакле, да је основна промена коју је механика лома увела у инжењерску праксу прихватање неминовности постојања прслина и сличних грешака и неопходности анализе њиховог утицаја на интегритет конструкције. Основна улога механике лома је да математички повеже три променљиве величине (напон, величина грешке и жилавост лома), чиме је омогућено да се на основу две познате величине израчуна трећа. На пример, ако је на основу оптерећења и геометрије конструкције познат напон, а на основу испитивања жилавост лома материјала конструкције, онда може да се одреди критична величина грешке. У пракси је такође чест случај да се методама испитивања без разарања (ИБР) открије прслина или слична грешка у конструкцији за коју се онда одређује критични напон на основу познате жилавости лома материјала, или се одређује минимална жилавост лома материјала на основу напонског стања конструкције. Коначно, овај концепт може да се примени још у фази пројектовања, ако се претпостави постојање прслине чије су димензије једнаке осетљивости опреме за ИБР, па се одреди дозвољени напон на основу жилавости лома, или обрнуто.

Методологија примене механике лома зависи од расположивих података, понашања материјала, утицаја околне средине и оптерећења конструкције. У случају статичког оптерећења треба разликовати понашање материјала које се описује као линеарно-еластично ("сразмерно мало течење") од понашања материјала код кога не може да се занемари његова пластичност. У првом случају се примењује линеарно-еластична механика лома (ЛЕМЛ), док се у другом случају, у зависности од облика пластичног течења примењују различите варијанте еластопластичне механике лома (ЕПМЛ). У случају динамичког оптерећења такође треба разликовати линеарно-еластично од еласто-пластичног понашања материјала, а посебан значај има замор, као типични механизам раста прслине под дејством цикличног оптерећења. Коначно, утицај околине може да буде од пресудног значаја због повишене температуре или корозије.

4.1. Механика лома заварених спојева

Грешке у завареним спојевима које су довеле до катастрофалних последица (нпр. бродови "Liberti", нафтна платформа "Alexander Kielland", трајект "Estonija") условиле су развој и примену механике лома, као научне дисциплине која изучава понашање материјала у присуству прслина. У оквиру ових истраживања заварени спојеви имају посебан значај, јер су топлотни и металуршки процеси при заваривању веома погодни за настанак прслина. Кључно питање у оваквим истраживањима је да ли ће прслина 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 прслине може да буде спор и стабилан, ако га прате пластичне деформације испред врха прслине, или брз и нестабилан, ако пластичних деформација практично нема. Нестабилан раст прслине изазива крти лом и изучава се у оквиру линеарноеластичне механике лома, док се стабилан раст прслине изучава у оквиру еластопластичне 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 жилавошћу лома, а у оквиру еласто-пластичне механике лома, отварање прслине или Ј интеграл са њиховим критичним вредностима, [59].

Међу најпознатије ломове заварених конструкција свакако спадају ломови бродова "Liberti", који су прављени током другог светског рата електролучним заваривањем под прашком, што је тада први пут примењено у масовној производњи. Ломови бродова "Liberti" су били крти, уз минималну пластичну деформацију, а основни узроци су били неквалитетан материјал (висока температура преласка у крти лом), спречена деформација у правцу дебљине (равно стање деформације) и дејство заосталих напона. Од 4694 направљених бродова чак 233 брода се поломило на два дела, слично примеру на сл. 4.2, који се односи на брод укотвљен у луци, на који практично није деловало спољно оптерећење, већ само унутрашњи (заостали) напони, [59].



Слика 4.2. Изглед прелома брода "Liberty"

Док ломови бродова "Liberti" могу да се припишу недовољном познавању технологије заваривања и лошем материјалу, дотле у случају хаварија нафтне платформе "Alexander Kielland" и трајекта "Estonija" узрок треба да се тражи у погрешној процени значаја неких заварених спојева и њиховој лошој изради.

У случају нафтне платформе, хаварија која је 1980. године однела 123 живота је последица заморног лома по обиму попречног носача платформе (цев D-6, сл. 4.3). Овај заморни лом, сл. 4.3, [60], је инициран прслинама у сучеоном завареном споју прирубнице (која је израђена савијањем плоче и подужним сучеоним заваривањем), сл. 4.4, [60] и прслинама у угаоним завареним спојевима цеви D-6 и сонарне прирубнице, за које се сматрало да нису од прворазредног значаја, па њиховој изради није посвећена потребна пажња. Осим тога, од битног утицаја је била велика концентрација напона изазвана убацивањем сонарне прирубнице, без прелазног радијуса или неког другог начина смањења концентрација напона. Иронијом судбине сонарни уређај због кога је прирубница убачена није никад уграђен, [60].



Слика 4.3. Носачи нафтне платформе

Слика 4.4. Сучеони заварени спој сонарне прирубнице са прслинама

Основни узрок хаварије трајекта "Estonija" 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 изради није посвећена потребна пажња.

Последња од великих хаварија која се десила на нафтној платформи "Deepwater Horizon" 20. априла 2010. године, узрокована експлозијом метана, што је довело до пожара на платформи. Висока температуре је проузроковала слабљење саме конструкције платформе и њеног потонућа, сл. 4.5, [61].



Слика 4.5. Пожар на нафтној платформи "Deepwater Horizon"

Претпоставља се да је потонуће платформе проузроковало пуцање цевовода кроз коју је слободно истицала нафта. Иако експлицитно нема доказа претпоставља се да је пожар проузроковао слабљење механичких особина цеви, а посебно у зони заварених спојева. Ова хаварија је изазвала највећу еколошку катастрофу у америчкој историји јер се претпоставља да је у море исцурило близу милион тона нафте. Ту треба укључити и потонуће платформе, као и људске животе (настрадало 11 радника), сл. 4.6, [61].



Слика 4.6. Нафтна мрља настала нако хаварије на платформи "Deepwater Horizon"

4.1.1. Значај механике лома

Механика лома је инжењерска дисциплина, која се бави проучавањем развоја прслине у кртим и квазикртим телима. Термин механика лома има двојаки смисао. У ужем смислу он се односи на истраживање услова развоја прслине. У ширем смислу он обухвата и део отпорности материјала, који се односи на завршну фазу процеса деформисања под деловањем оптерећења. Овако постављена, механика лома представља дисциплину у којој је неизбежно повезивање теоријских разматрања са експерименталним резултатима, са једне, и са појавом ломова и хаварија у експлоатацији конструкција, са друге стране. У циљу што успешније примене механике лома потребно је поседовати и предзнања из дисциплина као што су механика деформабилног тела и наука о материјалима, које су њен саставни део, као што је схематски приказано на сл. 4.7, [62].





При пројектовању конструкција као што су посуде под притиском, мостови, бродови, ваздухоплови и возила један од основних циљева је да се њихове захтеване перформансе оптимизују са становишта свеобухватне цене материјала, конструисања, израде, експлоатације и одржавања. Да би се ови циљеви остварили, пројектант полази од претпостављених радних оптерећења и експлоатационих услова, израчунава напоне у разним елементима конструкције и упоређује их са критичним напонима за одговарајући облик оштећења који може да се појави. Елементи се затим димензионишу у складу са изабраним материјалом, како би се предупредила појава отказа у било ком облику. Могући узроци отказа су:

- ▶ прекомерна еластична деформација;
- прекомерна пластична деформација, и
- ▶ лом.

Инжењери се у пракси најчешће концентришу на прва два могућа облика оштећења полазећи од претпоставке да ће правилним избором материјала и димензионисањем елемената, тј. ограничавањем нивоа напона у њима спречити појаву лома. Овакво размишљање није увек исправно што је у пракси потврђено отказима и ломовима великог броја конструкција при напонима нижим од напона течења. Наиме, компоненте конструкција могу да садрже низ слабих места која настају при технолошком поступку добијања и прераде сировог материјала, изради компоненти, монтажи, термичкој обради, заваривању и у току експлоатације. Испитивања су потврдила да у конструкцијама практично увек постоји неки облик дисконтинуитета у материјалу. Дисконтинуитети могу бити микронске величине али некад могу постојати и прслине од неколико центиметара. Модерне методе испитивања без разарања за утврђивање грешака у материјалу као што су ултразвучна и радиографска, иако су значајно унапређене, не могу увек да открију веома мале дисконтинуитете у материјалу као што су прслине, лункери или порозност.

Другим речима контрола квалитета може утицати да се смање или отклоне неке грешке у материјалу, али се оне, у начелу, не могу избећи. Намеће се закључак да се при правилном пројектовању конструкција са становишта сигурности у разматрање морају узети сви могући појавни облици отказа. Механика лома се бави проблемима стабилног или нестабилног раста неке већ постојеће или током експлоатације инициране прслине, као и анализом оштећења и ломова насталих растом прслине, [63].

Један од основних захтева при пројектовању и димензионисању било које инжењерске конструкције је да у периоду предвиђене експлоатације не дође до неког вида оштећења, услед кога ће она изгубити функционалност. Значи, до губитка конструкцијске целине може доћи на различите начине. Међутим, најсложенији и најопаснији начин је онај који је у начелу описан као "**крти лом**". Примена метала високе чврстоће и релативно високе вредности напона течења у инжењерској пракси може бити праћена неочекиваним појавама.

До сада, се сигурност конструкција у односу на наведене облике могућег отказа постизала димензионисањем делова на основу допуштених напона $\sigma_{dop.}$. Овај традиционални приступ конструисања на бази степена сигурности, међутим, није довољно поуздан јер се откази и хаварије дешавају и поред испуњења строгих захтева у погледу сигурности од пластичног течења. Као доказ могу послужити многобројни примери ломова разних типова кострукција: челичних мостова, решеткастих носећих структура, бродова, ваздухоплова, посуда и цевовода под притиском и машинских елемената, [64]. Неки од њих су последица лоших конструкцијских и технолошких решења, али су узрок великог броја несрећа биле скривене грешке у материјалу које су током експлоатације прерасле у макро прслину.

Да би се схватили разлози појаве проблема треба детаљно анализирати дијаграм на сл. 4.8, [64], на коме су упоређена два челика с обзиром на "осетљивост према зарезу". Челик А је материјал високе чврстоће, док је други челик В слабијег квалитета и ниже затезне чврстоће, али више жилавости лома K_{Ic}(B) > K_{Ic}(A), [64].



Слика 4.8. Избор материјала на основу жилавости лома

Дијаграм на сл. 4.8, који показује осетљивост материјала према постојећим грешкама (као што је она означена тачком Р која указује да је у извесним ситуацијама заиста опасно применити челик високе чврстоће). Претпоставимо да је номинални радни напон опот знатно нижи од затезне чврстоће оба разматрана челика.

Претпоставимо такође да материјал од кога је део израђен има неку малу почетну грешку, која се у радним условима може стабилно развијати због замора материјала или због утицаја напонске корозије. Означимо првобитну величину те почетне грешке са a^* . Са сл. 4.8 се види да тачка Р, која одговара a^* одређује стварни напон при коме ће доћи до лома конструкције, што може да се деси и при номиналном напону σ_{nom} знатно нижем од затезне чврстоће оба разматрана материјала. Очигледан је закључак да услов означен тачком Р може да се појави у раду конструкције и да ће при том доћи до лома конструкције израђене од челика А, док ће конструкција од челика В остати неоштећена.

Можемо рећи да пројектовање засновано на класичним критеријумима сигурности, који укључују концепцију допуштених напона и степене сигурности различитих врста, није довољно поуздано да обезбеди конструкцијску целину делова. Посебно, овај недостатак може бити одлучујући, ако током експлоатације дође до појаве неког (или свих) утицаја:

- > примена заварене конструкције са заосталим напоном непознате величине;
- ниска радна температура или велика брзина деловања оптерећења (нпр, ударно оптерећење);
- ▶ велике димензије делова, и
- > променљиво (заморно) оптерећење или агресивна средина.
- Пројектант који жели да реализује поуздану конструкцију примениће поставке механике лома при:
- > процени века конструкције, пре пуштања у рад и у току експлоатације;
- > одређивању заосталих напона;
- избору материјала, и
- > оптимизацији конструкције.

Главни узрок лома код великог броја конструкција је настанак и ширење прелина као последице грешке или друге несавршености у материјалу. Развој ових прелина је проузрокован деловањем статичких и динамичких оптерећења, а у великом броју случајева олакшан и атмосферским утицајима (температура, влажност, корозиона средина). Из искустава добијених испитивањем авионских конструкција уочено је да је време потребно за настанак прслине релативно кратко у односу на време потребно за ширење прслине до лома. Из тог разлога се и преостали век конструкције процењује на основу времена потребног за ширење прслине које износи око 95% века, [43]. Дакле, уобичајено је да се читав процес акумулације оштећења посматра као процес ширења прслине, и да се време за њен настанак не троши. Испитивања показују да је овакав приступ довољно конзервативан да би био прихватљив. При пројектовању конструкција мора се узети у обзир и чврстоћа и трајност делова који садрже посебно грешку типа прслине као најопаснију грешку. Трајност делова конструкције зависи од брзине ширења прслине, односно брзине смањења носивости као последице докритичног развоја прслине. Схематски приказ развоја грешке у зависности од времена и смањења преостале чврстоће дат је на сл. 4.9, [64].

Грешка достиже критичну величину " a_{cr} " после одређеног критичног временског периода, после тог времена носивост дела постаје мања од пројектованог оптерећења, тако да долази до изненадног и превременог отказа конструкције односно катастрофалног лома. Да би се обезбедила сигурност конструкције, пројектовање је потребно извршити према специфичним захтевима у погледу грешке тако да се никад не дозвољава развој почетне грешке до њене критичне величине (дужине), јер би се у том случају смањило пројектно гранично оптерећење испод прописаног нивоа (F_{min}) у току радног века конструкције. На век конструкције утиче читав низ различитих фактора као што су: максимални и радни напон, учесталост оптерећења, заостали напони, чврстоћа материјала, величина прелине, облик прслине, брзина развоја прслине, утицај радне средине, итд.



Слика 4.9. Шематски приказ развоја прслине при повећању оштећења и смањењу преостале чврстоће

При предвиђању преосталог века конструкције полази се од претпоставке да прелина већ постоји или да је настала у почетном периоду века конструкције. Поступак предвиђања је приказан на сл. 4.10, [64], и обухвата следеће фазе:

- 1. Геометрија: Улазни податак за анализу напона је одређивање геометрије конструкције која се истражује (пројектује).
- 2. Утврђивање грешака: Применом испитивања без разарања утврђује се присутство, величина и облик грешке у различитим фазама развоја као и одређивање критичног положаја у посматраном делу. Напомена: Може се утврдити само присуство грешака већих од прага осетљивости методе.
- Оптерећење: Потребно је одредити тачну вредност радних оптерећења као и све промене радног оптерећења. Напомена: Радно оптерећење није могуће измерити, већ се прерачунава из других параметара (нпр. деформације).
- 4. Околна средина: Дефинисање утицаја радне средине на конструкцију (температура, влажност, корозиона дејства).
- Особине материјала: Одређивање жилавости лома и развоја прслине у условима радне средине и радног оптерећења.
- 6. Предвиђање радног века конструкције: Радни век се може предвидети на основу анализе напона и закона развоја прслине, а тиме се добијају подаци о веку при утицају замора и интервалима инспекције у преосталом веку.



Слика 4.10. Предвиђање века конструкције и преостале чврстоће

Преостала чврстоћа конструкције са прслином зависи од различитих фактора као што су: металуршке особине, претпоставке при анализи, услови оптерећења. За тачно одређивање чврстоће потребно је пажљиво дефинисати значај различитих фактора и њихов утицај на преосталу чврстоћу. Један од најважнијих фактора при одређивању преостале чврстоће је избор погодног критеријума за појаву лома. Различити аутори (истраживачи) су предложили више критеријума за појаву лома, [58]. Најчешће примењивани критеријуми за појаву лома се заснивају на одређивању жилавости лома при равном стању напона "К_с", померању отвора прслине "б" или COD (crack opening displacement), густина енергије деформације W, анализа J-интеграла, [58].

Ирвин, [65], је предложио да се утицај пластичне зоне узме у обзир увођењем у анализу ефективне величине прслине једнаке физичкој величини прслине повећаној за једну половину величине пластичне зоне.

Велс, [66], је предложио критеријум за појаву лома заснован на коначном померању "δ" отвора врха прслине. Претпоставља се да почетак лома настаје када отварање прслине достигне критичну вредност "δ_c", независно од дужине прслине.

Крафт и сарадници, [67], су први предложили критеријуме засноване на концептима отпора развоју прелине, "К_г". Они су пошли од тога да ће се прелина развијати стабилно ако је повећање отпора са повећањем прелине веће од повећања делујућег интензитета напона.

Механика лома омогућује да се добије квантитативни одговор на специфичне проблеме сигурности конструкција са прелином. Те прелине, без обзира како су се појавиле, могу да расту током експлоатације, при чему брзина њиховог раста зависи од многих фактора као што су величина и тип оптерећења, комбинација материјал-окружење, величина и облик тела са прелином. Са порастом прелине повећава се интензитет напона на њеном врху што узрокује њен још бржи раст. Преостала чврстоћа конструкције σ_c , која је приказана зависношћу напона лома од дужине прелине, прогресивно опада са растом прелине (сл. 4.9).

Након одређеног времена преостала чврстоћа постаје толико мала да компонента у експлоатацији може да откаже и при нормалним радним оптерећењима. Ово наводи на закључак да конструкција може имати само ограничен век експлоатације, а да конструктор, полазећи од те чињенице, треба да понуди решења која ће вероватноћу појаве лома свести на прихватљиво низак ниво.

У том смислу треба одговорити на следећа питања:

- Колика је преостала носивост конструкције у функцији дужине прслине?
- Која се величина прслине може толерисати при очекиваним радним оптерећењима, тј. колика је максимално дозвољена дужина прслине а_d?
- Колики је радни век конструкције када се претпостави да у њој већ постоји прелина?
- Колико ће дуго трајати раст прслине од почетне величине, нпр. од оне најмање која се може открити, до највеће дозвољене величине прслине?
- Колико често конструкција мора бити подвргута инспекцији и утврђивању величине прслине како би се могла благовремено извршити замена, поправка или заустављане експлоатације?

У овом тренутку концепти механике лома поседују методе које могу дати квантитативне и довољно прецизне одговоре на постављена питања. То практично значи да је механика лома омогућила увођење нових концепција у пројектовању, као и у производњи, развоју, примени нових материјала као што су композитни, синтеровани и керамички материјали, а пре свега код заварених спојева. Истовремено, могућност процене опасности од грешке типа прслине одређене величине и положаја, коју је отворила механика лома, дозвољава да се и структуре са грешкама, уз одређена ограничења, пусте у експлоатацију.

4.1.2. Основне дефиниције механике лома

4.1.2.1 Основни облици образовања површине прелома

Под прслином се начелно подразумева шупљина у телу образована без уклањања материјала и ограничена са две наспрамне површине (лица) чије је растојање неупоредиво мање од димензија њене површине, [68]. Заједничка контурна линија површине прслине назива се чело (фронт) прслине, сл. 4.11, [68]. Како су стварне прслине најчешће неправилне по облику, на сл. 4.11 су дати најкарактеристичнији облици раванске прслине идеализованог чела који се усвајају при теоријским разматрањима. Тако се нпр. чело средишње пролазне прслине (сл. 4.11а) идеализује као права линија, површинске прелине као полуелипса (сл. 4.11б), а чело скривене (унутрашње) прелине као елипса (сл. 4.11в).



Слика 4.11. Основни појавни облици раванске прслине а) пролазна, б) полуелиптична, в) елиптична

Раздвојене површине прслине представљају неоптерећене границе напрегнутог тела, и због тога расподела напона у близини врха прслине зависи од облика образовања површине прелома. Ирвин је показао да постоје три основна облика померања једне површине прслине ка другој и да се њима описује понашање прслина у свим напонским стањима. На сл. 4.12 приказани су основни облици померања који обухвата врх прслине, [68].



Слика 4.12. Основни облици развоја прслине и образовања површине прелома

Облици померања врха прслине, која лежи у X-Z равни, могу се описати на следећи начин:

І облик-развој прслине цепањем (сл. 4.12а) одређен је померањем површина прслине тако да се оне отварају симетрично у односу на првобитну раван прслине.

- ІІ облик-развој прслине клизањем (сл. 4.12б) се односи на локалну деформацију при којој једна површина клизи по другој у истој равни, али у супротним смеровима.
- ІІІ облик-развој прслине смицањем (сл. 4.12в) представља случај локалне деформације, при којој се површине смичу једна по другој дуж чела прслине тако да тачке материјала, које су пре развоја прслине биле у истој вертикалној равни, после развоја прслине се распоређују по различитим вертикалним равнима (тзв. неравни развој прслине).

Најопаснији ломови настају при развоју прелине цепањем (облик I). Из тог разлога овај тип ломова је и највише проучаван, и за тај облик развоја лома дефинисано је и одређивање фактора интензитета напона.

4.1.2.2 Фактор интензитета напона

Фактор интензитета напона одређује величину компоненти напона при неравномерној расподели напона, [69]. Ваља напоменути да се сви облици развоја прслине (I, II, III) могу сврстати у раван проблем Теорије еластичности, јер припадају било равној деформацији или генералисаном равном стању напона. Оба ова проблема решавају се истим математичким поступком. На сл. 4.13 приказане су компоненте напона у близини врха прслине у просторном систему правоуглих координата, [69].



Слика 4.13. Компоненте напона испред чела прслине у просторном систему правоуглих координата

Зависност компоненти напона σ_x , σ_y , σ_3 као и τ_{xy} могу се изразити у облику:

$$\sigma_{x} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \cdots$$

$$\sigma_{y} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \cdots$$

$$\sigma_{z} = \begin{cases} \nu (\sigma_{x} + \sigma_{y}) - RSD \\ 0 - RSN \end{cases}$$

$$\tau_{xy} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{2\theta}{2} + \cdots$$

$$(4.1)$$

Ови изрази који описују компоненте поља напона испред чела прслине за r<<a, у изотропном линеарно-еластичном материјалу, се могу изразити у тензорском облику:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + \cdots$$
(4.2)

где је: $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ - фактор интензитета напона, и

f_{ij}(θ) - функција угла.

Ово је познати Вестеградов модел (приступ), [70], који омогућује повезивање поља напона локализованог око чела (врха) прелине са глобалним граничним условима.

На основу једначине 4.2 се може уочити да ће напони на врху прслине тежити бесконачности када г \rightarrow 0 и да су они производи геометријског члана $\frac{1}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta)$ і фактора $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$, који је једноставна функција удаљеног напона σ и дужине прслине **a**. Отуда фактор $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ одређује величину сингуларитета еластичних напона у пољу око чела (врха) прслине. Овај фактор, назван фактор интензитета напона за тип I тј. отварање прслине има облик:

$$K_I = C \cdot \sigma \sqrt{a} \tag{4.3}$$

и изражава се у MN m^{-3/2} или MPa m^{1/2}. Константа C (геометријски фактор) за двоосни случај затезања износи C = $\pi^{1/2}$. Треба истаћи да је историјски резултат у облику једначине први добио Грифит, [69]. Међутим, он га је извео на потпуно

различит начин, посматрајући енергију еластичне деформације коју садржи неограничена средина, која окружује елиптичну грешку са занемарујуће малом мањом осом. Слично је и за облик II и III.

4.1.3. Примена параметара механике лома на употребну спремност заварених спојева

Механика лома је теоријским и експерименталним анализама понашања тела са прелином отворила нове могућности у обезбеђењу сигурности конструкција. Развој стандарда за одређивање жилавости лома при равној деформацији, К_{Iс} омогућио је примену линеарно-еластичне механике лома на реалне конструкције, израђене од материјала високе чврстоће. Услов важења тих испитивања је да је развијена само мала зона пластичне деформације око врха прелине пре него што дође до развоја прелине и лома.

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:

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \tag{4.4}$$

где је: Ү бездимензиони фактор геометрије, о удаљени напон, *а* дужина прслине.

Отпорност материјала на нестабилни раст прслине се у оквиру линеарно еластичне механике лома представља критичном вредношћу фактора интензитета напона у условима равног стања деформације, К_{Iс}, 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 E399, [71].

Када је позната вредност жилавости лома и фактора интензитета напона може да се дефинише услов за нестабилни раст прслине:

 $K \ge K_{Ic} \tag{4.5}$

на основу кога се одређује критична дужина прелине a_c , ако се знају жилавост лома, удаљени напон σ и фактор геометрије Y, или се одређује потребна жилавост лома (избор материјала) ако се знају дужина прелине a, удаљени напон σ и фактор

геометрије Y. Услов нестабилног раста прелине, једначина 4.5, може да се користи и као критеријум за одређивање дозвољеног оптерећења (представљеног напоном σ), ако се знају дужина прелине *a*, жилавост лома и фактор геометрије Y.

Директно одређивање жилавости лома К_{Iс} и његова примена су ограничени само на материјале високе чврстоће, јер је код већине конструкцијских материјала око врха прслине развијена велика зона пластичне деформације. Због тога су анализом пластичног понашања материјала са прслином, којом се бави еластопластична механика лома, уведена још следећа два параметра:

 \blacktriangleright отварање врха прслине СТОD (δ), и

▹ контурни (J) интеграл, независан од путање интеграције.

У линеарно-еластичној области, када су испуњени услови равне деформације, ова два параметра представљају критичне величине (δ_{Ic} и J_{Ic}) и директно су повезани са величином К_{Ic}. Погодност примене параметара δ и J је у могућности њихове анализе и после развоја значајних пластичних деформација, са једне стране, као и у погодности њиховог стандардима прописаног експерименталног одређивања, с друге стране.

Прве предлоге стандарда за одређивање жилавости лома при равној деформацији су објавили Америчко друштво за испитивање и материјале (American Society for Testing and Materials-ASTM)-ASTM E399-70T, и Британска институција за стандарде (British Standard Institution-BSI)-DD 3. Ови су предлози прихваћени под насловом:

- ASTM E399:70 "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials" (Испитивања жилавости лома при равној деформацији металних материјала), [71], и
- BSI DD3:71 "Method for Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} Testing" (Метода одређивања жилавости лома при равној деформацији K_{Ic}), [72].

Стандард ASTM E399 је био кључни стандард, који је омогућио израду и усвајање читавог низа стандарда који су дефинисали методе одређивања параметара линеарно-еластичне механике лома и параметара еласто-пластичне механике лома. Коришћени су:

- ASTM E813 "Standard Test Method for J_{Ic}, A Measure of Fracture Toughness" (Стандардни поступак испитивања J_{Ic}, мере жилавости лома), [73]. Повучен из употребе је 1997. год.
- ASTM E1152 "Standard Test Method for Determining J-R Curve" (Стандардни поступак испитивања за одређивање J-R криве), [74]. Повучен из употребе је 1997. год.
- ASTM E1290 "Standard Test Method for Crack Тір Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement" (Стандардни поступак испитивања жилавости лома мерењем отварања врха прслине - СТОD), [75]. Повучен из употребе је 2013. год.
- ASTM E1737 "Standard Test Method for J Integral Characterization of Fracture Toughness" (Стандардни поступак испитивања за одређивање жилавости лома помоћу Ј интеграла), [76]. Овај стандард је објединио два стандарда (Е 813 и Е 1152), који су у највећем делу подударни, а на основу искуства из њихове примене у проширено подручје примене Ј интеграла у карактеризацији материјала. Повучен из употребе је 2008. год.

Што се тиче ASTM стандарда, данас су важећи и у употреби:

- ASTM E399:2020 "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials" (Стандардни поступак испитивања Линеарноеластичне жилавости лома при равној деформацији металних материјала), [77],
- ASTM E1820:2020 "Standard Test Method for Measurement Fracture Toughness" (Стандардна поступак мерења жилавости лома), [78]. Овај стандард је објединио стандарде E399, E1290 и E1737.

Слични приступ је усвојен и у Британским стандардима, па је у BS 7448 – "Fracture mechanics toughness tests", [79], дефинисано испитивање жилавости лома, односно у његовом првом делу, "Methods for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials", обједињени су поступци за одређивање K_{Ic} , критичног CTOD и критичне J вредности металних материјала. У другом делу "BS 7448 - Methods for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials," [80], који је објављен 1997. године, прописује се поступак испитивања механике лома заварених спојева.

Данас су важећи европски стандарди:

- EN ISO 12135:2016 "Metallic Materials. Unified Method of test for the determination of quasistatic Fracture Toughness" (Метални материјали -Обједињена метода испитивања при одређивању квазистатичке жилавости лома), [81], и
- EN ISO 15653:2018 "Metallic Materials. Method of test for the determination of quasistatic Fracture Toughness of weld" (Метални материјали - Метода испитивања при одређивању квазистатичке жилавости лома заварених спојева), [82].

Први стандарди на подручју бивше Југославије као JUS стандарди, предложени су знатно касније, око 1990. године. То су стандарди:

- JUS C.A4.083 "Механичка испитивања материјала. Основни појмови и величине у механици лома", [83], и
- JUS C.A4.084 "Механичка испитивања. Испитивање жилавости лома при равној деформацији (К_{Iс})", [84].
- > Данас су у Србији важећи:
- SRPS EN ISO 12135:2016 "Метални материјали Обједињена метода испитивања при одређивању квазистатичке жилавости лома", [81], и
- SRPS EN ISO 15653:2018 "Метални материјали Метода испитивања при одређивању квазистатичке жилавости лома заварених спојева", [82].

Користе се и сви активни међународни стандарди, ASTM E1820:2020 i BN EN ISO 15653:2018 стандарди. Тенденција обједињавања стандарда, заснована на истим облицима епрувете и сличном поступку испитивања, исказана је и у приступу који је прихваћен у Европи.

Оно што је за заварене спојеве од посебног значаја, је опште прихваћено мишљење да је присуство прслина и других грешака могуће, па чак и неизбежно. Одатле и потиче велики интерес да се параметри механике лома примене на заварене спојеве и конструкције. Међутим, постоје два значајна проблема у примени параметара механике лома при анализи понашања заварених спојева, [85]:

 Ограничена могућност откривања грешака у погледу њихове величине и положаја, и Хетерогеност микроструктуре, сл. 4.14, [88] и механичких особина завареног споја.

Према томе, процена сигурности заварених спојева није довољно поуздана, јер нема довољно података о грешкама, а није извесно како ће се прслина развијати пролазећи кроз различите структуре завареног споја. Због тога је један од значајних проблема у испитивању узорака са прслином из завареног споја локација врха прслине, [86, 87].

С обзиром на различите механичке особине, јасно је да ће услови раста прслине, чији је врх у различитим областима завареног споја, бити различити. Ове тешкоће нису препрека експерименталном одређивању жилавости лома у критичним зонама завареног споја или завареног споја као целине, али се тешкоће појављују приликом тумачења измерених вредности, [87].





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. Међу бројним облицима који су у различитим истраживањима коришћени, најширу примену су нашле епрувете за савијање у три тачке, сл. 4.15, и компактне епрувете за затезање, сл. 4.16, [81]. 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 (KIc, δ, J). Компактна епрувета за затезање омогућава значајну уштеду материјала у поређењу са другим облицима епрувета, као и сразмерно мању силу за испитивање.



