



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U  
NOVOM SADU

---



Aleksandar Čabrilo

**MEHANIČKE OSOBINE I BRZINA RASTA ZAMORNE  
PRSLINE U ZAVARENOM SPOJU PANCIRNOG  
ČELIKA**

- doktorska disertacija -

Novi Sad, 2018 god.



## КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, <b>РБР</b> :		
Идентификациони број, <b>ИБР</b> :		
Тип документације, <b>ТД</b> :	Монографска документација	
Тип записа, <b>ТЗ</b> :	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, <b>ВР</b> :	Докторска дисертација	
Аутор, <b>АУ</b> :	Александар Чабрило	
Ментор, <b>МН</b> :	Др Катарина Герић	
Наслов рада, <b>НР</b> :	Механичке особине и брзина раста заморне прслине у завареном споју панцирног челика	
Језик публикације, <b>ЈП</b> :	Српски	
Језик извода, <b>ЈИ</b> :	Српски	
Земља публиковања, <b>ЗП</b> :	Србија	
Уже географско подручје, <b>УГП</b> :	Нови Сад	
Година, <b>ГО</b> :	2018.	
Издавач, <b>ИЗ</b> :	Ауторски репринт	
Место и адреса, <b>МА</b> :	21000 Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6	
Физички опис рада, <b>ФО</b> : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	6/215/147/40/143/0/5	
Научна област, <b>НО</b> :	Машинско инжењерство	
Научна дисциплина, <b>НД</b> :	Производно машинство	
Предметна одредница/Кључнеречи, <b>ПО</b> :	Материјали и технологије спајањем	
<b>УДК</b>		
Чува се, <b>ЧУ</b> :	Библиотека ФТН-а, Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад	
Важна напомена, <b>ВН</b> :	-	
Извод, <b>ИЗ</b> :	Циљ рада је била израда квалитетног завареног споја панцирног челика. Заварени спој поседује добре затезне карактеристике, као и високу енергију удара у метал шава и ЗУТ-у, високу отпорност на пропагацију прслине у метал шава и ЗУТ-у. Основни материјал има највећу затезну чврстоћу, најнижу енергију удара, најмању жилавост лома и отпорност на пропагацију прслине. Након балистичких испитивања установљено је да ЗУТ и основни материјал поседују балистичку отпорност, док метал шава не задовољава стандарде. Испитивањем гасне хроматографије установљена је ниска количина дифундованог и задржаног водоника у зони метал шава. У складу са тим се закључује да су параметри заваривања, као и додатни материјал одговарајуће изабрани. На основу испитивања брзине раста заморне прслине, одређен је преостали век оклопних возила која се праве од панцирног челика.	
Датум прихватања теме, <b>ДП</b> :		
Датум одбране, <b>ДО</b> :		
Чланови комисије, <b>КО</b> :		
Председник:	Др Александар Седмак, ред. проф, Машински Факултет, Београд.	
Члан:	Др Зијах Бурзић, научни саветник, Војно Технички Институт, Београд.	
Члан:	Др Борот Косец, ред. проф, Природно Технички факултет, Љубљана.	
Члан:	Др Себастијан Балаш, ванр. проф, ФТН, Нови Сад	Потпис ментора
Члан, ментор:	Др Катарина Герић, ред. проф, ФТН, Нови Сад	





## KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, <b>ANO</b> :	
Identification number, <b>INO</b> :	
Document type, <b>DT</b> :	Monograph documentation
Type of record, <b>TR</b> :	Textual printed material
Contents code, <b>CC</b> :	PhD thesis
Author, <b>AU</b> :	Aleksandar Čabrilo
Mentor, <b>MN</b> :	PhD Katarina Gerić
Title, <b>TI</b> :	Mechanical properties and fatigue crack growth at welded armour steel
Language of text, <b>LT</b> :	Serbian
Language of abstract, <b>LA</b> :	Serbian
Country of publication, <b>CP</b> :	Serbian
Locality of publication, <b>LP</b> :	Novi Sad
Publication year, <b>PY</b> :	2018.
Publisher, <b>PB</b> :	Author reprint
Publisher, <b>PB</b> :	21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6
Physical description, <b>PD</b> : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/215/147/40/143/0/5
Scientific field, <b>SF</b> :	Mechanical Engineering
Scientific discipline, <b>SD</b> :	Production Engineering
Subject/Key words, <b>S/KW</b> :	Materials and Joining Technologies
<b>UC</b>	
Holding data, <b>HD</b> :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad
Note, <b>N</b> :	-
Abstract, <b>AB</b> :	<p>The aim of this paper was to produce a high-quality welded joint of armored steel. The welded joint has good tensile properties, as well as a high impact energy in the weld metal and HAZ, and high resistance to crack propagation in the weld metal and HAZ. The base metal has the highest tensile strength, the lowest impact energy and the smallest fracture toughness and crack propagation resistance. After ballistic testing, the HAZ and basic metals have been found to have ballistic resistance, while the weld metal does not meet the standards. Gas chromatography analysis detected a low amount of diffused and retained hydrogen in the metal seam zone. It may therefore be concluded that the welding parameters and the additional material have been appropriately selected. Based on the study of the fatigue crack growth rate, the fatigue life of armored vehicles was predicted.</p>
Accepted by the Scientific Board on, <b>ASB</b> :	
Defended on, <b>DE</b> :	
Defended Board, <b>DB</b> :	President: PhD, Aleksandar Sedmak, full professor, Faculty of Mechanical Engineering, Beograd
	Member: PhD, Zijah Burzić, Military Technical Institute, Beograd
	Member: PhD, Borut Kosec, full professor, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Ljubljana
	Member: PhD, Sebastijan Baloš, associate professor, FTN, Novi Sad associate
	Mentor: PhD, Katarina Gerić, full professor, FTN, Novi Sad

## ZAHVALNOST

*Ova doktorska disertacija urađena je pod rukovodstvom Dr Katarine Gerić, redovnom profesoru Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu kojoj želim da izrazim veliku zahvalnost za pružen naučni nadzor u toku rada.*

*Želim da izrazim veliku zahvalnost i Dr Zijahu Burziću, načelniku Instituta za ispitivanje materijala na Vojnotehničkom institutu na svesrdnoj pomoći oko ispitivanja mehaničkih osobina, mehanike loma i brzine rasta zamorne prsline.*

*Zahvaljujem se prof. Borutu Kosecu, Aleksandru Sedmaku i Sebastijanu Balošu na korisnim sugestijama tokom pisanja doktorske disertacije.*

*Izražavam iskrenu zahvalnost Dr Milošu Jovanoviću, direktoru Instituta za Varilstvo, i Zoranu Stojanoviću iz ICI d.o.o., za pomoć po pitanju problematike procesa zavarivanja. Dugujem posebnu zahvalnost Goranu Pekezu i Vojvodina metal klasteru, na nesebičnom zalaganju i pomoći po pitanju zavarivanja ploča i razvoja zavarivanja robotom.*

*Takođe želim da izrazim zahvalnost velikom broju saradnika Vojnotehničkog instituta, Srđi Perkoviću na svesrdnoj pomoći oko ispitivanja mehanike loma i brzine rasta zamorne prsline kao i Dr Igoru Radisavljeviću oko ispitivanja mehaničkih osobina i energije udara. Zahvaljujem se Stanislavu Simiću na pomoći pri pripremi uzoraka za svetlosnu mikroskopiju, kao i Milošu Bokorovu na pomoći pri ispitivanju uzoraka na skening elektronskom mikroskopu.*

*I konačno, najveću zahvalnost dugujem porodici, na bezrezervnoj podršci tokom celokupnog rada na ovoj doktorskoj disertaciji.*

AUTOR

## REZIME

Zavarivanje pancirnog čelika je komplikovano zbog visokog procenta ugljenika u osnovnom materijalu, prisustva grešaka u vidu prslina i pora koji nastaju u zoni metal šava u toku procesa zavarivanja. Za zavarivanje pancirnih čelika se tradicionalno koristi austenitni dodatni materijal, jer se izbegava negativan uticaj vodonika zbog spore difuzije prema osetljivoj liniji stapanja i stvaranje prslina. Za teške konstrukcije, kao što su vojna oklopna vozila koja su frekventno pod uticajem udarnih i dinamičkih opterećenja, važno je znati dinamičke osobine najosetljivije oblasti zavarenog spoja, zone metala šava. Prslina stvorena u metal šavu, usled dinamičkog opterećenja, lako može propagirati prema osetljivoj liniji stapanja, nakon čega može nastupiti njen ubrzani rast.

Eksperimentalni deo ovog rada obuhvatio je izbor tehnologije zavarivanja koja će dati zavarenom spoju osobine koje će zadovoljiti standard MIL-STAN-1189. U skladu sa zahtevom izabran je proces zavarivanja robotom u cilju ponovljivosti i sledljivosti rezultata kao i automatizacije procesa. Ispitane su mehaničke osobine zavarenog spoja, tvrdoća i osobine pri zatezanju. Heterogenost zavarenog spoja zahteva da se ispitaju osobine u području osnovnog materijala, ZUT-a i metal šava. Instrumentirano udarno ispitivanje je izvršeno na Šarpi „V“ epruvetama, na kojima je ispitano iniciranje i rast prslina. Dinamička ispitivanja energijom udara su pokazala visoku energiju za iniciranje kao i za propagaciju prslina u zonama metal šava i linije stapanja, dok je najniža vrednost pokazala zona osnovnog materijala. Žilavost loma je važna osobina svakog zavarenog spoja, stoga je mehanika loma ispitana u svim zonama zavarenog spoja. Žilavost loma  $K_{IC}$  je najniža za osnovni materijal, a zbog velike duktilnosti u zoni metal šava i ZUT-u je određena žilavost preko vrednosti  $J_{IC}$  integrala. Svetlosni mikroskop i SEM su korišćeni za analizu mikrostrukture i površina preloma. Zbog značajnog interesa za kvantificiranje otpornosti materijala prema propagaciji prslina, izmerena je brzina rasta prslina u svim područjima. U zoni metal šava se povećava otpornost na rast prslina jer dolazi, pri rastu zamorne prslina do transformacije mekanog austenita u martenzit, što je ispitano difrakcijom X - zraka. Zbog spore difuzije, zadržani vodonik u zoni metal šava može imati štetan efekat i ubrzati rast prslina u ovoj po zateznim karakteristikama najslabijoj zoni. Količina zadržanog i difundovanog vodonika je ispitana u zoni metal šava, i njegova vrednost je bila u zadovoljavajućim granicama. Ispitivanje balističke otpornosti su imala za cilj

utvrđivanja da li je zavareni spoj zadovoljio standard NATO AEP-55 STANAG 4569. Utvrđeno je da zone ZUT-a, i osnovnog materijala zadovoljavaju, dok zona metal šava ne ispunjavanja navedeni standard.

## SPISAK OZNAKA I SKRAĆENICA

- a* – dužina prsline,  
*a<sub>i</sub>* – dužina prsline u *i*-tom ciklusu opterećenja,  
 $\Delta a$  – prirast dužine prsline,  
 $\frac{da}{dN}$  – brzina rasta prsline,  
*B* – debljina epruvete,  
*B<sub>N</sub>* – neto debljina epruvete,  
*b<sub>0</sub>* – ligament (*W*-*a<sub>i</sub>*),  
*b<sub>i</sub>* – ligament kod *i* – te dužine prsline,  
*C* – konstanta (u Paris-ovoj jednačini),  
*d* – veličina zrna,  
*%DL* – udeo duktilnog loma kod ispitivanja energije udara,  
*E* – Young-ov moduo elastičnosti,  
*Em* – masena efikasnost,  
*F(t)* – sila u funkciji vremena kod ispitivanja energije udara,  
*F<sub>a</sub>* – koja se određuje kao presek strmog pada krive sila-deformacija i krive koja osciluje,  
*F<sub>m</sub>* – maksimalna sila na krivoj sila-deformacija, (energija udara),  
*F<sub>in</sub>* – sila iniciranja na krivoj sila-deformacije, (energija udara),  
 $f_i \left( \frac{a_i}{W} \right)$  – dužina prsline,  
*H<sub>v</sub>* – tvrdoća, Hall – Petch jednačine,  
*H<sub>0</sub>* – koeficijent, Hall – Petch jednačine,  
*J* – integral (parametar mehanike loma),  
*J<sub>c</sub>* – kritična vrednost *J* –integrala,  
*J<sub>Q</sub>* – kandidovana vrednost *J* –integrala,  
*J<sub>el.</sub>* – integral (parametar mehanike loma) elastična komponenta,  
*J<sub>pl.</sub>* – integral (parametar mehanike loma) plastična komponenta,  
*J<sub>Q</sub>* – presečena tačka regresione prave i linije zatupljivanja,  
*K* – faktora intenziteta napona,  
*K<sub>c</sub>* – kritični faktor intenziteta napona (žilavost loma),  
*K<sub>IC</sub>* – kritični faktor intenziteta napona (žilavost loma) za oblik I,  
*K<sub>I</sub>* – faktor intenziteta napona za način otvaranja I,  
*K<sub>Q</sub>* – kandidovani faktor intenziteta napona,  
*K<sub>g</sub>* – gornji faktor intenziteta napona,  
*K<sub>max</sub>* – maksimalni faktor intenziteta napona,  
*K<sub>min</sub>* – minimalni faktor intenziteta napona,  
 $\Delta K_{th}$  – opseg praga faktora intenziteta napona,  
 $\Delta K$  – opseg faktora intenziteta napona (žilavost loma),  
*K<sub>HP</sub>* – Hall-Petch-ov koeficijent,  
*k<sub>0</sub>* – faktor lokalnog ometanja plastičnog tečenja materijala, (kod ispitivanja žilavosti loma),  
**LEML** – linearno elastična mehanika loma,

$L_P$  – dužina čela prsline,  
 $I$  – ligament ispred vrha prsline,  
 $m$  – koeficijent u Paris-ovoj funkciji,  
 $m_{\text{čel.}}$  – masa po jedinici površine čelika za balističku otpornost referentne,  
 $m_{\text{okl.}}$  – masa po jedinici oklopa koji pruža zaštitu kao čelik za balističku otpornost referentne tvrdoće,  
 $N$  – broj ciklusa opterećenja,  
 $N_i$  – broj ciklusa  $i$ -tom ciklusu opterećenja,  
 $\mathcal{H}$  – istorija opterećenja,  
 $\Delta P$  – opseg opterećenja kod ispitivanja brzine rasta zamorne prsline,  
 $P_5$  – sila dobijena povlačenjem sečice čiji je nagib za 5% manji od početnog nagiba dijagrama  $P$ - $V$ ,  
 $P_Q$  – najveća zabežena sila na krivoj do preseka sa sečicom,  
 $P$  – sila kod ispitivanja mehanike loma,  
 $Q$  – protok zaštitne atmosfere,  
 $R$  – odnos minimalnog i maksimalnog opterećenja,  
 $R_K$  – poluprečnik dominantne zone,  
 $R_m$  – zatezna čvrstoća,  
 $R_{p0,2}$  – napon na granici tečenja,  
 $r_P$  – zona plastičnih deformacija na vrhu prsline,  
 $r_p^c(\theta)$  – veličina plastične zone pri cikličnom opterećenju,  
 $r_{1p}$  – veličina plastične zone pri monotonom opterećenju,  
 $S$  – raspon oslonaca,  
 $s(t)$  – ugib za proračun energije udara kod ispitivanja energije udara,  
 $t$  – vreme kod ispitivanja energije udara,  
 $t_0$  – početno vreme kada počinju deformacije kod ispitivanja energije udara,  
 $\sigma_T$  – ravno stanje deformacije,  
 $\sigma_{\max}$  – maksimalno primenjeni normalni napon,  
 $\sigma_{\min}$  – minimalno primenjeni normalni napon,  
 $\Delta\sigma$  – opseg napona,  
 $\sigma_{T, \text{ef.}}$  – efektivni napon tečenja kod ispitivanja žilavosti loma,  
 $\sigma_M$  – zatezna čvrstoća,  
 $\sigma_{ys}$  – napon tečenja,  
 $\sigma_Y$  – napon tečenja kod ispitivanja energije udara,  
 $v(t)c$  – brzina udara klatna u vremenu  $t$ ,  
 $v_0$  – početna brzina udara klatna,  
 $V_m$  – maksimalno otvaranja epruvete kod ispitivanja mehanike loma,  
 $\mathcal{G}$  – Poasonov koeficijent,  
 $W$  – širina epruvete,  
 $Y$  – geometrijski faktor,

## SADRŽAJ

<b>ZAHVALNOST</b> .....	<b>I</b>
<b>REZIME</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTA SLIKA</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA TABELA</b> .....	<b>XX</b>
<b>1 UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 OSNOVA ISPITIVANJA .....	1
1.2 CILJ I POLJE ISPITIVANJA .....	2
1.3 METODOLOGIJE .....	3
1.4 ORGANIZACIJA TEZE .....	4
<b>2 TEORIJSKA RAZMATRANJA</b> .....	<b>7</b>
2.1 UVOD .....	7
2.2 PANCIRNI ČELICI .....	7
2.2.1 PANCIRNI ČELIK PROTAC 500 .....	14
2.2.2 KH DIJAGRAM PANCIRNOG ČELIKA PROTAC 500 .....	14
2.3 ZAVARIVANJA PANCIRNIH ČELIKA .....	17
2.3.1 UVOD .....	17
2.3.2 TEHNIKA ZAVARIVANJA MIG POSTUPKOM .....	20
2.3.2.1 ZAVARIVANJE U STABILNOM REŽIMU KRATKOG SPOJA .....	21
2.3.2.2 ZAVARIVANJE U STABILNOM REŽIMU SPREJ TRANSFERA .....	21
2.3.2.3 ZAVARIVANJE U STABILNOM REŽIMU PULSA .....	23
2.3.2.4 TEHNOLOŠKI PROCES ZAVARIVANJA PANCIRNIH ČELIKA .....	23
2.3.3 IZBOR ZAŠTITNE ATMOSFERE .....	24
2.3.3.1 ZAŠTITNA ATMOSFERA GAS UGLJEN-DIOKSID .....	25
2.3.3.2 ZAŠTITNA ATMOSFERA GAS ARGON .....	25
2.3.3.3 ZAŠTITNA ATMOSFERA MEŠAVINA GASA ARGONA SA UGLJEN-DIOKSIDOM I ARGONA SA KISEONIKOM .....	26
2.3.3.4 IZBOR KOLIČINE PROTOKA ZAŠTITNE ATMOSFERE .....	28
2.3.4 IZBOR DODATNOG MATERIJALA .....	29
2.3.4.1 PUNA ŽICA .....	29
2.3.4.2 PUNJENA ŽICA .....	29
2.3.4.3 IZBOR OPTIMALNOG DODATNOG MATERIJALA .....	30
2.3.5 UTICAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA U OSNOVNOM MATERIJALU, ZUT-U I METAL ŠAVU ...	32
2.3.5.1 UTICAJ HEMIJSKIH ELEMENATA U OSNOVNOM MATERIJALU I ZUT-U .....	34
2.3.5.2 UTICAJ HEMIJSKIH ELEMENATA U METAL ŠAV-U .....	35
2.4 MEHANIČKE OSOBINE I ANALIZA MIKROSTRUKTURE .....	36
2.4.1 TVRDOĆA .....	36

2.4.2 ZATEZNE KARAKTERISTIKE .....	37
2.4.3 MIKROSTRUKTURA I ŠIRINA ZUT-A ZAVAREN OG SPOJA PANCIRNOG ČELIKA .....	38
2.5 ENERGIJA UDARA .....	39
2.6 MEHANIKA LOMA U ZAVARENIM SPOJEVIMA .....	40
2.4.1 UVOD .....	40
2.4.2 KONCEPT MALE ZONE TEČENJA .....	41
2.4.3 ELASTIČNO-PLASTIČNA MEHANIKA LOMA .....	43
2.7 BRZINA RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZAVARENOM SPOJU .....	44
2.7.1 UVOD .....	44
2.7.2 ANALIZA ZAMORA SA STANOVIŠTA MEHANIKE LOMA .....	45
2.8 ZAŠTITA VOJNIH OKLOPNIH VOZILA .....	51
2.9 DIFUNDOVANI I ZADRŽANI VODONIK U ZAVARENOM SPOJU PANCIRNOG ČELIKA .....	53
<b>3 EKSPERIMENTALNE METODE .....</b>	<b>55</b>
3.1 EKSPERIMENT PROCESA ZAVARIVANJA, MATERIJAL I OPREMA .....	55
3.1.1 MEHANIČKE OSOBINE PANCIRNOG ČELIKA .....	55
3.1.2 PROCES ZAVARIVANJA .....	57
3.1.2.1 OPREMA ZA MIG PROCES ZAVARIVANJA .....	62
3.1.2.2 DODATNI MATERIJAL .....	64
3.2 ISPITIVANJA MEHANIČKIH OSOBINA I ANALIZA MIKROSTRUKTURE .....	65
3.2.1 TVRDOĆA .....	65
3.2.2 ZATEZNE OSOBINE .....	66
3.2.3 ENERGIJE UDARA .....	67
3.3 ISPITIVANJE MEHANIKE LOMA ZAVARENIM SPOJEVIMA .....	70
3.3.1 MEHANIKA LOMA U OSNOVNOM MATERIJALU .....	72
3.3.2 MEHANIKA LOMA U METAL ŠAVU I ZUT-U .....	74
3.4 BRZINE RASTA ZAMORNE PRSLINE .....	77
3.4.2 EKSPERIMENTALNA TEHNIKA .....	77
3.4.2.1 EPRUVETA .....	77
3.4.2.2 TIP EKSPERIMENTA .....	78
3.4.2.3 POSTUPAK ISPITIVANJA .....	79
3.4.3 PRORAČUN .....	81
3.4.3.1 FAKTOR INTENZITETA NAPONA I PLASTIČNA ZONA .....	81
3.4.3.2 BRZINA RASTA PRSLINE .....	82
3.4.4 ISPITIVANJE DIFRAKTOGRAFIJOM X ZRAKA .....	86
3.5 ODREĐIVANJE KOLIČINE DIFUNDOVANOG I ZADRŽANOG VODONIKA .....	87



3.5.1	UVOD .....	87
3.5.2	EKSPERIMENTALNA TEHNIKA KOD ISPITIVANJA KOLIČINE DIFUNDOVANOG VODONIKA ...	87
3.5.2.1	SNIMANJE PARAMETARA PROCESA ZAVARIVANJA U TOKU EKSPERIMENTA .....	89
3.5.2.2	APARATURA ZA MERENJE KOLIČINE DIFUNDOVANOG VODONIKA .....	89
3.5.2.3	EKSPERIMENTALNA TEHNIKA KOD ISPITIVANJA KOLIČINE ZADRŽANOG VODONIKA ..	90
3.6	EKSPERIMENT BALISTIČKE OTPORNOSTI .....	91
3.6.1	UVOD .....	91
3.6.2	EKSPERIMENTALNA TEHNIKA .....	92
<b>4</b>	<b>REZULTATI .....</b>	<b>95</b>
4.1	REZULTATI MIG PROCESA ZAVARIVANJA PANCIRNOG ČELIKA .....	95
4.1.1	REZULTATI RADIOGRAFIJE ZAVARIVANJA .....	95
4.1.2	MIG PROCES ZAVARIVANJA .....	97
4.2	REZULTATI TVRDOĆE, ENERGIJE UDARA I ZATEZNIH KARAKTERISTIKA .....	98
4.2.1	REZULTATI ISPITIVANJA TVRDOĆE .....	98
4.2.2	METALOGRAFSKA OPSERVACIJA .....	103
4.2.3	ZATEZNE KARAKTERISTIKE .....	107
4.2.4	REZULTATI ISPITIVANJA ENERGIJE UDARA .....	109
4.2.4.1	REZULTATI ISPITIVANJA ENERGIJE UDARA U OSNOVNOM MATERIJALU .....	109
4.2.4.2	REZULTATI ISPITIVANJA ENERGIJE UDARA NA LINIJI STAPANJA .....	115
4.2.4.3	REZULTATI ISPITIVANJA ENERGIJE UDARA U METAL ŠAVU .....	123
4.3	REZULTATI ISPITIVANJA MEHANIKE LOMA ZAVARENOM SPOJU .....	126
4.3.1	REZULTATI PARAMETARA MEHANIKE LOMA U ZONI OSNOVNOG MATERIJALA .....	126
4.3.2	REZULTATI PARAMETARA MEHANIKE LOMA U ZONI UTICAJA TOPLOTE .....	129
4.3.3	REZULTATI PARAMETARA MEHANIKE LOMA U ZONI METAL ŠAVA .....	135
4.4	REZULTATI RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZAVARENOM SPOJU PANCIRNOG ČELIKA .....	138
4.4.1	REZULTATI PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U OSNOVNOM MATERIJALU .....	139
4.4.2	REZULTATI PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZONI UTICAJA TOPLOTE .....	142
4.4.2.1	REZULTATI PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZONI UTICAJA TOPLOTE ..	143
4.4.2.2	REZULTATI PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE ZA POZICIJU DELOM U ZUT-U DELOM U METAL ŠAVU .....	145
4.4.3	REZULTATI PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U METAL ŠAVU .....	149
4.4.4	REZULTATI DIFRAKCIJE X – ZRACIMA .....	152
4.5	REZULTATI KOLIČINE DIFUNDOVANOG I ZADRŽANOG VODONIKA .....	153
4.6	REZULTATI ISPITIVANJA BALISTIČKE OTPORNOSTI .....	154
<b>5</b>	<b>DISKUSIJA .....</b>	<b>159</b>
5.1	DISKUSIJA PROCESA ZAVARIVANJA PANCIRNOG ČELIKA .....	159

5.1.1 DISKUSIJA KH DIJAGRAM PANCIRNOG ČELIKA .....	159
5.1.2 DISKUSIJA MIG PROCES ZAVARIVANJA .....	160
5.2 DISKUSIJA TVRDOĆE, METALOGRAFIJE I ZATEZNIH KARAKTERISTIKA .....	161
5.2.1 DISKUSIJA TVRDOĆE U ZAVARENOM SPOJU .....	162
5.2.2 DISKUSIJA METALOGRAFIJE ZAVARENOG SPOJA PANCIRNOG ČELIKA .....	164
5.2.3 DISKUSIJA ZATEZNIH KARAKTERISTIKA .....	167
5.3 DISKUSIJA ENERGIJE UDARA .....	168
5.3.1 DISKUSIJA ENERGIJE UDARA U ZONI OSNOVNOG MATERIJALA .....	168
5.3.2 DISKUSIJA ENERGIJE UDARA U ZONI LINIJE STAPANJA .....	169
5.3.3 DISKUSIJA ENERGIJE UDARA U ZONI METAL ŠAV-A .....	170
5.4 DISKUSIJA MEHANIKE LOMA ZAVARENOG SPOJA .....	172
5.4.1 DISKUSIJA MEHANIKE LOMA U OSNOVNOM MATERIJALU .....	172
5.4.2 DISKUSIJA MEHANIKA LOMA U ZUT-U I ZUT-METAL ŠAV-U .....	173
5.4.2.1 DISKUSIJA MEHANIKA LOMA U ZUT-U .....	173
5.4.2.2 DISKUSIJA MEHANIKE LOMA U ZUT-METAL ŠAVU .....	173
5.4.3 DISKUSIJA MEHANIKE LOMA U METAL ŠAVU .....	174
5.5 DISKUSIJA PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZAVARENOM SPOJU PANCIRNOG ČELIKA .....	176
5.5.1 DISKUSIJA PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U OSNOVNOM MATERIJALU .....	177
5.5.2 DISKUSIJA PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZUT-U I ZUT - METAL ŠAV-U ...	178
5.5.2.1 DISKUSIJA PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZUT-U .....	178
5.5.2.2 DISKUSIJA PARAMETARA RASTA ZAMORNE PRSLINE U ZUT-METAL ŠAV-U .....	178
5.5.3 DISKUSIJA PARAMETARA ZAMORNE PRSLINE U METAL ŠAVU .....	180
5.6 DISKUSIJA KOLIČINE DIFUNDOVANOG I ZADRŽANOG VODONIKA .....	182
5.6.1 DISKUSIJA EFEKTA MEĐUPROLAZNE I TEMPERATURE PREDGREVANJA NA KOLIČINU DIFUNDOVANOG VODONIKA .....	182
5.6.2 SUMA ISPITIVANJA KOLIČINE VODONIKA .....	183
5.7 DISKUSIJA KOD ISPITIVANJA BALISTIČKE OTPORNOSTI .....	184
5.7.1 ISPITIVANJE BALISTIČKE OTPORNOSTI .....	184
5.7.1.1 OŠTEĆENJE .....	184
5.7.1.2 BALISTIČKA OTPORNOST .....	186
5.7.2 ANALIZA POVRŠINE PRELOMA .....	187
5.7.3 MASENA EFIKASNOST .....	187
<b>6 PREDVIĐANJE PREOSTALOG VEKA SA ASPEKTA DELOVANJA PROMENNJIVOG OPTEREĆENJA .....</b>	<b>188</b>
6.1 PREDVIĐANJE PREOSTALOG VEKA VOJNOG OKLOPNOG VOZILA .....	190
<b>7 ZAKLJUČCI .....</b>	<b>202</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>204</b>

---

<b>PRILOG .....</b>	<b>I</b>
PRILOG 1 .....	I
PRILOG 2 .....	II
PRILOG 3 .....	IV
PRILOG 4 .....	VI
PRILOG 5 .....	XX

## LISTA SLIKA

**Slika 2.1.** *Tvrdoća u funkciji brzine hlađenja, pancirnog čelika Protac 500. Na osnovu rezultata dobijenih sa dilatometrijskih uzoraka.*

**Slika 2.2.** *KH dijagram za Protac 500 čelik dobijen pomoću dilatometrijske metode.*

**Slika 2.3.** *Šema mikrostrukture zone uticaja toplote kod četvero-prolaznog zavarivanja.*

**Slika 2.4.** *Šema mikrostrukture zone uticaja toplote kod: a) jedno-, b) dvo, c) četvero prolaznog zavarivanja.*

**Slika 2.5.** *Zavarivanje u režimu kratkog spoja, ploča debljine od 8 mm.*

**Slika 2.6.** *Parametri zavarivanja za tri transfera MIG postupka.*

**Slika 2.7.** *Zvonast oblik luka.*

**Slika 2.8.** *Šema sprej transfera.*

**Slika 2.9.** *Raspored toplote tokom zavarivanja čistim argonom.*

**Slika 2.10.** *a) Mešavina argona (Ar) i ugljen-dioksida (CO<sub>2</sub>) (argon+2.5%CO<sub>2</sub>), b) kao i čistog argona (argon 100%).*

**Slika 2.11.** *Mehanizam difuzije vodonika.*

**Slika 2.12.** *Prslina u metal šavu austenitnog dodatnog materijala sa visokim procentom mangana, nastala tokom procesa očvršćavanja.*

**Slika 2.13.** *Optički metalni grafikoni prethodnog austenitnog zrna nakon zagrevanja do (a) 1100 ° C; (b) 1150 ° C; (c) 1200 ° C; (d) 1250 ° C; i (e) 1350 ° C; i zatim hlađenje od 1350 ° C do (f) 1250 ° C; (g) 1200 ° C; (h) 1150 ° C; i (i) 1100 ° C.*

**Slika 2.14.** *Inženjerski problem prsline u konstrukciji a) kriva rasta prsline; b) dijagram preostale čvrstoće.*

**Slika 2.15.** *Plastična zona ispred vrha prsline,  $r_p < R_K$ , i njen zanemarljiv uticaj na nominalno polje napona.*

**Slika 2.16.** *Približna raspodela napona ispred vrha prsline  $\sigma_y$  i veličina plastično deformisane zone u prvoj aproksimaciji za: a) ravno stanje napona, RSN i b) ravnu deformaciju, RFD.*

**Slika 2.17.** *Oblast primene metoda LEML i EPML za definisanje loma.*

**Slika 2.18.** *Promene tvrdoće u zoni uticaja toplote.*

**Slika 2.19.** *Linearni rast prsline  $a-N$ ,  $t$  pri konstatnom opsegu  $\Delta K$ =faktor koncentracije napona u uslovima ograničenog tečenja  $r_p^c \ll R_K$ . Napomena:  $a$ -dužina prsline,  $N$ -broj ciklusa i  $t$ -vreme ispitivanja.*

**Slika 2.20.** *Primeri istorija opterećenja i prateći oblici pojasa plastično deformisanog materijala za koje ne važi sličnost ponašanja na vrhu rastuće prsline za iste vrednosti  $K$ -faktora i načelni oblici zavisnosti  $a=f(N)$ . a) Rastuća  $\Delta K$  koje se ostvaruje kontrolom opterećenja  $\Delta P = \text{const}$ , b) Opadajuće  $\Delta K$  pri kontroli pomeranja  $\Delta V_p = \text{const}$ , c) Stohastička primena  $\Delta K$ .*

**Slika 2.21.** Zavisnost rasta prsline  $a=f(N)$  za tri nivoa opsega opterećenja  $\Delta P=\text{const}$  pri čemu je  $\Delta P1>\Delta P2>\Delta P3$ .

**Slika 2.22.** Načelni oblici promene brzine rasta  $\frac{da}{dN} = \int(\Delta K)$  za  $R=0$  i pravci pomeranja S-krive za odnos  $R\neq 0$ .

**Slika 3.1.** Profil mikro-tvrdoće pancirnog čelika Protac 500 po njegovoj debljini u orijentaciji paralelnim sa pravcem valjanja.

**Slika 3.2.** Mikrostruktura pancirnog čelika Protac 500 kaljenog sa 920 °C i niskotemperaturno otpuštenog na 280 °C.

**Slika 3.3.** Putanja kretanja pištolja, za prolaz: a) korena, b) popune, c) desnog i d) levog pokrivnog prolaza sa veličinama a-amplituda, f-frekvencijom i b-rastojanjem od centra ose zavarivanja.

**Slika 3.4.** Šematski crtež sučeonog spoja i položaj prolaza u procesu zavarivanja.

**Slika 3.5. a)** Priprema površine oko ivice ploče.

**Slika 3.5. b)** Dodati nastavci od 100 mm na kraju ploče za zavarivanje.

**Slika 3.6.** Šematski prikaz dimenzije pancirne ploče Protac 500 sa pozicijom ugrađenog para Cr-Ni-Cr žice.

**Slika 3.7. a)** Uređaj za merenje temperature.

**Slika 3.7. b)** Pozicioniranje pištolja sa prikazom postavljene keramičke podloške.

**Slika 3.8.** Robot Kuka.

**Slika 3.9.** Alat i oprema za pozicioniranje pancirnih ploča.

**Slika 3.10.** Zavareni spoj i otisci utiskivača: a) 2 mm ispod gornje površine, b) 2 mm iznad donje površine, c) uzduž po visini u zoni metal šava, d) uzduž po visini u zoni metal šava, uz liniju stapanja i e) uz liniju stapanja na strani osnovnog materijala.

**Slika 3.11.** Šema uzimanja uzoraka iz zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.

**Slika 3.12.** Izged epruvete za ispitivanje zateznih karakteristika, izrađene prema standardu EN ISO 895.

**Slika 3.13.** Tipična slika mogućih krivih dobijenih instrumentiranim klatnom.

**Slika 3.14.** Epruveta sa V-zarezom za ispitivanje energije udara

**Slika 3.15.** Šema pozicije zareza, MŠ-metal šav, LS-linija stapanja i OM-osnovni materijal.

**Slika 3.16.** Standardna epruveta za savijanje SEN (B).

**Slika 3.17.** Visokofrekfetni pulzator za stvaranje zamorne prsline.

**Slika 3.18.** Uređaj za merenje dužine prsline.

**Slika 3.19.** Položaj merenja dužine prsline a), kao i debljine epruvete b) Napomena:  $a_{z.p.}$ - dužina prsline stvorene zamaranjem materijala,  $a_{m.z.}$ - dužina prsline stvorene mehaničkom obradom brušenjem.

**Slika 3.20.** Oprema za ispitivanje mehanike loma: osloni valjci, ekstenzometar, SEN(B) epruveta i trn za savijanje.

**Slika 3.21.** Oblik zapisa zavisnosti  $P$ - $V$  sa postupkom određivanja sile  $P_Q$  merodavne za izračunavanje žilavosti loma  $K_{IC}$ .

**Slika 3.22.** Tipični izgled krive sila-pomeranje  $P$ - $V$  sa povremenim rasterećenjima za primenu metode popustljivosti.

**Slika 3.23.** Šematski prikaz postupka definisanja  $J_R$  krive otpornosti.

**Slika 3.24.** Standardna epruveta za savijanje SEN (B).

**Slika 3.25.** Istorija opterećenja i prateći oblici pojasa plastično deformisanog materijala: a) i b) rastuće  $\Delta K$  koje se ostvaruje kontrolom opterećenja  $\Delta P = \text{const}$ .

**Slika 3.26.** Oprema za ispitivanje: uređaj za ispitivanje i merenje brzine rasta prsline i kompjuter sa kontrolom i programom za ispitivanje.

**Slika 3.27.** Visokofrekventni pulzator za stvaranje i propagaciju prsline kao i uređaj za merenje dužine prsline Fractomat.

**Slika 3.28.** Merenje propagacije prsline pomoću merne folije zalepljene na epruveti.

**Slika 3.29.** Metod inkrementalnog polinoma, izbor tačaka za određivanje brzine rasta prsline.

**Slika 3.30.** Propagacija prsline se smatra linearnom, za mali prirast prsline. Metod najmanjih kvadrata se koristi za određivanje brzine rasta prsline u regionu praga faktora koncentracije napona.

**Slika 3.31.** Šema proračuna  $da/dN$ - $\Delta K$  na osnovu podataka opterećenja i dužine prsline.

**Slika 3.32.** Nanesen dodatni materijal sa ulaznom, centralnom i izlaznom epruvetom: 1- bakarni blok, 2 – spojene epruvete, 3 - bakarna folija i 4 - vijak M12.

**Slika 3.33.** Epruvete postavljene u zaštitnu posudu a), epruvete spojene i pripremljene za zavarivanje, b).

**Slika 3.34.** Kontaktni termometar a) i uređaj za merenje težine b).

**Slika 3.35.** Uređaj za ispitivanje metodom tople gasne ekstrakcije.

**Slika 3.36.** Položaj isecanja epruvete iz zavarenog spoja za ispitivanje količine zadržanog vodonika.

**Slika 3.37.** Šema balističkog ispitivanja

**Slika 3.38.** Cev za balističko ispitivanje.

**Slika 3.39.** Korišćena municija 7,62 x 51 mm.

**Slika 3.40.** Optička barijera.

**Slika 4.1.** Nadvišenje a) i provar b) sučeono zavarenog spoja Protac 500 čelika.

**Slika 4.2.** Snimci radiografije para ploča sa oznakama A-2 a) i A-4 b).

**Slika 4.3.** Izgled zavarenih osam parova ploča.

**Slika 4.4.** Temperaturni ciklusi četvero-prolaznog MIG procesa zavarivanja austenitnim dodatnim materijalom sa temperaturom predgrevanja 150 °C i međuprolaznom temperaturom od 160 °C.

**Slika 4.5.** Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog 2 mm ispod gornje površine.

- Slika 4.6.** *Profil tvrdoće izmerenog 2 mm iznad donje površine zavarenog spoja.*
- Slika 4.7.** *Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog u zoni osnovnog materijala.*
- Slika 4.8.** *Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog u zoni metal šava.*
- Slika 4.9.** *Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog u zoni metal šava.*
- Slika 4.10.** *Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog uz liniju stapanja, na rastojanju manjem od 0,5 mm.*
- Slika 4.11.** *Makro ispitivanje različitih zona ZUT ( sa leve na desno: osnovni materijal, subkritična zona, interkritična zona, finozrna zona, grubozrna zona i metal šav).*
- Slika 4.12.** *Mikroispitivanje zavarenog spoja svetlosnom mikroskopijom a) metal šava, b) grubozrne zone ZUT, c) finozne zone ZUT, d) interkritične zone ZUT i f) subkritične zone ZUT.*
- Slika 4.13.** *Mikrostruktura a) i b) grubozrnaste zone ZUT-a, c) i d) finozne zone ZUT, e) i f) interkritične zone ZUT, d) subkritične zone ZUT, četvoroprolaznog zavarivanja.*
- Slika 4.14.** *Veličina zrna u ZUT-u: a) blizu linije stapanja, b) 1,5 do 2,5 mm mereno od linije stapanja, c) 3,4 do 4,0 mm mereno od linije stapanja i d) u osnovnom materijalu.*
- Slika 4.15.** *Dijagram napon-deformacija zavarenog spoja.*
- Slika 4.16.** *Prelomljena epruveta nakon ispitivanja zatezne čvrstoće.*
- Slika 4.17.** *Površina preloma uzorka za zatezanje.*
- Slika 4.18.** *Energija udara u zavisnosti od temperature za poziciju zareza u osnovnom materijalu.*
- Slika 4.19.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u osnovnom materijalu na temperaturi 20 °C.*
- Slika 4.20.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u osnovnom materijalu na temperaturi 0 °C-*
- Slika 4.21.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u osnovnom materijalu na temperaturi -20 °C.*
- Slika 4.22.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u osnovnom materijalu na temperaturi -40 °C.*
- Slika 4.23.** *Energija udara u zavisnosti od temperature sa zarezom na liniji stapanja.*
- Slika 4.25.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza na liniji stapanja, na temperaturi 0 °C.*
- Slika 4.26.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza na liniji stapanja, na temperaturi -20 °C.*
- Slika 4.27.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza na liniji stapanja, na temperaturi - 40 °C.*
- Slika 4.29.** *Energija udara u zavisnosti od temperature za poziciju zareza u metal šavu.*
- Slika 4.30.** *Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u metal šavu, na temperaturi 20 °C.*



**Slika 4.31.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u metal šavu, na temperaturi 0 °C.

**Slika 4.32.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u metal šavu, na temperaturi -20 °C.

**Slika 4.33.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine prelom sa prslinom u metal šavu, na temperaturi - 40 °C.

**Slika 4.34.** Dijagram  $P - v$ , za poziciju zareza u osnovnom materijalu.

**Slika 4.35.** Slika površine preloma nakon ispitivanja mehanike loma za prslinu u osnovnom materijalu.

**Slika 4.36.** Površina preloma uzorka pri određivanju  $K_{Ic}$  a) granica zamor-otvaranje b, c i d) zona razvlačenja.

**Slika 4.37.** Dijagrami a)  $P - V$  i b)  $J - \Delta a$ , sa zarezom u zoni uticaja toplote.

**Slika 4.38.** Položaj isecanja uzorka iz ZUT-a.

**Slika 4.39.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta sa zarezom u zoni ZUT.

**Slika 4.40.** Dijagrami a)  $P - V$  i b)  $J - \Delta a$ , sa pozicijom zareza u ZUT/metal šavu.

**Slika 4.41.** Položaj isecanja uzorka iz ZUT/metal šava.

**Slika 4.42.** Prelomljena epruveta sa zarezom u ZUT kod epruvete ispitane mehanikom loma.

**Slika 4.43.** Prelomljena epruveta sa zarezom u ZUT/metal šavu kod epruvete ispitane mehanikom loma.

**Slika 4.44.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta sa zarezom u ZUT/metal šavu.

**Slika 4.45.** Dijagram a)  $P - V$  i b)  $J - R$  kriva za zarez u metal šavu.

**Slika 4.46.** Položaj isecanja uzorka iz metal šava.

**Slika 4.47.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta sa zarezom u metal šavu.

**Slika 4.48.** Šema položaja zareza i rasta prsline iz zavarenog spoja, a) osnovi materijal, b) ZUT, c) ZUT/metal šav i d) metal šav.

**Slika 4.49.** Dijagram zavisnosti dužina prsline od broja ciklusa optrećenja a) i brzine rasta zamorne prsline po ciklusu  $da/dN$  u zavisnosti od faktora intenziteta napona,  $\Delta K$  b), za zarez u osnovnom materijalu.

**Slika 4.50.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju sa zarezom u osnovnom materijalu.

**Slika 4.51.** Fraktografija površine preloma ispitivane epruvete na brzinu rasta zamorne prsline u osnovnom materijalu.

**Slika 4.52.** Dijagrami a) zavisnosti dužina prsline  $a$ , od broja ciklusa,  $N$ , i b) brzine rasta zamorne prsline po ciklusu,  $da/dN$ , u zavisnosti od faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za zamornu prslinu u ZUT-u.

**Slika 4.53.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju sa zarezom u ZUT-u.



**Slika 4.54.** Fraktografija površine preloma ispitivane epruvete na brzinu rasta zamorne prsline u ZUT-u.

**Slika 4.55.** Dijagrami a) zavisnosti dužina prsline  $a$ , od broja ciklusa,  $N$ , i b) brzine rasta zamorne prsline po ciklusu,  $da/dN$ , u zavisnosti od faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za zarez u ZUT /metal šavu.

**Slika 4.56.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju u ZUT/metal šavu.

**Slika 4.57.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta na brzinu rasta zamorne prsline u ZUT/ metal šavu.

**Slika 4.58.** Dijagram zavisnosti dužina prsline  $a$ , od broja ciklusa  $N$  a) i brzine rasta zamorne prsline po ciklusu  $da/dN$  u zavisnosti od faktora intenziteta napona  $\Delta K$  b), za zarez u metal šavu.

**Slika 4.59.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju iz metal šava.

**Slika 4.60.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta na brzinu rasta zamorne prsline u metal šavu.

**Slika 4.61.** XRD-difraktogram epruvete koja je ispitana.

**Slika 4.62.** Oštećenja zone metal šava: a) proboj (hitac 2); b) zador sa izbočinom (hitac 3).

**Slika 4.63.** Oštećenje u oblasti ZUT-a: a) leva strana zador sa prslinom (hitac 4 i 5); b) desna strana zador krenuo čep (hitac 6).

**Slika 4.64.** Oštećenje u oblasti osnovnog materijala: leva strana zador (hitac 7 i 8); desna strana zador (hitac 9).

**Slika 5.1.** Mikrostruktura metal šava pancirnog čelika, dobijenog optičkim mikroskopom za: a) manuelno zavarivanje i b) automatizovano zavarivanje.

**Slika 5.2.** Vickers mikrotvrdoća u funkciji veličine zrna  $d^{-1/2}$  za ZUT oblast Protac 500 čelika.

**Slika 5.3.** Proračunat odnos napona tečenja u funkciji veličine zrna  $d^{-1/2}$  za oblast ZUT-a čelika Protac 500, Hardox 450 i martenzitnog čelika.

**Slika 5.4.** Šarpi epruvete sa prelomom koji prati liniju stapanja zavarenog spoja.

**Slika 5.5.** Uporedni dijagram prelaznih temperatura krtosti za poziciju prsline u metal šavu, ZUT-u i osnovnom materijalu, za četvero prolazni MIG procesa zavarivanja.

**Slika 5.6.** Uporedna vrednost žilavosti loma,  $K_{IC}$ , za pozicije prsline u osnovnom materijalu, ZUT-u, ZUT metal šavu i metal šavu zavarenog spoja pancirnog čelika.

**Slika 5.7.** Parisova kriva za pancirne čelike AISI 4340, Ni-Cr-Mo i XAR 30.

**Slika 5.8.** Uporedni dijagram brzine rasta prsline za svaku zonu zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.

**Slika 5.9.** Zavisnost srednje vrednosti oštećene površine od tvrdoće materijala u zoni metal šava, ZUT-a i osnovnog materijala.

**Slika 5.10.** Zavisnost srednje vrednosti oštećene površine od energije udara materijala u zoni metal šava, ZUT-a i osnovnog materijala.

**Slika 6.1.** Udeo perioda iniciranja  $N_i$  i perioda rasta zamorne prsline  $N_p$  u ukupnom veku zamora  $N_f$ .

**Slika 6.2.** *Pozicija mernih traka na Vojnom oklopnom vozilu Lav – 25.*

**Slika 6.3.** *Efektivni napon / vreme kod Rozete C u slučaju saobraćanja po gruboj podlozi.*

**Slika 6.4.** *Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod osnovnog materijala. Napomena: Pretpostavljena dužina prsline, a, mm.*

**Slika 6.5.** *Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT-a. Napomena: Pretpostavljena dužina prsline, a, mm.*

**Slika 6.6.** *Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT-MŠ. Napomena: Pretpostavljena dužina prsline, a, mm.*

**Slika 6.7.** *Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod metal šava. Napomena: Pretpostavljena dužina prsline, a, mm.*

## LISTA TABELA

**Tabela 2.1.** *Mehaničke osobine pancirnog čelika 500 HB.*

**Tabela 2.2.** *Hemijski sastav ruskih pancirnih čelika.*

**Tabela 2.3.** *Mehaničke osobine ruskih pancirnih čelika.*

**Tabela 2.4.** *Hemijski sastav pancirnog čelika Mars.*

**Tabela 2.5.** *Mehaničke osobine pancirnih čelika Mars.*

**Tabela 2.6.** *Hemijski sastav pancirnog čelika Armox.*

**Tabela 2.7.** *Mehaničke osobine pancirnog čelika Armox.*

**Tabela 3.1.** *Hemijski sastav pancirnog čelika Protac 500.*

**Tabela 3.2.** *Mehaničke osobine pancirnog čelika Protac 500.*

**Tabela 3.3.** *Parametri zavarivanja za pancirni čelik Protac 500.*

**Tabela 3.4.** *Hemijski sastav dodatnog materijala AWS A5.9 ER307.*

**Tabela 3.5.** *Mehaničke osobine dodatnog materijala AWS A5.9 ER307 [100].*

**Tabela 3.6.** *Parametri zavarivanja za temperature pedgrevanja od 150 °C i 160 °C.*

**Tabela 3.7.** *Prikaz analogije balističkog ispitivanja.*

**Tabela 4.1.** *Karakteristike ciklusa hlađenja (vreme hlađenja  $t_{8/5}$ ,  $t_{6/2}$  i prosečna brzina hlađenja) četvero prolaznog MIG procesa zavarivanja austenitnim dodatnim materijalom sa temperaturom predgrevanja 150 °C i međuprolaznom temperaturom od 160 °C.*

**Tabela 4.2.** *Karakteristike dijagrama napon-deformacija četvero prolaznog MIG procesa zavarivanja.*

**Tabela 4.3.** *Rezultati ispitivanja energije udara sa pozicijom zarez u osnovnom materijalu.*

**Tabela 4.4.** *Rezultati ispitivanja energije udara sa pozicijom zarez na liniji stapanja.*

**Tabela 4.5.** *Rezultati ispitivanja energije udara sa pozicijom zarez u metal šavu.*

**Tabela 4.6.** *Rezultati merenja dužine zamorne prsline.*

**Tabela 4.7.** *Rezultati mehanike loma u osnovnom materijalu.*

**Tabela 4.8.** *Merenje ukupne dužine prsline za poziciju u ZUT-u.*

**Tabela 4.9.** *Merenje ukupne dužine prsline u ZUT/metal šavu.*

**Tabela 4.10.** *Merenje ukupne dužine prsline u zoni metal šava.*

**Tabela 4.11.** *Vrednosti kritičnog J-integrala,  $J_{IC}$  i žilavosti loma  $K_{IC}$ .*

**Tabela 4.12.** *Parametri Parisove jednačine za prslinu u osnovnom materijalu.*

**Tabela 4.13.** *Parametri Parisove jednačine za prslinu u zoni uticaja toplote.*

**Tabela 4.14.** *Parametri Parisove jednačine za brzinu rasta prsline na  $\Delta K= 20$  [MPa\*m<sup>1/2</sup>] za prslinu u ZUT/metal šavu.*

**Tabela 4.15.** *Parametri Parisove jednačine za brzinu rasta prsline na  $\Delta K= 20$  [MPa\*m<sup>1/2</sup>] za prslinu u metal šavu.*

**Tabela 4.16.** *Rezultati rendgenske strukturalne analize.*

**Tabela 4.17.** *Parametri zavarivanja kod ispitivanja količine difundovanog vodonika.*

**Tabela 4.18.** *Nivo difundovanog vodonika izmeren za austenitni dodatni materijal kod temperature predgrevanja od 150 °C i 160 °C kao i količina zadržanog vodonika.*

**Tabela 4.19.** *Rezultati ispitivanja balističke otpornosti za zonu metal šava zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.*

**Tabela 4.20.** *Rezultati ispitivanja balističke otpornosti u oblasti ZUT-a zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.*

**Tabela 4.21.** *Rezultati ispitivanja balističke otpornosti u oblasti osnovnog materijala zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.*

**Tabela 5.1.** *Uporedni rezultati energije u ispitivanjima Bernetič, Trajkovskog sa rezultatima u ovom ispitivanju za zonu osnovnog materijala čelika Protac 500.*

**Tabela 5.2.** *Uporedni rezultati ispitivanja energije udara u zoni metal šava pancirnih čelika zavarenim austenitnim dodatnim materijom na temperaturi 20 °C.*

**Tabela 5.3.** *Najveća dozvoljena dužina prsline za dozvoljenu žilavost loma.*

**Tabela 6.1.** *Efektivno opterećenje izmereno na odabranim pozicijama vojnog oklopnog vozila LAV 25.*

**Tabela 6.2.** *Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u osnovnom materijalu. Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 1,0 \cdot 10^{-9}$ ,  $m = 3,35$ .*

**Tabela 6.3.** *Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u ZUT-u. Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 6,0 \cdot 10^{-13}$ ,  $m = 5,97$ .*

**Tabela 6.4.** *Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u ZUT-Metal šav. Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $m = 5,07$ .*

**Tabela 6.5.** *Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u metal šavu. Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 4,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $m = 5,25$*

# 1 UVOD

## 1.1 Osnova ispitivanja

Oklopna vozila i vozila za prenos trupa se prave od pancirnog čelika. Pancirni čelici su problematični za zavarivanje zbog visokog nivoa ugljenika, odnosno otvrdnjavanja i sklonosti prema hladnim prslinama. Prsline u većini slučajeva nastaju uz liniju stapanja, u zoni uticaja toplote (ZUT). Kao rezultat eksploatacije oklopnih vozila na različitim topografijama terena za vreme vojnih operacija [1, 2], zone zavarenog spoja: metal šav i ZUT su objekat izloženi dinamičkim opterećenjima.

Prsline prisutne u ZUT-u za vreme eksploatacija oklopnih vozila mogu dovesti do katastrofalnih lomova. Pod ovim uslovima, znanje mehanike loma i brzine rasta zamorne prsline u svim delovima zavarenog spoja je od presudne važnosti za upotrebu zavarenog pancirnog čelika. Zavareni pancirni čelik treba da ima adekvatan otpor rastu zamorne prsline da bi imao željene eksploatacione zahteve za vojnu upotrebu.

Postoje brojne mehaničke osobine koje su važne za zavareni spoj. Kontrola nivoa tvrdoće u ZUT, je važan aspekt kod procene rizika od vodonične hladne prsline. Veći nivo tvrdih martenzitnih konstituenata u ZUT-u, veća je verovatnoća stvaranja hladnih prslina. Prsline mogu nastati u ZUT-u, uz liniju stapanja osnovnog materijala i metal šava [3, 4]. Potrebno je odabrati odgovarajuće parametre zavarivanja i hemijski sastav dodatnog materijala, da bi se obezbedio najbolji kompromis između tvrdoće i žilavosti. Važan kriterijum za komponente korišćene u konstruisanju oklopnih vozila su zahtevi balističke otpornosti. Na osnovu standarda MIL-A-46100 [5], površina na rastojanju daljem od 15,9 mm mereno od osne linije metal šava ne sme imati tvrdoću manju od 509 HV. U pogledu zateznih karakteristika minimalna zatezna čvrstoća od 550 MPa ako je u pitanju austenitni dodatni materijal. Kontrolisanjem toplote i mikro legiranih elemenata može se podići žilavost u ZUT-u.

Suprostavljene strane u drugom svetskom ratu su brzo shvatile da se bitke dobijaju zahvaljujući visokoj produktivnosti, veliki broj tenkova, oklopnih vozila, vojnih džipova proizvedenih u jedinici vremena i slanje istih na bojna polja. Suprostavljena strana i pored uništenja velikog broja nije mogla da se suprostavi novim nadolazećim oklopnim vozilima. MIG

proces zavarivanja omogućuje superiornost u produktivnost poredeći sa manuelnim elektrolučnim postupkom, na način da se žica kontinualno dodaje u metalno kupatilo izbegavajući frekventno startovanje u zaustavljane kao što je o slučaj kod elektrolučnog zavarivanja. Ako se pri tome doda niska količina vodonika, zahvaljujući zaštitnoj atmosferi i mogućnosti automatizacije procesa korišćenjem robota i pune ili metalnim prahom punjene žice, MIG postupak je najbolji. Osnovna prednost pune žice je mala količina vodonika u metal šavu i ZUT-u, kao i u prilagodljivost automatskom procesu zavarivanja zbog izostanka potrebe za međuprolaznim čišćenjem [6] kao rezultat odsustva šljake. U ispitivanju zadržane količine vodonika [7] u zavarenom spoju pancirnog čelika se pokazalo da velika količina vodonika biva “zaključana” u austenitnoj mikrostrukturi metal šava, dok je feritni dodatni materijal imao manju količinu vodonika, što znači da je veći deo vodonika difundovao iz metal šava prema ZUT-u. Može se zaključiti, da se u zavarenom spoju feritnog dodatnog materijala može očekivati velika količina vodonika u ZUT-u, a time i sklonost prema hladnim prslinama.

Ispitivanja u ovom radu bi se usmerilo na zavarivanje austenitnim dodatnim materijalom MIG postupkom čiji je cilj dobijanje kvalitetnog zavarenog spoja. Nakon čega bi se ispitivanja nastavila sa ispitivanjem mehaničkih osobina i balističke otpornosti zavarenog spoja.

## 1.2 Cilj i polje ispitivanja

Zavareni pancirni čelici spadaju u visoko odgovorne konstrukcije, kod kojih su spojevi osetljivi na prsline i njihov stabilni ili nestabilni rast. Poznavanje veka zavarenog spoja sa prslinom, kada se ona otkrije nekom od bez razarajućih metoda, u metal šavu i u osnovnom materijalu je od izuzetnog značaja. Cilj ispitivanja jeste razvoj tehnološkog procesa zavarivanja i dobijanja tvrdoće u oblastima ZUT-a, koja će biti bliska osnovnom materijalu. Od zavarenog spoja se očekuju bolje ili jednake vrednosti zateznih karakteristika u odnosu na već objavljena ispitivanja zavarenih spojeva pancirnih čelika [8] sa austenitni dodatnim materijalom, kao i dobijanja ocene zavarenog spoja koja će pripadati klasi B, maksimalnoj oceni zavarenog spoja.

Nakon ostvarivanja ovih ciljeva, ispitivanja su fokusirana na upoznavanju mehaničkih osobina zavarenog spoja. Kao drugi glavni cilj u ovom radu jeste poznavanje žilavosti loma i brzine rasta zamorne prsline i u mehanika loma u različitim zonama zavarenog spoja.

Glavni ciljevi u ovoj disertaciji su:

1. Razvoj tehnološkog procesa zavarivanja i dobijanje zavarenog spoja bez poroznosti, prslina i grešaka,
2. Postizanje vrednosti mehaničkih osobina koja će biti veća ili jednaka u odnosu na sadašnje stanje u literaturi,
3. Predviđanje zamornog rasta prslina, korišćenjem linearno elastične mehanike loma, praćenjem rasta zamorne prslina,
4. Analiza eksperimentalno dobijenih podataka, njihova međusobna povezanost i mogućnost primene,
5. Ispitivanje količine zaostalog i zadržanog vodonika,
6. Ispitivanje balističke otpornosti zavarenog spoja.

### 1.3 Metodologije

Ispitivanja u ovom radu su eksperimentalna. Energija udara ispitana instrumentiranim klatnom će omogućiti snimanje sila-vreme, sa ciljem razdvajanja energije iniciranje od energije propagacije prslina. U ovom delu će se ispitati i uticaj temperature na energiju udara.

Plastična zona na vrhu prslina kod pancirnog čelika je mala u poređenju sa dužinom prslina, iz istih razloga primeniće se linearno-elastična mehanika loma i metod za određivanje,  $K_{IC}$ . U metal šavu i zoni uticaja toplote, veličina plastične zone je velika u odnosu na dužinu prslina. U ovim zonama primeniće se elasto - plastična mehanika loma. U oblasti elasto-plastične mehanike loma odrediće se kritična vrednost J-integrala,  $J_{IC}$ .

Proces zamornog loma se može podeliti u tri vremenske faze, a) fazu stvaranja mikro-prslina,  $a_i$ , i njenog dalje rasta do veličine koja se može otkriti,  $a_0$ . b) fazu stabilnog rasta makro-prslina do pojave nestabilnosti pri dužini,  $a_c$ . c) fazu nestabilnog rasta i konačnog kvazistatičkog loma. Mehanizmi iniciranja i rasta mikro-prslina se razlikuju od mehanizama rasta makro-prslina. Koncept lokalnih deformacija se primenjuje za fazu inicijiranja prslina, dok se koncept mehanike loma primenjuje za fazu rasta makro-prslina. S obzirom da se na brzinu rasta makroskopske prslina ne može uticati promenom strukture, to preostaje da se za dati materijal odredi brzina rasta prslina u laboratorijskim uslovima i da se, nakon što se povremenim inspekcijama odredi



veličina prsline, proceni preostali vek dela konstrukcije. Koncept linearno-elastične mehanike loma će se primeniti za određivanje rasta prsline pri zamoru. Uslovi na vrhu prsline će jednoznačno biti definisani samo preko opsega faktora intenziteta napona  $\Delta K$ . Ispitivanje će biti pri opterećenju kada dolazi do otvaranja prsline (način I) koji je dominantan za ispitivanje makroskopskog rasta prsline. Pored opsega  $K$ -faktora,  $\Delta K$ , na ponašanje pri rastu prsline značajno utiče i srednji napon koji se izražava preko odnosa  $R=K_{min}/K_{max}$ . U ispitivanju će se koristiti čisto zatezno opterećenje sa vrednošću  $R=0,1$ . Kao posledica formiranja plastične oblasti na vrhu prsline, javlja se pojam zatvaranja prsline. Što je vrednost  $R=K_{min}/K_{max}$  veće, zatvaranje vrha prsline je manje izraženo. Iz istih razlogu u ispitivanju se neće uzimati u obzir zatvaranje vrha prsline.

## 1.4 Organizacija teze

Rad je podeljen na sedam poglavlja sa literaturom i dodatnih pet priloga. U prvom poglavlju detaljno je opisana motivacija koje podstakla autora na ispitivanje zavarenog spoja pancirnog čelika. Izložen je pregled do sada primenjenih metoda za ispitivanje mehanike loma i zamornog rasta prsline u materijalu. Na kraju poglavlja izložena je hipoteza i očekivani doprinos radu. U uvodnom delu disertacije su prikazani eksploatacioni zahtevi koje pancirni čelik treba da ispuni. Istaknuti ključni problemi koji se javljaju pri zavarivanju. Primena mehanike loma na prsline i slične greške omogućava analizu veka konstrukcije. U istom poglavlju dat je detaljno prikaz hipoteza disertacije, metodologije i ciljevi.

U drugom poglavlju je dat sistematičnom prikaz vrsta pancirnih čelika, njihovo dobijanje, osobine i analizirane su mogućnosti, prednosti i nedostaci različitih metoda zavarivanja, izbor dodatnog materijala, što je neophodno da bi se odabrala tehnologija koja omogućuje dobijanje zavarenog spoja koji ispunjava visoke zahteve postavljene za pancirni čelik. U drugom delu ovog poglavlju dat je pregled dosadašnjih istraživanja u zemlji i svetu. Praktičnoj primeni zavarenog spoja pancirnog čelika treba da prethodi detaljno proučavanje njihovih mehaničkih i eksploatacionih osobina, kao što je tvrdoća, zatezna čvrstoća i udarne karakteristike, koje su veoma značajne i sa stanovišta balističkih osobina. U realnim uslovima ne sme da se isključi mogućnost pojave grešaka u zavarenim spojevima, a obično nije ekonomski opravdano praviti zavareni spoj bez grešaka, te je definisan značaj mehanike loma u analizi prisustva prsline u zavarenim spojevima, kao najopasnije greške. Kod zavarenih spojeva



pancirnih čelika prisutni vodonik može da izazove pojavu prslina. Eksploatacijske osobine koje pancirni čelik treba da ima su balističke, te zavareni spoj treba da zadovolji zahteve balističke otpornosti od projektila.