Слика 4.15. Епрувета за савијање у три тачке



Слика 4.16. Компактна епрувета за затезање

Испитивање епрувета са прслином показује локално понашање материјала око врха прслине довољно хомогеног материјала епрувете, тако да се резултати локалног понашања могу третирати глобално, односно да се могу непосредно пренети на одговарајућу конструкцију. Имајући у виду хетерогену структуру са сл. 4.14, овакав поступак испитивања није довољно поуздан, јер врх прслине при развоју лома може да пролази кроз подручја различитих структура и механичких особина завареног споја. Због тога је потребна анализа завареног споја са аспекта примене механике лома.

Сложеност у микроструктурном и геометријском погледу при одређивању жилавости лома и других механичких особина у ЗУТ илуструје сл. 4.17, на којој је приказан нисколегирани, термомеханички обрађени челик повишене чврстоће у вишепролазном шаву. По правилу, код спојева ових челика се у ЗУТ под дејством поновљених термичких циклуса и пластичних деформација, у узаном појасу ЗУТ уз линију стапања појављују места смањене жилавости лома (места A и E на сл. 4.17), [89].

Када је у питању препорука да се при директном одређивању жилавости лома у критичној зони споја узме најнижа измерена вредност, сл. 4.17 илуструје низ тешкоћа са којима је овакво одређивање повезано. Када је, као код челика, ЗУТ критично подручје у коме се најчешће појављују прслине, његова величина од 2-3mm у основном металу уз линију стапања указује на експерименталне тешкоће постављања врха почетне заморне прслине на критично место. Практична истраживачка искуства показују да је и уз најбрижљивији рад потребно испитати десетине узорака да би се успешно лоцирао врх прслине у милиметарски узана критична подручја и поуздано одредиле стварне минималне вредности жилавости лома у ЗУТ, што другим речима ограничава степен искоришћења на највише 10-20% испитаних узорака, [90].



Слика 4.17. Пресек кроз ЗУТ шава нисколегираног челика повишене

чврстоће

Следећа тешкоћа у одређивању жилавости лома је траг раста заморне прслине, чији је врх лоциран у ЗУТ (подручје А на сл. 4.17), јер она ће продирати у подручја ЗУТ различитих микроструктурних и механичких карактеристика. Различите карактеристике у односу на раван раста прслине резултирају у асиметричном формирању пластичне зоне испред врха прслине. Имајући још у виду да стварне вредности неких механичких особина, нпр. напона течења, не могу директно да се одреде за уско крто подручје А и Е у ЗУТ, очигледно је да су нарушени услови за одређивање вредности параметара механике лома по поступцима за хомогене материјале.

Због описаних ограничења различите методе механике лома нису подједнако применљиве за одређивање најниже вредности жилавости лома у завареном споју. Ако се има у виду да је проблем постављања врха заморне прслине на критично место у ЗУТ заједнички за све методе, онда би критеријум за оцену применљивости појединих метода могао да буде њихова способност да мере жилавост лома непосредно испред врха прслине, независно од утицаја материјала на већим растојањима од тзв. процесне зоне на врху прслине. У том погледу је К_{Iс}, као линеарно-еластични показатељ жилавости лома, у предности, јер су услови ограничене пластичне зоне при његовом одређивању оштрији него код еластопластичних показатеља. У реалним ситуацијама, при испитивању шавова, ови оштри услови ретко могу да се испуне, зато што је у питању најчешће челик релативно високе жилавости лома. Контрола величине пластичне зоне повећањем димензија узорка је тешко остварљива, прво зато што би код мекших челика дебљина узорка била вишеструко већа од дебљине конструкцијских елемената, а затим што се код узорака исечених из шавова са повећањем димензија додатно компликује постављање врха прслине у критичну зону.

Како је напред речено, 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 особина, нарочито затезне чврстоће, податак за заварени спој као целину мора да се прихвати као меродавнији за заварену конструкцију него појединачни резултат било за МШ или за основни метал.

Велики интерес за примену испитивања механике лома заварених спојева је већ у почетку наишао на ограничења што се тиче цене испитивања и броја епрувета које треба испитати. Пре свега, према већ наведеној анализи треба испитати бар 10 епрувета механике лома да би се одредио неки од параметара механике лома завареног споја. Овако скупа испитивања ће у многим случајевима бити економски оправдана ако доприносе сигурности конструкције или повећању века, имајући при том у виду да се више од половине укупно произведеног челика у свету уграђује у заварене конструкције, [91]. Треба имати у виду да испитивања механике лома подразумевају познавање механичких особина. Када су у питању заварени спојеви често недостаје поуздан податак о величини напона течења, који је према стандардима за испитивање параметара механике лома један од основних упоредних параметара механичких особина.

И поред свих тешкоћа и недоумица, примена механике лома на испитивање заварених спојева је све шира. Разлог је, пре свега, у бољем и потпунијем разумевању понашања завареног споја са прслином на основу анализе података добијених у тим испитивањима. Стандард EN ISO 15653:2018, [82], предвиђа примену сва три параметра (К_{Iс}, СТОД, Ј- интеграл) за карактеризацију отпорности завареног споја према настајању и расту прслине, и прописује случајеве у којима је сваки од њих меродаван. Упрошћена процедура поступка испитивања према стандарду EN ISO 15653:2018, дата је шематски на сл. 4.18, [82].

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

- Зарез треба поставити тако да раван заморне прелине 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 МШ, у линију стапања или у ЗУТ.



Слика 4.18. Схематски приказ процедура испитивања механике лома код заварених спојева према EN ISO 15653:2018

За утврђивање погодности избора додатног материјала испитује се МШ. Схема вађења епрувета са зарезом и заморном прслином у МШ је дата на сл. 4.19, [82].





Епрувете за одређивање параметара механике лома се израђују из придружених проби, израђених на исти начин као и стварни производ. За плоче мање дебљине од 50mm користе се епрувете пуне дебљине. Отпорност према развоју прслине у МШ и ЗУТ испитује се на епруветама са зарезом и заморном прслином, што је схематски приказано на сл. 4.20 и сл. 4.21, [87].

Шема положаја зареза	Правац	Геометрија епрувете	Место зареза
B	NP	В х В или В х 2В	МШ - дуж централне линије
M	NQ	B x B	МШ - из корена дуж централне линије
B	NP	В х В или В х 2В	ЗУТ- зарез у линији стапања на половини дебљине
Buter	NP	В х В или В х 2В	ЗУТ- зарез у линији стапања на четвртини дебљине
	PQ	B x B	Попречно у МШ
	PN	B x B	Попречно у МШ дуж централне линије

Слика 4.20. Положај зареза у епруветама механике лома за испитивање

завареног споја

Шема положаја зареза	Правац	Геометрија епрувете	Место зареза
Ŵ	NQ	B x B	Управно на МШ дуж централне линије
M Revenue of the second	NQ	B x B	У првом завару корена МШ
	NQ	B x B	Крупнозрна структура ЗУТ уз МШ
m A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	NP	В х В или В х 2В	Кроз највећу запремину МШ дуж споја
	NP	В х В или В х 2В	Управно на највећуу запремину МШ
	NP	В х В или В х 2В за узорке дебље од 50 mm	Најмање 15% чела прслине у крупнозрној структури ЗУТ
	NP	В х В или В х 2В	ZUT – 5mm од линије стапања



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 1,5-2,5mm.

4.2. Анализа замора са становишта механике лома

Раст прслине под утицајем променљивих оптерећења која су мања од оптерећења квазистатичког лома назива се замор материјала. Највећи број оштећења и испада из погона делова и конструкција током експлоатације се догађа као последица замора. У низу ситуација оштећења се могу приписати стању материјала, али су многа оштећења последица лоших конструкцијских решења, а најчешће лоших заварених спојева, [92]. То значи да склоност ка замору дела машине или конструкције или завареног споја, не зависи само од издржљлвости на замор материјала од којег је део израђен већ и од његове геометрије. Према томе, када се као задатак поставља повећање издржљивости неке машине или конструкције на замор треба имати у виду да само избор издржљивијег материјала од којих су делови направљени није довољан, а често је и неефикасан и да нова конструкцијска решења престављају бољу алтернативу.

Грешке у металима и разни облици концентратора напрезања (зарези, жлебови, отвори, заварени и механички спојеви) у елементима се не могу избећи. Због тога се период до иницирања заморне прслине N_i, са становишта укупног века замора до појаве лома N_u, може занемарити. С обзиром да се на брзину раста макроскопске прслине не може утицати променом структуре, то преостаје да се за дати материјал епрувете или елемента одреди брзина раста прслине у лабораторијским условима и да се, након што се повременим инспекцијама одреди величина прслине, процени преостали век дела машине или конструкције. Могућност за ову процену пружају поставке линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ).

4.2.1. Концепт линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ)

Концепт ЛЕМЛ се може применити и за одређивање раста прслине при замору, [93]. Теоријска потврда је базирана на такозваном концепту сличног понашања када су услови на врху прслине једнозначно дефинисани само преко једног параметра оптерећења као што је фактор интензитета напона К. За случај стационарне прслине то значи да ће до лома две различите конфигурације од истог материјала доћи при истој, критичној, вредности К-фактора, К_с. Под одређеним условима се К-фактор може применити и за описивање раста прслине услед замора.

Као пример ће се размотрити раст прелине при константној вредности опсега К-фактора, Δ К, као на сл. 4.22а, [94]. Овај тип оптерећења је само академског значаја јер се у експлоатационим условима не појављује. Он је међутим интересантан при експерименталним испитивањима и могуће га је остварити на компјутерски управљаним пулзаторима. Треба уочити да непроменљивост опсега Δ К током раста прелине не значи и непроменљивост оптерећења F(P) или померања V_P. Напротив, да би се то остварило оптерећење мора да се по одређеној законитости смањује током раста прелине.


Слика 4.22. Начелно линеарни раст прслине *a* - N, t при константном опсегу ΔK= const и условима ограниченог течење r_p^c << R_k

Како сваки циклус замора формира одговарајућу пластичну зону испред врха прелине $r_p^c(\theta)$ то са растом прелине иза њеног врха остаје појас пластично деформисаног материјала (сл. 4.22b). Уколико је пластична зона $r_p^c(\theta)$ истовремено и унутар К-доминантне зоне сингуларитета R_K, испуњен је услов мале зоне течења $r_p^c(\theta) < R_K$ па вредност К-фактора за разматрани циклус замора на јединствен начин описује поље напона на врху текуће прелине. Следи да се брзина раста прелине da/dN може изразити у облику:

где је:
$$\Delta K = K_{\text{max}} - K_{\text{min}}$$
, опсег К-фактора, и (4.6)

R=K_{max}/K_{min}, његов однос.

Како величина пластичне зоне зависи само од K_{max} i K_{min} следи да претходни израз имплицитно узима у обзир утицај пластичне зоне и пратећег пластичног појаса на брзину раста прелине. Уколико пак K_{max} i K_{min} варирају током циклуса замора брзина раста за текући циклус може зависити и од нивоа оптерећења χ па се претходни израз може уопштити и приказати у облику:

$$\frac{da}{dN} = f_2(\Delta K, R, \chi) \tag{4.7}$$

Теба нагласити да утицај различитих оптерећења на раст прслине da/dN искључује применљивост концепта сличног понашања. Наиме, две конфигурације од истог материјала изложене замору са истим вредностима ΔК и R ће показати исту брзину раста прслине da/dN само уколико су и нивои претходних оптерећења идентични.

Раст прелине при замору је веома сложен процес који зависи од низа променљивих као што су:

- ▶ интензитет ефективног поља напона на врху прслине дефинисан К-фактором;
- ▶ тип и облик оптерећења;
- > радна средина (агресивност, температура, влажност), и
- механичке и металуршке карактеристике метала.

Потреба да се механика лома уведе у проучавање заморног понашања проистекла је из анализе раста прслине при цикличном оптерећењу. На сл. 4.23, [95], је приказана промена дужине прслине, **a**, са бројем циклса, N, за три нивоа горњег напона σ_{r} ($\Delta\sigma_1 > \Delta\sigma_2 > \Delta\sigma_3$) при доњем напону $\sigma_d=0$, при чему је свака епрувета имала исту почетну дужину прслине a₀.

Уочљиво је да се са повећањем броја циклуса N и дужине прслине **a** брзина раста прслине дефинисана нагибом тангенте, стално расте. Такође са повећањем опсега напона $\Delta \sigma$ долази и до бржег повећања градијента брзине. Другим речима прслина на пример дужине **a**₁ на сл. 4.23 брже расте при амплитуди напона $\Delta \sigma_1$ него при $\Delta \sigma_2$ односно $\Delta \sigma_3$.



Слика 4.23. Зависност дужине заморне прслине од броја циклуса

У литератури се могу наћи бројне теоријски и емпиријски дефинисане зависности у облику da/dN = f(F, a), којима се наглашава важност оптерећења и дужине прслине. Први који су као основни параметар који контролише брзину раста заморне прслине дефинисали опсег фактора интензитета напона $\Delta K = f(\sigma, a)$ у облику

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = Y(\sigma_{max} - \sigma_{min})(\pi a)^{1/2} = Y \Delta \sigma(\pi a)^{1/2}$$
(4.8)

били су Парис и сарадници, [93, 94]. Уколико је при томе $\sigma_{min} < 0$, усваја се да је $K_{min} = 0$, јер К-фактор не егзистира за напоне на притисак.

Брзине раста прслине da/dN у функцији од ΔК се одређују са одговарајуће криве а - N,t графичким или нумеричким поступком. Експериментални резултати представљени на двоструко-логаритамској скали најчешће имају карактеристичан S-облик, схематски приказан на сл. 4.24, [93].



Слика 4.24. Начелни облик промене брзине раста da/dN = f(∆K) za R = 0 и правци померања S-криве за односе R≠0

Са становишта механизма раста прелине и различитих интензитета утицајних фактора могу се уочити три области на овој кривој. У области I са смањењем ΔK долази до наглог смањења брзине раста прелине. Вредност ΔK , при којој су те брзине реда 10^{-10} m/ciklusa или мање дефинише праг осетљивости опсега фактора

интензитета напона-праг замора, ΔK_{th}, [96]. Испод ΔK_{th} заморне прелине се понашају као прелине без тенденције пораста.

У области II зависност log(da/dN) од log ΔК је у основи линеарна и представљена правом линијом коју су Парис и сарадници, [93], описали степеном функцијом облика:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left(\Delta K\right)^m \tag{4.9}$$

У оквиру области III долази до наглог раста прелине пре коначног лома. Та привидна нестабилност је повезана са приближавањем максималне вредности Кфактора, К_{max}, критичној вредности жилавости лома К_{Ic}, за дати материјал, што је повезано са раном фазом кртог лома. Ова могућност је изражена код материјала високе чврстоће, а мале жилавости лома, где димензије епрувета за затезање омогућавају линеарно-еластично понашање и при нивоима К-фактора блиским жилавости лома при равној деформацији К_{Ic}.

Примена Парисове једначине се показала нарочито плодоносном у подручју замора МШ и заварених конструкција. За разлику од хомогених материјала и од њих израђених делова, код којих број циклуса потребан за стварање заморне прслине доминантно учествује у укупном броју циклуса до лома, код шавова је убрзо након формулисања Парисове једначине запажено да је укупан број циклуса до лома углавном одређен растом заморне прслине. Провере које су уследиле су потврдиле, да број циклуса потребан за иницијацију прслине код разних врста шавова и материјала не прелази 25% од укупног броја циклуса до лома, [96]. Разлог за ово лежи у геометријској нехомогености шавова и у постојању, посебно на прелазу између надвишења и основног метала, довољно ситних површинских неравнина у виду интрузија или укључака троске дубине не веће од 0,02-0,04mm, на којима због концентрације напона долази до брзог стварања почетне заморне прслине, [96].

На основу досадашње анализе утицајних фактора на раст заморне прелине види се да поред опсега ΔK , као најутицајнијег, на брзину раста прелине утичу многи механички, геометријски и металуршки фактори и особине средине. Зато је немогуће дати у једноставном аналитичком облику све ове утицаје на раст прелине при замору. До сада је, међутим, изведен низ емпиријских, полуемпиријских или чисто теоријских модела за предвиђање брзине раста прслине, [97-99], али је карактеристично да сваки од њих задовољава у одређеној области ΔК и за одређене метале и услове испитивања.

Парисова једначина представљена изразом 4.9, где су С i m константе материјала, важи само у II области раста прелине (сл. 4.24), и само за једну вредност односа $R = K_{max}/K_{min}$. Како су линије брзине раста прелине у области II за различите вредности R приближно паралелне (сл. 4.25), [94], то ће и вредности коефицијента м бити исте, али ће се разликовати коефицијенти C, јер они зависе од односа R. Та зависност се може на једноставан начин приказати у облику:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_{\nu}}{(1-R)^{n_{\nu}}} \left(\Delta K\right)^{m_R} \tag{4.10}$$

где су коефицијнти C_v , і n_v , утврђени за однос R = 0.



Слика 4.25. Утицај односа напона R на дијаграм раста прслине

Једначину 4.10 је, заменом

$$\mathbf{K}_{\max}^{\mathbf{n}_{v}} = \left[\frac{\Delta \mathbf{K}}{\left(\mathbf{1} - \mathbf{R}\right)}\right]^{\mathbf{n}_{v}} \tag{4.11}$$

модификовао Вакер, [97], у облику:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \mathbf{C}_{\mathrm{v}} \cdot \Delta \mathbf{K}^{\mathrm{m}_{\mathrm{R}}-\mathrm{n}_{\mathrm{v}}} \cdot \mathbf{K}^{\mathrm{n}_{\mathrm{v}}}_{\mathrm{max}} = \mathbf{C}_{\mathrm{v}} \cdot \Delta \mathbf{K}^{\mathrm{m}_{\mathrm{v}}} \cdot \mathbf{K}^{\mathrm{n}_{\mathrm{v}}}_{\mathrm{max}}$$
(4.12)

где је $m_v = m_R - n_v$

Форман са сарадницима, [98], је предложио израз:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = \frac{\mathrm{C}_{\mathrm{F}}(\Delta \mathrm{K})^{\mathrm{m}_{\mathrm{F}}}}{(1-\mathrm{R})\cdot\mathrm{K}_{\mathrm{Ic}} - \Delta \mathrm{K}} = \frac{\mathrm{C}_{\mathrm{F}}(\Delta \mathrm{K})^{\mathrm{m}_{\mathrm{F}}-1}\mathrm{K}_{\mathrm{max}}}{\mathrm{K}_{\mathrm{Ic}} - \mathrm{K}_{\mathrm{max}}}$$
(4.13)

који поред односа R, укључује и утицај брзог лома када се K_{max}, приближава жилавости лома K_{Ic}. Овакво понашање је изражено код метала високе чврстоће, а ниске жилавости лома, где величине епрувета за испитивање брзине раста заморне прслине омогућавају линеарно-еластично понашање и при нивоима K-фактора блиским K_{Ic}. Клеснил и Лукас, [99], су укључили утицај односа R на понашање раста прслине близу прага ΔK_{th} (област I). Тај емпиријски модел, који важи и за област II има облик:

$$\frac{\mathrm{da}}{\mathrm{dN}} = C_{\mathrm{K}} \left[\frac{(\Delta \mathrm{K})^{\mathrm{m}_{\mathrm{K}}}}{(1-\mathrm{R})^{\gamma}} - \Delta \mathrm{K}_{\mathrm{th}}^{\mathrm{m}_{\mathrm{K}}} \right]$$
(4.14)

где су C_k и m_k константе материјала, а γ константа која зависи од система материјал-средина.

4.3. Процена интегритета конструкција

Примена ЛЕМЛ се заснива на фактору интензитета напона, К₁, који с једне стране представља оптерећење и геометрију конструкције, укључујући облик и величину прслине, а с друге стране, његова критична вредност, названа жилавост лома, К_{Iс}, представља својство материјала. На основу овог тумачења параметара ЛЕМЛ и енергетског критеријума Грифита, добијају се једноставне зависности којима се процењује интегритет конструкције:

 \succ $K_1 \leq K_{lc}$ - интегритет конструкције није угрожен, и

 \sim K_I > K_{Ic} - интегритет конструкције јесте угрожен јер је могућ крти лом.

Постоји неколико начина да се при процени интегритета конструкција узме у обзир пластичност материјала, који се сви своде на примену отварања врха прслине или Ј-интеграла, као меродавних параметара еласто-пластичне механике лома. Отварање врха прслине-СТОD, иако нема "чврсту" теоријску основу, има велику практичну примену, пре свега због једноставности одређивања. С друге стране, Јинтеграл, по правилу захтева компликованији поступак одређивања, али као енергетски параметар, теоријски утемељен у основним законима механике континиуума, има и подједнако важну практичну примену.

4.3.1. Пројектна СТОД крива

Користећи теоријску поставку Велса, [100], о линеарној зависности СТОD и удаљене деформације (напона) у области сразмерно великог течења (пластичности)-LSY (large scale yielding), и зависности између критичне вредности СТОD (δ_c) и деформације при лому широких плоча са две ивичне прслине (ε_f), добијене испитивањем у условима сразмерно малог течења, Бардекин и Стоун су дефинисали бездимензиони параметар Φ, [101]:

$$\Phi = \frac{\delta_{crit}}{2\pi\varepsilon_{y}a} = \left(\frac{\varepsilon_{f}}{\varepsilon_{y}}\right)^{2} \operatorname{za} \frac{\varepsilon_{f}}{\varepsilon_{y}} \le 0,5;$$

$$\Phi = \frac{\delta_{crit}}{2\pi\varepsilon_{y}a} = \frac{\varepsilon_{f}}{\varepsilon_{y}} - 0,25 \operatorname{za} \frac{\varepsilon_{f}}{\varepsilon_{y}} \ge 0,5$$
(4.15)

где је єу деформација течења.

Треба уочити да су изрази 4.15 аналогни, и да је при дефинисању бездимензионог параметра Ф такође коришћен фактор сигурности 2 због конзервативности приступа. Графички приказ пројектне СТОД криве, сл. 4.26, [101], омогућава њену једноставну примену.

Наиме, ако се за неку конструкцију добије тачка која лежи изнад пројектне криве, за њу се сматра да је сигурна од лома, јер је $\varepsilon \leq \varepsilon_y$, односно $\delta > \delta_c$. При томе се ордината тачке одређује на основу података о материјалу (δ_c , ε_y) и дужини прслине, a, а апсциса тачке на основу оптерећења, које се своди на деформацију ε :

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \left[k_t \left(P_m + P_b \right) + S \right] \tag{4.16}$$

где су: P_m і P_b - примарни мембрански и савојни напон, увећани коефицијентом концентрације напона к_t,

- S секундарни (заостали или термички) напон,
- Е модул еластичности.

Ако се не зна расподела секундарних напона, за S може да се усваји напон течења.



Слика 4.26. Пројектна СТОД крива

4.3.2. Дијаграми анализе лома

Конструкције направљене од жилавих материјала нису подложне кртом лому, али зато могу пластично да се сломе (колапс), ако су преоптерећене. Механизам пластичног колапса није обухваћен пројектном СТОД кривом, па је за његову анализу неопходан општији двопараметарски приступ, реализован преко дијаграма анализе лома (Failure Assessment Diagramme-FAD), односно граничне криве која се добије на основу модификованог модела траке течења за пролазну прслину у бесконачној плочи, [102]:

$$\frac{K_{eff}}{K_{I}} = \frac{\sigma_{c}}{\sigma} \left[\frac{8}{\pi^{2}} ln sec \left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_{c}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(4.17)

где је $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$, К_{eff} уведено уместо б и напон течења σ_Y замењен напоном колапса σ_c , као погоднијим критеријумом течења код реалних конструкција. Као

завршни корак, дефинишу се бездимензионе променљиве, $S_r = \sigma / \sigma_c$ і $K_r = K_l / K_{lc}$, при чему је усвојено да је K_{eff} једнако жилавости лома материјала, K_{Ic}, па јед. 4.17 постаје:

$$K_r = S_r \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec\left(\frac{\pi}{2} S_r\right) \right]^{-\frac{1}{2}}$$
(4.18)

Ако је материјал потпуно жилав, конструкција се ломи пластичним колапсом при C_r=1, док је за лом конструкције од потпуно кртог материјала K_r=1. У свим осталим случајевима постоји међудејство пластичног колапса и кртог лома, па су K_r и C_r мањи од 1, а парови одговарајућих вредности чине граничну криву, која је дефинисана јед. 4.18 и приказана на сл. 4.27, [85].



Слика 4.27. Дијаграм анализе лома

Напони потребни за одређивање K_r и C_r, раздвајају се на исти начин као код пројектне CTOD криве, на примарне и секундарне, а при одређивању C_r, узимају се само примарни напони, јер секундарни напони не утичу на колапс конструкције. Треба напоменути да примена FAD није ограничена на K, већ да на ординати могу да буду и J или δ, као и да постоје многобројне модификације овог дијаграма.

Битно је уочити да FAD омогућава једноставну аланизу интегритета која може поуздано да утврди да ли је нека компонента сигурна од лома, под условом да су геометрија и оптерећење представљени на конзервативан начин. С друге стране, ако не може да се докаже интегритет, то не значи да је компонента неупотребљива, већ да су потребне додатне, компликованије анализе, [85].

4.3.3. BS 7910 процедура

Првобитна PD 6493 процедура из 1980. године, [103], била је заснована на СТОD пројектној кривој. Ова методологија је имала неколико недостатака. На пример, једначина за силу раста прслине је била углавном емпиријска и имала променљив ниво конзервативности. Кориговане једначине за силу раста прслине постају доступне са R6 и EPRI процедурама, али је пројектна СТОD крива већ била широко прихваћена. Уследиле су модификације ове процедуре, и дошло се данас до коначне важеће процедуре ознаке BS 7910:2019 - "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures", [104], која је остала у кораку са прошлошћу (ниво I), а истовремено су уведена побољшања (нивои II и III). Заједничко за сва три нивоа BS 7910 су начин одређивања напонског стања и димензија прслина.

Када се за оцену интегритета приликом пријема нове конструкције или у току њене експлоатације користе поступци испитивања без разарања потребно је утврдити и ниво прихватљивости откривених прслина. За заварене спојеве за оцену нивоа прихватљивости прслина користи се концепт "погодности за употребу". По том концепту је заварени спој прихватљив за експлоатацију у предвиђеној намени, ако се не стекну услови за појаву лома, допуштајући у извесној мери додатно оштећење током експлоатације. Потребно је да се утврди разлика између прихватљивости на нивоу контроле квалитета и на основу погодности за употребу.

Нивои контроле квалитета су произвољни и обично конзервативни и од посебног су значаја за надзор квалитета завареног споја у производњи. Прслине допуштеног нивоа или мање на задатом нивоу контроле квалитета су према важећим стандардима прихватљиве без даљег разматрања. Ако се открију прслине, чија величина прелази ниво прописан контролом квалитета не треба аутоматски одбацити производ, већ треба одлучити на основу погодности за употребу да ли се спој може прихватити или поправити на основу документованог искуства са сличним материјалом, напонима и условима околине или на основу критичне инжењерске оцене (КИО), [104,105]. Појава прслина, чак и ако се на основу КИО оцени прихватљивом, указује на потребу да се квалитет побољша.

Примену КИО треба посебно уговорити, при чему треба утврдити значај прслине у завареном споју у реалним условима. Није могуће начинити списак прслина за које се оцењује да неће довести до превременог лома због тога што делује велики број утицајних фактора. Када постоји одговарајуће искуство и потребни подаци може се КИО изоставити и користити ранија оцена као основа за утврђивање граница прихватљивости. КИО може бити основа за одлагање извођења поправке за погодно време. Треба указати да незадовољавајућа поправка безначајне прслине може условити појаву значајне прслине, коју је тешко открити.

Оцена погодности за употребу конструкције са прслином подразумева брижљиво испитивање поступцима без разарања после термичке обраде и пробног испитивања (притиском), који могу да одреде положај и величину прслине у критичној области. При том треба узети у обзир и ограничену осетљивост испитивања без разарања. Следеће су фазе поступка оцене значаја прслина откривених испитивањем:

- Ако прслина није већа од допуштене нивоом квалитета у датој примени, даље акције нису потребне;
- Ако су границе прухватљивости већ одређене на основу КИО за одговарајућу комбинацију материјала, поступка заваривања, додатног материјала, напона и фактора околине, прслину треба оценити према тим критеријумима, и
- Ако не постоји документовано искуство треба приступити КИО према овом упутству.

4.3.3.1 Оцена опасности од отказа

Утицај грешака може да се оцени, коришћењем овог поступка за следеће облике отказа: лом, заморни лом, пластични отказ (пластична деформација од преоптерећења у преосталом попречном пресеку), процуривање посуда, корозија, ерозија, корозијски замор, напонска корозија, нестаблиност облика (витоперење), пузање или пузање праћено замором.

Различит је ниво поузданости и тачности оцене опасности од отказа различитих облика. Лом и замор заварених спојева су већ добро познати изучавањем таквих

ломови конструкција. Обрађен је и проблем смицајног лома нето пресека. Сви други наведени облици лома подразумевају примену КИО, јер њиховим деловањем може доћи до отказа и и због тога је потребна детаљнија анализа у поређењу са замором и кртим ломом, [104]. Редослед операција у оцени значаја познате грешке је следећи:

- а) Утврдити врсту грешке, тј. да ли је површинска, просторна или грешка облика.
- b) Определити основне податке, меродавне за одређену конструкцију.
- с) Одредити величину грешке.
- d) Утврдити прихватљивост према прихваћеној граничној величини за различите коначне облике отказа и оценити да ли ће прслина да расте до коначне величине механизмима докритичног раста прслине (замор, корозија у прслинама, корозијски замор, пузање, пузање и замор.

Ако се оцени да прслина неће, расти до граничне величине, сматра се прихватљивом.

Подаци треба да обухвате деформацију материјала и температуре, којима је материјал био изложен у одговарајућој околини. Оцена треба да укључи радна оптерећења, и оптерећења приликом транспорта, уградње и испитивања. У неким случајевима је потребно узети у обзир и последице незгода и оштећења. Треба анализирати локална оптерећења и геометријска одступања. Ово треба да буде засновано на доказаним поставкама и одговарајућој документацији, укључујући спецификације материјала, и прилог је КИО, [104]. Захтевају се меродавни подаци из следећег списка:

- > положај и оријентација грешке;
- облик конструкције и завареног споја, поступак заваривања;
- напони (посебно растући) и температура (укључујући прелазну температуру кртости);
- напон течења или конвенционални напон течења (0,2%), затезна чврстоћа и модул еластичности (у неким случајевима се може захтевати и крива напондеформација);
- подаци о замору и корозијском замору у виду S-N криве и брзине раста прелине;

- жилавост лома (К_{Iс} или СТОD) (у неким случајевима се жилавост лома може одредити на основу меродавних података испитивања Шарпи епрувета са V зарезом или на основу испитивања Ј-интеграла);
- трајна временска чврстоћа (чврстоћа пузања), раст прелине пузањем или пузањем и замором, и
- > жилавост лома при напонској корозији (K_{Iscc}).

Исптивања без разарања (ИБР) (Non destructive testing-NDT) су основа за оцену погодности за употребу када се захтева квантитативни податак о величини и облику грешке. Избор поступка ИБР за оцену грешке зависи од врсте потребног податка на задовољавајућем нивоу тачности. Потребни су неки или сви од наведених података о дужини грешке, висини, положају, и оријентацији грешке у односу на правце главних напона, и да ли је попречни пресек раван или не.

Следећи поступци су прикладни за откривање површинских грешака (типа прслине): визуелна контрола, течни пенетранти, магнетне честице (за феромагнетне материјале), вртложне струје, пад електричног потенцијала (наизменичне или једносмерне струје), радиографија, ултразвук. Сви поступци се могу користити за одређивање дужине таквих грешака, али се само ултразвуком и мерењем пада потенцијала може одредити њихова висина.

Следећи поступци су прикладни за откривање запреминских (скривених) грешака: радиографија, ултразвук, вртложне струје (у немагнетним материјалима), пад електричног потенцијала (само једносмерна струја). Од наведених поступака се радиографијом и ултразвуком може измерити дужина грешке, али се само ултразвуком може измерити висина грешке. Вртложним струјама и падом потенцијала се може измерити површина попречног пресека грешке. Поступци ИБР се могу користи у одређеном обиму, не обавезно 100%, у складу са одговарајућим стандардима.

Да би прслина могла да се анализира процедуром BS 7910, мора да се сведе на неки од облика за које постоје аналитичка решења. Прслине се деле на пролазне и на делимично пролазне, при чему се ове друге деле на површинске и скривене, сл. 4.28, [104].



Слика 4.28. Облици прслина

Уколико постоји више прслина на малом растојању мора да се узме у обзир повећање фактора интензитета напона, док се код сасвим малих растојања прслине спајају у једну заједничку, сл. 4.29, [104].



Слика 4.29. Свођење више прслина на једну

Поступак анализе прслина садржи још и њено пројектовање у раван управну на правац дејства главног напона и описивање правоугаоника чије се димензије узимају као њене основне мере.

4.3.3.2 Напони које треба анализирати

Напони, који се анализирају ради оцене погодности за употребу, могу се разматрати непосредно, или разлагањем на компоненте (а, б, ц и д) на сл. 4.30. За ниво 1 оцене лома може се користити само максимална вредност комбинованог поља напона. За нивое 2 и 3 мора се узети у обзир и градијент напона, [104].

1. Мембрански напон (P_m). То је компонента равномерно распоређеног напона, која је једнака просечној вредности напона по дебљини попречног пресека,

потребна да задовољи једноставне законе равнотеже спољних и унутрашњих сила и момената.

- Напон савијања (Рь). То је компонента напона од делујућег оптерећења која се мења по дебљини попречног пресека. У оцени погодности за употребу Рь се сматра комонентом која се додаје на Р_т.
- 3. Секундарни напон (Q). Секундарни напон Q је напон, који се сам уравнотежава, потребан да би се задовољила компактност (компатибилност) конструкције. Термички и заостали напони су обично секундарни. Посебно својство секундарних напона је да они не изазивају пластични отказ, јер су последица појаве ограничених померања и деформација. Они могу допринети оштрини локалних услова на врху прслине и због тога их треба укључити у прорачун К или δ при оцени лома.За оцену лома на нивоу 2 и 3 секундарни напони могу да се поделе на мембранске (Q_m) и савојне (Q_b) компоненте као и за примарне напона.
- 4. Вршни напони (F). Вршни напон је прираштај напона који се додаје збиру примарних и секундарних напона због концентрације на местима локалних дисконтинуитета у примене при оцени лома нивоа 1. Вршни напон је највећи напон, који обично делује на површини. За оцену нивоа 2 и 3 потребан је детаљнији приказ утицаја расподеле напона и градијент напона од површине пика на врху прслине.



Слика 4.30. Шематски приказ расподеле напона по пресеку

4.3.3.3 Оцена појаве лома

Поступци оцене механике лома се односе на развој прслине цепањем (облик I). Увођење нових података условљава већу сложеност поступка, па се данас значај грешке оцењује на три нивоа.

- 1. **Ниво 1** се односи на PD 6493 у изворном облику, [103].
- Ниво 2 представља нови потпунији приступ, који узима у обзир лом и локални пластични колапс (отказ). У односу на ниво 1 он уводи анализу грешке која укључује градијент напона и утицај заосталих напона, уз коришћење захтеваног степена сигурности, [104].
- 3. Ниво 3 омогућава већу тачност увођењем сложенијег поступка и више података о материјалу. Он је нарочито погодан за материјале великог капацитета деформацијског ојачавања и за оцену сталиблног раста прслине чупањем. Није неопходно користити га за опште конструкцијске челика, [104].

На сваком од нивоа се може користити фактор интензитета напона, К или отварање врха прелине СТОD (δ), али их треба користити од почетка до краја, у складу са расположивим подацима о материјалу. Допуштено је да се подаци за К узимају на основу Ј интеграла, али није предвиђено да се подаци о жилавости лома типа СТОD преводе у податке типа К.

Због неизвесности у погледу утицаја ометене деформације на врху прслине, могу се појавити разлике у резултатима добијеним преко К и СТОD. Због тога треба исти параметар користити од почетка до краја поступка са погодно одабраним степеном сигурности. Значајан развој у поступку оцене значаја грешке је коришћење методе поузданости са делимичним факторима сигурности за сваки улазни податак. Ти делимични фактори сигурности се примењују појединачно за улазне податке, наиме за напон, величину прслине и жилавост лома.

<u>Ниво I:</u> Ниво I је сагласан са пројектном СТОД кривом, али није обавезно коришћење δ (тј. $\sqrt{\delta}$), већ може да се користи и К. По логици ствари, прва варијанта се користи када жилавост лома дата преко δ_c , а друга, ако се користи К_{Ic} или К_{Лс}. Шта више, при одређивању силе раста прслине, чак и ако се користи δ , оно се изражава преко К на следећи начин:

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{\sigma_v E} \tag{4.19}$$

што важи за челике и легуре алуминијума за $\sigma_t/\sigma_y < 0,5$ и за остале материјале за све односе σ_t/σ_y . За челике и легуре алуминијума за $\sigma_t/\sigma_y > 0,5$ важи:

$$\delta_I = \frac{K_I^2}{\sigma_y E} \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_I}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_y} - 0.25\right)$$
(4.20)

При одређивању фактора интензитета напона као меродавна узима се максимална вредност укупног напона, дефинисаног као збир свих делујућих напона, сл. 4.30e.

$$\sigma_l = F_m + F_b + Q + F_l + F_2 \tag{4.21}$$

За пролазну прслину, сл. 4.28а, фактор интензитета напона се одређује на уобичајен начин, $K_I = \sigma_I \sqrt{\pi} a$, а за делимично пролазну прслину, сл. 4.286-в, према изразу:

$$K_{I} = (M_{m}/\Phi)\sigma_{I}\sqrt{\pi a}$$

$$(4.22)$$

где је М_m фактор облика прслине, сл. 4.31, [103,104] а Фелиптични интеграл, сл. 4.32, [104].



Слика 4.31. Параметар M_m: а) за површинску прслину, б) за унутрашњу

прслину



Слика 4.32. Елиптични интеграл Ф у функцији а/с за прорачун К₁ за површинску и унутрашњу прслину

При одређивању силе раста прслине се не узима експлицитно у обзир степен сигурности 2, већ је он укључен у анализу преко граничне вредности за К_R (√δ_R), која није 1, већ 1/√2≈0,7, сл. 4.33, [103,104]. На нивоу I нису потребни додатни делимични степени сигурности.



При одређивању S_r секундарни напони се не узимају у обзир, а за својство материјала се узима напон, који се одређује као мања од следеће две величине: полузбир напона течења и затезне чврстоће, $\sigma_{\phi} = (\sigma_{YC} + \sigma_{TC})/2$, и напона течења,

увећаног 20%, $\sigma_{\phi}=1,2\sigma_{YC}$. За критичну вредност S_r је усвојено 0,8 уместо 1,0 да би задржао конзервативни приступ у делу великих напона.

Ниво I пружа такође могућност одређивања прихватљиве величине делимично пролазне прслине применом концепта еквивалентне прслине, или пролазне прслине директном применом израза:

$$a_m = \frac{\delta_{mat}E}{2\pi \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_Y}\right)^2}$$
(4.23)

који важи за челике и легуре алуминијума за σι/σ_у<0,5 и безусловно за остале материјале, односно израза:

$$a_m = \frac{\delta_{mat}E}{2\pi \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_Y} - 0.25\right)} \tag{4.24}$$

који важи за челике и легуре алуминијума за σ1/σу>0,5. Добијену величину прслине треба проверити у односу на пластични лом.

<u>**Ниво II:**</u> Ниво II је практично исто што и FAD, с тим што дозвољава анализу на основу СТОD (тј. $\sqrt{\delta_R}$). Поступак одређивања утицаја концентрације напона и секундарних напона много је сложенији него на нивоу I.

Фактор интензитета напона се одређује методом која узима у обзир расподелу напона и укључује делимични степен сигурности, у односу на напон и величину прслине. Вредности делимичних степена сигурности су дате у таб. 4.1, [105]

Подони о рединици	Последице лома			
подаци о величини	Умерене	Мале		
Напон, познат или тачно измерен, 5% одступања	1,1	1,4		
Напон, оцењен, 30% одступања	1,2	1,6		
Величина прслине, стандардна девијација 25mm	1,0	1,2		
Величина прслине, стандардна девијација 10mm	1,1	1,4		
Жилавост изражена као К _{таt} , најмања од три вредности	1,0	1,2		
Жилавост изражена као δ_{mat} , најмања од три вредност	1,1	1,4		

Табела 4.1. Делимични степени сигурности

Фактор интензитета напона може да се израчуна из израза:

$$K_I = (Y\sigma)\sqrt{\pi a} \tag{4.25}$$

где је $Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s$, односно за примарне напоне важи:

$$(Y\sigma)_p = (1/\Phi)(M_{km}M_mP_m + M_{kb}M_bP_b)$$

$$(4.26)$$

а за секундарне напоне:

$$(Y\sigma)_s = (1/\Phi)(M_m Q_m + M_b Q_b) \tag{4.27}$$

Параметри M_{km} , M_m , M_{kb} и M_b представљају факторе увећања мембранског и савојног напона услед несаосности и одступања облика у близини прелине. Када постоји концентрација напона примарни и термички напони треба да се увећају одговарајућим факторима концентрације, K_m за несаосност материјала и K_t за промену облика у близини прелине. Вредности за M_b су дате на сл. 4.34, [105], за унутрашњу и површинску прелину. За унутрашње прелине M_{km} и M_{kb} су једнаки 1, као и за површинске прелине односа a/B > 0,2.



Слика 4.34. Фактор увећања напона Мь: а) за унутрашњу прслину, б) за површинску прслину

Битна одлика нивоа II је да се при одређивању секундарног напона узима у обзир његово међудејство са примарним напонима, нпр. преко фактора ρ којим се коригује вредност параметра К_r:

$$K_r = \frac{K_l}{K_{mat}} + \rho \tag{4.28}$$

За одређивање ρ прво се израчуна $\chi = [(Y\sigma)_s/(Y\sigma)_p](\sigma_n/\sigma_Y)$ и одреди ρ_1 , а затим примени следећа процедура:

$$\rho = \rho_1 za \sigma_n / \sigma_Y < 0.8; \tag{4.29a}$$

$$p=4\rho_l(1,05-\sigma_n/\sigma_Y) \ za \ 0,8 < \sigma_n/\sigma_Y < 1,05;$$
 (4.29b)

$$\rho = 0 za 1,05 < \sigma_n / \sigma_Y \tag{4.29c}$$

Друга могућност да се узме у обзир међудејство секундарних и примарних напона је да се претпостави да део секундарних напона прелази у пластичну деформацију, сл. 4.35, [105].



Слика 4.35. Заостали напони

Ако се претпостави да збир примарних и заосталих напона не може да пређе напон течења, за заостале напоне може да се добије следећи израз:

$$\sigma_R = (1, 4 - S_r) \sigma_Y \tag{4.30}$$

где је σ_R заостали напон који се користи за израчунавање Ki^S. Може да се примети да σ_r постаје 0,4 σ_Y за C_r=1, тј. да се (максимални) ниво заосталих напона смањује за 60% када напон достигне напон течења. Коначно, треба уочити да се параметар C_r одређује на исти начин као у нивоу I. Делујуће отварање прслине би за нивое оцене II и III, се одређује на основу:

$$\delta_I = \frac{(Y\sigma)^2 \pi a}{\sigma_v E} \tag{4.31}$$

и укључује делимични степен сигурности.

Дијаграм лома у нивоу II се тумачи на исти начин као код нивоа I, али крива може да се искористи и за одређивање критичне силе (напона).

<u>Ниво III</u>: Ниво III је заснован на тзв. референтном напону и додатно смањује конзервативност процедуре PD6493 јер узима у обзир ојачавање материјала при затезању, односно криву напон-деформација, што утиче на жилавост лома. Дијаграм оцене за овај случај је приказан на сл. 4.36, [104], а потребне величине се израчунавају на следећи начин:

$$K_{r,\sqrt{\delta_{r}}} = \left\{ \frac{E \cdot ln(1 + \varepsilon_{ref})}{\sigma_{ref} \cdot (1 + \varepsilon_{ref})} + \frac{\sigma_{ref}^{3} \cdot (1 + \varepsilon_{ref})^{3}}{2\sigma_{y}^{2}E \cdot ln \cdot (1 + \varepsilon_{ref})} \right\}^{-0.5}$$
(4.32)

$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_Y = \sigma_n / \sigma_Y \tag{4.33}$$

где су σ_{ref} и ε_{ref} референтни напон и деформација. Треба уочити да је референтни напон еквивалентан напону у нето пресеку. Како је коефицијент оптерећења L_r (уместо S_r) дефинисан у односу на напон течења уместо напона течења, то L_r може да буде веће од 1, али не може да пређе вредност σ_f/σ_Y , где је σ_f дефинисан као средња вредност измедју чврстоће на граници течења и затезне чврстоће.



Слика 4.36. Дијаграм оцене лома за ниво оцене Ш

За ниво III дефиниција напона течења $\sigma_f = 1,2 \sigma_Y$ не може да се примени. За $L_r > \sigma_f / \sigma_Y, K_r = 0.$

Ако крива напон-деформација није позната, као што би то био случај када се анализира ЗУТ, тада за граничну криву може да се користи једначина:

$$K_r, \sqrt{\delta_r} = \left(1 - 0.14L_r^2\right) \left\{0.3 + 0.7\exp\left(-0.65L_r^6\right)\right\}$$
(4.34)

Овај израз такође има прекид за $L_r = \sigma_{f} / \sigma_Y$. Иако ова варијанта граничне криве захтева познавање једино напона течења и затезне чврстоће материјала, она је с друге стране, често веома конзервативна.

Процена интегритета је иста као код нивоа I и II ако се добијени подаци сведу на таку са координатама (K_r, L_r). Међутим, ако су подаци за K_{mat} и δ_{mat} дати у виду криве отпорности треба анализа да се спроведе према следећем алгоритму:

- 1. Дефинисати величину прслине а₀ и по потреби је помножити делимичним степеном сигурности;
- Дефинисати К_{mat} или δ_{mat} и по потреби поделити делимичним степеном сигурности;
- 3. Дефинисати прираштај Δa_{Γ} ;
- Израчунати L_r, K_r или δ_r, при чему се K₁, K_{mat} и σ_n оцењују за дужине прслине a₀, a₀+Δa₁, a₀+Δa₂, ..., укључујући делимични степен сигурности, ако је потребно;
- 5. Уцртати одговарајуће вредности у дијаграм отказа, и
- 6. Услови за гранично оптерећење се јављају када линија повучена кроз све уцртане тачке додирује линију дијаграма отказа само у једној тачки, а остале тачке леже изван површине захваћене осама и линијом.

Оцена опасности од лома: Степен сигурности треба усвојити према допуштеној вероватноћи лома, зависној од последица лома компонената и тачности и расипања улазних података, жилавости лома, напона и димензија прелине. Последице лома могу бити: локализовани лом који не доводи до потпуног отказа конструкције или тотални лом који потпуно искључује конструкцију из рада. Делимични степени сигурности зависе од неизвесности и расипања у процени. Препоруке за делимични степен сигурности су дате у таб. 4.1. Напоне и величину прелине треба помножити, а жилавост лома поделити делимичним степеном сигурности. Када постоји већи број прелина, треба узети веће делимичне степене сигурности или већи број испитивања жилавости лома.

4.3.4. Поступак SINTAP - Structural INTegrity Assessment Procedures

4.3.4.1 Систематски увод IIW SST 1093-8, 5 делова и SINTAP

Поступци интегритета конструкција су технике које се користе да се покаже погодност за употребу компоненти конструкција које преносе оптерећење. Оне су важне у фази пројектовања да обезбеде сигурност нове конструкције, посебно када се уносе усавршавања у избору материјала или поступака производње, и у фази експлоатације, да се обезбеди сигурност конструкције током њеног века. Оне имају посебан значај у економском развоју и осигурању квалитета техничке робе и услуга. Ако се добро примене, оне могу да повећају ефикасност избегавањем предимензионисања и непотребних контрола и оправки, али могу исто тако да успоставе равнотежу између економичности и бриге за појединачну сигурност и заштиту околине, где су угрожене ако дође до лома. Посвећена пажња поузданости и погодности за употребу донеће значајан добитак у погледу сигурности, цене, квалитета и тиме конкурентност одређене индустрије и њених производа. Потреба индустрије за овим поступком се одражава у трендовима и у садашњем стању, [5,106]:

- постојање великог броја (више од 10) поступака за оцену погодности за употребу у примени, у Европи и свету;
- повећана примена ових поступака у многим индустријама, уз оне који се користе у офшор и нуклеарним постројењима, која овај приступ користе већ годинама;
- постојање неодређеног степена сигурности, емпиријски приступ и ниво поузданости који се не може дефинисати су пратећи у овим поступцима;
- развој принципа пројектовања које допушта оптерећења у пластичној области, као што је пројектовање према граничним стањима, и повећани захтев индустрије да се потпуно користе особине савремених материјала;
- захтев индустрије за материјалима веће чврстоће и поступцима спајања велике продуктивности;
- постојање великог броја испоручиоца материјала, корисника материјала, пројектаната, оцењивача сигурности, истраживачких института и органа за развој стандарда, укључених у оцену интегритета;

- обиље експерименталних података и модела, доступних у организацијама у Европској унији (EU);
- искуство у многим организацијама у EU у развоју постојећих поступака, њиховој примени на реалне конструкције и познавање ограничења у поступцима, и
- усмерење ка европској стндардизацији у испоруци материјала, производњи и конструкцијама (какви су EN стандарди и Еврокодови).

Кључне индустрије за привреду сваке земље (гас, нафта, петрохемија, енергија, грађевинарство и израда конструкција) много зависе од сигурне експлоатације постројења и конструкција, и у случају оштећених компоненте или прслина, тачно одређивање значаја било ког оштећења или прслине у завареном споју је врло важно. Посебно значајна је захтев за продужење века конструкција, коришћењем принципа толеранције оштећења, заснованом на концепту механике лома, због велике економске користи од осигурања интегритета.

4.3.4.2 Поступци за оцену интегритета конструкција SINTAP

Како се проширује технолошко знање за дефинисање нивоа прихватљивости прелина на основу погодности за употребу, потребно је укључити овај развој у индустријску примену кроз поступке који ће донети тој индустрији предност поседовања тог знања. SINTAP документ обухвата остварени развој у методама оцене механике лома у јединствени поступак. Док се прозвољни ниво прихватљивог квалитета и даље користи за контролу квалитета, допунска примена описаног поступка омогућава оцену прихватљивости познатих или претпостављених прелина у одређеној ситуацији на рационалан начин.

Пројект SINTAP садржи пет задатих подручја: разлику чврстоће конституената у завареном споју, лом компоненти са прслином, методе вероватноће, заостале напоне и развој поступка, [5,106]. Овај поступак је развијен на искуству конзорцијума, стеченом у различитим поступцима оцене, укључујући BS PD 6493, R6, Модел инжењерског приступа (ETM), IIW SST 1093-8 и испитивање узорка великих димензија, као што су узорци широких плоча, али не само њих. Поступак укључује више опција различитог степена сложености са

избором на основу квалитета података, циља оцена, врсте конструкције и знања корисника.

У задатку 1 је дефинисан утицај разлике чврстоће метала шава (у односу на основни метал) у оцени конструкције и дате су препоруке како узети у обзир разлику чврстоће када се предвиђа понашање конструкције.

Задатак 2 се односи на особине компоненте са прслином и обухвата аспекте као што су спречена деформација, однос напона течења и затезне чврстоће у савременим челицима, утицај претходног преоптерећења и преглед фактора интензитета напона и решења граничног стања.

Задатак 3 укључује оптимизацију обраде података и даје статистички приступ обраде улазних података, аспекте као што су расипање резултата испитивања механике лома, корелација Шарпи-жилавост лома, препоруке за ИБР и степене сигурности.

Заостали напони су обрађени у задатку 4, који обухвата преглед расподеле заосталих напона од заваривања, као и резултате недавно развијених модела и експериментално одређене расподеле напона.

Задатак 5, развој поступка, има за циљ да претходне задатке обједини у целовит поступак. Различити нивои оцене су предложени, почев од једноставних, али конзервативних приступа, где су расположиви подаци ограничени, све до сложених поступака који укључују најновији развој.

Резултати оцене лома могу бити приказани било преко силе развоја прслине или дијаграма оцене лома. У првом случају, сила развоја прслине (нпр. као делујући Ј-интеграл) се наноси у зависности од величине прслине за различита оптерећења, или као функција оптерећења за различите величине прслине, и пореди са отпорношћу материјала према прслинама. У другом случају, оцена се добија преко тачке или криве на дијаграму, чији се положај пореди са линијом оцене лома. Ова два приступа дају сагласне резултате у оцени, који не зависе од избора поступка, [5,106].

Резултати пројекта SINTAP доприносе даљем развоју CEN стандарда за погодност за употребу, који се разматра у CEN TC 121. У том погледу, треба разумети да приступи описани у овом поступку нису намењени да замене постојеће

документе, посебно оне засноване на искуству. Они треба да се сматрају допунским, чија примена треба да осигура сигуран и ефикасан избор материјала, пројект конструкције и продужење века. Поступак се ослања на принципе механике лома и применљив је за оцену металних конструкција, која имају познату или претпостављену прслину. Намена поступка је да утврди значај, с обзиром на лом и пластични отказ, прслине која постоји у металним конструкцијама и компонентама. Принцип је да ће до лома доћи када делујућа сила развоја прслине превазиђе способност материјала да се супротстави развоју те прслине. Ова особина материјала се зове жилавост лома или отпорност према лому.

Поступак се може применити током пројектовања, производње или фазе експлоатације у радном веку конструкције. Претпостављајући произвољни дисконтинуитет у равни у фази пројекотвања могу се одрдити особине материјала, пројектни напони, поступак контроле, критеријуми прихватљивости и интервали контроле. У фази производње може да се оцени погодност за употребу. Међутим, овај поступак не треба користити да се оцени да ли је израда лоша или да се свака покединачна прелина која се појави разматра у односу на производне стандарде. Ако се појаве дисконтинуитети, који се не могу сматрати прихватљивим према овом поступку, нормална реакција је (i) исправити грешку у производном процесу која доводи до тог дисконтинуитета, и (ii) поправити или заменити лош производ. Овај поступак може да се користи за доношење одлуке да ли је могуће наставити сигуран рад са компонентом или конструкцијом код које је грешка откривена или треба изменити радне услове. Ако се при инспекцијској контроли открију дисконтиниутети, настали због делујућег променљивог оптерећења или утицаја околине, ови се утицаји морају размотрити погодним поступком. Поступак може да се користи да покаже да ли је, под потпуном контролом, сигуран даљи рад до оправке. Даља је примена поступка да пружи доказ за промену потенцијално лошег рада и да оправда продужени експлоатацијски век (продужење века), [5,106].

Ниво прихватљивости прслина се заснива на концепту погодности за употребу: одређена конструкција се сматра погодном за употребу ако нису испуњени услови за њен лом, узимајући у обзир у извесној мери ненормалну експлоатацију или оштећења током рада.

Начело овог приступа је да квалитет улазних података има одраза на осмишљеност и тачност резултујуће анализе. На располагању је низ нивоа, сваки са повећаном сложеношћу и сваки све мање конзервативан у односу на суседни нижи ниво, према томе, "казна" и "награда" следе из коришћења лоших и квалитетних података, респективно. Овако осмишљен поступак значи да неприхватљиви резултат на неком нивоу може постати прихватљив на нижем нивоу. Корисник треба само да изведе радове потребне да се достигне прихватљиви ниво и не мора да инвестира у непотребна сложена испитивања или анализе. Због хијерархијске организације нивоа података и оцене, пут кроз поступак је заснован на релативном учешћу кртог лома и пластичног отказа у укупном лому. Обезбеђене су квалитативне и квантитативне препоруке за корисника, које ће му омогућити највише предности од побољшаних података. Основа тога је положај тачке полазне анализе у односу на крти лом и пластични отказ. Ово може да се користи за одређивање прихватљивости датих услова, одређивањем вредности критичног параметра, оценом степена сигурности према лому или утврђивањем вероватноће лома.

Поступак је применљив на крти лом и пластични отказ. Други облици лома, као што су замор, прслине од агресивне средине, корозија, пузање и други облици лома на високој температури, временски зависни откази (као деградација материјала), извијање, заустављање прслине, мешовито оптерећење, нису обухваћени овим поступком, али се могу користити према:

- BS 7910-19 "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures", [104], и
- BS 7608:2014+A1:2015. Guide to fatigue design and assessment of steel products, [107].

Проширење поступка на докритични раст прелине може довести до услова лома, али зависног од времена. То је логични корак за даљи развој поступка. Када треба да се установе особине материјала за примену у оцени, то треба урадити у складу са признатим стандардима. Препоручују се ISO, EN и национални стандарди, баш тим редом.

Два су приступа за оцену интегритета конструкције или компоненте са прелином изабарана за SINTAP поступак, [5,106]:

- 1. дијаграм анализе лома (FAD), и
- 2. крива силе развоја прслине (CDF).

Оба су приступа заснована на истим научним принципима и дају исте резултате ако се улазни подаци обраде на исти начин. Основа оба приступа је да ће лом бити избегнут све док конструкција није оптерећена изнад максимума носећег оптерећења, дефинисаног критеријумима механике лома и анализе граничног пластичног стања. Анализа механике лома подразумева поређење оптерећења на врху прслине (често названог сила развоја прслине) са способношћу материјала да се супротстави прслини (дефинисаној као жилавост лома или отпорност према лому).

Оптерећење на врху прслине мора, у већини случајева, да се оценити еластопластичним концептом и зависи од конструкције, величине и облика прслине, затезних особина материјала и оптерећења. У приступу FAD су у исто време упоређени сила развоја прслине и жилавост лома материјала, и делујуће оптерећење са граничним оптерећењем пластичног отказа. У приступу CDF сила развоја прслине се уноси у дијаграм и директно пореди са жилавошћу лома. Посебна је анализа граничног пластичног стања. Како су и FAD и CDF приступи засновани на еласто-пластичном концепту, њихова примена је упрошћена коришћењем само еластичних параметара. Примена оба приступа зависи од различитих фактора, који обезбеђују да анализа буде конзервативна, тако да она потцењује оптерећење за лом за дату величину прслине и критичну величину прслине за дато оптерећење. Исто тако, примењују се ограничења како би важили резултати испитивања малих епрувета за много веће и сложеније конструкције. Због тога оцена се не односи на услове лома, већ на граничне прихватљиве услове (гранично оптерећење или величина прслине). То значи да има простора за даљу, реалнију процену, са мање конзервативним резултатом, [5,106].

4.3.5. Процена преостале чврстоће и радног века

Преостала чврстоћа и радни век конструкције без прслине одређује се на основу понашања конструкције. Санацију и ревитализацију треба обављати само када конструкција има лоше локално понашање. У случају лошег глобалног понашања конструкцију треба заменити. При томе је потребно елиминисати лоше понашање ("лечити" узрок, а не последицу) погодном реконструкцијом. Преостала чврстоћа и радни век конструкције са стварном или симулираном прелином, одређује се на основу понашања конструкције, узимајући у обзир величину и положај прелине, односно силу раста прелине, која се пореди са отпорношћу материјала на раст прелина.

Својства отпорности материјала на прелине се одређују експериментално, према стандарду ASTM E1820-20, [78]. У оквиру линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ), сила раста прелине се идентификује са фактором интензитета напона: $K=Y\sigma\sqrt{\pi a}$, где је Y бездимензиони фактор геометрије, σ удаљени напон, *a* дужина прелине. Отпорност материјала на нестабилни раст прелине се у оквиру линеарно еластичне механике лома представља критичном вредношћу фактора интензитета напона у условима равног стања деформације, K_{Ic} , односно жилавошћу лома. Услов за нестабилни раст прелине гласи: $K \ge K_{Ic}$, одакле се одређује критична дужина прелине *a*, ако се знају жилавост лома, удаљени напон σ и фактор геометрије Y, или се одређује потребна жилавост лома (избор материјала) ако се знају дужина прелине *a*, удаљени напон σ и фактор геометрије Y. Услов нестабилног раста прелине може да се користи и као критеријум за одређивање дозвољеног оптерећења, ако се знају дужина прелине *a*, жилавост лома и фактор геометрије Y.

Примена ЛЕМЛ је по правилу ограничена на доказ сигурног рада конструкције са прелином, код које се при том занемарује способност материјала да се пластичним деформацијама супротстави расту прелине. Како је утицај пластичне деформације око врха прелине врло битан за већину конструктивних материјала, то је за комплетну анализу раста прелине неопходно применити параметре еласто-пластичне механике лома, као што су СТОД и J-интеграл.

Отварање врха прслине (СТОД-сгаск tip opening displacement), ознака-δ је параметар који се дефинише на различите начине, сл. 4.37, [78]. Осим нејединствене дефиниције, проблем у примени овог параметра је и његово експериментално одређивање, које се према стандардној процедури изводи на посредан начин, мерењем отварања уста прслине (СМОД-сгаск mouth opening displacement) и израчунавањем одговарајуће вредности СТОД, према ASTM E1820-20, [78]. Ова процедура је једноставна, али важи само уз извесна ограничења, као

што је захтев да дужина прслине буде 45-55% од ширине епрувете. С друге стране директно мерење CTOD захтева специјални уређај и за сада није стандардизовано.





Додатни проблеми у примени концепта отварања прслине на заварене спојеве су евентуална несиметрија отварања прслине услед хетерогености материјала и утицај заосталих напона. Међутим, и поред свих наведених проблема СТОД је најчешће коришћен параметар механике лома када су у питању заварени спојеви, јер омогућава брзу и ефикасну инжењерску процену значаја прслине за сигурност конструкције. Ова констатација је заснована на искуству стеченом у примени тзв. пројектних СТОД кривих и дијаграма анализе лома (FAD-failure assessment diagram), тј. процедури описаној детаљно у PD 7910:2019, [104]. Иако упрошћена, ова процедура је погодна за већину инжењерских проблема, јер даје поуздану и конзервативну процену понашања завареног споја са прслином.