U trećem i četvrtom poglavlju je dat u metodološkom prikazu rezultat eksperimentalnih ispitivanja osobina zavarenog spoja pancirnih čelika. Na osnovu analize *KH* dijagrama, odabrane su temperature predgrevanja i međuprolaza, brzina hlađenja i tehnologija zavarivanja. Opisane su metode mehaničko - eksploatacijskih ispitivanja. Ovo se pre svega odnosi na određivanje tvrdoće, zateznih osobina. Energija udara je određena merenjem signala u toku loma na instrumentiranom klatnu. Zbog heterogenosti zavarenog spoja koji se sastoji od osnovnog metala, metal šava i zone uticaja toplote, energija udara je ispitivana u svim zonama, kao i parametri mehanike loma i parametri rasta zamorne prsline. Određeni su koeficijenti u Parisovoj jednačini, za sva područja zavarenog spoja i prikazane dobijene vrednosti praga zamora,  $K_{th}$ . Izračunate su ciklične karakteristike koje se koriste za procenu preostalog veka zavarenog spoja pancirnog čelika. Prikazani su i rezultati makro i mikrostrukturnih ispitivanja zavarenog spoja pancirnog čelika i opisana područja loma, primenom skening elektronske mikroskopije radi otkrivanja uzroka loma. Na osnovu mikroskopskog ispitivanja, veličine prethodnog austenitnog zrna, uspostavljena je veza koja definiše tvrdoću u zavisnosti od veličine zrna. Merena je količina vodonika koja može da izazove probleme u zavarenom spoju pancirnog čelika. XRD analizom je otkriveno da pri rastu zamorne prsline u metalu šava, dolazi do transformacije austenitnog materijala u martenzit. Osnovna uloga pancirnog čelika je balistička zaštita i ispitivanja koja su pokazala da takav zavareni spoj ima osobine koje mogu da zaštite objekat u odgovarajućem trenutku. Ispitivanje balistike je potvrda da zavaren spoj u regionu ZUT-a ima balističku otpornost od prodiranja zrna.

U petom poglavlju su analizirani dobijeni rezultati ispitivanja. Transformacijom austenitnog materijala u martenzit pri rastu zamorne prsline dolazi do ojačavanja metal šava, a to je objašnjenje za dobijene visoke zamorne karakteristike zavarenog spoja. Rezultati ispitivanja veličine austenitnog zrna pre transformacije, su omogućili određivanje koeficijenata Hall-Petchove jednačine, koja omogućava primenu rezultata eksperimentalnih ispitivanja na procenu preostalog veka zavarenog spoja pancirnog čelika.

U šestom poglavlju je definisana procedura za određivanje zaostalog veka za zavarene spojeve, kako u osnovnom materijalu, tako i u metalu šava i zoni uticaja

toplote. Rezultati su pokazali da ovaj proračun može biti od velikog značaja za predviđanje ispitivanja zavarenih spojeva pancirnog čelika.

U sedmom poglavlju, na osnovu sprovedenih istraživanja, dati su zaključci i pravci daljih istraživanja.

## 2 TEORIJSKA RAZMATRANJA

### 2.1 Uvod

U ovom poglavlju su zajedno sa pregledom literature, obuhvaćena dosadašnja istraživanja iz oblasti procesa zavarivanja pancirnih čelika, energije udara, zatim linearno elastične mehanike loma, brzine rasta zamorne prsline kao i o balističkoj otpornosti zavarenih spojeva.

### 2.2 Pancirni čelici

Pancirni čelici spadaju u grupu čelika ultra visoke čvrstoće, poseduju visoku tvrdoću i dobru duktilnost. Prema mehaničkim karakteristikama, odnosno naponu tečenja, pancirni čelici pripadaju grupi čelika visoke čvrstoće ( $750 < R_{p0,2\%} > 1500$  MPa). Kada se zahteva pancirna zaštita protiv lakih oružja, pancirni čelik biva odabran zbog njegovih: mehaničkih osobina, balističke otpornosti i težine. Posebna prednost pancirnih čelika je proces proizvodnje [8, 9] i lakoća u izradi koju on pruža kada je u pitanju cena, u odnosu na ostale pancirne materijale [10]. Pancirni čelici klase 500 HB su dizajnirani da daju prihvatljivu zavarljivost uz dobru balističku otpornost.

Pri proizvodnji pancirnih čelika ploče se toplo valjaju na željenu debljinu i dostavljaju u valjanom stanju na termičku obradu. Termička obrada se sastoji iz kaljenja, gde se stvara krti, kaljeni martenzit, zatim sledi niskotemperaturno otpuštanje kojim se dobija žilavost uz dozvoljeno smanjenje tvrdoće. Ova dva koraka termičke obrade kao rezultat daju superiornu kombinaciju: tvrdoće, čvrstoće i žilavosti. Temperatura otpuštanja pancirnih čelika je od 200 do 280 °C. Na taj način se povećava duktilnost, odnosno energija udara čelika, uz umereno smanjenje zatezne čvrstoće i napona tečenja. U skladu s tim, može da se konstatuje da je osnovni mehanizam ojačavanja ovih čelika mehanizam ojačavanja faznim transformacijama. Pri tome dolazi do promene kristalne strukture, čime se otežava klizanje. Pored pomenutog, prisutni su i drugi mehanizmi ojačavanja, pre svega disperziono ojačavanje i ojačavanje granicama zrna. Ova dva mehanizma su izražena kod niskolegiranih čelika, odnosno, čelika za pancirnu zaštitu, jer se pri otpuštanju na temperaturi od ~ 200 °C, stvara  $\epsilon$ -karbid ili cementit. Vreme i temperatura otpuštanja kod pancirnih čelika igraju značajnu ulogu na otpornost u prodiranju projektila [11]. Legirani čelici otpušteni na temperaturi od ~ 200 °C, imaju značajno višu zateznu čvrstoću u odnosu na sadržaj ugljenika,

odnosno, višu energiju udara u odnosu na zateznu čvrstoću, što je važno za balističku otpornost, [slika 2.24](#).

Na osnovu studija vojnih standarda i naučnoj literaturi, pancirni čelik mora da zadovolji određena mehanička svojstva koja su data u [tabeli 2.1](#).

**Tabela 2.1.** *Mehaničke osobine pancirnog čelika 500 HB.*

Tvdoća po Brinelu	$R_{P0,2}$	$R_m$	$R_{P0,2}/R_m$	$A_5$	Energija udara
HB	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]		%	[J]
477-534	1150-1250	1500-1700	0,65-0,75	Min.9	Min.20

Pored mehaničkih osobina, velika pažnja se posvećuje i tehnološkim osobinama, kao što je prokaljivost (za obezbeđenje adekvatnih mehaničkih osobina po dubini za ploče veće debljine) i zavarljivost [12]. Prokaljivost je takođe važna karakteristika, pre svega kod čelika za pancirnu zaštitu, gde na pojedinim mestima, debljina iznosi i do 280 mm. Zbog zahteva za zaustavljanje projektila, permanentna je potreba za što ujednačenijom strukturom po poprečnom preseku što se postiže ukoliko je prokaljivost čelika veća.

Osnovni mehanizam zaustavljanja projektila kod čelika za pancirnu zaštitu je apsorpcija kinetičke, odnosno energije projektila, kod probojne i kumulativne municije, respektivno. Ti mehanizmi su zastupljeni i kod drugih tipova homogenih metalnih oklopa [13]. Povećan sadržaj ugljenika utiče na povećanje deformacije kristalne rešetke putem mehanizma intersticijskog rastvarajućeg ojačavanja, gde atomi ugljenika (koji se smeštaju u oktaedarske rupe feritne osnove) izazivaju deformacije kristalne rešetke  $\alpha$  – željeza. Kao posledica toga, kod čelika sa ispod 0,4 % ugljenika, se javlja dislokacioni (paketasti) martenzit, čime se otežava kretanje dislokacija. Uz to, atomi ugljenika stvaraju atmosfere oko dislokacija i blokiraju njihovo kretanje, pa je potreban veći napon za njihovo pokretanje, što izaziva efekat ojačavanja (intersticijsko rastvarajuće ojačavanje). Na taj način, dolazi do povećanja tvrdoće, napona tečenja i zatezne čvrstoće, međutim, kao posledica se javlja i smanjenje duktilnosti. U osnovi, i kod rastvarajućeg i kod mehanizma ojačavanja dislokacijama, ujedno sa povećanjem napona tečenja dolazi do smanjenja duktilnosti. Smanjenje duktilnosti se javlja kroz mehanizam nagomilavanja dislokacija, koje dospevaju u graničnu površinu sekundarnih faza ili granice zrna i blokiranja njihovog

daljeg kretanja. Kao posledica, dolazi do poniranja dislokacija u graničnu površinu, dolazi do dekohezije i stvaranja mikrošupljina, koje prerastaju u mikroprslinae [14]. Kretanja dislokacija utiče na tvrdoću. Pancirni čelici se najčešće dele prema tvrdoći, zbog čega proizvođači kao što su Bisaloy, SSAB i Acroni nazive pancirnih čelika daju prema vrednosti njegove tvrdoće.

U svetu je trenutno u upotrebi veliki broj različitih tipova čelika namenjenih za pancirnu zaštitu, najčešće u obliku valjanih limova i ploča. Kad oklopnih vozila se koriste dve grupe pancirnih čelika. U prvu grupu spadaju čelici čija je tvrdoća od 470 HB do 540 HB koja po američkom standardu pripada klasi 4A sa oznakom MIL-A-46110D [15]. Ovi pancirni čelici su male žilavosti. U drugu grupu spadaju žilaviji čelici čija se vrednost tvrdoće kreće u granicama od 370 HB do 430 HB [16]. Prema nameni pancirni čelici se mogu podeliti na one koje se koriste na oklopnim vozilima čija je tvrdoća od 400 do 500 HB, kao i na one koje se koriste na tenkovima čija je tvrdoća od 270 HB do 400 HB. Čelici za pancirnu zaštitu tvrdoće preko 500 HB su zbog većeg sadržaja ugljenika manje pogodni za zavarivanje, tako da se koriste uglavnom u funkciji dodatne zaštite. Trenutno najefikasniji čelik čija je namene za pancirnu zaštitu je dvoslojni ili troslojni čelik, dobijen eksplozivnim spajanjem ili valjanjem dve ili tri vrste čelika, nakon čega se vrši termička obrada (kaljenje i otpuštanje) [13].

Peforirani pancirni čelici su prvobitno predloženi 1986 godine [17], i bili su bazirani na izbušenim rupama na pancirnim čeličnim pločama. Prečnik rupa i prostor između njih su dizajnirani za malokalibarska oruđa sa kalibrom od 5,56 do 14,5. Često je u upotrebi paket pancirne zaštite koji se sastoji od perforacije trougaonog oblika na termički tretiranim pločama. Kako bi se obezbedio otpor od pravolinijske penetracije projektila, pozicija rupa kod unutrašnje i spoljašnje ploče su paralelne pomerene respektujući jednu u odnosu na drugu [17]. Poznat je paket pancirne zaštite koji se sastoji od dodatne perforirane pancirne čelične ploče kod koje je površina sa rupama iznosi 40-50% od ukupne površine ploče [18]. Razvijen je velik broj specijalizovanih čelika za pancirnu zaštitu, koji se od drugih čelika razlikuju po nekim specifičnostima.

U nastavku je dat pregled nekih od aktuelnih čelika za pancirnu zaštitu. Među najpoznatijim čelicima ovog tipa su ruska serija čelika za tenkove i oklopna vozila, zatim i francuska serija čelika poznatih pod komercijalnim nazivom Mars (proizvođač Creusot Loire Industrie, Le Creusot, Francuska) i švedska serija čelika Armox (proizvođač SSAB Oxelösund, Oxelösund, Švedska). U ovim serijama, nalazi se više različitih čelika, optimizovanih za pancirnu zaštitu različitih vozila i ličnu zaštitu [19].

Hemijski sastav i mehaničke osobine ruskih čelika date su u [tabelama 2.2 i 2.3](#), čelika Mars u [tabelama 2.4 i 2.5](#), a serije Armox u [tabelama 2.6 i 2.7](#). Mehaničke osobine su date prema dostupnim podacima iz literature.

**Tabela 2.2.** Hemijski sastav ruskih pancirnih čelika, [20].

Čelik	Maseni udeo elemenata [%]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb
77Ш	0,35	1,4	-	1,1	2,4	0,30	-	-	-
88Ш	0,40	1,4	-	1,1	2,4	0,30	-	-	-
KBK-37	0,37	-	0,80	2,0	1,0	0,50	0,70	-	0,03
KBK-42	0,42	-	0,80	2,0	1,0	0,50	0,70	-	0,03
«46»	0,46	-	-	1,0	1,5	0,25	-	0,14	-
«56»	0,50	-	-	3,0	1,7	1,95	-	0,30	-
СПС-43	0,43	1,65	-	1,2	1,3	0,45	-	-	-
«96»	0,48	-	-	1,6	1,0	0,50	-	0,25	-
Ц85	0,42	1,5	-	1,1	1,2	0,45	-	-	-
42	0,42	1,35	-	1,5	1,6	0,40	-	-	-
Φ110	0,46	1,30	-	1,5	1,6	0,30	-	-	-

**Tabela 2.3.** Mehaničke osobine ruskih pancirnih čelika, [20].

Čelik	Mehaničke osobine			
	Debljina ploče	Tvrdoća	R <sub>m</sub>	KU
	[mm]	[HB]	[MPa]	[J]
77Ш	do 50	477	1900	80
88Ш	do 50	495	2000	70
KBK-37	do 50	447	2000	-
KBK-42	do 50	495	2100	-
«46»	do 50	54	2150-2250	-
«56»	do 50	57	2250-2350	-
СПС-43	do 50	444	2050	-
«96»	do 50	52	2100-2150	-
Ц85	do 50	485	2050	-
42	do 50	485	2050	-
Φ110	do 50	53	2100	-

**Tabela 2.4.** Hemijski sastav pancirnog čelika Mars, [21].

Čelik	Maseni udeo elemenata [%]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb
MARS 190	0,30	-	-	1,1	2,0	0,45	-	-	-
MARS 240	0,285	-	-	1,5	1,5	0,30	-	-	-
MARS 270	0,35	-	-	0,75	3,1	0,30	-	-	-
MARS 300	0,50	0,80	-	-	4,0	0,40	-	-	-

**Tabela 2.5.** Mehaničke osobine pancirnih čelika Mars, [21].

Čelik	Mehaničke osobine			
	Debljina ploče	Tvrdoća	R <sub>m</sub>	KU
	[mm]	[HB]	[MPa]	[J]
MARS 190	do 50	≤388	900	80
MARS 240	do 50	450-534	1650	70
MARS 270	do 50	477-534	1700	-
MARS 300	do 50	578-655	2180	-

**Tabela 2.6.** Hemijski sastav pancirnog čelika Armox, [22-26].

Čelik	Maseni udeo elemenata [%]								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb
Armox 370T	0,32	0,40	1,2	1,0	1,8	0,70	-	-	-
Armox 440T	0,21	0,50	1,2	1,0	2,5	0,70	-	-	-
Armox 500T	0,32	0,40	1,2	1,01	1,8	0,70	-	-	-
Armox 550	0,36	0,70	1,5	1,5	2,5	0,80	-	-	-
Armox 600T	0,47	0,1-0,7	1,0	1,5	3,0	0,70	-	-	-

**Tabela 2.7.** Mehaničke osobine pancirnog čelika Armox, [22-26].

Čelik	Maseni udeo elemenata [%]					
	Debljina ploče	Tvrdoća	R <sub>m</sub>	R <sub>p0,2%</sub>	A	KV
	[mm]	[HB]	[MPa]	[MPa]	[%]	[J]
Armox 370T	do 150	340-390	1050-1250	>900	>11	>25
Armox 440T	do 30	420-480	1250-1550	>1100	>10	>30
Armox 500T	do 150	480-540	1450-1750	>1250	>8	>20
Armox 550	do 100	530-590	1600-1900	>1300	>7	>15
Armox 600T	do 100	570-640	2000	>1500	>7	>12

Legirani elementi imaju važnu ulogu u postizanju gore navedenih svojstava. Pancirni čelici pripadaju grupi niskolegiranih čelika, u kojima je karakterističan visok sadržaj ugljenika, iznad 2,7%. Visok procenat ugljenika utiče na tvrdoću, zatezne karakteristike i otpornost na habanje [27]. Pancirni čelik se osim ugljenika legira i aluminijumom koji utiče na dezoksidaciju, potom niobijumom, titanom, vanadijumom i borom koji povećavaju čvrstoću čelika. Legiranjem se postiže izvesno poboljšanje pojedinih osobina, važnih za čelik namenjen za pancirnu zaštitu, kao što su:

- veća energija udara pri istoj zateznoj čvrstoći,
- veća zatezna čvrstoća za isti sadržaj ugljenika prokaljivost i spušta temperatura transformacije austenita u ferit,
- smanjuje se veličina austenitnih i feritnih zrna, čime se povećava zatezna čvrstoća [28],
- eliminiše se osetljivost čelika na proces starenja,
- smanjuje se sadržaj kiseonika, azota i sumpora, čime se povećava čistoća čelika.

Ovo je izraženije što je sistem legiranja kompleksniji – najizraženije je kod čelika legiranih sa hromom, niklom i molibdenom, što je u skladu sa hemijskim sastavom i sistemom legiranja kod čelika za pancirnu zaštitu, [tabele 2.6, 2.8 i 2.10](#). Legiranjem se poboljšava disperzija karbida, čime se otežava i sprečava kretanje dislokacija, mehanizmom disperzionog ojačavanja [29]. Nekoherentne čestice mogu da utiču na nagomilavanje i blokiranje dislokacija, čime se postiže povećanje napona tečenja, ali uz smanjenu duktilnost [30]. Duktilnost se može povećati dodavanjem hroma i nikla, koji grade supstitucijski čvrsti rastvor sa feritom i austenitom. Pored toga, dodavanjem molibdena dodatno se povećava energija udara. Pancirni čelici namenjeni za pancirnu zaštitu pripadaju grupi visokokvalitetnih (prema sadržaju sumpora, ispod 0,02 %) niskolegiranih čelika. Pojedini tipovi čelika iz ove grupe, Mars 190 i 270, kao i Armox 560 i 600 pripadaju grupi ultra čistih (premijum) čelika, jer je sadržaj sumpora ispod 0,007 %. Upravo je niži sadržaj nečistoća, odnosno sumpora i fosfora osnovna razlika u odnosu na niskolegirane konstrukcione čelike korišćene u civilstvu. Niskim sadržajem nečistoća se povećava duktilnost, što je za čelik za pancirnu zaštitu od velikog značaja. Čelici za pancirnu zaštitu, Mars i Armox imaju niži sadržaj sumpora i fosfora u odnosu na ruske čelike [20-26]. Velika sličnost sa niskolegiranim konstrukcionim čelicima je i sadržaj ugljenika koji je kod većine navedenih čelika (osim



ruskih i Armox 600) ispod 0,4 %. U skladu sa tim, postiže se žilavi paketasti dislokacioni martenzit, koji nastaje pri sadržaju ugljenika ispod 0,4 %, čime se poboljšava zavarljivost. Paketasti-dislokacioni martenzit sadrži tanak sloj zaostalog austenita [29], zbog čega je ovaj tip martenzita žilav i veoma pogodan kod čelika namenjenih za pancirnu zaštitu. S druge strane, osnovni problem pri zavarivanju ovih čelika je pojava hladnih prslina u zoni uticaja toplote, što je posledica zakaljivosti. Na zakaljivost, velik uticaj ima sadržaj ugljenika i legirajućih elemenata, što se prikazuje preko ugljeničnog ekvivalenta. Većina čelika je legirana hromom, niklom i molibdenom, dok su pojedini čelici, KBK-37, KBK-42 i Armox, dodatno legirani i manganom. Može se uočiti veći sadržaj molibdena kod pancirnih čelika tipa Armox u odnosu na ruske i pancirne čelike klase Mars. Osnovni mehanizam kojim molibden utiče na povećanje duktilnosti je razbijanje karbidnog filma na granicama martenzitnih pločica ili paketa. Legiranjem manganom se ostvaruje smanjenje veličine austenitnog zrna, a time se utiče i na smanjenje veličine paketa ili pločica martenzita koje su za red veličina manje od austenitnog zrna i nastaju unutar njega. Svi legirajući elementi, zastupljeni kod čelika za pancirnu zaštitu, hrom, nikl, molibden i mangan povećavaju prokaljivost [31]. U prethodnom periodu je bilo pokušaja i upotrebe martenzitno – starenih čelika sa 18 % nikla i 10 % kobalta tvrdoće od 590 HB i energije udara po Šarpiju na sobnoj temperaturi (20 °C) od 31 J. Takav tip čelika bi imao vrlo visoku balističku otpornost, posebno od probojnih projektila streljačke municije [32, 33]. Međutim, praktična upotreba ovog čelika za pancirnu zaštitu nije prihvaćena zbog relativno visoke cene. Kod pancirnih čelika sa procentom ugljenika iznad 0,45 % ne dobija se paketasti već tvrdi, ali i krtiji pločasti-dvojniovani martenzit (0,4 – 1 % ugljenika). To određuje i njihovu oblast primene u funkciji dodatne oklopne zaštite. Naime, čelici najveće tvrdoće se ne koriste samostalno, već uvek u kombinaciji sa drugim tipom oklopa, najčešće čelikom ili legurama aluminijuma za pancirnu zaštitu, čija je duktilnost veća. S druge strane, negativna posledica povećanog sadržaja ugljenika kod čelika Armox 600, predstavlja i smanjena zavarljivost. Međutim, s obzirom na činjenicu da se koriste kao dodatni oklop, za koji u najvećem broju slučajeva postoji potreba za čestom montažom i demontažom, daleko je pogodniji način spajanja sa osnovnim oklopom vijčanom vezom.

### 2.2.1 Pancirni čelik – Protac 500

Pancirni čelik Protac 500, predmet ovog ispitivanja je legiran sa silicijumom, hromom, molibdenom, titanom i borom. Da bih se postigao niži ugljenični ekvivalent (Ceq) i bolja zavarljivost, sadržaj ugljenika je ograničen na 0,3% C. Nivo mangana od ~0,98%, kod Protac 500 čelika i njegova kombinacija sa silicijom dovode do povećanja: zatezne čvrstoće, modula elastičnosti i energije udara. Kod čelika sa srednjim sadržajem mangana dolazi do nestabilnosti strukture u toku procesa plastičnog deformisanja u vidu Ludersovih traka klizanja [34]. Mangan spušta temperaturu transformacije austenita u ferit prema nižim vrednostima [35] i dodaje se u kombinaciji sa drugim elementima da bi se postigao visok nivo tvrdoće i čvrstoće bez negativnog efekta na ostale osobine čelika. Zatim, mangan ne povećava ugljenični ekvivalent, čime se postiže dobra zavarljivost pancirnog čelika. Molibden je prisutan da bi se spustila temperatura transformacije austenita u ferit, i stvaranje kaljenih mikrostruktura. Veličina austenitnog zrna se kontroliše dodatkom vanadijum, titanijuma i aluminijuma. Dodatkom hroma se povećava tvrdoća i mehaničke osobine, a njegova osnovna prednost je da malo povećava ugljenični ekvivalent, čime se malo utiče na zavarljivost pancirnog čelika.

### 2.2.2 KH dijagram pancirnog čelika Protac 500

Dijagram kontinualnog hlađenja (KH dijagram) predstavlja odnos promene temperature, vremena i nastale strukture pri konstantnoj temperaturi hlađenja. KH dijagram je od velike pomoći kod izbora tehnologije zavarivanja. Razlog je u mogućnosti procene mikrostrukture ZUT-a a time i svojstava zavarenog spoja. Mikrostruktura u zavarenom spoju direktno će zavisiti od unosa toplote i brzine hlađenja. Korišćenjem KH dijagrama moguće je proceniti tvrdoću u zavarenom spoju, što je značajan pokazatelj sklonosti prema hladnim prslinama. Na osnovu procene tvrdoće mogu se odrediti i ostale mehaničke osobine u zavarenom spoju koji su u određenoj povezanosti sa njom. KH dijagram za Protac 500 čelik, prikazan na slici 2.2, pokazuje promenu tvrdoće i mikrostrukture u zavisnosti od brzine hlađenja, [36]. Možemo videti da gornja kritična brzina hlađenja Protac 500 čelika, na kojoj se dobija 100 %-tni martenzit iznosi 7 °C/sek. Odnosno brzina hlađenja Protac 500, je neophodno da bude od toga sporija da se čelik ne bi prekalio, odnosno došlo do stvaranja hladnih prslina.

Dijagram kontinualnog hlađenja (KH) je važan izvor informacija o tvrdoći, zatim vrsti i količini mikrostrukture za različite brzine hlađenja. Analizirajući dijagram dobija se neophodno predznanje za razvoj tehnološkog postupka zavarivanja pancirnog čelika. Na osnovu analize dijagrama, u cilju postizanja željene tvrdoće i mikrostrukture unutar ZUT-a, projektuje se toplota unosa, odabirom brzine zavarivanja, temperature predgrevanja kao i parametara zavarivanja.

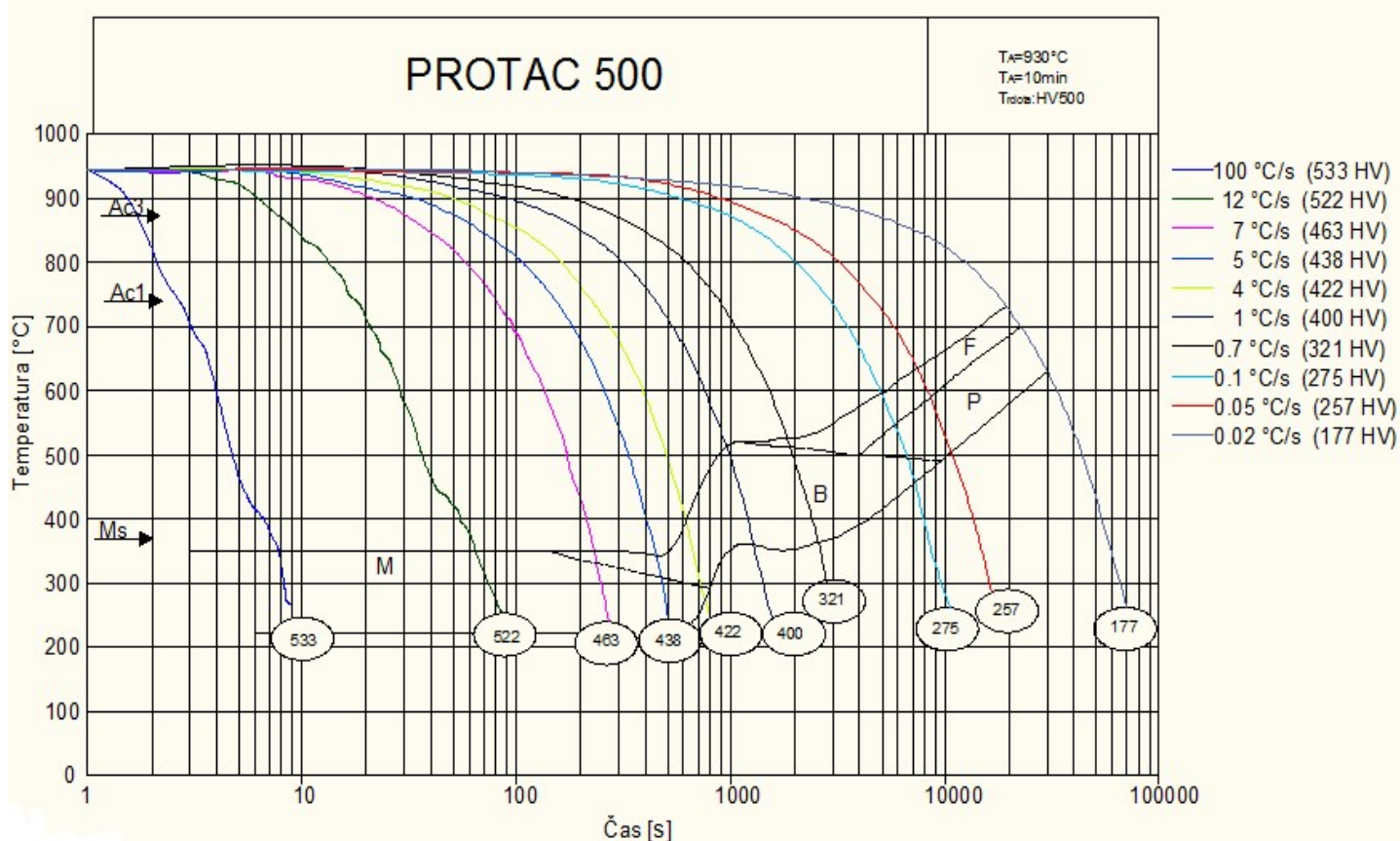
Podaci sa KH dijagrama su analizirani sa ciljem izučavanja uticaja različitih brzina hlađenja na promenu tvrdoće i mikrostrukture pancirnog čelika. Krive hlađenja za brzine od 0,02 K/s, 0,05 K/s i 0,1 K/s pokazuju feritno-perlitnu strukturu, dok su im tvrdoće 177 HV, 257 HV i 276 HV, respektivno. Na [slici 2.1.](#) je prikazana tvrdoća u funkciji brzine hlađenja, koja je dobijena na uzorcima ispitivanim dilatometrijom. Sa povećanjem brzine hlađenja od 0,02 K/s do 1 K/s tvrdoća naglo raste od vrednosti 177 HV do 400 HV. Povećanje tvrdoće se dešava kao rezultat zamene mekših struktura, ferita i perlita formiranim sa brzinama hlađenja od 0,02 K/s do 0,1 K/s, sa tvrdom beinitnom strukturom sa brzinom hlađenja od 1 K/s. Početak transformacije austenita sa brzinom hlađenja 0,02 K/s, 0,05 K/s i 0,1 K/s je na temperaturi od 731 °C, 635 °C i 596 °C, dok su temperature završetka transformacije od 630 °C, 504 °C i 458 °C.

Beinit se pojavljuje pri brzini hlađenja od 0,7 K/s. Donja kritična brzina hlađenja za njegov nastanak je 0,7 K/s, veće prisustvo beinita je kod brzina hlađenja od 1 K/s. Mikrostruktura se sastoji od ferita, perlita i beinita, sa tvrdoćom od 321 HV. Početak transformacije je na temperaturi od 456 °C, dok je njen završetak na 362 °C. Veće prisustvo beinita je kod brzina hlađenja od 1 K/s. Tvrdoća strukture je 400 HV sa početkom transformacije na 512 °C i temperaturom završetka na 460 °C. Struktura beinit plus martenzit se javlja kod brzina hlađenja 4 K/s i 5 K/s, sa tvrdoćama 422 HV i 438 HV, [slika 2.1.](#) Pomenute vrednosti zajedno sa podacima dobijenih sa krivih hlađenja pokazuju da se zapreminski odnos martenzita prema beinitu povećava sa povećanjem brzine hlađenja u ovom opsegu.

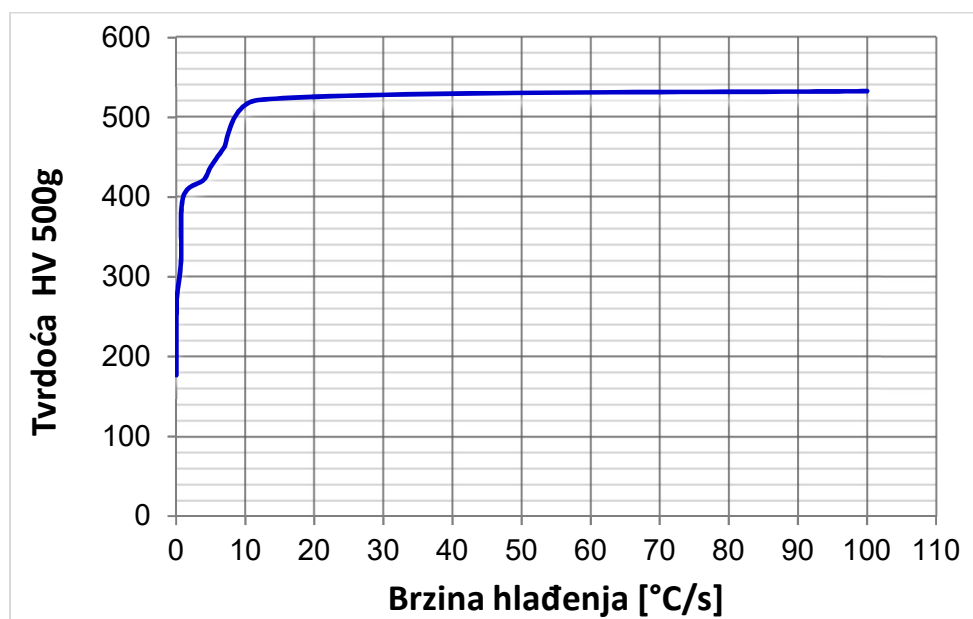
Na osnovu podataka sa dilatacionih krivi, može se zaključiti da je kritična brzina hlađenja za martenzitno formiranje nešto iznad 4 K/s. Počeci martenzitne transformacije, Ms, su na temperaturama od 398 °C i 342 °C za brzine hlađenja 4 K/s i 5 K/s. Čisto martenzitna struktura, sa tvrdoćom od 463 HV, se javlja kod brzine hlađenja od 7 K/s.

Pomenuti podatak je polazna osnova za odabir unosa toplote pri zavarivanju. Kada su u pitanju brzine hlađenja 12 K/s i 100 K/s kriva hlađenja pokazuje da transformacija počinje na temperaturama od 350 °C a završava na 221 °C. Brzine hlađenja 12 K/s i 100 K/s stvaraju čist martenzit sa tvrdoćom od 522 HV i 533 HV. Veoma blago povećanje tvrdoće se nastavlja sa povećanjem brzina hlađenja od 12 K/s do 100 K/s. U ovom velikom intervalu promene brzine hlađenja, tvrdoća se neznatno povećala za 11 HV, od vrednosti 522 HV do 533 HV, [slika 2.2](#).

Kod realnih uslova zavarivanja u zavisnosti od unosa toplote i temperature predgrevanja, u različitim regionima ZUT-a dolazi do transformacije koje odgovaraju brzinama hlađenja od 1 K/s do 100 K/s a prezentovani su u *KH* dijagramu. Pomenute brzine hlađenja rezultuju formiranje nisko temperaturne transformacije, pa se ZUT, u različitim njegovim regionima sastoji od mešavine tvrdih faza uključujući donji beinit, pločice martenzita, potom ferit kao i perlit.



**Slika 2.1.** *KH* dijagram za Protac 500 čelik dobijen pomoću dilatometrijske metode [36].



**Slika 2.2.** Tvrdoća u funkciji brzine hlađenja, pancirnog čelika Protac 500. Na osnovu rezultata dobijenih sa dilatometrijskih uzoraka [36].

## 2.3 Zavarivanja pancirnih čelika

### 2.3.1 Uvod

Zahtevi za zavarene spojeve pancirnih čelika, propisani prema standardima MIL-A-46100 i SD-X12140 [10], mogu se svrstati u tri grupe: kvalitet zavarenog spoja, zahtev mehaničkih osobina kao i eksploatacionim osobinama.

Kod procesa zavarivanja pancirnog čelika neophodno je strogo poštovanje propisane procedure. Najveća opasnost je od prslina izazvanih vodonikom koje nastaju uz liniju stapanja osnovnog i dodatnog materijala. Usled unosa toplote dešava se pad tvrdoće u ZUT-u, i pojava poroznosti u zoni metal šava. Da li će se prslina izazvana vodonikom pojaviti zavisice od različitih faktora kao što je tvrdoća osnovnog materijala, od vrste i veličine zaostalih opterećenja, zatim od brzine difuzije vodonika kroz metal šava kao i od količine vodonika koji ulazi u metal šava.

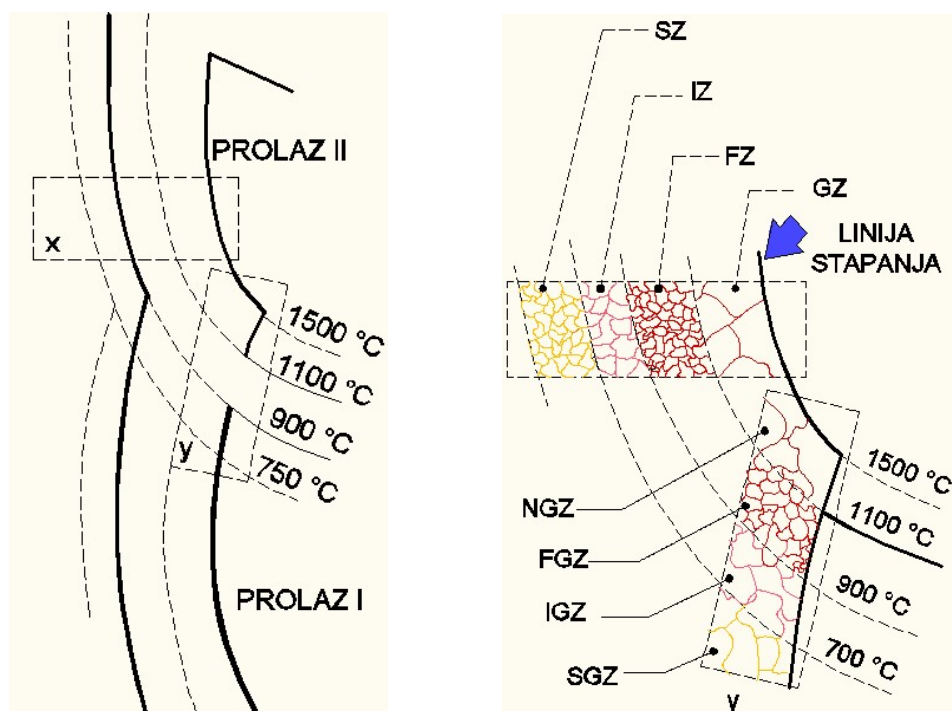
Najčešće su u upotrebi pancirne ploče debljine veće od 6 mm. Kod ovih debljina primenjuje se višeprolazno zavarivanje. Svaki sledeći prolaz prouzrokuje novi unos i predaju toplote na dodatni materijal prethodnog prolaza što utiče na promenu strukture i osobine ZUT-a. Kao rezultat unosa toplote u toku procesa zavarivanja nastaju različite strukturne promene, što ima za posledicu heterogenost mehaničkih i metalurških osobina u ZUT-u i u metal šavu. Svaki toplotni ciklus odlikuje se: maksimalnom temperaturom zagrevanja i vremenom hlađenja u temperaturnom

intervalu, koji je kod pancirnog čelika od 600 °C do 200 °C, ( $\Delta t_{6/2}$ ) [37]. Pojedine zone osnovnog materijala su intenzivnije izložene promenama strukture usled ponovljenog unosa toplote.

Grubozrna oblast ZUT-a je najkritičnija kod konstrukcionih čelika. Poznavanje promena tvrdoće i mikrostrukture kod višeprolaznog zavarivanja u grubozrnoj oblasti je važno iz ugla sigurnosti konstrukcije. Grubozrna oblast kod drugog i ostalih prolaza se može podeliti na više pod zona [38].

- Nepromenjena grubozrna zona,
- Zona sa maksimalnom temperaturom iznad  $A_{C3}$  a ispod 1200 °C,
- Zona sa maksimalnom temperaturom između  $A_{C1}$  i  $A_{C3}$  – interkrična zona,
- Zona sa maksimalnom temperaturom ispod  $A_{C1}$  – subkritična zona.

Na slici 2.3 su prikazani toplotni ciklusi kod četvero-prolaznog zavarivanja.

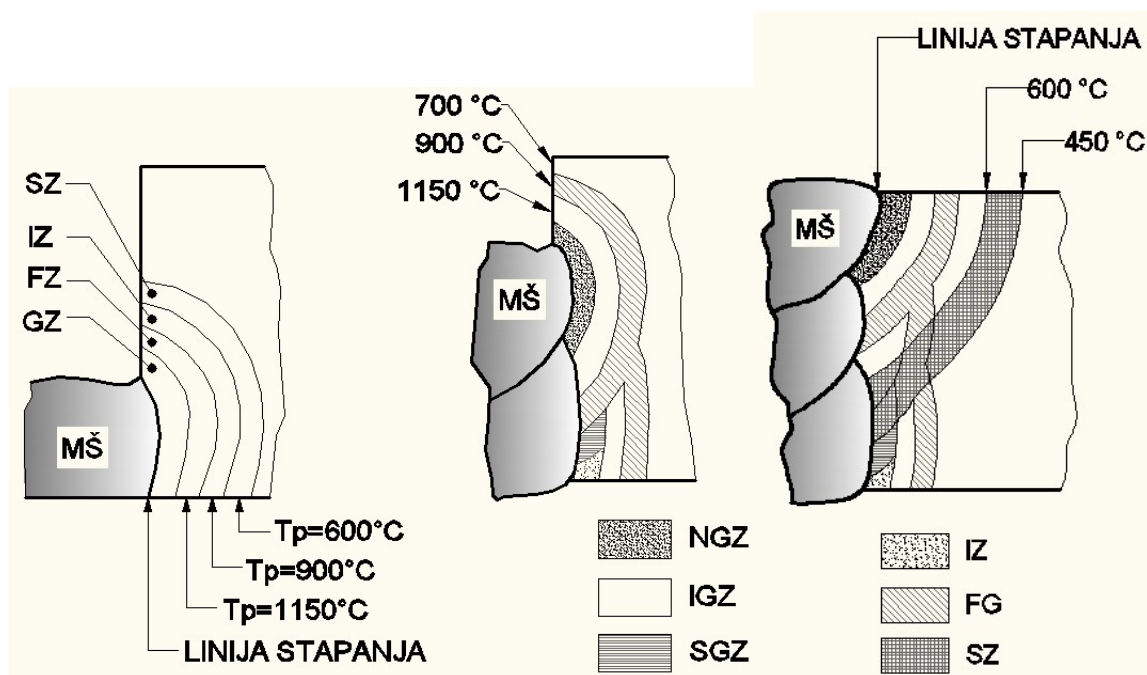


**Slika 2.3.** Šema mikrostrukture zone uticaja toplote kod četvero-prolaznog zavarivanja [39].



Grubozrna oblast i njegove promene pod dejstvom različitih nivoa toplotnih ciklusa, prikazani su na slici 2.4.

- Kada se grubozrna oblast ponovo zagreje na temperaturu iznad 1200 °C do 1420 °C, nakon hlađenja u ovoj oblasti će ostati grubozrno. Ova zona se zove nepromenjena grubozrna oblast - NGZ.
- U zonama zagrejanim na temperaturama od 900 °C do 1200 °C, dolazi do normalizacije. Grubozrno će u ovim zonama toplotnih delovanja, transformisati se u finozrno.
- U zoni zagrejanij interkritički, doći će do delimične transformacije  $\alpha \rightarrow \gamma$ . Austenit nastaje duž granica primarnog austenitnog zrna ili unutar paketa beinita. Austenitna ostrva su obogaćena ugljenikom, ali nema vremena za difuziju rastvorenih elemenata, te se pri hlađenju stvaraju čestice sekundarne faze.
- Grubozrna oblast zagrejana temperaturom ispod  $A_{C1}$  se praktično ne menja.



**Slika 2.4.** Šema mikrostrukture zone uticaja toplote kod: a) jedno-, b) dvo-, c) četvero prolaznog zavarivanja [40].

Finozrna, interkritična i subkritična oblast, zagrejana interkritičnom temperaturom.

- U pomenutim oblastima dolazi do intenzivnog izdvajanja karbida i karbonitrida zato što se ranije nije moglo desiti zbog brzog hlađenja. Međutim, zagrevanjem na visoku temperaturu i brzim hlađenjem se stvara metastabilno stanje koje povoljno deluje na proces izdvajanja pri ponovnom zagrevanju.

Finozrna, interkritična i subkritična oblast, zagrejana subkritičnom temperaturom.

f) U zoni koje je zagrejano na temperaturu ispod  $A_1$  ne dešavaju se strukturne transformacije, nema ni modifikacije zrna. U zavisnosti od toga da li je maksimalna temperatura zagrevanja bliža ili dalja od  $A_1$  može doći do smanjenja tvrdoće usled otpuštanja.

Omekšavanje ZUT-a je nepovoljno i smanjuje otpornost na prodiranje zrna, međutim možemo očekivati poboljšanje žilavosti ove zone. Žilavost je važna osobina usled udarnih dejstva koja se dešavaju kod saobraćanja vojnih oklopnih vozila.

Da bi se smanjio rizik od stvaranja prsline izazvane vodonikom, a s obzirom da se KH dijagram od pancirnog do pancirnog čelika razlikuje, neophodno je naći najoptimalnije parametre procesa zavarivanja za dati pancirni čelik. Osim zadatka da se dobije zavareni spoj bez prsline neophodno je postići najmanji pad tvrdoće u ZUT-u, odnosno pad tvrdoće koji je u saglasnosti sa standardima MIL-A-46100 i SD-X12140 [15].

Martenzitni čelici su ranije zavarivani konvencionalnim elektrolučnim postupkom, pre svega zbog veće penetracije i mešanja sa osnovnim materijalom. Postoje nekoliko tehnika zavarivanja pancirnog čelika koji se uobičajeno koriste:

- REL,
- MIG i
- Hibridni laser - MIG postupak.

### 2.3.2 Tehnika zavarivanja MIG postupkom

U procesu zavarivanja pancirnih čelika zadnjih 20 godina se najviše koriste MIG postupak kao proces zavarivanja, dok je dodatni materijal rutilnim prahom punjena žica [41]. MIG postupak je bolji u pogledu produktivnosti u odnosu na REL postupak zavarivanja. Žica se kontinualno dodaje obezbeđujući neprekidno zavarivanje, u odnosu na REL postupak gde se dešava često prekidanje procesa zavarivanja. U slučajevima kada je zahtev automatizacija procesa zavarivanja, potrebno je rutilnim prahom punjenu žicu zameniti punom ili metalnim prahom punjenom žicom.

Režimi MIG zavarivanja mogu biti:

- Zavarivanje u stabilnom režimu kratkog spoja,
- Zavarivanje u stabilnom režimu sprej transfera,
- Zavarivanje u stabilnom režimu pulsa,



- Zavarivanje u stabilnom režimu rotacionog luka.

### 2.3.2.1 Zavarivanje u stabilnom režimu kratkog spoja

Ovo je najzastupljeniji režim MIG zavarivanja. Parametri zavarivanja u stabilnom režimu kratkog spoja su niži u odnosu na ostale režime. U stabilnom režimu kratkog spoja se koriste jačine struje u granicama od 50-180 A dok je napon od 15-22 V. Režimom u kratkom spoju se zavaruju ploče debljine do 4 mm ili prolaz korena kod višeprolaznog zavarivanja. Ako bi se ovaj režim koristio kod debljih ploča, dobila bih se mala penetracija, [slika 2.5](#), dok bi čvrstoća spoja bila ispod dozvoljene granice.

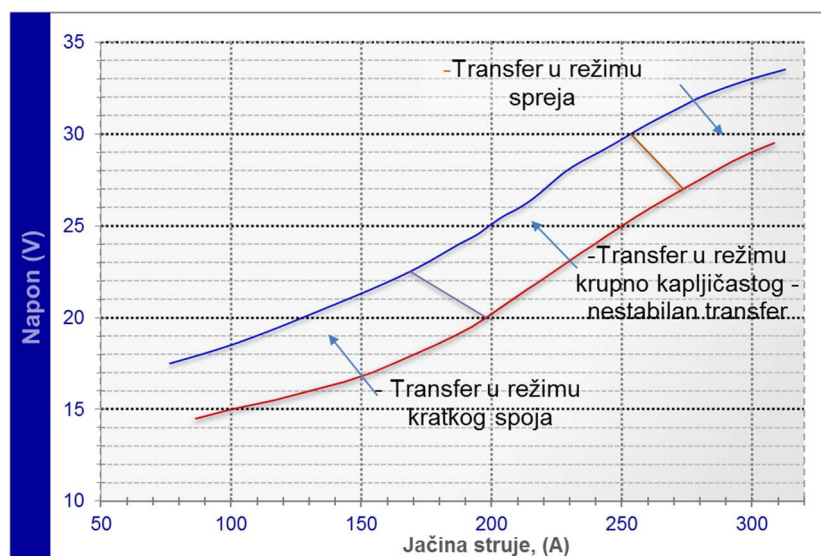


**Slika 2.5.** Zavarivanje u režimu kratkog spoja, ploča debljine od 8 mm.

Zbog male debljine materijala, mogućnosti progorevanja i zaustavljanja luka ovaj režim se koristi za početni, korenski prolaz sučeonih V - spojeva. U pogledu preporuka prečnika žice u ovom režimu su pogodnije tanje žice od 0,8 mm i 1,0 mm, dok žica prečnika 1,2 mm ne bi dala široku mogućnost izbora parametara procesa (napona, jačine struje i brzine žice) za dobar rad.

### 2.3.2.2 Zavarivanje u stabilnom režimu sprej transfera

Proces zavarivanja u sprej transferu bi trebalo da bude prvi izbor za ploče debljina preko 4 mm. Da bi se postigao stabilan režim u sprej transferu, neophodan je sadržaj argona u mešavini gasa minimum 80 %, zatim sposobnost aparata u predaji napona od minimum 25 V odnosno jačine struje preko 250 A, i na kraju brzina žice je neophodno da bude veća od 9 m/sek. Parametri zavarivanja u režimu sprej transfera su viši u odnosu na krupno kapljičasti i režim u kratkom spoju, što [slika 2.6](#) i pokazuje.



**Slika 2.6.** Parametri zavarivanja za tri transfera MIG postupka, [42].

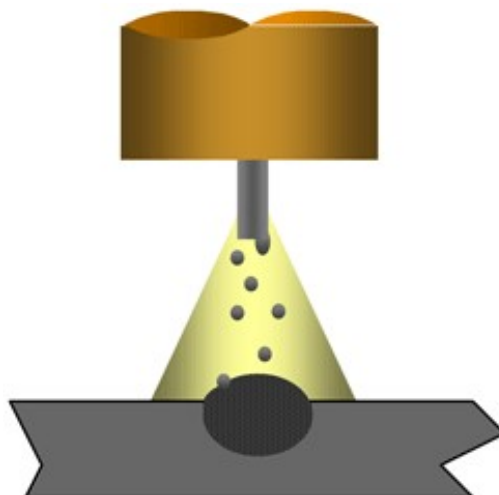
Sprej transfer zahteva potpunu pripremu čelika u pogledu čišćenja, odmašćivanja i brušenja. Neophodno je vodeno hlađenje aparata za zavarivanja. Dizna se nalazi duboko u šobi ~5 mm, dok je prepust žice od 50 % - 100 % veći u odnosu na režim kratkog spoja. Protok zaštitnog gasa za sprej transfer je veći za 40 %– 50 % u odnosu na transfer kratkim spojem, zatim oblik luka je zvonast, dok je dužina luka mala od 2 do 3 mm, što je prikazano na slici 2.7 [43].



**Slika 2.7.** Zvonast oblik luka [43].

Sa većim unosom toplote deformacije zavarenog spoja su mnogo veće. Veličina sprej kapljica se menja sa promenom parametara zavarivanja. Kada su parametri zavarivanja niski, sprej kapljice su krupnije. Za zavarivanje u sprej transferu, potreban je veći prečnik žice: 1,0 mm, 1,6 mm i 2,0 mm.

Može se zaključiti da je prečnik žice od 1,0 mm univerzalan i da se sa tim prečnikom može zavarivati i u režimu kratkog spoja i u režimu sprej transfera.



Slika 2.8. Šema sprej transfera [44].

### 2.3.2.3 Zavarivanje u stabilnom režimu pulsa

Prednost rada u režimu pulsa je u dostizanju sprej transfera [slika 2.8](#) parametrima koji su niži u odnosu na klasični MIG postupak. Ako se pulsni MIG koristi sa punom žicom doći će do veoma niskog unosa toplote u metalno kupatilo.

Prednosti pulsno MIG-a u odnosu na klasični MIG postupak su sledeći [\[45\]](#):

- Niži nivo unešenog vodonika u metalno kupatilo,
- Bolja difuzija,
- Niža količina šljake i rasprskavanja,
- Brži proces zavarivanja-veća produktivnost,
- Veći nivo stepena deponovanja i efikasnost,
- Niži nivo unutrašnjih deformacija,
- Mogućnost zavarivanja u svim pozicijama,
- Niži nivo isparavanja.

Prednosti pulsno MIG postupka dolaze do izražaja kod materijala koji su osetljivi na veliki unos toplote a pri tome se zahteva duboka penetracija.

### 2.3.2.4 Tehnološki proces zavarivanja pancirnih čelika

REL, MIG i hibridni laser-MIG su tehnološki procesi koji se koristi kod zavarivanja pancirnih čelika klase 500 HV. Hibridni laser-MIG postupak kombinuje prednosti jednog i drugog postupka. Osnovni razlog upotrebe ovog postupka je postizanje uske ZUT oblasti, što poboljšava balističku otpornost zavarenog spoja pancirnog čelika. Autori [\[46\]](#) su ispitivali koji je najbolji način pripreme pancirnih ploča za sučeono

zavarivanje hibridnim laser MIG postupkom. Najbolji rezultat je pokazao dupli „Y„ spoj, sa uglom pripreme od  $12,5^\circ$  i visinom korena od 6 mm. Hibridnim laser MIG postupkom je moguće zavarivati i ugaone spojeve pancirnih čeličnih ploča debljine 10 mm [7]. Kod ugaonih spojeva i ploča pomenute debljine koristi se snaga laserskog snopa od 3 kW do 4 kW [47]. Zaštitna atmosfera argon sa 8% ugljen dioksida se koristi kod sučeonih spojeva [48], dok se mešavina argona sa 1,5% kiseonika koristi kod ugaonih spojeva [7].

Zadnjih godina se kod procesa zavarivanja pancirnog čelika koristi REL i MIG postupak u kombinaciji sa niskovodoničnim feritnim dodatnim materijalom [49]. MIG postupkom se koristi napon od 30 V i jačina struje od 220 A [50]. Pancirni čelik se pre zavarivanja predgreje na temperaturu od  $100^\circ\text{C}$ , dok se kao međuprolazna koristi temperatura od  $150^\circ\text{C}$ , [51]. U procesu zavarivanja MIG postupkom koristi se unos toplote od  $2,03\text{ kJ mm}^{-1}$ . REL postupkom se koristi napon od 23 V i jačina struje od 160 A. Kod ovog postupka pancirni čelik se predgreje na  $100^\circ\text{C}$ , dok je međuprolazna temperatura  $150^\circ\text{C}$ . Unos toplote kod ovog postupka je niži u odnosu na MIG postupak i iznosi  $1,33\text{ kJ mm}^{-1}$ . MIG tehnološkim postupkom, sa niskovodoničnim dodatnim materijalom korišćen je i veći napon od 28 V i veća jačina struje od 250 A, [52, 53]. Kao rezultat korišćenja feritnog dodatnog materijala i kod ovih parametara je neophodno predgrevanja na temperaturu od  $150^\circ\text{C}$ , i održavanje međuprolazne temperature od  $170^\circ\text{C}$ . Unos toplote kod pomenutih parametara iznosi  $2,03\text{ kJ mm}^{-1}$ . Kod austenitnog dodatnog materijala nije neophodno predgrevanja pancirnih čeličnih ploča. MIG postupkom se sa ovim dodatnim materijalom koriste napon od 32 V i jačina struje od 250 A, [54]. Kod kombinacije tvrdog i mekog dodatnog materijala, radi bolje balističke otpornosti kod REL postupka, koriste se napon i jačina struje od 21 do 23 V i od 110 do 153 A [55, 56]. U zavarenom spoju se tada mogu pojaviti prsline u zonama linije stapanja i između dve vrste dodatnog materijala.

### 2.3.3 Izbor zaštitne atmosfere

Prostor između žice i materijala mora biti ispunjen elektro provodnim gasom (u nastavku zaštitna atmosfera) koji će služiti kao zaštita rastopljenog, usijanog i očvrnutog metala od oksidacije i poroznosti. U skladu da sa tim, razlozi upotrebe zaštitne atmosfere su:

- da zaštiti metal od negativnog uticaja atmosfere (kiseonika i azota),
- da postane provodnik, potom da se zagreje na visoku temperaturu i otopi žicu i materijal koji se zavaruje,
- da omogući dobijanje željene geometrije metal šava,
- da stvori željenu vrstu transfera sa dodatnog materijala na materijal koji se zavaruje.

### 2.3.3.1 Zaštitna atmosfera gas ugljen-dioksid

Autori [49, 57] su u ispitivanju zavarljivosti pancirnog čelika koristili zaštitnu atmosferu ugljen dioksid, kako kod austenitnog tako i kod feritnog dodatnog materijala sa prečnikom žice od 1,6 mm dok je brzina protoka bila 12 l/min, [50]. Niža vrednost zatezne čvrstoće je kod austenitnog dodatnog materijala.

Ako se izabere čist ugljen-dioksid kao zaštitni gas kod zavarivanja pancirnog čelika, dobiće se široka i duboka penetracija u ivicama gusenice, jer ugljen-dioksid ima visoku toplotnu provodljivost. U rekombinaciji kada se dodirne sa metalom, zaštitna atmosfera gas ugljen dioksid, će predati toplotu metalu i po sredini i po ivicama gusenice.

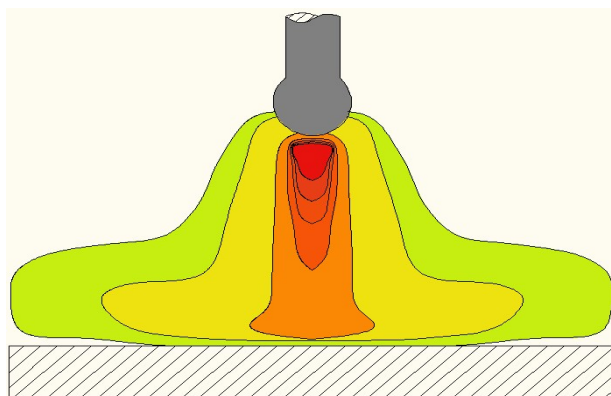
U toku procesa disocijacije oko vrha žice, gde je temperature visoka, kiseonik se disocira na dva atoma i biva privučen od molekula ugljen monoksida, čime se smanjuje količina oksidacije. Molekul ugljen monoksida neće disocirati na C+O jer mu je za disocijaciju potrebno preko 6000 °C, a temperatura luka je oko 4000 °C. Kada molekuli budu u zonama materijala čija je temperatura oko 1600 °C desiće se rekombinacija i ponovno vezivanje ugljen monoksida sa kiseonikom u ugljen dioksid, CO<sub>2</sub>. Vezivanje je egzotermalno čime se dodatna toplota predaje materijalu što omogućava bolje topljenje materijala. Loše osobine u primeni zaštitne atmosfere gas ugljen dioksid kod pancirnog čelika su: unos ugljenika u metal šava, oksidacija, time i gubitak legirajućih elemenata, pad žilavosti i čvrstoće, nemogućnost automatizacije procesa zbog velike stope rasprskavanja.

### 2.3.3.2 Zaštitna atmosfera gas argon

U TIG procesu zavarivanja pancirnog čelika koristi se čist argon sa protokom od 16 l/min [58].

Ako se kod MIG postupka izabere čist argon nastaje niska toplotna provodljivost po ivicama gusenice. Argon stvara plazmu koja u ovom slučaju obavija vrh žice. Za razliku od zaštitnog gasa  $\text{CO}_2$ , kod koga se plazma pozicionira ispod žice odnosno ispod rastopljene kapljice, kod argona će se desiti da vrh postane šiljat. Plazma obavija vrh žice i zbog jakih elektromagnetnih sila koje deluju prema centru žice, kao i zbog toga što je žica slaba na mestu gde je rastopljena, dešava se odvajanje sitnih kapljica. Luk je stabilan i lako se pali jer je potencijal jonizacije 15,7 eV.

Nedostatak primene čistog argona u procesu zavarivanja pancirnog čelika jeste u toplotnoj provodljivost koja je znatno slabija u poređenju sa  $\text{CO}_2$ -plazmom. Sa [slike 2.9](#) se mogu uočiti dve zone, jedna u obliku stuba direktno ispod žice u kojoj je temperatura luka vrlo visoka, i druga široka zona oko ovog stuba gde je temperatura znatno manja. Iz istih razloga se dešava da plazma vrši topljenje materijala u dubinu, ali ne i u širinu.



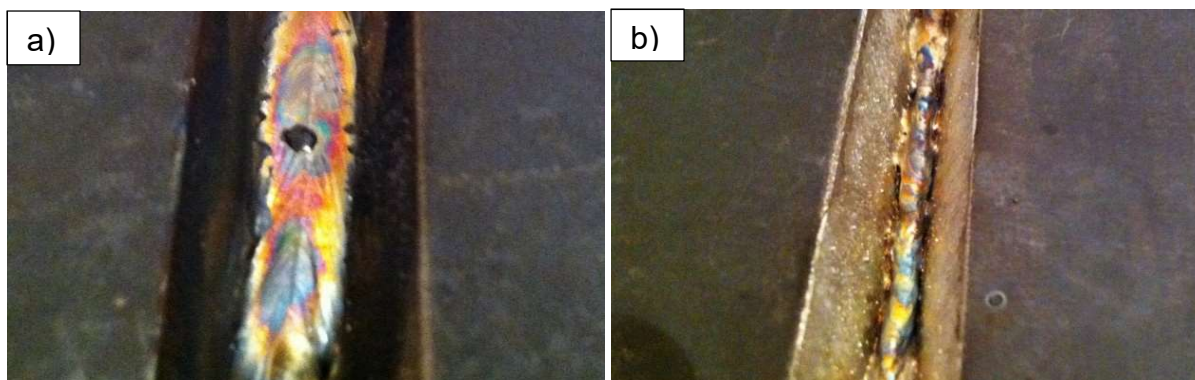
**Slika 2.9.** Raspored toplote tokom zavarivanja čistim argonom [42].

### 2.3.3.3 Zaštitna atmosfera mešavina gasa argona sa ugljen-dioksidom i argona sa kiseonikom

Mešanjem argona i ugljen dioksida i iskorišćenjem najboljih osobina jednog i drugog gasa, dovelo je do toga da zavarivanje čelika MIG postupkom postane najzastupljeniji proces zavarivanja u zemljama zapadne evrope. U ovom slučaju maksimalno se iskorišćavaju prednosti  $\text{CO}_2$  gasa i njegove disocijacije i velike energije odnosno toplote. Nivo poroznosti i oksidacije su manji kod mešavina Ar- $\text{CO}_2$  od onih sa Ar- $\text{O}_2$ . Kombinacijom ova dva gasa, zbog smanjene reakcije gasa sa rastopljenim metalom, dobija se zavareni spoj sa visokim mehaničkim osobinama dok je količina dima manja za nekih 20-25 %. Kod rastopljenog metala, ne dešava se oksidacija ili je ona manje izražena zbog manje količine kiseonika u zaštitnoj atmosferi.



Kiseonik se u procesu zavarivanja koristi u mešavini sa argonom. Kod ove mešavine dolazi do disocijacije kiseonika u plazmi, ali dolazi i do njegove reakcije sa rastopljenim metalom iz žice i rastopljenim metalom kupatila. Dejstvo kiseonika na dodatni materijal je negativan jer vezivanje sa hemijskim elementima znači gubitak legirajućih elemenata i smanjenje mehaničkih osobina. Veće količine silicijuma, mangana i hroma u dodatnom materijalu za pancirne čelike se koriste zbog vezivanja sa što više kiseonika, unapred predviđajući da će mali procenat biti izgubljen tokom zavarivanja usled oksidacije kao i sagorevanjem. Pozitivan efekat kiseonika na proces zavarivanja je u lakšem provođenju struje u plazmi gasa, jer povećava potencijal jonizacije, potom i u stabilizaciji luka. Zbog stvaranja oksida, koji imaju veoma mali površinski napon u odnosu na rastopljeni čisti metal, dešava se veoma lepo razlivanje u metalnom kupatilu [slika 2.10 a](#)), što je posledica dobrog razlivanja ivice gusenice tokom zavarivanja. Većina dodatnih materijala za pancirne čelike imaju veću količinu silicijuma jer je njegovo vezivanje sa kiseonikom egzotermalna reakcija, koja dodatno unosi toplotu i dodatno razliva rastopljeni metalni oksid. Većim unosom toplote smanjuje se površinski napon, dok se dodatni materijal bolje razliva u metalnom kupatilu. Kada nemamo kiseonik u zaštitnom gasu, kao što je to slučaj sa čistim argonom, rastopljeni metal ima tendenciju da se pretvori u kuglicu ili da ode u visinu zbog velikog površinskog napona praveći veliko nadvišenje, pa je zavareni spoj u obliku kanapa [slika 2.10 b](#)). Kada se argonu doda ugljen dioksid ili kiseonik dešava se potiranje negativnih svojstva oba gasa dok ostaju samo pozitivna svojstva svakog od njih.



**Slika 2.10.** a) Mešavina argona (Ar) i ugljen-dioksida ( $\text{CO}_2$ ) (argon+2.5% $\text{CO}_2$ ), b) kao i čistog argona (argon 100%) [42].

### **Zaštitna atmosfera u mešavini: argona + ugljen-dioksida**

Zaštitna atmosfera u mešavini argon + ugljen dioksid se najčešće koristi kod zavarivanja pancirnog čelika. Odnos argon-ugljen dioksid 75:25 je čest kod zavarivanja feritnim ili austenitnim dodatnim materijalom [37]. Pomenuti odnos se koristi kod pune i punjene žice, prečnika od 0,9 do 1,2 mm [41, 59]. Kod procesa zavarivanja pancirnog čelika koristi se i mešavina argona sa 8% ugljen dioksida [46, 58]. Pomenuti odnos se koristi sa feritnom punjenom žice prečnika od 0,9 do 1,2 mm.