Додатну могућност анализе комплетног раста прелине (стабилног и нестабилног), тј. еласто-пластичног понашања материјала са прелином, пружа Јинтеграл, [78]. Као контурни интеграл независан од путање овај параметар је погодан за анализу понашања дводимензионог равног тела од нелинеарно еластичног материјала, оптерећеног квазистатички без растерећења. Критична вредност Ј-интеграла, Ј_{Iс}, при којој почиње нестабилни раст прелине, сл. 4.38, [78], може да се одреди и ако нису задовољени услови равног стања деформације, што је битно ограничење при одређивању К_{Iс}.

Осим тога, искуство је показало да Ј-интеграл може да се примени за анализу понашања заварених спојева и процену њиховог интегритета и ван наведених ограничења, односно при расту прелине који превазилази област затупљивања, сл. 4.38. Ј интеграл, као параметар еласто-пластичне механике, посебно је погодан за процену преостале чврстоће (заварене) конструкције, као што је показано на сл. 4.39, [78], где је Ј-интеграл примењен с једне стране као параметар који дефинише оптерећење и геометрију тела, укључујући прслину (сила раста прслине), а с друге стране као отпорност материјала на раст прслине, што је дато кривом отпорности (J-R крива).

Силе раста прслине су дате параметарски, зависно од оптерећења, а J-R крива је постављена у положај који одговара почетној дужини прслине. Силе раста прслине се одређују нумерички (нпр. методом коначних елемената) или аналитички (нпр. EPRI приручником), док се криве отпорности добијају експериментално, нпр. процедуром дефинисаном у стандарду ASTM E1820:2020, [78]. Крива силе раста прслине која тангира J-R криву одређује оптерећење при коме прслина расте нестабилно, а тачка додира дефинише претходни стабилни раст прслине и критичну вредност J интеграла.



Слика 4.38. Стабилни раст прслине: J-R крива



Дужина прслине

Слика 4.39. Одређивање преостале чврстоће поређењем силе раста прслине и криве отпорности

Ревитализација конструкције подразумева реконструкцију или санацију старе конструкције и/или продужење њеног преосталог века. Свака од наведених ставки разрађује се на основу претходне анализе стања конструкције и дијагностике њеног понашања и попуштања, односно процене преостале чврстоће и века. Реконструкција подразумева првенствено промену геометрије, а често су потребне интервенције на материјалу (посебно на завареним спојевима), односно њихова санација.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДЕО

Основни услов који мора задовољити свака заварена конструкција је сигурност и поузданост у условима експлоатације. Да би тај услов био задовољен пресудне су особине завареног споја. Како су у питању комплексне структуре, за детаљно познавање особина заварених спојева неопходна су експериментална истраживања, као и тумачење добијених резултатата.

Дефинисање квалитетне технологије заваривања, са аспекта смањења утицаја експлоатационих услова (радни притисак, температура, корозија) представља основни циљ, при заваривању дебелих лимова. Легирани Cr-Mo челик ознаке SA 387 Gr. 91 је намењен за израду посуда под притиском, паровода и гасних инсталација у хемијској и петрохемијској индустрији, као и термоенергетским постројењима, које раде у условима повишене температуре, повишеног притиска и корозионе средине, [22]. Због својих изразито добрих механичких особина, као и одличне отпорности на присуство и пропагацију прслине у експлоатационим условима, његовом применом оствариће се и значајна уштеда у материјалу у односу на конвенционалне челике. Успешна примена овог челика зависи од степена погоршавања својстава основног метала током заваривања. Зона утицаја топлоте (ЗУТ) и метал шава (МШ) могу бити места смањене енергије удара са прелазном температуром кртости помереном ка вишим температурама. Проблем је при том како оценити енергију удара у критичним подручјима завареног споја, тј. у ЗУТ. Стандардом прихваћен поступак за одређивање енергије удара заварених спојева је испитивање Шарпи епрувета са врхом V зареза постављеним у МШ и у ЗУТ. Расипање резултата тако одређене енергије удара је последица хетерогености микроструктуре и механичких својстава подручја у коме се налази врх зареза, при чему је и ширина ЗУТ зависна од параметара режима заваривања. Расипање је такође последица великог прелазног радијуса корена V зареза као концентратора напона у поређењу са укупном величином ЗУТ.

Практичној примени заварених конструкција израђених од легираног челика SA 387 Gr. 91 треба да претходи детаљно проучавање њихових механичких и експлоатацијских својстава, како би се сигурност заварених спојева, а тиме и заварене конструкције у целини, обезбедила у потпуности на нивоу већ достигнуте сигурности, или чак и побољшала. Као полазни податак о квалитету и применљивости завареног споја служе карактеристике које се добијају при деловању статичког оптерећења (механичко-технолошка испитивања). Ове карактеристике описују глобално механичко понашање завареног споја. Допунски подаци о понашању завареног споја се добијају ударним испитивањем (енергија лома епрувете са зарезом), али се та карактеристика користи само као упоредна величина при избору материјала и не може се директно користити за прорачун напона. Она описује локално понашање материјала, на које утиче концентрација напона у виду зареза, [13].

5.1. Основни материјал

Легирани челик SA 387 Gr. 91 спада у групу Cr-Мо челика. Има напон течења минимум 450MPa и гарантовану енергију удара на собној температури минимум 41J. Произведен је у "Železarni ACRONI" Јесенице, [107]. Хемијски састав испитиваног челика је дат у табели 5.1.

Табела 5.1. Хемијски састав испитиване шарже челика SA 387 Gr. 91, Шаржа: 295701

Елемент	%	Елемент	%	Елемент	%
С	0,129	Ni	0,01	Al	0,007
Si	0,277	Cu	0,068	Sn	0,005
Mn	0,443	Мо	0,874	W	0,016
Р	<0,001	V	0,198	Со	0,009
S	<0,001	Ti	<0,001	В	0,0005
Cr	8,25	Nb	0,056	Ν	0,031

5.2. Избор оптималне технологије заваривања и поступак заваривања

При заваривању легираних челика какав је и SA 387 Gr. 91 најважније је одабрати коректан термички циклус заваривања који неће имати негативан утицај на особине челика. На термички циклус при заваривању утиче низ фактора, [107]:

- ⋟ унесена енергија;
- дебљина материјала;
- > температура основног материјала (температура предгревања);
- ▶ облик завареног споја и димензије, и

▶ број слојева.

С обзиром на врсту материјала и техничко-технолошке прописе који се требају испоштовати, а имајући у виду да се ради о легираном челику, заваривање испитних узорака је урађено са два поступка и додатна материјала, и то, [108,109]:

- Коренски завар ТІG заваривање (поступак 141 према EN ISO 6947), 4 (четири) пролаза. Коришћени додатни материјал за ТІG је жица ознаке BOEHLER C 9 MV-IG, пречника 2,4mm (међународна ознака W CrMo 91 према EN ISO 21952-А), и
- Испуна REL заваривање (поступак 111 према EN ISO), остали пролази. Коришћени додатни материјал за REL је електрода ознаке BOEHLER FOX C9 MV, пречника 2,5 i 3,2mm (међународна ознака E CrMo 91 B 4 2 H5 према EN ISO 3580-A).

Опис ТІG поступка заваривања је дат у Прилогу 1, а REL поступка у Прилогу 2. Атестне карактеристике хемијског састава додатних материјала су дате у таб. 5.2, а механичких особина у таб. 5.3, [108,109].

1	K ња	Хемијски састав, %											
Додатни материја	Поступа	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо	Ni	V	Cu	Nb	N
C 9 MV-IG	TIG	0,11	0,23	0,5	0,006	0,003	9,0	0,93	0,5	0,19	0,03	0,07	0,04
FOX C9 MV	REL, 2,5mm	0,09	0,19	0,55	0,01	0,006	8,5	1,00	0,5	0,19	0,1	0,04	0,05
FOX C9 MV	REL, 3,2mm	0,11	0,26	0,66	0,008	0,005	8,5	0,94	0,5	0,20	0,1	0,06	0,04

Табела 5.2. Хемијски састав додатног материјала

Табела 5.3. Механичке особине додатног материјала

Додатни материјал	Поступак заваривања	Напон течења, R _{eL} /R _{p0,2} , Мра	Затезна чврстоћа, R _m , MPa	Издужење, А, %	Енергија удара, KV, J	
C 9 MV-IG	TIG	≥ 530	≥ 620	≥ 17	≥ 50	
FOX C9 MV	REL, 2,5mm	≥ 550	≥ 680	≥ 17	≥ 47	
FOX C9 MV	REL, 3,2mm	≥ 550	≥ 680	≥ 17	≥47	
Да би се избегао проблем дефинисања положаја зареза у ЗУТ, изабран је сучеони заварени спој са правилним симетричним К-жлебом, сл. 5.1, [49]. У односу на дебљину плоча, дефинисан је редослед и број пролаза заваривања. Редослед заваривања дат је на сл. 5.2, [49]. Као заштитни гас је коришћен Аргон (Ar), протока 12 lit/min.



Слика 5.1. Облик шава за материјал SA 387 Gr. 91



Слика 5.2. Пролази заваривања SA 387 Gr. 91

Редослед пролаза приказан на сл. 5.2 је следећи:

- 1÷4-ТІG, жица пречника 2,4mm
- ▶ 5÷9-REL, електрода пречника 2,5mm
- ▶ 10÷14-REL, електрода пречника 3,2mm

Пре заваривања вршено је предгревање на 250°С, а током заваривања је температура одржавана у интервалу 200°С÷300°С.

Након поступка заваривања, заварене плоче су подвргнуте термичкој обради, према схеми датој на сл. 3.20, [56]. Термичка обрада је неопходна због хомогенизације завареног споја, као и прерасподеле заосталих напона унешених у току поступка заваривања.

1	5		,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	1-3-3	L · J
Immeree	$t_1 = 73s$	$t_1 = 107s$	$t_1 = 206s$	$t_1 = 197s$	$t_1 = 230s$
І пролаз	$l_1 = 25 \text{mm}$	$l_1 = 36$ mm	$l_1 = 84$ mm	$l_1 = 201 \text{mm}$	$l_1 = 154$ mm
II uno doo	$t_1 = 90s$	$t_1 = 98s$	$t_1 = 134s$	$t_1 = 172s$	
п пролаз	$l_1 = 55 mm$	$l_1 = 65 mm$	$l_1 = 185$ mm	$l_1 = 195$ mm	
III una dan	$t_1 = 101s$	$t_1 = 58s$	$t_1 = 81s$	$t_1 = 143s$	$t_1 = 107 s$
пролаз	$l_1 = 115$ mm	$l_1 = 48 \text{mm}$	$l_1 = 67 mm$	$l_1 = 145 \text{mm}$	$l_1 = 125$ mm
IV upo uoo	$t_1 = 134s$	$t_1 = 302s$	$t_1 = 110s$		
ту пролаз	$l_1 = 114$ mm	$l_1 = 376$ mm	$l_1 = 10$ mm		
-				•	

Прилог 1. ТІG попуна, Напон-12,2V, Јачина струје-167 до 177А [49]

Прилог 2. REL попу	уна, Напон-25,4V, Јачи	ина струје-120 до 132A [49]
--------------------	------------------------	-----------------------------

V upo too	$t_1 = 51s$	$t_1 = 55s$	$t_1 = 75s$	
у пролаз	$l_1 = 157$ mm	$l_1 = 164$ mm	$l_1 = 179$ mm	
VI uno doo	$t_1 = 53s$	$t_1 = 55s$	$t_1 = 55s$	$t_1 = 35s$
у г пролаз	$l_1 = 160$ mm	$l_1 = 150$ mm	$l_1 = 147$ mm	$l_1 = 43 \text{mm}$
VII uno uoo	$t_1 = 101 s$	$t_1 = 58s$	$t_1 = 81s$	$t_1 = 143s$
ун пролаз	$l_1 = 115$ mm	$l_1 = 48$ mm	$l_1 = 67$ mm	$l_1 = 145 \text{mm}$
VIII uno uoo	$t_1 = 46s$	$t_1 = 53s$	$t_1 = 90s$	
v III пролаз	$l_1 = 140 \text{mm}$	$l_1 = 180$ mm	$l_1 = 180$ mm	
IV uno uoo	$t_1 = 49s$	$t_1 = 47s$	$t_1 = 51s$	$t_1 = 16s$
та пролаз	$l_1 = 120$ mm	$l_1 = 140$ mm	$l_1 = 150$ mm	$l_1 = 90$ mm
	$t_1 = 35s$	$t_1 = 39s$	$t_1 = 40s$	$t_1 = 90s$
V προπορ				
Х пролаз	$l_1 = 80 \text{mm}$	$l_1 = 120$ mm	$l_1 = 110$ mm	$l_1 = 190$ mm
Х пролаз	$l_1 = 80 \text{mm}$ $t_1 = 54 \text{s}$	$l_1 = 120 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$	$l_1 = 110 \text{mm}$ $t_1 = 49 \text{s}$	$l_1 = 190 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$
Х пролаз XI пролаз	$l_1 = 80 \text{mm}$ $t_1 = 54 \text{s}$ $l_1 = 130 \text{mm}$	$l_1 = 120$ mm $t_1 = 52$ s $l_1 = 140$ mm	$l_1 = 110 \text{mm}$ $t_1 = 49 \text{s}$ $l_1 = 145 \text{mm}$	$l_1 = 190 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$ $l_1 = 83 \text{mm}$
Х пролаз XI пролаз	$l_1 = 80 \text{mm}$ $t_1 = 54 \text{s}$ $l_1 = 130 \text{mm}$ $t_1 = 48 \text{s}$	$l_1 = 120$ mm $t_1 = 52$ s $l_1 = 140$ mm $t_1 = 55$ s	$l_1 = 110$ mm $t_1 = 49$ s $l_1 = 145$ mm $t_1 = 52$ s	$l_1 = 190 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$ $l_1 = 83 \text{mm}$ $t_1 = 53 \text{s}$
Х пролаз XI пролаз XII пролаз	$l_1 = 80$ mm $t_1 = 54$ s $l_1 = 130$ mm $t_1 = 48$ s $l_1 = 110$ mm	$l_1 = 120 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$ $l_1 = 140 \text{mm}$ $t_1 = 55 \text{s}$ $l_1 = 150 \text{mm}$	$l_1 = 110$ mm $t_1 = 49$ s $l_1 = 145$ mm $t_1 = 52$ s $l_1 = 145$ mm	$l_1 = 190 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$ $l_1 = 83 \text{mm}$ $t_1 = 53 \text{s}$ $l_1 = 105 \text{mm}$
Х пролаз ХІ пролаз ХІІ пролаз ХІІІ пролаз	$l_1 = 80$ mm $t_1 = 54$ s $l_1 = 130$ mm $t_1 = 48$ s $l_1 = 110$ mm $t_1 = 48$ s	$l_1 = 120 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$ $l_1 = 140 \text{mm}$ $t_1 = 55 \text{s}$ $l_1 = 150 \text{mm}$ $t_1 = 50 \text{s}$	$l_1 = 110$ mm $t_1 = 49$ s $l_1 = 145$ mm $t_1 = 52$ s $l_1 = 145$ mm $t_1 = 49$ s	$l_1 = 190 \text{mm}$ $t_1 = 52 \text{s}$ $l_1 = 83 \text{mm}$ $t_1 = 53 \text{s}$ $l_1 = 105 \text{mm}$ $t_1 = 24 \text{s}$
Х пролаз ХІ пролаз ХІІ пролаз ХІІІ пролаз ХІІІ пролаз	$l_1 = 80$ mm $t_1 = 54$ s $l_1 = 130$ mm $t_1 = 48$ s $l_1 = 110$ mm $t_1 = 48$ s $l_1 = 130$ mm	$l_{1} = 120 \text{mm}$ $t_{1} = 52 \text{s}$ $l_{1} = 140 \text{mm}$ $t_{1} = 55 \text{s}$ $l_{1} = 150 \text{mm}$ $t_{1} = 50 \text{s}$ $l_{1} = 150 \text{mm}$	$l_{1} = 110 \text{mm}$ $t_{1} = 49 \text{s}$ $l_{1} = 145 \text{mm}$ $t_{1} = 52 \text{s}$ $l_{1} = 145 \text{mm}$ $t_{1} = 49 \text{s}$ $l_{1} = 160 \text{mm}$	$l_{1} = 190 \text{mm}$ $t_{1} = 52 \text{s}$ $l_{1} = 83 \text{mm}$ $t_{1} = 53 \text{s}$ $l_{1} = 105 \text{mm}$ $t_{1} = 24 \text{s}$ $l_{1} = 60 \text{mm}$
Х пролаз ХІ пролаз ХІІ пролаз ХІІІ пролаз	$l_{1} = 80mm$ $t_{1} = 54s$ $l_{1} = 130mm$ $t_{1} = 48s$ $l_{1} = 110mm$ $t_{1} = 48s$ $l_{1} = 130mm$ $t_{1} = 48s$	$l_{1} = 120 \text{mm}$ $t_{1} = 52 \text{s}$ $l_{1} = 140 \text{mm}$ $t_{1} = 55 \text{s}$ $l_{1} = 150 \text{mm}$ $t_{1} = 50 \text{s}$ $l_{1} = 150 \text{mm}$ $t_{1} = 53 \text{s}$	$l_{1} = 110 \text{mm}$ $t_{1} = 49 \text{s}$ $l_{1} = 145 \text{mm}$ $t_{1} = 52 \text{s}$ $l_{1} = 145 \text{mm}$ $t_{1} = 49 \text{s}$ $l_{1} = 160 \text{mm}$ $t_{1} = 55 \text{s}$	$l_{1} = 190 \text{mm}$ $t_{1} = 52 \text{s}$ $l_{1} = 83 \text{mm}$ $t_{1} = 53 \text{s}$ $l_{1} = 105 \text{mm}$ $t_{1} = 24 \text{s}$ $l_{1} = 60 \text{mm}$

Изглед сучеоно заварених лимова димензија 500 x 150 x 16mm са завареним спојем у средини после термичке обраде је дат на сл. 5.3.



Плоча 1.



Плоча 2.

Слика 5.3. Сучеоно заварени лимови легираног челика SA 387 Gr. 91

5.3. Испитивање завареног споја легираног челика SA 387 Gr. 91

Хронолошка класификација грешака, која укључује све типове грешака који могу да се јаве на конструкцијским елементима од фазе пројектовања, преко конструисања, монтаже до експлоатације, приказана је на сл. 5.4, [105].



Групе грешака	Пример
Конструктивне	 Неодговарајућа конструкција Неправилан избор димензија елемената конструкције Неодговарајућа процена радних услова Одступање димензија елемената конструкција у односу на
Технолошке	 Одступање од, захтеваног по стандарду, хемијског састава материјала, структуре, механичких особина, количине укључака, дисконтинуитета итд. Грешке заваривања Одступање у параметрима режима заваривања, претходне и накнадне термичке обраде од пројектом предвиђених Одступање у квалитету и стању површине од захтева према стандарду или пројектној документацији
Монтажне	 -Неправилна монтажа елемената конструкције -Грешке заваривања на монтажним шавовима -Одступања у параметрима режима заваривања,претходне и накнадне термичке обраде од пројектом предвиђених
Експлоатационе	-Заморне прслине, прслине пузања -Прслине услед корозионо-агресивног дејства радног флуида -Промене димензија и облика компонената услед деловања повишене температуре и притиска
Ремонтне	 -Прслине провоциране високим нивоом заосталих напона од заваривања -Грешке заваривања при ремонту -Монтажне грешке током ремонта

Слика 5.4. Хронолошка класификација грешака и типови грешака

Скуп метода, мера и поступака који имају за циљ утврђивање хемијских, физичких, механичких (на собној и радној температури), структурних и геометријских карактеристика материјала готових елемената (конструкцијски елементи и готови конструкцијски елементи, цеви, лопатице, вратила, фазонски комади, и др.) припада улазној контроли материјала. Улазна контрола је неопходна не само при пријему опреме која ће се уградити, већ обавезно и пре извођења поправки или замене дела опреме код постројења у експлоатацији, [105]. Експлоатациону контролу опреме чини скуп метода, мера и поступака помоћу којих се утврђују актуелно стање метала и узроци који су током експлоатације довели до пада његове радне способности. Експлоатациона контрола може да буде:

- ▶ редовна;
- ▶ периодична;
- ▶ капитална, и
- ▶ хаваријска.

Методе контроле које се користе код улазне и експлоатационе контроле су многобројне. Методе се деле на методе:

- испитивања са разарањем, и
- испитивања без разарања.

Све методе морају бити бар у извесној мери стандардизоване или доказане.

Испитивање заварених спојева на легираном челику SA 387 Gr. 91 је дефинисано стандардом SRPS EN ISO 15614-1:2017: "Спецификација и квалификација технологије заваривања металних материјала -Квалификација технологије заваривања - Део 1: Електролучно и гасно заваривање челика", [110]. Контрола и испитивање заварених спојева обухватају контролу без разарања (NDT) и испитивање са разарањем, у складу са захтевима датим у таб. 5.4, [110].

ИСПИТНИ УЗОРАК	BPCT	ОБИМ ИСПИТИВАЊА	
	Ианитрана	Визуелна контола	100 %
Сучеоно	испитвање	Пенетрантска контрола	100 %
заварени	оез разарања	Радиографска контрола	100 %
спој		Макро и микроструктура	1 узорак
челичних	Испитивање	Попречно савијање	2+2 епрувете*
лимова	ca	Испитивање тврдоће	1 узорак
SA 387 Gr. 91	разарањем	Попречно затезање	6 епрувете**
		Ударно испитивање	6+6+6 епрувете***

Табела 5.4. Захтеви за испитивање заварених спојева према SRPS EN ISO 15614-1:2017

* 2 епрувете са лица и 2 епрувете са коренске стране.

** 3 епрувете на собној температури и 3 епрувете на радној температури

** 6 епрувета са зарезом у основном металу-ОМ, 6 епрувета са зарезом у зони утицаја топлоте-ЗУТ, 6 епрувета са зарезом у металу шава, на собној (3) и радној (3) температури.

5.4. Испитивање квалитета завареног споја ИБР методама

После извршеног поступка заваривања, а пре узимања епрувета сви узорци се подвргавају испитивању ИБР методама. Употреба одређених техника са циљем да се одреди интегритет материјала, компоненте или конструкције, или квантитативно измере неке карактеристике објекта назива се испитивањем без разарања, сл. 5.5, [110].



Слика 5.5. Схематски приказ метода испитивања без разарања (ИБР)

У конкретном случају, а сходно стандарду SRPS EN ISO 15614-1:2017, за проверу квалитета сучеоно завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91, коришћен је визуелни преглед (ВП), пенетрантско испитивање (ПИ), и радиографско испитивање (РИ).

Сваки завршени заварени спој мора да буде прегледан визуелно у стању како је заварен. Визуелни преглед (ВП) се користи пре било које друге методе

испитивања завареног споја, а у циљу откривања површински видљивих грешака (до одређене величине) на лицу и корену завареног споја, и одступања у облику и димензијама испитиваног узорка.

Визуелни преглед представља најважнију операцију "прелиминарног" испитивања завареног споја. За визуелни преглед конкретног завареног споја је коришћена лупа увећања до 10х. Овим прегледом нису уочене површински видљиве грешке, а посебно грешке типа прслине.

За детектовање грешака које нису видљиве голим оком (нпр. микропрслине), а налазе се на површини завареног споја користе се пенетранти у боји где се на основу контраста боје детектују грешке. На претходно очишћену и одмашћену површину нанешен је пенетрант (црвене боје), течност велике способности влажења и капиларности која продире у евентуалне површинске дисконтинуитете.

Након пенетрирања у евентуалну прслину (време пенетрирања, тј. продирања у прслине зависи о врсти пенетранта и о димензијама прслине, али се приближно узима 10 до 15 минута), уклања се пенетрант на одговарајући начин (водом, сувом крпом). Пенетранти који су у употреби садрже флуоресцентну компоненту, тако да се преглед врши помоћу УВ лампе чиме је повећана осетљивост теста. Такође, употреба пенетраната није детектовала евентуалне грешке типа прслине у зони завареног споја.

Међутим, највећи број евентуалних грешака у завареном споју налази се у унутрашњости и те грешке нису видљиве голим оком, нити се могу детектовати пенетрантима. У овом случају за заварене спојеве лимова дебљине испод 20mm се користи радиографска контрола. Радиографска контрола (PK) је нашла велику примену код утврђивања унутрашњих дефеката и уопште нехомогености материјала. Ово испитивање засновано је на способности рендгенских зрака да пролазе кроз разне материјале. Приликом продирања зрака кроз метале долази до њихове апсорпције, тј. зраци слабе. Ово слабљење је мање ако зраци наилазе на грешке и нехомогености, тј. тада је мања апсорпција.

У зависности од интензитета зрака на филму или плочи виде се тамнија места грешака и светлија мест-хомогени материјал. Уместо фотографског филма или плоче може се користити и неки флуоросцентни екран. Овом методом испитивања је могуће открити готово све грешке. Подаци о опреми и параметри радиографске контроле завареног споја легираног челика SA 387 Gr. 91 су дати у табели 5.5, [111].

\succ	Извор зрачења	Rø-APARAT
≻	Произвођач и тип опреме	SEIFERT ERESCO-200 MF
	Активност извора / јачина и напон струје	140 / 4,5
\succ	Величина фокуса (извора)	1,50mm
\succ	Растојање извор – филм	600mm
\succ	Техника снимања	Нормална
≻	Вриеме експозиције	3min
\succ	Врста контролника	6 ISO 12
\checkmark	Критеријум прихватљивости	SRPS ISO 5817
\succ	Обим контроле	100%

Табела 5.5. Подаци о опреми и параметри радиографске контроле

Радиографском контролом нису детектоване евентуалне грешке типа прслине, лункера и троске у зони завареног споја.

5.5. План узорковања епрувета за испитивање

Како испитивањима без разарања нису констатоване недозвољене грешке у завареном споју лимова легираног челика SA 387 Gr. 91, приступило се следећој фази испитивања, а то су деструктивна испитивања, односно испитивања са разарањем.

Технолошка и механичка испитивања су вршена да би се одредиле особине отпорности и деформације основног материјала и завареног споја: чврстоће, тврдоће, еластичности, пластичности и енергије удара. Епрувете су вађене из заварених плоча према технологији и поступку датим у поглављу 5.2. Изглед заварених плоча је дат на сл. 5.3, а узорковане су према схеми датој на сл. 5.6.



Слика 5.6. План вађења епрувета

5.6. Макро и микроструктурно испитивање завареног споја

Макро и микроструктурно испитивање завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91 је рађено према стандарду **SRPS EN ISO 17639:2014 "Испитивање са разарањем заварених спојева металних материјала - Макроскопско и микроскопско испитивање заварених спојева"**, [112]. Ова испитивања се изводе са циљем да се утврде структуре испитиваног материјала, односно да се процени квалитет изведеног споја и примењене технологије заваривања.

Макроскопски снимак завареног споја за примењену технологију заваривања дат је на сл. 5.7. Из макроструктурног пресека сучеоно завареног споја види се да је заваривање урађено из више пролаза, полагањем више завара у једном слоју.



Слика 5.7. Макроструктура завареног споја челика SA 387 Gr. 91

Микроструктура основног метала (ОМ) и компоненти завареног споја (ЗУТ и МШ) легираног челика SA 387 Gr. 91, је дата на сл. 5.8 до 5.10.



Слика 5.8. Микроструктура ОМ челика SA 387 Gr. 91



Слика 5.9. Микроструктура ЗУТ завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91



Слика 5.10. Микроструктура МШ завареног споја челичних лимова SA 387

Gr. 91

Специфична грубозрнаста структура ОМ и ЗУТ је дата на сликама у наставку, сл. 5.11 до 5.18.



Слика 5.11. Микроструктура основног метала (ОМ), 10s a) 200x, b) 500x



Слика 5.12. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 10s a) 200x, b) 500x



Слика 5.13. Микроструктура основног метала (OM), 15s a) 200x, b) 500x



Слика 5.14. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 15s a) 200x, b) 500x



Слика 5.15. Микроструктура основног метала (OM), 20s a) 200x, b) 500x



Слика 5.16. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 20s a) 200x, b) 500x



Слика 5.17. Микроструктура основног метала (OM), 25s a) 200x, b) 500x



Слика 5.18. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 25s a) 200x, b) 500x

Структура ОМ је отпуштени ламеларни мартензит, сл. 5.8, сл. 5.11, сл. 5.13, сл. 5.15 и сл. 5.17. На појединим границама претходних аустенитних зрна уочено је присуство издвојених крупнијих карбида. Структура у ЗУТ одговара отпуштеном мартензиту што се види на сл. 5.9, сл. 5.12, сл. 5.14, сл. 5.16 и сл. 5.18. Структура у металу шава одговара отпуштеном мартензиту, уочавају се границе примарних аустенитних зрна, сл. 5.10.

До појаве мартензита пре свега долази у делу подручја потпуне прекристализације ЗУТ, у којем нарасло аустенитно зрно често представља доминантан утицајни фактор.

ОМ је ваљана структура, а МШ ливена структура због топљења материјала, и што је више пролаза код заваривања то је место слабије. Термичком обрадом та се

структура сређује, па је зато она код овог челика SA 387 Gr. 91 специфична са контролисаним загревањем и контролисаним хлађењем.

Иначе висок садржај Cr доприноси отпорности на корозију и способност деформације, али неповољно утиче на ударну жилавост.

Исто се односи и на жилавост лома која је уско повезана са ударном жилавости. Тамо где су ниже вредности ударне жилавости ту су и мање вредности жилавости лома, односно где су мале енергије удара то је већа кртост. Металуршки то значи да су присутни талози и карбиди, поготово ванадијумови карбиди који су најкртији.

5.7. Технолошка испитивања - испитивање савијањем

При оцени понашања завареног споја као целине и хетерогене структуре поред поређења особина основног материјала и метала шава, а ради потпуније слике о понашању завареног споја користе се и технолошке пробе у које спада испитивање савијањем. Циљ испитивања је да се утврди способност материјала да се деформише савијањем под одређеним углом.

Епрувете и поступак испитивања савијањем на сучеоно завареним спојевима изводе се према стандарду SRPS EN ISO 5173:2013 "Испитивање са разарањем заварених спојева металних материјала – Испитивање савијањем", [113]. Димензије епрувета су 300 x 30 x 15mm (дужина х ширина х дебљина). Епрувете се савијају помоћу трна или ваљка пречника 4t са углом савијања од 180°. Схема поступка мерења угла савијања је дата је на сл. 5.19, а схема поступка савијања завареног споја око корена и око лица је дата на сл. 5.20. Само испитивање је изведено на механичкој кидалици у контроли хода.



Слика 5.19. Мерење угла при савијању (α)



Слика 5.20. Савијање епрувете завареног споја

У току испитивања на епруветама се ни у једном правцу не смеју јавити грешке са дужином већом од 3mm. Резултати испитивања на савијање су дати у таб. 5.6.

		n		•
Габела	5.6.	Резултати	испитивања	савијањем
				j

Ознака узорка	Угао савијања око лица завара, °	Ознака узорка	Угао савијања око корена завара, °	Оцена радиограма
$ZS_{L}-1$	180 (нема прслина)	$ZS_K - 1$	180 (нема прслина)	2
$ZS_L - 2$	180 (нема прслина)	$ZS_{\rm K}-2$	180 (нема прслина)	2

Резултати испитивања епрувета извађених из заварених лимова савијањем, таб. 5.6, указују на квалитетно изведено заваривање, јер при достизању угла савијања од 180° није дошло до појаве прелина. На основу резултата испитивања и њихове анализе можемо закључити да је изабрана технологија заваривања добра, и да су резултати испитивања достављених узорака заварених лимова легираног челика SA 387 Gr. 91 задовољавајући.