Zaštitna atmosfera argona i ugljen dioksida je adekvatan izbor za zavarivanje pancirnog čelika zbog osetljivosti i na mali unos ugljenika u metal šav. U ovoj zaštitnoj atmosferi je moguće zavarivati i u kratkom spoju, pulsu kao i u sprej transferu.

### **Zaštitna atmosfera u mešavini: argona + 1.5% kiseonika**

Kod zavarivanja pancirnog čelika koristi se mešavina argon-1,5 % O<sub>2</sub> kiseonika sa protokom zaštitne atmosfere od 20 l/min [37], obično u kombinaciji sa metalnim prahom punjenom žicom. Zaštitna atmosfera argona-1,5 % O<sub>2</sub> se koristi i sa punom austenitnom žicom prečnika 0,9 mm i protokom od 13 l/min [59].

Kod izbora ove zaštitne atmosfere, usled odsustva CO<sub>2</sub>, ne postoji disocijacija i rekombinacija zbog čega je mali unos toplote po ivicama gusenice. Penetracija po bokovima je zadovoljavajuća samo zbog smanjenja površinskog napona na ivicama gusenica. Poroznost je moguća zbog velike penetracije u dubinu a manje po bokovima, jer gasne faze često ne stignu da izađu iz metalnog kupatila i ostaju unutra. Poroznost je naročito izražena kod zavarivanja debljih ploča, pa su preporuke za korišćenje kod zavarivanja tankih ploča u sprej i puls transferu. Dobre osobine kod izbora ove zaštitne atmosfere su korišćenje manje jačine struje kod postizanja sprej transfera, a koji se koristi kod prolaza popune, prilikom zavarivanja debljih ploča. Zbog manjeg površinskog napona lice šava je ravnije. Zbog velikog oksidacionog potencijala prilikom korišćenja 5 % O<sub>2</sub> kiseonika i neefikasnosti sa 1 % O<sub>2</sub>, najbolji je izbor mešavine argona sa količinom od 1,5 do 2 % O<sub>2</sub>.

#### **2.3.3.4 Izbor količine protoka zaštitne atmosfere**

Faktori koji utiču na izbor količine protoka zaštitne atmosfere su:



- Vrsta zaštitne atmosfere. Ako se izabere čist CO<sub>2</sub>, protok je manji u odnosu na izbor mešavine Ar-CO<sub>2</sub>. Za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi CO<sub>2</sub> u transferu kratkog spoja, uobičajeno pravilo za protok je  $Q=10 \times$  prečnik žice, dok se za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi Ar-CO<sub>2</sub> koristi pravilo  $Q=(12\div 15) \times$  prečnik žice,
- Brzina zavarivanja. Ako se zavaruje koren šava zbog manje brzine zavarivanja i manje jačine struje, protok zaštitne atmosfere je manji u odnosu na šavove popune gde su veće brzine zavarivanja i gde je veća jačina struje, a time i veći protok,
- Vrsta spoja. Ako se zavaruje ugaoni spoljašnji spoj potreban je veći protok u odnosu na sučeone ili ugaone unutrašnje spojeve,
- Vrsta transfera zavarivanja. Za zavarivanje u sprej transferu zbog veće jačine struje potreban je veći protok, u odnosu na transfer u kratkom spoju.

### 2.3.4 Izbor dodatnog materijala

#### 2.3.4.1 Puna žica

Puna žica kao tip dodatnog materijala se prva počela koristiti kod zavarivanja pancirnog čelika [37]. Prednost pune žice je odsustvo šljake koja se stvara nakon procesa zavarivanja [60]. Ovaj tip dodatnog materijala je naročito pogodan za automatizaciju procesa jer ne postoji potreba za međuprolaznim otklanjanjem šljake. Nije sklon apsorpciji vodonika iz okolne atmosfere, što je čest slučaj da dodatni materijal bude skladišten u prostorijama izloženim vlazi i spoljnim uticajima. Pomenuta prednost naročito dolazi do izražaja kada je u pitanju proces zavarivanja pancirnog čelika koji je osetljiv čak i na mali unos vodonika.

#### 2.3.4.2 Punjena žica

Metalom i rutilom punjena žica, kao tip dodatnog materijala se često koriste kod zavarivanja pancirnog čelika [37]. Kod rutilom i metalom punjene žice zaštitna atmosfera je argon + 25% CO<sub>2</sub>, i argon + 1.5 % O<sub>2</sub>. Punjena žica je uvedena kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi, da bi se iznad kupke formirala troska slična kao kod REL postupka. U režimima sprej transfera, koji je širok sa sitnim kapljicama, punjena žica ima veću gustinu struje u odnosu na punu žicu, čime se dobija bolja bočna penetracija. Potom, pri istim parametrima zavarivanja, zbog veće

gustine struje topi se više punjene žice u odnosu na punu što rezultuje većom produktivnošću.

Danas se smatra da je bešavna punjena žica, najkvalitetniji tip žice za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi. Njene prednosti se ogledaju u sledećem:

- sigurne su od apsorpcije vodonika iz atmosfere a time i od pada žilavosti, što je važno kada se zavaruje pancirni čelik,
- dobro zavarivanje sa malim i velikim jačinama struje, što je važno kod debljih ploča u transferu kratkog spoja i sprej transferu,
- nema opasnosti od poroznosti,
- lako se dostiže stabilni režim, nema rasprskavanja,
- produktivnost je velika, u kombinaciji sa robotom ona se još uvećava,
- dobra penetracija u osnovni materijal, u kombinaciji sa robotom omogućuje dobro mešanje osnovnog i dodatnog metala,
- visoke mehaničke osobine spoja,
- kvalitetan koreni prolaz zajedno sa keramičkom podloškom,
- ne postoji rasprskavanja u zaštitnoj atmosferi Ar+CO<sub>2</sub> 18%.

#### 2.3.4.3 Izbor optimalnog dodatnog materijala

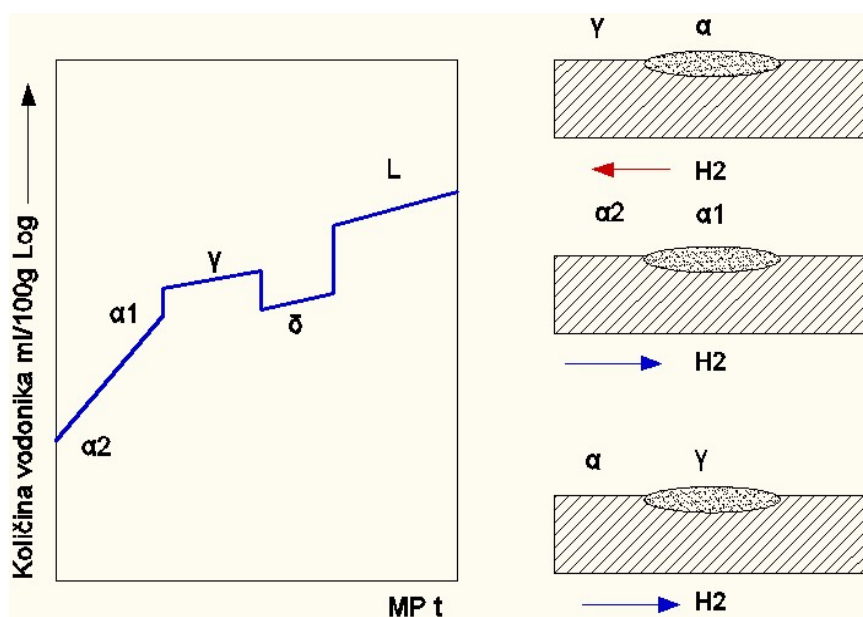
Prema vojnom standardu [15] osobine koje se zahtevaju kod izbora dodatnog materijala su napon tečenja ne manji od 550 MPa za feritni, odnosno zatezna čvrstoća ne manja od 550 MPa za austenitni dodatni materijal. ZUT pancirnog čelika ima nisku energiju udara. Iz istih razloga cilj izbora dodatnog materijala i tehnologije zavarivanja je u dobijanju zavarenog spoja bez prisustva poroznosti, prslina i sa visokom vrednošću energije udara [61].

Pancirni čelici se mogu zavarivati: austenitnim, dodatnim materijalom koji sadrži visoku količinu nikla kao i feritnim dodatnim materijalom sa niskom količinom vodonika [57]. Predgrevanje osnovnog materijala se često koristi da bi suvišni vodonik difundovao iz metal šava i ZUT-a.

Dodatni materijal sa visokom količinom nikla ima bolju otpornost na udarna opterećenja, u odnosu na austenitni i niskovodonični dodatni materijal. Kod ovog dodatnog materijala ZUT ima veće omekšavanje prouzrokovano različitim toplotnim ciklusima [57]. Mikrostruktura metal šava se sastoji iz austenitne osnove i delta ferita [62].

Prednost niskovodoničnog feritnog dodatnog materijala je u niskoj ceni koštanja, u odnosu na austenitni i dodatni materijal koji sadrži visoku količinu nikla. Mikrostruktura metal šava se sastoji od veoma poželjne acirkularno-feritne morfologije. Nedostatak je što se količina vodonika smanjuje samo sa jednog izvora, dok se njena apsorpcija sa drugih izvora ne može sprečiti. Praksa kod izbora dodatnog materijala, je da ima nešto nižu zateznu čvrstoću, poredeći sa osnovnim materijalom. Ovim se smanjuje nivo zaostalih opterećenja kao i rizik od vodonične krtosti [59].

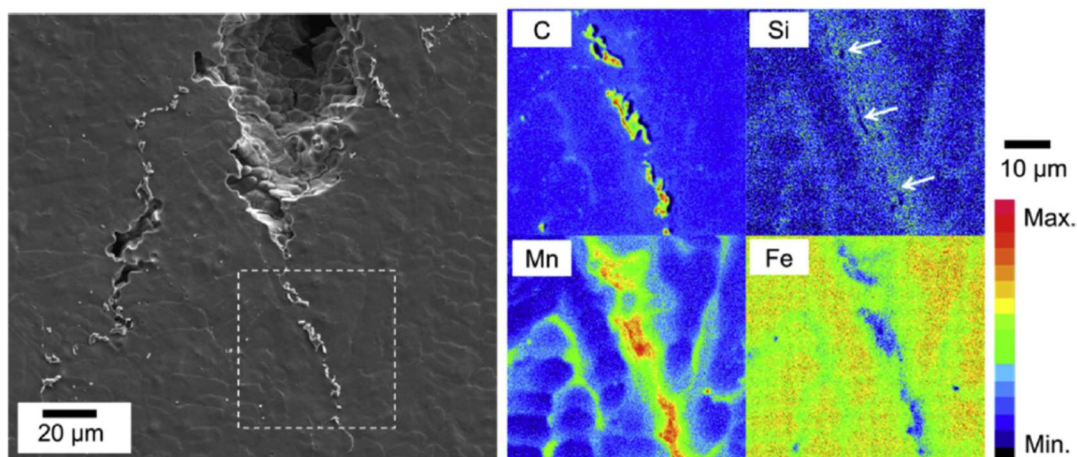
Postoje brojne prednosti kada se pancirni čelik zavaruje austenitnim dodatnim materijalom. Rastvorljivost vodonika u austenitu je mnogo veća, dok je difuzija manja poredeći sa feritnom strukturom. Iz istih razloga je moguće dobiti zavareni spoj bez prslina sa prisustvom veće količine rastvorenog vodonika [59, 63]. Mikrostruktura metal šava se sastoji iz austenitne osnove u kojoj se nalazi skelet delta ferita [62, 64]. Ako se koristi feritni dodatni materijal, relativno vreme transformacije sa najviše temperature između dodatnog materijala i ZUT-a, određuje smer difuzije vodonika. Rastvorljivost vodonika u tečnom stanju je veća kod austenitne u odnosu na feritnu i martenzitnu strukturu. Ako se u toku hlađenja, dodatni materijal brže transformiše nego austenitizirani deo ZUT-a, kompletan vodonik iz metal šava će biti potisnut u ZUT osnovnog materijala. Ovaj mehanizam je prikazan na slici 2.11. Jedan od boljih načina da se izbegne ovaj efekat je da se koristi austenitni dodatni materijal. Austenitni dodatni materijal štiti ZUT od vodonika jer ima mogućnost da više apsorbuje.



Slika 2.11. Mehanizam difuzije vodonika [37].

Austenitni dodatni materijal je visoko legiran niklom i hromom. Oba hemijska elementa, imaju značajan uticaj na mikrostrukturu metal šava. Nikl dodatno povećava energiju udara: smanjenjem količine ( $\delta$ ) ferita (faza koja je krta i osetljiva na vodoničnu krtost), zatim stabilizuje i povećava vrednost energije udara austenitne faze. Suprotno niklu, hrom dodatno stabilizuje ferit i takođe utiče na formiranje ( $\delta$ ) ferita koji smanjuje energiju udara i duktilnost zavarenog spoja.

Austenitni dodatni materijal ima veći koeficijent termičkog širenja koji ga čini osetljivijim na stvaranje prsline tokom procesa očvršćavanja, kao što je to prikazano na slici 2.12. Može prouzrokovati veći nivo deformacija u materijalu, kao rezultat pomenutog širenja tokom hlađenja, što ga čini osetljivijim na vodoničnu krtost. Kod izbora austenitnog dodatnog materijala, potrebno je izbeći velike količine lokalizovanih krtih faza, koje povećavaju tvrdoću ZUT-a, koje mogu nastati duž linije stapanja. Krte faze nastaju kao rezultat difuzije legirajućih elemenata iz svih oblasti ZUT-a. Naknadna termička obrada nije preporučljiva kod austenitnog dodatnog materijala, zbog velike razlike u termičkom širenju između osnovnog i dodatnog materijala [63].



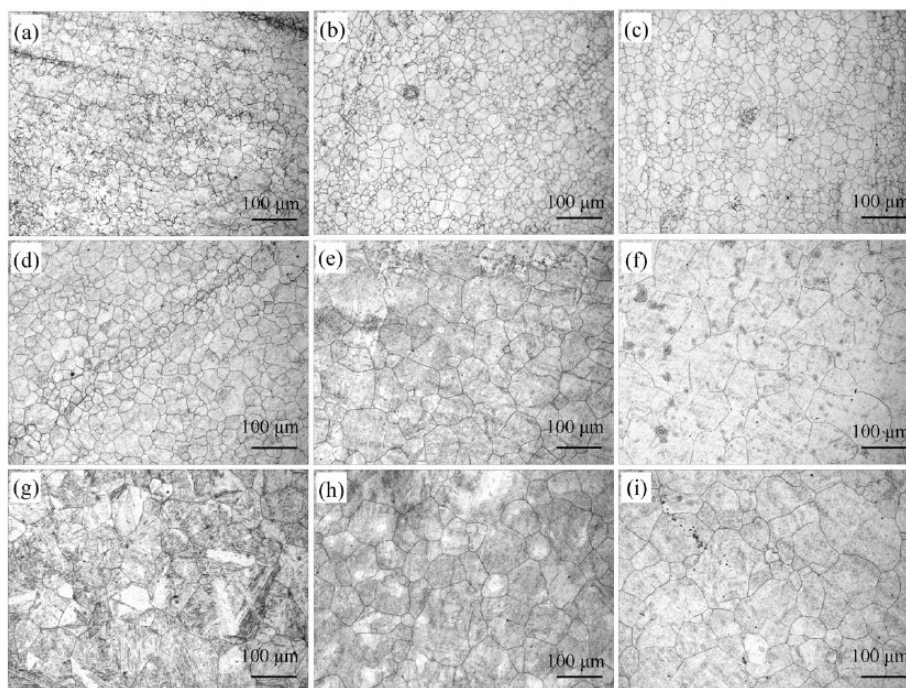
**Slika 2.12.** Prsline u metal šavu austenitnog dodatnog materijala sa visokim procentom mangana, nastala tokom procesa očvršćavanja [65].

### 2.3.5 Uticaj legirajućih elemenata u osnovnom materijalu, ZUT-u i metal šavu

Osobine zavarenog spoja zavise od hemijskog sastava njegovih elemenata: osnovnog materijala, metal šava i ZUT-a. U ZUT-u pod uticajem unete toplote u toku procesa zavarivanja deo osnovnog materijala u okolini rastopljenog metal šava biva izložen visokoj temperaturi i faznim transformacijama. Fazne transformacije direktno zavise od hemijskog sastava osnovnog materijala, dodatnog materijala i unosa toplote. Fazne transformacije uključuju rastvaranje, ponovno taloženje i ukрупnjavanje austenitnog zrna. Veći unos toplote prouzrokuje sporije hlađenje, a kao posledicu rast

austenitnog zrna. Ovaj efekat najviše je izražen u gruboznoj oblasti ZUT-a, i u okolina linije stapanja, gde je osnovni materijal izložen najvišoj temperaturi u toku procesa zavarivanja. Veći unos toplote, vodi prema značajnijem rastu austenitnog zrna ove oblasti ZUT-a. Energija udara zavisi od veličine zrna, a kao posledica, grubozna oblast postaje najkritičnija oblast ZUT-a. Preduslov pouzdane ocene sigurnosti zavarene konstrukcije je u dobrom poznavanju uloge različitih legirajućih elemenata u kontroli mikrostrukture za vreme različitih toplotnih ciklusa, jer mikrostruktura zavisi od toplotnog ciklusa i vrste legirajućih elemenata. Ako karbidi i nitridi legirajućih elemenata ostanu nerastvoreni za vreme toplotnog ciklusa zavarivanja, oni igraju važnu ulogu u smanjivanju rasta austenitnog zrna u ZUT-u. Međutim ovi elementi jednom rastvoreni utiču na smanjenje energije udara u ZUT-u.

Tokom toplotnog ciklusa uzrokovanog procesom zavarivanja, u ZUT- u će se desiti brzi ili spori rast austenitnog zrna. Ubrzani rast austenitnog zrna će se desiti ako je maksimalna temperatura u ZUT-u iznad  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dok sporiji rast možemo očekivati kod temperatura koja su ispod  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Veličina zrna se izuzetno povećava tokom hlađenja od  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  [66]. Vreme održavanja na visokoj temperaturi tokom toplotnog ciklusa zavarivanja utiče na veličinu austenitnog zrna [slika 2.13](#). Veće austenitno zrno možemo očekivati ako je vreme zadržavanja na visokoj temperaturi duže.



**Slika 2.13.** Optički metalni grafikoni prethodnog austenitnog zrna nakon zagrevanja do (a)  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (d)  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; i (e)  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; i zatim hlađenje od  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  do (f)  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (g)  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (h)  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; i (i)  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [66].



### 2.3.5.1 Uticaj hemijskih elemenata u osnovnom materijalu i ZUT-u

#### Vanadijum

Izraziti uticaj vanadijuma je u promeni mikrostrukture. On utiče na usitnjavanje zrna i promenu iz poligonalnog u acirkularni ferit, čime se povećava energija udara. Vanadijum se lako veže sa nečistoćama fosforom i sumporom, time se sprečava njihovo prisustvo na granici zrna što dovodi do povećanja mehaničkih osobina [67]. Nedostatak vanadijum karbida i karbonitrida je njihov prelaz u čvrsti rastvor u temperaturnom opsegu od 950 °C do 1150 °C, a to je znatno ispod maksimalne temperature na koju se ZUT zagreva prilikom zavarivanja [34]. Pozitivan efekat vanadijuma je u količinama do 0,05 % u interkritičnoj oblasti ZUT-a [68]. Ispitivanje je pokazalo da se u interkritičnoj oblasti, koja se zagreva do 950 °C, gde je bilo prisutno 0,05 % vanadijuma, smanjila količina M-A konstituenata i prelazna temperatura krtosti. Kod čelika sa vanadijum nitridnim fazama i niobijumom primećena je retardacija zrna u temperaturnom opsegu do 1100 °C. U slučajevima da je došlo do taloženja vanadijum karbida, kod višeprolaznog zavarivanja ponovno taloženje vanadijum-karbida utiče mnogo nepovoljnije od ponovno istaloženih čestica vanadijum-karbonitrida [69].

#### Aluminijum

Količina aluminijuma u osnovnom materijalu zavisi od načina dezoksidacije čelika. On ostaje u čeliku do 0,08 %. Aluminijum ima veći afinitet prema kiseoniku nego prema azotu. Ispitivanja pokazuju da količina aluminijuma od 0,01 % do 0,1 % prisutnog u osnovnom materijalu ne utiče na žilavost zavarenog spoja. Količina aluminijuma do 1,2 % u metal šavu povećava žilavost, zbog stvaranja acirkularnog ferita i smanjenja količine kiseonika.

#### Titan

Titan nitridne faze su stabilne čak i na visokim temperaturama (oko 1450 °C), [45]. Odlična kontrola rasta austenitnog zrna se postiže sa odnosom titana i azota između 2 do 3,42. Titan nitridna faza je stabilnija u odnosu na vanadijum nitridnu fazu, tako da ometa rast austenitnog zrna u temperaturnom opsegu od 1100-1300 °C, [70]. Predložen mehanizam koji objašnjava nukleaciju intergranularnog ferita na pomenutim fazama je: 1) inertna površina ovih faza, smanjuje aktivacionu energiju očvršćavanja, 2) dobro poklapanje kristalnih rešetki titan nitridnih faza i acirkularnog

ferita, 3) zona oko mangana ili ugljenika vodi prema lokalnom povećanju energije za nukleaciju, i 4) stvaranje termičke energije deformacije [67] zbog različitog koeficijenta širenja između titan nitridne faze i austenita, [71, 72]. Kod niskolegiranih čelika, najbolja kombinacija mikrostrukture i energije udara se postiže opsegom od 0,02-0,05 % titanijuma, [73]. Tokom procesa očvršćavanja titanijum onemogućuje oksidaciju bora, za vreme hlađenja preostali bor se štiti od azota, formiraju se titan nitridne faze. Tako bor, koji je inače u malim količinama prisutan u niskolegiranom čeliku, može da segregira po granicama zrna, koji zatim sprečava stvaranje i rast Widmaštatenovog ferita, [74].

### **Bor**

Bor stvara globularni beinit u grubozrnoj oblasti ZUT-a, u širokom opsegu brzine hlađenja [75]. Isto ispitivanje pokazuje da bor snižava temperaturu transformacije za 50 do 100 °C u širokom opsegu brzine hlađenja. Bor smanjuje količinu zrna koje imaju granice pod velikim uglom a povećava količinu martenzitno austenitnih faza, što utiče na smanjenje energije udara. Bor zbog malog atomskog prečnika lako difunduje do granice zrna austenita smanjujući njenu energiju a time i mesto za nukleaciju proeutektoidnog ferita. Zbog negativnog uticaja kiseonika i azota na bor, prema kome on ima veliki afinitet, najčešće se kao pratilac boru dodaje titanijum. Kao rezultat većih segregacija bora prema granicama zrna, i njegovog uticaja na spuštanje temperature transformacije prema nižim vrednostima, granica zrna ostaje zadnja tečna a usled termičkih deformacija dolazi do stvaranja prslina na pomenutim mestima [76, 77].

### **Bakar**

Pancirni čelik, ojačan talogom bakra poseduje veoma dobre osobine. Količina bakra kod pancirnog čelika zavisi od procenta ugljenika. On se dodaje sa odnosom 1:2 u korist ugljenika [36].

## **2.3.5.2 Uticaj hemijskih elemenata u metal šavu**

### **Niki**

Niki je jedan od kritičnih elemenata u dodatnom materijalu. Kod visoko hromnog dodatnog materijala nalazi se u količinama iznad 8 %. Niki povećava čvrstoću, energiju udara, duktilnost dok istovremeno povećava otpornost na oksidaciju i korozionu postojanost. Niki čini granicu zrna neravnom što povoljno utiče na mehaničke osobine

zavarenog spoja [78]. Ovo se objašnjava pretpostavkom da u toku zavarivanja dolazi do segregacije po granici zrna, a u toku ponovnog zagrevanja nečistoće kao što su fosfor, kalaj i antimon difunduju prema granici zrna, stvarajući interkristalnu krtost.

### **Mangan**

Mangan se dodaje radi dezoksidacije i odsumporavanja austenitnog dodatnog materijala za vreme njegovog očvršćavanja, zbog prevencije željezo sulfidnih uključaka koji mogu stvoriti problem zbog nastanka prslina. Mangan se nalazi u većim količinama, do 7 %, u austenitnom dodatnom materijalu se nalazi radi smanjenja osetljivosti na toplu prslinu i radi povećanja tvrdoće. On je takođe stabilizator austenita i kada se dodaje u većim količinama (od 4 do 15 %) on zamenjuje nikl u nerđajućim čelicima, čija je prodajna cena visoka.

### **Silicijum**

Silicijum u austenitnom dodatnom materijalu povećava otpornost na oksidaciju. On se često dodaje ako je prisutan molibden, zbog otpornosti na oksidaciju.

## **2.4 Mehaničke osobine i analiza mikrostrukture**

Mikrostrukturne i mehaničke osobine pancirnog čelika u bilo kojoj oblasti ZUT–a, su u funkciji istorije zagrevanja i hlađenja u datoj tački. Tehnologija zavarivanja treba da bude tako propisana da su osobine ZUT-a, slične osobinama osnovnog materijala, da bi se garantovao integritet konstrukcije i balističku otpornost.

### **2.4.1 Tvrdoća**

Tvrdoća u zavarenom spoju pancirnog čelika je direktno povezana sa mikrostrukturom. Metal šava ima nižu tvrdoću u odnosu na ZUT i osnovni materijal, zbog austenitne mikrostrukture. Tvrdoća u zavarenom spoju pancirnog čelika nije jednolika već se povećava postepeno od lokacija blizu linije stapanja prema osnovnom materijalu. Nakon maksimuma u grubozrnoj oblasti ZUT-a tvrdoća se smanjuje prema osnovnom materijalu. Smanjenje tvrdoće se može objasniti delovanjem toplotnog ciklusa što rezultuje dodatno otpuštanje oblasti koja je veće kaljena i otpuštena. Smanjenje tvrdoće je manje kod postupka zavarivanja koji ima niži unos toplote nego kod zavarenih spojeva sa većim unosom toplote, kao rezultat razlike temperaturnih ciklusa.



Kontrolisanje nivoa tvrdoće u ZUT-u, je važan aspekt kada se procenjuje rizik vodonične krtosti. Sa većim prisustvom vodonika i većom tvrdoćom u ZUT-u, veća je i verovatnoća pojave vodonične krtosti. Kada se razvija tehnologija zavarivanja, maksimalna tvrdoća dobijena u ZUT-u je ključna za kvalitet procedure zavarivanja i izbegavanje vodonične krtosti. Takođe postoji veza između tvrdoće i žilavosti zavarenog spoja, zbog toga je potrebno izabrati odgovarajuće parametre zavarivanja, kao i prilagođeni hemijski sastav dodatnog materijala prema osnovnom materijalu, da bi se postigao najbolji kompromis između ove dve osobine. Austenitni dodatni materijal zavaren MIG postupkom ima tvrdoću 261 HV [57, 79], dok feritni dodatni materijal zavaren istim postupkom ima veću tvrdoću koja iznosi 311 HV [49, 51]. U većini istraživanja feritni dodatni [41, 46] materijal ima tvrdoću od  $\sim 320 \pm 20$  HV, [47] dok je tvrdoća austenitnog dodatnog materijala u iznosu od  $220 \pm 20$  HV [80, 81].

Visoka tvrdoća čelika je prvi i nezaobilazni segment zaštite oklopnih vojnih vozila i posade. Razlog je sprečavanje ulaska projektila u unutrašnjost vozila. Na osnovu klauzule standarda [15] bilo koji deo površine na rastojanju od 15,9 mm prema osnovnom materijalu, mereno od sredine metal šava, ne sme da ima tvrdoću manju od 477 HB (509 HV). Ako tvrdoća pređe izvesnu granicu, koja zavisi od sadržaja difundovanog vodonika, pojaviće se prsline. Da bi se izbegle prsline u ZUT-u i metal šavu, uvedena je vrednost granične tvrdoće, kao veza između količine difundovanog vodonika i dozvoljene tvrdoće. Granična tvrdoća se može povećati sa padom količine difundovanog vodonika  $H_2$ : (20 ml/100 g)→350 HV, (10÷20 ml/100 g)→375 HV, (5÷10 ml/100 g)→400 HV, (1÷5 ml/100 g)→450 HV [82, 83]. U zavisnosti od uslova zavarivanja, tvrdoća u grubozrnoj oblasti može se dostići i vrednosti iznad 600 HV [60].

#### 2.4.2 Zatezne karakteristike

Zatezna čvrstoća i napon tečenja kod feritnog dodatnog materijala iznose  $\sim 850$  MPa i  $\sim 830$  MPa, [41, 46]. Zavaren spoj feritnog dobijen REL postupkom ima veću zateznu čvrstoću u odnosu na MIG tehnološki postupak [48, 85]. Zavareni spoj austenitnog dodatnog materijala ima niže vrednosti zateznih karakteristika u odnosu na zavareni spoj feritnog dodatnog materijala [47, 84], pri čemu je potrebno naglasiti da postoje razlike u zateznoj čvrstoći u zavisnosti od tehnološkog postupka zavarivanja. Kod zavarenog spoja pancirnog čelika, spojenog MIG tehnološkim postupkom i

austenitnim dodatnim materijalom su moguće niske vrednosti zatezne čvrstoće od 571 do 600 MPa [50, 51]. Međutim u nekim slučajevima zatezna čvrstoća sa ovom kombinacijom tehnološkog postupka i dodatnim materijalom E312-16 iznosi i do 765 MPa [41]. Zavareni spoj pancirnog čelika spojen REL tehnološkim postupkom i austenitnim dodatnim materijalom ima zateznu čvrstoću od 650 do 735 MPa [50, 51].

Zatezna čvrstoća zavarenog spoja se menja i različita je po oblastima ZUT-a, potom od vrste dodatnog materijala, konfiguracije spoja, dimenzija, procenta ugljenika i ugljeničnog ekvivalenta čelika. Kod kaljenih i otpuštenih čelika, maksimalna čvrstoća i tvrdoća je na liniji stapanja, a minimalna u finostrukturnoj oblasti ZUT-a. U gruboznoj oblasti ZUT-a, je najmanja duktilnost, zatim ona raste i maksimalna vrednost duktilnosti je u finostrukturnoj oblasti ZUT-a, pre toga duktilnost polako opada do dela osnovnog materijala.

Cilj ispitivanja jeste provera da li zavareni spoj zadovoljava zahteve propisane standardom za zavarene spojeve pancirnog čelika [15]. Prema pomenutom standardu za feritni dodatni materijal napon tečenje ne sme imati vrednost manju od 550 MPa, dok je za austenitni dodatni materijal minimalna zatezna čvrstoća 550 MPa.

#### **2.4.3 Mikrostruktura i širina ZUT-a zavarenog spoja pancirnog čelika**

ZUT oblast se sastoji od otpuštenog martenzita. Međutim, finoća zavisi od tehnološkog postupka zavarivanja i od vrste dodatnog materijala [50]. Feritni dodatni materijal ima grublju mikrostrukturu sa otpuštenim martenzitom u odnosu na austenitni dodatni materijal.

Šira interkritična i subkritična oblast ZUT-a se dobija sa međuprolaznom i temperaturom predgrevanje od 200 °C i 25 °C u odnosu na međuprolaznu i temperaturu predgrevanje od 120 °C i 80 °C. Rezultati metalografije su pokazali da grubozno područje ZUT-a, ima znatno veću količinu mekših faza (gornjeg i donjeg beinita) sa međuprolaznom i temperaturom predgrevanje od 200 °C i 25 °C, u odnosu na međuprolaznu i temperaturu predgrevanje od 120 °C i 80 °C, [37].

Sa unosom toplote od 0,86 kJ/mm, kod ploča predgrejanih na 80 °C, u gruboznoj oblasti ZUT-a, se može očekivati prisustvo gornjeg i donjeg beinita i pločica martenzita. Ferit je isto prisutan u formi veoma finih feritnih pločica gornjeg beinita. Ako je temperatura pancirne ploče 20 °C i koristimo isti unos toplote, ferit će nestati iz grubozne oblasti ZUT-a. Smanjivanje temperature predgrevanja utiče na formiranje

veće količine tvrdih faza dok mikrostruktura postaje finije. Sa smanjivanjem temperature predgrevanja količina martenzita se povećava na račun beinita [37, 86].

## 2.5 Energija udara

Energija udara zavisi od hemijskog sastava čelika, toplotnog ciklusa pri zavarivanju i mikrostrukture. U toku projektovanja i izrade čelika se teži prema najpovoljnijem sastavu, da se što više smanji sadržaj nečistoća kao što su sumpor i azot a dodavanjem manjih količina titana ili niobijuma i vanadijuma eventualno smanji sadržaj ugljenika koji nepovoljno deluje na žilavost.

Kod pancirnog čelika energija udara raste sa povećanim unosom toplote pri zavarivanju, odnosno sa porastom vremena hlađenja  $t_{6/2}$ .

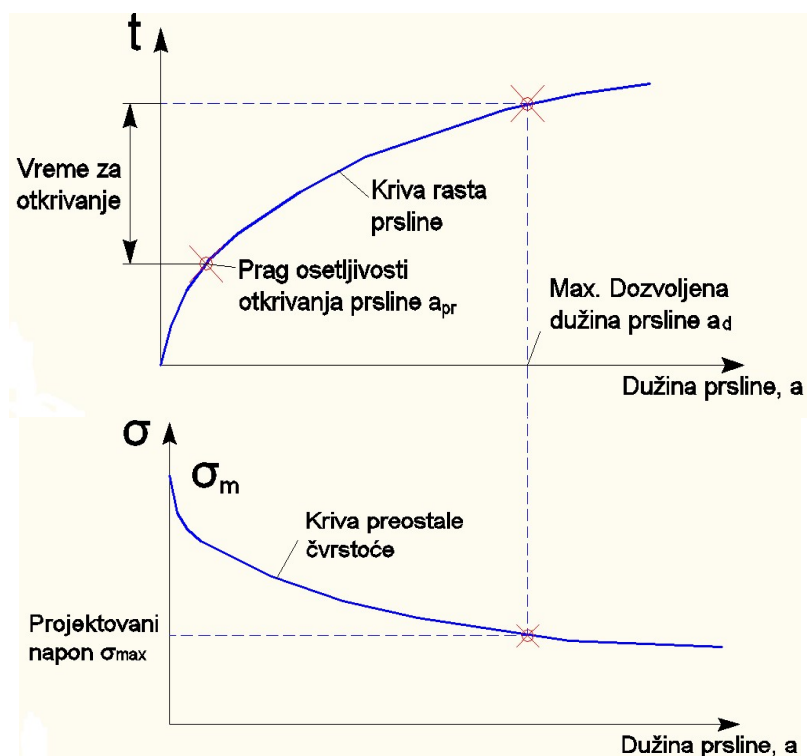
Energija udara zavarenog spoja će zavisiti od oblasti u kojoj se vrši ispitivanje. Najniže vrednosti energije udara su blizu linije stapanja, kao i u osnovnom materijalu [3, 4]. Na njenu vrednost utiče hemijski sastava čelika, brzina hlađenja, uneta toplota i mikrostruktura. U toku projektovanja i izrade čelika teži se prema najpovoljnijem sastavu, da se što više smanji sadržaj nečistoća kao što su sumpor i azot, dok dodavanje manjih količina titana ili niobijuma i vanadijuma eventualno smanji sadržaj ugljenika koji nepovoljno deluje na žilavost. Kod pancirnog čelika energija udara raste sa povećanim unosom toplote pri zavarivanju, odnosno sa porastom vremena hlađenja  $t_{6/2}$ . Energija udara u osnovnom materijalu zavisi od tvrdoće pancirnog čelika. Pancirni čelici sa tvrdoćom od 477 HV na sobnoj temperaturi imaju energiju udara od 36 J i 31 J [36, 28 i 87]. Nešto veću energiju udara od 49 J na sobnoj temperaturi imaju pancirni čelici sa tvrdoćom od 450 HV [56, 57]. Dok pancirni čelik sa većom tvrdoćom od 525 HV ima energiju udara od 28 J [41]. Energija udara u ZUT-u direktno zavisi od unešene toplote odnosno od tvrdoće. Energija udara na sobnoj temperaturi u ZUT-u, čija je tvrdoća većim delom oko 350 HV, sa pikom od 440 HV, iznosi 52 J [3]. Žilavost ZUT-a se može poboljšati smanjivanjem količine lokalnih krutih faza, zatim kontrolisanjem količine martenzitno austenitnih faza, potom pažljivim izborom hemijskog sastava dodatnog materijala kao i ulaznom temperaturom zavarivanja. Energija udara u austenitnom dodatnom materijalu iznosi 59 J i 62 J, za MIG i REL postupak, [57]. Kada je u pitanju niskovodonični feritni dodatni materijal energija udara iznosi od 32 J do 46 J, [56].

## 2.6 Mehanika loma u zavarenim spojevima

### 2.6.1 Uvod

Zavarene konstrukcije od pancirnog čelika spadaju u visoko odgovorne konstrukcije, kod kojih su zavareni spojevi često osjetljivi na prsline i njihov stabilni ili nestabilan rast. Stoga je bitno poznavati preostalu čvrstoću konstrukcije sa prslinom bilo u zavarenom spoju, bilo u osnovnom materijalu. Postojeća prsina bez obzira kako su se pojavila, može da raste tokom eksploatacije vojnog oklopnog vozila po neravnom terenu. Brzina njihovog rasta zavisi će od mnogih faktora kao što su: veličina i tip opterećenja, zatim kombinacija materijal-okruženje, kao i veličina i oblik tela sa prslinom. Sa porastom prsline povećava će se intenzitet napona na njenom vrhu što će prouzrokovati njen još brži rast.

Kao jedna od najpouzdanijih metoda procene preostale čvrstoće danas se koristi poređenje krive otpornosti ( $J-R$  krive) sa parametarskim krivama sila -rast prsline, na osnovu čega se može odrediti opterećenje koje izaziva stabilan rast prsline. Preostala čvrstoća konstrukcije  $\sigma_m$  koja je prikazana zavisnošću napona loma od dužine prsline, progresivno opada sa rastom prsline [slika 2.14](#). Nakon određenog vremena preostala čvrstoća postaje toliko mala da komponenta u eksploataciji može da otkaže i pri normalnim radnim opterećenjima.



**Slika 2.14.** Inženjerski problem prsline u konstrukciji a) kriva rasta prsline; b) dijagram preostale čvrstoće, [88].

## 2.6.2 Koncept male zone tečenja

Kvalitetnu analizu ponašanja prsline, pri dejstvu opterećenja, kada je u pitanju zona osnovnog materijala, će omogućiti linearno elastična mehanika loma. Linearno elastična mehanika loma odnosno koncept male zone tečenja, je odgovarajući za pancirne čelike. Koncept male zone tečenja važi u uslovima kada je zona plastičnih deformacija na vrhu prsline,  $r_P$ , dovoljno mala u poređenju sa relevantnim geometrijskim veličinama tela sa prsline, kao što su: dužina prsline,  $a$ , ligament ispred vrha prsline,  $l$ , i dužina čela prsline,  $L_P$ . U ovakvim uslovima, faktor koncentracije napona će dovoljno tačno definisati aktuelno polje napona i deformaciju neposredno oko plastične oblasti. Oko vrha prsline se uspostavlja singularno polje elastičnih napona i deformacije koje je opisano faktorom *intenziteta napona*  $K$ , [slika 2.15](#). Veličina zone u kojoj dominiraju singularni naponi u kojoj  $K$ -faktor dovoljno tačno opisuje polje napona u okolini vrha prsline naziva se  $K$  – dominantna zona.  $K$  – dominantna zona se prostire do  $R_K = r = 2\%a$  ispred vrha prsline.

Međutim, kod krutih materijala, kao što je pancirni čelik, rastu prsline prethodi mala plastična deformacija ispred njenog vrha. Plastična deformacija počinje kada naponi dostignu efektivni napon tečenja  $\sigma_{T,ef}$ , jednačina 2.1. Tada, se na vrhu prsline pojavljuje oblast plastično deformisanog materijala, zona intenzivne plastične deformacije [slika 2.15](#). Ukoliko je ova zona manja u odnosu na  $K$ -dominatnu zonu,  $R_K$ , tada  $K$ -faktor i dalje može da karakteriše stanje elastičnih napona u okolini koja okružuje plastično deformisani materijal na vrhu prsline.

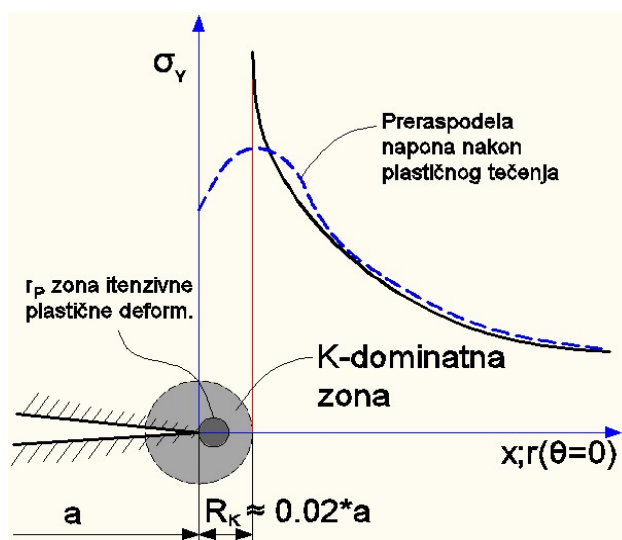
$$\sigma_{T,ef} = k_0 \cdot \sigma_T \quad 2.1$$

gde su:

$k_0$  - faktor lokalnog ometanja plastičnog tečenja materijala, (kod ispitivanja žilavosti loma)

$\sigma_{T,ef}$  – efektivni napon tečenja,

$\sigma_T$  – napon tečenja.

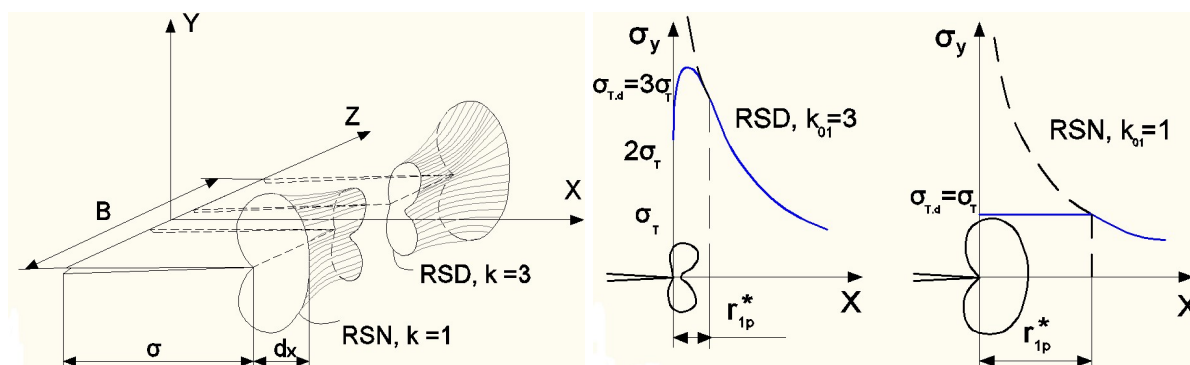


**Slika 2.15.** Plastična zona ispred vrha prsline,  $r_p < R_K$ , i njen zanemarljiv uticaj na nominalno polje napona, [88].

Veličine plastične zone ispred vrha prsline se izračunava na osnovu jednačine 2.2.

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \frac{K_I}{k_0 \cdot \sigma_T} \right)^2 \quad 2.2$$

Rezultujuća raspodela napona je prikazana na slici 2.16. Pri ravnom stanju napona  $\sigma_y$  naglo raste od vrednosti  $\sigma_T$ , na samom vrhu prsline do vrednosti  $3 \cdot \sigma_T$  na malom rastojanju ispred vrha prsline.

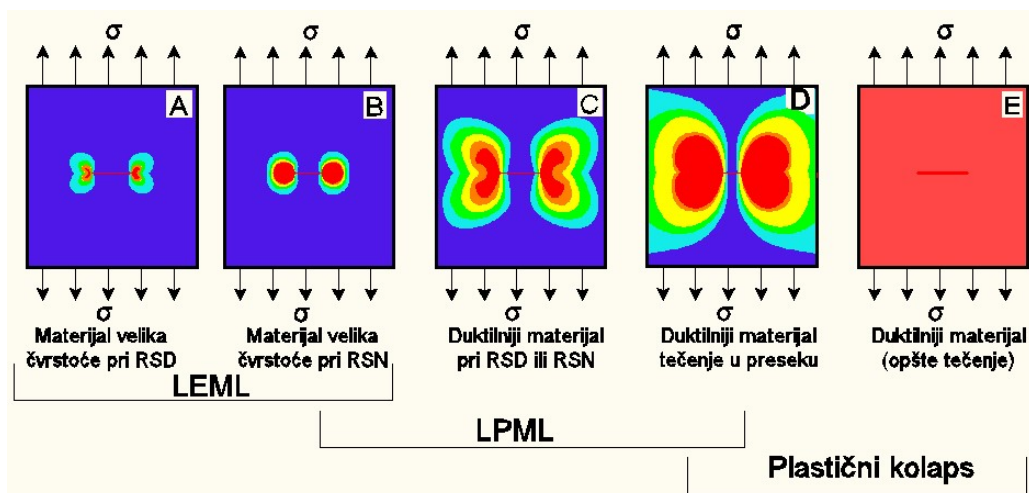


**Slika 2.16.** Približna raspodela napona ispred vrha prsline  $\sigma_y$  i veličina plastično deformisane zone u prvoj aproksimaciji za: a) ravno stanje napona, RSN i b) ravnu deformaciju, RFD.

Trenutno stanje literature nam daje malo informacija o parametrima mehanike loma u osnovnom materijalu. Prema rezultatima linearno elastične mehanike loma, Bisaloy 500 ima dobru otpornost na rast prsline. Žilavost loma u uzdužnom pravcu iznosi  $121 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ , dok je u poprečnom pravcu žilavost loma nešto niža i iznosi  $111 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$  [89].

### 2.6.3 Elastično-plastična mehanika loma

Linearno-elastična mehanika loma (*LEML*) se može primeniti sve dok je veličina plastične zone na vrhu prsline mala u poređenju sa dužinom prsline. *LEML* se može primeniti na pancirnom čeliku jer je materijal visoke čvrstoće a istovremeno je krt. Međutim, kod duktilnog dodatnog materijala, gde je veličina plastične zone velika u odnosu na dužinu prsline tada *LEML* više ne važi, i on se ne može primeniti na ispitivanje zone metal šava. U ovim uslovim se primenjuju metode elasto-plastične mehanike loma (*EPML*) [90]. Primena metoda *LEML* i *EPML* sa stanovišta relativne veličine plastične zone na prolaznu prslinu u ploči je dat na slici 2.17.



Slika 2.17. Oblast primene metoda *LEML* i *EPML* za definisanje loma.

Kao posledica mogućih grešaka u materijalu kao i oštećenja pri izradi i ugradnji delova, sasvim je verovatno da će se prslina formirati u početnom periodu eksploatacije vojnih oklopnih vozila. Pri projektovanju vojnih oklopnih vozila sigurnost vozila zahteva da se pri proračunu koriste podaci o mehanici loma, kako bi se sprečilo zaustavljanje u eksploataciji ili katastrofalni lom. Potrebno je napomenuti da se u trenutno objavljenim radovima ne mogu naći ispitivanja žilavosti loma za austenitni dodatni materijal klase ER307. Rezultati za ovaj tip materijala će biti korisni za ostale materijala klase AISI 3XX.

Rezultati mehanike loma će omogućiti kvantitativan odgovor na specifične probleme sigurnosti konstrukcije vojnog oklopnog vozila sa prslinom. Podaci će omogućiti novu koncepciju u projektovanju, kao i u proizvodnji, razvoju vojnih oklopnih vozila. Istovremeno, mogućnost procene opasnosti od greške tipa prsline određene

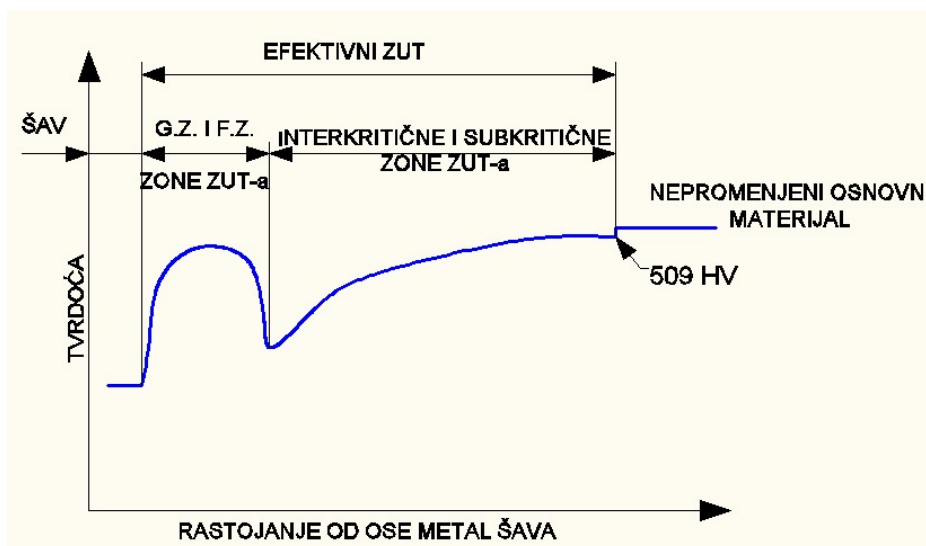


veliĉine i poloŝaja, ĉe omogoĉiti da se i vozila sa greškama, uz odreĉena ograniĉenja, puste u eksploataciju.

## 2.7 Brzina rasta zamorne prsline u zavarenom spoju

### 2.7.1 Uvod

Kada je pancirni ĉelik predmet procesa zavarivanja, postojeća mikrostruktura oko metal šava se drastiĉno menja. Tokom procesa zavarivanja pojedine zone ZUT-a dostiŝu temperaturu iznad 1200 °C, što dovodi do okrupnjavanja odnosno uvećanja nerastvorenih ili delimiĉno rastvorenih faza. Sa većim unosom toplote zrno postaje grublje, zbog ĉega se povećava tvrdoća a time i sklonost prema stvaranju mikroprsline. [Slika 2.18](#) prikazuje promenu tvrdoće kod pancirnog ĉelika nakon procesa zavarivanja.



**Slika 2.18.** Promene tvrdoće u zoni uticaja toplote, [59].

Visoka tvrdoća ĉelika je prvi i nezaobilazni segment zaštite oklopnih vojnih vozila i posade. Cilj ovog zahteva je da se spreĉi ili poveća otpornost od proboja projektila u unutrašnjost vozila.

Pri konstrukciji vojnih oklopnih vozila, posebno se mora voditi računa o pokretljivosti kao mogućnosti da vozilo u što kraćem roku preĉe odreĉenu udaljenost na gruboj i neravnoj podlozi. Drugim reĉima, od oklopnih vozila se zahteva eksploatacija na razliĉitim topografijama terena. Najveći deo eksploatacije je na gruboj i kamenitoj podlozi.

Najveći rizik kod pancirnog ĉelika su mikroprsline. Stvaranje mikroprsline, zavise



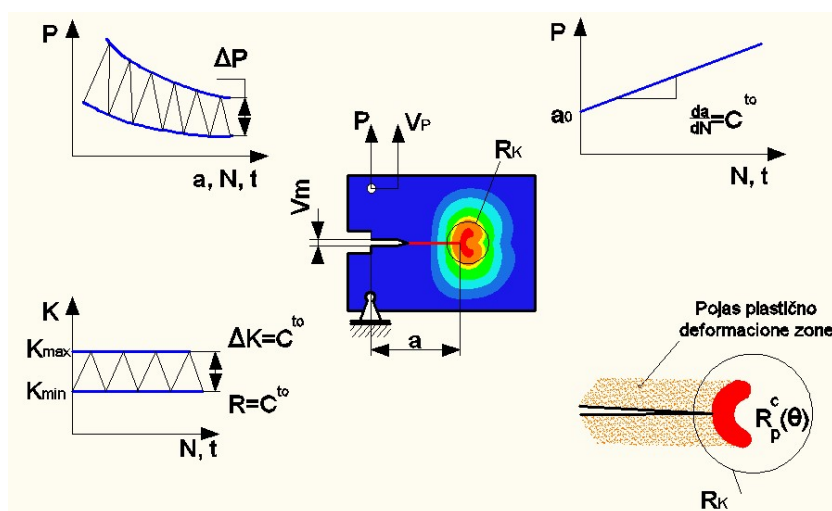
mnogobrojnih faktora kao što su: mikrostruktura, zaostala opterećenja i količine vodonika unetog tokom procesa zavarivanja. Prslina koja može nastati u procesu proizvodnje ili tokom procesa zavarivanja čelika, može biti fatalna tokom eksploatacije ovakve vrste vozila. Kada su u pitanju feritni i dupleks feritno austenitni dodatni materijali, unos toplote i temperatura predgrevanja utiču na to da li će se prslina stvoriti ili ne [59]. Kod austenitnog dodatnog materijala, prsline se prema nekim istraživanjima [81] ređe stvaraju i unos toplote i temperatura predgrevanja ne igraju veliku ulogu.

## 2.7.2 Analiza zamora sa stanovišta mehanike loma

U nameri da se propiše sigurna kontrola, ili pak da se proverí da li je obezbeđen siguran rad za vreme datog intervala za kontrolu, potrebno je raspolagati podacima o rastu prsline [50] po mogućnosti u svim zonama zavarenog spoja pancirnog čelika.

Informacije se mogu dobiti ispitivanjima, koja se kao procena sigurnosti baziraju na postavkama mehanike loma. Koncept *LEML* se može primeniti i za određivanje rasta prsline pri zamoru [91], koja je bazirana na konceptu sličnog ponašanja kada su uslovi na vrhu prsline definisani preko jednog parametra opterećenja, faktora intenziteta napona  $K$ . Primena *LEML* u određivanju brzine rasta zamorne prsline se može razmotriti pri konstatnoj vrednosti opsega  $K$ -faktora,  $\Delta K$  slika 2.19. Vrednost opsega faktora inteziteta napona pri kojoj prslina počinje da raste naziva se prag, i definisan je kao prag opsega faktora inteziteta napona,  $\Delta K_{th}$ .

Jednim ciklusom, koji se sastoji od opterećenja i rasterećenja, formira se plastična zona ispred vrha prsline  $r_p^c(\theta)$ , [88]. Ponavljanjem ciklusa, prslina nastavlja da raste pri čemu se iza njenog vrha ostavlja trag pojasa plastično deformisanog materijala. Plastična zona  $r_p^c(\theta)$  ispred vrha prsline mora biti manja u odnosu na  $K$ -dominantnu zonu da bi bio ispunjen uslov za primenu *LEML* u određivanju brzine rasta zamorne prsline. Kod ispitivanja brzine rasta zamorne prsline da bi plastična zona ispred vrha prsline bila manja u odnosu na  $K$ -dominatnu zonu, neophodno je posebnu pažnju obratiti kod izbora opterećenja.



**Slika 2.19.** Linearni rast prslina  $a-N, t$  pri konstantnom opsegu  $\Delta K$ =faktor koncentracije napona u uslovima ograničenog tečenja  $r_p^c \ll R_K$ . Napomena:  $a$ -dužina prsline,  $N$ -broj ciklusa i  $t$ -vreme ispitivanja, [88].

Opseg faktora koncentracije napona za razmatrani ciklus i dužina prsline, opisuju polje napona na njenom vrhu. Brzina rasta prsline  $da/dN$  se može izraziti u obliku jednačine 2.3:

$$\frac{da}{dN} = \int_1(\Delta K, R) \quad 2.3$$

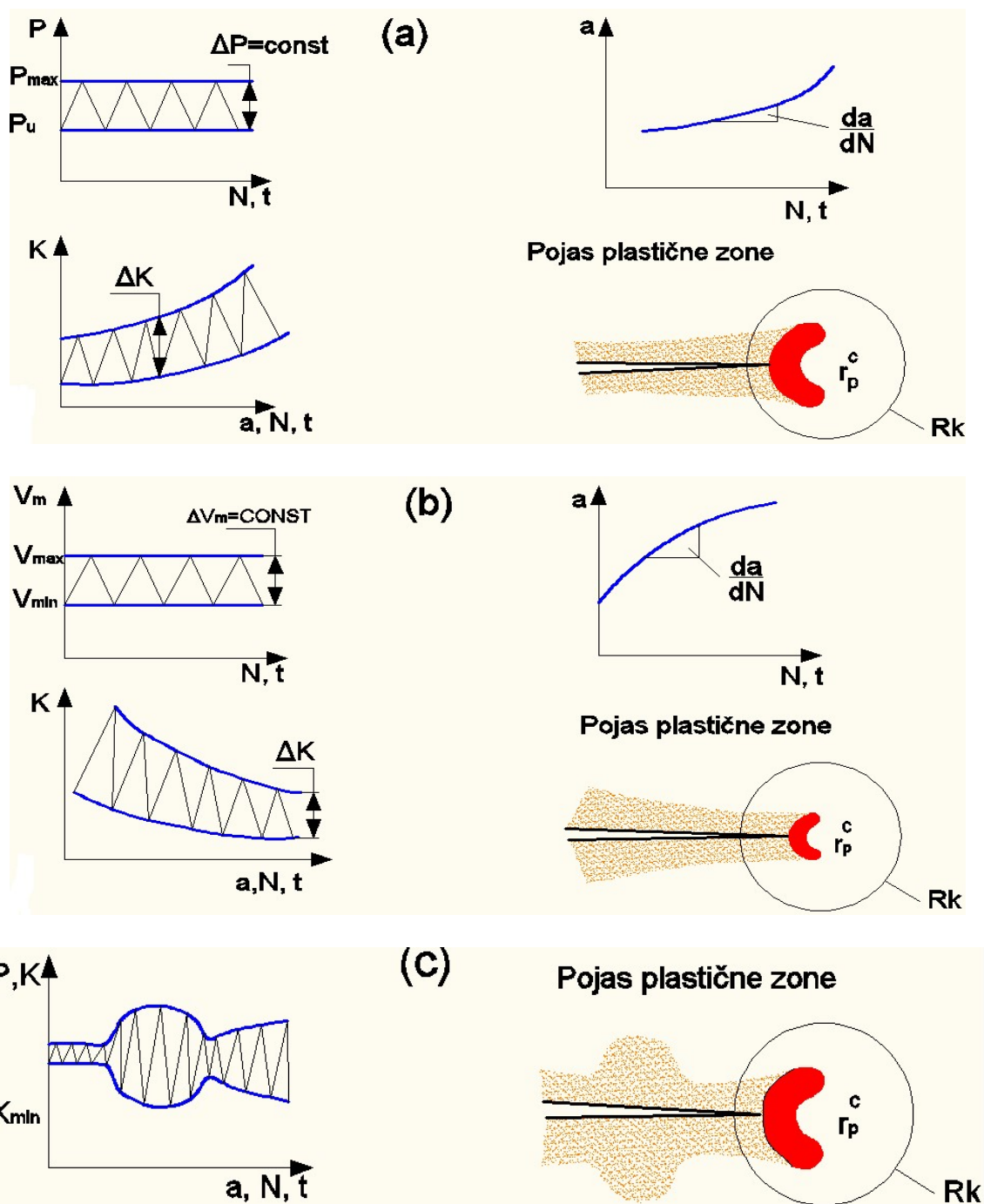
Opseg faktora intenziteta napona je određen razlikom  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ , dok je  $R$ -odnos  $R = K_{min}/K_{max}$ . Ukoliko  $K_{max}$  i  $K_{min}$  variraju tokom ciklusa, brzina rasta za tekući ciklus zavisi će i od istorije opterećenja  $\mathcal{H}$  pa se prethodni izraz prikazuje u obliku jednačine 2.4:

$$\frac{da}{dN} = \int_2(\Delta K, R, \mathcal{H}) \quad 2.4$$

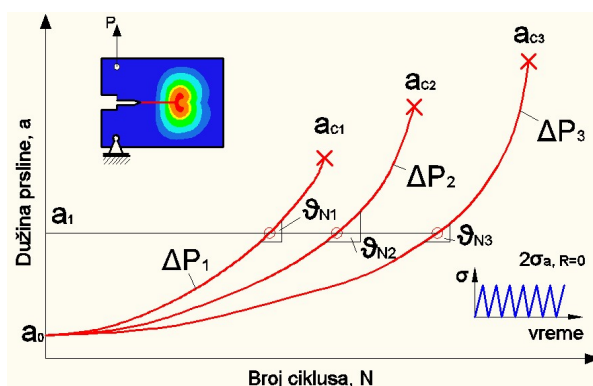
Na slici 2.20 je prikazano nekoliko primera istorije opterećenja za koje ne važi sličnost polja napona na vrhu rastuće prsline za iste vrednosti  $K$ -faktora.

Uvođenje mehanike loma pri cikličnom opterećenju proisteklo je prilikom analize rasta već nastale prsline. Dominantan način makroskopskog rasta prsline i čemu se najveća pažnja u ispitivanjima posvećuje su opterećenja koja otvaraju prslinu na način "I"(jedan). Na slici 2.21 je prikazana promena dužine prsline,  $a$ , sa brojem ciklusa,  $N$ , za tri nivoa opsega opterećenja  $\Delta P = const$  pri čemu je  $\Delta P_1 > \Delta P_2 > \Delta P_3$ . Može se uočiti da prslina brže raste pri većem opsegu opterećenja, odnosno do loma dolazi kod manjeg broja ciklusa. U skladu sa tim, može zaključiti da vek do loma zavisi od toga da li materijal ima početnu prslinu ili ne, od veličine napona i otpornosti materijala prema lomu. Kada je u pitanju brzina rasta zamorne prsline, zbog manje žilavosti

osnovnog materijala-panciranog čelika, nije potrebno računati normalne napone, koji deluju ispred vrha prsline.



**Slika 2.20.** Primeri istorija opterećenja i prateći oblici pojasa plastično deformisanog materijala za koje ne važi sličnost ponašanja na vrhu rastuće prsline za iste vrednosti  $K$ -faktora i načelni oblici zavisnosti  $a=f(N)$ . a) Rastuća  $\Delta K$  koje se ostvaruje kontrolom opterećenja  $\Delta P = \text{const}$ , b) Opadajuće  $\Delta K$  pri kontroli pomeranja  $\Delta V_p = \text{const}$ , c) Stohastička primena  $\Delta K$ , [88].



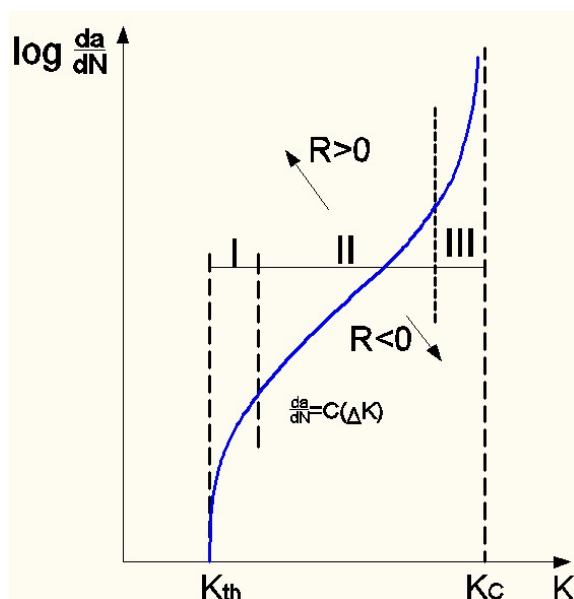
**Slika 2.21.** Zavisnost rasta prsline  $a=f(N)$  za tri nivoa opsega opterećenja  $\Delta P=const$  pri čemu je  $\Delta P_1 > \Delta P_2 > \Delta P_3$ .

Intenzitet napona u svim zonama zavarenog spoja će biti definisan kao osnovni parametar koji kontroliše brzinu rasta zamorne prsline  $\Delta K = \int(\sigma, a)$  u obliku  $\Delta K = K_{max} - K_{min} = Y(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ , [92].

Gde je  $Y$  – geometrijski korekcionni faktor

Pri ispitivanju rasta prsline, dužina prsline,  $a$ , se razmatra u funkciji broja ciklusa,  $N$ , [slika 2.21](#). Brzina rasta prsline  $da/dN$  se određuje diferenciranjem  $a-N$  krive tačku po tačku. Ta veličina se poredi sa definisanim opsegom faktora intenziteta napona  $\Delta K$  zbog toga što je rast zamornih prsline uglavnom određen cikličnim plastičnim deformacijama oko vrha prsline, koje zavise od opsega faktora intenziteta napona  $\Delta K$ .

U pogledu intenziteta uticajnih faktora, mehanizma rasta prsline i različitih intenziteta uticajnih faktora na krivoj mogu se uočiti tri oblasti [slika 2.22](#).



**Slika 2.22.** Načelni oblici promene brzine rasta  $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$  za  $R=0$  i pravci pomeranja  $S$ -krive za odnos  $R \neq 0$ , [88].