5.8. Испитивање тврдоће

Испитивање тврдоће на завареном споју је рађено према стандарду SRPS EN ISO 9015:2013 "Испитивање са разарањем заварених спојева металних материјала - Испитивање тврдоће - Део 1: Испитивање тврдоће електролучно заварених спојева", [114]. Коришћена је Викерс метода HV10. Оптерећење је било 100N, а увећање за мерење отиска 100х. Тврдоћа је мерена линијски ОМ - ЗУТ -МШ - ЗУТ - ОМ. Резултати мерења тврдоће сучеоно завареног споја легираног челика SA 387 Gr. 91 дати су у таб. 5.7, а приказани су и графички, на сл. 5.21.

Табела 5.7. Резултати мерења тврдоће на завареном споју челика SA 387 Gr. 91

Место		Тврдоћа HV10														
Мерења	ОМ		Мерења ОМ			ЗУТ			ΜШ			ЗУТ			OM	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Зона І	208	208	216	207	206	207	255	241	240	201	209	207	215	212	211	
Зона II	209	210	210	214	206	210	256	245	260	207	214	209	207	208	210	
Зона III	210	207	209	207	213	214	235	234	225	207	205	209	211	208	210	



Слика 5.21. Промена вредности тврдоће у зависности од места испитивања

Анализирајући добијене вредности тврдоће приказаних у таб. 5.7, као и њиховој графичкој интерпретацији на сл. 5.21, јасно се види да су највеће измерене вредности тврдоће у МШ. Идући од МШ преко ЗУТ ка ОМ, тврдоћа бележи

постепено уравнотежење, односно врло мала је разлика у вредностима тврдоће измереним у ЗУТ и ОМ.

Измерене вредности тврдоће сучеоно завареног споја се крећу од 225 до 260 HV10 у МШ. У ЗУТ су добијене ниже вредности него у МШ и крећу се од 201 до 214HV10. Измерене вредности тврдоће ОМ се крећу од 207 до 215HV10.

5.9. Испитивање попречним затезањем

Испитивање затезањем сучеоно заварених спојева, укључујући облик и димензије епрувета као и сам поступак испитивања је дефинисан стандардом SRPS EN ISO 4136:2013 "Испитивање са разарањем заварених спојева металних материјала - Испитивање попречним затезањем", [115]. Овај стандард пре свега дефинише само попречно затезање, односно увођење оптерећења попречно на заварени спој. Код попречног затезања сучеоно завареног споја по правилу се одређује само затезна чврстоћа испитиваног узорка, која не би требала да буде нижа од затезне чврстоће основног материјала.

Испитивања су рађена на електромеханичкој кидалици у контроли оптерећења. Брзина увођења оптерећења је била 5mm/min. Изглед епрувете за испитивање је дат на сл. 5.22, [115]. Резултати одређивања затезних карактеристика епрувета сучеоно завареног споја дати су у таб. 5.8.

Ознака Узорка	Температура испитивања, °С	Напон течења R _{p0,2} , MPa	Затезна чврстоћа R _m , MPa	Издужење* А, %	Место Лома
3C - 1s		592	724	25,3	OM
3C - 2s	20	601	725	22,6	ОМ
3C - 3s		597	734	24,6	OM
3C - 1p		319	333	18,2	ОМ
3C - 2p	575	331	345	16,1	OM
3C - 3p		328	338	14,9	OM

Табела 5.8. Резултати затезних својстава епрувета сучеоно завареног споја

* измерено на L₀ = 100mm, као упоредна величина (не као својство материјала).



Слика 5.22. Епрувета за одређивање затезних својстава

Криве затезања напон-издужење за епрувете извађене из завареног споја и испитане на собној температури су дате на сл. 5.23 до 5.25, а криве затезања напониздужење за епрувете испитане на температури од 575°C су дате на сл. 5.26 до 5.28.



Слика 5.23. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 1s



Слика 5.24. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 2s



Слика 5.25. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 3s



Слика 5.26. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 1р



Слика 5.27. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 2р



Слика 5.28. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 3р

Утицај температуре испитивања на вредности напона течења и затезне чврстоће сучеоно завареног споја приказан је графички на сл. 5.29.



Слика 5.29. Промена R_{p0,2} і R_m у зависности од температуре испитивања

Промена издужења у зависности од температуре испитивања код епрувета сучеоно завареног споја је приказана на сл. 5.30. Анализирајући резултате затезања епрувета сучеоно завареног споја, види се да са повећањем температуре испитивања долази до смањења особина чврстоће и деформације. Опадају вредности напона течења и затезне чврстоће, као и издужења.



Слика 5.30. Промена издужења у зависности од температуре испитивања

Добијене вредности напона течења се крећу од 597МРа на 20°С, и опадају до 326МРа на температури од 575°С, док вредности затезне чврстоће такође опадају од 728МРа добијене на 20°С, do 339МРа добијене испитивањем на 575°С. Издужење опада са повећањем температуре испитивања, и креће се од 24,2% на 20°С до приближно 16,4% на 575°С.

5.10. Ударна испитивања компоненти завареног споја

Испитивање савијањем ударним дејством силе на епруветама са зарезом може да пружи и објашњење о понашању материјала при ометаном деформисању, тј. при просторном напонском стању. Одређивање рада потребног за лом под утврђеним условима испитивања најчешће служи за текућу контролу квалитета и хомогености материјала, као и његове обраде. Овим поступком испитивања може се утврдити склоност ка кртом лому, односно склоност ка повећању кртости у току експлоатације (старење), [95].

Ударна испитивања епрувета са зарезом у основном материјалу (ОМ), металу шава (МШ) и зони утицаја топлоте (ЗУТ), су рађена у циљу одређивања укупне енергије удара, као и компоненти, енергије стварања прслине и енергије ширења прслине. Поступак испитивања, као и облик и димензије епрувета, као и положај зареза, су дефинисани стандардом SRPS EN ISO 9016:2013 "Испитивање са разарањем заварених спојева металних материјала - Испитивање ударом -Постављање епрувета, оријентација зареза и испитивање", [116]. Испитивање је урађено на епруветама чија је геометрија дата на сл. 5.31, [116].

Након термичке обраде заварених плоча, епрувете су вађене према схеми датој на сл. 5.6, а начин постављања зареза на епруветама извађеним из завареног споја је схематски приказан на сл. 5.32, [116].



Слика 5.31. Епрувета за одређивање енергије удара



Слика 5.32. Схема вађења Шарпи епрувета из завареног споја

Испитане су три групе епрувета у зависности од места урезивања V-2 зареза, и то:

- ◆ I група епрувете са V-2 зарезом у основном металу (ОМ);
- II група епрувете са V-2 зарезом у металу шава (МШ), и
- III група епрувете са V-2 зарезом у зони утицаја топлоте (ЗУТ).

Како је испитивање рађено на инструментираном Шарпијевом клатну, то је могуће дати оцену како место постављања зареза, а и температура утичу на ударне карактеристике и на пластичност материјала.

5.10.1.Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ОМ

Резултати ударних испитивања епрувета извађених из заварених плоча легираног челика SA 387 Gr. 91, дати су у таб. 5.9 за епрувете са V-2 зарезом у ОМ.

Ознака Узорка	Температура испитивања, °С	Укупна енергија удара, А _{uk} , Ј	Енергија стварања прслине, А _I , Ј	Енергија ширења прслине, А _Р , Ј
OM - 1s		251	58	193
OM - 2s	20	268	60	208
OM - 3s		275	58	217
OM - 1p		159	41	118
OM - 2p	575	166	43	123
ОМ - Зр		155	41	114

Табела 5.9. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ОМ

Типични дијаграми сила-време и енергија-време су дати на сл. 5.33 до 5.35 за епрувете са зарезом у ОМ и испитане на собној температури, а за епрувете испитане на 575°C на сл. 5.36 до 5.38.



Слика 5.33. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 1s



Слика 5.34. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 2s



Слика 5.35. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 3s



Слика 5.36. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 1р



Слика 5.37. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 2р



Слика 5.38. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 3р

Зависност укупне енергије удара, А_{ик}, код епрувета са зарезом у основном металу (ОМ), од температуре испитивања је дата дијаграмски на сл. 5.39. Утицај

температуре испитивања на вредности енергије стварања прслине, А_I, и енергије ширења прслине, А_P, је дат дијаграмски на сл. 5.40.



Слика 5.39. Промена Auk у зависности од температуре испитивања код ОМ



Слика 5.40. Промена А_I и А_P у зависности од температуре код ОМ

На основу добијених резултата ударних испитивања види се да са порастом температуре испитивања долази до пада укупне енергије удара Auk, sl. 5.39. Вредности укупне енергија удара код ОМ се крећу од 265Ј добијене испитивањем на 20°С до 160Ј

добијене испитивањем на 575°С. Учешће енергије стварања прслине, A₁, код епрувета са зарезом OM, се креће од 59Ј добијено на 20°С до 42Ј добијено на 575°С. Вредности енергије ширења прслине, A_P, се крећу од 206Ј добијене на 20°С до 118Ј добијене на 575°С. Однос енергије стварања прслине (крте компоненте), A₁, и енергије ширења прслине (дуктилне компоненте), A_P, код епрувета са V-2 зарезом у OM за испитивање на 20°С је 1:3,5, док је за испитивање на 575°С.

5.10.2.Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у МШ

Резултати ударних испитивања епрувета извађених из заварених плоча легираног челика SA 387 Gr. 91, дати су у таб. 5.10 за епрувете са V-2 зарезом у МШ.

Ознака узорка	Температура испитивања, °С	Укупна енергија удара, А _{uk} , Ј	Енергија стварања прслине, А _I , Ј	Енергија ширења прслине, А _Р , Ј
MIII - 1s		144	52	92
MIII - 2s	20	168	55	113
MIII - 3s		156	52	104
MIII - 1p		92	28	64
MIII - 2p	575	94	28	66
MIII - 3p		104	29	75

Табела 5.10. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у МШ

Типични дијаграми сила-време и енергија-време су дати на сл. 5.41 до 5.43 за епрувете са зарезом у МШ и испитане на собној температури, а за епрувете испитане на 575°C на сл. 5.44 до 5.46.



Слика 5.41. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 1s



Слика 5.42. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 2s



Слика 5.43. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 3s



Слика 5.44. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 1р



Слика 5.45. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 2р



Слика 5.46. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 3р

Зависност укупне енергије удара, А_{uk}, код епрувета са зарезом у металу шава (МШ), од температуре испитивања је дата дијаграмски на сл. 5.47.

Утицај температуре испитивања на вредности енергије стварања прслине, А_I, и енергије ширења прслине, А_P, је дат дијаграмски на сл. 5.48.



Слика 5.47. Промена Auk у зависности од температуре испитивања код МШ



Слика 5.48. Промена A_I и A_P у зависности од температуре испитивања код

MIII

На основу добијених резултата ударних испитивања види се да са порастом температуре испитивања долази до пада укупне енергије удара A_{uk} , сл. 5.47. Вредности укупне енергије удара, A_{uk} , епрувета са V-2 зарезом у МШ се крећу од 156Ј добијене испитивањем на 20°С и опадају у просеку до 97Ј, добијене испитивањем на 575°С. Учешће енергије стварања прслине, A_I , се креће у просеку од 53Ј добијено на 20°С и опада до 28Ј добијено на 575°С. Вредност енергије ширења прслине, A_P , исто тако опада са повећањем температуре, од 103Ј добијена на 20°С до 69Ј добијена на 575°С. Однос енергије стварања прслине, A_I , и енергије ширења прслине, A_P , код епрувета са V-2 зарезом у МШ за испитивање на 20°С је 1:1,9, док је за испитивање на 575°С, 1:2,5.

5.10.3.Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ЗУТ

Резултати ударних испитивања епрувета извађених из заварених плоча легираног челика SA 387 Gr. 91, дати су у таб. 5.11 за епрувете са V-2 зарезом у ЗУТ.

Ознака Узорка	Температура испитивања, °С	Укупна енергија удара, А _{uk} , Ј	Енергија стварања прслине, А _I , Ј	Енергија ширења прслине, А _Р , Ј
3 Y T – 1s	20	248	70	178
3 Y T – 2s		246	69	177
3 Y T – 3s		248	70	178
ЗУТ – 1р	575	147	39	108
ЗУТ – 2р		153	42	111
ЗУТ – Зр		138	40	98

Табела 5.11. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ЗУТ

Типични дијаграми сила-време и енергија-време су дати на сл. 5.49 до 5.51 за епрувете са зарезом у ЗУТ и испитане на собној температури, а за епрувете испитане на 575°C на сл. 5.52 до 5.54.



Слика 5.49. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 1s



Слика 5.50. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 2s



Слика 5.51. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 3s



Слика 5.52. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 1р


Слика 5.53. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 2р



Слика 5.54. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ – 3р

Зависност укупне енергије удара, А_{ик}, код епрувета са зарезом у зони утицаја топлоте (ЗУТ), од температуре испитивања је дата дијаграмски на сл. 5.55. Утицај

температуре испитивања на вредности енергије стварања прслине, А_I, и енергије ширења прслине, А_P, је дат дијаграмски на сл. 5.56.



Слика 5.55. Промена Auk у зависности од температуре испитивања код ЗУТ



Слика 5.56. Промена А_I и А_P у зависности од температуре испитивања код ЗУТ

На основу добијених резултата ударних испитивања види се да са порастом температуре испитивања долази до пада укупне енергије удара Auk, сл. 5.55.

Вредности укупне енергија удара, A_{uk} , епрувета са V-2 зарезом у ЗУТ се крећу од 247Ј добијене испитивањем на 20°С и опадају у просеку до 146Ј добијене испитивањем на 575°С. Учешће енергије стварања прслине, A_I , се креће у просеку од 70Ј добијено на 20°С и опада до 40Ј добијено на 575°С. Вредност енергије ширења прслине, A_P , исто тако опада са повећањем температуре, од 177Ј добијена на 20°С до 106Ј добијена на 575°С. Однос енергије стварања прслине, A_I , и енергије ширења прслине, A_P , код епрувета са V-2 зарезом у ЗУТ за испитивање на 20°С је 1:2,5, док је за испитивање на 575°С, 1:2,65.

Најслабије ударне особине су добијене код епрувета са V-2 зарезом у МШ, а најбоље код епрувета са V-2 зарезом у ОМ.

5.11.Одређивање жилавости лома при равној деформацији К_{Ic}

Познавајући структуру завареног споја као и његове различите структурне и механичке особине значајно је дати оцену како се основни метал (OM) и компоненте завареног споја, метал шава (MШ) и зона утицаја топлоте (ЗУТ) понашају у присуству грешке типа прелине. Испитивање епрувета са прелином показује локално понашање материјала око врха прелине и полази од претпоставке да је материјал око прелине довољно хомоген, што значи да се резултати локалног понашања могу третирати глобално, односно да се могу непосредно пренети на одговарајућу конструкцију. Међутим, имајући у виду структуру завареног споја, овај поступак испитивања се показује недовољно поузданим, јер врх прелине при развоју лома може да пролази кроз подручја различитих структура и механичких особина завареног споја. Због тога је потребна детаљна анализа завареног споја са аспекта примене механике лома.

Структурна и механичка хетерогеност завареног споја се огледа у различитости особина компоненти завареног споја кроз које врх заморне прслине пролази, односно подручја кроз које се лом развија. Испитивање жилавости лома при равној деформацији, К_{Iс}, је рађено у циљу одређивања критичног фактора интензитета напона, К_{Iс}, односно оцене понашања ОМ и компоненти завареног споја, МШ и ЗУТ у присуству грешке типа прслине, као најопасније од свих грешака у конструкцијским материјалима, а посебно завареним спојевима. Само испитивање је рађено на собној температури од 20°С, и температури од 575°С.

Рађене су три групе епрувета у зависности од места урезивања зареза, односно места врха заморне прслине, и то:

- I група епрувете са врхом заморне прслине у ОМ;
- > II група епрувете са врхом заморне прслине у МШ, и
- ➢ Ⅲ група епрувете са врхом заморне прслине у ЗУТ.

За одређивање K_{Ic} на собној температури коришћене су епрувете за савијање у три тачке (SEB) чија геометрија је дефинисана стандардом ASTM E1820-18 "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", [78], и дата је на сл. 5.57, [82].





Слика 5.57. Епрувета SEB за испитивање механике лома

За одређивање K_{Ic} на температури од 575°С коришћене су модификоване СТ епрувете за затезање чија је геометрија у сагласности са стандардом EN ISO 15653-18 "Metallic Materials. Method of test for the determination of quasistatic Fracture Toughness of weld", [82], и дата је на сл. 5.58. Овај тип епрувете се показао као најпрактичнији за испитивање на повишеним температурама због ограничености простора у комори у којој се истовремено постиже радна температура и врши испитивање (затезање).



Слика 5.58. Компактна СТ епрувета за испитивање механике лома

Како је дефинисао стандард ASTM E1820-18, прво се приступило припремању епрувете, односно стварању заморне прслине. Заморна прслина је потребна да би се створили услови равног стања деформације. Одређивање називне граничне силе, FL, односно максималне силе почетка замарања за SEB епрувету је дефинисано изразом:

$$F_{\rm L} = \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{b}^2 \cdot \mathbf{R}_{\rm T}}{2 \cdot \mathbf{L}} \tag{5.1}$$

а за СТ епрувету:

$$F_{L} = 0.4 \cdot \frac{B \cdot b^{2} \cdot R_{T}}{(2W + a)}$$
(5.2)

где је: В - ширина SEB епрувете, mm;

- W ширина СТ епрувете, mm;
- b дужина лигамента, mm;
- L распон између ослонаца, mm, и
- R_T ефективни напон течења, МРа, који се одређује по формули:

$$R_{\rm T} = \frac{R_{\rm p0,2} + R_{\rm m}}{2} \tag{5.3}$$

где је: R_{p0,2} – напон течења, MPa, и

R_m – затезна чврстоћа, МРа.

Приближно 50% завршне дужине заморне прслине је изведено при максималној сили замарања $F_{max} = 0,4 \cdot F_L$. У оба случаја је минимална сила била $F_{min} = 0,1 \cdot F_{max}$. Стварање заморне прслине и код SEB и код CT епрувета је рађено на високофреквентном пулзатору "AMSLER", сл. 5.59. Овај уређај може да оствари синусоидално наизменично променљиво оптерећење у опсегу од -100 до 100kN. Средње оптерећење и амплитуда оптерећења је регистрована са тачношћу ±50N. Остварена учестаност се кретала од 120 do 180Hz што је у директној зависности од типа епрувете, нивоа средњег оптерећења и температуре испитивања.





Слика 5.59. Стварање заморне прслине на високофреквентном пулзатору а) код SEB епрувете, б) код модификоване СТ епрувете

Како захтеви за испуњење услова равног стања деформације:

$$B \ge 2.5 \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{R_{p0,2}}\right)^2$$
(5.4)

нису задовољени, уместо примене линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ), приступило се коришћењу еласто-пластичне механике лома (ЕПМЛ). И једна и

друга метода су дефинисане стандардом ASTM E1820-18, [78]. Циљ коришћења еласто-пластичне механике лома је да се вредност критичног фактора интензитета напона, К_{Iс}, одреди посредно преко критичног J-интеграла, J_{Ic}, односно да се прати развој прслине у условима изражене пластичности.

Понашање еласто-пластичног материјала у који спадају и челици за рад на повишеним температурама SA 387 Gr. 91 (P91), као и компоненте завареног споја, при стабилном расту прслине може да се опише дијаграмом Ј-∆а, где је ∆а прираштај прслине, сл. 5.60, [78].



Слика 5.60. Схематски приказ зависности Ј-∆а при стабилном развоју прслине

При кртом понашању материјала лом се развија без додатног утрошка енергије, и за тај случај дијаграм Ј-∆а представља хоризонталну праву линију која пресеца ординату на висини Ј_Iс. Та висина одговара критичном утрошку енергије који је потребан за почетак развоја прслине. Када се материјал понаша пластично, у почетној фази пораста силе и утрошка енергије, деформација се исказује само повећањем отвора постојеће прслине, а не и напредовањем прслине. Ово одговара врло стрмој линији зависности Ј-∆а, и представља фазу затупљивања врха прслине. У критичној тачки долази до промене нагиба криве зависности, што значи да је даље отварање прслине повезано са напредовањем прслине и порастом њене дужине. Тачка прегиба у почетној фази се узима као Ј_Iс, па се на основу те вредности може одредити критични фактор интензитета напона К_Iс. Америчко друштво за испитивање материјала (ASTM) установило је стандардни поступак добијања кривих отпорности металних материјала према развоју прслине, [78]. На унапређењу овога стандарда рађено је у оквиру европског друштва за интегритет и век конструкције ESIS, [117]. Нека од решења овог стандарда су прихваћена и инкорпорирана у ASTM E1820 стандард.

Експерименти су извођени методом испитивања једне епрувете сукцесивним парцијалним растерећењем, односно методом попустљивости једне епрувете, како је то дефинисано стандардом ASTM E1820-18, [78]. Циљ методе попустљивости са растерећењем је да се региструје величина развоја прслине, ∆а, која настаје током испитивања.

Испитивање епрувета завареног споја легираног челика SA 387 Gr. 91 са врхом заморне прслине у ОМ, МШ и ЗУТ, рађено је на собној температури од 20°С на електромеханичкој кидалици, и температури од 575°С, на сервохидрауличкој кидалици, сл. 5.61.





Слика 5.61. Изглед поступка испитивања а) SEB епрувете, б) модификоване СТ епрувете

Код испитивања на собној температури епрувета је била опремљена COD екстензометром ради регистровања отварања врха прелине. То није био случај код испитивања на повишеним температурама. Наиме, због недостатка екстензометра за рад на повишеним температурама, отварање врха прелине је регистровано помоћу индуктивног давача, уз претходно регистровање калибрационе криве односа вредности добијених на екстензометру и индуктивном давачу.

Оптерећење на савијање или затезање у зависности који тип епрувете смо испитивали, се уводило малом брзином, и у конкретном случају брзина увођења оптерећења износила је 3mm/min. Оптерећење се уводило са повременим растерећивањима до тренутка великих пластичних деформација или лома епрувете, односно изласка из опсега мерења екстензометра, односно индуктивног давача. За то време су се A/D конвертором прикупљали подаци о оптерећењу, померању и отварању врха прслине.

По завршетку испитивања обележава се позиција прслине настале затезањем испитиване епрувете. Маркирање положаја прслине се врши на два начина. Епрувете испитане на собној температури се загреју на 200°С, а епрувете испитане на повишеним температурама се накнадно замарају. Ово је потребно урадити ради прецизнијег одређивања укупне дужине прслине. Потом се епрувете ломе, да би могле да се измере почетне ао и крајње дужине прслина а_f. С обзиром да фронт прслине није паралелан са улазном ивицом епрувете, мерења се врше дуж 5 до 7 паралелних мерних линија код епрувета испитаних на собној температури, и 3 до 5 мерења код епрувета испитаних на 575°С. Схема поступка мерења дужине прслине, као и сам уређај за мерење су дати на сл. 5.62.





Слика 5.62. Шема поступка и уређај за мерење дужине прслине

Дужина заморне прелине биће: $a_{zsr} = \frac{a_{z1} + a_{z2} + ...a_{zn}}{n}$. Укупна дужина прелине тада је: $a = a_o + a_{zsr}$ На основу добијених података конструише се Ј-∆а крива на којој се конструише регресиона линија према ASTM 1820-18 стандарду. Из добијене регресионе линије добија се критични Ј-интеграл, Ј_Iс. Познавајући вредности критичног Ј_Iс интеграла може се израчунати вредност критичног фактора интензитета напона или жилавост лома при равној деформацији, К_Iс, помоћу зависности:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_{Ic} \cdot E}{1 - v^2}}$$
(5.5)

Утицај температуре на склононост ка кртом лому ОМ, као и компоненти завареног споја МШ и ЗУТ је оцењиван одређивањем жилавости лома у условима равне деформације, односно критичне вредности фактора интензитета напона К_{Ic} Критична вредност фактора интензитета напона К_{Ic} је рађена применом методе једне епрувете сукцесивним оптерећењем и растерећењем.

На основу података прикупљених са кидалице (давача силе и COD давача), конструисани су дијаграми сила F-отварање врха прслине δ (CMOD). Ознака CMOD је скраћеница од Crack Mouth Opening Displacement која се преводи као отварање врха прслине. Ови дијаграми су подлога за одређивање критичне вредности J-интеграла, J_{IC}, а сам поступак се огледа у добијању R-криве, односно J-Δа криве, која се састоји од вредности J-интеграла за равномерне прираштаје прслине Δа.

5.11.1.Резултати одређивања К_{Iс} епрувета са зарезом у ОМ

Користећи једн. 5.5 израчунавају се вредности критичног фактора интензитета напона или жилавости лома при равној деформацији, КІс. Израчунате вредности критичног фактора интензитета напона, КІс, су дате у таб. 5.12 за епрувете са зарезом у ОМ, испитане на собној температури од 20°С и температури од 575°С.

Ознака Епрувете	Температура испитивања, °С	Критични Ј-интеграл, Ј _{Ic} , kJ/m ²	Критични фактор интензитета напона, K _{Ic} , MPa m ^{1/2}	Критична дужина прслине а _с , mm
OM - 1s		131,1	173,9	27,0
OM - 2s	20	144,2	182,4	29,7
OM - 3s		124,0	169,2	25,6
OM - 1p		78,5	122,9	45,3
OM - 2p	575	80,9	124,7	46,6
OM - 3p		81,9	125,5	47,2

Табела 5.12. Вредности К_{Ic} епрувета са зарезом у ОМ

Важно је напоменути да је у прорачуну за жилавост лома при равној деформацији, К_{Iс}, (једн. 5.5) коришћена једна вредност за модул еластичности на собној температури (210GPa), а друга вредност за повишене температуре (приближно 175GPa за 575°C). Применом основне формуле механике лома:

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c} \tag{5.6}$$

и уношењем вредности конвенционалног напона течења, $P_{p0,2} = \sigma$, могу се израчунати приближне вредности за критичну дужину прслине, ас. Дијаграми F-δ и J- Δ a за епрувете извађене из OM, дати су на сл. 5.63 до 5.65 за епрувете испитане на собној температури и на сл. 5.66 до 5.68 за епрувете испитане на 575°C.



Слика 5.63. Дијаграми F - δ (a) и J - ∆a (b) за епрувету ознаке ОМ - 1s



Слика 5.64. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке OM - 2s



Слика 5.65. Дијаграми F - δ (а) и J - Δа (b) за епрувету ознаке OM - 3s



Слика 5.66. Дијаграми F - δ (a) и J - ∆a (b) за епрувету ознаке ОМ - 1р



Слика 5.67. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке OM - 2p



Слика 5.68. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ОМ - 3р

Утицај температуре испитивања на вредности критичног, J_{Ic}, односно критичног фактора интензитета напона, К_{Ic} за епрувете са зарезом у ОМ је графички приказан на сл. 5.69, а утицај температуре испитивања на вредности критичне дужине прслине, а_c, је графички приказан на сл. 5.70.

На основу добијених резултата испитивања епрувета са зарезом у ОМ, види се да са повећањем температуре испитивања долази до смањења вредности критичног, J_{Ic} , интеграла, односно жилавости лома, K_{Ic} . Добијене вредности жилавости лома, K_{Ic} , епрувета са зарезом у ОМ, таб. 5.12, се крећу од 175МРа m^{1/2} добијене испитивањем на 20°С и опадају до 124МРа m^{1/2} добијене испитивањем на 575°С.

Критична дужина прслине, а_с, сл. 5.70, расте са повећањем температуре. Добијене вредности критичне дужине прслине, а_с, се крећу од од 27mm добијене испитивањем на 20°C и расту до 46mm на 575°C.



Слика 5.69. Промена вредности К_{Ic} у зависности од температуре испитивања код ОМ



Слика 5.70. Промена вредности а_с у зависности од температуре испитивања

код ОМ

5.11.2. Резултати одређивања К_{Iс} епрувета са зарезом у МШ

Израчунате вредности критичног фактора интензитета напона, К_{Ic}, су дате у таб. 5.13 за епрувете са зарезом у МШ, испитане на собној температури од 20°С и температури од 575°С. У прорачуну за жилавост лома при равној деформацији, К_{Ic} коришћена је једна вредност за модул еластичности на собној температури (210GPa), а друга вредност за повишене температуре (приближно 175GPa за 575°С).

Ознаке Епрувете	Температура испитивања, °С	Критични Ј-интеграл, Ј _{Ic} , kJ/m ²	Критични фактор интензитета напона, K _{Ic} , MPa m ^{1/2}	Критичн а дужина прслине а _с , mm
MIII - 1s		71,6	128,5	14,8
MIII - 2s	20	64,8	122,3	13,4
MIII - 3s		69,2	126,4	14,3
МШ - 1р		51,2	99,2	29,5
МШ - 2р	575	40,1	87,8	23,1
МШ - Зр		38,6	86,2	22,3

Табела 5.13. Вредности К_{Iс} епрувета са зарезом у МШ

Дијаграми F-δ и J-∆а за епрувете извађене из МШ, дати на сл. 5.71 до 5.73 за епрувете испитане на собној температури и на сл. 5.74 до 5.76 за епрувете испитане на 575°С.



Слика 5.71. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 1s



Слика 5.72. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке MШ - 2s



Слика 5.73. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 3s



Слика 5.74. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 1р



Слика 5.75. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 2p



Слика 5.76. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 3р

Утицај температуре испитивања на вредности критичног, J_{Ic}, односно критичног фактора интензитета напона, К_{Ic}, за епрувете са зарезом у МШ је графички приказан на сл. 5.77, а утицај температуре испитивања на вредности критичне дужине прслине а_c, је графички приказан на сл. 5.78.

На основу добијених резултата испитивања епрувета са зарезом у МШ, види се да са повећањем температуре испитивања долази до смањења вредности критичног, J_{Ic}, интеграла, односно жилавости лома, К_{Ic}. Добијене вредности жилавости лома, К_{Ic}, епрувета са зарезом у МШ, таб. 5.13 се крећу од 126МРа m^{1/2}

добијене испитивањем на 20°С и опадају до 91МРа m $^{1/2}$ добијене испитивањем на 575°С.

Критична дужина прслине, а_с, сл. 5.78, расте са повећањем температуре. Добијене вредности критичне дужине прслине, а_с, се крећу од од 14mm добијене испитивањем на 20°C и расту до 25mm на 575°C.



Слика 5.77. Промена вредности К_{Ic} у зависности од температуре испитивања

код МШ



Слика 5.78. Промена вредности ас у зависности од температуре испитивања

ΜШ

5.11.3.Резултати одређивања К_{Ic} епрувета са зарезом у ЗУТ

Израчунате вредности критичног фактора интензитета напона, K_{Ic} , су дате у таб. 5.14 за епрувете са зарезом у ЗУТ, испитане на собној температури од 20°С и температури од 575°С

Ознака епрувете	Температура испитивања, °С	Критични Ј-интеграл, Ј _{Ic} , kJ/m ²	Критични фактор интензитета напона, K _{Ic} , MPa m ^{1/2}	Критична дужина прслине а _с , mm
ЗУТ - 1s		97,6	150,1	20,1
ЗУТ - 2s	20	88,9	143,2	18,3
ЗУТ - 3s		92,1	145,8	19,0
ЗУТ - 1р		65,3	112,1	37,7
ЗУТ - 2р	575	61,6	108,8	35,5
ЗУТ - Зр		68,5	114,8	39,5

Табела 5.14. Вредности К_{Ic} епрувета са зарезом у ЗУТ

Дијаграми F-δ и J-∆а за епрувете извађене из ЗУТ, дати на сл. 5.79 до 5.81 за епрувете испитане на собној температури и на сл. 5.82 до 5.84 за епрувете испитане на 575°С.



Слика 5.79. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 1s



Слика 5.80. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 2s



Слика 5.81. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 3s



Слика 5.82. Дијаграми F - δ (а) и J - ∆а (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 1р



Слика 5.83. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 2p



Слика 5.84. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 3р

И у овом случају је важно напоменути да је у прорачуну за жилавост лома при равној деформацији, К_{Iс}, (једн. 5.5) коришћена једна вредност за модул еластичности на собној температури (210GPa), а друга вредност за повишене температуре (приближно 175GPa за 575°C). Применом основне формуле механике лома (једн. 3.6), и уношењем вредности конвенционалног напона течења $R_{p0.2} = \sigma$, израчунате су приближне вредности за критичну дужину прслине а_с.

Утицај температуре испитивања на вредности критичног, J_{Ic}, односно критичног фактора интензитета напона, К_{Ic}, за епрувете са зарезом у ЗУТ је графички приказан на сл. 5.85, а утицај температуре испитивања на вредности критичне дужине прслине, а_c, је графички приказан на сл. 5.86.



Слика 5.85. Промена вредности К_{Ic} у зависности од температуре испитивања

код ЗУТ



Слика 5.86. Промена вредности а_с у зависности од температуре испитивања код ЗУТ

На основу добијених резултата испитивања епрувета са зарезом у ЗУТ, види се да са повећањем температуре испитивања долази до смањења вредности критичног, J_{Ic} , инеграла, односно жилавости лома, K_{Ic} . Добијене вредности жилавости лома, K_{Ic} , епрувета са зарезом у ЗУТ, таб. 5.14 се крећу од 146Мра m^{1/2} добијене испитивањем на 20°С и опадају до 112МРа m^{1/2} добијене испитивањем на 575°С. Критична дужина прслине, a_c , сл. 5.86, расте са повећањем температуре. Добијене вредности критичне дужине прслине, a_c , се крећу од 019mm добијене испитивањем на 20°С и отадају до 38mm на 575°С.

Најслабија отпорност према развоју прслине при статичком деловању силе, односно, најмања вредност К_{Ic}, је код епрувета са зарезом у МШ, а најбоља отпорност према развоју прслине је код епрувета са зарезом у ОМ. Вредности критичне дужине прслине, а_c, расту са повећањем температуре. Највеће вредности добијене су код епрувета са зарезом у ОМ, а најмање код епрувета са зарезом у МШ.

5.12. Динамичка испитивања завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91

Може се тврдити да је са систематским динамичким испитивањима, односно испитивањем при деловању променљивог оптерећења започео Велер и да је велики број истраживача уложио значајне напоре да се бројни параметри, од којих зависи заморно понашање материјала, експериментално анализирају, [118]. До данас су нека од тих испитивања обухваћена стандардима, који су због сложене међузависности утицајних фактора ипак само основа за даља испитивања. Према облику епрувета и делова, који се испитују, динамичка испитивања се могу поделити у три основне групе:

- Испитивање глатких епрувета одређивање трајне динамичке чврстоће, односно одређивање динамичке чврстоће при одређеном броју циклуса који за заварене спојеве износи 2x10⁶ циклуса;
- Испитивање епрувета са зарезом одређивање параметара механике лома, и
- Испитивање готових конструкцијских облика.

Испитивања епрувета у односу на заморно понашање могу да се изводе са два основна циља: да се добију стандардни подаци или да се истражује утицај једног или више параметра заморног понашања. При испитивању коначних конструкцијских облика је по правилу циљ да се провери успешност конструкције у односу на делујуће променљиво оптерећење.

5.12.1.Испитивања променљивим оптерећењем

Утицај температуре на понашање сучеоно завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91 у условима деловања променљивог оптерећења је рађено са циљем да се одреде тачке у S-N дијаграму (конструисања Велерове криве) и да се одреди динамичка чврстоћа, S_f. Из S-N дијаграма се може одредити напон при коме не долази до појаве прслине на глаткој епрувети ни после 2х10⁶ циклуса, односно

дефинисаног броја циклуса при којој се одређује динамичка чврстоћа завареног споја. Стандард за ова испитивања предвиђа велики број епрувета (минимум по 3 за одређену амплитуду при константном односу оптерећења R). Због тога је ово испитивање изузетно скупо и оправдано када су потребни подаци за пројектовање, првенствено са аспекта замора и механике лома, значи када се пројектују делови изложени дуготрајном променљивом оптерећењу у укупном пројектном веку конструкције.

Поступак испитивања, као и епрувета за испитивање дефинисани су стандардом EN 6072-10 "Aerospace series - Metallic materials - Test methods - Constant amplitude fatigue testing", [119], као и препорукама струковних међународних организација овлашћених да дефинишу услове провере квалитета заварених спојева. Скица епрувете је дата на сл. 5.87, а изглед готових епрувета за испитивање променљивим оптерећењем је дат на сл. 5.88.



Слика 5.87. Епрувета за динамичка испитивања према стандарду EN 6072:2010



Слика 5.88. Изглед готових епрувета за динамичка испитивања

Само испитивање је рађено на сервохидрауличној машини SHIMADZU, sl. 5.89 на собној температури и при влажности ваздуха од 65%, као и на 575°С.



Слика 5.89. Сревохидраулична машина SHIMADZU

Сервохидраулична машина SHIMADZU може да оствари синусоидално наизменично променљиво оптерећење у опсегу од -100kN до +100kN. Средње оптерећење и амплитуда оптерећења је регистрована са тачношћу ± 20 N. Остварена учестаност је дефинисана на нивоу од 45Hz за испитивање на собној температури и 30Hz за испитивање на 575°C. У циљу потпуније оцене понашања материјала при дејству променљивог оптерећења, а имајући у виду димензије епрувете, рађен је најкритичнији случај деловања променљивог оптерећења, и то наизменично промењиво оптерећење затезање-притисак (R = -1). Схема деловања променљивог оптерећења је дата на сл. 5.90.

При овом испитивању се по правилу само утврђује број промена оптерећења до лома при дејству оптерећења константног распона, и захтева се само податак о величини напона при којој не долази до лома после 2x10⁶ циклуса.



Слика 5.90. Схема наизменично променљивог оптерећења, R = -1

Утицај температуре на вредности трајне динамичке чврстоће, S_f, односно максималног динамичког напона при којем не долази до иницијације грешке типа прслине код глатких епрувета, је приказан графички у облику Велерових кривих (S-N дијаграми) на сл. 5.91 за епрувете сучеоно завареног споја, а на сл. 5.92 за епрувете ОМ.



Слика 5.91. S-N дијаграм епрувета извађених из сучеоно завареног споја и испитаних на собној температури и на 575°C



Слика 5.92. S-N дијаграм епрувета извађених из основног метала (OM) и испитаних на собној температури и на 575°C

Анализирајући добијене резултате испитивања високоцикличног замора глатких епрувета са циљем конструисања Велерове криве и одређивања трајне динамичке чврстоће, видимо да температура испитивања значајно утиче на добијене вредности динамичке чврстоће при 2х10⁶ циклуса, што је и приказано на сл. 5.93.



Слика 5.93. Промена вредности динамичке чврстоће Sf при 2x10⁶ циклуса у

зависности од температуре испитивања

Са повећањем температуре испитивања долази до пада вредности динамичке чврстоће при $2x10^6$ циклуса и код основног метала и код завареног споја. Динамичка чврстоћа, S_f, основног метала на собној температури је 490MPa, а на 575°C је 226MPa. Код завареног споја је ситуација слична, на собној температури је 445MPa, а на 575°C је 205MPa.

Код испитивања епрувета основног метала на собној температури, имамо да нам је однос вредности динамичке чврстоће при $2x10^6$ циклуса и вредности напона течења, 0,82, односно добијена вредност динамичке чврстоће представља 82% вредности напона течења. Код испитивања епрувета завареног споја на собној температури, имамо да нам је однос вредности динамичке чврстоће при $2x10^6$ циклуса и вредности напона течења, 0,75, односно добијена вредност динамичке чврстоће представља 75% вредности напона течења.

Када је у питању заварени спој, овај однос је врло задовољавајући, односно вредност динамичке чврстоће од 445 MPa је доста висока, узимајући у обзир потенцијалну хетерогеност структурних и механичких особина завареног споја. У прилог ових резултата иде место лома епрувета. Наиме, све поломљене епрувете, испитане на оптерећењима већим од оптерећења динамичке чврстоће завареног споја су пукле или у ЗУТ или у МШ, а епрувете испитане на оптерећењима блиским оптерећењу динамичке чврстоће завареног споја су пукле у ЗУТ. Повећањем температуре испитивања долази до смањења вредности динамичке чврстоће при 2х10⁶ циклуса. И у овом случају епрувете завареног споја испитане на оптерећењима већим од оптерећења динамичке чврстоће при 2х10⁶ циклуса. И у овом случају епрувете завареног споја со ја испитане на оптерећењима већим од оптерећења динамичке чврстоће завареног споја су пуцале или у ЗУТ или у МШ.

Отпорност на иницијацију прслине са повећањем температуре опада, односно склоност ка лому се повећава. То је израженије код завареног споја него код основног метала. Ови резултати као и резултати затезних испитивања упућују на закључак да је утицај температуре испитивања већи код динамичких испитивања. него код статичких испитивања, [120, 121, 122].

5.12.2.Одређивање параметара раста заморне прслине

Раст прелине под утицајем променљивих оптерећења која су мања од оптерећења квазистатичког лома назива се замор материјала. Највећи број

оштећења и испада из погона делова и конструкција током експлоатације се догађа као последица замора материјала, што изискује појаву грешке типа прслине. У низу ситуација оштећења се могу приписати стању материјала, али су многа оштећења последица лоших конструкцијских решења. То значи да склоност ка замору дела машине или конструкције не зависи само од издржљивости на замор материјала од које је део израђен већ и од његове геометрије. Према томе, када се као задатак поставља повећање издржљивости неке машине или конструкције на замор, треба имати у виду да само избор издржљивијег материјала од којих су делови направљени није довољан, а често је и неефикасан и да нова конструкцијска решења представљају бољу алтернативу.

Грешке у металима и разни облици концентратора напрезања (зарези, жлебови, отвори, заварени и механички спојеви) у елементима се не могу избећи. Због тога се период до иницирања заморне прслине, N_i, са становишта укупног века замора до појаве лома, N_u, може занемарити. С обзиром да се на брзину раста макроскопске прслине не може утицати променом структуре, то преостаје да се за дати материјал епрувете или елемента одреди брзина раста прслине у лабораторијским условима и да се, након што се повременим инспекцијама одреди величина прслине, процени преостали век дела машине или конструкције. Могућност за ову процену пружају поставке линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ).

Концепт ЛЕМЛ се може применити и за одређивање раста прслине при замору, [123]. Теоретска потврда је базирана на такозваном концепту сличног понашања када су услови на врху прслине једнозначно дефинисани само преко једног параметра оптерећења као што је фактор интензитета напона, К. За случај стационарне прслине то значи да ће до лома две различите конфигурације од истог материјала доћи при истој, критичној, вредности К-фактора, К_с. Под одређеним условима се К-фактор може применити и за описивање раста прслине услед замора.

Основни напредак који је механика лома направила у сфери замора материјала је у аналитичком расчлањивању феномена лома услед замора на период стварања, у коме заморна прслина настаје, и на период раста или ширења који му следи и у коме се настала прслина повећава до критичне величине при којој долази до наглог лома. Тиме се укупан број циклуса, N_u, после кога долази до лома, дели

на број циклуса потребних да заморна прслина настане, N_i, и број циклуса да она порасте до критичне величине за лом, N_p, односно:

$$N_u = N_i + N_p. \tag{5.7}$$

Анализа стања напона и деформација на врху растуће заморне прслине поступцима линеарно-еластичне механике лома (ЛЕМЛ) је довела до формулисања Парисове једначине за све метале и легуре, која доводи у везу брзину раста заморне прслине са опсегом фактора интензитета напона на врху прслине, [124, 125]. Иако Парисова једначина раста прслине не важи у читавом подручју, између малих брзина у близини прага замора (на сл. 4.24), и високих брзина (К_{Iс}), велики линеарни средњи део криве покривен Парисовом релацијом се са практичне тачке гледања показао далеко најважнијим јер истовремено допушта да се направи разлика између иницијације и раста заморне прслине ΔК_{th}. Примена Парисове једначине се показала нарочито плодоносном у подручју замора конструкција израђених од материјала повишене и високе чврстоће.

Како конструкција под одређеним условима неће бити угрожена док прслина не достигне критичну величину, може се, уз претходне анализе, допустити експлоатација конструкције са прслином и у периоду раста прслине. Битан податак за одлуку о даљој експлоатацији је познавање брзине раста прслине и њене зависности од делујућег оптерећења. Стандард ASTM E647-15e1, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", [126], прописује мерење брзине раста заморне прслине, da/dN, која се развија из постојеће прслине и прорачун опсега фактора интензитета напона, ΔK , што значи да епрувета треба да има заморну прслину.

Испитивање на собној температури у циљу одређивања брзине раста заморне прслине, da/dN, и прага замора, ∆К_{th}, изведено је на стандардним Шарпи епруветама методом савијања епрувете у три тачке на резонантном високофреквентном пулзатору, сл. 5.94. Само испитивање је рађено у контроли силе. Овај пулзатор остварује синусоидално наизменично променљиво моментно оптерећење у опсегу од -160 до +160Nm.



Слика 5.94. Савремени систем за динамичка испитивања

Уређај је саставни део мерно-аквизиционог система, чиме се омогућава аутоматизација мерења и директно прикупљање и обрада добијених података. Испитивање је обављено при истом односу минималног и максималног оптерећења R=-1. Остварена учесталост се кретала у опсегу од 195 до 215Hz у зависности од тога да ли је прслина пролазила кроз основни метал, метал шава или зону утицаја топлоте и од величине оптерећења. Средње оптерећење и његова амплитуда је регистрована са тачношћу ±3Ncm.

Епрувете су пре испитивања механички припремљене и на тако припремљене епрувете су залепљене мерне траке-фолије помоћу којих је праћен прираштај прслине. За испитивање су коришћене мерне фолије RMF A-5 мерне дужине 5mm. Да би се могао пратити раст прслине помоћу мерне фолије, коришћен је уређај за регистровање прираштаја прслине FRACTOMAT, [127]. Систем за мерење прираштаја прслине, FRACTOMAT и мерна фолија су базирани да региструју промену електричног отпора мерне фолије. Како заморна прслина расте испод мерне фолије, мерна фолија пуца пратећи врх заморне прслине и обезбеђује промену отпора фолије која варира линеарно са променом дужине прслине. Схема рада система за мерење прираштаја прслине FRACTOMAT-мерна фолија је приказана на сл. 5.95, [127].





Изглед једне групе припремљених епрувета за одређивање параметара раста заморне прслине је дат на сл. 5.96.

Испитивање на температури од 575°С, у циљу одређивања брзине раста заморне прслине, da/dN, и прага замора, изведено је на модификованим СТ епруветама (сл. 5.97) на високофреквентном пулзатору. Само, ΔK_{th} , испитивање је рађено у контроли силе. У циљу потпуније оцене понашања материјала при дејству променљивог оптерећења, а имајући у виду димензије епрувете, рађен је критични случај деловања променљивог оптерећења, и то позитивно променљиво оптерећење (R= 0,1).





Слика 5.96. Епрувете за испитивање параметара раста заморне прслине

Слика 5.97. Модификована СТ епрувета за испитивање на повишеним температурама

Одређивање зависности брзине раста заморне прслине, da/dN, и опсега фактора интензитета напона, ΔK, се своди на одређивање коефицијента C и експонента m y једначини Париса. Брзини раста заморне прслине треба за тренутну дужину прслине, а, приписати опсег фактора интензитета напона, ΔK, који зависи

од геометрије епрувете и дужине прслине, и од опсега променљиве силе, $\Delta F = F_g - F_d$. За одређивање опсега фактора интензитета напона користи се формула:

$$\Delta K = \frac{\Delta F \cdot L}{B\sqrt{W^3}} \cdot f(a/W)$$
(5.8)

где је: L - распон ослонаца, mm;

- В дебљина епрувете, mm;
- W ширина (висина) епрувете, mm, и
- А дужина прелине.

Геометријски члан f (a/W) дат је изразом:

$$f(a/W) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a}{W}} \cdot \left[1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right)\right]}{2 \left(1 + 2\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$
(5.9)

Важни подаци у оцени понашања материјала са грешком типа прслине у условима деловања променљивог оптерећења се добијају одређивањем параметара раста заморне прслине. Утицај температуре на параметре раста заморне прслине је анализиран испитивањем ОМ, као и компоненти завареног споја, МШ и ЗУТ. Испитиване су три групе епрувета у зависности од места врха прслине, и то:

- I група епрувете са врхом прслине у ОМ;
- II група епрувете са врхом прслине у МШ, и
- III група епрувете са врхом прслине у ЗУТ.

На основу тока испитивања и добијених зависности дужина прелине а, број циклуса N, израчунава се брзина раста заморне прелине, da/dN. У зависности од примењеног променљивог оптерећења исказаног кроз промену опсега фактора интензитета напона ΔK , цртају се криве, log da/dN-log(ΔK).

5.12.2.1 Одређивање параметара раста заморне прслине код епрувета са врхом заморне прслине у ОМ

Испитивањем на епруветама са врхом прслине у ОМ, добијене су вредности параметара Парисове једначине, коефицијента, С, и експонента, m, прага замора,

 ΔK_{th} , и брзине раста заморне прслине, da/dN, при вредности ΔK =25MPa m^{1/2}, и дате су у таб. 5.15.

Ознака епрувете	Температура испитивања, °С	Праг замора, ΔK _{th} , MPa m ^{1/2}	Коефицијент, С	Експонент, т	da/dN, mm/ciкl, при ∆K=25M Pa m ^{1/2}
OM - 1s	20	17,6	$3,56 \cdot 10^{-13}$	3,69	$5,13 \cdot 10^{-8}$
OM - 2s		17,4	$2,31 \cdot 10^{-13}$	3,88	6,13 · 10 ⁻⁸
OM - 3s		16,9	$1,08 \cdot 10^{-13}$	3,33	$4,88 \cdot 10^{-8}$
OM - 1p	575	13,9	6,00 · 10 ⁻¹²	3,22	1,90 · 10 ⁻⁷
OM - 2p		14,1	$5,49 \cdot 10^{-12}$	3,18	$1,53 \cdot 10^{-7}$
OM - 3p		14,4	3,00 · 10 ⁻¹¹	2,65	$1,52 \cdot 10^{-7}$

Табела 5.15. Параметри раста заморне прслине за епрувете са зарезом у ОМ

Карактеристични дијаграми брзина раста заморне прелине, da/dN-промена опсега фактора интензитета напона, ΔK , за епрувете са врхом заморне прелине у ОМ и испитане на собној температури су дати на сл. 5.98 do 5.100, а на температури од 575°C приказани су на сл. 5.101 do 5.103.



Слика 5.98. Дијаграм зависности da/dN - ∆К епрувете ОМ - 1s



Слика 5.99. Дијаграм зависности da/dN - ∆К епрувете ОМ - 2s



Слика 5.100. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ОМ - 3s



Слика 5.101. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ОМ - 1р


ак, MPa m^{1/2} Слика 5.102. Дијаграм зависности da/dN - ΔK епрувете OM - 2p



Слика 5.103. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ОМ - 3р

Утицај места постављања зареза и иницијације прелине, као и температура испитивања, имају одлучујући утицај на вредности прага замора, ΔK_{th} . За епрувете са врхом заморне прелине у ОМ је то графички приказано на сл. 5.104. Вредности прага замора, ΔK_{th} , се крећу од 17,3МРа m^{1/2} на 20°С и падају до 14,1МРа m^{1/2} на 575°С.



Слика 5.104. Промена вредности ΔKth код ОМ

Утицај температуре испитивања на брзину раста заморне прслине, da/dN, код епрувета са зарезом у OM је графички приказан на сл. 5.105.



Слика 5.105. Промена da/dN у зависности од температуре код епрувета са

зарезом у ОМ

Утицај структуре ОМ на брзину раста заморне прслине, da/dN, је у директној вези са одређеним параметрима Парисове једначине, коефицијента С и експонента m. За анализу смо узели вредност опсега фактора интензитета напона $\Delta K=25$ MPa m^{1/2}, односно вредност на дијаграмима зависности da/dN- ΔK која се налази у делу стабилног раста прслине у коме важи Парисов закон. Брзина раста заморне прслине расте са повећањем температуре и креће се од 5,38·10⁻⁸mm/cikl., за епрувете са зарезом у ОМ и испитане на собној температури, до 1,65·10⁻⁷ mm/cikl., на 575°C.

5.12.2.2 Одређивање параметара раста заморне прслине код епрувета са врхом заморне прслине у МШ

Испитивањем на епруветама са врхом прслине у МШ, добијене су вредности параметара Парисове једначине, коефицијента, С, и експонента, m, прага замора, ΔK_{th} , и брзине раста заморне прслине, da/dN, при вредности $\Delta K=25$ MPa m^{1/2}, и дате су у таб. 5.16.

Ознака епрувете	Температура испитивања, °С	Праг замора, ΔK _{th} , MPa m ^{1/2}	Коефицијент, С	Експонент, т	da/dN, mm/cikl, при ΔK=25M Pa m ^{1/2}
MIII - 1s	20	16,5	5,93 · 10 ⁻¹¹	2,47	$1,\!68\cdot 10^{-7}$
MIII - 2s		14,3	$2,15 \cdot 10^{-12}$	3,46	$1,\!48 \cdot 10^{-7}$
MIII - 3s		17,2	$1,76 \cdot 10^{-11}$	2,79	$1,40 \cdot 10^{-7}$
MIII - 1p	575	12,4	6,68 · 10 ⁻¹⁰	2,31	$1,13 \cdot 10^{-6}$
MIII - 2p		13,1	$2,59 \cdot 10^{-11}$	3,46	$1,78 \cdot 10^{-6}$
МШ - Зр		11,6	$1,74 \cdot 10^{-10}$	2,80	1,43 · 10 ⁻⁶

Табела 5.16. Параметри раста заморне прслине за епрувете са зарезом у МШ

Карактеристични дијаграми брзина раста заморне прелине, da/dN-промена опсега фактора интензитета напона, ΔK, за епрувете са врхом заморне прелине у МШ и испитане на собној температури су дати на сл. 5.106 до 5.108, а на температури од 575°C приказани су на сл. 5.109 до 5.111.



Слика 5.106. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 1s



Слика 5.107. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 2s



Слика 5.108. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 3s



Слика 5.109. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 1р



Слика 5.110. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 2р



Слика 5.111. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 3р

Такође, и код епрувета са врхом заморне прслине у МШ види се утицај места постављања зареза и иницијације прслине, као и температуре испитивања, на вредности прага замора, ΔK_{th} . То се за епрувете са зарезом у МШ јасније види графички на сл. 5.112. Вредности прага замора, ΔK_{th} , добијене испитивањем епрувета са заморном прслином у МШ се крећу од 16,0МРа m^{1/2} одређеног на 20°С и опадају до 12,4МРа m^{1/2} на 575°С. Утицај температуре испитивања на брзину раста заморне прслине, da/dN, код епрувета са зарезом у МШ је графички приказан на сл. 5.113.



Слика 5.113. Промена da/dN у зависности од температуре код епрувета са

зарезом у МШ

Брзина раста заморне прслине расте са повећањем температуре и креће се од $1,52 \cdot 10^{-7}$ mm/cikl. за епрувете са врхом заморне прслине у МШ испитаних на 20° C, do $1.44 \cdot 10^{-6}$ mm/cikl. на 575° C.

5.12.2.3 Одређивање параметара раста заморне прслине код епрувета са врхом заморне прслине у ЗУТ

Испитивањем на епруветама са врхом прелине у ЗУТ, добијене су вредности параметара Парисове једначине, коефицијента, С, и експонента, m, прага замора, ΔK_{th} , и брзине раста заморне прелине, da/dN, при вредности $\Delta K=25$ MPa m^{1/2}, и дате су у таб. 5.17.

Ознака епрувете	Температура испитивања, °С	Праг замора, ΔK _{th} , MPa m ^{1/2}	Коефицијент, С	Експонент, т	da/dN, mm/cikl, при ∆K=25MPa m ^{1/2}
ЗУТ - 1s	20	17,2	$3,33 \cdot 10^{-13}$	3,88	8,84 · 10 ⁻⁸
ЗУТ - 2s		17,4	$1,78 \cdot 10^{-13}$	4,06	$8,43 \cdot 10^{-8}$
ЗУТ - 3s		17,7	4,03 · 10 ⁻¹³	3,77	7,51 · 10 ⁻⁸
ЗУТ - 1р	575	13,9	$1,69 \cdot 10^{-10}$	2,33	3,06 · 10 ⁻⁷
ЗУТ - 2р		13,7	$2,60 \cdot 10^{-10}$	2,20	$3,09 \cdot 10^{-7}$
ЗУТ - Зр		14,3	$2,19 \cdot 10^{-10}$	2,23	$2,87 \cdot 10^{-7}$

Табела 5.17. Параметри раста заморне прслине за епрувете са зарезом у ЗУТ

Карактеристични дијаграми брзина раста заморне прелине, da/dN-промена опсега фактора интензитета напона, ΔK, за епрувете са врхом заморне прелине у ЗУТ и испитане на собној температури су дати на сл. 5.114 до 5.116, а на температури од 575°C приказани су на сл. 5.117 до 5.119.



Слика 5.114. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 1s



Слика 5.115. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 2s



Слика 5.116. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 3s



Слика 5.117. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 1р



Слика 5.118. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 2р



Слика 5.119. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 3р

Код епрувета са врхом заморне прслине у ЗУТ види се утицај места постављања зареза и иницијације прслине, као и температуре испитивања, на вредности прага замора, ΔK_{th} . То се за епрувете са зарезом у ЗУТ јасније види графички на сл. 5.120. Вредности прага замора, ΔK_{th} , добијене испитивањем епрувета са заморном прслином у ЗУТ се крећу од 17,4МРа m^{1/2} одређеног на 20°С и падају до 14,0МРа m^{1/2} на 575°С.



Утицај температуре испитивања на брзину раста заморне прслине, da/dN, код епрувета са зарезом у МШ је графички приказан на сл. 5.121.

Брзина раста заморне прслине расте са повећањем температуре и креће се од $8,26 \cdot 10^{-8}$ mm/cikl., за епрувете са врхом заморне прслине у ЗУТ испитаних на 20°С, до $3.00 \cdot 10^{-7}$ mm/cikl., на 575°С.



Слика 5.121. Промена da/dN у зависности од температуре код епрувета са зарезом у ЗУТ

Најлошију отпорност на пропагацију прслине, односно највећу брзину раста заморне прслине, da/dN имају епрувете са прслином у МШ, а најбољу отпорност на пропагацију прслине, односно најмању брзину раста заморне прслине, da/dN имају епрувете са прслином у ОМ. Највећу вредност прага замора ΔK_{th} , односно најбољу отпорност да при овој вредности не дође до раста већ постојеће прслине, имају епрувете са врхом заморне прслине у ОМ и ЗУТ. Најнижу вредност прага замора имају епрувете са врхом прслине у МШ. Епрувете са врхом заморне прслине у ЗУТ, имају блиске вредности епруветама ОМ, што се доводи у везу са добро изабраном технологијом заваривања.

5.13. Фрактографски преглед преломних површина

Карактеристични изглед преломних површина Шарпи епрувета, испитаних на скенинг електронском микроскопу, приказан је микрофотографијама на сл. 5.122, сл. 5.123 и сл. 5.124. на којима се може уочити и механизам лома за три подручја завареног споја (ОМ, МШ, ЗУТ) на 20°С и на 575°С, [128].



Слика 5.122. SA 387 Gr. 91, ОМ фрактографија, (а) стварање прслине, 575 °C; (b) ширење прслине, 575 °C; (c) стварање прслине, 20 °C; (d) ширење прслине, 20 °C



Слика 5.123. SA 387 Gr. 91, МШ фрактографија, (а) стварање прслине, 575 °C; (b) ширење прслине, 575 °C; (c) стварање прслине, 20 °C; (b) ширење прслине, 20 °C.



Слика 5.124 . SA 387 Gr. 91, ЗУТ фрактографија, (а) стварање прслине, 575 °C; (b) ширење прслине, 575 °C; (c) стварање прслине, 20 °C; (b) ширење прслине, 20 °C.

Јасно је да само сл. 5.122 а, сл. 5.123 а и сл. 5.124 а, које представљају процес иницирања прслине на 575°С, не показују потпуно дуктилне површине лома, што је у складу са нижим енергијама забележеним за иницијацију прслине у овим узорцима (42, 28, и 40J). Међутим, ни они не представљају крте ломове, све фрактографије показују високу отпорност на настанак и ширење прслине.

Разлике у вредностима K_{lc} између различитих зона завареног споја челика SA 387 Gr. 91, показују приказане фрактографије, сл. 5.125, сл. 5.126 и сл. 5.127, и указују на довољно дуктилан материјал. Чак и у случају МШ на 575 °C (као што је приказано на сл. 5.126 b), који изгледа као крта фрактура, установљено је да је ово заправо "локално крто подручје" (ЛКП), што није неуобичајено за МШ, посебно ако је у питању легирани челик. Иста фрактографија, али са увећањем од 200 ×, приказана је на сл. 5.128, која такође указује на неке типичне карактеристике дуктилног лома, [128].