U oblasti "I" sa smanjenjem  $\Delta K$  dolazi do naglog smanjenja brzine rasta prsline. Kriva se asimptotski približava granicama rasta prsline  $\Delta K_{th}$ , pragu opsega faktora intenziteta napona. Prag opsega intenziteta napona  $\Delta K_{th}$  je granična vrednost ispod koje zamorna prsline nema uslova za rast. Vrednosti  $\Delta K$  pri kome se definiše prag osetljivosti napona su brzine reda  $10^{-10}$  m/ciklusu ili manje [93]. Ispod  $\Delta K_{th}$  zamorne prsline se ponašaju kao prsline bez tendencije porasta. Granična vrednost  $\Delta K_{th}$  može da se odrediti: a) postupnim smanjenjem opterećenja do prestanka rasta prsline, b) postupnim povećanjem opterećenja do početka rasta prsline i c) korišćenjem epruvete oblika kod koga intenzitet napona opada sa dužinom prsline.

U oblasti "II" zavisnost  $\log (da/dN)$  od  $\log \Delta K$  je u osnovi linearna i predstavljena pravom linijom koju su Paris i saradnici [92] opisali stepenom jednačinom 2.5 oblika:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad 2.5$$

U okviru oblasti "III" dolazi do naglog rasta prsline pre konačnog loma. Lom će nastupiti kada sila  $Pg$  postigne vrednost  $Kc$  ili kada nazivni naponi u ligamentu dostignu zateznu čvrstoću.

Opseg faktora intenziteta napona je najvažniji, ali ne i jedini parameter koji utiče na brzinu rasta prsline. Na brzinu rasta utiče i odnos napona  $R$ . U sve tri oblasti S krive sa porastom  $R$  dovodi do povećanja brzina rasta prsline,  $da/dN$ , odnosno do smanjenje opsega praga faktora inteziteta napona. Dodatna zavisnost brzine rasta prsline od odnosa napona  $R$  uslovljava da,  $C$ , i  $n$ , nisu više konstatni nego zavise od  $R$ . U mnogim radovima [94, 95] se uzima u obzir uticaj odnosa  $R$  na brzinu rasta prsline, primer, izraz kojii su razvili Forman i saradnici:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^n}{(1 - R) \cdot K_c - \Delta K} = \frac{C \cdot \Delta K^n}{(1 - R) \cdot (K_c - K_g)} \quad 2.6$$

Ova jednačina opisuje, osim povećanja  $da/dN$  sa  $R$ , još i zaobljenje sigmoidalne krive pri  $Pg \rightarrow Kc$ . Jednačina 2.7 se koristi za oblasti 2 i 3 na slici 2.22, u modifikovanom obliku:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot (\Delta K - \Delta K_{th})^n}{(1 - R) \cdot K_c - \Delta K} \quad 2.7$$

Princip sličnog ponašanja ( $dK/da=0$ ) tokom rasta prsline u ovim slučajevima treba da bude zadovoljen pa uticaj istorije opterećenja na rast prsline neće biti izražen. Za analizu slučajeva sa rastućim ili opadajućim opsegom  $K$ -faktora na slici 2.22 za koje

je gradijent  $dK/da \rightarrow 0$ , pogodno je koristiti modele koji su postavljeni za zamor sa  $\Delta K = \text{const}$ , odnosno ( $dK/da=0$ ).

Iako su opterećenja sa konstatnom amplitudom u praksi retka najveći broj eksperimentalnih podataka u vidu zavisnosti  $da/dN = f(\Delta K, R)$  je dat upravo za ovakav vid opterećenja.

Iz oštih koncentratora napona će se u uslovima promenljivog opterećenja posle određenog broja ciklusa doći do iniciranja prsline i do njenog rasta ako je prekoračen prag faktora koncentracije napona  $K_{th}$ . Kako konstrukcija pod određenim uslovima neće biti ugrožena dok prsline ne dostigne kritičnu veličinu, može se, uz prethodne analize, dopustiti eksploatacija konstrukcije sa prsline i u period rasta prsline. Bitan podatak za odluku o daljoj eksploataciji je poznavanje brzine rasta prsline i njene zavisnosti od delujućeg opterećenja.

Zavareni spoj pancirnog čelika sa austenitnim dodatnim materijalom ima heterogenu strukturu. Metal šav je sa austenitnom strukturom dok je osnovni materijal sa martenzitnom. Osnovni materijal sa zateznom čvrstoćom dvostruko većom u odnosu na metal šava ima manju duktilnost odnosno energiju udara [57, 36]. Metal šava ima zateznu čvrstoću mnogo manju u odnosu na pancirni čelik, dok je duktilnost metal šava veća u odnosu na pancirni čelik. Određivanje najkritičnije oblasti u pogledu brzine rasta zamorne prsline je važno da bih znali koja će zona u heterogenom zavarenom spoju prva popustiti.

Ako se analizira brzina rasta zamorne prsline u zoni metal šava za niskovodonični feritni i austenitni dodatni materijal sa tehnologijom REL i MIG postupka za oba dodatna materijala [50, 51], možemo konstatovati da austenitni dodatni materijal sa MIG postupkom ima najbrži rast prsline, gde su parametri Parisove jednačine eksponent brzine rasta prsline  $m=6,0$ , dok je konstanta  $C=8,06 \times 10^{-11}$ . Prag faktora inteziteta napona,  $K_{th}$ , je  $6,0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ . Najveću otpornost u brzini rasta prsline ima niskovodonični feritni dodatni materijal sa REL postupkom zavarivanja, parametri Parisove jednačine eksponent brzine rasta prsline, eksponent  $m=4,3$ , dok je konstanta  $C=1,75 \times 10^{-10}$ , prag faktora inteziteta napona,  $K_{th}$ , je  $7,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ .

Zbog visokog napona tečenja  $\geq 1200 \text{ MPa}$ , pancirni čelik ima dobru otpornost na rast prsline, veću od svih oblasti zavarenog spoja [50, 51]. Eksponent brzine rasta prsline,  $m=4$ , je niži od metal šava i u slučaju niskovodoničnog i u slučaju austenitnog dodatnog materijala. Dok je konstanta  $C=2,12 \times 10^{-10}$ . Prag faktora inteziteta napona,  $K_{th}$ , je veći od zone metal šava i u slučaju niskovodoničnog i u slučaju austenitnog

dodatnog materijala i iznosi  $9,0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ . Kod ovog ispitivanja se mora napomenuti da osnovni materijal ima tvrdoću  $\sim 450 \text{ HV}$ , odnosno materijal je žilaviji, nego Protac 500 koji ima veću tvrdoću u odnosu na prethodni pancirni čelik, i ona iznosi  $509 \text{ HV}$ , [36]. Kao rezultat brzina rasta zamorne prsline u ovom osnovnom materijalu je veća u odnosu na pancirni čelik čija je tvrdoća  $455 \text{ HV}$ , [50, 51]. EkspONENT brzine rasta prsline,  $m$ , iznosi  $3,08$ , dok je konstanta,  $C$ ,  $3,18 \times 10^{-9}$ , a prag faktora inteziteta napona,  $K_{th}$ , je izuzetno niska i iznosi  $4,23 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ . Okolna sredina i odnos opterećenja utiču na brzinu rasta prsline. Kod odnosa opterećenja,  $R=0,1$ , prag faktora koncentracije napona,  $K_{th}$ , iznosi  $5,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ . Sa većim odnosom opterećenja,  $R=0,5$ , prag faktora koncentracije napona,  $K_{th}$ , pada na nižu vrednost i iznosi  $3,6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ . Sredina sa  $3,5\%$  NaCl utiče na smanjenje praga faktora koncentracije napona, sa odnosom opterećenja,  $R=0,1$ , prag faktora koncentracije napona,  $K_{th}$ , iznosi  $3,7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ , [96].

Cilj ispitivanja je poznavanje brzine rasta zamorne prsline u svim zonama zavarenog spoja pancirnog čelika. Kao posledica ne poznavanja tačnih opterećenja, osobina materijala, uticaja sredine, ograničenja metoda analize napona, mogućih grešaka u samom materijalu kao i oštećenja pri izradi i ugradnji delova, sasvim je verovatno da se prsline formira u početnom periodu eksploatacije vojnih oklopnih vozila. Sigurnost zahteva, da se pri projektovanju vojnih oklopnih vozila i ova činjenica uzima u obzir, kako bi se sprečilo zaustavljanje eksploatacije ili katastrofalni lom. Drugim rečima, traži se da vojna oklopna vozila budu tolerantna na oštećenja. Da bi se ovaj zahtev mogao ispuniti prsline treba blagovremeno otkriti i pratiti, pre nego što ona dostigne kritičnu veličinu  $a_c$ , pri kojoj dolazi do značajnog oštećenja ili loma. Na taj način se mogu ispuniti uslovi sigurne eksploatacije vojnih oklopnih vozila.

## 2.8 Zaštita vojnih oklopnih vozila

Pri konstrukciji vojnih oklopnih vozila, mora se voditi računa i o balističkoj otpornosti. Nezaobilazni element svakog vojnog oklopnog vozila jeste oklopna zaštita. Oklopna zaštita sprečava ulazak projektila u unutrašnjost vozila potom i njegov negativni efekat unutar vozila. Sistemi zaštite vojnih oklopnih vozila se mogu podeliti u dve grupe. U prvu grupu spadaju sistemi koji imaju zadatak da ometaju sistem za navođenje projektila i na taj način spreče uništavanje vojnog oklopnog vozila. U drugu grupu spadaju sistemi namenjeni da onesposobe nadolazeći projektil. Oklop oklopnih vozila štiti posadu od dejstva vatrenog, eksplozivnog i minskog oružja [58].



Kao rezultat procesa zavarivanja u oblast ZUT-a dolazi do unosa toplote. Toplota difunduje kroz materijal i njen uticaj opada sa rastojanjem od linije stapanja. Mikrostruktura formirana u ZUT –u je u funkciji hemijskog sastava i toplotnog ciklusa. Oblast ZUT-a blizu linije stapanja je pod uticajem najveće temperature, koja prelazi  $AC_3$  liniju, potom je i pod uticajem brzog hlađenja, što rezultuje grubljim zrnom. Temperatura kontroliše veličinu austenitnog zrna, dok brzina hlađenja kontroliše mikrostrukturu unutar zrna. Oba od pomenutih su funkcija hemijskog sastava osnovnog materijala i unosa toplote tokom procesa zavarivanja [52]. Unos toplote je direktno proporcionalan brzini hlađenja  $t_{6/2}$ . Sa većim unosom toplote duže je vreme hlađenja  $t_{6/2}$ . Veći unos toplote rezultuje većim vremenom hlađenja  $t_{6/2}$ , što rezultuje širom omekšanom zonom. Time unos toplote direktno utiče na balističku otpornost zavarenog spoja.

Balistička otpornost zavarenog spoja u oblasti ZUT-a se ispituju prema standardu VPAM APR 2006 in NATO AEP – 55 STANAG 4569 [97]. Sa unosom toplote od  $0,6 \text{ kJ mm}^{-1}$ , ZUT ima otpornost u prodiranju zrna, pri čemu se dešava neznatno oštećenje na površini materijala [52]. Kod unosa toplote od  $0,6 \text{ kJ mm}^{-1}$ , ZUT je ocenjen kao zadorom sa prslinom. Unos toplote od  $\sim 0,9 \text{ kJ mm}^{-1}$  će sprečiti prodiranje zrna u ZUT-u, ali će se na suprotnoj strani stvoriti prslina, odnosno ZUT je ocenjen kao zador sa prslinom [56, 98]. Kod unosa toplote u vrednosti od  $1,2 \text{ kJ mm}^{-1}$ , dolazi do proboja zrna s tim da deo zrna ostaje usađen u materijal. Pomenuto indikuje na otpornost u prodiranju zrna. Kod ovog unosa toplote balističko ispitivanje je ocenjeno kao zador probijen čep. Sa unosom toplote većim od  $1,8 \text{ kJmm}^{-1}$  prodiranje se dešava bez oštećenja zrna, dok je balističko ispitivanje ocenjeno kao proboj.

Zona metal šava ima najmanju otpornost na proboj zrna sučeono zavarenog spoja. U cilju što bolje dinamičke čvrstoće zavarenog spoja najčešće se koristi ili niskovodonični feritni ili austenitni tip dodatnog materijala. U takvim slučajevima zona metal šava je najmekša zona zavarenog spoja. U zavisnosti od izbora pomenutih dodatnih materijala tvrdoća u ovoj zoni je od 260 do 310 HV [52, 57]. Ako je zona metal šava popunjena samo austenitnim dodatnim materijalom prilikom ispitivanja prema standardu VPAM, doći će do proboja zrna [52]. U cilju što bolje balističke otpornosti

zoni metal šava se dodaje sloj tvrdog dodatnog materijala, [56, 98]. U takvim slučajevima konstrukcija ima izgled, 1. sendvič, sa mekim dodatnim materijalom spolja, ispred i iza, dok je unutar metal šava tvrdi dodatni materijal, ili, 2. tvrdi dodatni materijal spolja, samo ispred kao zaštitna barijera, dok je unutra metal šav popunjen sa mekim dodatnim materijalom. U oba slučaja kod uzoraka ispitanih prema standardu VPAM, ne dolazi do proboja zrna.

Da bi se u potpunosti opisala efikasnost zavarenog spoja pancirnog čelika, može se uvesti termin masene efikasnosti. Ona predstavlja odnos između mase čelika za balističku otpornost tvrdoće 270 HB i određenog tipa oklopa, pri čemu je stepen zaštite jednak [19]. Izraz po kome se može izračunati masena efikasnost je:

$$E_m = \frac{m_{\text{čel}}}{m_{\text{okl}}} \quad 2.8$$

gde je:

$E_m$  – masena efikasnost,

$m_{\text{čel}}$  – masa po jedinici površine čelika za pancirnu zaštitu referentne tvrdoće i

$m_{\text{okl}}$  – masa po jedinici po određenog tipa oklopa koji pruža zaštitu kao čelik za pancirnu zaštitu referentne tvrdoće.

Cilj ispitivanja jeste određivanje balističke otpornosti ZUT-a. Osnovni razlog je utvrđivanje da li je unos toplote bio velik sa stanovišta omekšavanja i prodiranja zrna.

## 2.9 Difundovani i zadržani vodonik u zavarenom spoju

Vodonik igra važnu ulogu u mnogim mehanizmima stvaranja krte livene strukture. Rastvor vodonika u čeliku u malim količinama za vreme procesa zavarivanja u većini slučajeva je odgovoran za degradaciju njegovih mehaničkih osobina. Zadržani vodonik utiče na smanjenje duktilnosti i stvaranje veće količine manjih prslina na granicama zrna.

Ispitivanjem količine difundovanog vodonika se dobijaju podaci o količini unetog vodonika u metal šav. Ovim podatkom se dobija odgovor da li je tehnološki postupak pravilno izabran, a pre svega o kvalitetu dodatnog materijala i njegove sposobnosti da ne apsorbuje vodonik iz okolne atmosfere. Austenitni dodatni materijal ima 1,3 ml. vodonika na 100 g. dok feritni dodatni materijal ima 23,4 ml. vodonika na 100 g. metal šava [37], odnosno austenitni dodatni materijal unosi manje vodonika u zonu metal šava. Naj tačin kod ovog tipa dodatnog materijala i manja količina vodonika difunduje

prema zoni linije stapanja, koja je najosetljivija u zavarenom spoju pancirnog čelika. Kod zavarivanja REL postupkom je veća količina difundovanog vodonika u odnosu na MIG postupak za isti tip dodatnog materijala [51].

Ispitivanjem količine zadržanog vodonika dobijaju se podaci o sposobnosti difuzije vodonika kroz metal šava. Ovaj podatak je naročito važan kod izbora dodatnog materijala. Kod MIG postupka feritni dodatni materijal ima 0,9 ml dok austenitni dodatni materijal ima 5,8 ml. zadržanog vodonika na 100 g. metal šava [37]. Ispitivanje zadržane količine vodonika nam pokazuje da feritni dodatni materijal ne zadržava vodonik već isti slobodno difunduje kroz ovo strukturu, time i prema osetljivoj liniji stapanja.

Temperatura predgrevanja utiče na količinu difundovanog i zadržanog vodonika. Količine difundovanog vodonika na temperaturi od 7 °C i 80 °C iznose 1,3 i 0,8 ml na 100 g. metal šava, respektivno. Kada je u pitanju količina zadržanog vodonika ona iznosi 6,1 ml. i 8,9 ml na 100 g. metal šava. Ovi rezultati pokazuju da predgrevanja utiče na smanjenje količine difundovanog i zadržanog vodonika u metal šavu [37]. Iako austenitni dodatni materijal ima najnižu količinu difundovanog i zadržanog vodonika i kod ove vrste dodatnog materijala postoji razlika ako je u pitanju metalom ili rutilom punjena ili pak ako se zavaruje punom žicom. Najveću količinu difundovanog i zadržanog vodonika 0,8 ml. na 100 g. i 7,9 ml na 100 g. metal šava ima metalom punjena žica. Dok izrazito nisku količinu difundovanog i zadržanog vodonika ima puna žica 0 ml. 100 g. i 3,7 ml. na 100 g. metal šava, respektivno. Ovo se može objasniti činjenicom da kod punjenih žica, rutilom ili metalom, usled prisustva u vlažnom magacinu dolazi do absorpcije vlage unutar punjenja.

Cilj ispitivanja količine vodonika je utvrđivanje efekta odabranih temperatura predgrevanja i međuprolaza na količinu difundovanog i zadržanog vodonika u oblasti metal šava.

## 3 EKSPERIMENTALNE METODE

### 3.1 Eksperiment procesa zavarivanja, materijal i oprema

#### 3.1.1 Mehaničke osobine pancirnog čelika

Predmet ovog ispitivanja je pancirni čelik Protac 500, čelik visoke tvrdoće razvijen u Slovenačkoj željezari Acroni. Hemijski sastav i mehaničke osobine su prikazane u [tabeli 3.1](#) i [tabeli 3.2](#). Na reprezentativnoj šarži, spektrohemijskom analizom ispitan je hemijski sastava. Ploče na kojima je izvršen eksperiment procesa zavarivanja su isečene u dimenzijama 250 x 100 x 11 mm uređajem za sečenje vodenim mlazom.

Proces proizvodnje se sastojao iz rastapanja čelika u električnoj peći sa kapacitetom od 85 tona. Čelični umetak kao ulazni materijal u proizvodnji čelika mora imati odgovarajući kvalitet, mora da sadrži što manje nečistoće i elemenata u tragovima, koje se u proizvodnji čelika ne mogu rafinisati. Nakon rastapanja čeličnog umetka izvršena je oksidacija rastopa i formiranje odgovarajuće šljake koja je omogućila izdvajanja fosfora. Zatim se pristupilo sledećoj fazi tzv. sekundarnoj metalurgiji. Rastop u livačkom loncu peći se zagrejao na odgovarajuću temperaturu, a zatim se dodala legura aluminijuma i fero lagure (FeMn, FeCr, FeNb, FeMo, FeNi). Osim toga, dodala se odgovarajuća količina metalurškog kreča (CaO) kako bi se formirala nova rafinirina šljaka. Sledila je degazacija u komori za vakuumsku degazaciju (Vacuum Degassing Chamber). Sa metodama sekundarne metalurgije istopljena masa se homogenizovala, rafinirala i pripremila za livenje. U rastop su se zatim dodali elementi sa visokim afinitetom prema kiseoniku, u obliku žičanih šipki. Zatim su se u rastopu dodali ostatak aluminijuma, kalcijuma (CaSi) kao i ferotitana (FeTi), i na kraju odgovarajuća količina bora. Ovako pripremljen čelični rastop se sipao u uređaj za kontinualno livenje ploča.

Kontinualnim livenjem su se dobile ploče širine 1300 mm i debljine 200 mm. Livene ploče još uvek vruće u peći pod pritiskom, su se tokom tri sata zagrevale na temperaturi od 1250 °C. Sledilo je vruće valjanje sa "Blooming valjkom" na pločama u klasi debljine od 11 mm. Mala kristalna zrna su se formirala nakon najmanje 30% deformacije ispod 950 °C. Konačna temperatura valjanja nije prešla 870 °C.

Nakon toplog valjaja na željenu debljinu, ploče su se termički obradile. Proces termičke obrade se sastojao iz dve faze: kaljenja sa austenitne oblasti, što je stvorilo krutu mikrostrukturu koja se sastojala iz kaljenog i otpuštenog martenzita, nakon čega

je nastupilo niskotemperaturno otpuštanje što je uticalo na povećanje žilavosti sa malim padom tvrdoće u odnosu na kaljenu strukturu. Termičkom obradom je dobijena mikrostruktura koja ispoljava superiornu kombinaciju tvrdoće, čvrstoću, duktilnosti, žilavosti i zavarljivosti pancirnog čelika.

**Tabela 3.1.** Hemijski sastav pancirnog čelika Protac 500.

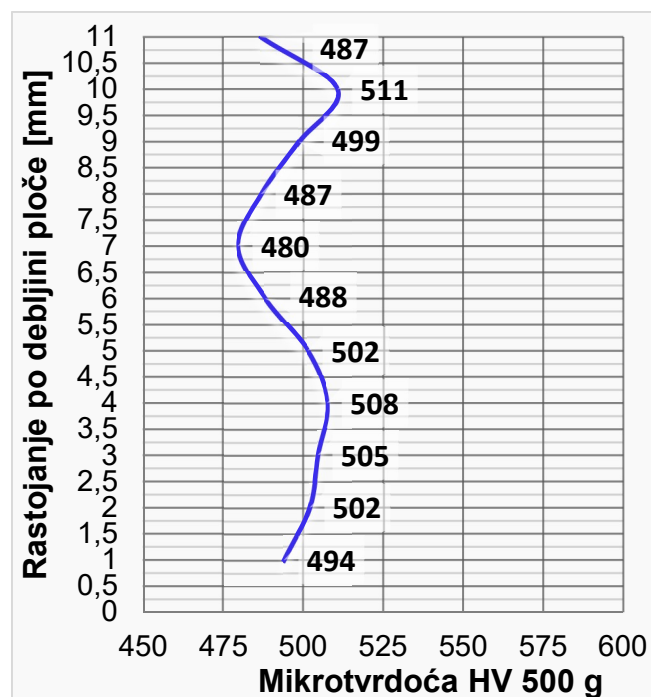
Hemijski element	C	Si	Mn	S	Cr	P
maseni udeo %	0,27	1,07	0,706	0,001	0,637	0,009

Hemijski element	Al	Cu	Ni	Mo	V	Sn
maseni udeo %	0,054	0,276	1,094	0,296	0,039	0,011

**Tabela 3.2.** Mehaničke osobine pancirnog čelika Protac 500.

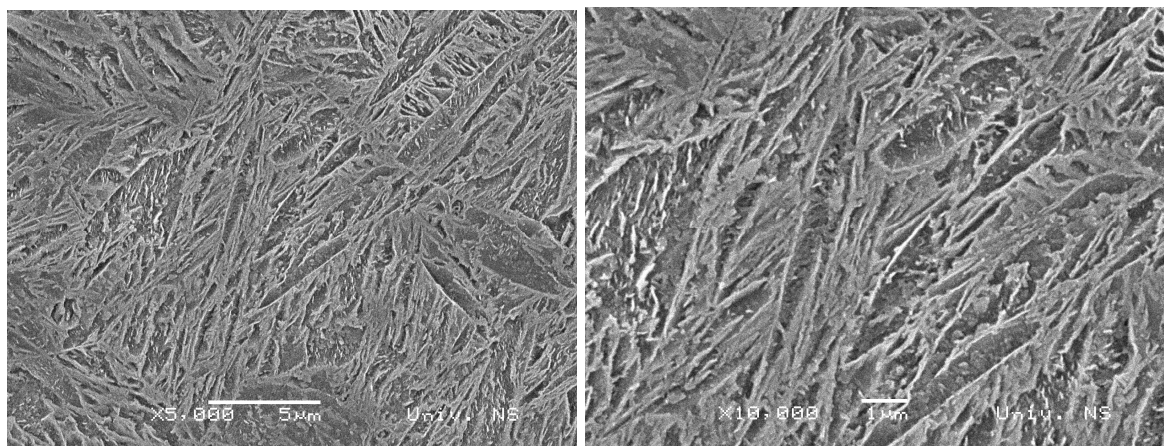
Materijal	$R_{p0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Izduž. [%]	$R_{p0.2}/R_m$
Protac 500	1210	1580	17	0,765

Mikro-tvrdoća pancirnog čelika je izmerena u orijentaciji paralelnim sa pravcem valjanja. Rezultati merenja su prikazani na slici 3.1. Mikro tvrdoća je izmerena na uređaju Digital Micro Vickers Hardness Tester HVS 1000A, ZZV, sa opterećenjem od 500 g.



**Slika 3.1.** Profil mikro-tvrdoće pancirnog čelika Protac 500 po njegovoj debljini u orijentaciji paralelnim sa pravcem valjanja.

Mikrostruktura pancirnog čelika Protac 500 otpuštenog na 280 °C se sastoji od kaljenog i otpuštenog martenzita [slika 3.2](#). Martenzit ima oblik paketa sa debljinom letvica 2 μm. Letvice su sa malim uglom dezorijentacije.



**Slika 3.2.** Mikrostruktura pancirnog čelika Protac 500 kaljenog sa 920 °C i niskotemperaturno otpuštenog na 280 °C.

### 3.1.2 Proces zavarivanja

#### Izbor međuprolazne i temperature predgrevanja

Eksperiment procesa zavarivanja je urađen u dve etape. U prvoj etapi su urađena probna zavarivanja, manuelnim-ručnim načinom, sa profesionalnim zavarivačima. Cilj ovog dela eksperimenta su ispitivanje odabranog: dodatnog materijala, prečnika žice, zatim parametara zavarivanja, potom zaštitne atmosfere, kao i način vođenja pištolja na kvalitet zavarenog spoja. Nakon potvrde željenih osobina, prešlo se na drugu etapu, gde su se parametri procesa zavarivanja preneli sa manuelnog na robotom-automatsko zavarivanje čime su se otklonile greške i uticaji zavarivača i dobila ponovljivost procesa.

Eksperiment procesa zavarivanja je imao za ciljeve:

- Postizanje kvaliteta zavarenog spoja koji će pripasti klasi „B,,
- Vrednost zateznih karakteristika koje će zadovoljiti standard MIL-STAN-1185,
- Vrednost tvrdoća koje će zadovoljiti standard MIL-STAN-1185.

Izbor međuprolazne i temperature predgrevanja su jedan od ključnih faktora koji utiču na vrstu mikrostrukture u ZUT-u, nakon procesa zavarivanja. Izbor temperatura ima za cilj dobijanje mikrostrukture, koja će dati vrednosti zateznih karakteristika kao



i tvrdoću u ZUT-u, koja je u skladu sa standardom [15]. Deblje ploče zahtevaju zavarivanje u više prolaza. Jednoprolazno zavarivanje zahteva visoku vrednost unosa toplote, a time i rast oblasti ZUT-a, kao i nekontrolisane izmene u mehaničkim osobinama osnovnog materijala. Kada je u pitanju zavarivanja pancirnih čelika koriste se identične temperature za predgrevanje i međuprolaz, a one su u opsegu od 80-120 °C.

Cilj izbora vrednosti međuprolazne i temperature predgrevanja je dobijanje veće količine gornjeg i donjeg beinita u odnosu na martenzitne faze, u grubozrnom području, i postizanje vrednosti tvrdoće koja neće prelaziti 540 HV, u ovoj oblasti. U finostrukturnom području dolazi da dominacije mekših faza. U interkritičnoj grejnoj zoni je cilj pojavljivanje faza: beinita, ferita i martenzita. U subkritičnoj grejnoj zoni se želi postići ista struktura kao osnovni materijal, odnosno čist martenzit. Cilj kod izbora parametara tehnološkog postupka zavarivanja je postizanje kvalitetnog zavarenog spoja sa što manjim uticajem unosa toplote, odnosno padom tvrdoće osnovnog materijala.

Kao rezultat kaljivosti a time i sklonosti ka prslinama Protac 500 u odnosu na Bisplate 500 čelika a koje je opisano u prethodnim poglavljima odabrane su nešto višlje temperature predgrevanja i međuprolazne temperature od uobičajenih 80 °C i 120 °C.

Za temperaturu predgrevanja odabrana je vrednost od 150 °C. Razlog odabira pomenute temperature je veći unos toplote čime će se dobiti brzina hlađenja koja će biti niža ili jednaka 7 °C / sec. Time će se pored martenzita u mikrostrukтури pojaviti i određena količina beinita, čime će se smanjiti tvrdoća a time i sklonost ka prslinama. Za međuprolaznu temperaturu odabrana vrednost od 160 °C. Ova temperatura je niža u odnosu na 200 °C. Razlog odabira pomenute temperature je održavanje brzine hlađenja od 1-5 °C / sek u ZUT-u, gde bi se dobila mikrostruktura čija tvrdoća ne prelazi 540 HV.

### **Izbor zaštitne atmosfere**

Za zaštitnu atmosferu izabrana je mešavina argona sa 2,5 % ugljen-dioksida. Ovim izborom će se iskoristiti prednosti CO<sub>2</sub> gasa i njegovog većeg unosa toplote, potom i niskim nivom poroznosti i oksidacije u odnosu na ostale mešavine. Zaštitna atmosfera



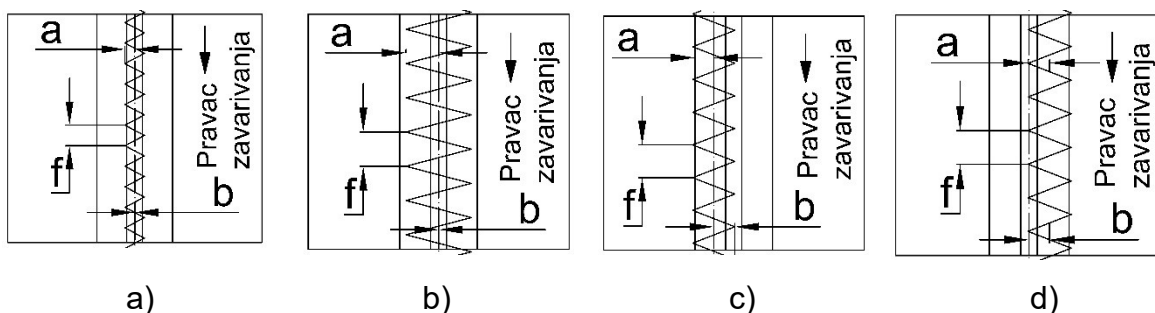
argona i ugljen dioksida je adekvatan izbor za zavarivanje pancirnog čelika zbog osetljivosti i na mali unos ugljenika u metal šav.

Minimalni procenat ugljen-dioksida od 2,5 % je dovoljan za MIG postupak i postizanje sprej transfera.

Protok zaštitne atmosfere u prolazu korena je 10 l, dok je u sprej transferu on 12 l. Time je ispoštovano da je protok 10 x prečnik žice u transferu kratkog spoja, odnosno 12 x prečnik žice u sprej transferu.

### Način vođenja pištolja

Za proces zavarivanja izabrana je opcija vođenja pištolja guranjem (tehnika ulevo) sa uglom od  $\alpha = 20^\circ$ . Svi prolazi procesa zavarivanja su izvedeni vođenjem pištolja po cik-cak putanji. Veličina amplitude i njena frekvencija su najmanje u prolazu korena, dok su najveće u prolazu popune. Pozicija pištolja sa veličinom amplituda i frekvencijama za automatizovani način zavarivanja su prikazani na [slici 3.3](#).



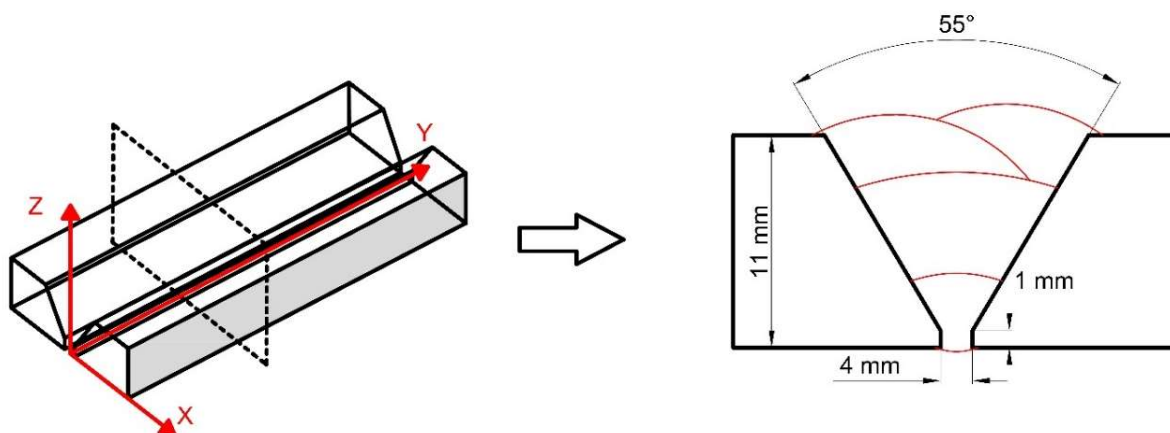
**Slika 3.3.** Putanja kretanja pištolja, za prolaz: a) korena, b) popune, c) desnog i d) levog pokrivnog prolaza sa veličinama a-amplituda, f-frekvijom i b-rastojanjem od centra ose zavarivanja.

### Proces zavarivanja

Proces zavarivanja je započet isecanjem pancirnih ploča u dimenzijama 250 x 100 x 11 mm. Ploče su isečene nekonvencionalnim postupkom, upotrebom uređaja za sečenje vodenim mlazom. Kvalitet površine je postignut malim pomakom tokom sečenja. Nakon isecanja ploča, pristupilo se pripremi ivica. Alat za pozicioniranje je napravljen, da bi se ploče dovele pod uglom koji bi obezbedilo vertikalno sečenje i pripremu ivica sa uglom od  $27,5^\circ$  i nadvišenjem od 1 mm, prema [slici 3.4](#). Nakon pozicioniranja na alatu, ivice su isečene uređajem za sečenje vodenim mlazom.

Konfiguracija više-prolaznog zavarivanja, prikazana na [slici 3.4.](#), je izabrana kao najoptimalniji odnos broj prolaza i unosa toplote. Dok je pokrivne prolaze, rastojanje

Šobe od ose sučeonog zavarenog spoja izabrana kao minimalna vrednost za dobro mešanja osnovnog i dodatnog materijala sa jedne, i minimalnog unosa toplote prema dubini osnovnog materijala sa druge strane.



**Slika 3.4.** Šematski crtež sučeonog spoja i položaj prolaza u procesu zavarivanja.

Sa gornje i donje strane površinskog sloja isečenih ploča su skinute nečistoće u širini od 30 mm, [slika 3.5. a](#)). Na krajevima pancirnih ploča su priheftani nastavci dužine od 100 mm, [slika 3.5. b](#)), dok su keramičke podloške dodate sa donje strane, radi dobijanja adekvatnog provara.



**Slika 3.5. a)** Priprema površine oko ivice ploče.

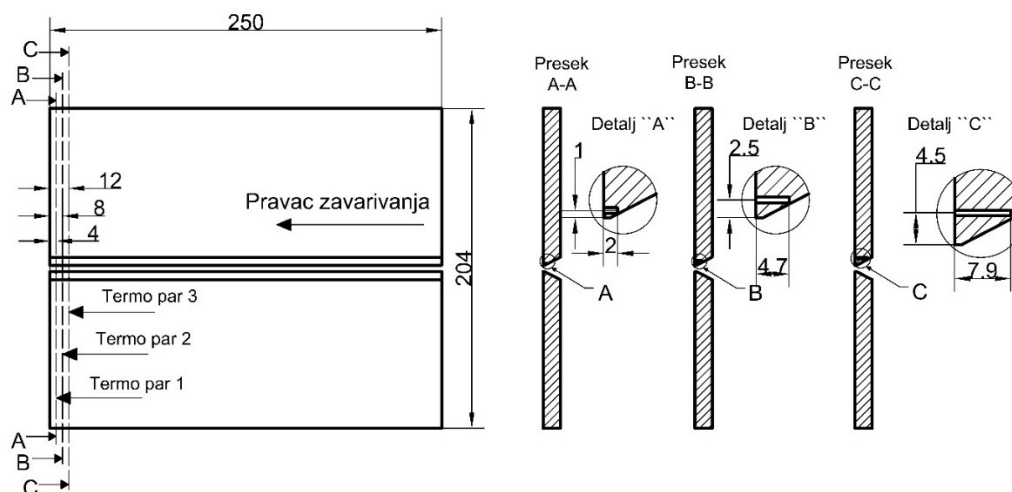
**Slika 3.5. b)** Dodati nastavci od 100 mm na kraju ploče za zavarivanje.

Proces zavarivanja je urađen u dve vrste transfera. Prvi prolaz, koren, je urađen u transferu kratkog spoja, [\[99\]](#). Za ovaj transfer su korišćeni niži parametri napona, brzine zavarivanja i brzine žice. Prolazi popune i pokrivni prolazi su urađeni u sprej transferu. U ovom transferu su korišćene visoke vrednosti: napona, velika brzina žice, kao i visoka brzina zavarivanja. Parametri zavarivanja su prikazani u [tabeli 3.3](#).

**Tabela 3.3.** Parametri zavarivanja za pancirni čelik Protac 500.

Prolaz	Struja	Napon	Brzina zavarivanja	Brzina žice	Zaštitni gas,	Protok
	[A]	[V]	[m/min]	[m/min]		l/min
1	175	16,9	0,16	7,4	Cronigon 2	10
2	215	25,5	0,15	12,9	Cronigon 2	12
3	215	25,5	0,29	12,9	Cronigon 2	12
4	215	25,5	0,29	12,9	Cronigon 2	12

Brzina hlađenja je merena u svakom od prolaza sa ciljem dobijanja promene temperature u vremenu. Ploče su predgrevane nekoliko stepeni iznad 150 °C u peći radi postizanja ravnomernog zagrevanja. Termoparovi Cr-Ni-Cr žice su korišćene za praćenje temperature predgrevanja i brzine hlađenja. Pozicija termoparova je prikazana na slici 3.6. Temperaturna promene za prolaz korena je merena sa termoparom 1, koji je postavljen 4 mm od kraja i 1 mm od donje ivice ploče. Termopar 2 je postavljen na 8 mm od kraja i 2,5 mm od donje ivice, da bi se merila brzina hlađenja za drugi prolaz, prolaz popune. Brzina hlađenja za levi pokrivni prolaz je merena termoparom 3, koji je postavljen 16 mm od kraja i 4,5 mm od donje ivice ploče. Rupe za termoparove su izbušene elektroerozivnom obradom. Alat u obliku žice prečnika 0,5 mm je korišćen za skidanje materijala na dubine 2 mm, 4,7 mm i 7,9 mm, prikazane na slici 3.6.

**Slika 3.6.** Šematski prikaz dimenzije pancirne ploče Protac 500 sa pozicijom ugrađenog para Cr-Ni-Cr žice.

Ploče su priheftane, na krajevima u delu dodatnih ploča. Priheftane ploče su kontra savijene, radi izjednačavanja sa termičkim deformacijama i dobijanja ravnog zavarenog spoja nakon procesa zavarivanja. Priheftan par ploča je pozicioniran na

alatu za pozicioniranje [slika 3.7. a](#)). U toku pozicioniranja izvršena je kontrola tačnosti pištolja u odnosu priheftane ploče [slika 3.7. b](#)). Nakon provere tačnosti pozicioniranja ploče su umetnute u peć, radi ravnomernog predgrevanja. Predgrevane ploče su postavljene na alat za pozicioniranje, potom pričvršćene nakon čega se pristupilo izvođenju procesa zavarivanja.



**Slika 3.7. a)** Uređaj za merenje temperature.



**Slika 3.7. b)** Pozicioniranje pištolja sa prikazom postavljene keramičke podloške.

### 3.1.2.1 Oprema za MIG proces zavarivanja

#### Automatski proces zavarivanja robotom

Kada je u pitanju proces zavarivanja pancirnog čelika, upotreba robota je ključna za dobijanje: tačnih, sigurnih i ponovljivih vrednosti. Tačnost, sigurnosti i ponovljivosti eksperimenta se ogleda u mogućnosti menjanja jednog od parametra, dok ostali ostaju isti, radi dobijanja njegove najbolje vrednosti. Dovođenjem pištolja uvek na isti položaj, postižu se isti parametri zavarivanja, napon i jačina struje. Potom robot omogućuje istu brzinu zavarivanja, time postižući isti unos toplote. Pored toga robot omogućuje isti način poprečnog kretanja pištolja, i njegove amplitude, time i željeno mešanje osnovnog i dodatnog materijala. Zavarivanja pancirnog čelika je urađeno automatskom kontrolom procesa, koristeći uređaj Citronix MIG Robotwelder 400 A.



Automatska kontrola procesa je urađena robotom Kuka, [slika 3.8](#). Za eksperiment je urađeno programiranja sva četiri prolaza. Programiranjem se definisao: način poprečnog kretanja pištolja njihova amplituda i frekvencija, potom brzina zavarivanja, zatim parametri napon, jačina struje i brzina žice, kao i položaj pištolja.

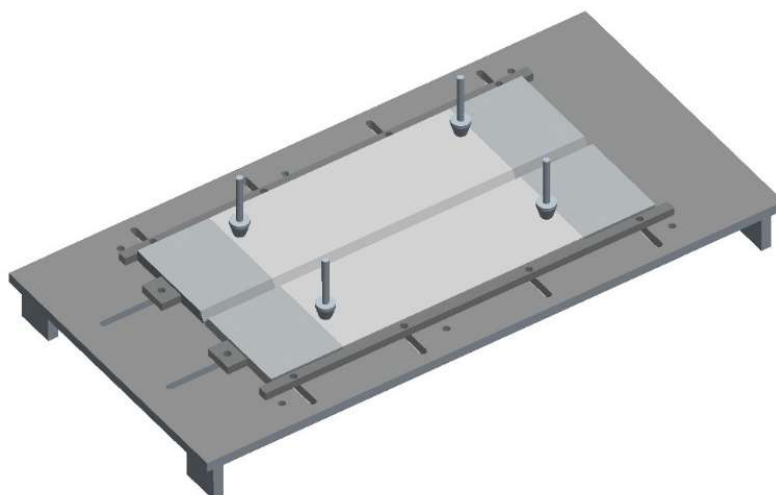


**Slika 3.8.** Robot Kuka.

Programi prolaza se razlikuju prema: brzini zavarivanja, zatim sa parametrima (napon i jačina struje), potom položaja pištolja, načina poprečnog kretanje pištolja i veličine njegovih oscilacija kao i brzini žice. Proces zavarivanja započinje aktiviranjem luka i doticanjem žice i osnovnog materijala. Dok se proces završava gašenjem luka i odmicanjem pištolja.

### **Alat za pozicioniranje**

Pancirne ploče, predmet sučeonog zavarivanja, moraju biti tačno pozicionirane u odnosu na sve tri ose,  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Za svrhu eksperimenta napravljen je specijalan alat, koji je omogućio precizno pozicioniranje pancirnih ploča, [slika 3.9](#). Alat se sastoji od horizontalne ploče na koju su postavljeni prednji i bočni graničnici kao i šapa za pritezanje. Alat za pozicioniranje i kretanje pištolja su paralelni, time se programiranim kretanjem omogućava održavanje istih parametara zavarivanja tokom procesa zavarivanja. Prednji i bočni graničnici su omogućili da ploče nakon predgrevanja budu vraćene u tačan položaj.



**Slika 3.9.** Alat i oprema za pozicioniranje pancirnih ploča.

### 3.1.2.2 Dodatni materijal

Prednosti za njenu upotrebu se ogledaju: u većoj energiji udara, zatim velikoj apsorpciji i niske difuzije vodonika prema ZUT-u, potom mogućnošću zavarivanja bez predgrevanja kao i na temperaturama od 7 °C. U ovom ispitivanju MIG proces zavarivanja je urađen austenitnom punom žicom. Prolazi korena, popune i pokrivni su urađeni sa istim prečnikom žice od 1,0 mm. Razlog izbora jednog prečnika žice za sve prolaze, je u mogućnosti zavarivanja u transferu i kratkog spoja i sprej transferu. Nakon procesa zavarivanja na reprezentativnom uzorku je izvedena spektrohemijska analiza sastava dodatnog materijala. Spektrohemijska analiza je urađena na uređaju ARL 2460, čiji su rezultati dati u [tabeli 3.4](#), dok je sertifikat o urađenoj analizi dat u dodatku 1.

**Tabela 3.4.** Hemijski sastav dodatnog materijala AWS A5.9 ER307.

<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>
0,07	0,9	7,0	0,02	<0,01	19,3	0,1	8,6	<0,1

Dodatni materijal je uzet iz lota 2014-2031004445-900001-014, čiji se rezultat od strane proizvođača dodatnog materijala za hemijski sastav i mehaničke osobine nalazi u dodatku 2. Mehaničke osobine dodatnog materijala su date u [tabeli 3.5](#).

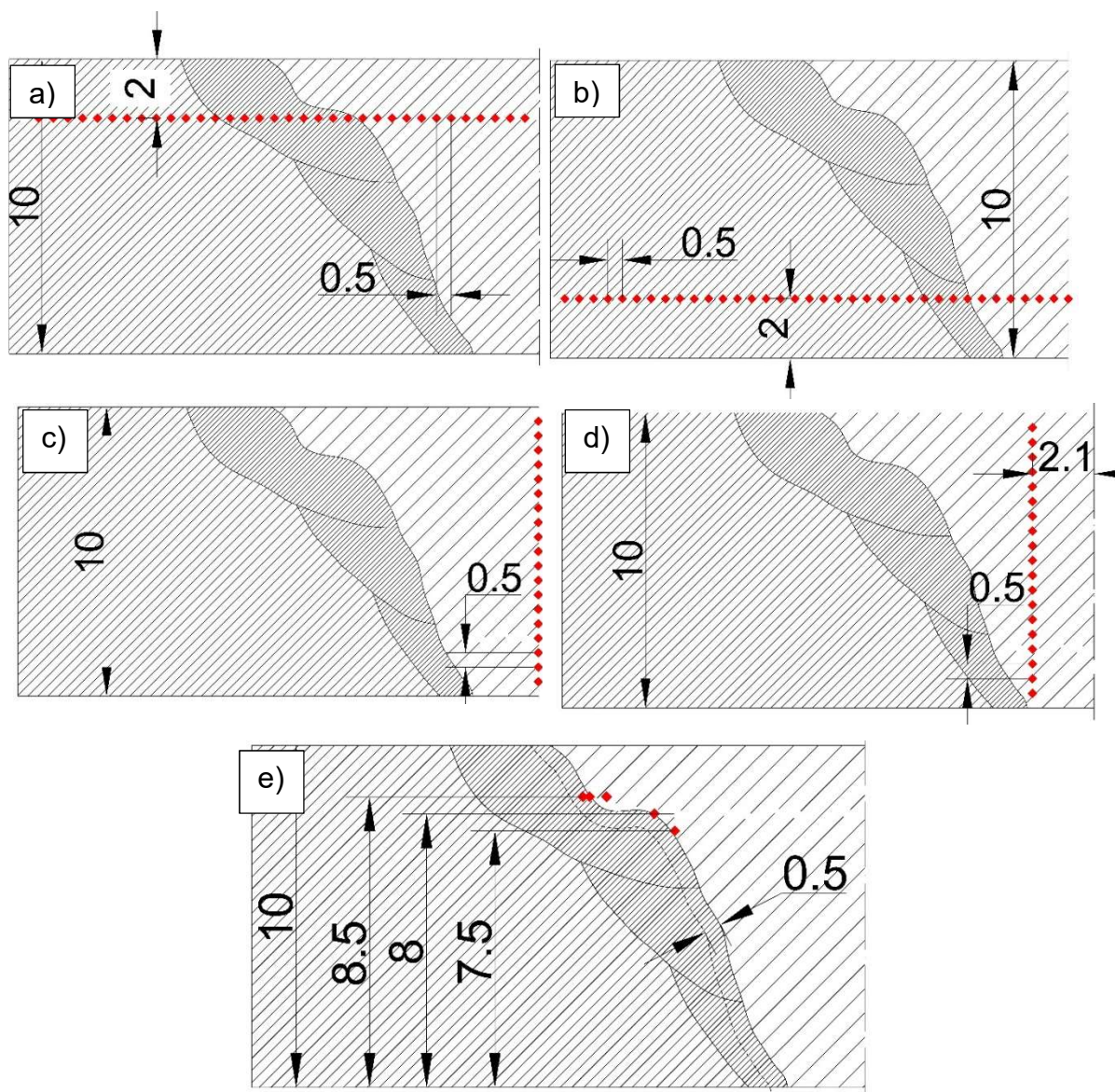
**Tabela 3.5.** Mehaničke osobine dodatnog materijala AWS A5.9 ER307 [100].

<i>Rel/Rp0.2</i> [MPa]	<i>Rm</i> [MPa]	<i>A (L<sub>0</sub>=5d)</i> [%]	<i>Energija udara</i> 20°C
>370	>600	>35	>100

## 3.2 Ispitivanje mehaničkih osobina i analiza mikrostrukture

### 3.2.1 Tvrdoća

Tvrdoća je izmerena nakon procesa manuelnog zavarivanja, cilj je bio iskontrolisati tvrdoću pre nego što se nastavi zavarivanje ostalih ploča. Uzorci su isečeni uređajem za sečenjem vodenim mlazom. Nakon čega su izbrušeni postavljajući u epoksidnu smolu. U epoksidnoj smoli su finije brušeni i nagriženi nitalom. Tvrdoća je izmerena pomoću Digital Micro Vickers Hardness Tester HVS 1000A, ZZV, proizvođača Laizhou Huayin Testing Instrument Co. Ltd. Tvrdoća je izmerena sa silom od 500 g.



**Slika 3.10.** Zavareni spoj i otisci utiskivača: a) 2 mm ispod gornje površine, b) 2 mm iznad donje površine, c) uzduž po visini u zoni metal šava, d) uzduž po visini u zoni metal šava, uz liniju stapanja i e) uz liniju stapanja na strani osnovnog materijala.



Tvrdoća je prvo izmerena 2 mm ispod gornje površine [slika 3.10. a](#)). Prvo merenje je bilo najvažnije za kompletno ispitivanje. Nakon postizanje zadovoljavajućih rezultata tvrdoće, nastavljen je proces zavarivanja na ostalim pločama. Proces zavarivanja ostalih ploča je urađen robotom. Detaljnija merenja tvrdoće su urađena nakon procesa zavarivanja svih ostalih ploča. Cilj je bio utvrđivanje detaljnijeg rasporeda tvrdoća u zavarenom spoju.

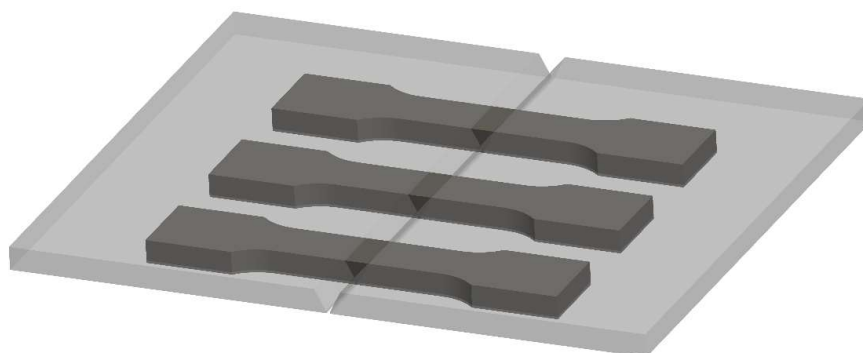
Detaljnija meranja mikro-tvrdoća u zavarenom spoju su započeta 2 mm iznad donje površine sa rastojanjem 0,5 mm [slika 3.10. b](#)). Vrednost tvrdoće je potom izmereno u zoni metal šava. Merenje tvrdoće u zoni metal šava je urađeno po debljini ploče, na sredini i uz donju ivicu prelaska iz zone metal šava u ZUT, [slika 3.10. c](#)) i [slika 3.10. d](#)).

Linija stapanja kao najkritičnija zona u zavarenom spoju pancirnog čelika je ispitana u zoni od 0,5 mm koja prati liniju stapanja, na visini od 7,5 mm, 8,0 mm i 8,5 mm, [slika 3.10. e](#)). Cilj ispitivanja jeste utvrđivanje vrednosti tvrdoće zatim i uticaj višeprolaznog unosa toplote na promenu tvrdoće sa visinom zavarenog spoja.

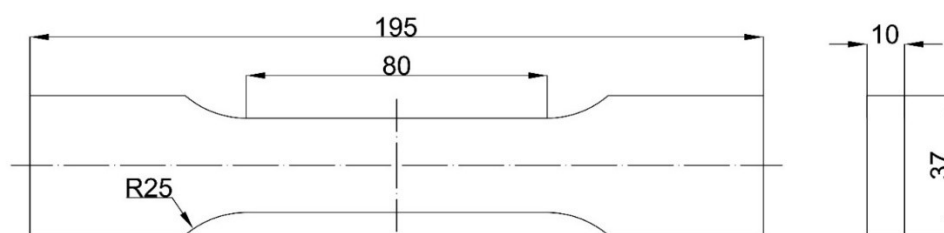
### 3.2.2 Zatezne osobine

Nakon procesa manuelnog zavarivanja, pored tvrdoće, ispitane su zatezne osobine zavarenog spoja. S obzirom na malu širinu zone metal šava i ZUT-a nije moguće ispitati pojedinačno, zatezne osobine u ovim zonama, jer je nemoguće napraviti epruvetu za ispitivanje. Standardom EN 895 je definisano opterećenja poprečno na zavareni spoj, sučeono zavareni spojevi na metalnim materijalima - ispitivanje poprečnim zatezanjem [101]. Ovim ispitivanjima se određuju napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje, kontrakcija, dijagram napon - deformacija, kao i analiza mesta i tipa loma uzorka.

Isecanje uzoraka iz zavarenog spoja je urađeno uređajem za sečenjem vodenim mlazom, [slika 3.11](#). Za ispitivanje su izrađene po tri epruvete. Sečenje je urađeno sa novom diznom uz mali posmak, sa ciljem je što finije površine. Ploče su pripremljene prema standardu EN 895. Tehnički crtež je dat na [slici 3.12](#). Ispitivanje je urađeno na uređaju Instron 8033, čiji je prečnik klipa 130 mm, sa statičkom i dinamičkom nosivosti od 500 kN i 250 kN. Ispitivanje je urađeno sa brzinom zatezanja od 0,125 mm/sek.



**Slika 3.11.** Šema uzimanja uzoraka iz zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.



**Slika 3.12.** Izgled epruvete za ispitivanje zateznih karakteristika, izrađene prema standardu EN ISO 895, [101].

### 3.2.3 Energije udara

Energija udara se određuje instrumentiranim klatnom koje omogućuje da se kriva sila-vreme snima se pomoću osciloskopa. Ugib se određuje iz zavisnosti sila-vreme. Veza između sila i vremena je proporcionalna karakteristikama ubrzanja. Koristi se kruti teg mase „ $m$ „, početne brzine udara „ $v_0$ „, i brzine „ $v$ „, tako da deformacije počinju u trenutku vremena „ $t_0$ „, pa se ugib „ $s$ „, proračunava dvostrukom numeričkom integracijom, [99].

$$s(t) = \int_{t_0}^t v(t) c \quad 3.1$$

$$v(t) = v_0 + \frac{1}{m} \cdot \int_{t_0}^t F(t) dt \quad 3.2$$

Gde su:

$s_t$  - ugib za proračun energije udara kod ispitivanja energije udara,

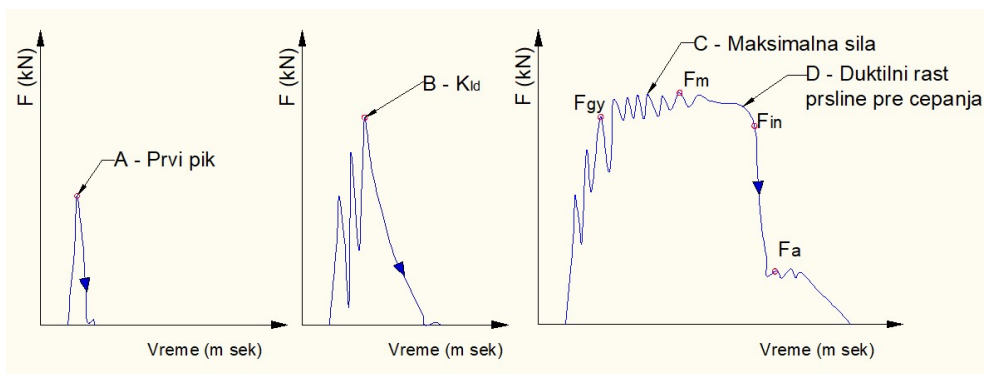
$v_t$  - brzina udara klatna u vremenu  $t$ ,

$v_0$  - početna brzina udara klatna,

$F_{(t)}$  - sila u funkciji vremena kod ispitivanja energije udara,

$t_0$  - početno vreme kada počinju deformacije kod ispitivanja energije udara,

$t$  - vreme kod ispitivanja energije udara,



**Slika 3.13.** Tipična slika mogućih krivih dobijenih instrumentiranim klatnom.

Sa dobijenog dijagrama [slika 3.13.](#) mogu da se očitaju potrebni parametri:

Na dijagrama nema  $F_{gy}$  – dinamička sila napon tečenja, određuje se na mestu gde dolazi do zakrivljenja na dijagramu, odnosno na prelaznoj tački od linearnog rasta do zakrivljenog dela zavisnosti sila-deformacija (ugib). Ona služi pri prvoj aproksimaciji kao mera plastičnog popuštanja ligamenta uzorka.

$F_m$  – maksimalna sila na krivoj sila-deformacija,

$F_{in}$  – sila iniciranja prsline, određuje se kao sila na preseku glatke krive i strmo opadajućeg dela krive sila-deformacija.

Energija stvaranja prsline odgovara površini levo od maksimalne sila  $F_m$  na [slici 3.13.](#) Preostali deo površine ispod krive sila-deformacija odgovara energiji potrebnoj za širenje prsline.

Kada se strmi pad sile podudara sa maksimalnom silom, onda je  $F_m = F_{in}$ . Sila  $F_a$  se određuje kao presek strmog pada krive sila-deformacije i krive koja osciluje. Za nestabilnu prslinu koja raste  $F_a = 0$ .

U slučaju da na krivoj nema strmog pada, može se reći da je udeo duktilnog loma u prelomnoj površini 100 %. Ako se pojavljuje strmi pad sile, veličina pada u odnosu na druge karakteristične veličine sile omogućava da se približno oceni udeo duktilnog loma (%DL) na prelomnoj površini prema sledećoj formuli:

$$\%DL = \left[ 1 - \frac{F_{IN} - F_A}{F_m} \right] \cdot 100 \quad 3.3$$

Gde su:

$F_{IN}$  - sila iniciranja na krivoj sila-deformacije,

$F_A$  - koja se određuje kao presek strmog pada krive sila-deformacija i krive koja osciluje,

$F_m$  - maksimalna sila na krivoj sila-deformacija,

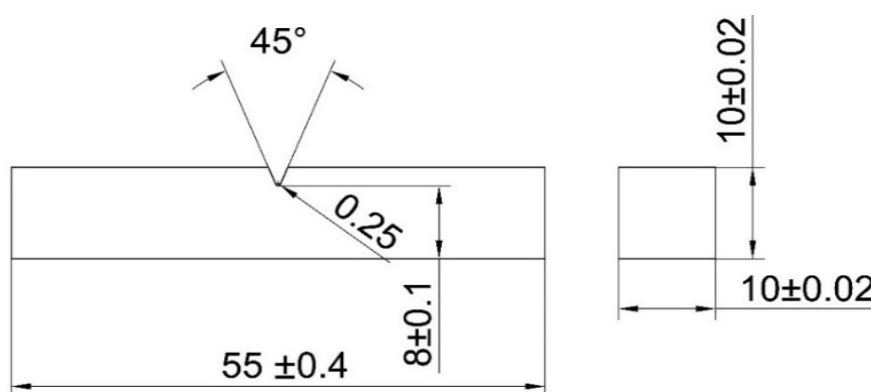
%DL - udeo duktilnog loma kod ispitivanja energije udara,

Za razliku od čvrstoće, udarna žilavost se može odrediti i za veoma usku zonu, odnosno može se odrediti i na stvarnim zavarenim spojevima. Zbog toga su uvedena standardna određivanja energije udara ZUT na uzorcima sa oštrim zarezom, čiji je koren smešten u zonu pored šava, na rastojanju od 0,5 i 1,5 mm od liniji stapanja.

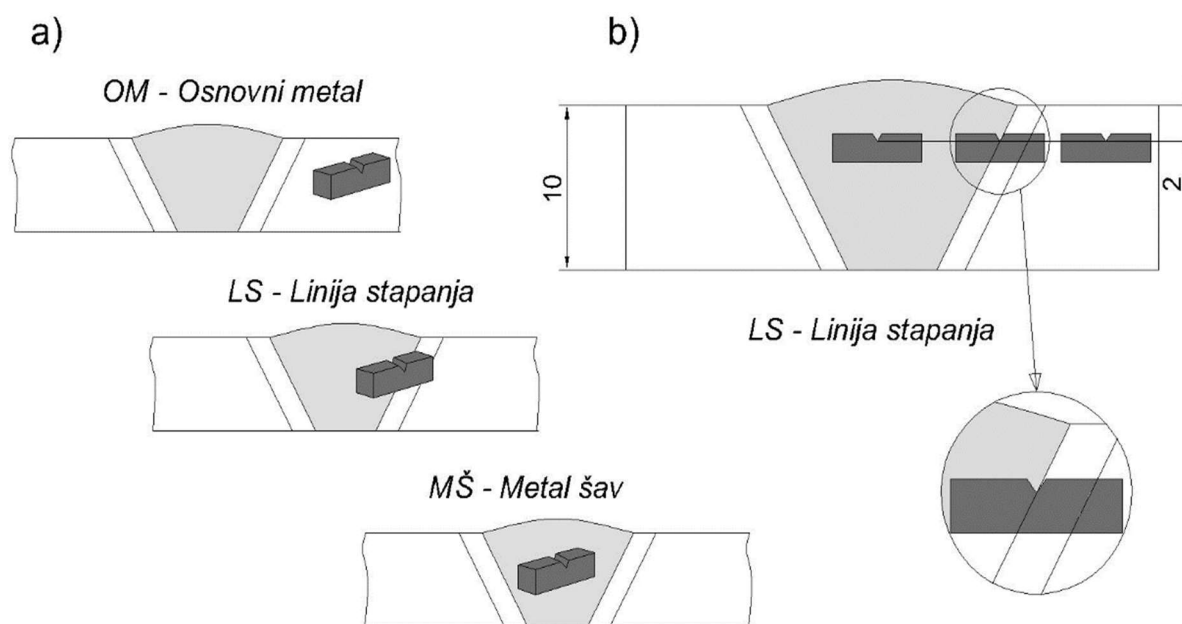
Međutim pri pravljenju uzoraka za poziciju zarez na liniji stapanja, ipak se ne može tačno odrediti u koju će zonu pasti vrh zarez. Iz tih razloga prilikom pravljenja V - zarez koristi glodalo koje ima manju tvrdoću. Prilikom ulaženja glodala u materijal ono lako skida sloj mekšeg metal šava, dok kada dođe do sloja linije stapanja usled veće tvrdoće ove zone, glodalo otežano skida slojeve dublje.

Uzorci za ispitivanje energije udara CVN su izrađeni prema standardu ISO 14556:2015. Ispitivanje je urađeno na uzorcima čije su dimenzije 10 mm (A) X 10 mm (B) X 55 (L) mm, gde su A-debljina, B-širina i L-dužina epruvete, [slika 3.14](#). V-zarez je formiran pod uglom od 45° i debljinom od 2 mm sa radijusom na vrhu od 0,25 mm. Ispitivanje energije udara sučeono zavarenog spoja je urađeno sa pozicijom zarez u osnovnom materijalu, ZUT-u i metal šavu, [slika 3.15](#).

Test je urađen na četiri različite temperature (-40 °C, -20 °C, 0 °C i 20 °C) sa ciljem dobijanja prelazne temperature krtosti. Uzorci ispitivani na temperaturama 0 °C i nižim su hlađeni tečnim azotom. Tečni azot je sipan u komoru nakon čega su epruvete postavljene. Da bi se održala termalna ravnoteža uzorci su držani na datoj temperaturi od 40 do 50 min. Temperatura je proveravana pomoću termoparova. Da bi se dobili što tačniji rezultati ispitivani su po četiri uzorka na svakoj temperaturi.



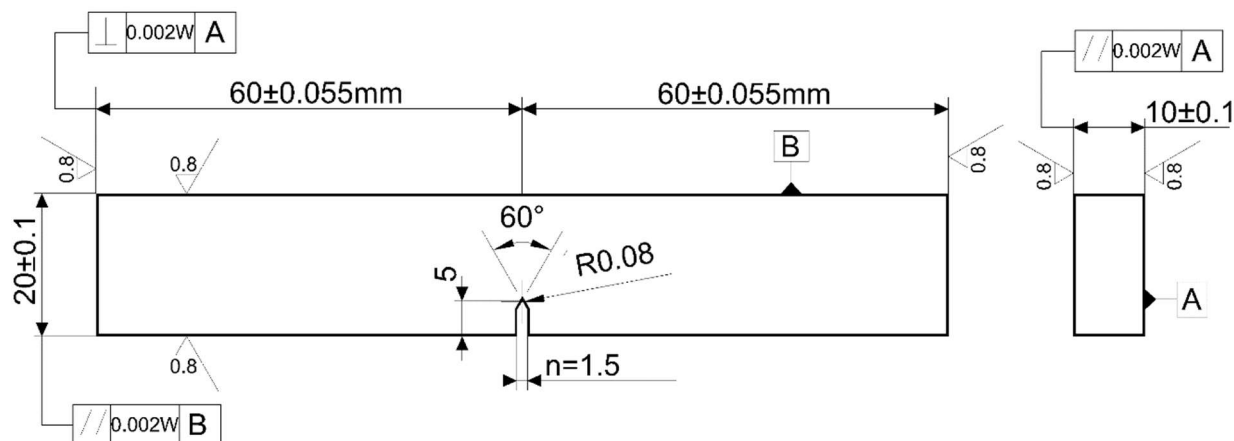
**Slika 3.14.** Epruveta sa V-zarezom za ispitivanje energije udara.



**Slika 3.15.** Šema pozicije zareza, MŠ-metal šav, LS-linija stapanja i OM-osnovni materijal.

### 3.3 Ispitivanje mehanike loma zavarenih spojeva

Dijagrami mehanike loma osnovnog materijala su dobijeni primenom linearno elastične mehanike loma - LEML dok su dijagrami metala šava i ZUT-a dobijeni primenom elasto plastične mehanike loma - EPML. Epruvete tipa SEN (B), [slika 3.16](#). debljine 11 mm, širine 120 mm i dužine 20 mm, su isečene iz zavarenog spoja, uređajem Water-jet. Mašinski stvorena prslina je napravljena u osnovnom materijalu, ZUT-u i metal šavu. Profilno točilo sa velikom brzinom obrtanja je korišćeno za stvaranje mašinski zarezane prsline. Nakon mašinski stvorene prsline, epruveta je obrađena na konačne dimenzije nakon čega je i obrušena na finalne mere, [slika 3.16](#). Epruvete su zatim zamorene, visokofrekventnim pulzatorom, prikazanim na [slici 3.17](#). Tokom stvaranja inicijalne prsline konstatno je praćena njena dužina tehnikom popustljivosti [102]. Zamorne prsline su u proseku dužine  $\approx 5$  mm.



**Slika 3.16.** Standardna epruveta za savijanje SEN (B) [102].

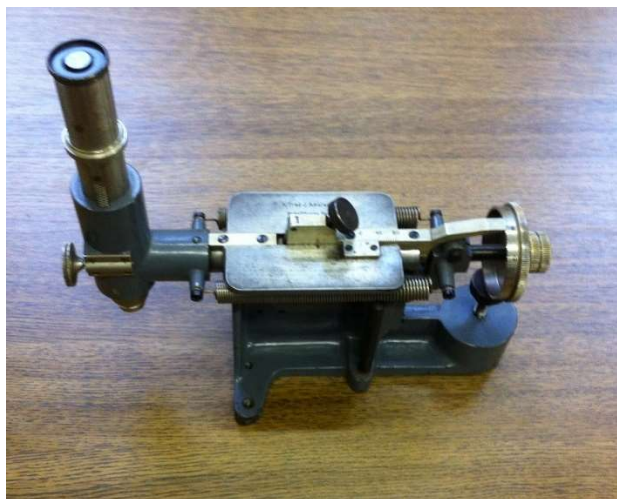
Za ova ispitivanja zamorna prslina je dobijena sinusoidalnim promenjivim opterećenjem u opsegu - 70 Nm do 70 Nm. Svi uzorci su zamarani pri istom odnosu opterećenja  $R=0,1$ . Srednje opterećenje i amplituda su registrovani sa tačnošću  $\pm 5$  Ncm. Ostvarena učestanost je oko 200 Hz. Moment sile je bio oko 40 Nm, a u pojedinim slučajevima i veći, jer je biran tako da zamorna prslina poraste na željenu dužinu za oko 80000 ciklusa.



**Slika 3.17.** Visokofrekvencni pulzator za stvaranje zamorne prsline.

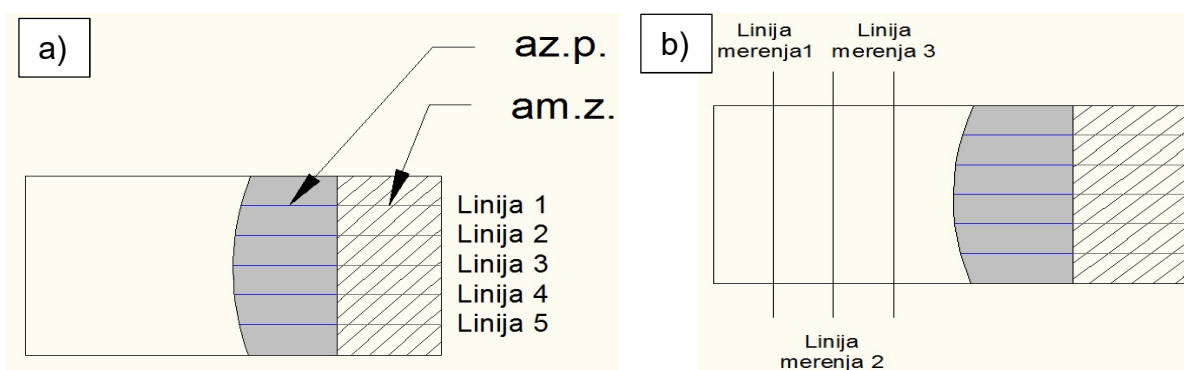
Stezni alat epruvete za savijanje u tri tačke je omogućio neznatno trenja između dodirnih površina. Merenje otvaranja vrha prsline,  $V$ , je ispitano postavljanjem ekstenzometra na čeonj površini epruvete.

Dužina mehanički i promenjivim opterećenjem stvorene prsline je izmerena optičkim uređajem prikazanim na slici 3.18.



**Slika 3.18.** Uređaj za merenje dužine prsline.

Dužina prsline je izmerena na pet mesta, sa položajima prikazanim na [slici 3.19. a\)](#), na osnovu koje je izračunata srednja vrednost dužine prsline. Širina epruvete je izmerena tri mesta prema položajima prikazanim na [slici 3.19. b\)](#).



**Slika 3.19.** Položaj merenja dužine prsline a), kao i debljine epruvete b) Napomena:  $a_{z.p.}$ - dužina prsline stvorene zamaranjem materijala,  $a_{m.z.}$ - dužina prsline stvorene mehaničkom obradom brušenjem.

### 3.3.1 Mehanike loma u osnovnom materijalu

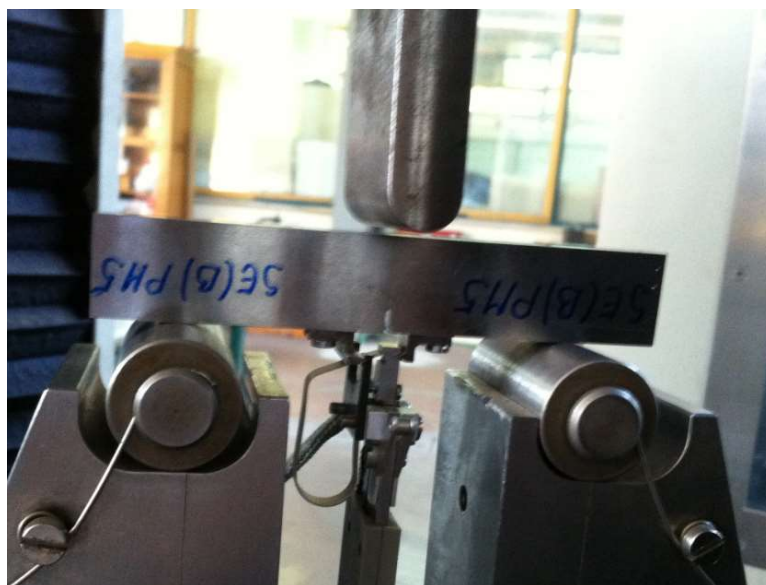
Za vreme statičkog delovanja sile preko merača je praćeno pomeranje,  $V$  u zavisnosti od intenziteta primenjene sile,  $P$ . Brzina opterećivanja epruvete je bila tolika da je brzina promene K-faktora u epruveti u granicama od 0,5 do 2,75 MPa m/s<sup>1/2</sup>. Ispitivanje je trajalo dok epruveta više nije mogla da prihvata rastuće opterećenje, odnosno kada je došlo do pada intenziteta sile.

Merenje vrednosti sila pomeranje je izmereno pomoću ekstenzometra koji je postavljen na čeonim površinama epruvete, [slika 3.20](#).

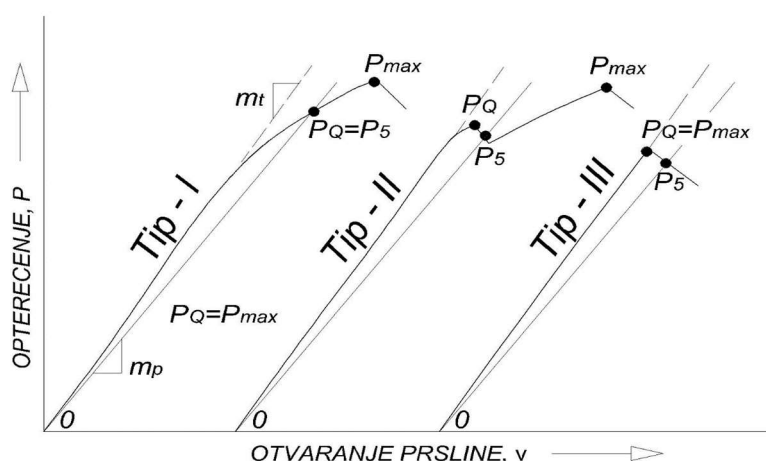


Za izračunavanje kandidovane vrednosti žilavost loma,  $K_Q$ , uzeta je sila  $P_Q$  koja je dobijena povlačenjem sečice  $OP_5$  tako da je njen nagib bio za 5 % manji od nagiba tangente  $(P/V)_5=0,95*(P/V)_0$ , tačka  $P_5$ , [slika 3.21 a](#)), ili se pre tačke  $P_5$  pojavio odskok (pop-in), [slika 3.21 b](#)), ili je jednaka najvećoj sili na  $P$ - $V$  dijagramu između tačaka  $O$  i  $P_5$ , [slika 3.21 c](#)).

Merenje vrednosti sila pomerenje je izmereno pomoću ekstenzometra koji je postavljen na čeonim površinama epruvete, [slika 3.20](#).



**Slika 3.20.** Oprema za ispitivanje mehanike loma: osloni valjci, ekstenzometar, SEN(B) epruveta i trn za savijanje.



**Slika 3.21.** Oblik zapisa zavisnosti  $P$ - $V$  sa postupkom određivanja sile  $P_Q$  merodavne za izračunavanje žilavosti loma  $K_{IC}$ .

Nakon određivanja tačne vrednosti  $P_Q$  na osnovu jednačine 3.4, odredila se vrednost  $K_Q$ -faktora kao kandidatu za  $K_{IC}$ , u zavisnosti od korišćenog tipa epruvete, [slika 3.21](#).

Na početnom delu krive  $P$ - $V$  pojavila se manja nelinearnost kao posledica malih pomeranja u steznom alatu, one se zbog toga odbacila. Kao kriterijum je uzeto i odstupanje od nelinearnosti  $V_1$  za vrednosti sile  $P_1=0,8*P_Q$ . Ovo odstupanje je manje od 25 % od odstupanja pri sili  $P_Q$ , označeno sa  $V$  odnosno  $V_1>1/V$ .

Vrednosti  $K_Q$  je usvojena kao žilavost loma pri ravnoj deformaciji  $K_{IC}$  jer je ispunjen uslov i zahtev dimenzija, odnosno vrednost  $K_Q=K_{IC}$  :

$$a; B; \frac{W}{2} \geq 2.5 * \left( \frac{K_Q}{\sigma_T} \right)^2 \quad 3.4$$

Gde su:

$a$  – dužina prsline,

$B$  – debljina epruvete,

$W$  – širina epruvete,

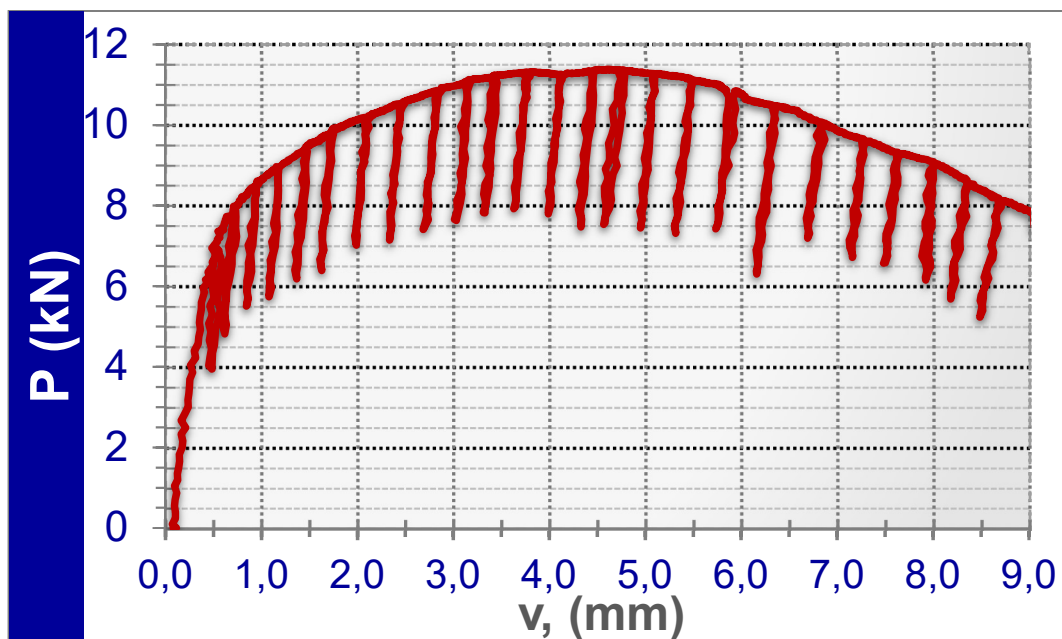
$K_Q$  – kandidovani faktor intenziteta napona,

$\sigma_T$  - napon tečenja.

### 3.3.2 Mehanika loma u metal šavu i ZUT-u

Eksperiment mehanike loma je urađen metodom jedne epruvete prema standardu ASTM E1820-16 [102]. Dok se dužina prsline utvrđivala u određenim intervalima, [slika 3.22](#).

Za praćenje prsline korišćena je tehnika pada potencijala i popustljivosti epruvete. Pri ispitivanjima meren je i hod klipa. Tokom procesa zatezanja epruveta se delimično rasteretila a zatim ponovo opteretila [slika 3.22](#).



**Slika 3.22.** Tipični izgled krive sila-pomeranje  $P$ - $V$  sa povremenim rasterećenjima za primenu metode popustljivosti.

Na bazi nagiba prave koja definiše popustljivost epruvete  $C_i=(\Delta V/\Delta P)$ , (popustljivost se povećava i nagib prave rasterećenja se smanjuje kako prslina napreduje), dok se na osnovu izraza za kalibraciju  $a_i=f(C_i)$  odredila dužina prsline. Istorija opterećenja  $J_R$  kriva otpornosti u trenutku rasterećenja  $i$ , *J-integral* se izračunava na osnovu izraza:

$$J_i = \frac{K_{(i)}^2 (1 - \nu^2)}{E} + J_{pl(i)} \quad 3.5$$

Gde su:

$E$  – modul elastičnosti,

$K_i$  – faktor intenziteta napona,

$\nu$  – poasonov koeficijent,

$J_{pl}$  – plastična komponenta J-integrala,

faktor intenziteta napona  $K_i$  je određen izrazom

$$K_{(i)} = \left[ \frac{P_i}{(B B_N W)^{1/2}} \right] \frac{2 + \frac{a_i}{W}}{\left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \cdot f_1 \left( \frac{a_i}{W} \right) \quad 3.6$$

Dužina prsline je data izrazom

$$f_i \left( \frac{a_i}{W} \right) = \left[ 0.886 + 4.64 \left( \frac{a_i}{W} \right) - 13.324.64 \left( \frac{a_i}{W} \right)^2 + 14.724.64 \left( \frac{a_i}{W} \right)^3 - 5.64.64 \left( \frac{a_i}{W} \right)^4 \right] \quad 3.7$$

plastična komponenta *J-integrala* je definisana izrazom:

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i-1)} + \left( \frac{\eta_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \left[ 1 - \frac{\gamma_{i-1}}{b_{i-1}} (a_i - a_{i-1}) \right] \quad 3.8$$

Gde su:  $J_{pl(i)}$  – integral (parametar mehanike loma) plastična komponenta,

$B_N$  – neto debljina epruvete,

$A_{pl(i)}$  – površina ispod  $P$ - $V$  krive nakon  $i$ -tog ciklusa,

$A_{pl(i-1)}$  – površina ispod  $P$ - $V$  krive nakon  $i-1$  ciklusa,

$a_i$  – dužina prsline u  $i$ -tom ciklusu opterećenja,

$a_{i-1}$  – dužina prsline u  $i-1$ -tom ciklusu opterećenja,

Vrednosti  $f(a_0/W)$  u izrazu za sračunavanje  $K_{(i)}$  kao i elastične popustljivosti epruvete  $C_i=(\Delta V/\Delta P)$  koja je potrebna da bi se sračunala površina  $A_{pl(i)}$ , kao mera energije utrošene na plastičnu deformaciju, su definisane standardom ASTM E 813 [103].

Vrednosti  $A_{pl(i)}-A_{pl(i-1)}$  su se odredili na osnovu izraza:

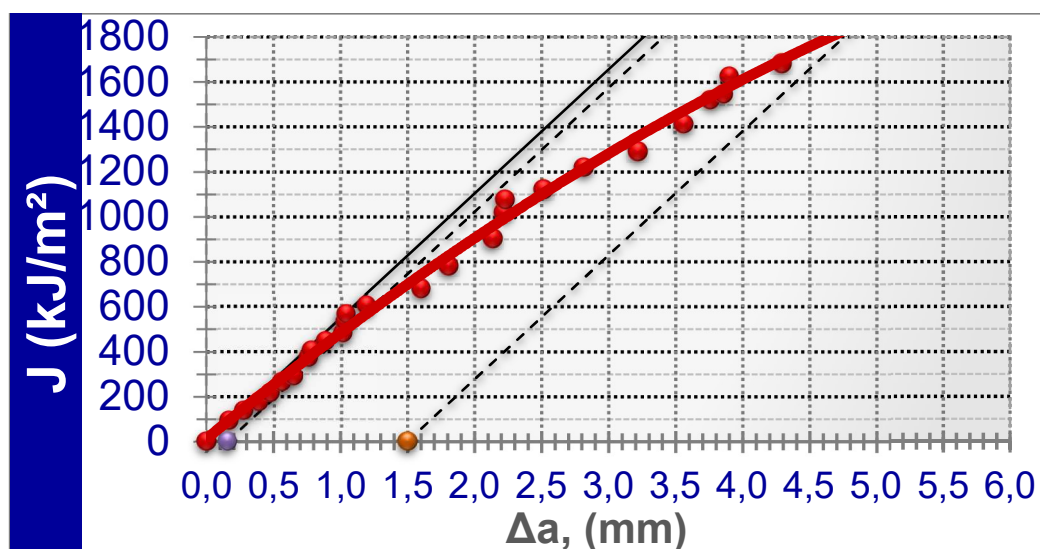
$$A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)} = \frac{(P_i + P_{i-1}) \cdot (V_{i(pl)} - V_{i-1(pl)})}{2} \quad 3.9$$

Na osnovu podataka  $(J_i; a_i)$  za seriju epruveta može se zavisnost  $J=J(\Delta a_i)$  odnosno kriva optornosti  $J_R$  prikazati u obliku stepene funkcije  $J=C_2(\Delta a)C_1$ , [slika 3.23](#).

Koeficijenti  $C_1$  i  $C_2$  se određuju regresionom metodom najmanjih kvadrata, pri čemu se uzimaju samo oni podaci koji se nalaze unutar linija odbacivanja koje su paralelne sa pravom zatupljivanja a povučene za dužine prslina  $\Delta a=0,15$  mm i  $\Delta a=1,5$  mm [slika 3.23](#). Linija zatupljivanja na pomenutoj slici opisuje proces koji neposredno prethodi iniciranju i stabilnom rastu prslina duktilnim čupanjem u kome prslina prividno raste zbog zaobljavanja njenog vrha i definisana je izrazom:

$$J=2\sigma_Y \Delta a \quad 3.10$$

gde je  $\sigma_Y$  napon ojačavanja i izračunat je na osnovu izraza  $\sigma_Y = \frac{\sigma_T + \sigma_M}{2}$



**Slika 3.23.** Šematski prikaz postupka definisanja  $J_R$  krive otpornosti.

granična linija 0,15 mm obezbeđuje da je  $\Delta a$  najmanje 0,15 mm, što omogućava preciznije merenje. Granična linija 1,5 mm obezbeđuje da je  $\Delta a$ , načelno manje od 6% preostalog ligamenta epruvete, što obezbeđuje primenjivost izraza za sračunavanje vrednosti  $J$ -integrala. Istovremeno vrednosti  $J_i$  moraju biti manje od maksimalne  $J_{max}=b_0\sigma_Y/15$  koju kapacitet epruvete dozvoljava. Zbog standard ASTM E 813 [103] koji definiše početak rasta prslina trenutak kada ona napreduje za 0,2 mm od početne dužine prslina  $a_0$ . To znači da je kandidovana vrednost  $J_Q$  za kritičnu vrednost  $J_{IC}$  definisana presekom sečice paralelne liniji zatupljivanja povučene  $\Delta a=0,2$  mm i

eksponencijalne  $J_R$  krive  $J=C_2(\Delta a)C_1$ . Da bi  $J_Q$  važiilo kao  $J_{IC}$  mora se ispuniti uslov da je:

$$B; b_0 > 25 * \frac{J_Q}{\sigma_Y} \quad 3.11$$

Gde su:

$B$  – debljina epruvete,

$b_0$  – ligament ( $W-a_i$ )

$J_Q$  - kandidovana vrednost  $J$  –integrala,

$\sigma_Y$  - napon tečenja,

$K_{IC}$  se zbog uslova RSD odredio na osnovu izraza

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{J_C E}{1 - \nu^2}} \quad 3.12$$

gde je  $J_C$  - kritična vrednost  $J$  –integrala, definisana u bilizini iniciranja duktilnog rasta prsline. Kada se epruvete ponašaju na pretežno elastičan način, mogu se odrediti bilo  $K_{IC}$  ili  $J_C$  ali slučaj sa  $K$  prestaje da važi sa pojavom većeg plastičnog deformisanja na vrhu prsline. Ukoliko se ispune potrebni dimenzioni zahtevi pri određivanju  $J_C$  onda se ona preko izraza može izraziti u obliku ekvivaletnog  $K_{IC}$ . Vrednost  $J_{IC}$  za početak duktilnog rasta prsline mora da zadovolji jednačinu 3.13, [104]. Takođe da bi se konverzija mogla izvršiti i u slučaju da se cepanje pri  $J_C$  kome ne prethodi stabilan rast prsline odvijao pod kontrolom  $J$ -integrala mora se zadovoljiti uslov da je

$$B, b_0 \geq \frac{M \cdot J_C}{\sigma_Y} \quad 3.13$$

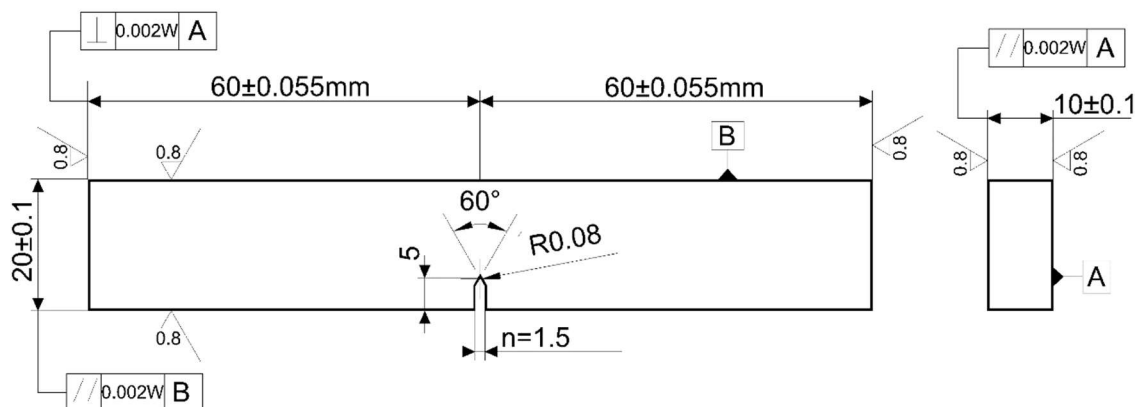
Nakon potpuno završenog ispitivanja, veličina i oblik zamorne prsline se mogu relativno lako utvrditi. Površina zamornog preloma i one dobijene statičkim dejstvom sile tokom ispitivanja imaju različitu topografiju, a time i različito odbijanja svetlosti. To omogućava jasno razdvajanje ove dve oblasti.

## 3.4 Brzina rasta zamorne prsline

### 3.4.2 Eksperimentalna tehnika

#### 3.4.2.1 Epruveta

Oblik SEN (B) epruvete je korišćen za ispitivanje brzine rasta zamorne prsline. Oblik epruvete je dat na slici 3.24.

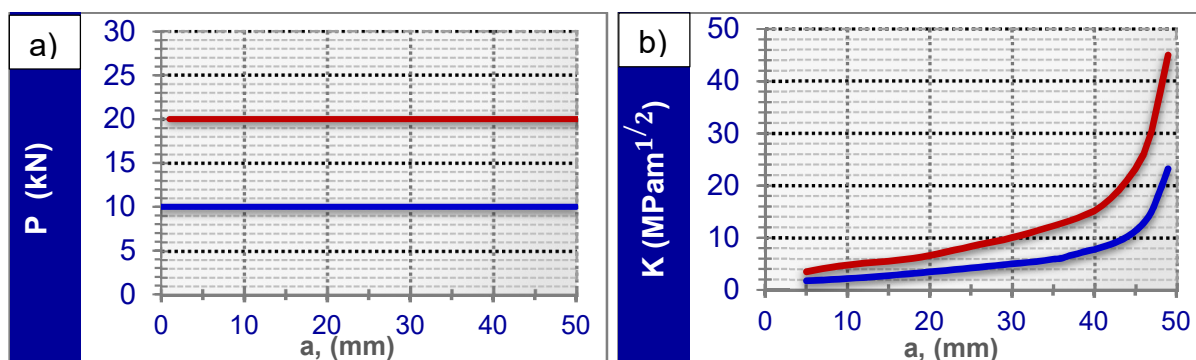


**Slika 3.24.** Standardna epruveta za savijanje SEN (B) [104].

### 3.4.2.2 Tip eksperimenta

Standard ASTM E647 [104] propisuje merenje brzine rasta zamorne prsline  $da/dN$ , koja raste iz postojeće prsline i proračun opsega faktora intenziteta napona,  $K$ . To znači da epruveta treba da ima zamornu prslinu. Dva su bitna ograničenja u standardu [104]: brzina rasta mora da je veća od  $10^{-8}$  m/ciklus da bi se izbeglo područje praga faktora koncentracije napona,  $K_{th}$ , dok opterećenje treba da bude konstantne amplitude.

Brzina rasta zamorne prsline je ispitana u: osnovnom materijalu, metal šavu u ZUT-u. Postupak izrade i stvaranje inicijalne prsline je isti kao za ispitivanje mehanike loma i on je opisan u poglavlju 3.25. U radu je korišćeno ispitivanje sa konstatnom amplitudom opterećenja tokom rasta prsline i rastućim opsegom  $\Delta K$ , *slika 3.25. a) i b).*



**Slika 3.25.** Istorija opterećenja i prateći oblici pojasa plastično deformisanog materijala: a) i b) rastuće  $\Delta K$  koje se ostvaruje kontrolom opterećenja  $\Delta P = \text{const}$ .

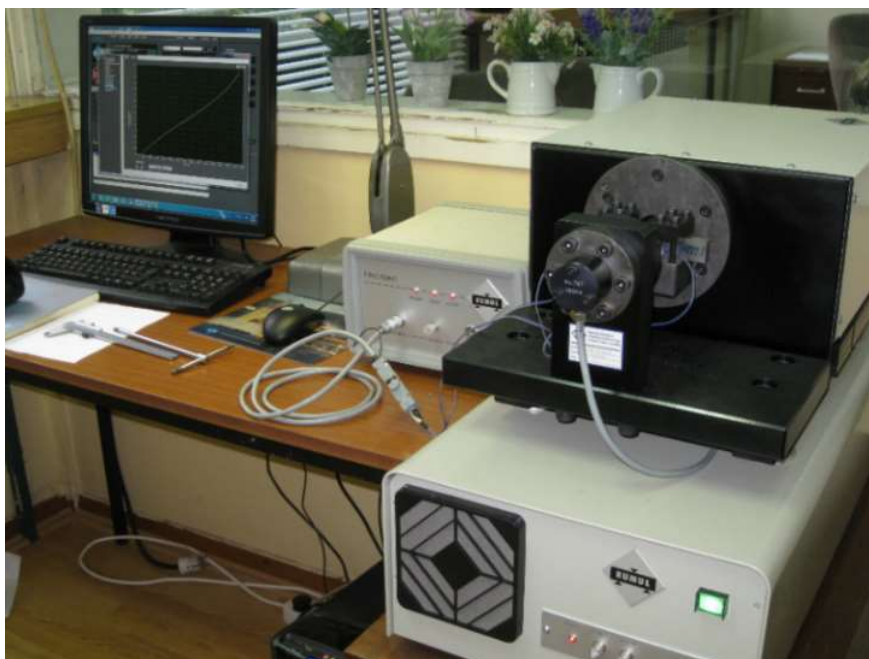


Ispitivanje sa rastućim  $\Delta K$  je imalo za cilj određivanje brzine rasta prsline veće od  $10^{-8}$  m/ciklusu. Dok je ispitivanje sa opadajućim  $\Delta K$  služilo za određivanje brzine rasta prsline u blizini praga faktora intenziteta napona  $\Delta K_{th}$ .

### 3.4.2.3 Postupak ispitivanja

Uređaj za ispitivanja, visokofrekventni pulzator, prikazan je na slici 3.26. Glavni delovi uređaja za ispitivanja su:

- uređaj za ispitivanje zamora, visokofrekventni pulzator,
- oprema za ispitivanje pulsnog direktnog merenja, firme Rumul Russenberger Prufmaschinen AG,
- kompjuterska kontrola i program,
- uređaj za merenje dužine prsline, Fractomat.



**Slika 3.26.** Oprema za ispitivanje: uređaj za ispitivanje i merenje brzine rasta prsline i kompjuter sa kontrolom i programom za ispitivanje.

Ispitivanje brzine rasta zamorne prsline  $da/dN$  je urađeno na SEN (B) epruvetama, na visokofrekventnom pulzatoru prikazanom na slici 3.27. Za ispitivanje je korišćena metoda savijanja epruvete u tri tačke.

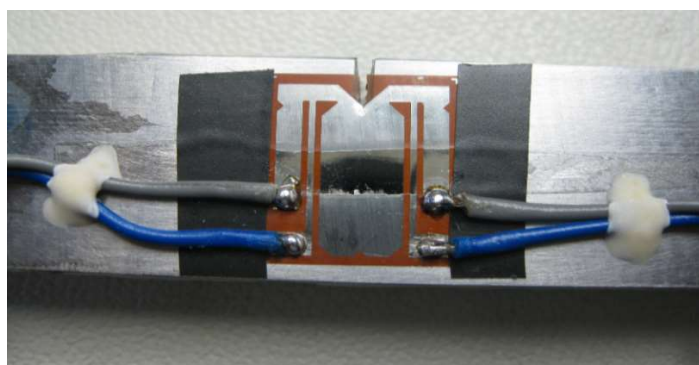




**Slika 3.27.** Visokofrekventni pulzator za stvaranje i propagaciju prsline kao i uređaj za merenje dužine prsline Fractomat.

Na pripremljenim epruvetama, prethodno mehanički zarezanim, su zalepljene merne folije sa oznakom "Rumul RMF A-10" merne dužine 10 mm. Epruveta je zatim pričvršćena na visokofrekventni pulzator dok je preko merne folije povezana sa uređajem za merenje propagacije prsline. Merna folija je zalepljena na epruvetu na isti način kao i klasične merne trake za merenje deformacije. Izgled merne folije i njena priprema na epruveti koja se ispituje prikazana je na [slici 3.28](#).

Pomoću merne folije, prikazanoj na [slici 3.28](#), praćen je rast prsline uređajem za merenje propagacije prsline Fractomat koji je baziran na promeni električnog potencijala.



**Slika 3.28.** Merenje propagacije prsline pomoću merne folije zalepljene na epruveti.

Kako zamorna prslina raste ispod merne folije, folija puca prateći vrh zamorne prsline i obezbeđuje promenu otpora folije koja varira linearno sa promenom dužine prsline.

Postupak ispitivanja je podeljen na dva dela. U prvom delu signal pada potencijala je generisan, koji meri dužinu prsline. Signal pada potencijala se šalje kontrolnom

kompjuteru, gde se ovaj signal konvertuje u dužinu prsline korišćenjem kalibraciju polinom. Sledeći deo kontroliše zamor mašine. To je sistem zatvorenog čvora koji uključuje potvrdu signala. Izlaz kontrole kompjutera, komanda izvršenja signala, je potvrda u ulazu kontrole kompjutera. Skoro svi testovi, osim testa konstantne amplitude, su kontrolisani dužinom prsline. Ovo znači da dužina prsline odlučuje o vrednostima opterećenja [99].

Zbog ove zavisnosti, tabela sa opterećenjima se mora napraviti pre startovanja eksperimenta. Komadni signal, koji sadrži unapred definisano maksimalno opterećenje, minimalno opterećenje i frekvenciju, je poslat od strane kompjutera na mašinu za zamaranje. Mašina za zamaranje nosi zadatak i vraća odgovor signalom kontrolnom kompjuteru. Nakon toga kontrola kompjutera kontroliše ovaj odgovor, sa vrednostima pronađenih u skladištenoj tabeli. Ako postoji nepoklapanje između struje odgovora i željene kombinacije u tabeli opterećenja, komadni signal se prilagođava pravcu prema vrednosti u kontrolnoj tabeli. Kontrola kompjuterom ne samo da osigurava ispravnu implementaciju tabele opterećenja, nego i skladišti sve relevantne podatke. Ovaj kružni proces se ponavlja sve do kraja ispitivanja.

Sva ispitivanja brzina rasta prsline su urađena na sobnoj temperature u sredini okolne atmosfere.

### 3.4.3 Proračun

#### 3.4.3.1 Faktor intenziteta napona i plastična zona

Faktor intenziteta napona  $\Delta K$  određuje amplitude lokalnog opterećenja oko vrha prsline. Ovi faktori zavisi od opterećenja, veličine prsline, oblika prsline i geometrije. Određivanje zavisnosti brzine rasta prsline po ciklusu  $da/dN$  i opsega faktora intenziteta napona  $\Delta K$  se svodi na određivanje koefficijenta "C" i "n" u jednačini Parisa [105]. Brzina rasta prsline treba, za trenutnu dužinu prsline -  $a$ , pripisati opseg faktora intenziteta napona  $\Delta K$ , i od opsega opterećenja,  $\Delta P = P_g - P_d$ .

Za određivanje opsega faktora intenziteta napona koristi se formula:

$$\Delta K = \frac{\Delta P \cdot L}{B \cdot \sqrt{W^3}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad 3.14$$

gde su:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \cdot \sqrt{\frac{a}{W}}}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left[ 1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left( 2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2 \right) \right] \quad 3.15$$

$\int \left(\frac{a}{W}\right)$ - trenutna dužina prsline,  $\Delta P$ - trenutno opterećenje,  $L$ -raspon oslonaca, mm;  $B$ - debljina epruvete, mm;  $W$  – širina eruvete, mm;  $a$  – dužina prsline. Na osnovu toka ispitivanja izračunavaju se i crtaju zavisnosti  $\log da/dN = \log (\Delta K)$ .

Za vreme ciklusa opterećenja materijal pokazuje plastično deformisanje na vrhu prsline [106, 107] zbog napona tečenja koji je dostigao ili prešao svoju vrednost u tom regionu, kao rezultat razvija se plastična. Oblik i veličina plastične zone nije tačno definisana. Plastična zona veličine  $2r_p^m$ , sa faktorom intenziteta napona  $K$ , se računa korišćenjem [108, 109]:

$$2r_p^m = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K}{\sigma_{YS}}\right)^2 \quad 3.16$$

gde je  $\sigma_{YS}$  napon tečenja. Plastična zona sa pretpostavlja kao kružna u poprečnom preseku. Nominalno zatezno opterećenje se redukuje za vreme smanjenja dela ciklusa opterećenja, dok se faktor intenziteta napona redukuje od  $K_{max}$  na  $K_{min}$ , u region plastičnosti blizu vrha prsline je pod dejstvom pritisnih opterećenja okruženih elastičnim telom. Ova pritisna opterećenja vode revidiranoj plastičnoj zoni. Ova revidirana plastična zona veličine  $2r_p^c$  zavise od veličine  $\Delta K$  i dvostruke vrednosti napona tečenja [108, 109].

$$2r_p^m = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K}{2\sigma_{YS}}\right)^2 \quad 3.17$$

### 3.4.3.2 Brzina rasta prsline

Brzina rasta zamorne prsline je određena veličinom prsline "a", kao funkcija broja ciklusa do loma -  $N$ . Standard ASTM E 647, u oblasti II, preporučuje dva načina proračun brzine rasta prsline: metodom sečice i inkrementalnim polinom. Za određivanja praga faktora intenziteta napona, oblast "I" se koristi treći metod. Sve tri metode su objašnjena u nastavku.

#### Metod sečice

Metod sečice ili tehnika od tačke do tačke, za proračun brzine rasta prsline koristi nagib prave linije koja povezuje dve susedne tačke na liniji krive  $a-N$ . Metoda sečice je opisana jednačinom 3.18:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = \frac{(a_{i+1} - a_i)}{(N_{i+1} - N_i)} \quad 3.18$$

Gde su:

$a_{i+1}$  - dužina prsline u  $i+1$  -tom ciklusu opterećenja,

$a_i$  - dužina prsline u  $i$  -tom ciklusu opterećenja,

$N_{i+1}$  - broj ciklusa  $i+1$  -tom ciklusu opterećenja,

$N_i$  - broj ciklusa  $i$  -tom ciklusu opterećenja,

Za proračun  $\Delta K$  uzima se srednja vrednost dužine prsline  $\bar{a} = \frac{1}{2} (a_{i+1} + a_i)$ . Metod od tačke do tačke, se uzima kod proračuna rastućeg odnosa  $da/dN$ .

### Metod inkrementalnog polinoma

Kriva zavisnosti  $a-N$  se koriste za određivanje brzina rasta prsline  $da/dN$ . Računski postupak se sastoji u aproksimaciji sedam uzastopnih tačaka parabolom drugog reda, počev od prve tačke zavisnosti  $a-N$ , metodom odstupanja najmanjih kvadrata:

$$a_1 = b_0 + b_1N + b_2N^2 \quad 3.19$$

Gde su:

$a_1$  - prva od sedam uzastopnih tačaka parabole drugog reda koja se koristi kod određivanja brzine rasta prsline  $da/dN$ ,

$b_0$  - početna tačka na krivoj zavisnosti  $a-N$  koja se koristi kod određivanja brzine rasta prsline  $da/dN$ ,

$b_1$  - prva tačka na krivoj zavisnosti  $a-N$  koja se koristi kod određivanja brzine rasta prsline  $da/dN$ ,

$b_2$  - druga tačka na krivoj zavisnosti  $a-N$  koja se koristi kod određivanja brzine rasta prsline  $da/dN$ ,

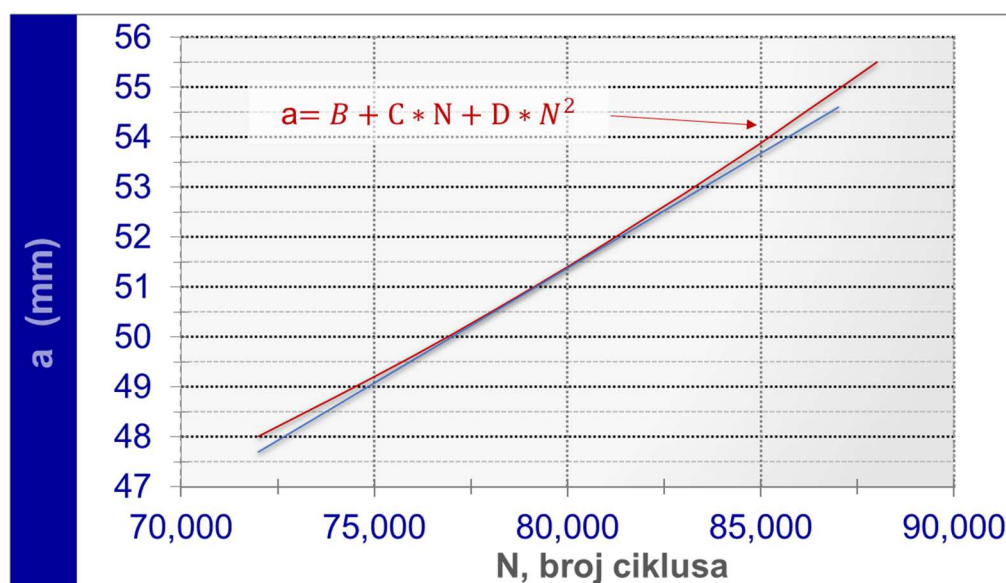
$N$  - broj ciklusa opterećenja (radni vek),

a zatim određivanjem prvog izvoda u srednjoj tački segmenta [slika 3.29](#). To znači da se stvarna kriva aproksimira nizom parabola, od kojih prva prolazi kroz tačke 1-7, druga kroz tačke 2-8, treća kroz tačke 3-9 i dalje redom. Brzina rasta prsline se određuje kao izvod u srednjoj tački (tačka 4 za prvu parabolu, 5 za drugu, 6 za treću i tako dalje):

$$\frac{da}{dN_{(a_i, N_i)}} = b_i + 2 \cdot b_2 \cdot N_i \quad 3.20$$

Na taj način se dobijaju brzine rasta prsline za prvu parabolu:

$$a_I = b_{0I} + b_{1I}N_I + b_{2I}N_I^2; \left. \frac{da_I}{dN_I} \right| = b_{1I} + b_{2I}N_{I4} \quad 3.21$$



**Slika 3.29.** Metod inkrementalnog polinoma, izbor tačaka za određivanje brzine rasta prsline.

za drugu parabola

$$a_{II} = b_{0II} + b_{1II}N_{II} + b_{2II}N_{II}^2; \left( \frac{da_{II}}{dN_{II}} \right) = b_{1II} + 2b_{2II}N_{II} \quad 3.22$$

i tako redom. Ovakva aproksimacija se može smatrati dovoljnom za izvedena ispitivanja. Da bi se sagledao uticaj odstupanja u pogledu dužine prsline i brzine njenog rasta, procenjene su ove veličine i drugim približnim postupkom, koristeći formulu:

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1}h_i^2 + a_i(h_2^2 - h_1^2) - a_{i-1}h_2^2}{h_i h_2 (h_1 + h_2)} \quad 3.23$$

gde je  $h_1 = N_i - N_{i-1}$  i  $h_2 = N_{i+1} - N_i$ . Uz pretpostavku da je  $h_1 \approx h_2$  fomula ta se svodi na

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_{i-1}}{N_{i+1} - N_{i-1}} \quad 3.24$$

što znači da se tangenta krive u tački uzima pravac sečice između dve tačke.

### Metod najmanjih kvadrata

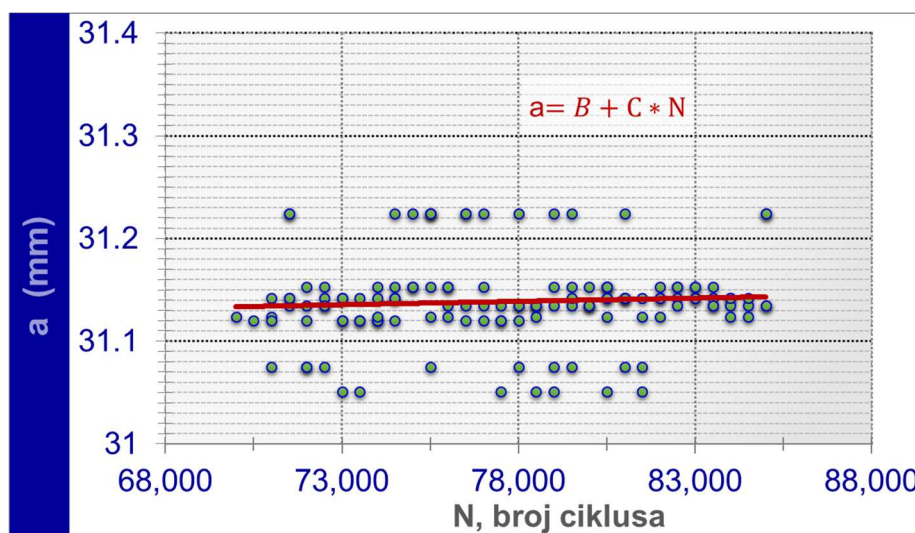
U slučaju upotrebe metode najmanjih kvadrata, za aproksimaciju, ASTM standard omogućuje korišćenje maksimalno devet tačaka. Kod testa u regionu "I", prag faktora koncentracije napona, nalazi se mnogo tačaka zbog malog priraštaja prsline. Rasipanje rezultata u ovoj oblasti će se desiti u slučaju izbora metode inkrementalnog polinoma. Kod metode najmanjih kvadrata, napredovanje prsline se smatra linearnom sa brojem ciklusa. Iz istog razloga ovaj metod se koristi za određivanje brzine rasta prsline u regionu praga faktora koncentracije napona.

Metoda najmanjih kvadrata za izabran set vrednosti se može opisati u obliku:

$$a = b_0 + b_1 \cdot N \quad 3.25$$

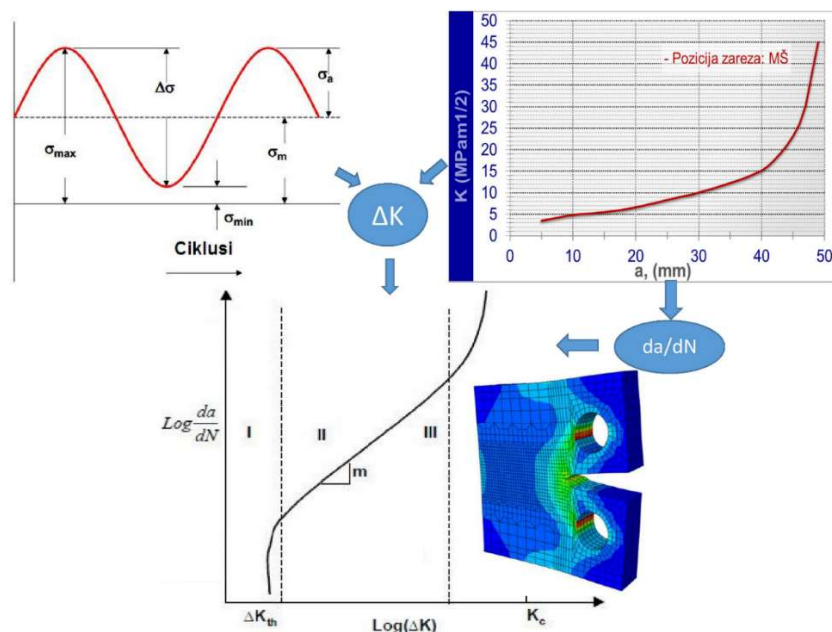
vrednosti  $b_0$  i  $b_1$  se određuju korišćenjem metodom linearnosti najmanjih kvadrata.

Brzina rasta prsline  $da/dN$  u oblasti iniciranja  $N_i$  je data u [jednačini 3.25](#). Podaci sa krive  $a-N_i$  dobijeni u regionu praga faktora koncentracije napona, se obrađuju korišćenjem metodom linearnosti najmanjih kvadrata koja je prikazana na [slici 3.30](#). Sve pomenute metode, vrednosti  $\Delta K$  su određene korišćenjem srednje vrednosti dužine prsline za izabrano područje posmatranih tačaka. [Slika 3.31](#). šematski prikazuje kako se proračunava  $da/dN-\Delta K$  u odnosu na opterećenja i dužinu prsline.



**Slika 3.30.** Propagacija prsline se smatra linearnom, za mali prirast prsline. Metod najmanjih kvadrata se koristi za određivanje brzine rasta prsline u regionu praga faktora koncentracije napona.





**Slika 3.31.** Šema proračuna  $da/dN-\Delta K$  na osnovu podataka opterećenja i dužine prsline.

### 3.4.4 Ispitivanje difraktografijom X zraka

Difrakcija X-zracima je korišćena za identifikovanje količine martenzitne transformacije formirane u toku propagacije prsline pod uticajem zamornog opterećenja. Ispitivanje je urađeno na sobnoj temperaturi X-zracima u Bragg–Brentano  $\theta:2\theta$  geometriji refleksije. Difraktogrami su snimljeni Philips X-ray difraktometrom koji se sastoji od generatora sa bakarnom cevi PW 1830, potom od goniometra PW 1820 koji je fitovan sa post-difraktovanim grafitnim monohromatom kao i od scintilacionog detektora prikačenog na PW 1710 kontroler (30 kV, 30 mA podešenost generatora,  $CuK\alpha$  radijacija).

*LaB6* je korišćen kao standard za kalibraciju pozicije pika kao i kod slučaja kada je vrh pika proširen. XRD podaci  $2\theta$  su ispitani u opsegu od  $40^\circ$  do  $60^\circ$ ,  $2\theta$  korakom od  $0.05^\circ$  i vremenom izlaganja od 2 s po koraku [110].

Odnos martenzita prema austenitu je izmeren na površini preloma. Nakon analize skinut je sloj debljine 0,05 mm, nakon čega je postupak merenja količine austenitne transformacije ponovljen. Ponavljanje postupka je nastavljeno do vrednosti austenitne transformacije u martenzit od 25 %.

Dekompozicija eksperimentalnih rezultata XRD difraktograma je urađena pseudo-Voight funkcijom na svakom difraktogramskom pik-u difrakcije dok je kod pozadinske radijacije (nekoheretnog rasipanja) korišćena linearna funkcija. Za kvantitativnu faznu



analizu, kod drugog po intenzitetu najjačeg pika kod martenzita  $\sim 45,0^\circ 2\theta$  [111] i kod austenita  $\sim 50,7^\circ 2\theta$  [112, 113], korišćena je RIR metoda [114]. Zbog velikog preklapanja pik-ova, najintenzivniji difrakcioni pikovi nisu korišćeni u  $2\theta$  oblasti od  $43^\circ$  do  $44,5^\circ$ .

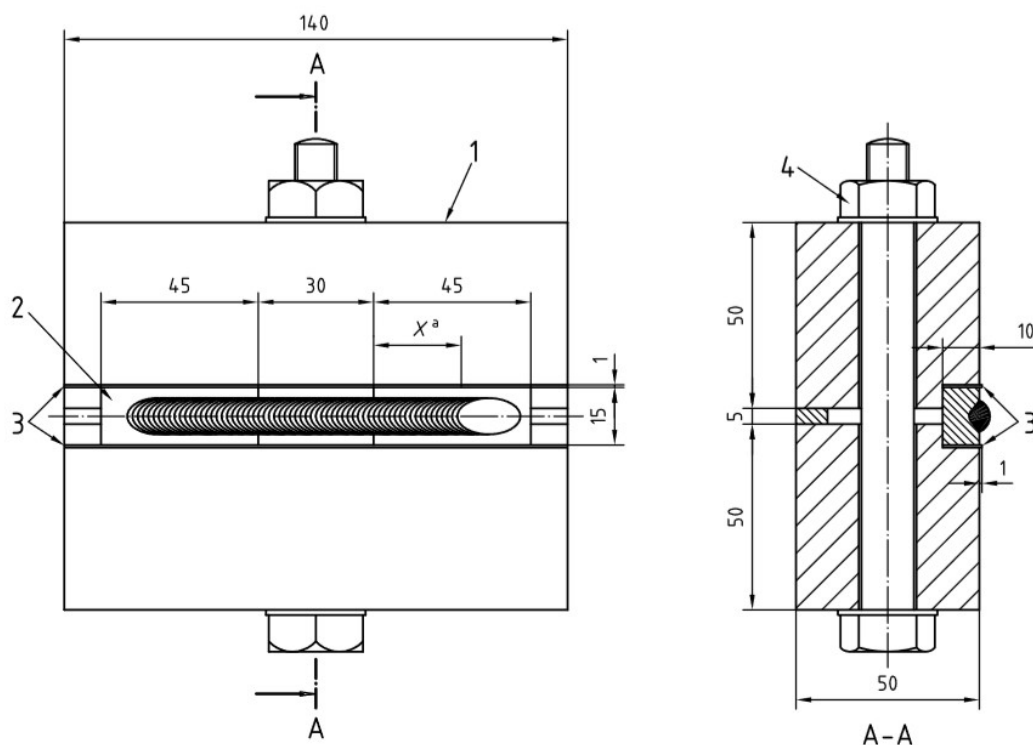
### 3.5 Određivanje količine difundovanog i zadržanog vodonika

#### 3.5.1 Uvod

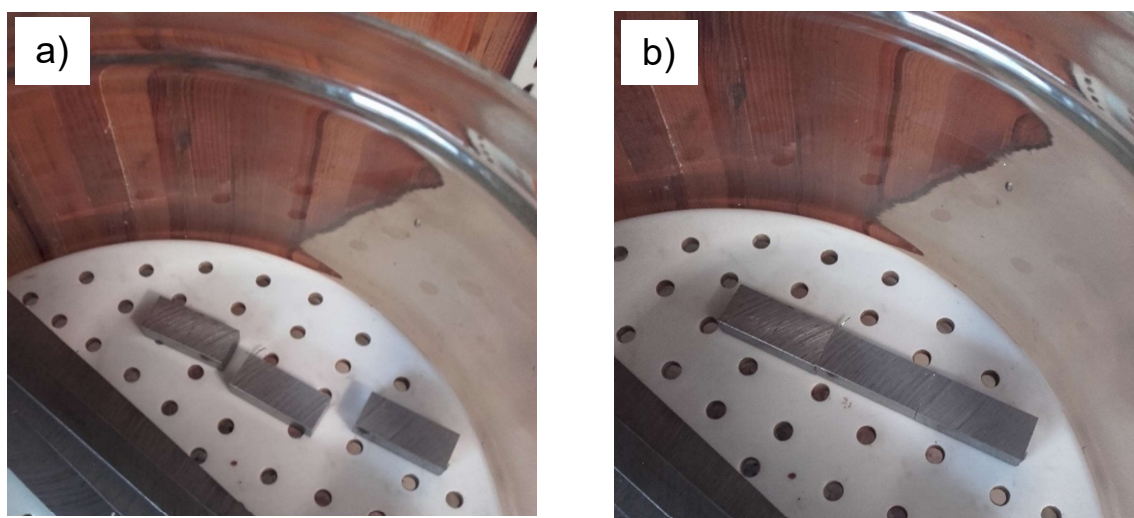
Cilj ispitivanja količine vodonika je utvrđivanje njegovog mogućeg negativnog efekta na brzinu rasta zamorne prsline, potom odabranih temperatura predgrevanja i međuprolaza na količinu difundovanog i zadržanog vodonika u oblasti metal šavu.

#### 3.5.2 Eksperimentalna tehnika kod ispitivanja količine difundovanog vodonika

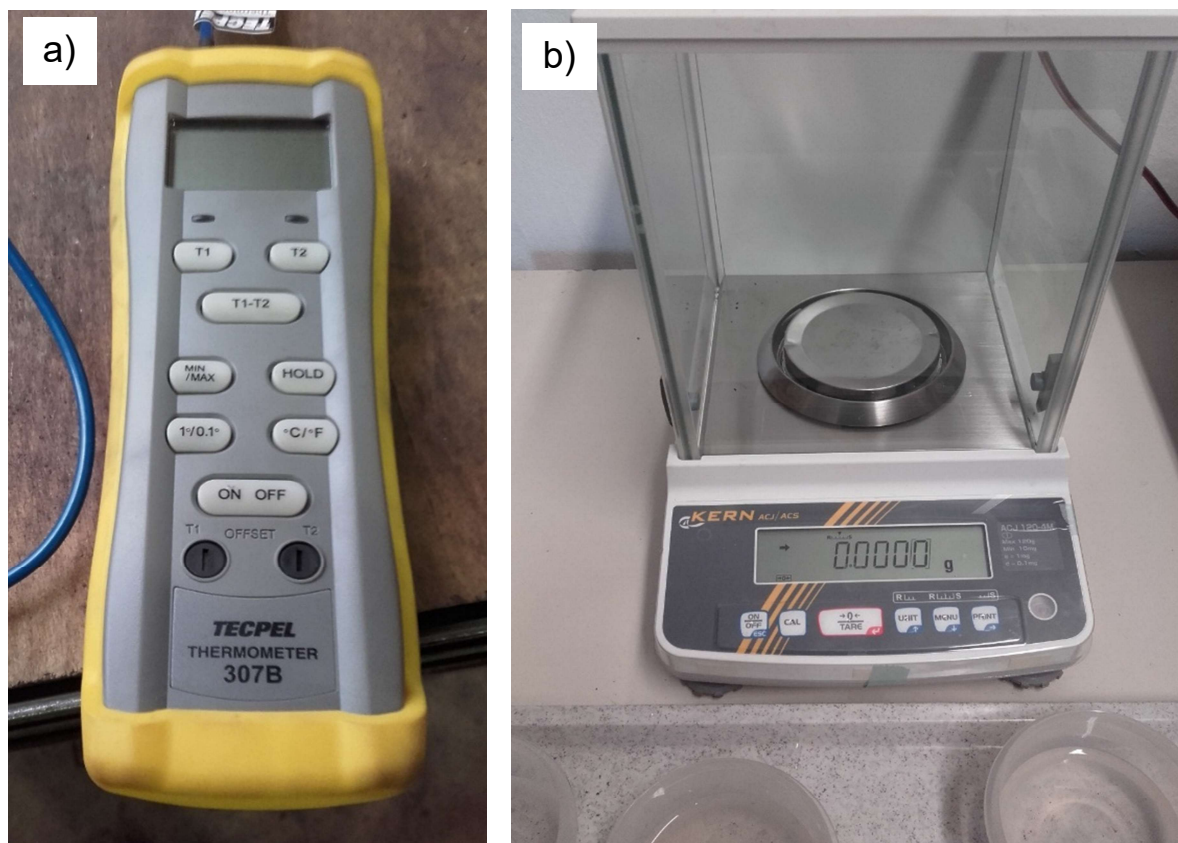
Ispitivanja započinje isecanjem ulazne, izlazne i centralne epruveta iz ploča koje su predmet ispitivanja, odnosno pancirnog čelika. Dimenzije ulazne i izlazne epruvete su  $45 \times 15 \times 10$  mm, dok je centralna epruveta dimenzije  $30 \times 15 \times 10$  mm, [slika 3.32](#). Pre procesa zavarivanja epruvete su očišćene od nečistoće i korozije. Izgled postavljanja epruveta je prikazan na [slici 3.33](#). Uzorci nisu oslobođeni gasova kao što standard zahteva, da bi se simulirali realni uslovi zavarivanja. Predgrevanje na temperature od  $150^\circ\text{C}$  i  $160^\circ\text{C}$  je urađeno u peći. Temperature predgrevanja su izmerene kontaktnim termometrom [slika 3.34. a\)](#). Nakon nanošenja dodatnog materijal, u jednom prolazu, epruvete predgrejane na  $150^\circ\text{C}$  i  $160^\circ\text{C}$  su prvo ohlađene u mešavini vode i leda a zatim su prebačene u posudu sa tečnim azotom. Ulazna i izlazna epruveta su polomljene i odvojene od centralnog dela, koji je zatim detaljno očišćen sa čeličnom žičanom četkom. Vremenski period odvajanja i čišćenja epruveta nije bio duži od 15 sekundi. Pre eksperimenta tople gasne ekstrakcije epruvetama je izmerena težina. Težina je izmerena korišćenjem uređaja sa tačnošću  $0,0001$  g, [slika 3.34. b\)](#).



**Slika 3.32.** Nanesen dodatni materijal sa ulaznom, centralnom i izlaznom epruvetom: 1- bakarni blok, 2 – spojene epruvete, 3 - bakarna folija i 4 - vijak M12 [85].



**Slika 3.33.** Epruvete postavljene u zaštitnu posudu a), epruvete spojene i pripremljene za zavarivanje, b).



Slika 3.34. Kontaktni termometar a) i uređaj za merenje težine b).

### 3.5.2.1 Snimanje parametara procesa zavarivanja u toku eksperimenta

U cilju praćenja unosa toplote u toku eksperimenta parametrima procesa zavarivanja su snimani. Odstupanje od zadatih parametara zavarivanja u toku eksperimenta za temperature pedgrevanja 150 °C i 160 °C su prikazani u dodatku 3. U toku eksperimenta parametri zavarivanja su neznatno varirali dok su srednje vrednosti prikazane su u tabeli 3.6.

Tabela 3.6. Parametri zavarivanja za temperature pedgrevanja od 150 °C i 160 °C.

Brzina zavarivanja	Brzina žice	Napon	Prečnik žice
[mm/min]	[m/min]	[V]	[mm]
160	7,3	17,8	1,0

### 3.5.2.2 Aparatura za merenje količine difundovanog vodonika

Danas se koriste tri različite metode za merenje količine vodonika, metoda žive, glicerinska kao i metoda tople gasne ekstrakcije. U pogledu tačnosti može se reći da

je glicerinska metoda najmanje tačna zatim metoda žive dok je najtačnija i danas se najviše koristi metoda tople gasne ekstrakcije. U ovom ispitivanju je korišćena metoda tople gasne ekstrakcije. Izgled aparature koji je korišćen u ovom eksperimentu je prikazan na slici 3.35. Test je urađen prema standard to EN ISO 3690 (2012) [85]. Svaki test je ponovljen tri puta.



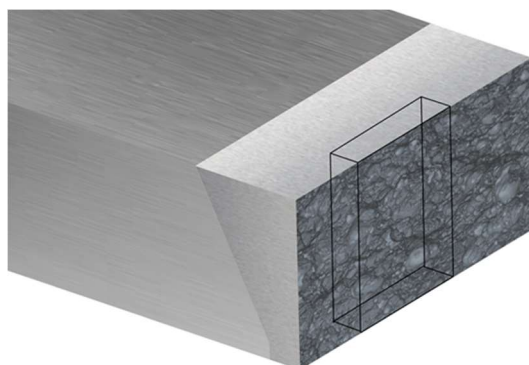
**Slika 3.35.** Uređaj za ispitivanje metodom tople gasne ekstrakcije.

Nakon merenja težine centralna epruveta je postavljena u komoru gasnog hromatografa nakon čega je zagrejana na 400 °C u atmosferi azota. Referetni gas je čist vodonik. Zaštitni gas je usisan u mernu jedinicu nakon čega je izmerena količina vodonika metodom tople gasne ekstrakcije.

### 3.5.2.3 Eksperimentalna tehnika kod ispitivanja količine zadržanog vodonika

Eksperiment količine zadržanog vodonika je urađen na zavarenim pločama koje su zavarene šest meseci ranije. Iz centralnog dela zavarenog spoja u zoni metal šava su izvađena po tri uzorka, čije su dimenzije 10 x 10 x 4 mm. Na slici 3.36., crnim pravougaonikom je prikazan položaj isecanja komada. Metal šav je izdvojen od ostatka zavareno spoja tehnološkim postupkom brušenjem. U toku brušenja komad je hlađen vodom da bi se sprečio unos toplote i mogućnost gubljenja zadržanog vodonika. Izdvojen uzorak iz zone metal šava je očišćen acetonom zatim osušen i kao takav pripremljen za ispitivanja količine zadržanog vodonika. Za merenje količine zadržanog vodonika je korišćena metoda tople gasne ekstrakcije čije je uređaj prikazan na slici 3.35. Nakon merenja težine, uređajem prikazanim na slici 3.34. b), epruveta je postavljena u komoru gasnog hromatografa nakon čega je zagrejana na

400 °C u atmosferi azota. Referentni gas je čist vodonik. Zaštitni gas je usisan u mernu jedinicu nakon čega je izmerena količina vodonika metodom tople gasne ekstrakcije.