Слика 5.125 SA 387 Gr. 91 ОМ фрактографија, а) SEB епрувета 20 °C, (b) CT епрувета 575 °C, 1,500×



Слика 5.126 SA 387 Gr. 91 МШ, фрактографија a) SEB епрувета 20 °C, (b) CT епрувета 575 °C, 1,500×



Слика 5.127 SA 387 Gr. 91 ЗУТ, фрактографија а) SEB епрувета 20 °C, (b) CT епрувета 575 °C, 1,500×



Слика 5.128 SA 387 Gr. 91 МШ, фрактографија, СТ епрувета 575 °C, 200×

6. ЗАКЉУЧАК

У овом поглављу је дат кратак осврт на анализу резултата већ дату у оквиру сваког урађеног истраживања. На основу урађених експерименталних испитивања, обављене анализе и дискусије може се закључити следеће:

- Анализирајући резултате затезања епрувета сучеоно завареног споја, види се да са повећањем температуре испитивања долази до смањења особина чврстоће и деформације. Опадају вредности напона течења и затезне чврстоће, као и издужења. Све испитиване епрувете су пукле у ОМ.
- Резултати испитивања епрувета извађених из заварених лимова савијањем, указују на квалитетно изведено заваривање, јер при достизању угла савијања од 180° није дошло до појаве прелина. На основу резултата испитивања и њихове анализе можемо закључити да је изабрана технологија заваривања добра, и да су резултати испитивања достављених узорака заварених лимова легираног челика SA 387 Gr. 91 задовољавајући.
- Анализирајући добијене вредности тврдоће, јасно се види да су највеће измерене вредности у МШ. Идући од МШ преко ЗУТ ка ОМ, тврдоћа бележи постепено уравнотежење, односно врло мала је разлика у вредностима тврдоће у ЗУТ и ОМ.
- Структура ОМ је отпуштени ламеларни мартензит. На појединим границама претходних аустенитних зрна уочено је присуство издвојених крупнијих карбида. Структура у ЗУТ одговара отпуштеном мартензиту. Структура у МШ одговара отпуштеном мартензиту, уочавају се границе примарних аустенитних зрна. Висок садржај Сг доприноси отпорности на корозију и способност деформације, али неповољно утиче на ударну жилавост. Исто се односи и на жилавост лома која је уско повезана са ударном жилавости. Тамо где су ниже вредности ударне жилавости ту су и мање вредности жилавости лома, односно где су мале енергије удара то је већа кртост. Металуршки то значи да су присутни талози и карбиди, поготово ванадијумови карбиди који су најкртији.

- Укупна енергија удара зависи од места урезивања зареза и температуре. Највећу вредност укупне енергије удара Auk, имају епрувете са зарезом у ОМ, нешто нижу вредност имају епрувете са зарезом у ЗУТ, а најмању вредност укупне енергије удара имају епрувете са зарезом у МШ. Главни утицај на вредности укупне енергије удара, као и на компоненте, енергију стварања прслине и енергију ширења прслине, има температура испитивања, јер је она уско повезана са пластичним особинама испитиваног материјала.
- Вредности К_{Ic} зависе од температуре испитивања и места постављања зареза. Са повећањем температуре опада жилавост лома при равној деформацији К_{Ic}. Најслабија отпорност према развоју прслине при статичком деловању силе, односно, најмања вредност К_{Ic}, је код епрувета са зарезом у МШ, а најбоља отпорност према развоју прслине је код епрувета са зарезом у ОМ. Вредности критичне дужине прслине, а_c, расту са повећањем температуре. Највеће вредности добијене су код епрувета са зарезом у ОМ, а најмање код епрувета са зарезом у МШ.
- Отпорност на иницијацију прслине са повећањем температуре опада, односно склоност ка лому се повећава. То је израженије код завареног споја него код основног метала. Ови резултати као и резултати затезних испитивања упућују на закључак да је утицај температуре испитивања већи код динамичких него код статичких испитивања. Када је у питању заварени спој, вредност динамичке чврстоће је доста висока, узимајући у обзир потенцијалну хетерогеност структурних и механичких особина завареног споја. У прилог ових резултата иде место лома епрувета. Наиме, све поломљене епрувете, испитане на оптерећењима већим од оптерећења динамичке чврстоће завареног споја су пукле или у ЗУТ или у МШ, а епрувете испитане на оптерећењима блиским оптерећењу динамичке чврстоће завареног споја су пукле у ЗУТ. Повећањем температуре испитивања долази до смањења вредности динамичке чврстоће при 2x10⁶ циклуса. И у овом случају епрувете завареног споја испитане на оптерећењима већим од оптерећења динамичке чврстоће завареног споја су пуцале или у ЗУТ или у МШ.

 Најлошију отпорност на пропагацију прслине, односно највећу брзину раста заморне прслине, da/dN имају епрувете са прслином у МШ, а најбољу отпорност на пропагацију прслине, односно најмању брзину раста заморне прслине, da/dN имају епрувете са прслином у ОМ. Највећу вредност прага замора ΔK_{th}, односно најбољу отпорност да при овој вредности не дође до раста већ постојеће прслине, имају епрувете са врхом заморне прслине у ОМ и ЗУТ. Најнижу вредност прага замора имају епрувете са врхом прслине у МШ. Епрувете са врхом заморне прслине у ЗУТ, имају блиске вредности епруветама ОМ, што се доводи у везу са добро изабраном технологијом заваривања.

Основни допринос ове дисертације, представљају резултати обимних експерименталних истраживања као и њихова каснија имплементација. Треба још једном поменути да су компоненте завареног споја челика SA 387 Gr. 91 показале добру отпорност на раст заморне прелине, као и жилавост. Тиме је потврђена добро изабрана технологија заваривања.

Увид у резултате ових истраживања, посебно у оне који се односе на раст заморне прелине, може представљати добру основу за даља истраживања, и да се искористи како би се прецизније проценио интегритет компоненти процесне опреме са завареним спојевима од овог челика. Правац даљих истраживања требало би да буде и допуна процедуре оцене интегритета коришћењем нумеричких метода прорачуна. Овде се пре свега мисли на процес израде одговарајућих нумеричких модела заснованих на експериментално добијеним резултатима и нумеричку симулацију раста заморне прслине. Методом коначних елемената (МКЕ) могуће је дефинисати и критична места у експлоатацији, односно извршити прорачун статичког, динамичког и термичког понашања компоненти процесне опреме.

ЛИТЕРАТУРА

- I. Čamagić, Z. Burzić, "*Eksperimentalno istraživanje rasta zamorne prsline u zavarenom spoju*", Monografija, Društvo za integritet i vek konstrukcija Prof. Dr. Stojan Sedmak, Beograd, 2017.
- [2] A. Sedmak, "Primena mehanike loma na integritet konstrukcije", Monografija, Mašinski fakultet, Beograd, 2003.
- [3] BS 7910-19, "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures", BSI, ISBN: 978 0 580 52086 0, 2019.
- [4] H.G. Pisarski, K. Wallin, "The SINTAP Fracture Toughness Estimation Procedure", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 67, No. 6, 2000, pp. 613-624.
- [5] S. Webster, A. Banniste "Structural integrity assessment procedure for Europe of the SINTAP programme overview", Engineering Fracture Mechanics, Vol. <u>67, No. 6</u>, 2000, pp. 481-514.
- [6] G. Junak, M. Cieśla, "Low-cycle fatigue of P91 and P92 steels used in the power engineering industry", Archieves of Materials Science and Engineering, Vol. 48, No. 1, 2011, p. 19-24.
- [7] A.A. Saad, C.J. Hyde,W. Sun & T.H. Hyde, "Thermal-mechanical fatigue simulation of a P91 steel in a temperature range of 400–600°C", Journal of <u>Materials at High Temperatures</u>, Vol. 28, No. 3, 2011, p. 212-218.
- [8] <u>R. Pohja, S. Holmström, P. Auerkari, A. Nurmela, "Predicted life of P91 steel for cyclic high temperature service</u>", Journal of <u>Materials at High Temperatures</u>, Vol. 34, No. 5-6, 2017, p. 301-310.
- [9] S. Maleki, Y. Zhang, K. Nikbin, "Prediction of creep crack growth properties of P91 parent and welded steel using remaining failure strain criteria", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 77, No. 15, 2010, p. 3035-3042.
- [10] J. Okrajni, K. Mutwil, M. Cieśla, "Steam pipelines' effort and durability", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 22 No. 2, 2007, p. 63-66.
- [11] D. Renowicz, M. Cieśla, "Crack initiation in steels parts working in boilers and steam pipelines", Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Vol. 21 2007, p. 49-52.

- [12] H. Li, D. Mitchell, "Microstructural characterization of P91 steel in the virgin, service exposed and post-service renormalized conditions", Steel Research International, 84 (12), 2013, p. 1302-1308.
- S. Pant, S. Bhardwaj, "Properties and Welding Procedure for Grade 91 Alloy Steel", International Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 6, No. 6, 2013, p. 767-772.
- [14] Welding "Grade 91" Alloy Steel, Sperko engineering Services, Growing experience with P91/T91 forcing essential code changes, By Jeffrey F Henry, Combined Cycle Journal, First Quarter, 2005. p. 1-5. http://www.sperkoengineering.com/html/Grade%2091%20R%2010-05.pdf, 2005
- [15] J.W. Wilson, J. Liu, N. Karimian, C.L. Davis, A.J. Peyton, "Assessment of microstructural changes in Grade 91 power station tubes through permeability and magnetic Barkhausen noise measurements", 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), Prague, October 6-10, 2014.
- [16] ASME Section IIA "Ferrous Material Specification", ASME, 2004
- B. Shashank Dutt, M. Nani Babu, G. Shanthi, S.Venugopal, G.Sasikala, A.K. Bhaduri, "*Influence of microstructural inhomogeneities on the fracture toughness of modified 9Cr–1Mo steel at 298–823 K*", Journal of Nuclear Materials, Vol. 421, No. 1-3, 2012, p.15-21.
- [18] ASME Section IIC, "Specifications for Welding rods, Electrodes and Filler Metals", 2004
- [19] B. Dogan, K. Nikbin, B. Petrovski, "Development of European Creep Crack Growth Testing Code of Practice for Industrial Specimens"- EC Project CREATE, No. GRD2-2000-30021, Paper presented at EPRI Int. Conf "Materials and Corrosion Experience for Fossil Power Plants", 2003. Wild Dunes Resort, Isle of Pahns, South Carolina, USA.
- [20] B. Dogan, "High temperature defect assessment procedures", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 80, No. 3, 2003, p. 149-156.
- [21] T.H. Hyde, M. Saber, W. Sun, "Creep Crack Growth Data and Prediction for a P91 Weld at 650°C", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 87, No. 12, 2010, p. 721-729.

- [22] S. Sedmak, "Eksploatacijske prsline u posudama pod pritiskom i rezervoarima", Monografija šeste međunarodne letnje škole mehanike loma, TMF-GOŠA Institut, 1992.
- [23] O.P.J. Almen, H. Black, "*Residual stresses and Fatigue in Metals*", McGraw-Hill Book Company, 1963, pp. 46-48.
- [24] H. Thielsch, "Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping", Reinhold Publishing Corporation, Chapman & Hall Ltd., 1963, pp. 7-11
- [25] R.H. Jones, "Stress Corrsosion Cracking Materials Performance and Evaluation", ASM International, 1993.
- [26] J.R. Landrum, "Fundamentals of Design for Corrosion Control A Corrosion Aid to the Designer", NACE, Houston, 1989.
- [27] R.A. Ainsworth, "*The initiation of creep crack growth*", International Journal of Solids and Structures, Vol. 18, No.10, 1982, pp. 873-871.
- [28] Lj. Nedeljković, "Čelici za sudove pod pritiskom i cevovode", Savremeni aspekti projektovanja i izrade sudova i cevovoda pod pritiskom", Druga letnja škola Mehanike loma, TMF, 1981, str. 117-149.
- [29] G. Cumino, S. Di Cuonzo, A. Di Gianfrancesco, O. Tassa, "Advanced high chromium ferritic steels for boiler components operating at high temperature", Latin American Applied Research 32, 2002, pp. 229-235.
- [30] J.A. Francis, W. Mazur, H.K.D. Bhadeshia, "Type IV cracking in ferritic power plant steels", Materials Science and Technology, Vol. 22, No. 12, 2006, pp. 1387-1395.
- [31] V.M. Radhakrishnan, "*Effect of notch on ductile fracture*", International Journal of Fracture Mechanics, 7, 1971, pp. 221-223.
- [32] DIN 17175, "Seamless Tubes of Heat-resistant Steels", DIN Handbook 403 (English edition), Iron and steel, Quality standards 3, Pressure vessels and pipelines, 1993.
- [33] Lj. Milović, "Analiza integriteta zavarenih komponenata procesne opreme za povišene radne temperature", Doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Beogradu, 2008.

- [34] ASTM A335/A335M-19a, "Standard Specification for Seamless Ferritic Alloy-Steel Pipe for High-Temperature Service", ASTM International, West Conshohocken, PA, Book of Standards Volume <u>01.01</u>, 2019, <u>www.astm.org</u>.
- [35] ASTM A387/A387M-17a "Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Chromium-Molybdenum", ASTM International, West Conshohocken, PA, Book of Standards Volume 01.04, 2017, <u>www.astm.org</u>.
- [36] EN 10216-2:2013, "Seamless steel tubes for pressure purposes-Technical delivery conditions-Part 2: Non-alloy and alloy steel tubes, with specified elevated temperature properties", CEN-CENELEC Management Centre, Brussels, 2013.
- [37] A. Bhaduri, "Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys-<u>Creep</u> and Stress Rupture", Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018, pp. 257-316.
- [38] ASTM E139-11, "Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials ASTM International, West Conshohocken, PA, Book of Standards Volume <u>03.01</u>, 2018, <u>www.astm.org</u>.
- [39] Project EPRI "The Grade X20 CrMoV 12-1 Steel Handbook", Electric Pover Research Institute (EPRI), EPRI Project Manager D. Gandy, Palo Alto, California, USA, 2006.
- [40] L. Engel, and H. Klingele, "An Atlas of Metal Damage", Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981.
- [41] A. Radović, "*Metalurški i tehnološki problemi zavarljivosti*", Međunarodno savetovanje "Zavarljivost materijala i metode ispitivanja", Vranje, 1985.
- [42] I. Hrivnjak, "Zavaritelnost oceli", Alfa Vydav., Techn. Ekonom. Liter., Bratislava, 1979.
- [43] F. Brohl, H. Mesch, "Welding of Alloyed Ferritic and Martensitic Steels in Piping Systems for High-temperature Service", Mannesmann, Düsseldorf, 1986.
- [44] L.S. Livšic, A.N. Hakimov, "*Metallovedenie svarki i termičeskaja obrabotka svarnih soedinenii*", Mašinostroenie, Moskva, 1979.
- [45] V.N. Volčenko, V.M. Iampoljski, V.A. Vinokurov, V.V. Frolov, "*Teoria svaročniih procesov*", Višaia škola, Moskva, 1988.
- [46] B.S. Kasatkin, O.N. Kozlovec, "*Mikrostruktura i svoistva svareniih soedinenii nizkolegirovaniih stalei*", Avtomatičskaja svarka, No. 7, 1989.

- [47] MIZ, "Classification of Microstructures in Low C, Low Alloye Steel Weld Metal and Terminology", IX-1282-83, 1983.
- [48] "Weld Metal Microstructures", A State-of-the Art review, 2002.
- [49] M. Burzić, EUREKA Project E!9983 2016-2018: "Optimal welding parameters of SA 387 Gr.91 thick steel plates in corrosive environment", IC Mechanical Faculty Belgrade, 2018.
- [50] *"The T91/P91 Book"*, Vallourec & Mannesmann tubes, 2002.
- [51] ASME Code IX, "Welding requirements Welding Procedure Specification (WPS)", 2017.
- [52] ISO 3580 : 2017, "Welding Consumables Covered Electrodes for Manual Metal ARC Welding of Creep-Resisting Steels – Classification", International Organization for Standardization, 2017.
- [53] H. Heuser, "Eigenschaften der Schweißgütern für das Stahl P91", Book of papers from Thyssen and SES Tlmače seminar. s. 23. Tlmače 2000.
- [54] M. Vrhovac, "*Kriterijumi rasta prsline u materijalu oštećenom puzanjem*", Doktorska disertacija, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1993.
- [55] N. Filipović, "Influence of the heat treatment technology on quality of X10CrMoVNb9 1 steel welds", "Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 52, No. 1, 2007, pp. 11-15.
- [56] J. Pecha, D. Stano, O. Peleš, "Welding of 9% Cr Creep Resisting Steels For Power Engineering Equipment" Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 49, No. 4, 2004, pp. 159-168.
- [57] W. Benduck, B. Hahn, W. Scheendler, "Development of creep damage in steel grades X10 CrMoVNb 9-1 (P/T91) and X20 CrMoV 12-1–Results from VGBresearch Project 160", VGB Power Tech, 2001, pp. 98-101.
- [58] J.A. Harris Jr, "Engine component retirement for cause, Vol. 1, Executive Summary", AFWAL-TR-87-4609, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1987.
- [59] G.R. Irwin, "Fracture", Handbuch der Physic VI, Springerverlag, 1958.
- [60] Z. Burzić, M. Burzić, "*Application of modern technologies in the destructive metal materials testing*" Journal of Metallurgy, Vol. 11, No. 2, 2005, pp.127-141.

- [61] <u>https://uk.images.search.yahoo.com/yhs/search;_ylt=AwrIQddEGd9fkBIAchZ3</u> <u>Bwx.;_ylu=Y29sbwMEcG9zAzMEdnRpZAMEc2VjA3Nj?p=Deepwater+Horiz</u> <u>on&fr=yhs-Lkry-newtab&hspart=Lkry&hsimp=yhs-newtab</u>
- [62] V.B. Ćulafić, "Uvod u mehaniku loma", Mašinski fakultet Podgorica, 1999.
- [63] T.L. Anderson, "Fracture Mechanics-Fundamentals and applications", CRC Press, USA, 1994.
- [64] Z. Burzić, "Teorijske i Esperimentalne osnove Mehanike loma", radni materijal predavanja, Tehnički fakultet Bihać, 2014.
- [65] G.R. Irwin, "Plastic zone near a crack and fracture toughness", Proc. 7th Sagamore Research Conference on Mechanics & Metals Behavior of Sheet Material. Vol. 4, 1960, pp. 463-478.
- [66] A.A. Wells, "Application of fracture mechanics at and beyond general yielding". British Welding Journal 11, 1963, pp. 563-570.
- [67] J.R. Kraft, "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks", Yournal of Applied Mechanics, Vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- [68] S. Sedmak, "Uticaj zareza i prslina na pojavu loma pri elastičnoj i plastičnoj deformaciji", Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1976.
- [69] A.A. Griffith, "The Phenomena of Rapture and Flow in Solids", Trans R. Soc, London, Vol. A221, 1920, pp. 163.
- [70] H.M. Westergard, "Bearing Pressures and Crack", Yournal of Applied Mechanics, Vol. 6, 1939, pp. 49-53.
- [71] ASTM E399-70, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", <u>www.astm.org</u>, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1989,
- [72] BSI DD3-71, "Method for Plane-Strain Fracture Toughness K_{lc} Testing", London, 1971.
- [73] ASTM E813-89, "Standard Test Method for J_{Ic}, A Measure of Fracture Toughness", <u>www.astm.org</u>, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1989, <u>Povučen iz upotrebe je 1997. god.</u>

- [74] ASTM E1152-95 "Standard Test Method for Determining J-R Curve", <u>www.astm.org</u>, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1995, <u>Povučen iz upotrebe je 1997. god.</u>
- [75] ASTM E1290-08 "Standard Test Method for Crack Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement", <u>www.astm.org</u>, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008, <u>Povučen iz upotrebe je 2013. god.</u>
- [76] ASTM E1737-96, "Standard Test Method for J Integral Characterization of Fracture Toughness", <u>www.astm.org</u>, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1996, <u>Povučen iz upotrebe je 1998. god.</u>
- [77] ASTM E399-20, "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", <u>www.astm.org</u>, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, ASTM Book of Standards Volume 03.01.
- [78] ASTM E1820-20b, "Standard Test Method for Measurement Fracture Toughness", <u>www.astm.org</u>, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, ASTM Book of Standards Volume 03.01.
- [79] BS 7448 Part 1, "Fracture mechanics toughness tests Method for determination of K_{Ic} critical CTOD and critical J values of metallic materials", BSI, 1991.
- [80] BS 7448 Part 2, "Fracture mechanics toughness tests Methods for determination of K_{Ic}, critical CTOD and critical J values of welds in metallic materials" BBI, 1997.
- [81] EN ISO 12135-16, "Metallic Materials. Unified Method of test for the determination of quasistatic Fracture Toughness", ISO/TC 164, Mechanical testing of metals, Subcommittee SC 4, Toughness testing — Fracture (F), Pendulum (P), Tear (T), 2016.
- [82] EN ISO 15653-18, "Metallic Materials. Method of test for the determination of quasistatic Fracture Toughness of weld" Technical Committee ISO/TC 164/SC 4, Fatigue, fracture and toughness testing, 2018.
- [83] JUS C.A4.083 "Mehanička ispitivanja materijala. Osnovni pojmovi i veličine u mehanici loma", 1993.
- [84] JUS C.A4.084 "Mehanička ispitivanja. Ispitivanje žilavosti loma pri ravnoj deformaciji (K_{Ic})", 1993.

- [85] A. Radović, "Mogućnosti korišćenja kriterijuma mehanike loma u oceni sigurnosti zavarenih spojeva", Letnja škola mehanike loma - Mehanika loma zavarenih spojeva, Aranđelovac, 1984, str. 15-43.
- [86] A. Sedmak, BURZIĆ Z., "Izveštaj o kvalifikaciji tehnologije reparaturnog zavarivanja reaktora DC-301, Mašinski fakultet Beograd, 1999.
- [87] BURZIĆ, Z., SEDMAK S., MANJGO M., "Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma zavarenih spojeva", Integritet i Vek Konstrukcija, No. 2, str. 97, 2001.
- [88] Slika Jovanović
- [89] SEDMAK, S., "Istraživanje uticaja količine zavarivanjem unete toplote na promene u ZUT kompleksno legiranih čelika visoke čvrstoće", Naučnoistraživački projekt Fabrike vagona Kraljevo i Osnovne zajednice nauka regiona Kraljevo-Čačak, TMF, Beograd, 1980-1981.
- [90] BROWN, W.F., SRAWLEY, J.E., "Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials", Special Technical Publication STP 410, Philadelphia, 1969.
- [91] BURZIĆ, Z., "Savremene metode provere mehaničko-tehnoloških osobina zavarenih spojeva–Deo 2", Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 47, No. 3, str. 151-158, 2002.
- [92] MILLER, K.J., O'DONNELL, W.J., "The fatigue limit and its elimination", Fatigue Fracture Engineering Materials Structures, Vol. 22, p. 545-557, 1999.
- [93] PARIS, P.C., ERDOGAN, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528.
- [94] PARIS, P.C., SIH, G.C., "Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and Application", STP 381, p. 30-83.
- [95] Z. Burzić, "Ispitivanje promenljivim opterećenjem glatkih i zarezanih epruveta", 7. Tematski zbornik radova "Eksperimentalne i numeričke metode u oceni integriteta konstrukcije", V. Plana, str. 75-92, 1997.
- [96] RADON, J.C., "Determination of Threshold Stress Intensties, Fatigue of Low Alloy Steel BS4360-50D", Int. J. Fatigue, p. 225, 1982.

- [97] WALKER, E.K., "An Effective Strain Concept for Crack Propagation and Fatigue With Specific Application to Biaxial Stress Fatigue", AFFDL-TR-70-144, p. 225-233, 1970.
- [98] FORMAN, R.G., KEARNEY, V.E., ENGLE, R.M., "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol.89, No.3, p. 459, 1997.
- [99] KLESNIL, M., LUKAS, P., "Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilization of Fatigue Cracks", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 4, p. 77-92, 1972.
- [100] WELLS, A.A., "Application of fracture mechanics at and beyond general yielding". British Welding Journal 11, p. 563-570, 1963.
- [101] BURDEKIN, F.M., DAWES, M.G., "Practical Use of Linear Elastic and Yielding Fracture Mechanics with Particular Reference in Pressure Vessels", Proc. of the Institute of Mechanical Engineering Conference, London, 1971, p. 28-37.
- [102] BEDNAR, H.H., "Pressure Vessel Design Handbook", Van Nostrand Reinhold Comp., New York, 1986.
- [103] PD 6493, "Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints-Uputstvo za postupke za ocenu prihvatljivosti prslina u topljenjem zavarenim konstrukcijama", BSI, 1991.
- [104] BS 7910-19 "Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures"
- [105] "Welding Handbook", 9th Edition, Vol. 1, AWS, 2001.
- [106] SINTAP (<u>Structural INTegrity Assessment Procedures for European Industry</u> -Postupak za ocenu integriteta konstrukcija za evropsku industriju), 1999.
- [107] https://sij.acroni.si/assets/Uploads/SIQUAL-catalogue.pdf
- [108] <u>https://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/01112015000000B_Boehl</u> <u>er%20FOX%20C%209%20MV_ce.pdf</u>
- [109] <u>https://www.capilla-gmbh.com/wp-content/uploads/Katalog_03_en.pdf</u>
- [110] EN ISO 15614-1:2017: "Specifikacija i kvalifikacija tehnologije zavarivanja metalnih materijala – Kvalifikacija tehnologije zavarivanja – Deo 1: Elektrolučno i gasno zavarivanje čelika".

- [111] "Podaci o opremi i parametri radiografske kontrole" Izveštaj 224/19 Zavod za zavarivanje, 2019.
- [112] SRPS EN ISO 17639:2014 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva"
- [113] SRPS EN ISO 5173:2013 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje savijanjem"
- [114] SRPS EN ISO 9015:2013 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje tvrdoće – Deo 1: Ispitivanje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva"
- [115] SRPS EN ISO 4136:2013 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje poprečnim zatezanjem"
- [116] SRPS EN ISO 9016:2013 "Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje udarom - Postavljanje epruveta, orijentacija zareza i ispitivanje"
- [117] "ESIS Procedure for Determining the Fracture Behavior of Materials", European Structural Integrity Society ESIS P2-92, 1992.
- [118] Z. Burzić, "Mikromehanički aspekti iniciranja i rasta prsline kod legura na bazi Al-Li sistema", Doktorska disertacija, TMF, Beograd, 1995.
- [119] EN 6072-10 Aerospace series Metallic materials Test methods Constant amplitude fatigue testing
- [120] M. Burzić, M. Kutin, B. Grujić, Ž. Adamović, "Safe Operation of Welded Structure with Cracks at Elevated Temperature", Strojniški Vestnik - Journal of Mechanical Engineering, in press, 2008.
- [121] M. Burzić, Z. Burzić, J. Kurai, "Fatigue Behaviour of Alloyed Steel for High Temperature", First Serbian (26th YU) Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Kopaonik, Serbia, p. 1085-1090, 2007.
- [122] Dž. Gačo, R. Prokić-Cvetković, M. Burzić, "Influence of Operating Conditions on Fracture Mechanics Parameters of High Alloyed Steel X20", MECHANICS '2007 - 12th International Conference Kaunas, Lithuania, p.253-261, 2007.
- [123] K. J. Miller, W. J. O'Donnell, "The fatigue limit and its elimination", Fatigue Fracture Engineering Materials Structures, Vol. 22, p. 545-557, 1999.

- [124] P. C. Paris, and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528.
- [125] P. C. Paris, and G. C. Sih, "Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and its Application", STP 381, p. 30-83.
- [126] ASTM E647-15e1, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM International, West Conshohocken, PA, Book of Standards Volume <u>03.01</u>, 2015, <u>www.astm.org</u>.
- [127] C. P. Paris, and B. R. Hayden, "A New System for Fatigue Crack Growth Measurement and Control", ASTM Symposium on Fatigue Crack Growth, Pittsburg, 1989.
- [128] Jovanović, M., Čamagić, I., Sedmak, S., Sedmak, A., Burzić, Z., "The Effect of Material Heterogeneity and Temperature on Impact Toughness and Fracture Resistance of SA-387 Gr. 91 Welded Joints", *Materials* 2022, 15(5), 1854, ISSN 1996-1944, <u>https://doi.org/10.3390/ma15051854</u>, 02 Mar 2022.