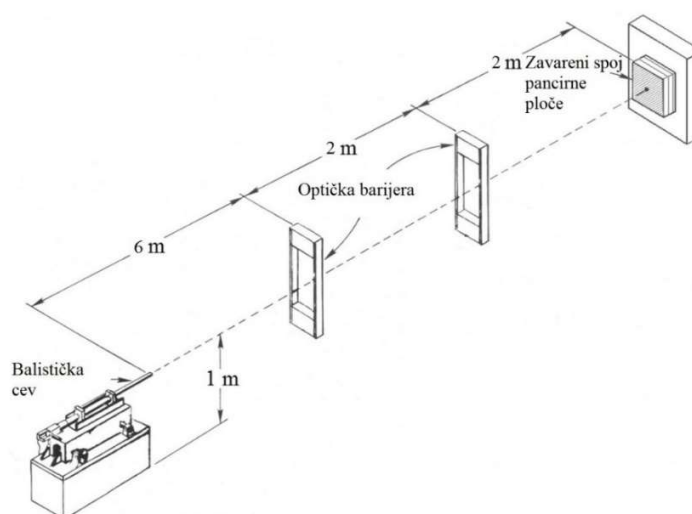


**Slika 3.36.** Položaj isecanja epruvete iz zavarenog spoja za ispitivanje količine zadržanog vodonika.

## 3.6 Eksperiment balističke otpornosti

### 3.6.1 Uvod

Ispitivanje balističke otpornosti je urađeno u skladu sa standardom VPAM APR 2007 [97]. Prema ovom standardu, oruđe se nalazi na rastojanju 10 m od mete [52]. Šema balističkog ispitivanja prikazana je na slici 3.37. Meta je postavljena na naslon, pod pravim uglom u odnosu na ravan gađanja. Brzina projektila je izmerena pre početka eksperimenta na udaljenosti 7 m od položaja usta cevi. Merenje brzine je izmereno na tri projektila dok je srednja vrednost uzeta kao reprezentativna veličina. Prihvatljiva brzina projektila za udaljenost mete od 10 m, kalibra 7,62 x 51 iznosi  $830 \pm 10$  m/s.



**Slika 3.37.** Šema balističkog ispitivanja

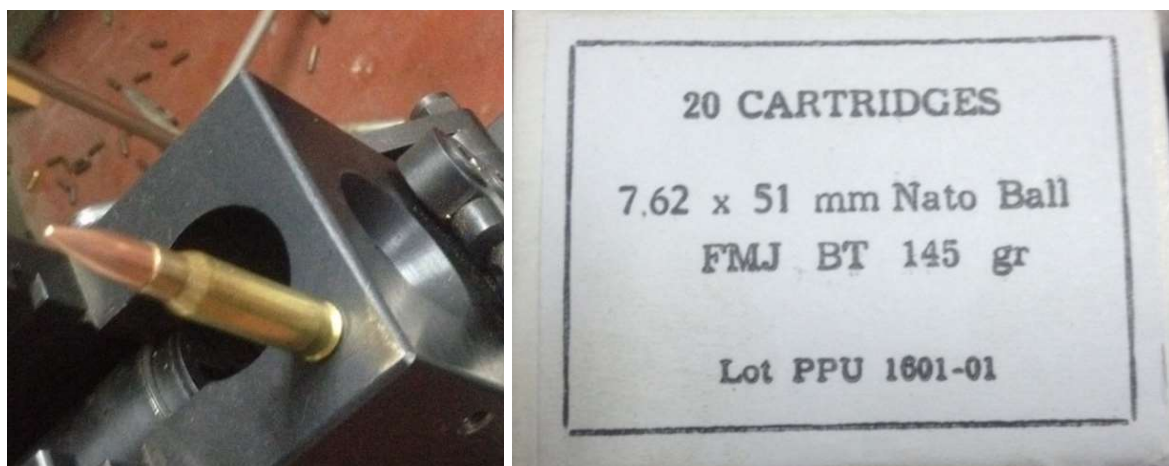


### 3.6.2 Eksperimentalna tehnika

Za eksperiment je korišćena cev za balističko ispitivanje kalibra 7,62 mm, koji ispaljuje municiju 7,62 x 51 mm (kalibar 7,62 mm, dužina čaure 51 mm). Na [slici 3.38](#). je prikazana cev za balističko ispitivanje, dok je na [slici 3.39](#). prikazana korišćena municija 7,62 x 51 mm. Brzina projektila je izmerena optičkom barijerom, [slika 3.40](#).



**Slika 3.38.** Cev za balističko ispitivanje.



**Slika 3.39.** Korišćena municija 7,62 x 51 mm.



**Slika 3.40.** *Optička barijera.*

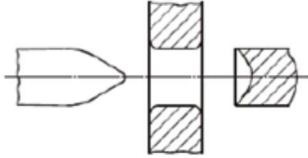
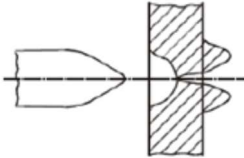
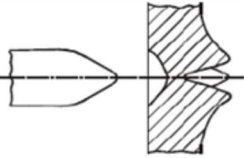
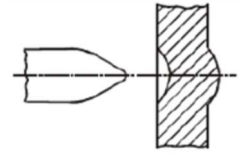
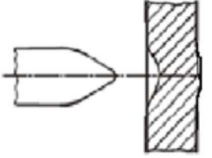
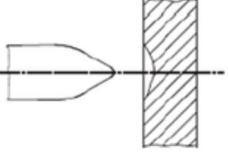
Oštećenja na zavarenom spoju su određivana opisno, prema terminologiji prikazanoj u [tabeli 3.7](#):

1. **Proboj** – projektil izvršio proboj kroz metu, pri čemu je prečnik otvora veći od prečnika probajnog jezgra
2. **Zador-izbijen čep (prodor)** – projektil izaziva odvajanje dela ispitivane ploče kružnom propagacijom prsline u obliku čepa, pri čemu je prečnik otvora manji od prečnika probajnog jezgra
3. **Zador sa prslinom** – oštećenje spoljašnje strane mete sa izbočinom i prslinom ili prslinama na unutrašnjoj,
4. **Zador-krenuo čep** – oštećenje spoljašnje strane mete sa prslinom u obliku čepa na unutrašnjoj strani,
5. **Zador sa izbočinom** – oštećenje spoljašnje strane mete sa izbočinom na unutrašnjoj strani,
6. **Zador** – javlja se kada je zrno izvršilo oštećenje spoljašnje strane mete, bez drugih efekata,



Meta pruža zaštitu u slučaju da se od pet ispaljenih projektila, nijedan ne može opisati kao proboj ili zador-izbijen čep. Ova terminologija je u saglasnosti sa terminologijom standarda STANAG 4146 [97].

**Tabela 3.7.** Prikaz analogije balističkog ispitivanja.

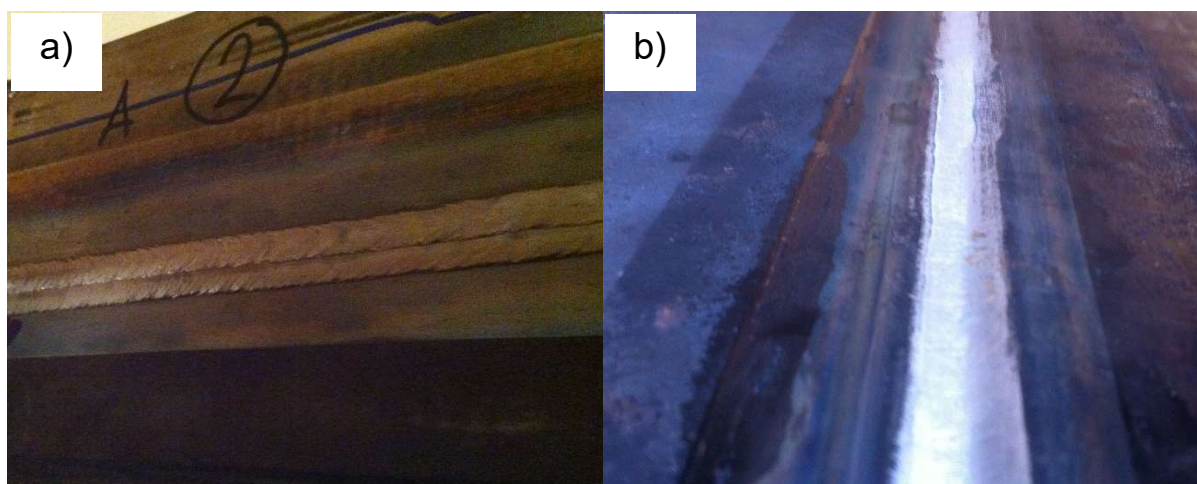
1.	<b>Proboj</b>	
2.	<b>Zador-izbijen čep (prodor)</b>	
3.	<b>Zador sa izbočinom</b>	
4.	<b>Zador-krenuo čep</b>	
5.	<b>Zador sa prslinom</b>	
6.	<b>Zador</b>	

## 4 REZULTATI

### 4.1 Rezultati MIG procesa zavarivanja pancirnog čelika

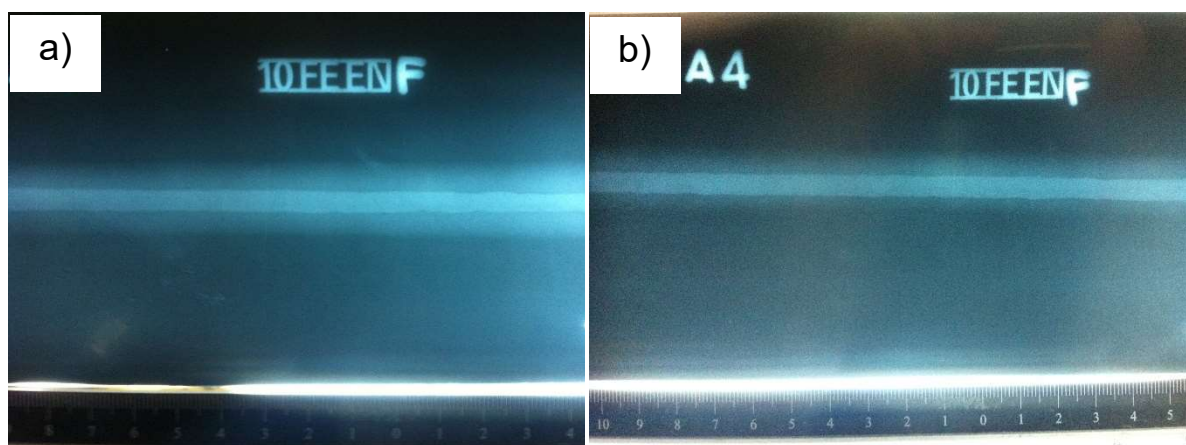
#### 4.1.1 Rezultati radiografije zavarivanja

Sučeono zavareni spoj na svih devet ploča je dobijen bez prslina. Slika nadvišenja i provera jednog od para ploča je prikazana na slikama 4.1. a) i b).



**Slika 4.1.** Nadvišenje a) i provar b) sučeono zavarenog spoja Protac 500 čelika.

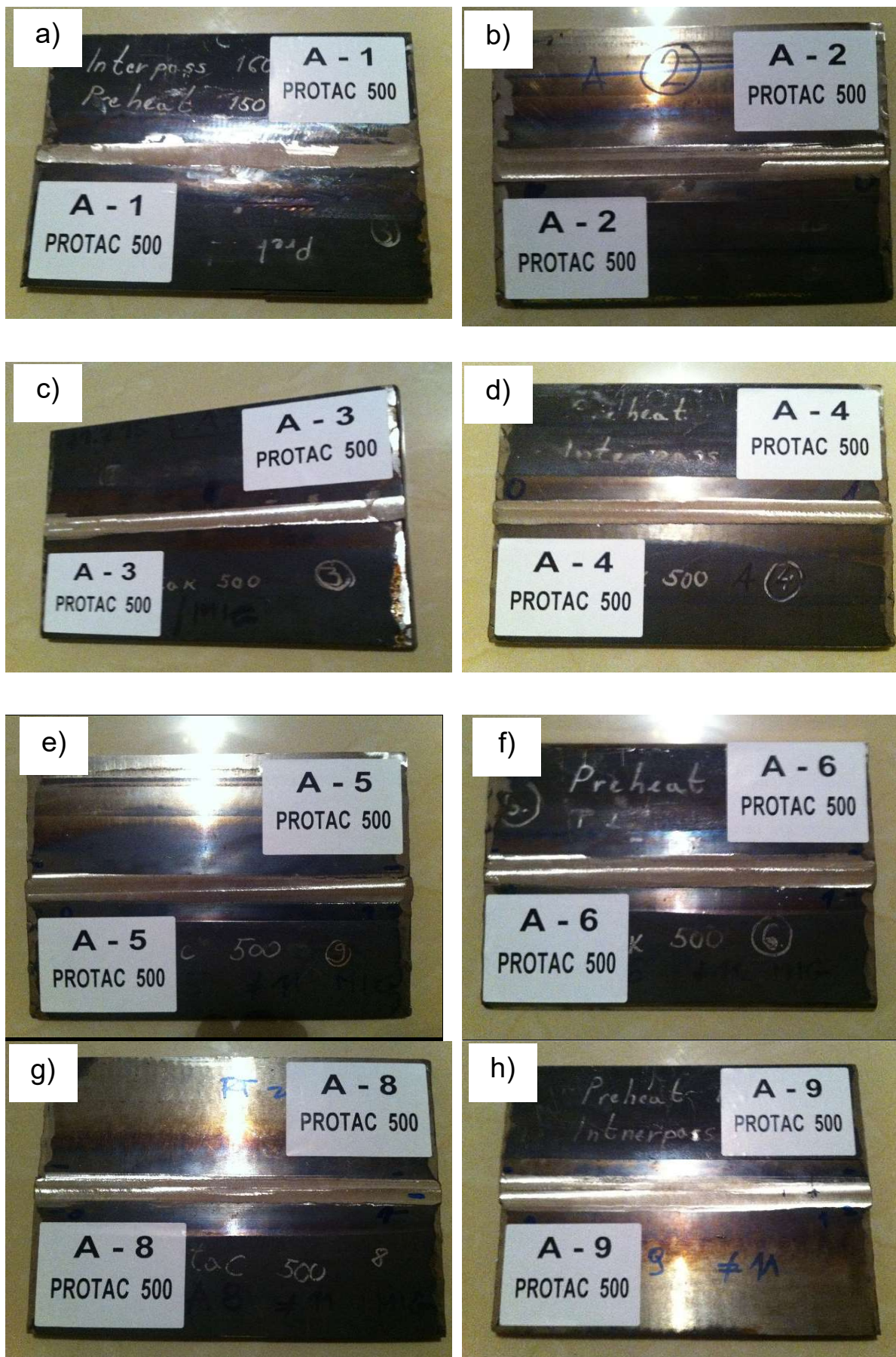
Rezultati radiografskog testa, za prve dve ploče sa oznakama A-2 i A-4, su ocenjeni klasom B, prema standardu EN ISO 5817: (2014) [115]. Radiografski snimci, prikazani na slici 4.2., pokazuju zavareni spoj bez poroznosti i prslina.



**Slika 4.2.** Snimci radiografije para ploča sa oznakama A-2 a) i A-4 b).

Rezultati radiografije zavarenih ploča sa oznakama A-5, A-6 i A-8 su dati dodatku 2 i prema standardu EN ISO 5817: (2014) [115] su ocenjeni su klasom B. Izgled zavarenih svih devet parova ploča, su prikazani na slici 4.3.



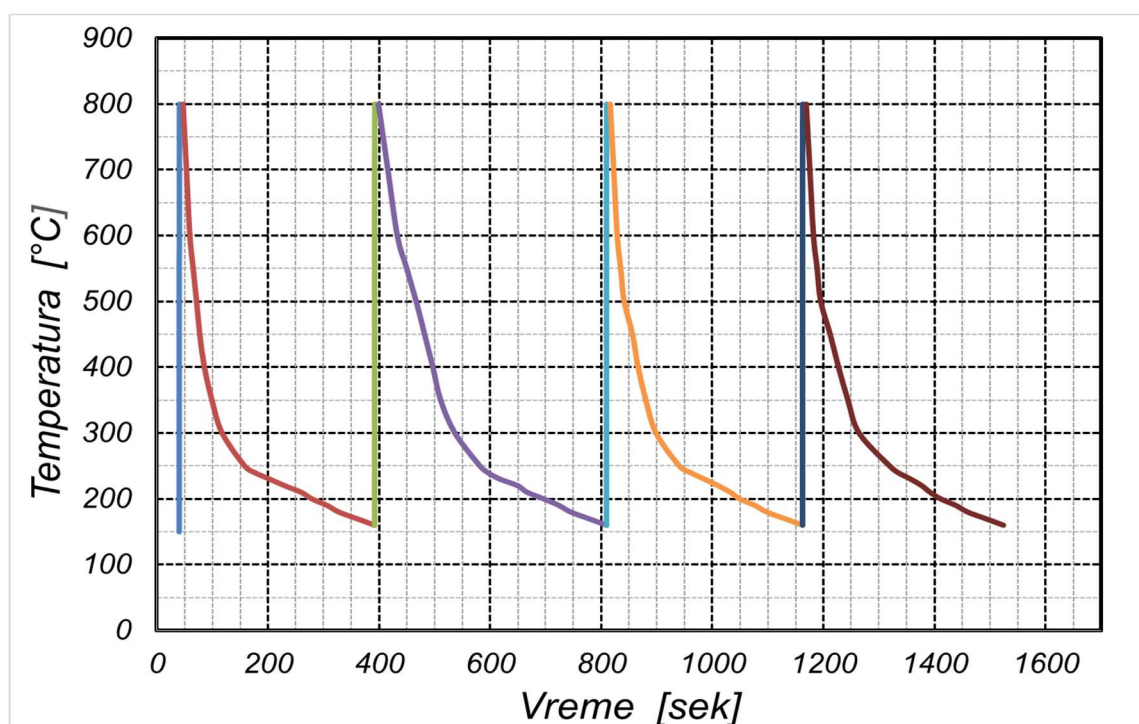


Slika 4.3. Izgled zavarenih osam parova ploča.

#### 4.1.2 MIG proces zavarivanja

Za zavarivanje pancirnog čelika PROTAC 500 izabran je MIG postupak zavarivanja sa austenitnim dodatnim materijalom.

Od brzine hlađenja u temperaturnom intervalu od 600 °C do 200 °C, zavisi kakva će mikrostruktura biti formirana u ZUT-u, a time i mehaničke osobine. Najvažniji cilj u prvoj etapi, a od koga zavise i svi ostali rezultati jeste merenje brzine hlađenja u najkritičnijoj, gruboznoj oblasti ZUT-a. Slika 4.4. pokazuje izmereni toplotni ciklus u gruboznom delu ZUT-a, dobijenog sa temperaturom predgrevanja od 150 °C i međuprolaznom temperaturom od 160 °C.



**Slika 4.4.** Temperaturni ciklusi četvero-prolaznog MIG procesa zavarivanja austenitnim dodatnim materijalom sa temperaturom predgrevanja 150 °C i međuprolaznom temperaturom od 160 °C.

Za pancirne čelika transformacija  $\gamma \rightarrow \alpha$  se dešava u temperaturnom intervalu od 600 °C do 200 °C. Na osnovu pomenutog vremena hlađenja u ovom temperaturnom intervalu definiše koja će se mikrostruktura stvoriti nakon procesa zavarivanja. Međutim, postoje i veći broj izraza koje definišu brzinu hlađenja u temperaturnom intervalu od 800 °C do 500 °C. Vrednosti parametara, vremena hlađenja ( $t_{8/5}$ ) kao i ( $t_{6/2}$ ) i srednja brzina hlađenja pri zavarivanju PROTAC 500, prikazani su u tabeli 4.1.

**Tabela 4.1.** Karakteristike ciklusa hlađenja (vreme hlađenja  $t_{8/5}$ ,  $t_{6/2}$  i prosečna brzina hlađenja) četvero prolaznog MIG procesa zavarivanja austenitnim dodatnim materijalom sa temperaturom predgrevanja 150 °C i međuprolaznom temperaturom od 160 °C.

Prolaz	Temperatura predgrevanja /međuprolaza	Vreme hlađenja $t_{8/5}$	Vreme hlađenja $t_{6/2}$	Prosečna brzina hlađenja [800 °C – 500 °C]
broj	[°C]	[s]	[s]	[°C/s]
1	150	24	219	13
2	160	68	263	5
3	160	25	220	12
4	160	26	223	12

## 4.2 Rezultati tvrdoće, energije udara i zateznih karakteristika

### 4.2.1 Rezultati ispitivanja tvrdoće

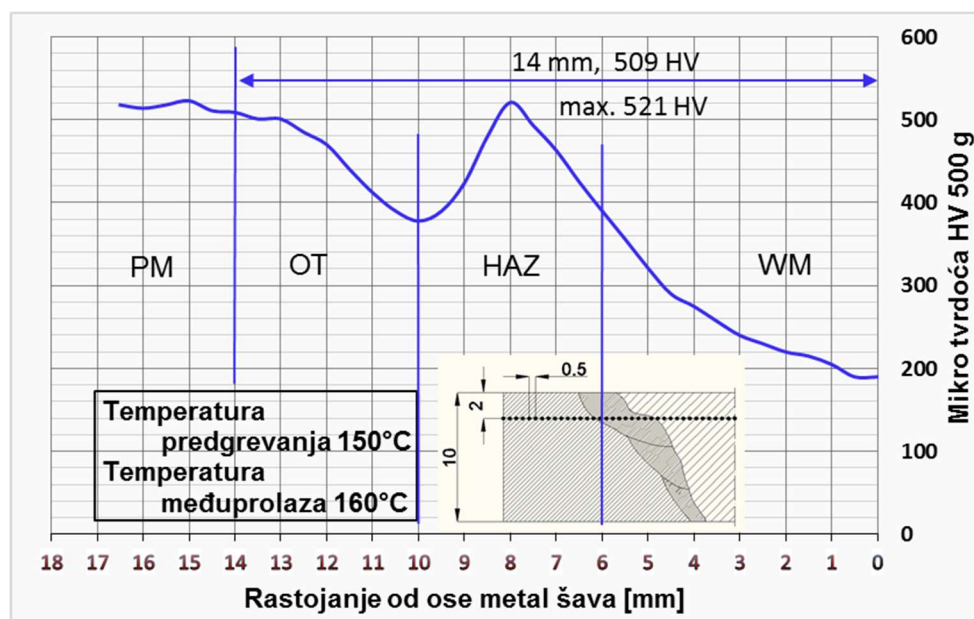
Sa aspekta zaštite posade oklopnog vozila, dinamičkih karakteristika, kvaliteta zavarenog spoja tvrdoća je važna karakteristika. Rezultati izmerenih tvrdoća zavarenog spoja su prikazani na slikama od 4.5.-4.6., svaka vrednost tvrdoće predstavlja srednju vrednost tri merenja.

Slike pokazuju podatke tvrdoće uzoraka zavarenog spoja sa temperaturom predgrevanja od 150 °C i međuprolaznom temperaturom od 160 °C. Zone zavarenog spoja su označene: metal šava (MŠ), linija stapanja (LS), zona uticaja toplote (ZUT), interkritična zona (IZ), subkritična zona (SZ) i osnovi metal (OM).

#### Profil tvrdoće 2 mm ispod gornje površine zavarenog spoja

Slika 4.5. pokazuje trend promene tvrdoće u zonama: MŠ, LS, ZUT i OM. Tvrdoća raste od sredine MŠ (190 HV), prema liniji stapanja i uz samu liniju na strani MŠ ima vrednost 339 HV. Tvrdoća na LS je 420 HV. Tvrdoća raste u zoni ZUT i dostiže maksimalnu vrednost od 521 HV na rastojanju 8 mm ose šava. Nakon maksimuma trend tvrdoće je u opadanju sa postignutom minimalnom tvrdoćom od 378 HV na rastojanju 10 mm od ose metal šava. Tvrdoća zatim raste i završava se na rastojanju 14 mm od ose metal šava sa vrednošću oko 509 HV. Rastojanje 14 mm je i granica ZUT i OM. Vrednost tvrdoće OM je zatim u proseku od 509 HV.

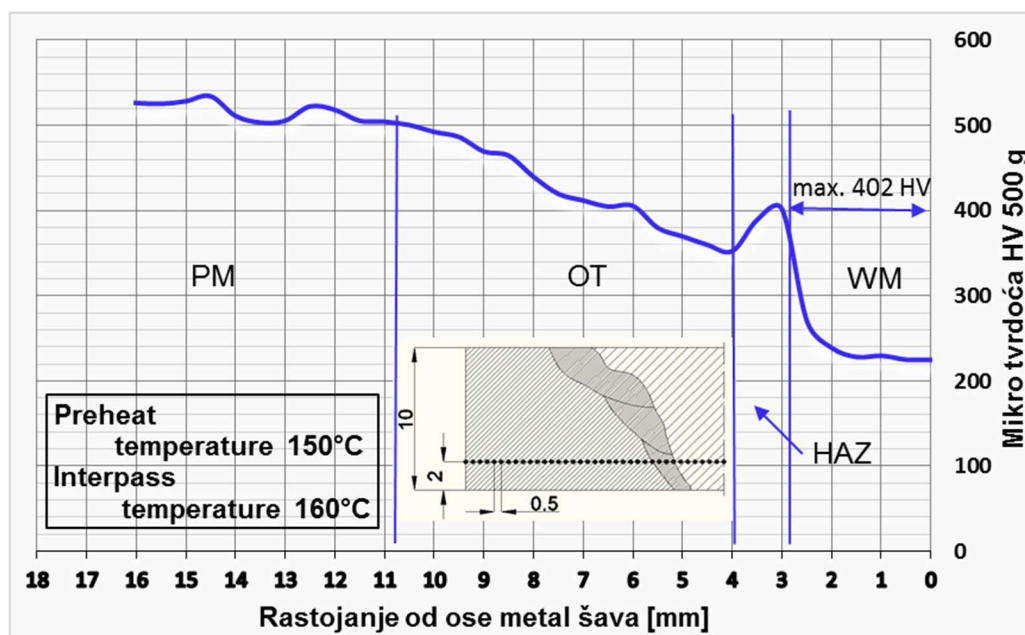




Slika 4.5. Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog 2 mm ispod gornje površine.

#### Profil tvrdoće 2 mm iznad donje površine zavarenog spoja

Slika 4.6. pokazuje trend promene tvrdoće u zonama: MŠ, LS, ZUT i OM. Tvrdoća raste od sredine MŠ gde je izmerena vrednost od 190 HV prema liniji stapanja i uz samu liniju na strani MŠ ima vrednost 350 HV. Tvrdoća na LS je 420 HV, a zatim opada u zoni ZUT i dostiže minimalnu vrednost od 353 HV na rastojanju 4 mm od ose šava. Tvrdoća zatim raste i na rastojanju 11 mm od ose šava sa vrednošću oko 509 HV. Rastojanje 11 mm je i granica ZUT i OM. Vrednost tvrdoće OM je zatim u proseku oko 509 HV.

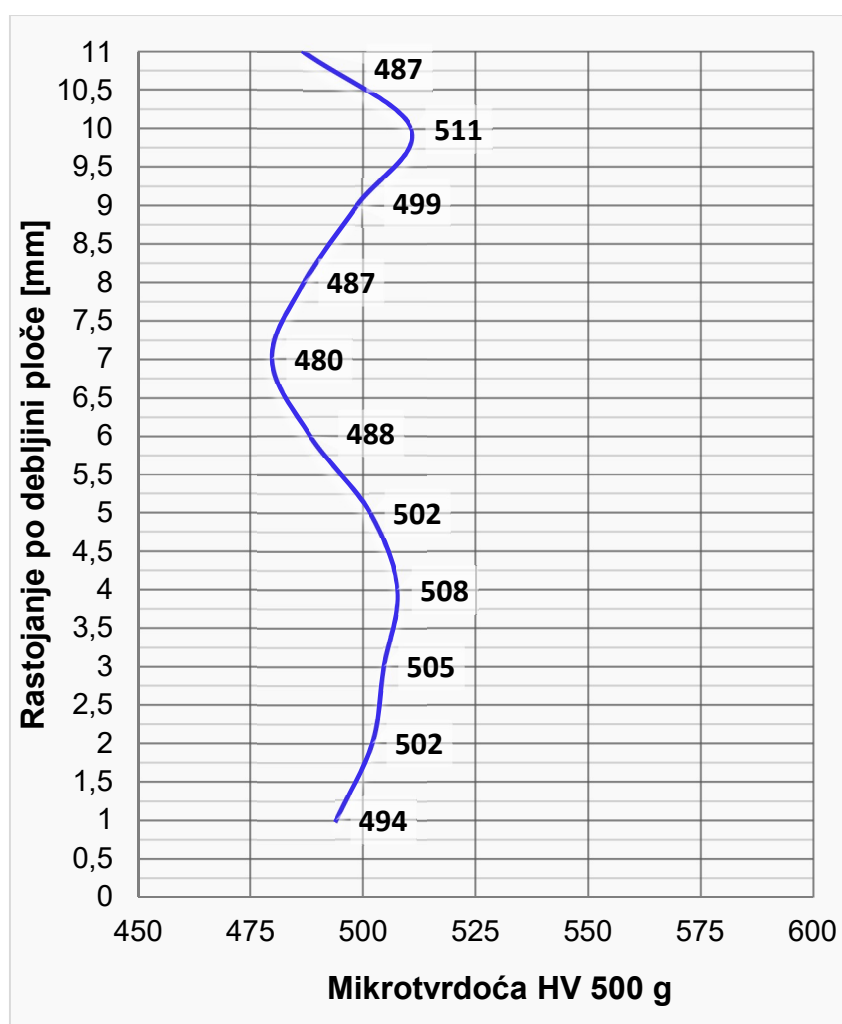


Slika 4.6. Profil tvrdoće izmerenog 2 mm iznad donje površine zavarenog spoja.



### Profil tvrdoće u osnovnom materijalu

Vrednost tvrdoće u osnovnom materijalu, [slika 4.7.](#) je u granicama od 480 HV i 511 HV. Maksimalna vrednost tvrdoće od 511 HV je na rastojanju 1 mm ispod gornje površine, kao i u zoni od 3 do 4 mm iznad donje površine sa vrednošću od 505-508 HV. Minimalne vrednosti tvrdoće su u zonama koje su neposredno uz sredinu ploče, sa vrednošću 480 HV. Može se zaključiti da je tvrdoća osnovnog materijala nešto niža u sredini ploče i na površini.

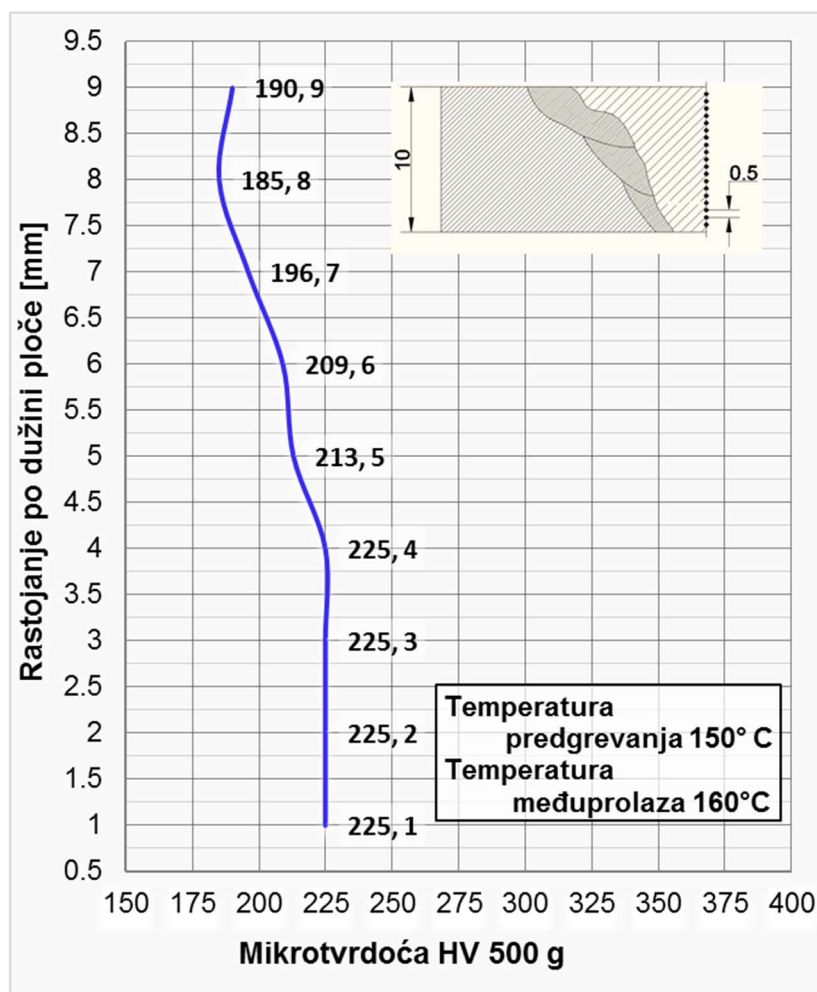


**Slika 4.7.** Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog u zoni osnovnog materijala.

### Profil tvrdoće po osi metal šava (MŠ)

Cilj ovog merenja jeste utvrđivanje razlike tvrdoće u korenu, prolazu popune i pokrivnim prolazima zone MŠ. Sa [slike 4.8.](#) se može zapaziti da je maksimalna tvrdoća u granicama od 202 HV i 222 HV u korenu šava. Nešto blaži pad tvrdoće u odnosu na prolaz korena je u zoni popune. Tvrdoća kod ovog prolaza je u granicama od 196 HV

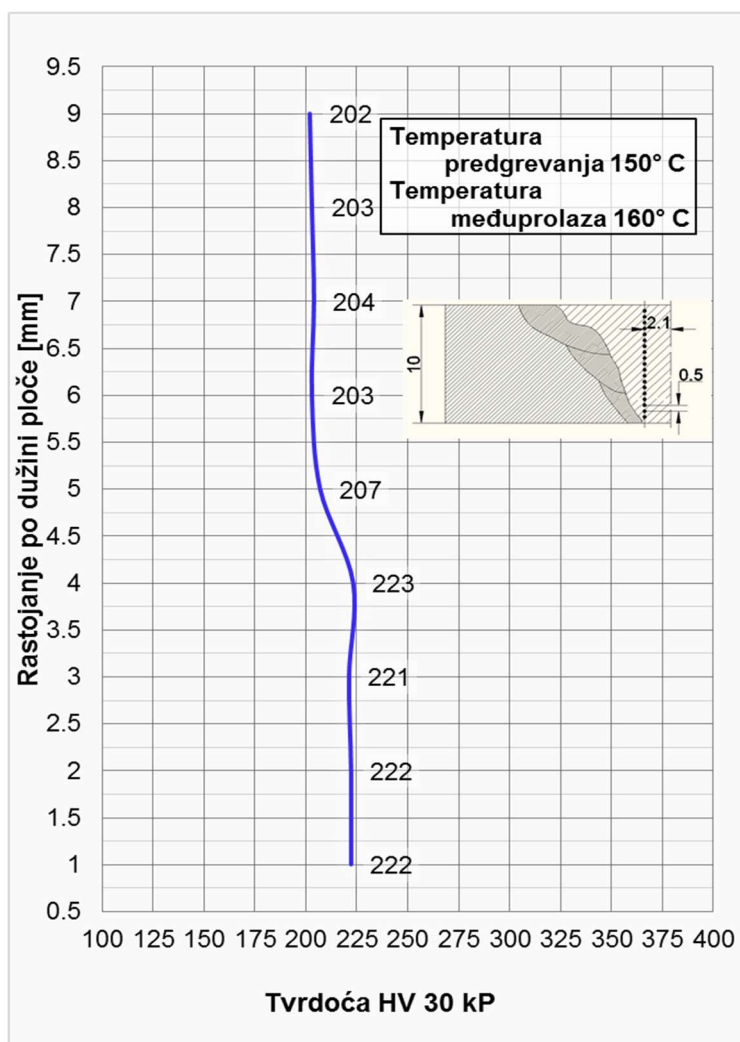
i 222 HV, a najniža tvrdoća je u pokrivnim prolazima od 185 i 190 HV. Veća tvrdoća u donjoj zoni je verovatno posledica boljeg mešanja osnovnog i dodatnog materijala u prolazu korena.



Slika 4.8. Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog u zoni metal šava.

### Profil tvrdoće u metal šavu (MŠ)

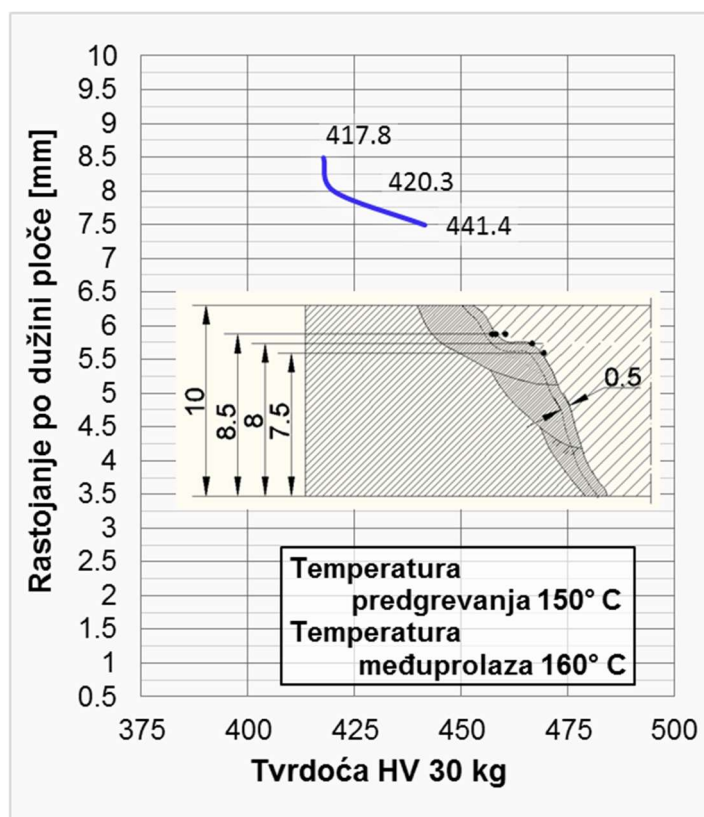
Pri merenju tvrdoće bliže liniji stapanja, [slika 4.9](#), može se zapaziti nešto umerenija promena tvrdoće sa promenom prolaza. Vrednosti tvrdoće su u granicama od 202 HV i 222 HV. Maksimalna tvrdoća 225 HV je u prolazu korena MŠ, nešto niža vrednost tvrdoće je u prolazu popune, dok su najniže vrednosti u pokrivnim prolazima MŠ. Može se zaključiti da je razlog veće tvrdoće u donjoj zoni, bolje mešanje osnovnog i dodatnog materijala uz ovu zonu koja je bliža liniji stapanja.



Slika 4.9. Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog u zoni metal šava.

### Profil tvrdoće uz liniju stapanja (LS)

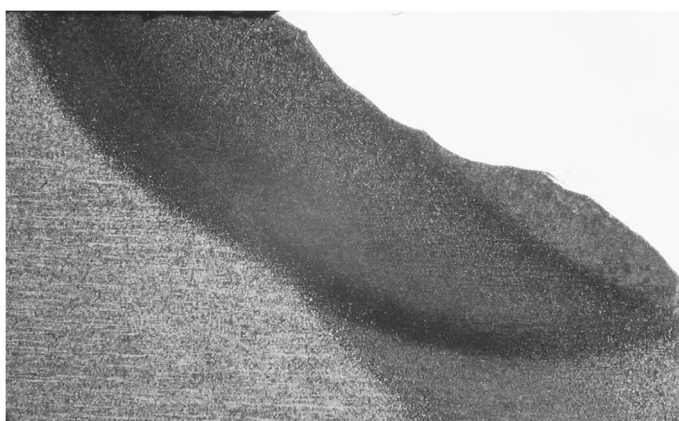
Tvrdoća je izmerena uz zonu širine 0,5 mm koja prati LS. Rezultati sa [slike 4.10](#). pokazuju da tvrdoća uz LS ne prelazi 442 HV, što je veoma dobro za ovu zonu. Vrednosti tvrdoće su u granicama od 418 HV i 442 HV. Tvrdoća opada od donje ka gornjoj zoni. Minimalna vrednost tvrdoće od 412 HV je u gornjoj zoni dok je maksimalna vrednost od 422 HV u donjoj zoni. To može da bude rezultat uticaja toplote koji je veći u zonama koji su bliži zadnjem prolazu nego što je to u prolazu korena, na koji je sigurno uticao već ohlađeni dodatni i osnovni materijal.



**Slika 4.10.** Profil tvrdoće zavarenog spoja izmerenog uz liniju stapanja, na rastojanju manjem od 0,5 mm.

#### 4.2.2 Metalografska ispitivanja

Odabrani parametri procesa zavarivanja odnosno unos toplote direktno su uticali na mikrostrukturu u zonama ZUT-a. Pre ispitivanja tvrdoće uzorci su bili predmet metalografskih ispitivanja, da bi se utvrdila mikrostruktura ZUT-a.

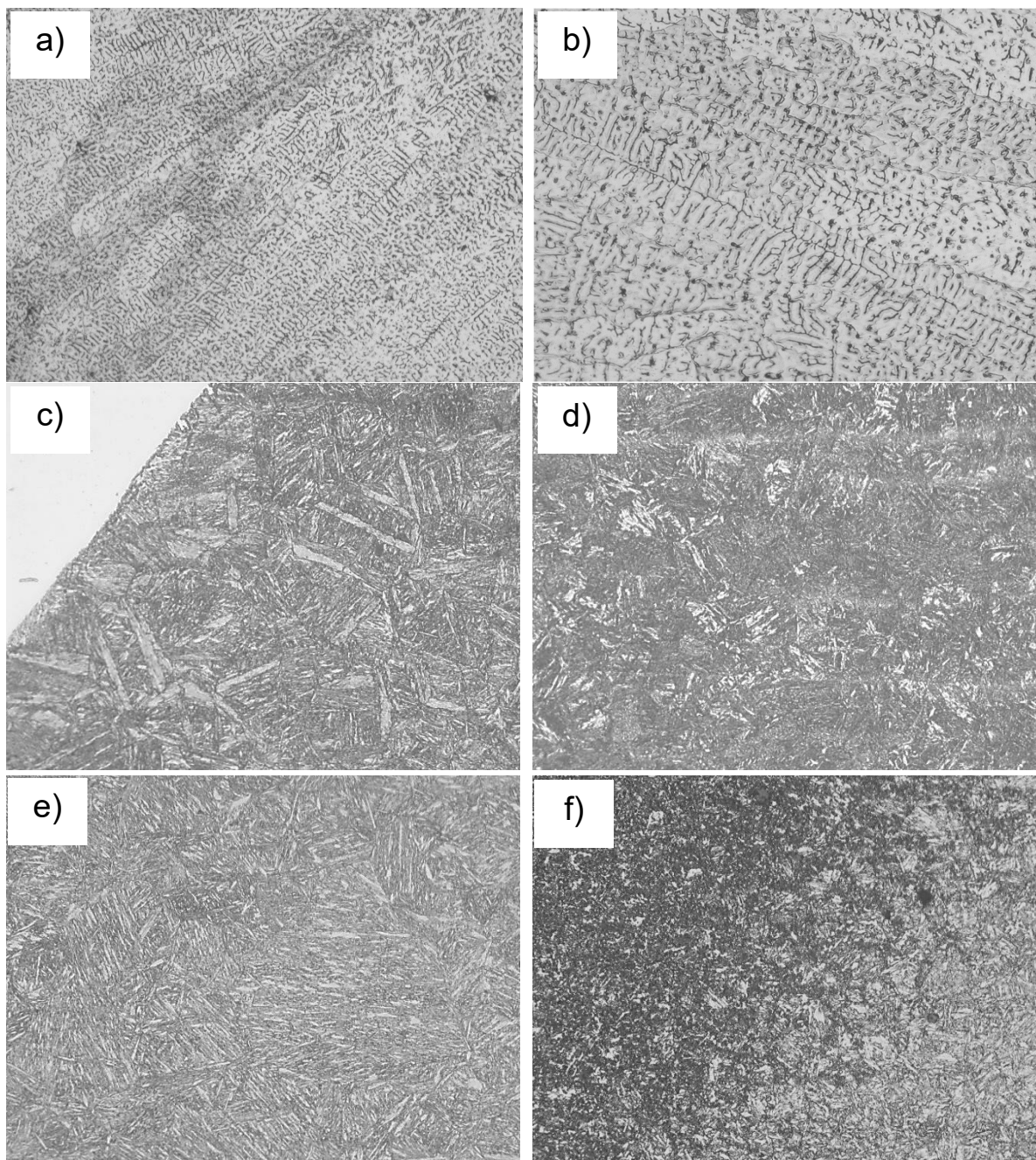


**Slika 4.11.** Makro ispitivanje različitih zona ZUT ( sa leve na desno: osnovni materijal, subkritična zona, interkritična zona, finoizrna zona, grubozrna zona i metal šav).

Zona ZUT-a, [slika 4.11](#), koja je pod uticajem najviše temperature tokom procesa zavarivanja je grubozrna zona. Visoka temperatura od 1200 °C do 1400 °C uzrokuje

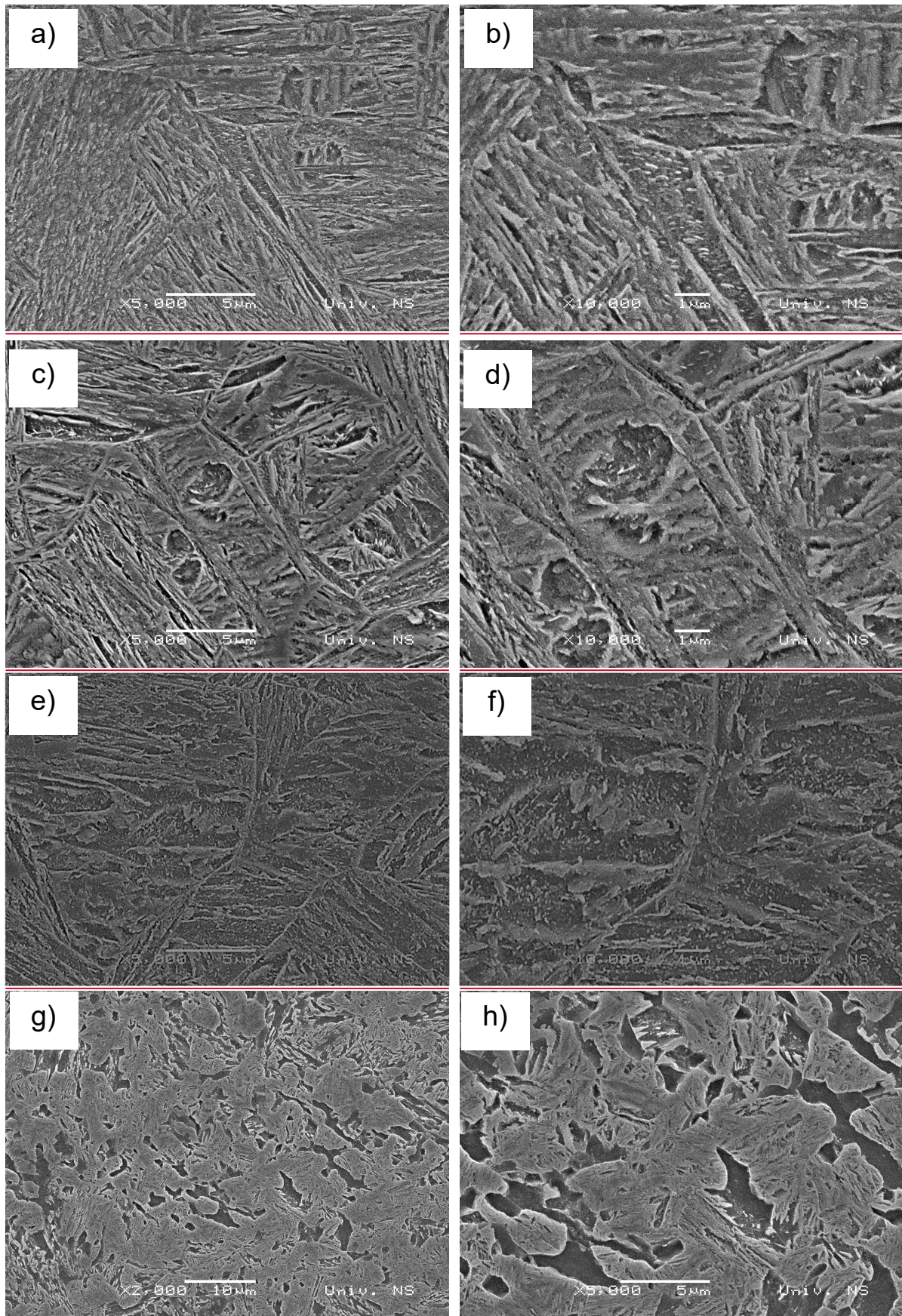


intenzivni rast zrna a time i gubitak žilavosti. Osobine zavara u grubozrnoj zoni ZUT-a su istovremeno tvrde i krte. Linija stapanja deli grubozrnu od zone metal šava. Linija stapanja je uska oblast u kojoj se najčešće javljaju prsline kada su u pitanju zavareni spojevi pancirnog čelika. Metal šav u tečnom stanju je prezasićen vodonikom. Tokom procesa očvršćavanja vodonik difunduje kroz liniju stapanja u grubozrnu zonu. Grubozrna zona visoke tvrdoće i visokim sadržajem difundovanog vodonika biva podložna hladnim prslinama. Metalografije svih zona su prikazane na [slici 4.12](#).



**4.12.** Mikroispitivanje zavarenog spoja svetlosnom mikroskopijom a) metal šava, b) grubozrne zone ZUT, c) finozrne zone ZUT, d) interkritične zone ZUT i f) subkritične zone ZUT.





**Slika 4.13.** Mikrostruktura ispitana SEM – om, a) i b) grubozrnaste zone ZUT-a, c) i d) fino-zrne zone ZUT, e) i f) interkritične zone ZUT, d) subkritične zone ZUT, četvoroprolaznog zavarivanja.

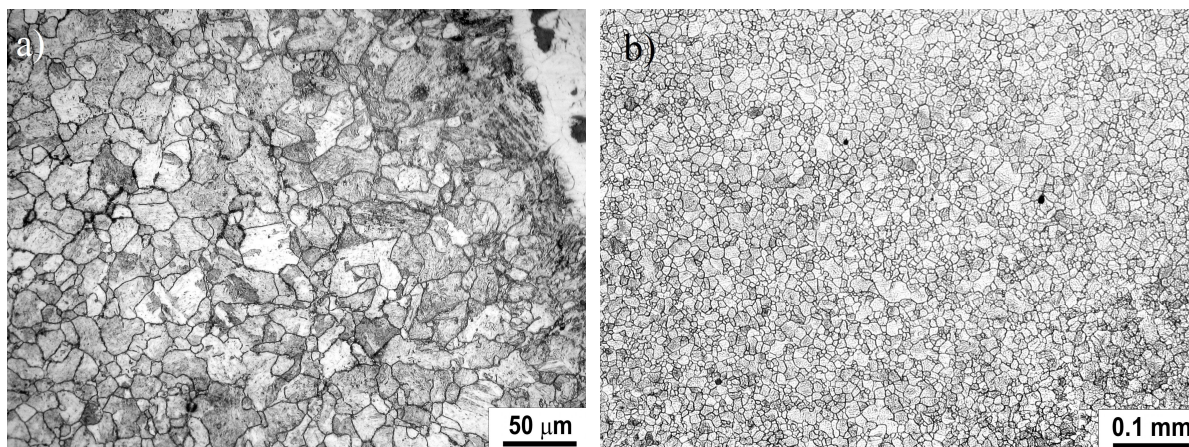


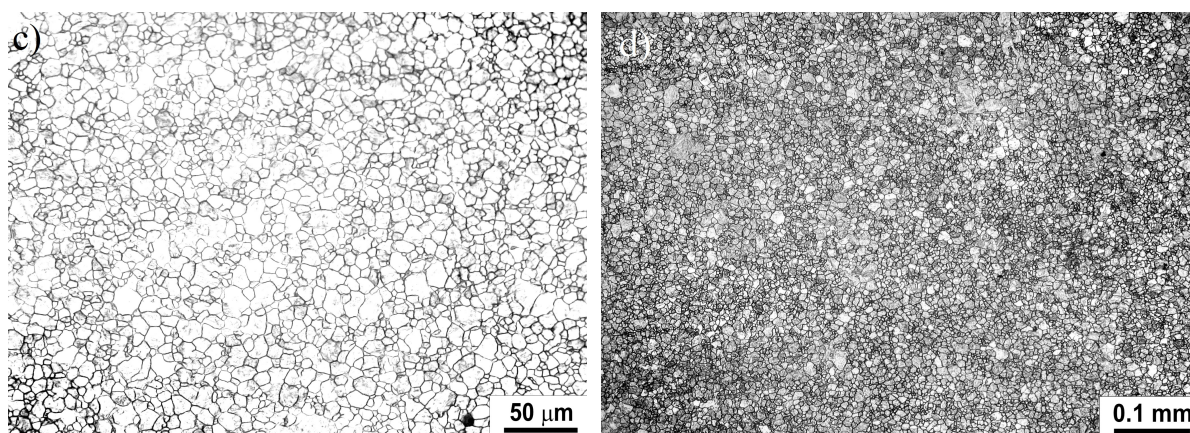
Mikrostruktura metal šava zavarenog spoja je austenitna sa oko 7 % delta ferita. Svetla polja na [slici 4.12 a\) i b\)](#) pokazuju austenitnu osnovu, dok su tamna polja delta ferit, sa skeletnom morfologijom.

Mikrostruktura grubozrnasta zone zavarenog spoja pancirnog čelika [slika 4.12. c\)](#) i [slika 4.13. a\) i b\)](#), sastoji se od martenzita. Otpušteni martenzit i beinit se nalaze u interkritičnoj zoni, što pokazuju [slike 4.12. d\)](#) i [slike 4.13. e i f\)](#). Subkritična zona [slika 4.12. f\)](#) i [slika 4.13. g\) i h\)](#) se sastoji od fino-zrnastog ferita, beinita i martenzita.

Veličina zrna u različitim zonama zavarenog spoja je merena metodom oksidacija prema standard EN ISO 643:2012 [16]. Nagrizanje uzoraka je urađeno Vilella regensom. Uzorci osnovnog materijala, dobijenih pre procesa zavarivanja, su sa karakterističnim sitnim zrnima [slika 4.14. d\)](#). Veličina zrna je upsegu od 8 do 9,5  $\mu\text{m}$ , sa srednjom vrednošću od 9  $\mu\text{m}$ . Skoro 95% izmerenih zrna su zrna veličine od 9  $\mu\text{m}$ . Abnormalna zrna nisu primećena. Proces zavarivanja je na rastojanju od 4 do 8 mm mereno od linije stapanja prouzrokovao uvećanje srednje veličine zrna poredeći sa veličinom zrna na uzorcima u dobijenom stanju, i veličina zrna ima vrednost od 10  $\mu\text{m}$ . Na rastojanju od 3,5 do 4 mm mereno od linije stapanja, minimalna veličina zrna je 15  $\mu\text{m}$ , [slika 4.14. c\)](#). Srednja veličina zrna je 17  $\mu\text{m}$ . Proces zavarivanja je prouzrokovao smanjenje veličine zrna na rastojanju od 1,5 to 2,5 mm mereno od linije stapanja. Srednja veličina zrna je 8  $\mu\text{m}$ , [slika 4.14. b\)](#). Struktura blizu linije stapanja je značajno različita u odnosu na ostale delove ZUT-a, [slika 4.14 a\)](#).

Najfrekventnija je veličina zrna od 20 do 30  $\mu\text{m}$ . Srednja veličina zrna iznosi 28  $\mu\text{m}$ , dok 5 % zrna prelazi veličinu od 30  $\mu\text{m}$ .



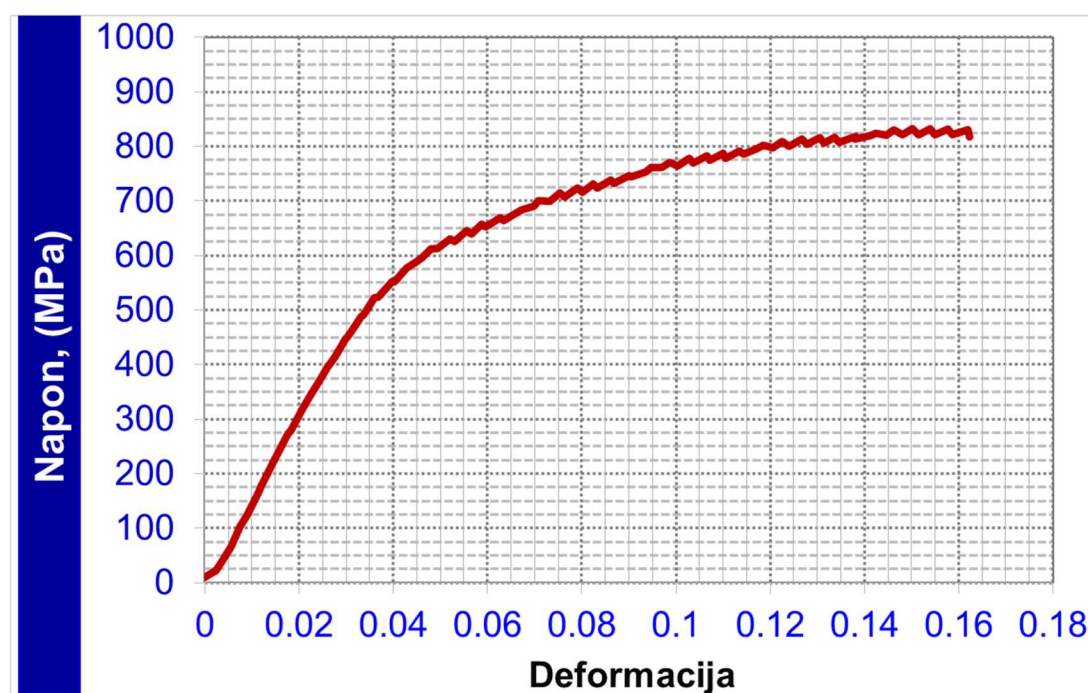


**Slika 4.14.** Veličina zrna u ZUT-u: a) blizu linije stapanja, b) 1,5 do 2,5 mm mereno od linije stapanja, c) 3,4 do 4,0 mm mereno od linije stapanja i d) u osnovnom materijalu, [116].

#### 4.2.3 Zatezne karakteristike

Osnovne karakteristike čvrstoće materijala, kao i krive napon – izduženje neophodne za naponsku analizu pancirne konstrukcije, dobijaju se zateznim ispitivanjima. Kako se radi o zavarenom spoju, neophodno je odrediti zatezne osobine zavarenog spoja u celini.

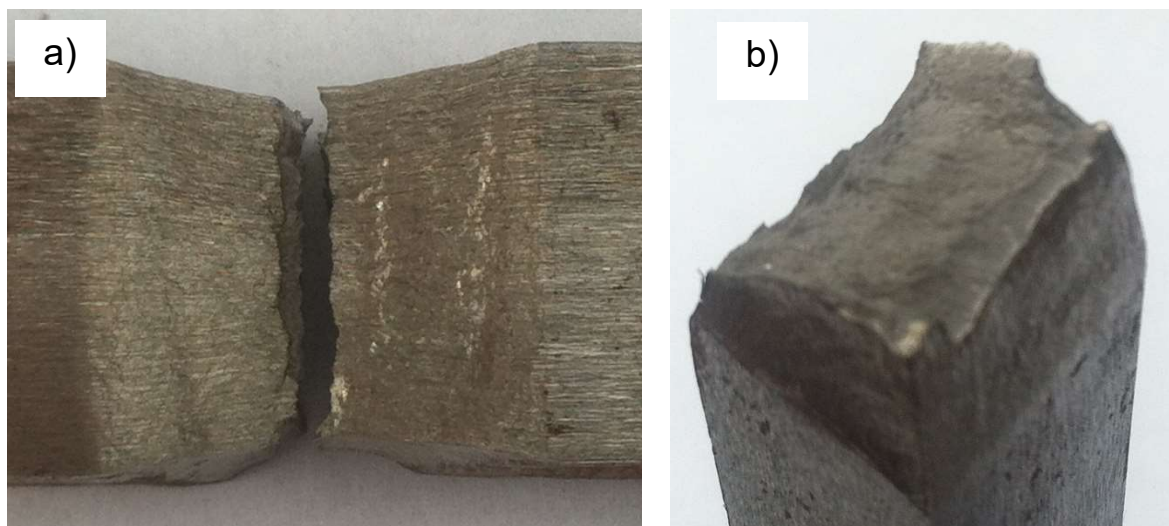
Dijagram ispitivanja epruveta sučeono zavarenog spoja poprečnim zatezanjem na sobnoj temperaturi od 20 °C je prikazan na slici 4.15, dok su rezultati dati u tabeli 4.2.



**Slika 4.15.** Dijagram napon-deformacija zavarenog spoja.



Eksperimentalni rezultati su pokazali da se lom desio u zoni metal šava, [slika 4.16](#). Zatezna čvrstoća od 833 MPa i napon tečenja od 552 MPa su u očekivanim granicama. Dobijena je velika razlika između napona tečenja i zatezne čvrstoće, što ukazuje na veliku rezervu plastičnosti.

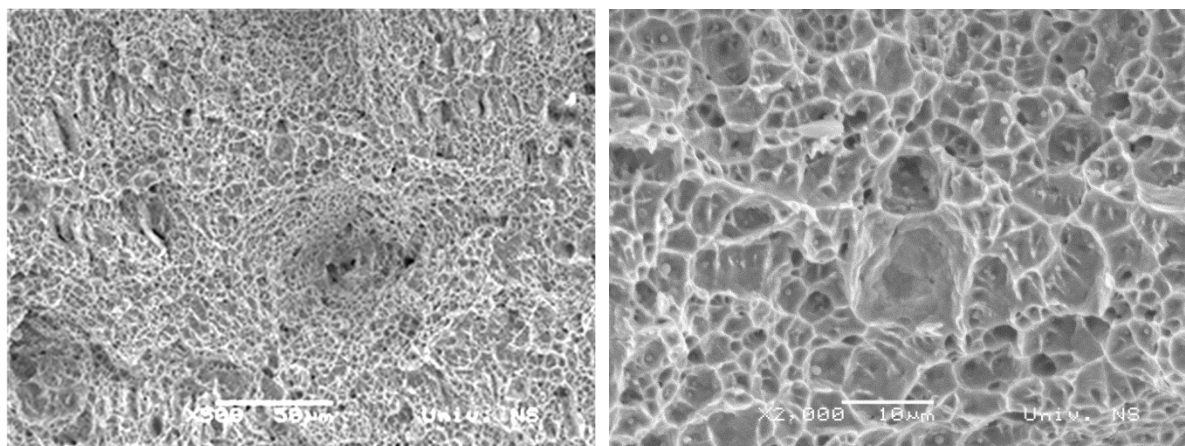


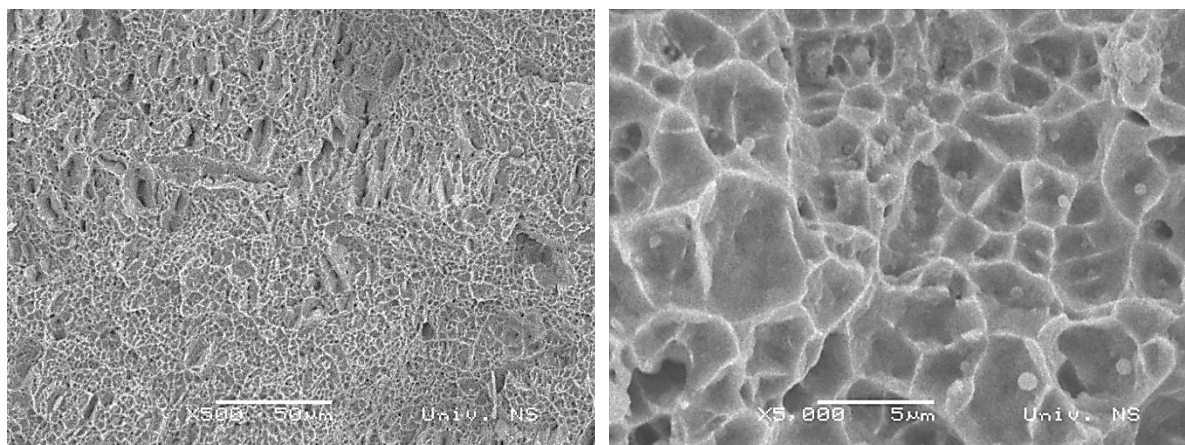
**Slika 4.16.** Prelomljena epruveta nakon ispitivanja zatezne čvrstoće.

**Tabela 4.2.** Karakteristike dijagrama napon-deformacija četvero prolaznog MIG procesa zavarivanja.

Epruveta	Zatezna čvrstoća	Napon tečenja
	[MPa]	[MPa]
1	825	593
2	833	552

Lom se desio u austenitnom metal šavu, tako da je površina preloma duktilna, sa tipičnim jamicama u kojima je često uključak, [slika 4.17](#).





Slika 4.17. Površina preloma uzorka za zatezanje.

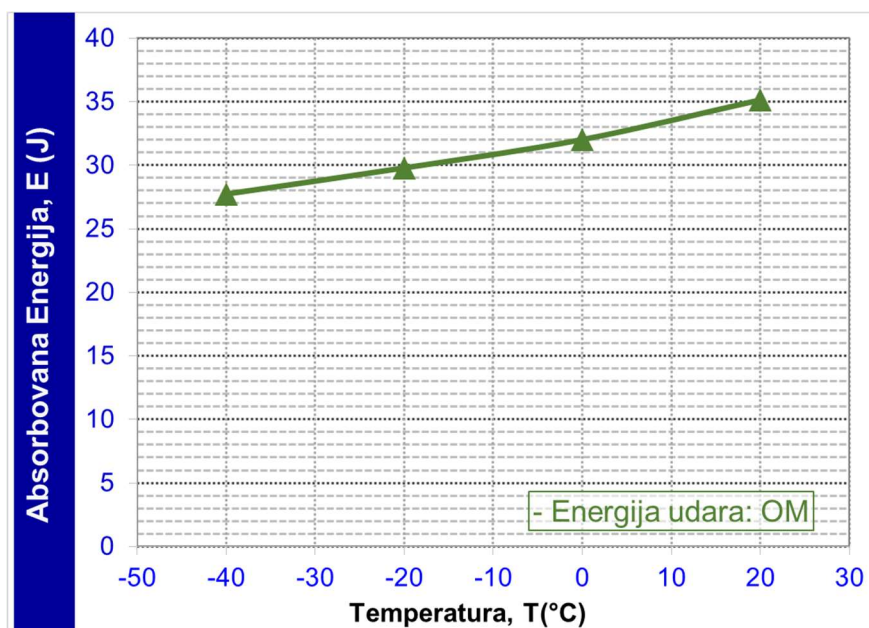
#### 4.2.4 Rezultati ispitivanja energije udara

##### 4.2.4.1 Rezultati ispitivanja energije udara u osnovnom materijalu

Promena energije udara za različite temperature je prikazana u tabeli 4.3. Energija udara u zoni osnovno metala je u granicama 34,2 i 27,9 J, za temperature 20 °C i -40° C, respektivno. Zavisnost energije udara od temperature je data na slici 4.18.

Tabela 4.3. Rezultati ispitivanja energije udara sa pozicijom zareza u osnovnom materijalu.

VPMS -OSNOVNI MATERIJAL					
Oznaka eprovete	Temperatura ispitivanja [°C]	Ukupna energija [J]	Srednja vrednost [J]	Energija nastanka prslina [J]	Energija širenja prslina [J]
VPMS1	20	35,2	34,2	32,0	3,2
VPMS2		32,2		25,4	6,8
VPMS3		35,2		28,3	6,9
VPMS5	0	28,3	32,5	22,0	6,3
VPMS6		32,0		27,6	4,5
VPMS7		32,9		26,9	6,0
VPMS8		35,8		26,8	9,0
VPMS9	- 20	35,8	31,8	29,6	6,3
VPMS10		29,8		22,9	6,9
VPMS11		31,3		27,8	3,5
VPMS12		34,3		26,8	7,5
VPMS13	- 40	27,7	29,5	24,9	2,9
VPMS14		31,0		29,0	2,0
VPMS15		31,0		30,2	0,8
VPMS16		28,1		26,2	1,9



**Slika 4.18.** Energija udara u zavisnosti od temperature za poziciju zareza u osnovnom materijalu.

Određivanjem energije udara za oblast osnovnog materijala ispitanog na 20 °C, dobijen je dijagram [slika 4.19.](#), na kome se vidi da je osim energije za nastanak prsline, određeni deo energije utrošen i na rast prsline (nije potpuno strma kriva), što pokazuje da nije u pitanju samo krta lom. Za nastanak prsline na 20 °C, izmerena energija udara je 28,6 J, a za rast je utrošeno 5,6 J. Dijagram energija udara za temperaturu 0 °C, -20 °C i -40 °C prikazani na [slikama 4.19. – 22.](#) su veoma slični. Energija za nastanak prsline je približno ista na svim temperaturama, a razlikuje se samo energija za rast koja je najniža na -40 °C i iznosi oko 2,0 J.

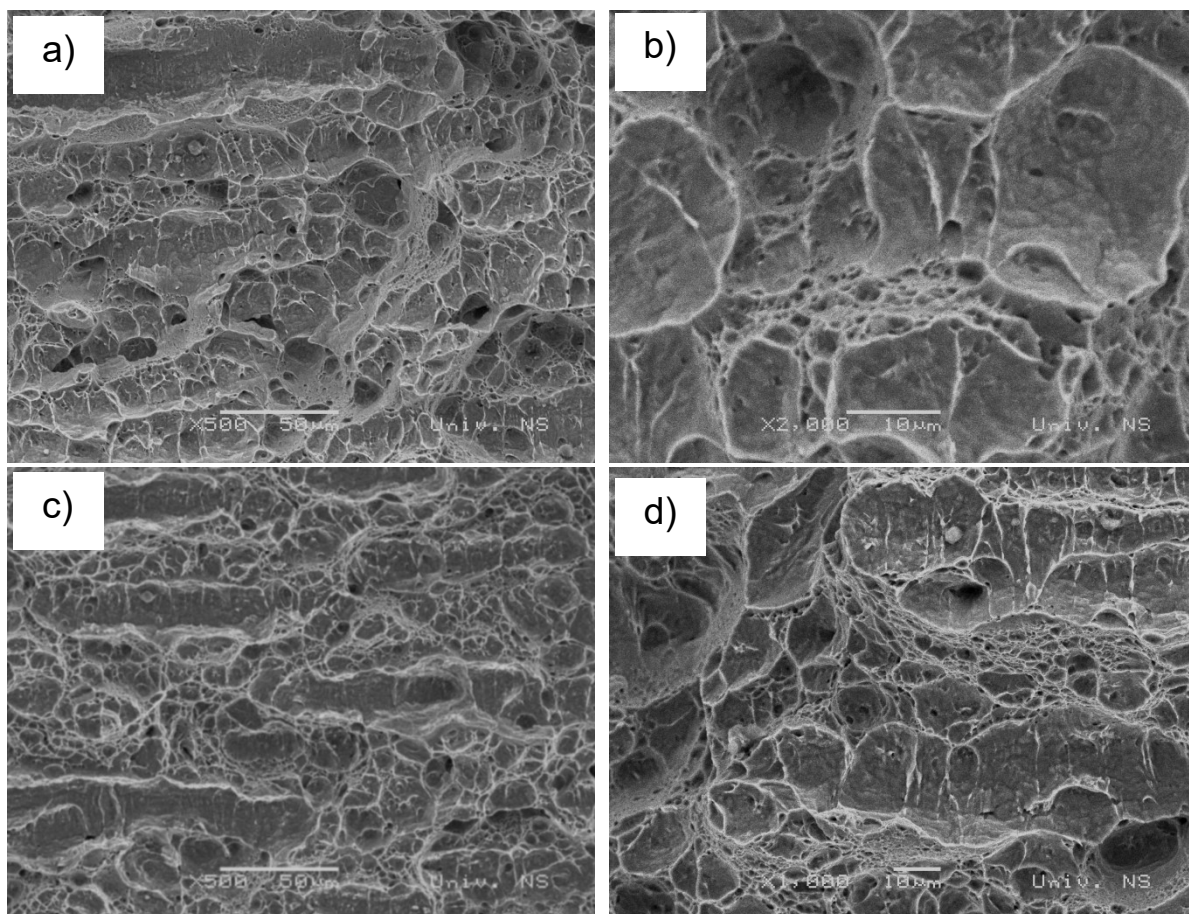
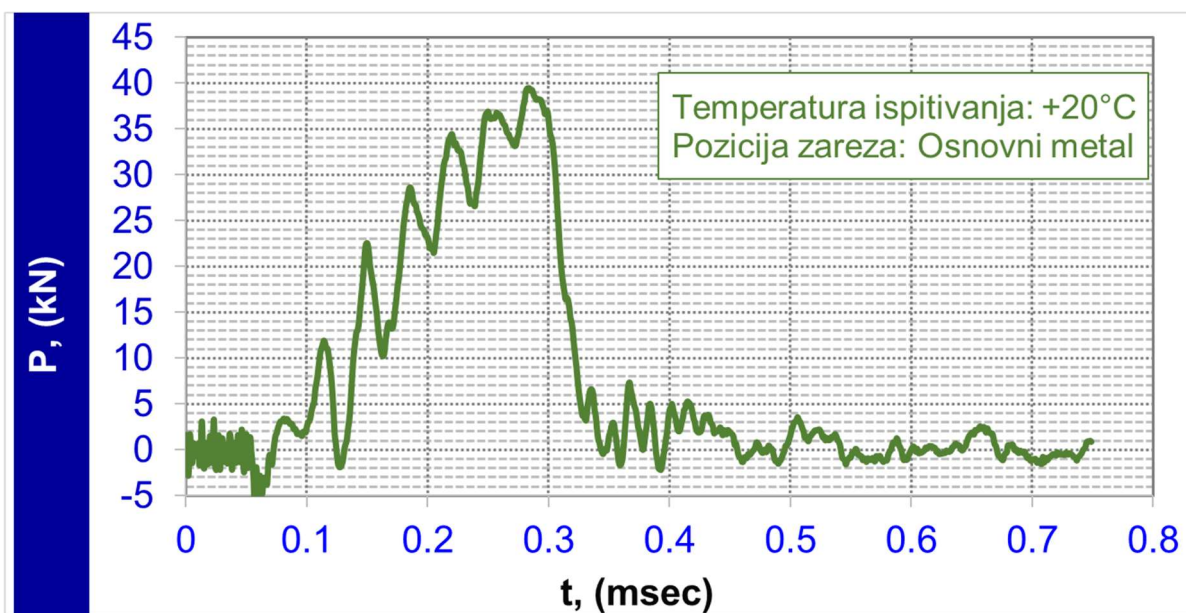
Površina preloma uzorka ispitanog na 20 °C se uglavnom sastoji od većih jamica nastalih rastom prsline tzv. smicajnom dekohezijom, što je vidi na [slici 4.19.](#) Samo na pojedinim mestima su vidljive jamice tipične za duktilni lom [slika 4.19. c i d](#)).

Površina preloma uzorka ispitanog na 0 °C nije tipično krta, ali je prsline rasla takođe smicajnom dekohezijom, [slika 4.20.](#) Veoma je slična površini preloma na sobnoj temperature.

Površina preloma uzorka ispitanog na -20 °C sadrži takođe područja koja su se lomila smicajnom dekohezijom, [slika 4.21.](#), ali i manja područja sa krtim lomom, tzv. kvazikrta lom (quasi cleavage) [slika 4.21. d](#)).

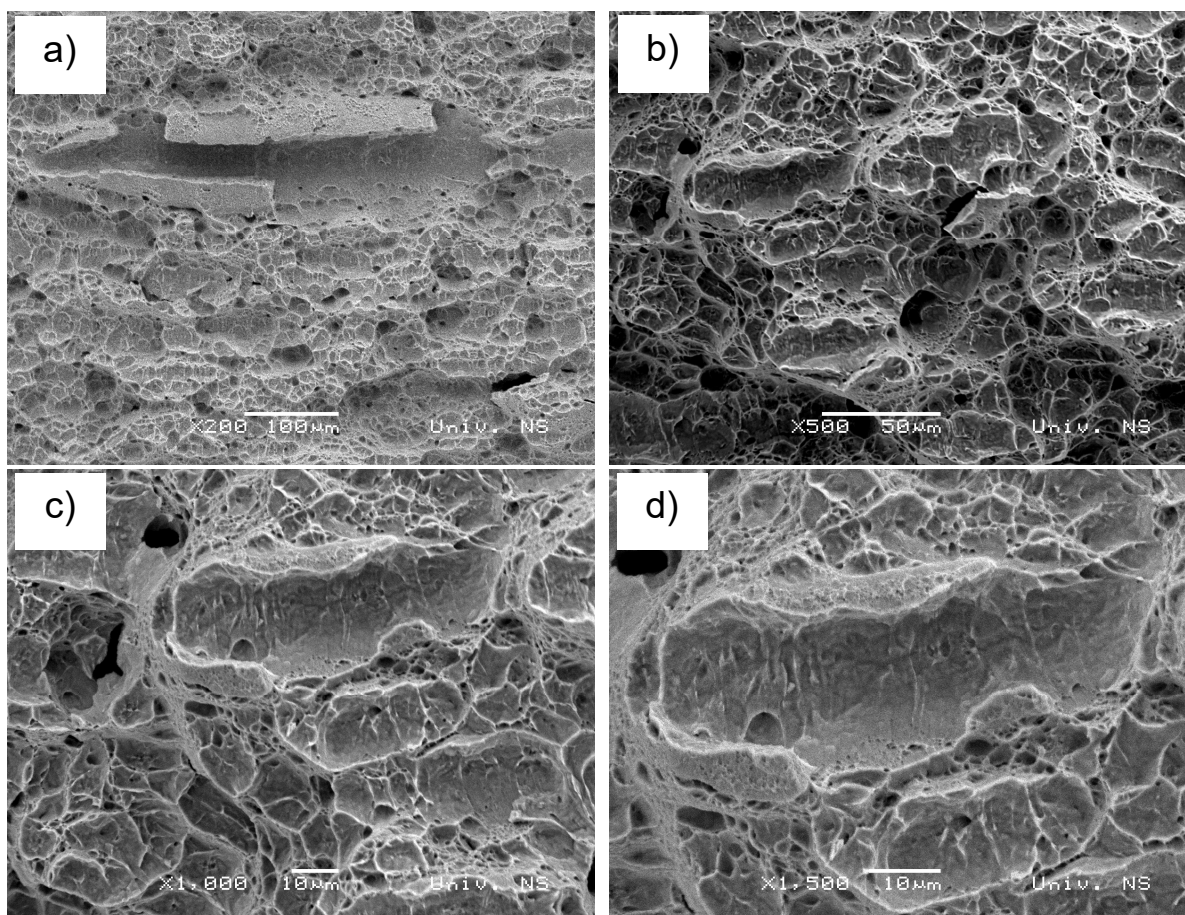
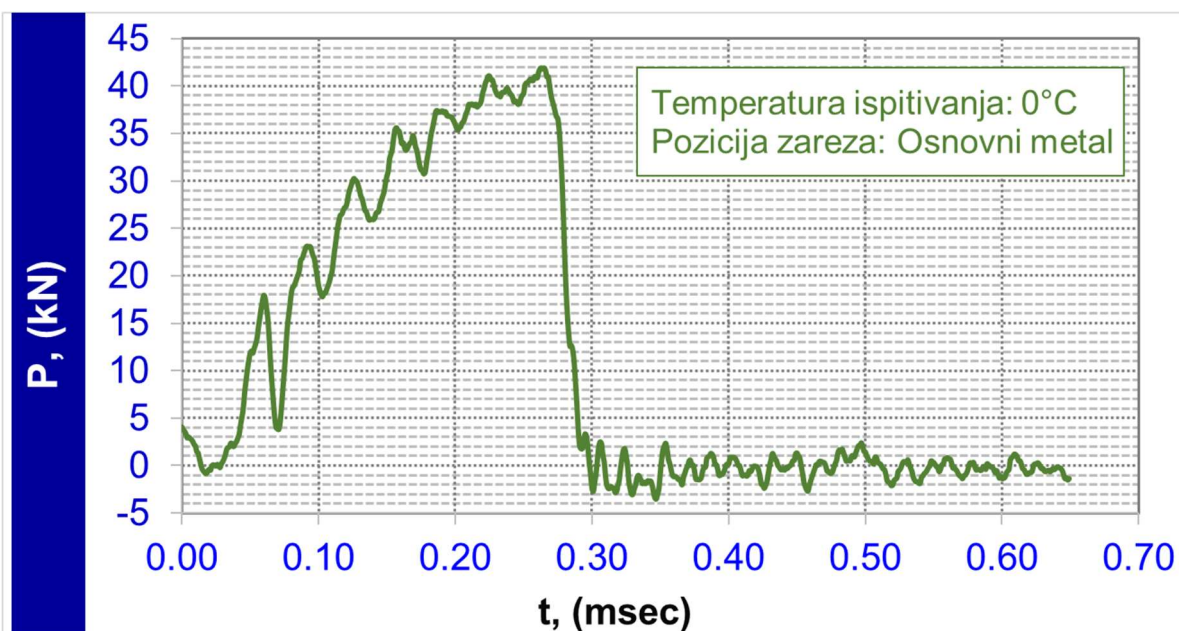
Površina preloma uzorka ispitanog na -40 °C sadrži smicajne jamice, prsline je rasla takođe smicajnom dekohezijom, [slika 4.22.](#), ali na većem području nastaje kvazikrta lom, [slika 4.22. c i d](#)).





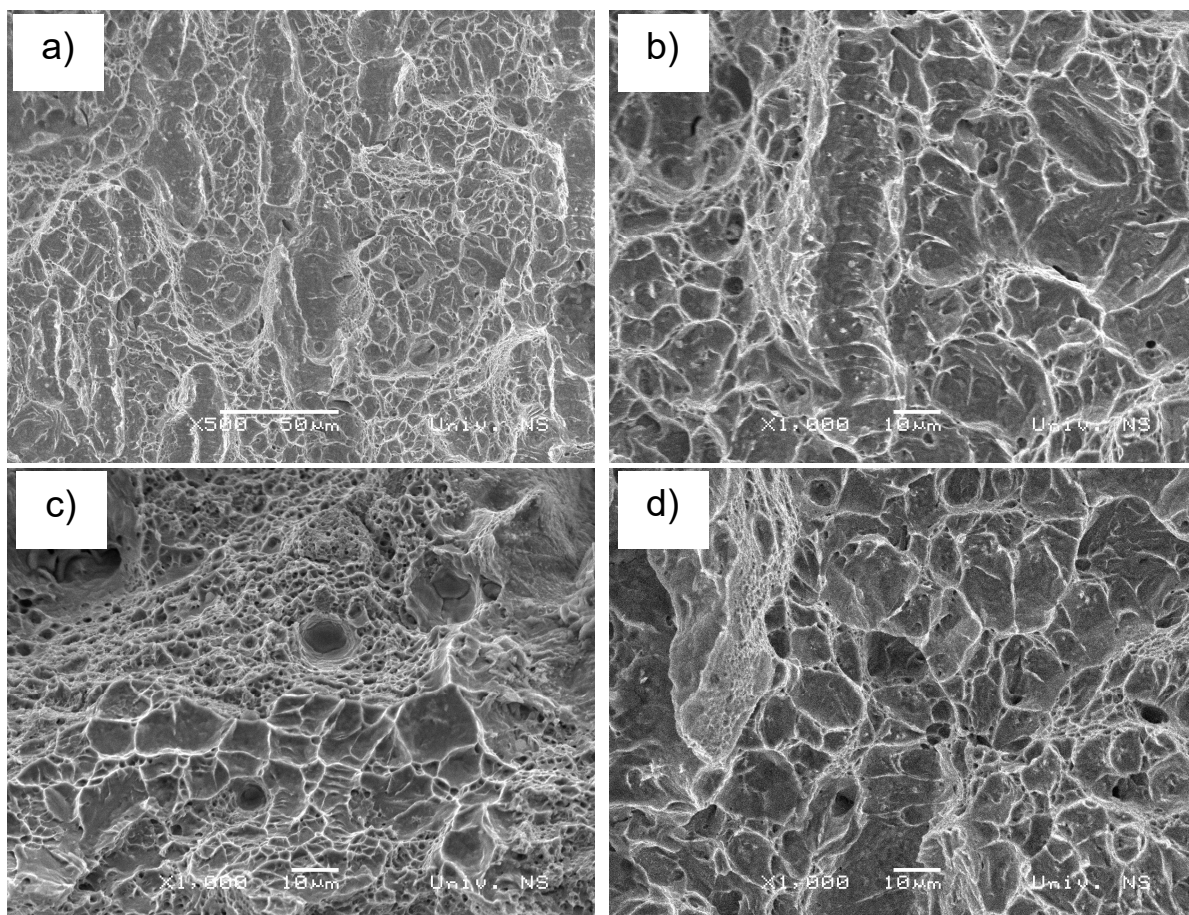
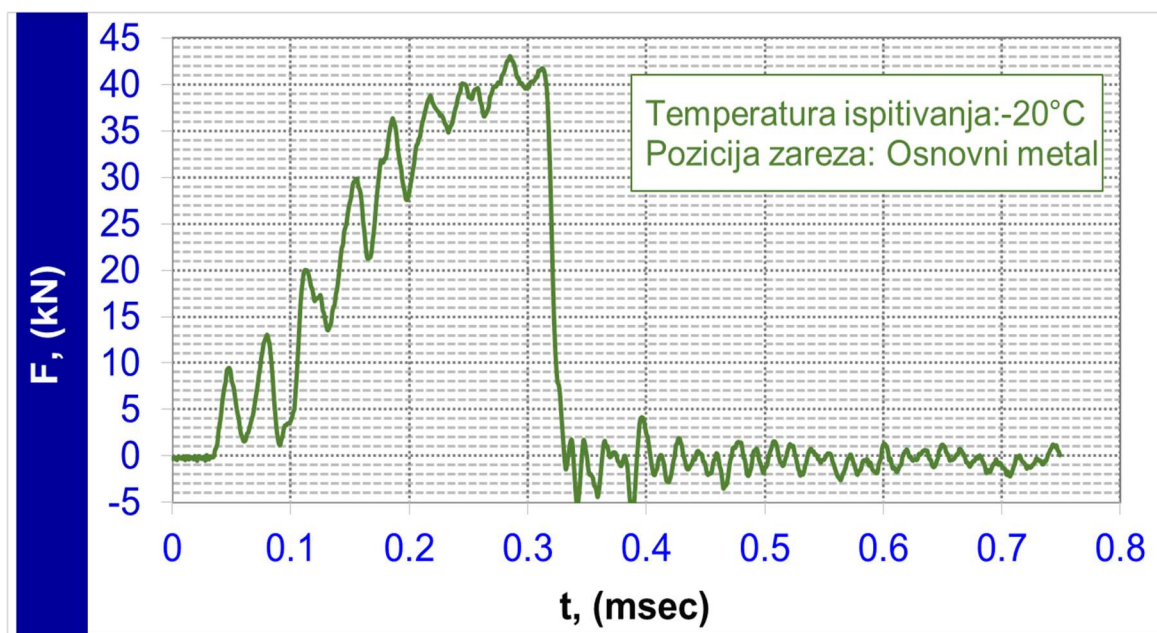
**Slika 4.19.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zarez u osnovnom materijalu na temperaturi 20 °C.





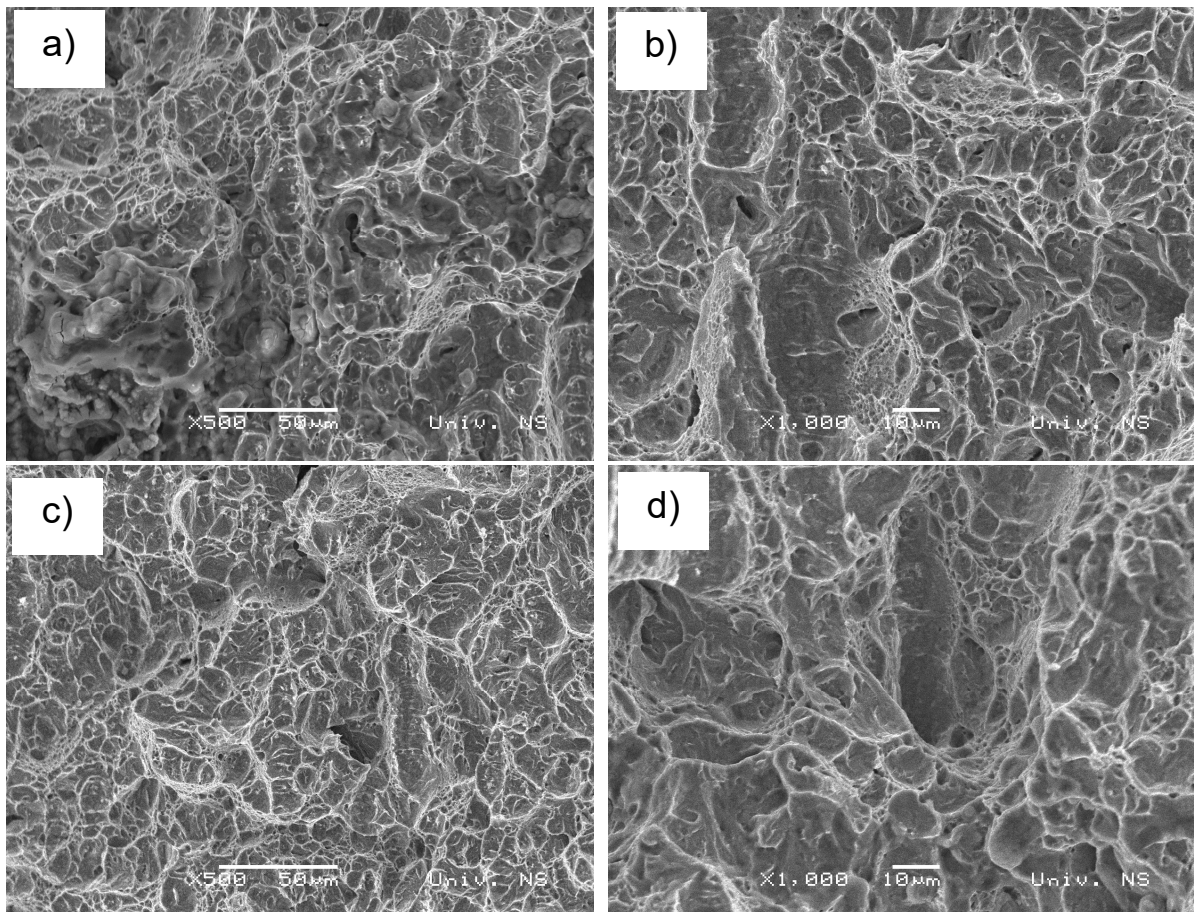
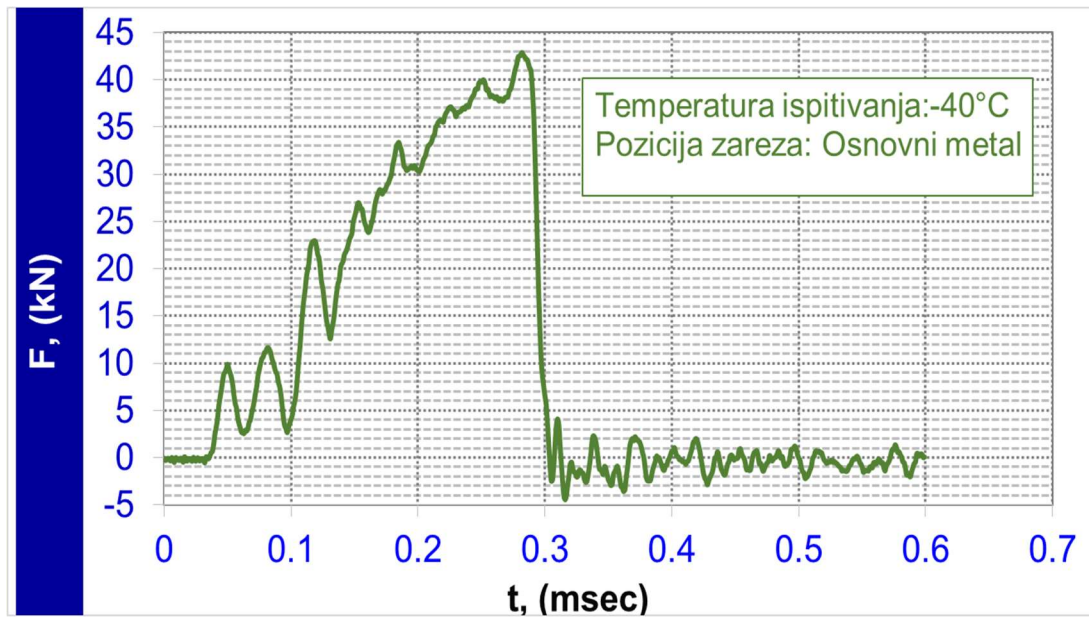
**Slika 4.20.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u osnovnom materijalu na temperaturi 0 °C.





**Slika 4.21.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zarez u osnovnom materijalu na temperaturi  $-20^{\circ}\text{C}$ .





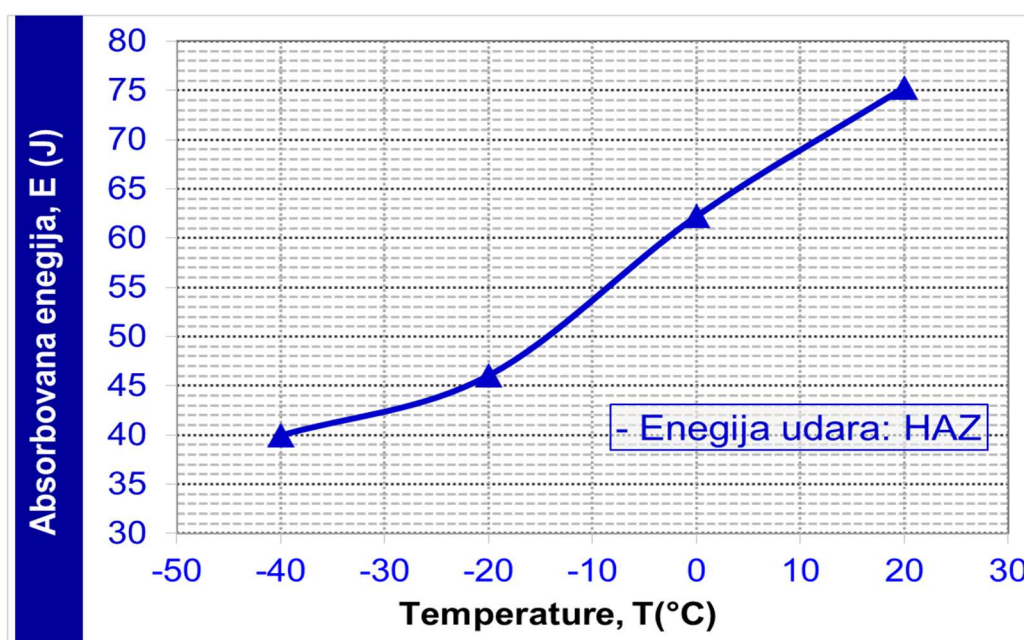
**Slika 4.22.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u osnovnom materijalu na temperaturi -40 °C.

#### 4.2.4.2 Rezultati ispitivanja energije udara na liniji stapanja

Promena energije udara za različite temperature je prikazana u [tabeli 4.4](#). Energija udara na liniji stapanja je u granicama 75,3 i 40,0 J, za temperature 20 °C i -40 °C. Zavisnost energije udara od temperature je data na [slici 4.23](#).

**Tabela 4.4.** Rezultati ispitivanja energije udara sa pozicijom zarez na liniji stapanja.

VHS-LINIJA STAPANJA					
	Temperatura ispitivanja	Ukupna energija	Srednja vrednost	Energija nastanka prsline	Energija širenja prsline
	[°C]	[J]	[J]	[J]	[J]
VHS1	20	65,1	75,3	45,7	19,4
VHS2		90,8		32,4	58,4
VHS3		70,0		48,4	21,6
VHS5		52,7		15,6	37,1
VHS6	0	53,4	62,2	12,7	40,7
VHS7		74,3		32,2	42,1
VHS8		68,4		23,2	45,2
VHS9		50,6		16,4	34,2
VHS10	-20	41,1	46,1	14,2	26,9
VHS11		44,9		25,5	19,5
VHS12		47,6		16,2	31,3
VHS13	-40	39,9	40,0	27,7	12,2
VHS14		49,2		41,8	7,4
VHS15		34,6		20,3	14,3
VHS16		36,2		25,7	10,5



**Slika 4.23.** Energija udara u zavisnosti od temperature sa zarezom na liniji stapanja.

Određivanjem energije udara za liniju stapanja uzorka ispitanog na 20 °C, dobijen je dijagram [slika 4.24.](#), koji pokazuje da je osim energije za nastanak prsline, veliki deo energije utrošen i na rast prsline, što pokazuje da je mehanizam loma duktilni lom. Za nastanak prsline na 20 °C, izmerena energija udara je 45,7 J, a za rast je utrošeno 19,4 J. Dijagrami energija udara za temperaturu 0 °C, -20 °C i -40 °C prikazani na [slikama 4.25. – 27.](#) su slični, imaju nešto manju energiju za rast prsline od one na 20 °C. Energija za nastanak prsline jako varira i u okviru jedne temperature, što može da se objasni činjenicom da prslina raste po liniji stapanja, koja nije homogena.

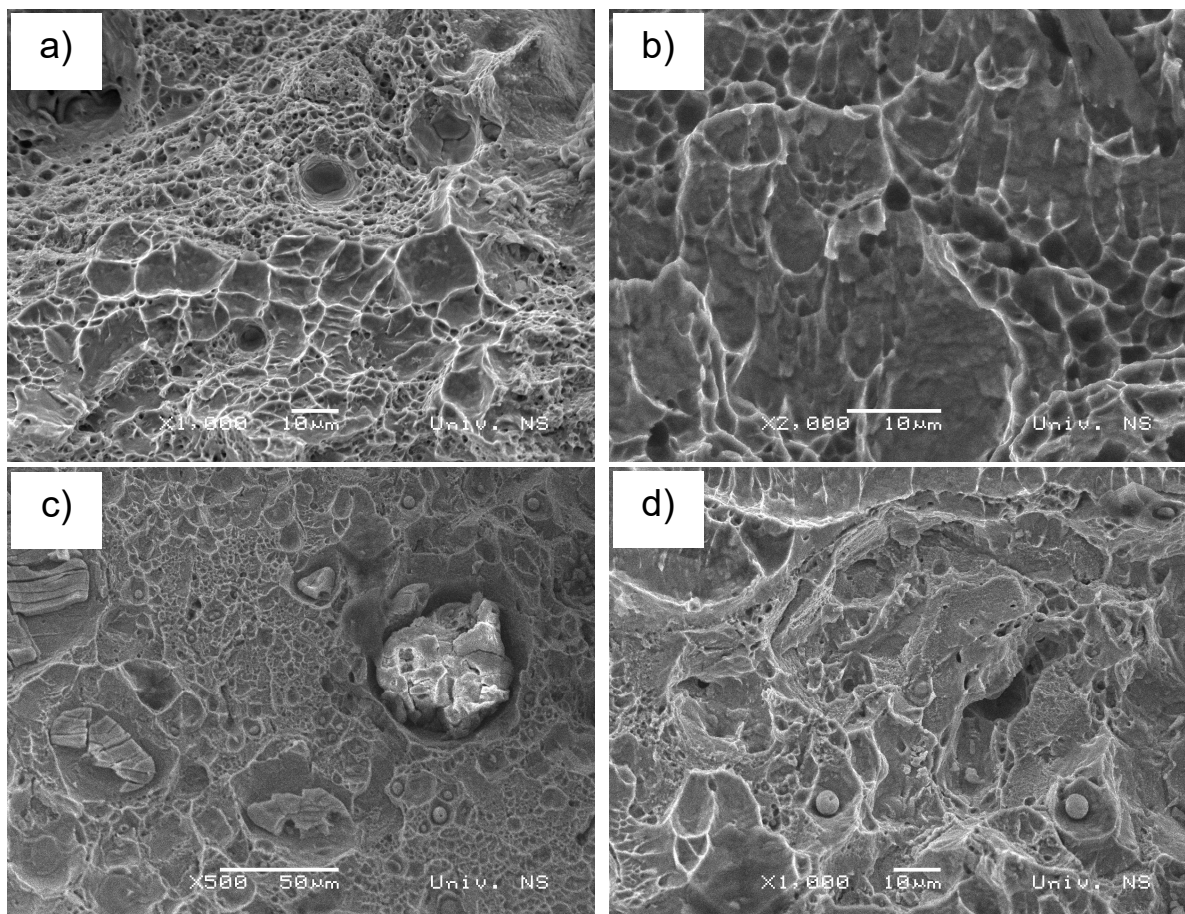
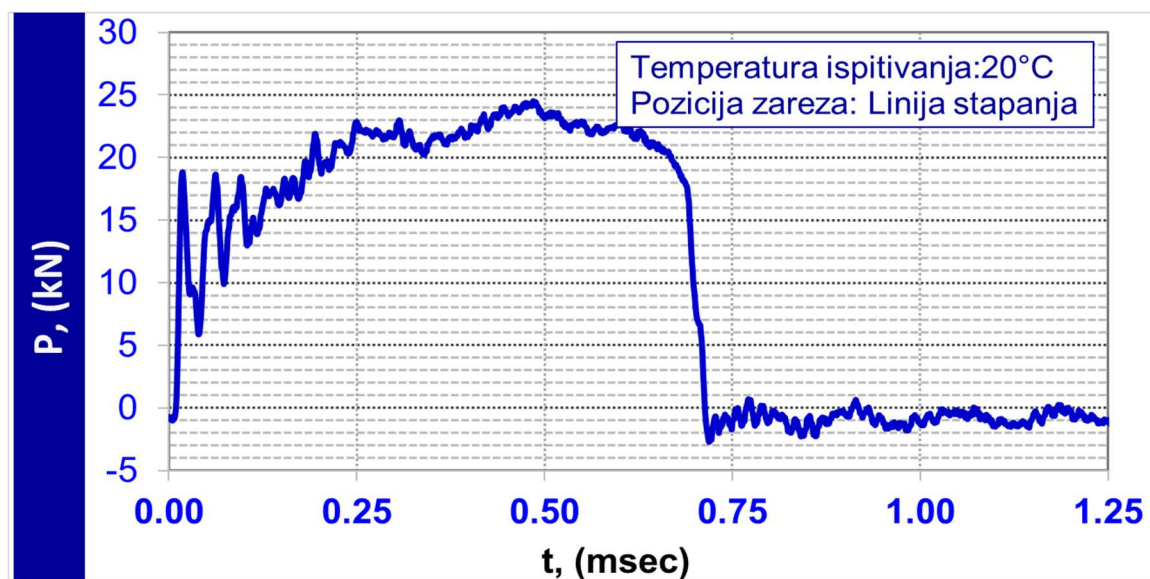
Površina preloma uzorka ispitanog na 20 °C se uglavnom sastoji od jamice tipične za duktilni lom, [slici 4.24. a\)](#) ali su na nekim mestima prisutne smicajne površine što se vidi na [slici 4.24. b\)](#). Na pojedinim mestima su vidljivi uključci i duktilni lom što znači da je prslina ušla u područje metal šava [slika 4.24. c\) i d\)](#).

Površina preloma uzorka ispitanog na 0 °C se sastoji od mešanih područja tipičnih jamica za duktilni lom [4.25. a\)](#), ali su prisutne, smicajne površine što se vidi na [slici 4.25. b\) i d\)](#).

Površina preloma uzorka ispitanog na -20 °C se sastoji od mešanih područja tipičnih jamica za duktilni lom [slika 4.26. a\)](#), i prisutnih smicajnih površina [slika 4.26. b\)](#), ali i deo izrazito krtoog loma sa tipičnim ravnim površinama [slike 4.26. c\) i d\)](#).

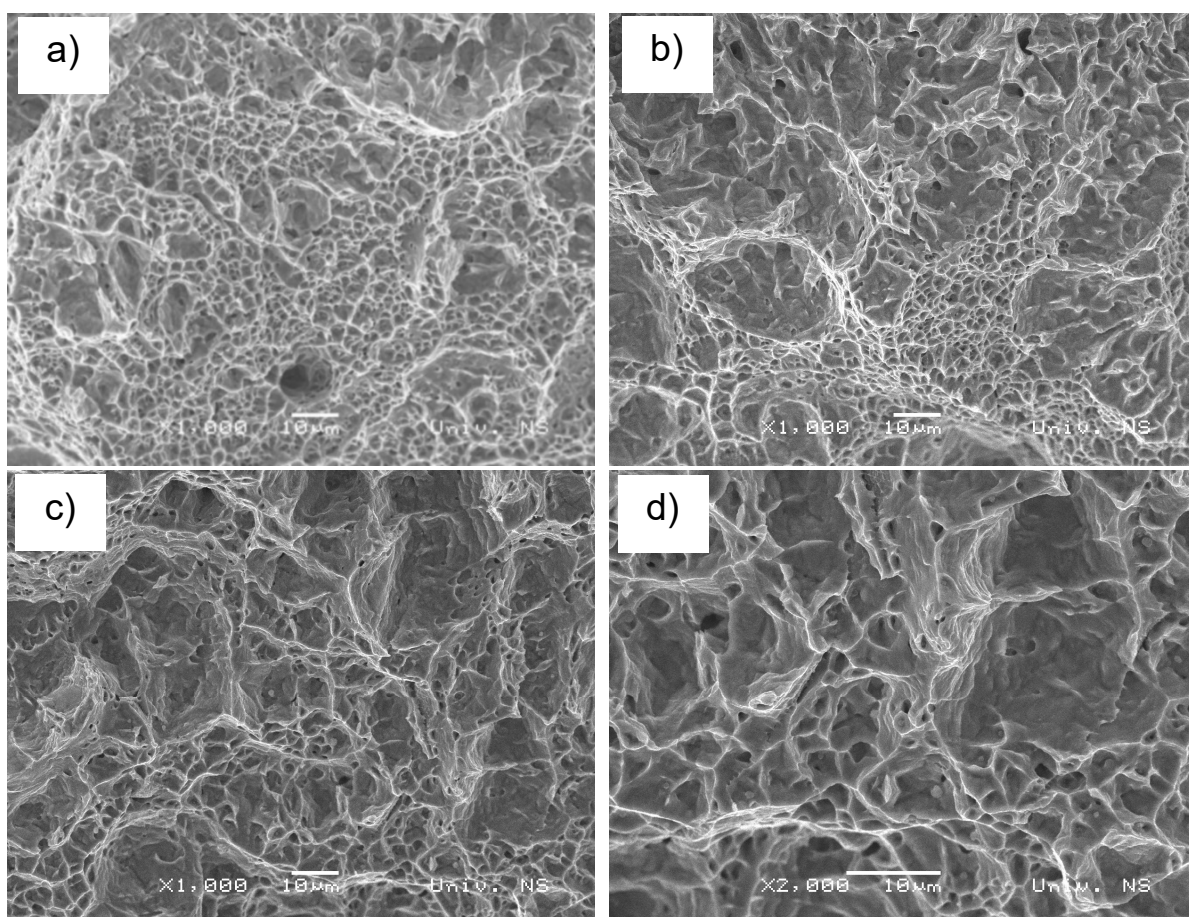
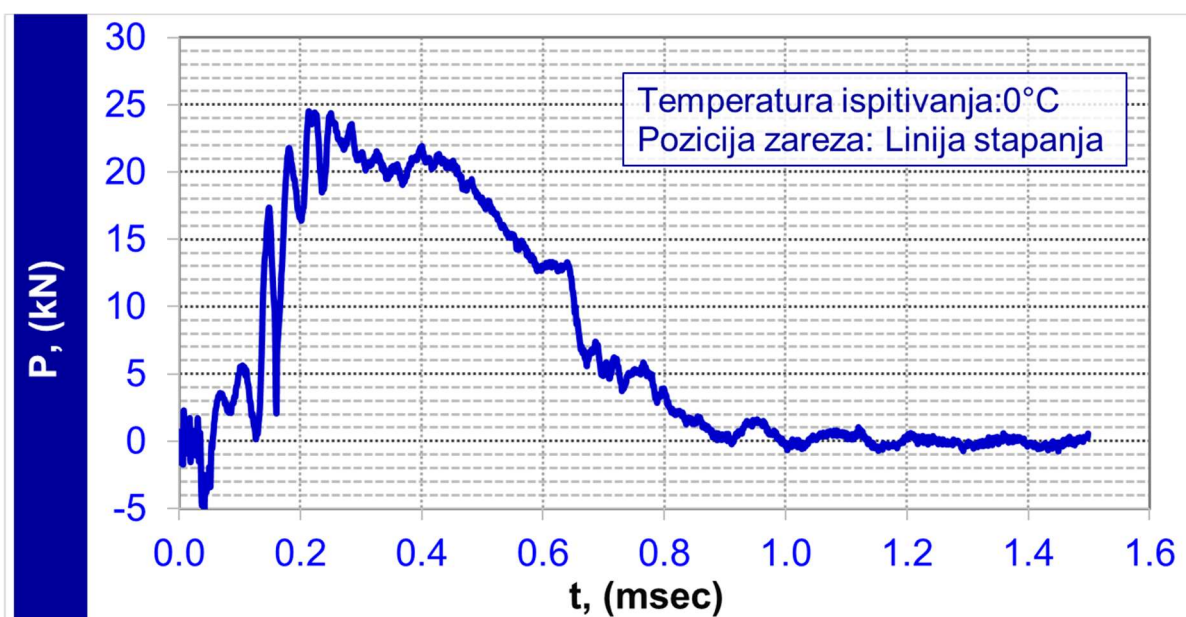
Površina preloma uzorka ispitanog na - 40 °C se sastoji od malog udela područja tipičnih jamica za duktilni lom [slika 4.27. a\)](#), a pretežno prslina raste krto, cepanjem, [slika 4.27. b\) i d\)](#).





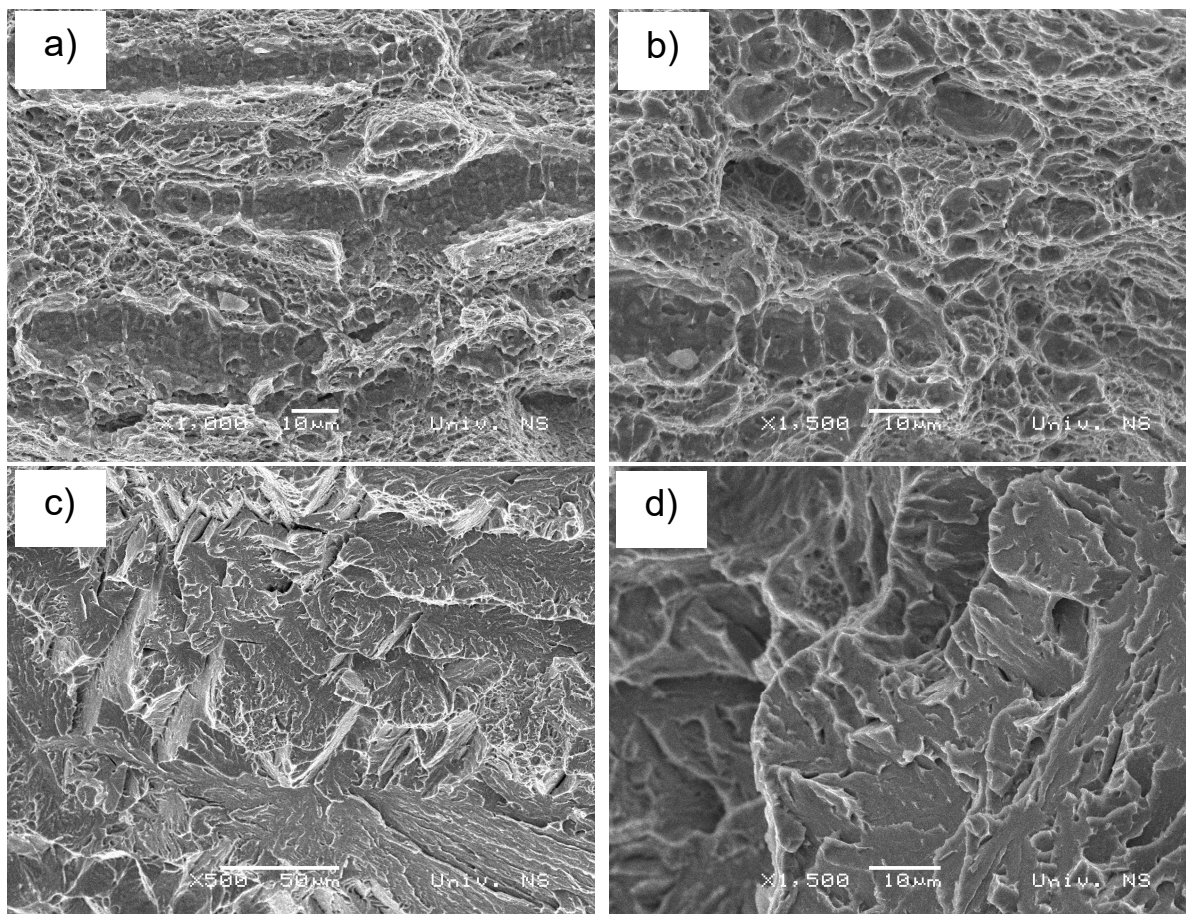
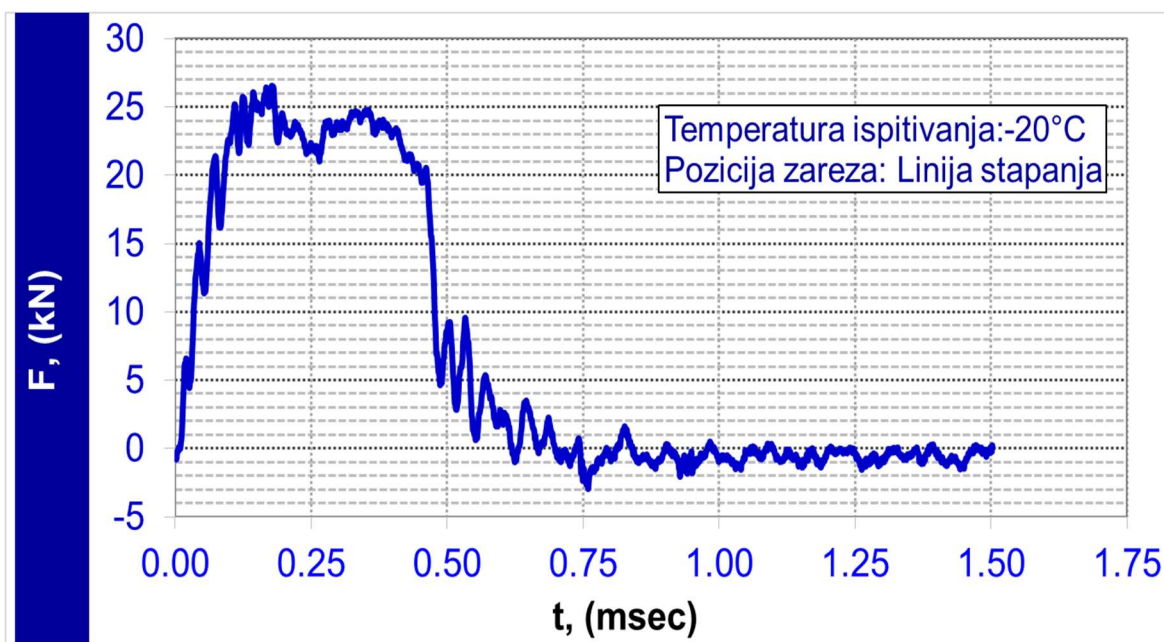
**Slika 4.24.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zarez na liniji stapanja, na temperaturi 20 °C.





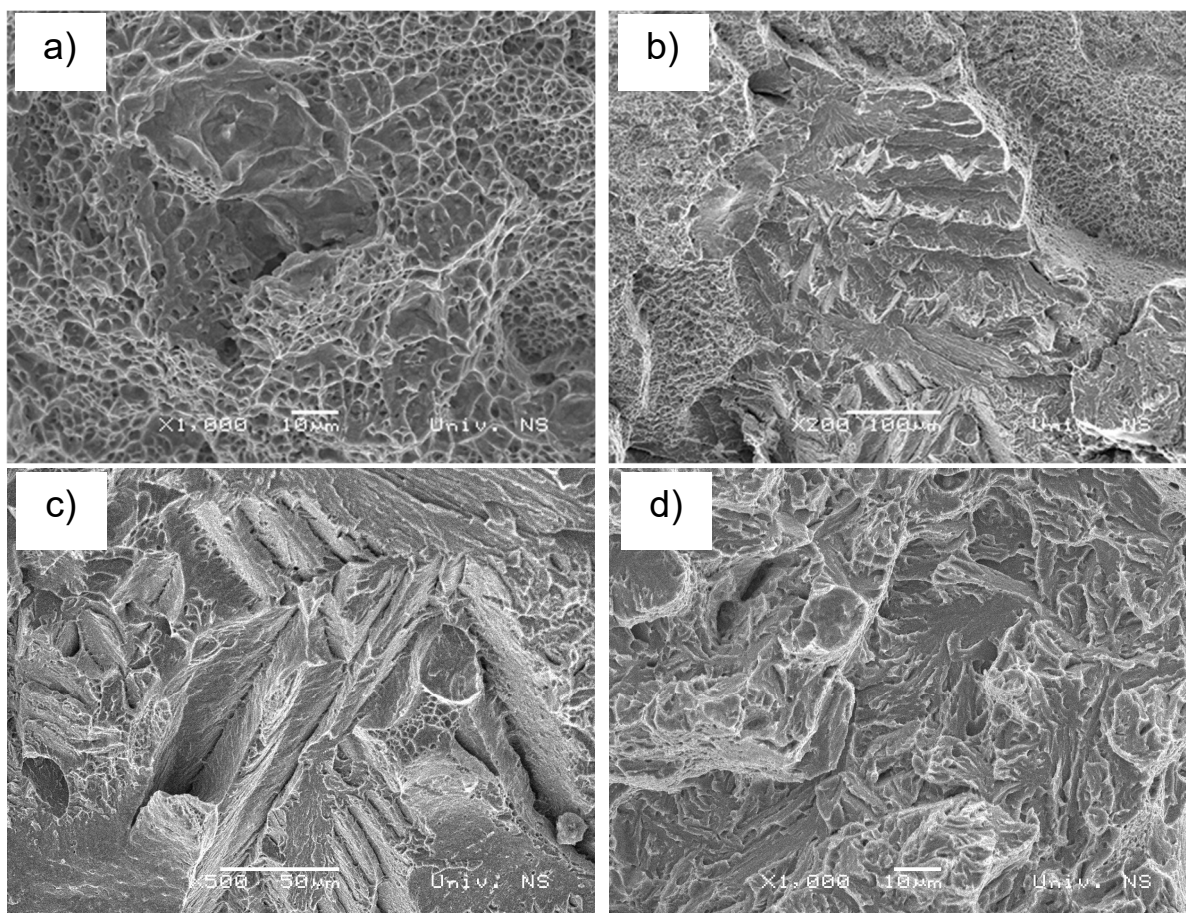
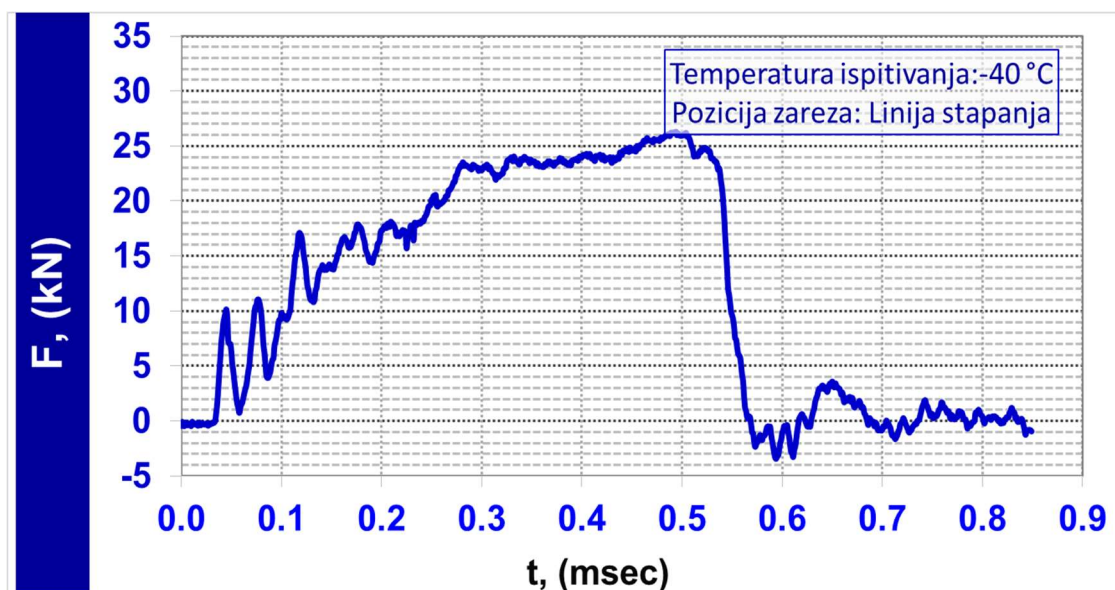
**Slika 4.25.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zarez na liniji stapanja, na temperaturi 0 °C.





**Slika 4.26.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zarez na liniji stapanja, na temperaturi  $-20^{\circ}\text{C}$ .

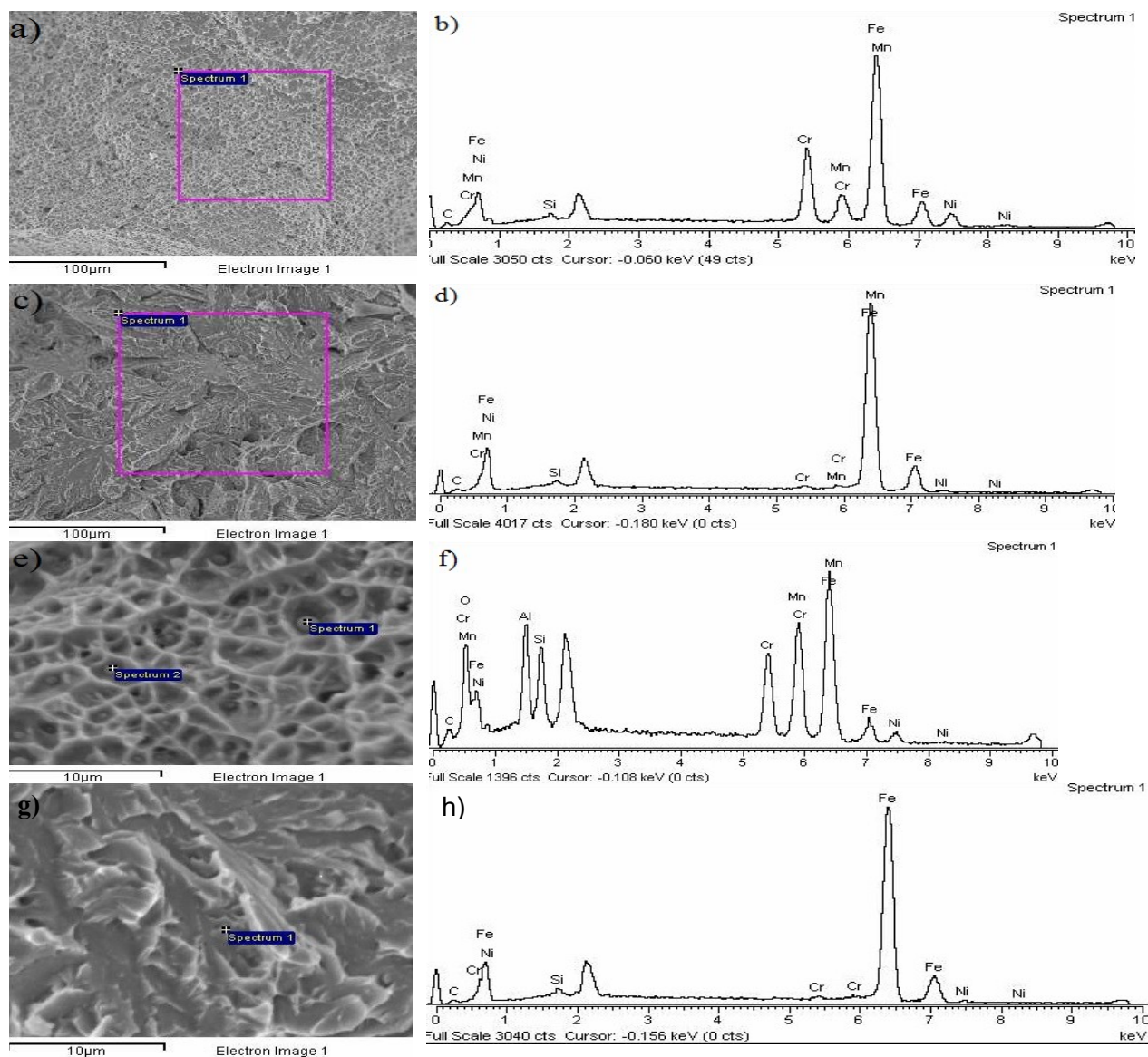




**Slika 4.27.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zarez na liniji stapanja, na temperaturi - 40 °C.

Detaljnija ispitivanja uključaka koji se javljaju na površini preloma uzoraka sa zarezom na liniji stapanja je urađena korišćenjem skening elektronskog mikroskopa, SEM, sa

energetski disperzivnom spektroskopijom, EDS. SEM/EDS je korišćen tamo gde su bili prisutni uključci, da bi se otkrio eventualni uticaj na lom, ali i da se utvrdi hemijski sastav, tj. putanja prsline. SEM/EDS analiza površine preloma uzoraka ispitanih na temperaturama od 20 °C do - 40 °C je prikazana na [slici 4.28](#). Prslina se na 20 °C kreće malo u ZUT-u, malo u metal šavu. Analiza hemijskog sastava u kvadratu na [slici 4.28. a\) i b\)](#) pokazuje da se prslina kreće u metal šavu ( 17 %Cr, 7% Ni, 6% Mn). Na 0 °C je analiziran uključak, koji u sebi sadrži oko 7% aluminijuma, ali i povećanu količinu hroma, [slika 4.28. c\) i d\)](#). Na površini preloma uzorka na -20 °C su pronađeni uključci Mn (17%), Al (7%) i Si (5%), kao i povećana količina hroma, [slika 4.28. e\) i f\)](#). Na - 40 °C je krta površina preloma, prslina raste u ZUT, EDS analiza odgovara osnovnom materijalu, [slika 4.28. g\) i h\)](#).



**Slika 4.28.** SEM/ EDS analiza ispitivanih epruveta prelomljenih na 20 °C a, b), na 0 °C c, d) i na -20 °C e, f) kao i na - 40 °C g, h).

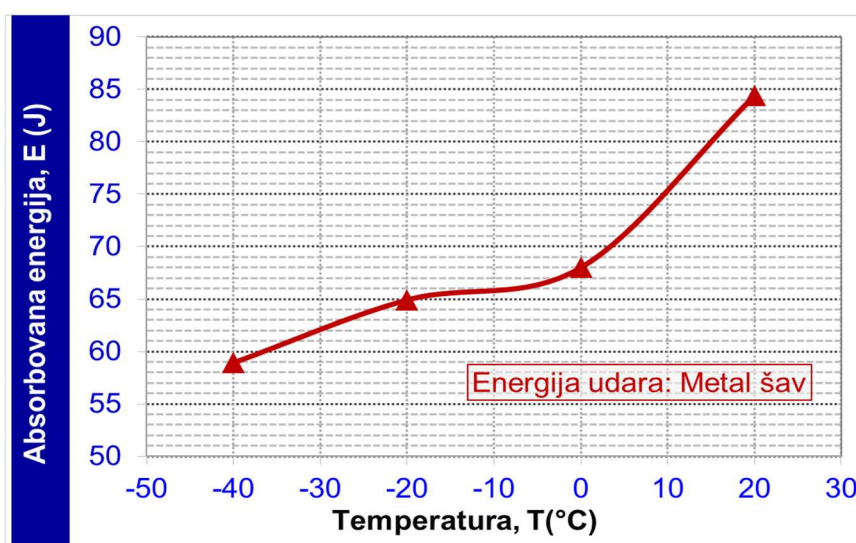


#### 4.2.4.3 Rezultati ispitivanja energije udara u metal šavu

Promena energije udara za različite temperature je prikazana u [tabeli 4.5](#). Energija udara u zoni metal šava je u granicama 84,4 i 61,5 J, za temperature 20 °C i -40 °C. Prelazna temperatura krtosti je data na [slici 4.29](#).