ПРЕГЛЕД ОЗНАКА

- *a*[mm] дебљина епрувете
- *a*[mm] дужина прслине
- *а**[mm] првобитна величина почетне грешке
- *а*₀[mm] почетна дужина прслине
- *a*_{*c*}[mm] критична дужина прслине
- *асг*[mm] критична величина грешке
- *ad*[mm] максимално дозвољена дужина прслине
- *а*_f[mm] крајња дужина прслине
- *a*_{*z*}[mm] дужина првобитне прслине
- *a*_m[mm] прихватљива величина делимично пролазне прслине
- А1[-] еутектоидна линија
- $A_3[-]$ линија почетка претварања γ -Fe и α -Fe при хлађењу, азавршетка претварања
- α-*Fe* у γ-*Fe* при загревању
- А4[-] солидус линија
- А5[-] ликвидус линија
- А[%] процентуално издужење
- $Ac_{I}[^{\circ}C]$ температура почетка трансформације α -Fe у γ -Fe при загревању
- $Ac_3[^{\circ}C]$ температура завршетка трансформације β -Fe у γ -Fe при загревању
- $Ar_3[^{\circ}C]$ температура почетка трансформације γ -Fe у β -Fe при хлађењу
- A[J] енергија потребна за лом
- *A*_{*uk*}[J] укупна енергија удара
- А_I[J] енергија стварања прслине
- А_Р[J] енергија ширења прслине
- *b*[mm] дужина лигамента

- В[mm] дебљина епрувете
- В константа за дати степен деформације
- С[-] геометриски фактор
- СЕ[%] еквивалент угљеника
- С[-] коефицијент у Парисовој једначини брзине раста прслине
- *C*_{*F*}[-] коефицијент у Формановој једначини брзине раста прслине
- С_ν[-] коефицијент у Вакеровој једначини брзине раста прслине
- Ск[-] коефицијент у једначини Клеснила и Лукаса за брзину раста прслине
- *СМОD*[mm] величина отварања уста прслине
- *COD*[mm] величина отварања прслине
- *CTOD*[mm] величина отварања врха прслине
- D[mm] пречник трна
- *E*[MPa] модул еластичности
- *f*(*a*/*W*)[-] геометријски фактор
- *fij*(*θ*)[-] функција угла
- *F*[N] сила
- *F*[MPa] вршни напон
- *F*_d[N] доња вредност силе
- $F_g[N]$ горња вредност силе
- *F*_{*L*}[N] гранична сила
- *F*_{min}[N] минимална сила замарања
- $F_{min}[N]$ пројектно гранично оптерећење
- *F*_{max}[N] максимална сила замарања
- *HCS*[-] осетљивост према топлим прслинама
- *J*[J/m²] континуирани интеграл независтан од путање интеграције

*J*_{el}[J/m²] - еластична компонента *J*- интеграла

J_{lc}[J/m²] - критична вредност контурног интеграла за први облик развоја прслине

kt[-] - коефицијент концентрације напона

K[MPa m^{1/2}] - фактор интензитета напона

*К*_{*c*}[MPa m^{1/2}] - критична вредност фактора интензитета напона

*K*_/[MPa m^{1/2}] - фактор интензитета напона за први облик развоја прелине

*K*_{*Ic*}[MPa m^{1/2}] - жилавост лома при равној деформацији (критична вредност фактора интензитета напона)

*K*_{min}[MPa m^{1/2}] - доњи ниво фактора интензитета напона

*K*_{max}[MPa m^{1/2}] - горњи ниво фактора интензитета напона

 K_R [MPa m^{1/2}] - гранична вредност фактора интензитета напона

*К*_{*r*}[-] - бездимензиона променљива

 K_{Iscc} [MPa m^{1/2}] - жилавост лома при напонској корозији

*К*_{*m*}[-] - фактор концентрације за несаосност материјала

*К*_{*t*}[-] - фактор концентрације за промену облика у близини прелине

 K_{mat} [MPa m^{1/2}] - жилавост изражена као најмања од три вредности

KV[J] - енергија удара

L[mm] - распон између ослонаца

Lr[-] - коефицијент оптерећења

*L*₀[mm] - дужина епрувете

т[-] - коефицијент у Парисовој једначини брзине раста прслине

*т*_{*F*}[-]- коефицијент у Формановој једначини брзине раста прслине

тк[-] - коефицијент у једначини Клеснила и Лукаса за брзину раста прслине

*m*_{*R*}[-] - коефицијент у Вакеровој једначини брзине раста прслине

*m*_v[-] - коефицијент у Вакеровој једначини брзине раста прслине

*M*_f[°C] - температура завршетка трансформације аустенита у мартензит при хлађењу

*M*_S[°C] - температура почетка трансформације аустенита у мартензит при хлађењу

*М*_m[-] - фактор облика прелине

M_{km}, M_m, M_{kb} і M_b[-] - фактори увећања мембранског и савојног напона услед несаосности и одступања облика у близини прелине

*n*_v[-] - коефицијент у Вакеровој једначини брзине раста прслине

N[циклус] - број циклуса оптерећења

Ni[ciklus] - број циклуса потребних да настане заморна прслина

N_p[ciklus] - број циклуса потребних да заморна прелина порасте до критичне величине за лом

*N*_{*u*}[ciklus] - укупан број циклуса (укупан век замора)

P[N] - сила

*Р*_{*m*}[MPa] - примарни мембрански напон

*P*_b[MPa] - напон савијања

*q*_P[kJ/cm] - линијска енергија заваривања

Q[kJ/cm] - активациона енергија која зависи од примењеног напона

Q[MPa] - секундарни напон

r[mm] - положај поља напона испред чела прслине

 $r_p^{c}(\theta)$ [mm] - величина пластичне зоне испред врха прслине

R[-] - коефицијент асиметрије циклуса

R[-] - однос горњег и доњег нивоа фактора интензитета напона

R[mm] - полупречник ваљака (ослонаца)

R [MPa] - напон

*R*_{*k*}[mm] - величина *К* доминантне зоне сингуларитета

*R*_m[MPa] - затезна чврстоћа

*R*_{p0,2}[MPa] - условна граница течења

- *R*_{eL}[MPa] напон течења
- *R*_T[MPa] ефективни напон течења
- *S*[MPa] променљиви напон
- S[MPa] секундарни (заостали или термички) напон
- S_f[MPa] трајна динамичка чврстоћа
- S_g [MPa] горњи напон у циклусу
- *Sd*[MPa] доњи напон у циклусу
- *Ssr*[MPa] средњи напон у циклусу
- Sr[-] бездимензиона променљива
- t[s] време потребно да се достигне било која деформација
- *Т*_{*M*}[°C] температура трансформације метала у ЗУТ
- *Тš*[°С] температура трансформације метала у шаву
- T_t [°C] температура топљења
- *T*_{*T*}[°C] температура реклистализације
- *V*_{*P*}[mm] померање
- *W*[J/m³] густина енергије деформације
- W[mm] ширина епрувете
- *Y*[-] бездимензиони фактор геометрије
- *Y*[-]- корекциони фактор
- α[°] угао савијања
- γ [-] koeficijent u jednačini Klesnila i Lukasa za brzinu rasta prsline
- χ[-] ниво оптерећења
- *v*[-] Поасонов коефицијент
- ∂[mm] величина отварања врха прслине
- δ_c [mm] критична вредност отварања врха прслине
*δ*_{*lc*}[mm] - критична вредност отварања врха прслине за први облик развоја прслине

- бі[mm] вредност отварања врха прслине за први облик развоја прслине
- *бmat*[mm] жилавост изражена као најмања од три вредност
- ∆*а*[mm] прираштај прслине
- $\Delta \sigma$ [MPa] опсег напона
- $\Delta F[N]$ опсег променљиве силе

 ΔK [MPa m^{1/2}] - опсег фактора интензитета напона

 ΔK_{th} [MPa m^{1/2}] - праг осетљивости опсега фактора интензитета напона (праг замора)

- *є*[-] релативна деформација
- *Еref*[-] референтна деформација
- є_f[-] деформације при лому широких плоча са две ивичне прслине
- *є*_у[-] деформација течења

о[MPa] - делујући просечни напон у удаљеном пресеку

- *о*л[MPa] укупни напон
- σ_c[MPa] преостала чврстоћа конструкције
- σ_c [MPa] напон колапса
- *σ*_d[MPa] доњи напон у циклусу
- *о_{ref}*[MPa] референтни напон
- σ_g [MPa] горњи напон у циклусу
- σ_{min} [MPa] минимална вредност напона променљивог оптерећења
- σ_{max} [MPa] максимална вредност напона променљивог оптерећења
- *опот*[MPa] номинални радни напон

- *о*_{*dop*}[MPa] допуштени напон
- *оуѕ*[МРа] напон течења
- *оты*[МРа] затезна чврстоћа
- *о*_{*R*}[MPa] заостали напон
- ој[MPa] средња вредност измедју чврстоће на граници течења и затезне чврстоће
- σ_x [MPa] компонента нормалног напона у близини врха прслине
- *о*у[MPa] компонента нормалног напона у близини врха прслине
- σ_{z} [MPa] компонента нормалног напона у близини врха прелине
- Φ [-] бездимензиони параметар
- Φ [-] елиптични интеграл
- ρ [-] фактор којим се коригује вредност параметра K_r
- *т*_{*xy*}[MPa] компоненте поља напона испред чела прслине

ПРЕГЛЕД СЛИКА

Слика 2.1. Поређење дебљине зида цеви различитих челика при истим конструкционим условима	12
Слика 2.2. Зависност модула еластичности и смицања од температуре за челик Р91	15
Слика 2.3. Промена вредности напона течења од температуре за легирани челик Р91	16
Слика 2.4. Чврстоћа при пузању легираног челика Р91 на 575 i 615°С	16
Слика 2.5. Шематски приказ стадијума пузања	17
Слика 2.6. Крива пузања за легирани челик Р91	17
Слика 2.7. Чврстоћа лома при пузању у зависности од темпратуре за легирани челик Р91	18
Слика 2.8. Понашање при оксидацији за Č.7400, Р91 и X20 на 600°С	20
Слика 3.1. Топографија топлих прслина у завареном споју, 1-подужне у шаву и ЗУТ зони, 2-попречне прслине у шаву и ЗУТ зони, 3-попречне прслине по дебљини основног материјала	24
Слика 3.2. Различити утицаји на склоност челика ка настанку топлих прслина, а) састав челика, б) облик шава и садржај С, в) предгревање и садржај С	28
Слика 3.3. Схематски приказ хладних прслина у угаоним и сучеоним спојевима	29
Слика 3.4. Механизам дифузије водоника из метала шава у ЗУТ	32
Слика 3.5. Схема топлотног циклуса ЗУТ при електролучном заваривању	33
Слика 3.6. Промена тврдоће по дебљини споја 1 - без предгревања, 2 - са предгревањем	34
Слика 3.7. Утицај предгревања, линијске енергије и дебљине на брзину хлађења	35
Слика 3.8. Положај ламеларне прслине према завареном споју	35
Слика 3.9. Прслина услед поновног загревања, нисколегирани CrMoV челик са грубозрним ЗУТ	37
Слика 3.10. Прслина услед поновног загревања, високолегирани CrNi челик	37
Слика 3.11. Расподела температура при заваривању топљењем	38
Слика 3.12. Зоне завареног споја	40
Слика 3.13. Могући изгледи профила попречног пресека завареног споја	41
Слика 3.14. Епитаксијални раст кристалних зрна при очвршћавању	42
Слика 3.15. Структуре у жареном челику при загревању и хлађењу током заваривања	44

Слика 3.16. Структуре у хладноваљаном челику при загревању и хлађењу током заваривања	46
Слика 3.17. Шематски приказ КХЗ дијаграма за угљенични челик	47
Слика 3.18. Профил тврдоће за REL- заваривање и TIG заваривање. Растојање на х-оси је у mm	51
Слика 3.19. Схематски приказ завареног споја легираног челика Р91	59
Слика 3.20. Циклус термичке обраде после заваривања (ТОПЗ) за легирани челик Р91	60
Слика 3.21. Утицај термичке обраде после заваривања на тврдоћу легираног челика Р91	63
Слика 3.22. Утицај ТОПЗ на енергију удара легираног челика Р91	64
Слика 4.1. Шематски приказ конструисања са сигурношћу од лома	67
Слика 4.2. Изглед прелома брода "Liberty"	69
Слика 4.3. Носачи нафтне платформе	70
Слика 4.4. Сучеони заварени спој сонарне прирубнице са прслинама	70
Слика 4.5. Пожар на нафтној платформи "Deepwater Horizon"	71
Слика 4.6. Нафтна мрља настала нако хаварије на платформи "Deepwater Horizon"	71
Слика 4.7. Области примене механике лома	72
Слика 4.8. Избор материјала на основу жилавости лома	74
Слика 4.9. Шематски приказ развоја прслине при повећању оштећења и смањењу преостале чврстоће	76
Слика 4.10. Предвиђање века конструкције и преостале чврстоће	77
Слика 4.11. Основни појавни облици раванске прслине а) пролазна, б) полуелиптична, в) елиптична	80
Слика 4.12. Основни облици развоја прслине и образовања површине прелома	80
Слика 4.13. Компоненте напона испред чела прслине у просторном систему правоуглих координата	81
Слика 4.14. Макроскопски изглед завареног споја 1 - ОМ, 2 - ЗУТ, 3 - МШ	87
Слика 4.15. Епрувета за савијање у три тачке	88
Слика 4.16. Компактна епрувета за затезање	88
Слика 4.17. Пресек кроз ЗУТ шава нисколегираног челика повишене чврстоће	89
Слика 4.18. Схематски приказ процедура испитивања механике лома код заварених спојева према EN ISO 15653:2018	92
Слика 4.19. Начин вађења епрувета и положај прслине при испитивању МШ	93

Слика 4.20. Положај зареза у епруветама механике лома за испитивање завареног споја	93
Слика 4.21. Примери положаја зареза у специфичним структурама завареног споја	94
Слика 4.22. Начелно линеарни раст прслине <i>a</i> - N, t при константном опсегу ΔK = const и условима ограниченог течење $r_p^c << R_k$	96
Слика 4.23. Зависност дужине заморне прслине од броја циклуса	97
Слика 4.24. Начелни облик промене брзине раста da/dN = f(∆K) za R = 0 и правци померања S-криве за односе R≠0	98
Слика 4.25. Утицај односа напона R на дијаграм раста прелине	100
Слика 4.26. Пројектна СТОД крива	103
Слика 4.27. Дијаграм анализе лома	104
Слика 4.28. Облици прслина	109
Слика 4.29. Свођење више прслина на једну	109
Слика 4.30. Шематски приказ расподеле напона по пресеку	110
Слика 4.31. Параметар М _m : а) за површинску прслину, б) за унутрашњу прслину	112
Слика 4.32. Елиптични интеграл Ф у функцији а/с за прорачун К _I за површинску и унутрашњу прслину	113
Слика 4.33. Процедура BS 7910 - нивои I и II	113
Слика 4.34. Фактор увећања напона Мь: а) за унутрашњу прслину, б) за површинску прслину	115
Слика 4.35. Заостали напони	116
Слика 4.36. Дијаграм оцене лома за ниво оцене III	117
Слика 4.37. Различите дефиниције СТОД	126
Слика 4.38. Стабилни раст прслине: J-R крива	127
Слика 4.39. Одређивање преостале чврстоће поређењем силе раста прслине и криве отпорности	128
Слика 5.1. Облик шава за материјал SA 387 Gr. 91	132
Слика 5.2. Пролази заваривања SA 387 Gr. 91	132
Слика 5.3. Сучеоно заварени лимови легираног челика SA 387 Gr. 91	134
Слика 5.4. Хронолошка класификација грешака и типови грешака	135
Слика 5.5. Схематски приказ метода испитивања без разарања (ИБР)	137
Слика 5.6. План вађења епрувета	140
Слика 5.7. Макроструктура завареног споја челика SA 387 Gr. 91	140
Слика 5.8. Микроструктура ОМ челика SA 387 Gr. 91	141

Слика 5.9. Микроструктура ЗУТ завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91141
Слика 5.10. Микроструктура МШ завареног споја челичних лимова SA 387 Gr. 91141
Слика 5.11. Микроструктура основног метала (ОМ), 10s a) 200x, b) 500x142
Слика 5.12. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 10s a) 200x, b) 500x142
Слика 5.13. Микроструктура основног метала (ОМ), 15s a) 200x, b) 500x142
Слика 5.14. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 15s a) 200x, b) 500x143
Слика 5.15. Микроструктура основног метала (ОМ), 20s a) 200x, b) 500x143
Слика 5.16. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 20s a) 200x, b) 500x143
Слика 5.17. Микроструктура основног метала (ОМ), 25s a) 200x, b) 500x144
Слика 5.18. Микроструктура зоне утицаја топлоте (ЗУТ), 25s a) 200x, b) 500x144
Слика 5.19. Мерење угла при савијању (α)145
Слика 5.20. Савијање епрувете завареног споја146
Слика 5.21. Промена вредности тврдоће у зависности од места испитивања147
Слика 5.22. Епрувета за одређивање затезних својстава149
Слика 5.23. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 1s149
Слика 5.24. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 2s150
Слика 5.25. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 3s150
Слика 5.26. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 1р151
Слика 5.27. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 2р151
Слика 5.28. Дијаграм напон - издужење при лому епрувете ZS - 3р152
Слика 5.29. Промена R _{p0,2} і R _m у зависности од температуре испитивања152
Слика 5.30. Промена издужења у зависности од температуре испитивања153
Слика 5.31. Епрувета за одређивање енергије удара154
Слика 5.32. Схема вађења Шарпи епрувета из завареног споја154
Слика 5.33. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 1s156
Слика 5.34. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 2s156
Слика 5.35. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 3s157
Слика 5.36. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 1р157
Слика 5.37. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 2р158
Слика 5.38. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ОМ - 3р158
Слика 5.39. Промена Auk у зависности од температуре испитивања код ОМ159
Слика 5.40. Промена А _I и А _P у зависности од температуре код ОМ159

Слика 5.41. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 18161
Слика 5.42. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 2s161
Слика 5.43. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 3s162
Слика 5.44. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 1р162
Слика 5.45. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 2р163
Слика 5.46. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете МШ - 3р163
Слика 5.47. Промена Auk у зависности од температуре испитивања код МШ164
Слика 5.48. Промена А _I и А _Р у зависности од температуре испитивања код МШ164
Слика 5.49. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 1s166
Слика 5.50. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 2s166
Слика 5.51. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 3s167
Слика 5.52. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 1р167
Слика 5.53. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ - 2р168
Слика 5.54. Дијаграми добијени ударним испитивањем епрувете ЗУТ – 3р168
Слика 5.55. Промена Auk у зависности од температуре испитивања код ЗУТ169
Слика 5.56. Промена A _I и A _P у зависности од температуре испитивања код
3VT169
3УТ169 Слика 5.57. Епрувета SEB за испитивање механике лома171
 ЗУТ
ЗУТ 169 Слика 5.57. Епрувета SEB за испитивање механике лома 171 Слика 5.58. Компактна CT епрувета за испитивање механике лома 172 Слика 5.59. Стварање заморне прслине на високофреквентном пузатору а) 173 код SEB епрувете, б) код модификоване CT епрувете 173 Слика 5.60. Схематски приказ зависности J-Δа при стабилном развоју 174 Слика 5.61. Изглед поступка испитивања а) SEB епрувете, б) модификоване 175 Ст епрувете 175 Слика 5.62. Шема поступка и уређај за мерење дужине прслине 176 Слика 5.63. Дијаграми F - δ (а) и J - Δа (b) за епрувету ознаке OM - 1s
ЗУТ
ЗУТ
ЗУТ 169 Слика 5.57. Епрувета SEB за испитивање механике лома 171 Слика 5.58. Компактна CT епрувета за испитивање механике лома 172 Слика 5.59. Стварање заморне прслине на високофреквентном пузатору а) 173 код SEB епрувете, 6) код модификоване CT епрувете 173 Слика 5.60. Схематски приказ зависности J-Δа при стабилном развоју 174 Слика 5.61. Изглед поступка испитивања а) SEB епрувете, 6) модификоване 175 Слика 5.62. Шема поступка и уређај за мерење дужине прслине 176 1775 Слика 5.63. Дијаграми F - δ (а) и J - Δа (b) за епрувету ознаке OM - 1s
3УТ
3УТ

Слика 5.70. Промена вредности а _с у зависности од температуре испитивања код ОМ181
Слика 5.71. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 1s182
Слика 5.72. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 2s183
Слика 5.73. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 3s183
Слика 5.74. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 1р183
Слика 5.75. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 2p184
Слика 5.76. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке МШ - 3р184
Слика 5.77. Промена вредности К _{Iс} у зависности од температуре испитивања код МШ185
Слика 5.78. Промена вредности ас у зависности од температуре испитивања МШ185
Слика 5.79. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 1s186
Слика 5.80. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 2s187
Слика 5.81. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 3s187
Слика 5.82. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 1р187
Слика 5.83. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 2р188
Слика 5.84. Дијаграми F - δ (a) и J - Δa (b) за епрувету ознаке ЗУТ - 3р188
Слика 5.85. Промена вредности К _к у зависности од температуре испитивања код ЗУТ189
Слика 5.86. Промена вредности ас у зависности од температуре испитивања код ЗУТ
Слика 5.87. Епрувета за динамичка испитивања према стандарду EN 6072:2010191
Слика 5.88. Изглед готових епрувета за динамичка испитивања191
Слика 5.89. Сревохидраулична машина SHIMADZU192
Слика 5.90. Схема наизменично променљивог оптерећења, R = -1193
Слика 5.91. S-N дијаграм епрувета извађених из сучеоно завареног споја и испитаних на собној температури и на 575°C193
Слика 5.92. S-N дијаграм епрувета извађених из основног метала (OM) и испитаних на собној температури и на 575°С194
Слика 5.93. Промена вредности динамичке чврстоће Sf при 2x10 ⁶ циклуса у зависности од температуре испитивања194
Слика 5.94. Савремени систем за динамичка испитивања
Слика 5.95. Шема мерне фолије и начина регистровања раста прслине
Слика 5.96. Епрувете за испитивање параметара раста заморне прслине199

Слика 5.97. Модификована СТ епрувета за испитивање на повишеним температурама	199
Слика 5.98 Лијаграм зависности da/dN - AK епрувете OM - 1s	
Слика 5.99. Дијаграм зависности da/dN - ΔK епрувете OM - 2s	202
Слика 5.99. Дијаграм зависности da/dN - ΔK епрувете OM - 25	202
Слика 5.100. Дијаграм зависности da/dN - ΔK спрувете OM - 15	203
Слика 5.101. Дијаграм зависности da/dN - ΔK спрувете OM - 2p	203
Слика 5.102. Дијаграм зависности da/dN $-\Delta K$ спрувете OM $-2p$	204
Слика 5.105. Дијаграм зависности da/div - ΔK спрувете Ом - 5р	204
Слика 5.104. Промена вредности ΔK код Ом	205
зарезом у ОМ	205
Слика 5.106. Дијаграм зависности da/dN - ∆К епрувете МШ - 1s	207
Слика 5.107. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 2s	207
Слика 5.108. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 3s	208
Слика 5.109. Дијаграм зависности da/dN - ∆К епрувете МШ - 1р	208
Слика 5.110. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 2р	209
Слика 5.111. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете МШ - 3р	209
Слика 5.112. Промена вредности ΔКth код МШ	210
Слика 5.113. Промена da/dN у зависности од температуре код епрувета са зарезом у МШ	210
Слика 5.114. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 1s	212
Слика 5.115. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 2s	212
Слика 5.116. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 3s	213
Слика 5.117. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 1р	213
Слика 5.118. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 2р	214
Слика 5.119. Дијаграм зависности da/dN - ΔК епрувете ЗУТ - 3р	214
Слика 5.120. Промена вредности ΔKth код ЗУТ	215
Слика 5.121. Промена da/dN у зависности од температуре код епрувета са зарезом у ЗУТ	216
Слика 5.122. SA 387 Gr. 91, OM фрактографија, (а) стварање прслине, 575 °C; (b) ширење прслине, 575 °C; (c) стварање прслине, 20 °C; (d) ширење прслине, 20 °C	217
Слика 5.123. SA 387 Gr. 91, МШ фрактографија, (а) стварање прелине, 575 °C; (b) ширење прелине, 575 °C; (c) стварање прелине, 20 °C; (b) ширење прелине, 20 °C	217
	••

Слика 5.124. SA 387 Gr. 91, ЗУТ фрактографија, (а) стварање прслине, 575 °C; (b) ширење прслине, 575 °C; (c) стварање прслине, 20 °C; (b) ширење прслине, 20 °C.	.218
Слика 5.125. SA 387 Gr. 91 ОМ фрактографија, а) SEB епрувета 20 °C, (b) CT епрувета 575 °C, 1,500×	.219
Слика 5.126. SA 387 Gr. 91 МШ, фрактографија а) SEB епрувета 20 °C, (b) CT епрувета 575 °C, 1,500×	.219
Слика 5.127. SA 387 Gr. 91 ЗУТ, фрактографија а) SEB епрувета 20 °С, (b) СТ епрувета 575 °С, 1,500×	.219
Слика 5.128. SA 387 Gr. 91 МШ, фрактографија, СТ епрувета 575 °C, 200×	.220

ПРЕГЛЕД ТАБЕЛА

Табела 2.1. Челици за пароводе термоелектрана и одговарајуће дебљине зида8
Табела 2.2. Утицај легирајућих елемената на особине CrMoV челика9
Табела 2.3. Хемијски састав челика SA 381 Gr. 9113
Табела.2.4. Механичке особине челика SA 387.Gr. 9113
Табела 2.5. Упоредне ознаке и примењени стандарди за челик Р91 [34-36]13
Табела 3.1. Енергија удара и тврдоћа метала шава за различите процесе заваривања
Табела 3.2. Захтеване карактеристике метала шава за Р9153
Табела 3.3. Електроде за заваривање челика Р91 у зависности од поступка заваривања
Табела 3.4. Препоруке за температуре предгревања легираних челика класе Р56
Табела 3.5. Циклус термичке обраде после заваривања за легирани челик Р9160
Табела 4.1. Делимични степени сигурности114
Табела 5.1. Хемијски састав испитиване шарже челика SA 387 Gr. 91, Шаржа: 295701
Табела 5.2. Хемијски састав додатног материјала131
Табела 5.3. Механичке особине додатног материјала131
Табела 5.4. Захтеви за испитивање заварених спојева према SRPS EN ISO 15614-1:2012136
Табела 5.5. Подаци о опреми и параметри радиографске контроле139
Табела 5.6. Резултати испитивања савијањем146
Табела 5.7. Резултати мерења тврдоће на завареном споју челика SA 387 Gr. 91147
Табела 5.8. Резултати затезних својстава епрувета сучеоно завареног споја148
Табела 5.9. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ОМ
Табела 5.10. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у МШ160
Табела 5.11. Резултати ударних испитивања епрувета са V-2 зарезом у ЗУТ165
Табела 5.12. Вредности К _{Ic} епрувета са зарезом у ОМ178
Табела 5.13. Вредности К _{Ic} епрувета са зарезом у МШ182
Табела 5.14. Вредности К _{Ic} епрувета са зарезом у ЗУТ
Табела 5.15. Параметри раста заморне прслине за епрувете са зарезом у ОМ201
Табела 5.16. Параметри раста заморне прслине за епрувете са зарезом у МШ 206
Табела 5.17. Параметри раста заморне прслине за епрувете са зарезом у ЗУТ211

БИОГРАФИЈА

Миливоје Јовановић рођен је 1970. године. Основну школу је завршио у Новом Брду, а средњу Техничку школу у Приштини, смер Машински техничар контролор. Машински факултет у Приштини завршио је 1999. године на смеру Производно машинство. Докторске студије уписује 2015. године на Техничком факултету у Косовској Митровици на студијском програму Машинско инжењерство.

У периоду од 1995. до 2001. године ради у Југотерму на месту Инжењера у развоју, а касније на месту Водећег инжењера за пројектовање и монтажу. Од 2001. до 2003. године ради у Индустрији Филип Кљајић у Крагујевцу на позицији Начелника службе енергетике, безбедности на раду, противпожарне заштите и заштите животне средине. Од 2004. до 2015. године покреће приватни посао у Лепосавићу за пројектовање и монтажу грејне технике. Ангажован је на великом броју стручних послова за CHF Office Kosovo, EU Office Kosovo, MK Group и друге компаније и организације.

Од 2016. године ради на Академији струковних студија косовско метохијској, Одсек Урошевац, као асистент у настави.

Стручни испит из области заштите од пожара положио је 2003. године у Сектору за ванредне ситуације, МУП РС у Београду. Поседује и више сертификата о усавршавању, а посебно из процесне технике.

Аутор је 6 а коаутор 4 научна рада, објављених у међународним и домаћим часописима, као и презентованих на међународним и домаћим конференцијама.

ВЕРИФИКАЦИЈА НАУЧНИХ ДОПРИНОСА

Рад у истакнутом међународном часопису (М22):

 Jovanović, M., Čamagić, I., Sedmak, S., Sedmak, A., Burzić, Z." The Effect of Material Heterogeneity and Temperature on Impact Toughness and Fracture Resistance of SA-387 Gr. 91 Welded Joints", MDPI, *Materials* 2022, *15*(5), 1854, ISSN 1996-1944, <u>https://doi.org/10.3390/ma15051854</u>, 02 Mar 2022.

Рад у међународном часопису (М23):

- Živković, P., Ognjanović, M., Čamagić, I., Jovanović, M., Kalaba, D., Tomić, R., Grgić, I. (2020). "Assessment of Probability of Gear Tooth Side Wear of a Planetary Gearbox", Tehnički vjesnik, ISSN 1330-3651(Print), Vol. 27, No. 2, pp. 506-512, <u>https://doi.org/10.17559/TV-20191004093047</u>
- Jović, S., Aničić, O., Jovanović, M. (2016). "Adaptive neuro-fuzzy fusion of multi-sensor data for monitoring of CNC machining", Sensor Review, Vol. 37, No. 1 pp. 78 – 81, <u>http://dx.doi.org/10.1108/SR-06-2016-0107,ISSN:0260-2288,Accepted</u>, IF(2017)=1.070.
- 4. Jović, S., Makragić, S., Jovanovic, M. (2017). "Parameters influence of laser forming on shaped surface by soft computing technique", Optik-International Journal for Light and Electron Optics, Elsevier, Vol. 142, pp. 451-454, <u>https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.04.089, ISSN:0030-42026</u>, IF(2017)=1.191.
- Aničić, O., Jović, S., Tasić, S., Vulović, A., Jovanovic, M. (2017). "Temperature detection in cutting zone for different forms of chip shapes during machining process", Sensor Review, Vol. 38, No. 1, pp.102-105, <u>https://doi.org/10.1108/SR-07-2017-0141</u>, IF(2017)=1.070.

Рад у националном часопиасу међународног значаја (М24):

- Jovanović, M., Čamagić, I., Sedmak, S., Živković, P., Sedmak, A. (2020). "Crack initiation and propagation resistence of hsla steel welded joint constituents", Structural integrity and life, ISSN 1451-3749 (štampano izdanje) (printed edition), EISSN 1820-7863 (Online), Vol.20, No.1, pp.11-14, <u>http://divk.inovacionicentar.rs/ivk/ivk20/11-IVK1-2020-MJ-IC-SAS-PZ-AS.pdf</u>
- 7. Jovanović, M., Čamagić, I., Sedmak, A., Burzić, Z., Sedmak, S., Živković, P. (2021). "Analysis of SA 387 Gr. 91 welded joints crack resistance under static and

impact load", Procedia Structural Integrity, Vol. 31, pp.38-44, <u>http://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.008</u>

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (МЗЗ):

 Jovanović, M., Čamagić, I., Sedmak, A., Lazarević, D., Sakorčević, Ž., Stanojković, J., (2021) "Influence of temperature on the behavior of welded alloyed steel under variable load conditions" 38th Intrnational Conference on Production Engineering of Serbia – ICPE – S 2021, PROCEEDINGS, ISBN: 987-86-7776-252-0, pp. 108-112, Čačak,Serbia, 14 – 15. October 2021 <u>http://spms.fink.rs/doc/2021/Proceedings%20SPMS%202021.pdf</u>

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (М34):

9. Jovanović, M., Čamagić, I., Sedmak, A., Burzić, Z., Sedmak, S., Živković, P. (2020). "Analysis of micro-alloyed steel welded joints behaviour under impact load" (Online presentation), 4th International Conference on Structural Integrity and Durability - ICSID 2020 & Summer School - Fatigue and Fracture Modelling and Analysis Centre for Advanced Academic Studies, Dubrovnik, Croatia, 14 - 18 Sep 2020, ISSN 2584-3907, pp. 34-35.

Рад у истакнутом националном часопису (М52):

10. Jovanovic, M., Jović, S. (2018). "Possibility of anfis application for evaluation roughness of surface during CNC machining", Journal of Production Engineering, Vol. 21, No. 1, <u>https://doi.org/10.24867/JPE-2018-01-017</u>.

Образац 5.

Изјава о ауторству

Потписани Миливоје Јовановић број индекса 3/2015

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ИСТРАЖИВАЊЕ УТИЦАЈА ПРОМЕНЉИВОГ ОПТЕРЕЋЕЊА И ГРЕШКЕ ТИПА ПРСЛИНЕ НА ПРОЦЕНУ ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОМПОНЕНАТА ПРОЦЕСНЕ ОПРЕМЕ ЗА ПОВИШЕНЕ РАДНЕ ТЕМПЕРАТУРЕ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Косовској Митровици 22.03.2022. године Потпис докторанда

Образац 6.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора <u>Миливоје Јовановић</u> Број индекса <u>5/2015</u> Студијски програм <u>Машинско инжењерство</u> Наслов рада <u>Истарживање утицаја променљивог оптерећења и</u> <u>грешке типа прслине на процену интегритета заварених</u> <u>компонената процесне опреме за повишене радне температуре</u> Ментор <u>др Ивица Чамагић, ванредни професор</u>

Потписани Миливоје Јовановић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.

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 Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици.

У Косовској Митровици, 22. 03. 2022. године Потпис докторанда

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини, са привременим седиштем у Косовској Митровици и Национални репозиторијум докторских дисертација унесе моју докторску дисертацију/ писани део докторског уметничког пројекта под насловом:

<u>Истарживање утицаја променљивог оптерећења и грешке типа</u> <u>прслине на процену интегритета заварених компонената процесне опреме</u> за повишене радне температуре

која је моје ауторско дело.

Дисертацију/ писани део уметничког пројекта са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију/ писани део уметничког пројекта похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Приштини са привременим седиштем у Косовској Митровици и Национални репозиторијум докторских дисертација могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

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).

У Косовској Митровици,

22. 03. 2022. године

Потпис докторанда

- 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.
- 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.