**Tabela 4.5.** Rezultati ispitivanja energije udara sa pozicijom zareza u metal šavu.

VWS-METAL ŠAVA					
	Temperatura ispitivanja	Ukupna energija	Srednja vrednost	Energija nastanka prsline	Energija širenja prsline
	[°C]	[J]	[J]	[J]	[J]
VWS1	20	88,4	84,4	34,9	53,5
VWS2		85,3		29,0	56,3
VWS3		79,5		27,5	51,9
VWS5	0	67,8	68,0	17,5	50,3
VWS6		68,0		24,6	43,4
VWS7		67,8		28,3	39,5
VWS8	-20	68,5	67,4	25,6	43,0
VWS9		70,9		26,9	44,0
VWS10		64,9		27,4	37,5
VWS11	-40	66,7	61,5	24,3	42,4
VWS12		83,3		31,3	52,0
VWS13		51,3		18,7	32,6
VWS14	-40	55,8	61,5	19,5	36,3
VWS15		57,0		19,3	37,7
VWS16		71,6		24,2	47,4



**Slika 4.29.** Energija udara u zavisnosti od temperature za poziciju zareza u metal šavu.

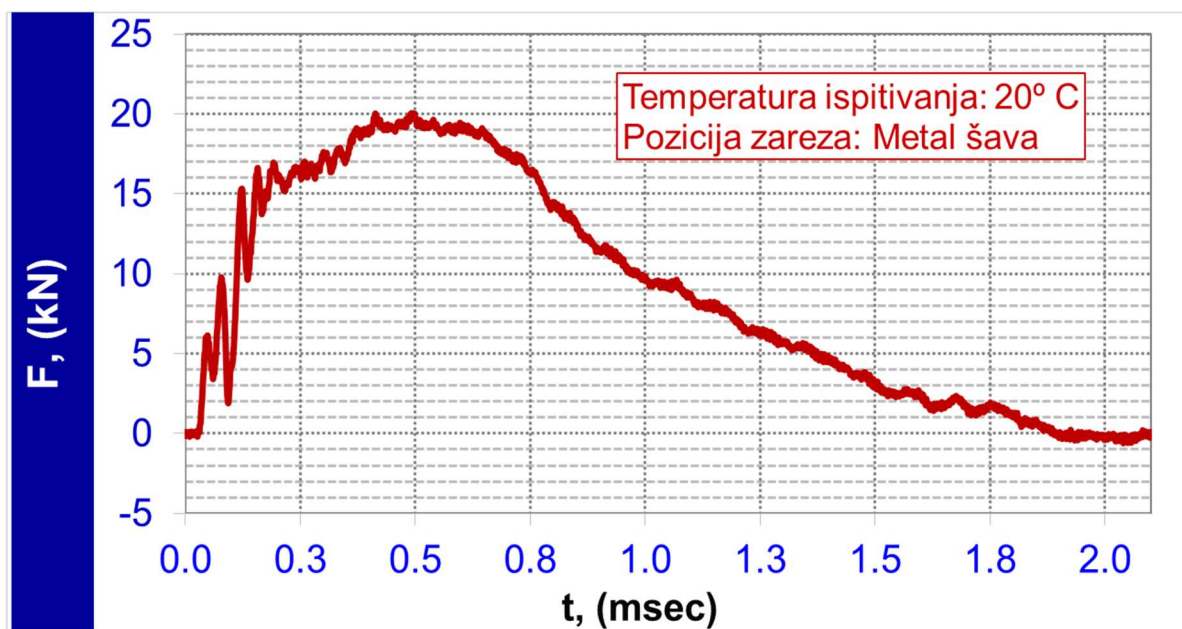
Određivanjem energije udara za oblast metal šava uzorka ispitanog na 20 °C, dobijen je dijagram [slika 4.30.](#), koji pokazuje da je za nastanak prsline u austenitnom metal šavu potrebna manja energija nego za rast prsline, što ukazuje na veliku duktilnost metal šava. Za nastanak prsline na 20 °C, izmerena energija udara je 29,0 J, a za rast je utrošeno 55,4 J. Dijagram energija udara za temperaturu 0 °C, -20 °C i -40 °C prikazani su na [slikama 4.31 – 33](#), su slični, samo imaju nešto manju energiju za rast prsline od one na 20 °C.

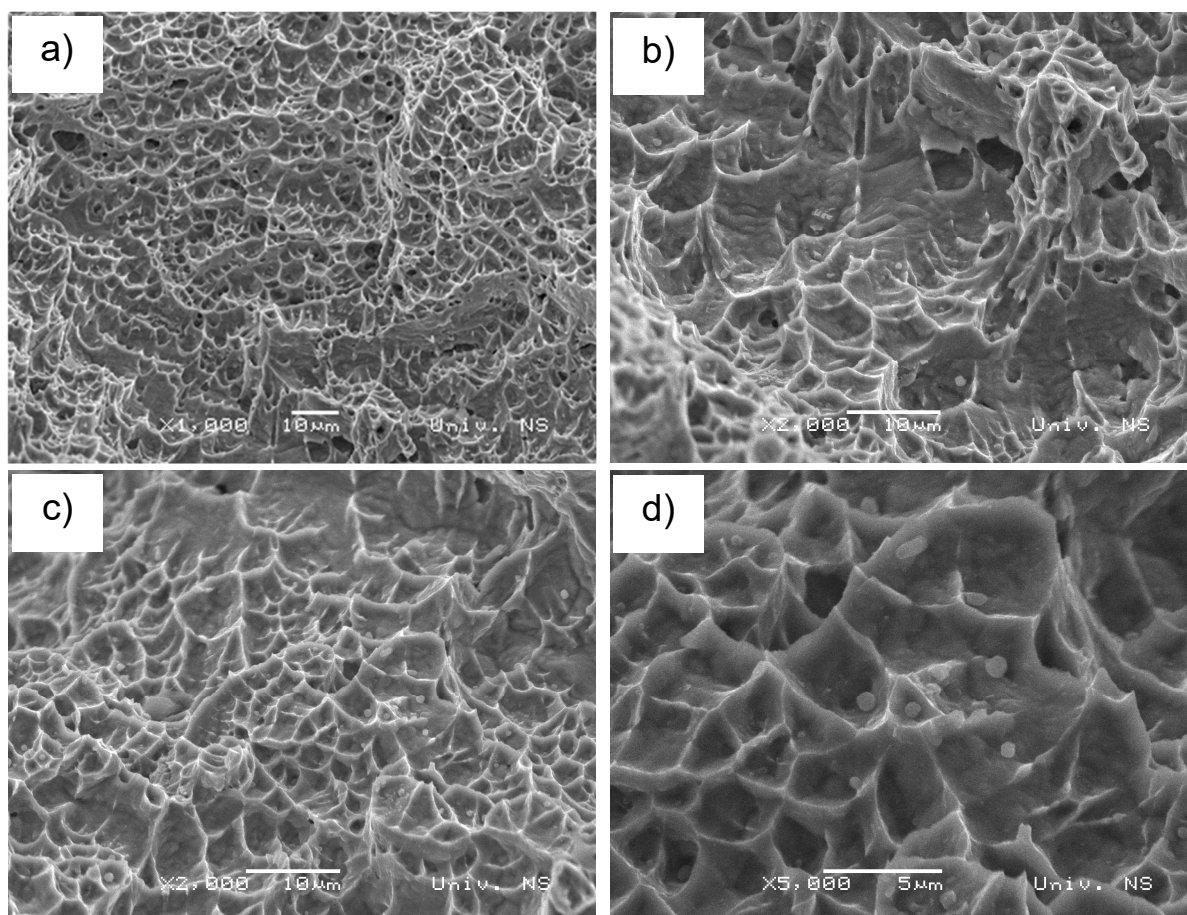
Površina preloma uzorka ispitanog na 20 °C se uglavnom sastoji od jamice tipične za duktilni lom, [slika 4.30.](#), ali su na nekim mestima prisutne smicajne površine što se vidi na [slici 4.30. a\) i b\)](#). Pretežno su duktilne jamice, [slika 4.30. c\) i d\)](#).

Površina preloma uzorka ispitanog na 0 °C se sastoji od mešanih područja prisutne su smicajne površine [4.31. a\) i b\)](#) ali i tipične jamice za duktilni lom, [slika 4.31 c\) i d\)](#).

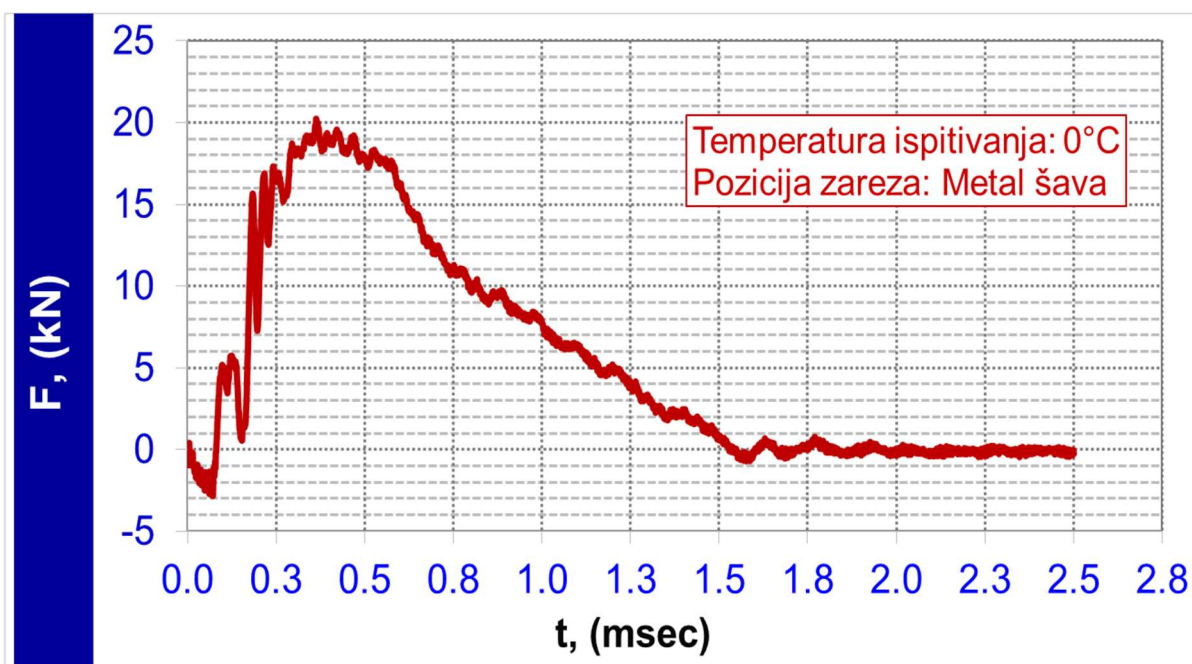
Površina preloma uzorka ispitanog na -20 °C se takođe sastoji područja prisutnih smicajnih površina [4.32. a\) i c\)](#), ali i tipičnog duktilnog loma [4.32. d\)](#).

Površina preloma uzorka ispitanog na -40 °C je mešavina malih područja tipičnih jamica za duktilni lom i smicajnih površina [slika 4.33. a\) i d\)](#).

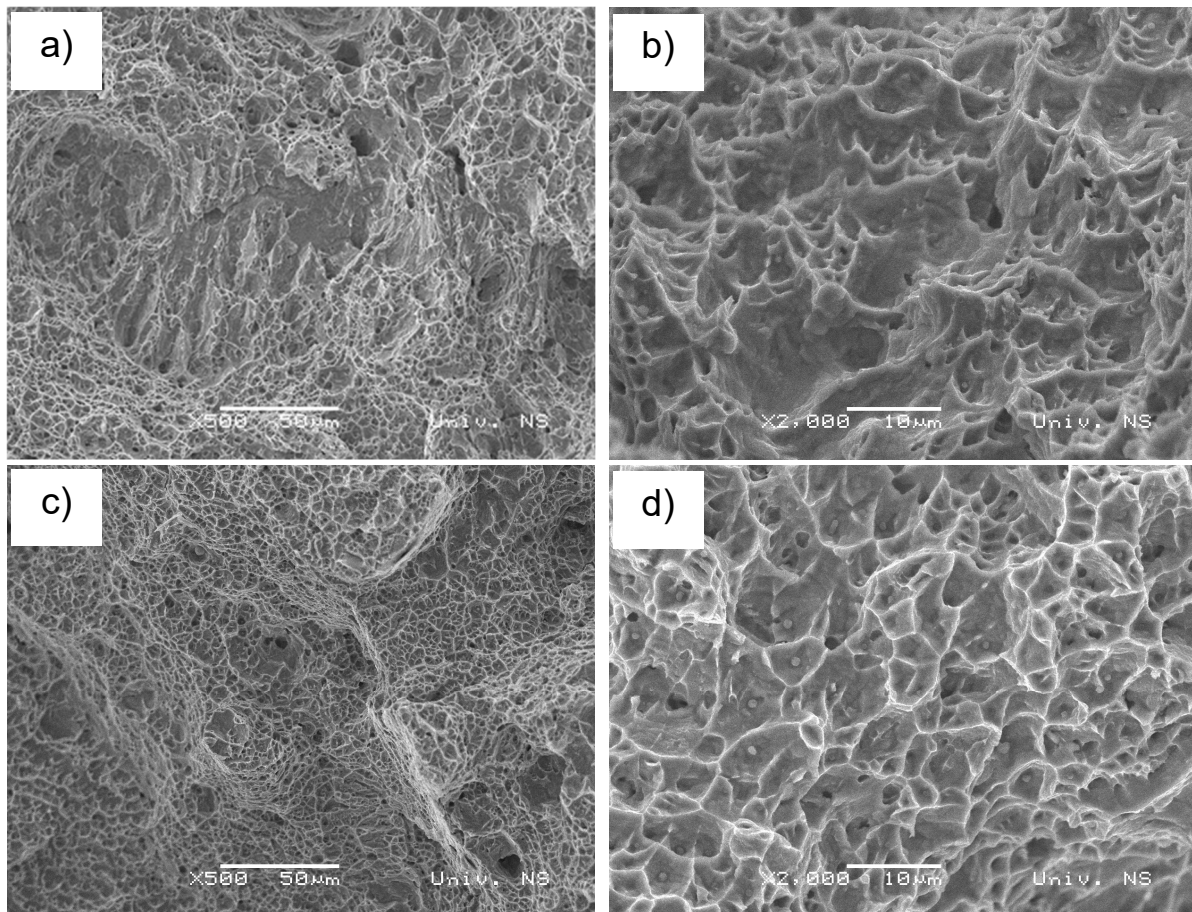




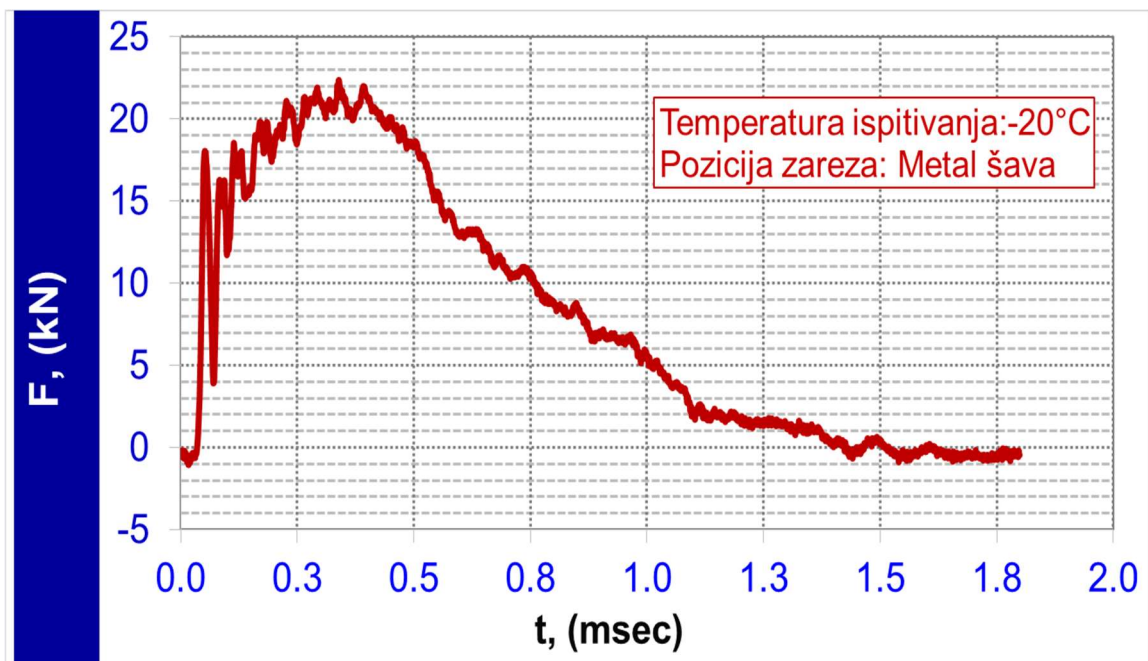
**Slika 4.30.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u metal šavu, na temperaturi 20 °C.

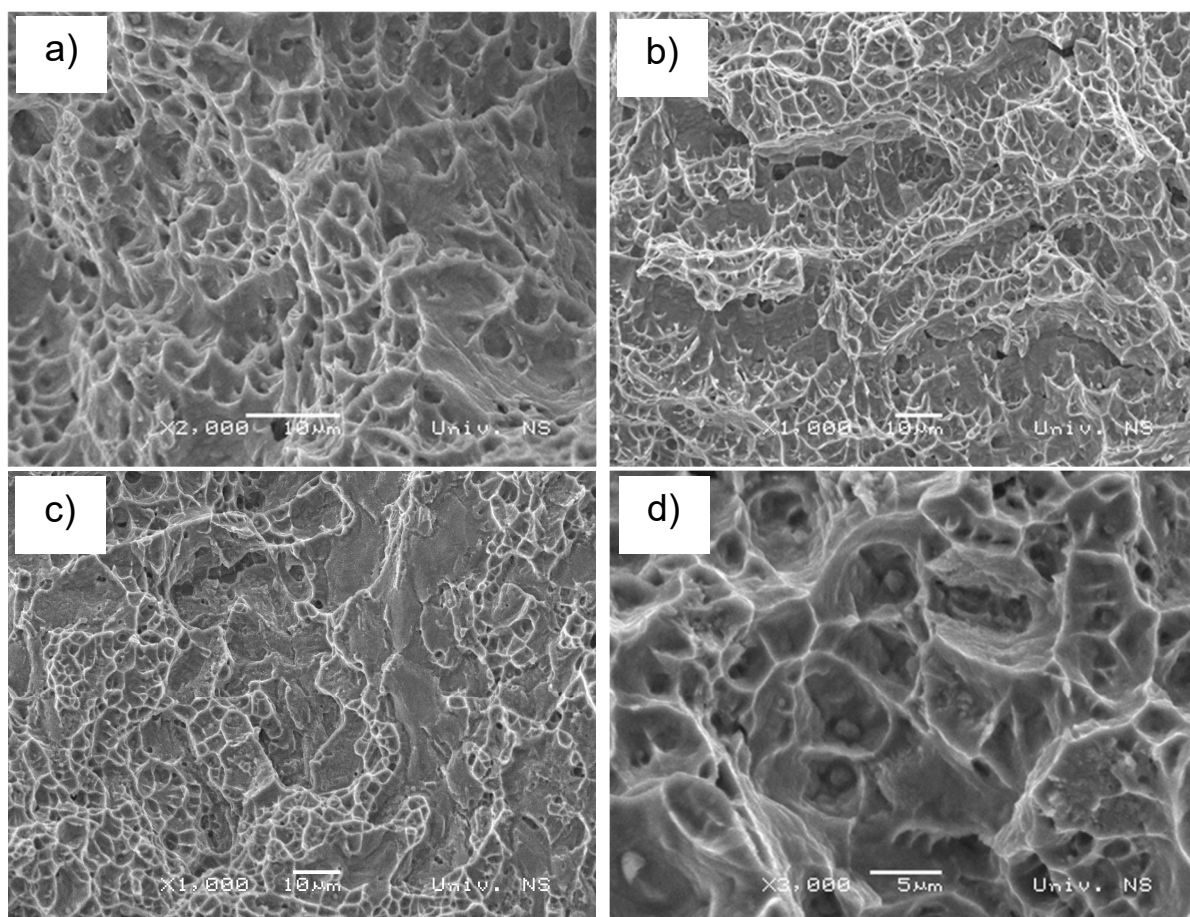




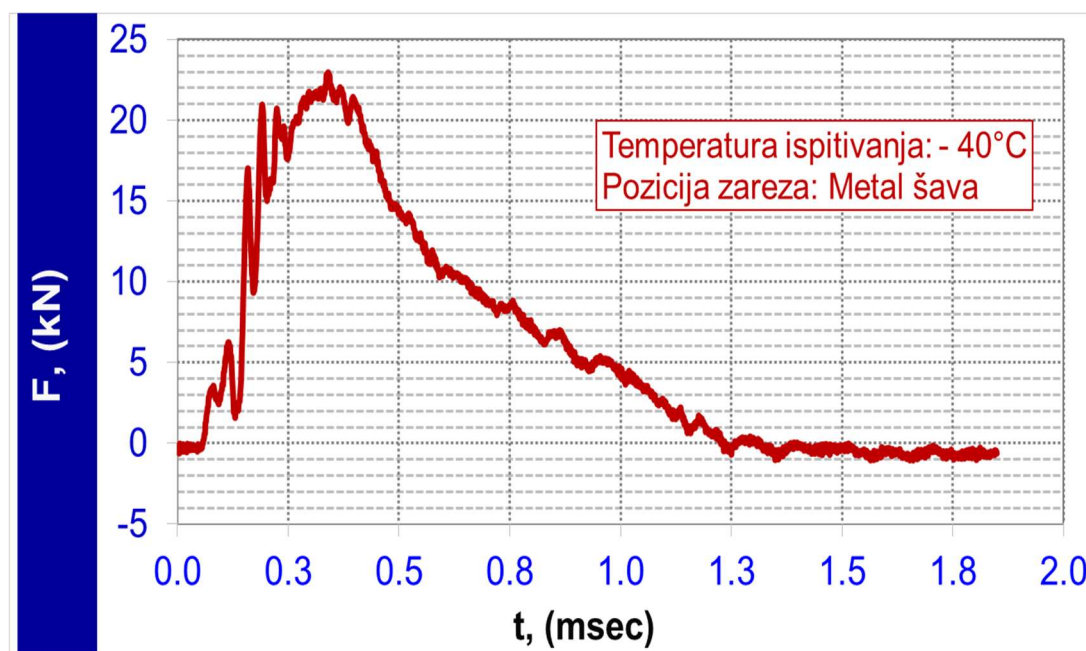


**Slika 4.31.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u metal šavu, na temperaturi 0 °C.

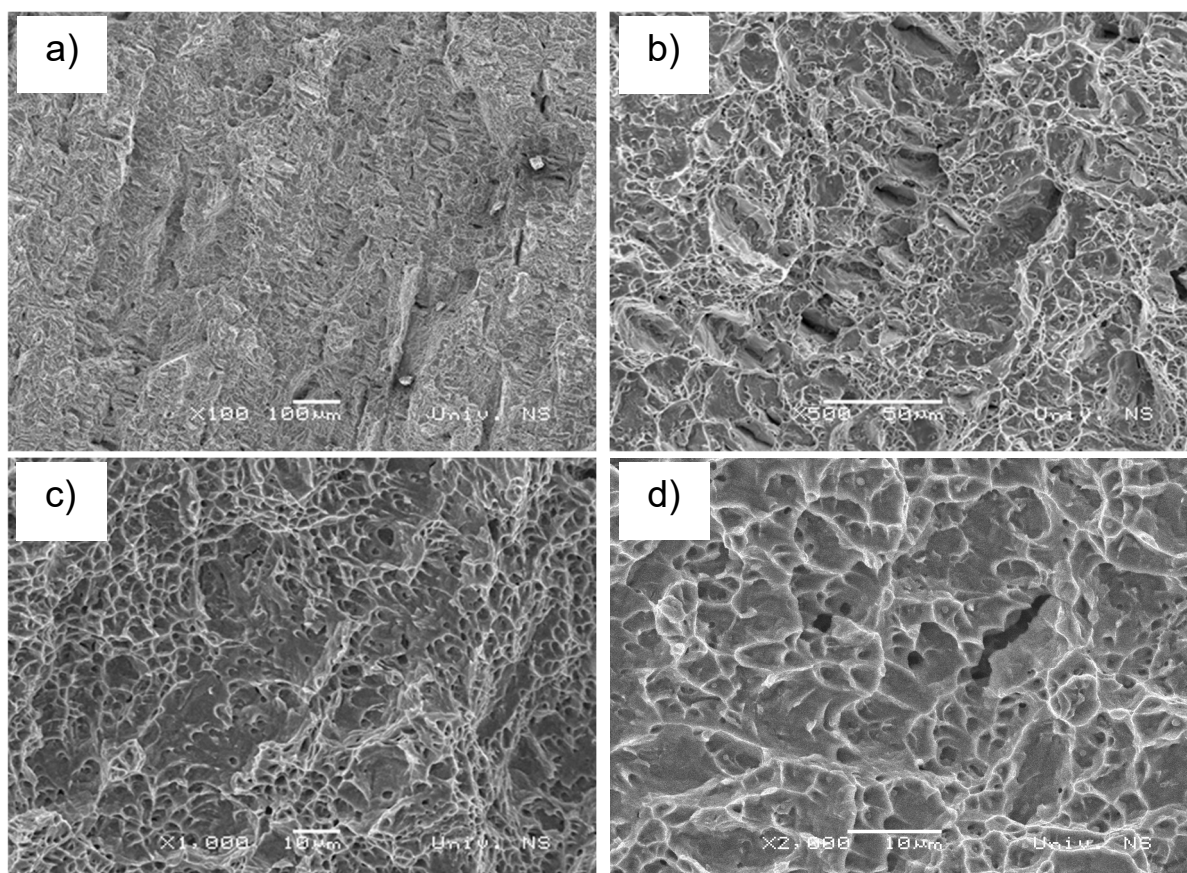




**Slika 4.32.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine preloma sa pozicijom zareza u metal šavu, na temperaturi -20 °C.







**Slika 4.33.** Rezultati ispitivanja instrumentiranim klatnom i fraktografija površine prelom sa prslinom u metal šavu, na temperaturi - 40 °C.

### 4.3 Rezultati ispitivanja mehanike loma zavarenog spoja

Ispitivanje epruveta sa prslinama, je najstrožiji uslov za ocenu krtoeg ponašanja, zbog troosnog naponskog stanja na vrhu prsline. Efekat heterogenosti strukture i mehaničke osobine zavarenog spoja određuju položaj nastanka a potom i razvoja prsline. Cilj ispitivanja je bio određivanje parametara mehanike loma u komponentama zavarenog spoja: osnovnom materijalu, metal šavu i zoni uticaja toplote, jer to za zavareni spoj pancirnog čelika može da bude pokazatelj kvaliteta.

#### 4.3.1 Rezultati parametara mehanike loma u zoni osnovnog materijala i fraktografija površine prelom

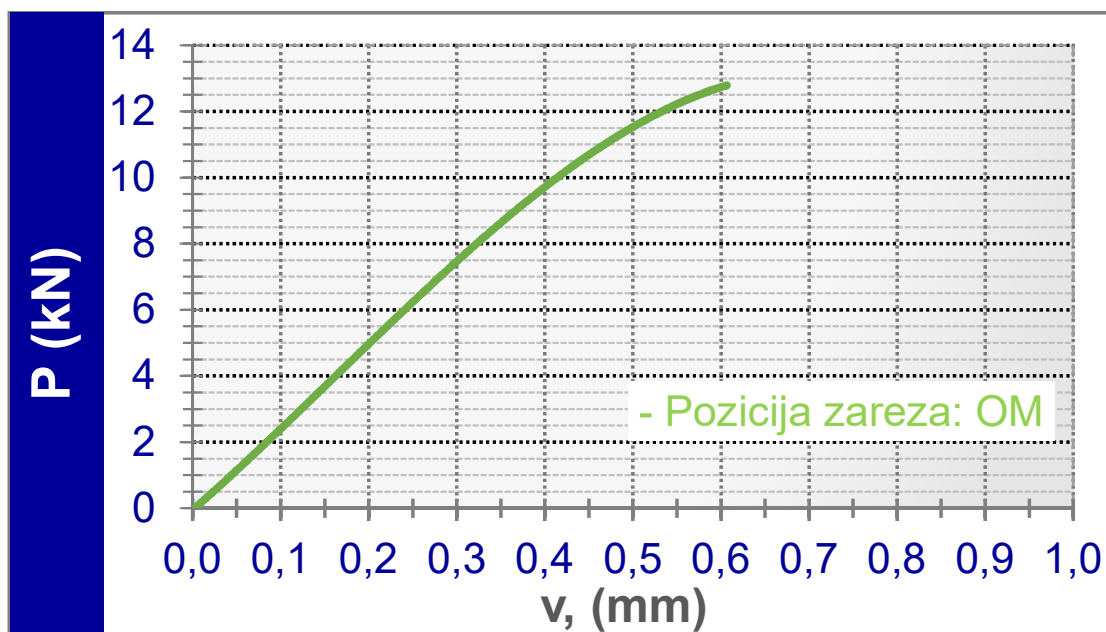
Priprema uzoraka za ova ispitivanja su veoma zahtevna, pre ispitivanja se pravi mehanička a zatim zamorna prslina. Dužina prsline stvorene mehanički i zamornim opterećenjem je izmerena optičkim uređajem prikazanim na [slici 3.20](#). Na osnovu rezultata merenja, može se konstatovati da su zahtevi standarda ASTM E1820-16 [102], za dužinu zamorne prsline ispunjeni na svih pet ispitivanih epruveta. Zahtevi u

pogledu razlike između srednje vrednosti dužine prsline i izmerenih dužina prsline su u okviru 5 %. Potom, razlike u dužinama prsline od 10 % na slobodnim bočnim površinama su ispunjeni. Kao i da bilo koji deo od čela zamorne prsline bliži čelu mašinskog zareza nije manji od 1,3 mm. Rezultati merenja dužine prsline su prikazani u tabeli 4.6.

Zapis sila-pomeranje,  $P$ - $V$  za jednu od epruveta je prikazan na slici 4.34. U početku, pomeranje  $P$ - $V$  je raslo linearno sa silom  $P$ , a u toku procesa nije primećeno skokovito pomeranje. Rezultati merenja dužine prsline su prikazani u tabeli 4.6.

**Tabela 4.6.** Rezultati merenja dužine zamorne prsline.

Oznaka epruvete	Dužina mašinski stvorene prsline [mm]	Dužina zamorne prsline [mm]	Ukupna dužina prsline [mm]
SE(B) PM 1	5,1	5,2	10,3
SE(B) PM 2	5,0	5,2	10,2
SE(B) PM 3	5,1	5,2	10,3
SE(B) PM 4	5,1	5,2	10,3
SN(B) PM 5	4,9	5,2	10,1



**Slika 4.34.** Dijagram  $P - v$ , za poziciju zareza u osnovnom materijalu.

Rezultati mehanike loma u osnovnom materijalu, ispitivanih pet epruveta, pod oznakama SE(B) PM1-PM5, su prikazani u tabeli 4.7. Vrednost  $K_Q$  postaje kritični faktor intenziteta napona,  $K_{IC}$ , odnosno žilavost loma, ako su ispunjeni uslovi za debljinu.

**Tabela 4.7.** Rezultati mehanike loma u osnovnom materijalu.

Specimen	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>S</i>	<i>P<sub>q</sub></i>	<i>F (a/W)</i>	<i>K<sub>Q</sub></i>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]		[MPa*m <sup>1/2</sup> ]
SEN (B) PM1	2,06	1,00	8	11,54	2,75	86,2
SEN (B) PM2	2,06	1,06	8	11,86	2,75	83,5
SEN (B) PM3	2,06	1,06	8	12,11	2,79	86,6
SEN (B) PM4	2,06	1,06	8	11,90	2,75	83,8
SEN (B) PM5	2,06	1,08	8	13,02	2,75	90

Na svih pet ispitivanih epruveta, primenom jednačine 3.4, zadovoljen je uslov  $K_I$  ili  $K_{IC}$  debljine, odnosno  $K_Q$  - faktora kao  $K_{IC}$ , jednačina 3.4, tako da srednja vrednost faktora koncentracije napona  $K_{IC}$ , iznosi 86,1 MPa\*m<sup>1/2</sup>.

Površina preloma ispitivanih epruveta, [slika 4.35.](#), se koristila za utvrđivanje simetričnosti čela zamorne prsline nakon čega i za merenje dužine prsline. Na površini preloma se vidi zarez, zamorna prslina (glatka površina) i na kraju statički lom (hrapava površina).

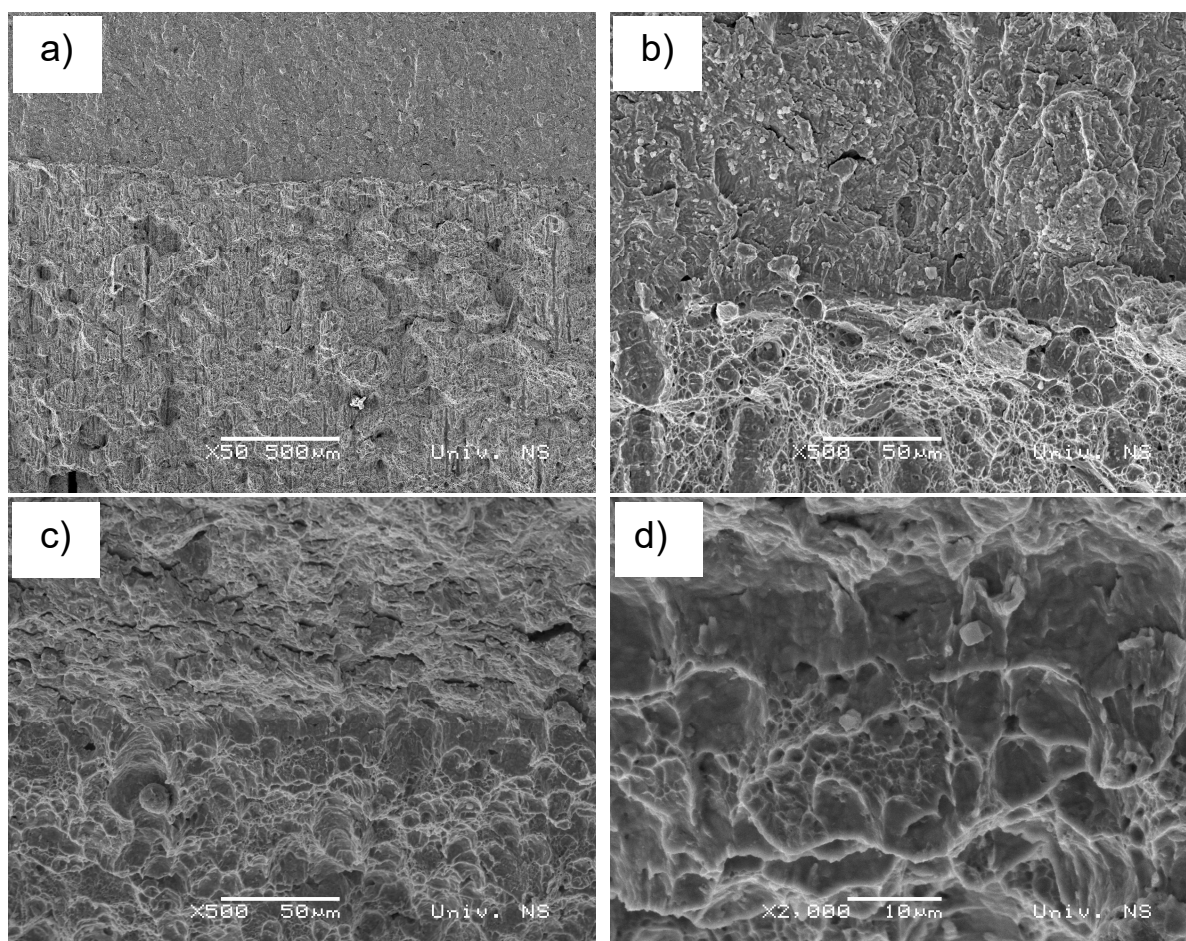


**Slika 4.35.** Slika površine preloma nakon ispitivanja mehanike loma za prslinu u osnovnom materijalu.

**Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla u osnovnom materijalu**



Na slikama 4.36. se vidi granica između zamora i otvaranja prsline [slika 4.36. a](#)). Vidi se glatka površina zamornog loma i otvaranje posle koga nastaje duktilni lom [slika 4.36. b](#)), a kad se nagne, vidi se zona razvlačenja (strech zona) [slika 4.36. c, d](#)).



**Slika 4.36.** Površina preloma uzorka pri određivanju  $K_{Ic}$  a) granica zamor-otvaranje b,c i d) zona razvlačenja.

#### 4.3.2 Rezultati parametara mehanike loma u zoni uticaja toplote

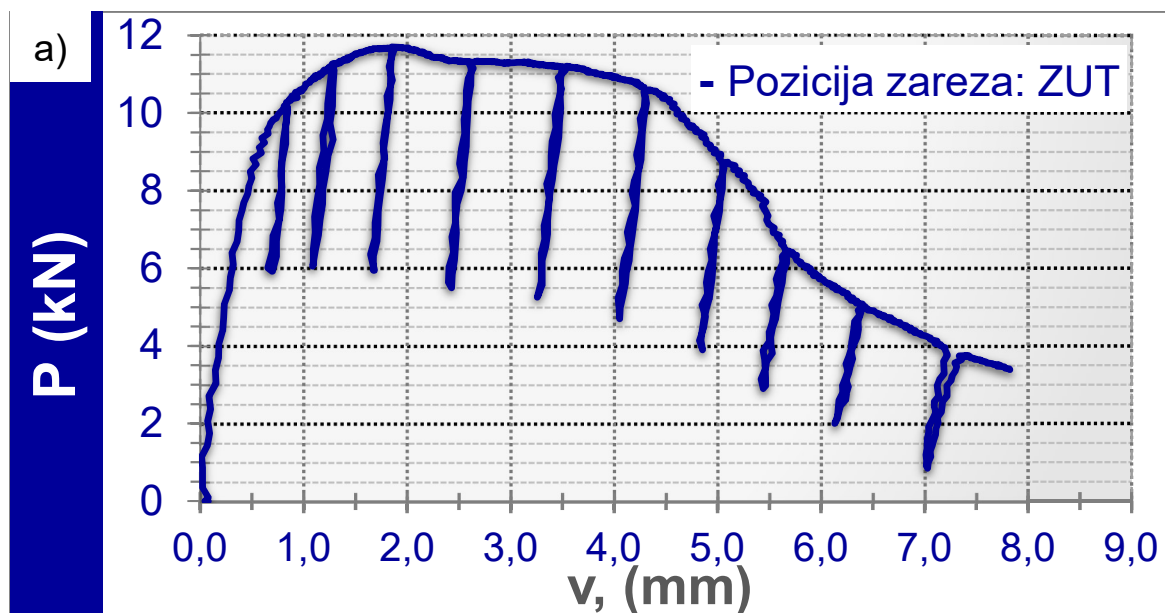
Dužina zamorne prsline nakon loma je izmerena na pet mesta, sa položajima prikazanim na [slici 3.21. a](#)), na osnovu koje je izračunata srednja vrednost dužine prsline. Rezultati merenja dužine prsline su prikazani u [tabeli 4.8](#). Na osnovu rezultata merenja, može se konstatovati da su zahtevi standarda ASTM E1820-16 [\[102\]](#), za dužinu zamorne prsline ispunjeni.

**Tabela 4.8.** Merenje ukupne dužine prsline za poziciju u ZUT-u.

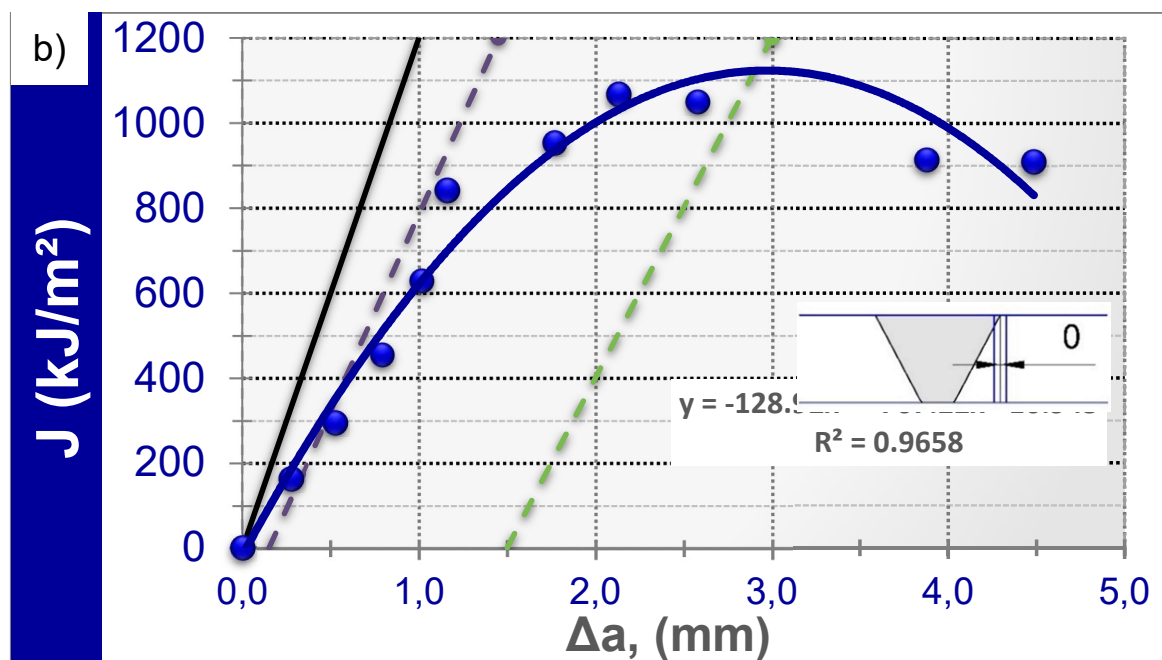
	Dužina mašinski stvorene prsline	Dužina zamorne prsline	Ukupna dužina prsline
	[mm]	[mm]	[mm]
SE(B)H4	5,14	4,81	10,01

Pošto se materijal ne ponaša krto, mora se koristiti pristup EPML (elasto-plastične mehanike loma), te je za određivanja  $J$  - integrala, korišćena tehnika pada potencijala i popustljivosti sa jednom epruvetom, [slika 4.37. a](#)). U toku ispitivanja, urađen je odgovarajući broj rasterećivanja sa ciljem dobijanja što pravilnijeg rasporeda priraštaja prsline  $\Delta a$ . Kod rasterećivanja, delujuća sila se smanjila za 30 %. Vrednost  $J$ -integrala, se može izmeriti i u zavisnosti od rasta fizičke dužine prsline  $a_p$ , koristeći najmanje četiri tačke unutar određenih granica razvoja prsline. Vrednosti  $J$ -integrala su se beležile u zavisnosti od  $\Delta a_p$ , nakon čega je dobijena tzv.  $J$ -R kriva, [slika 4.37. b](#)). Linija zatupljivanja je određena u skladu sa jednačinom 3.10. Izračunate vrednosti za iniciranje prsline su prikazane u [tabeli 4.8](#). Tačka iniciranja prsline se procenila određivanjem linije zatupljivanja u skladu sa jednačinom  $J=2*\sigma_y*\Delta a$ .

Paralelno sa linijom zatupljivanja prava linija preseca apscisu  $\Delta a$  u tačkama 0,15 i 1,5 mm. Unutar ove dve prave se nalaze sedam tačaka, što zadovoljava standard da se bar četiri tačke nađu u ovom području. Kroz sve tačke prolazi regresiona linija koristeći metod najmanjeg kvadratnog odstupanja promene  $J$  - integrala sa dužinom prsline  $a$ :  $\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \Delta a_p$ . Kritična vrednost  $J$  - integrala,  $J_{IC}$ , je dobijena presekom regresione prave i linije zatupljivanja, i iznosi 355 kJ/ m<sup>2</sup>. Na osnovu kritičnog  $J_{IC}$  integrala pomoću izraza 3.12, je posredno određena žilavost loma,  $K_{IC}$ , koja iznosi 286 MPa\*m<sup>1/2</sup>.







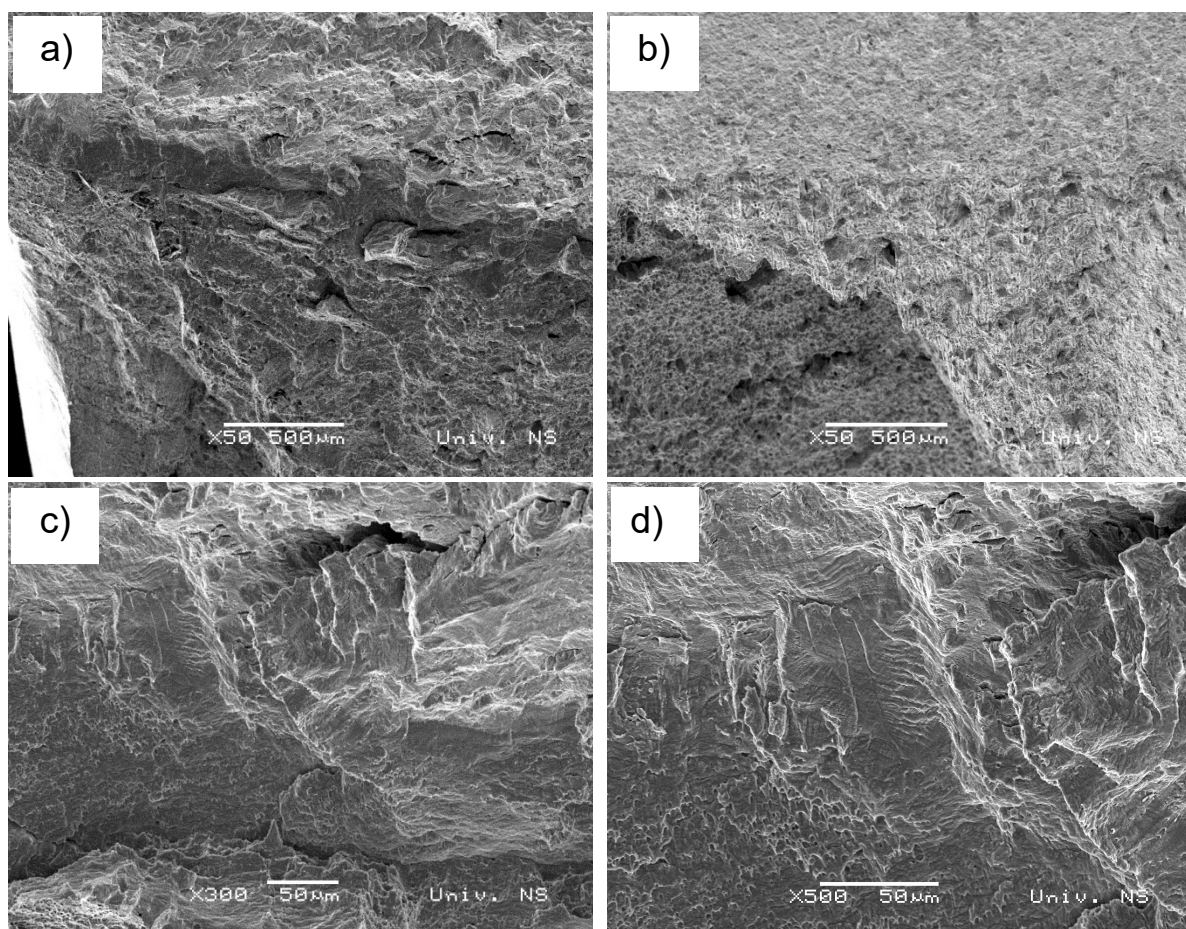
Slika 4.37. Dijagrami a)  $P - V$  i b)  $J - \Delta a$ , sa zarezom u zoni uticaja toplote.

#### Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla u ZUT-u

Nakon dobijanja  $J-R$  krive, ispitana je površina preloma, SEM mikroskopom, na epruveti SE(B) H4. Položaj isecanja je prikazan na slici 4.38. Na slici 4.39. a, b) se vidi granica između zamornog loma i duktilnog loma sa vidljivom zonom razvlačenja. Na slici 4.39. c, d), se vidi na nagnutim uzorcima glatka površina loma i zona razvlačenja sa deformisanim jamicama duktilnog.



Slika 4.38. Položaj isecanja uzorka iz ZUT-a.



**Slika 4.39.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta sa zarezom u zoni ZUT.

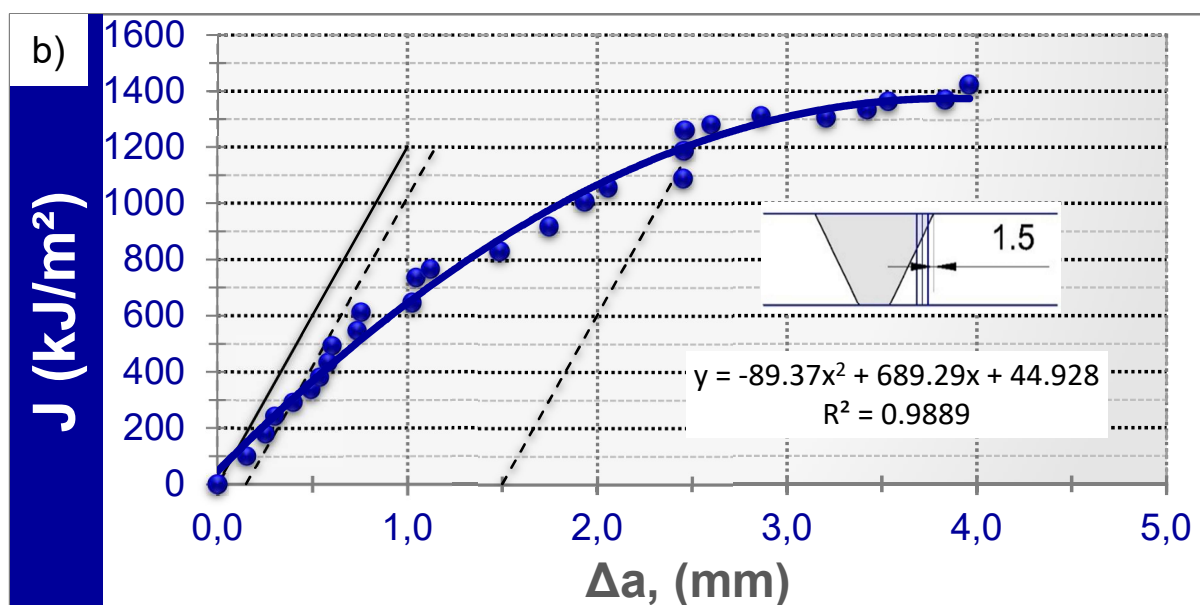
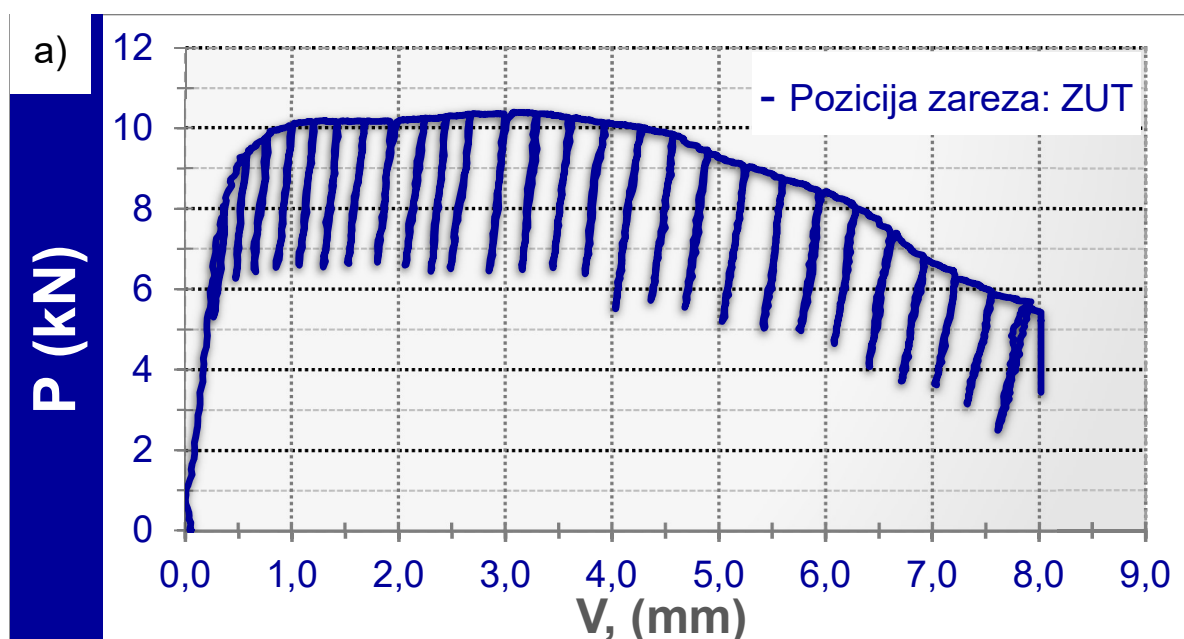
### Rezultati parametara mehanike loma sa prslinom u ZUT / metal šavu

Epruveta je pripremljena za ispitivanja pravljenjem zamorne prsline, dužine prikazane u [tabeli 4.9](#). Rezultati ispitivanja tehnikom pada potencijala i popustljivosti sa jednom epruvetom su prikazani dijagramom na [slici 4.40. a\)](#). U toku ispitivanja urađen je odgovarajući broj rasterećivanja dok je *J-integral* određen kao i u prethodnom slučaju i prikazan je na [slici 4.40. b\)](#).

**Tabela 4.9.** Merenje ukupne dužine prsline u ZUT/metal šavu.

	Dužina mašinski stvorene prsline	Dužina zamorne prsline	Ukupna dužina prsline
	[mm]	[mm]	[mm]
SE(B)H1	5,25	4,79	10,04
SE(B)H2	5,25	4,85	10,10
SE(B)H3	5,25	5,08	10,33

Vrednost kritičnog  $J$ -integrala,  $J_{IC}$ , iznosi  $355 \text{ kJ/m}^2$ . Žilavost loma, za poziciju prsline u ZUT-u je određena posredno na osnovu kritičnog  $J_{IC}$  integrala,  $K_{IC}$  iznosi  $286 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .



Slika 4.40. Dijagrami a)  $P - V$  i b)  $J - \Delta a$ , sa pozicijom zarez u ZUT/metal šavu.

### Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla na prelazu ZUT-a i metal šava

Karakterizacija površine je urađena na epruveti sa oznakom SE(B) H3. Položaj isecanja je prikazan na slici 4.41.





**Slika 4.41.** Položaj isecanja uzorka iz ZUT/metal šava.



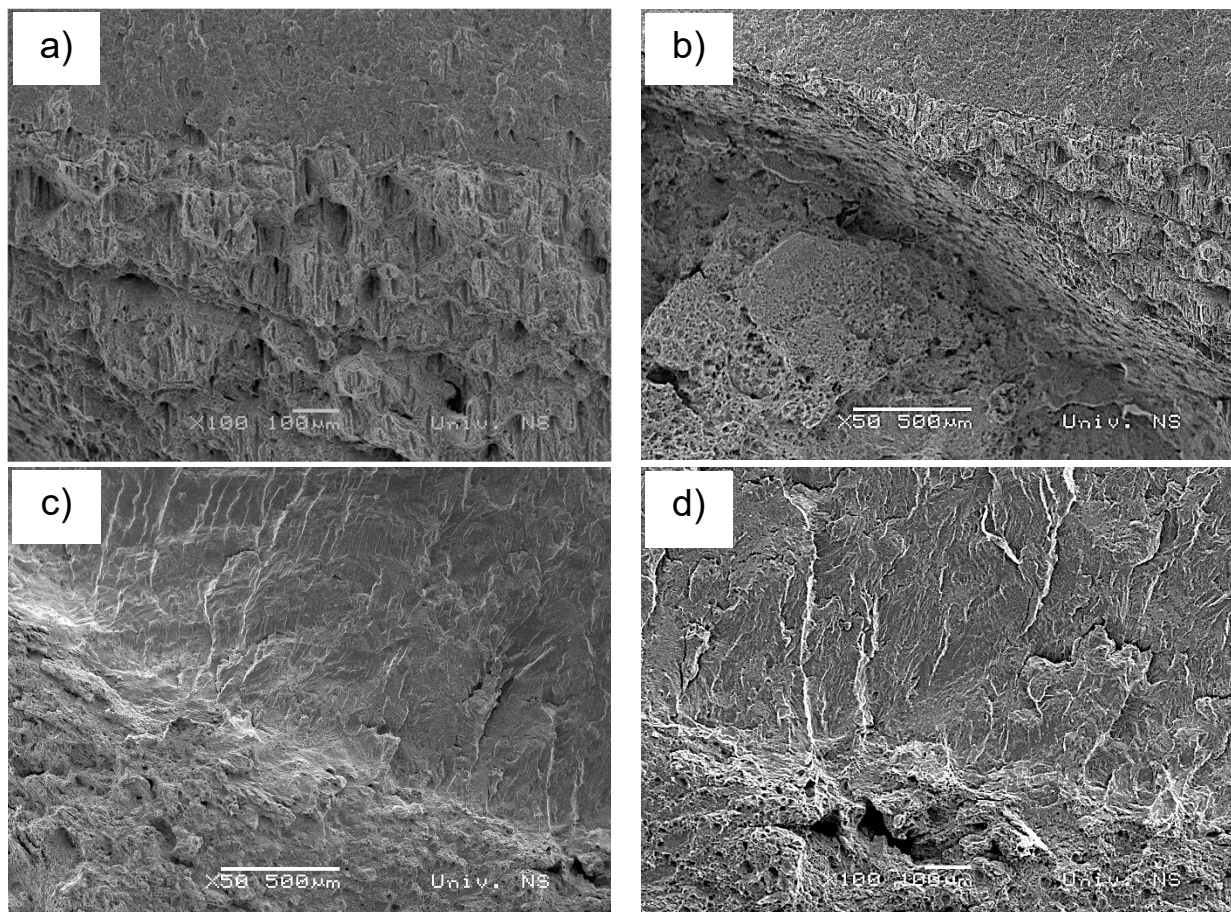
**Slika 4.42.** Prelomljena epruveta sa zarezom u ZUT kod epruvete ispitane mehanikom loma.



**Slika 4.43.** Prelomljena epruveta sa zarezom u ZUT/metal šavu kod epruvete ispitane mehanikom loma.

Nakon ispitivanja mehanike loma [slika 4.42](#) i [slika 4.43](#), pristupilo se ispitivanju karakterizacije površine preloma SEM mikroskopom. Ispitana je površina preloma na epruveti SE(B) H<sub>3</sub>. Granica između zamora i otvaranja prslina je prikazana na [slici 4.44. a\)](#), na pojedinim mestima se vidi da je prslina menjala pravac, odnosno da je lom po liniji stapanja, [slika 4.44. b\)](#). Zona razvlačenja je približno pod uglom od 45°, [slika 4.44. c, d\)](#).





**Slika 4.44.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta sa zarezom u ZUT/metal šavu.

Vrednost kritičnog *J-integrala*,  $J_{IC}$ , iznosi  $357 \text{ kJ/m}^2$ . Žilavost loma,  $K_{IC}$  za poziciju prsline u ZUT-u je određena posredno na osnovu kritičnog *J-integrala*,  $K_{IC}$  koji iznosi  $287 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

#### 4.3.3. Rezultati parametara mehanike loma u zoni metal šava

Dužina prsline je izmerena na pet mesta, sa položajima prikazanim na [slici 3.21. a\)](#), na osnovu koje je izračunata srednja vrednost dužine prsline. Rezultati merenja dužine prsline su prikazani u [tabeli 4.10](#).

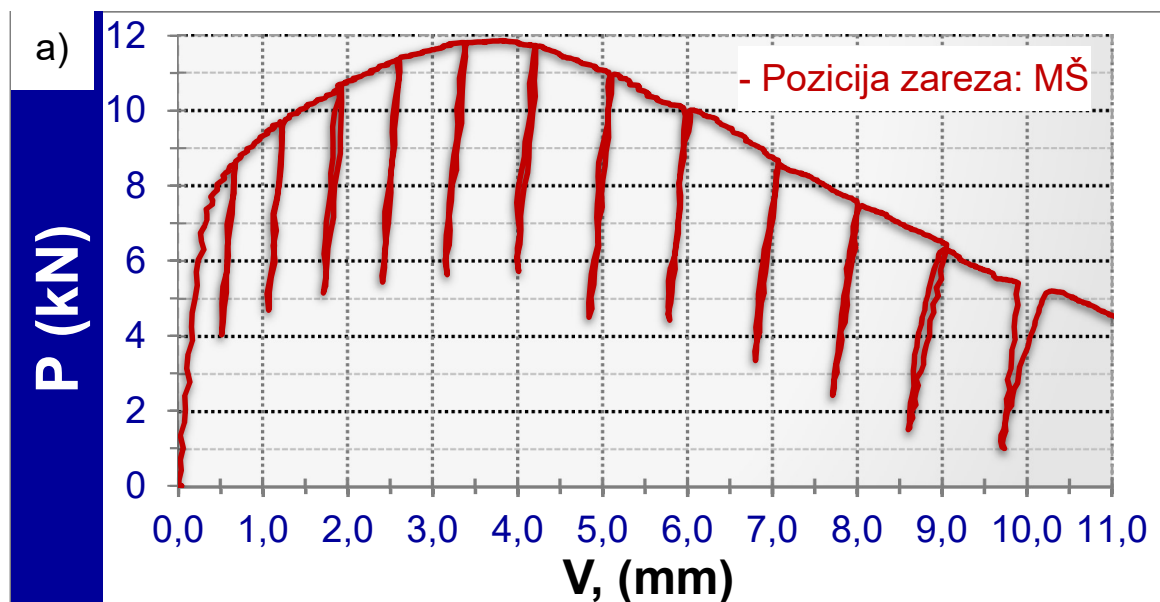
**Tabela 4.10.** Merenje ukupne dužine prsline u zoni metal šava.

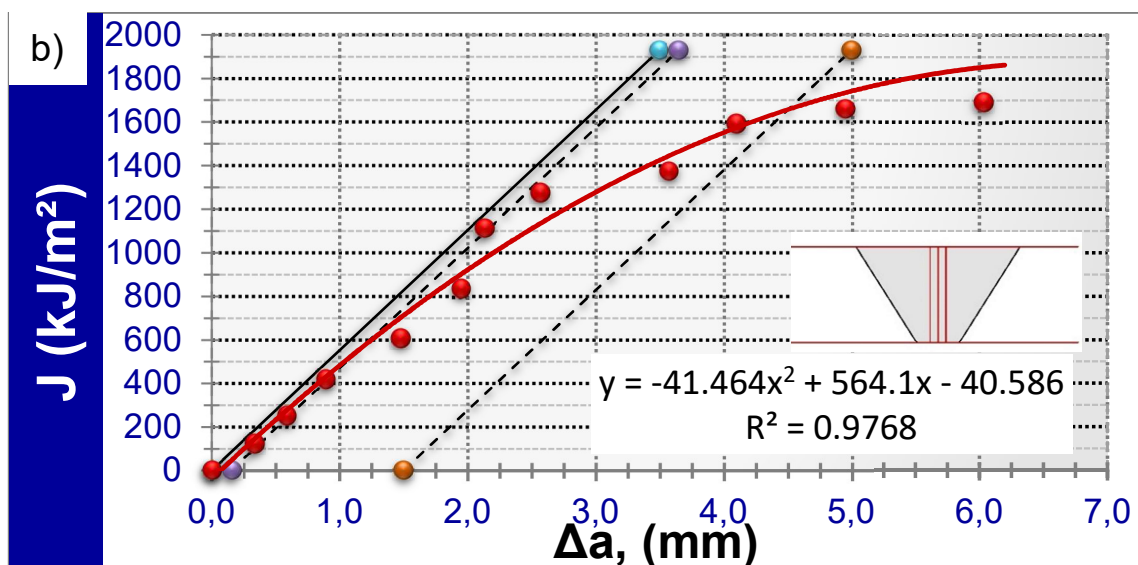
	Dužina mašinski stvorene prsline	Dužina zamorne prsline	Ukupna dužina prsline
	[mm]	[mm]	[mm]
SE(B)W1	5,28	4,79	10,07
SE(B)W2	5,27	4,81	10,08
SE(B)W3	5,28	4,74	10,02

Rezultati ispitivanja tehnikom pada potencijala i popustljivosti sa jednom epruvetom su prikazani dijagramom na slici 4.45. a). *J-integral* je je određen kao i u prethodnim slučajevima. Vrednost kritičnog *J-integrala* iznosi  $545 \text{ kJ/m}^2$ , tabela 4.11. Žilavost loma za poziciju prsline u ZUT-u se odredio posredno na osnovu kritičnog  $J_{IC}$  integral,  $K_{IC}$  iznosi  $355 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

**Tabela 4.11.** Vrednosti kritičnog *J-integrala*,  $J_{IC}$  i žilavosti loma  $K_{IC}$ .

Oznaka epruvete	Kritični <i>J-integral</i> $J_{IC}$	Kritični faktor intenziteta napona $K_{IC}$
	[ $\text{kJ/m}^2$ ]	[ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]
SE(B)W1	525	348
SE(B)W2	550	356
SE(B)W3	560	359

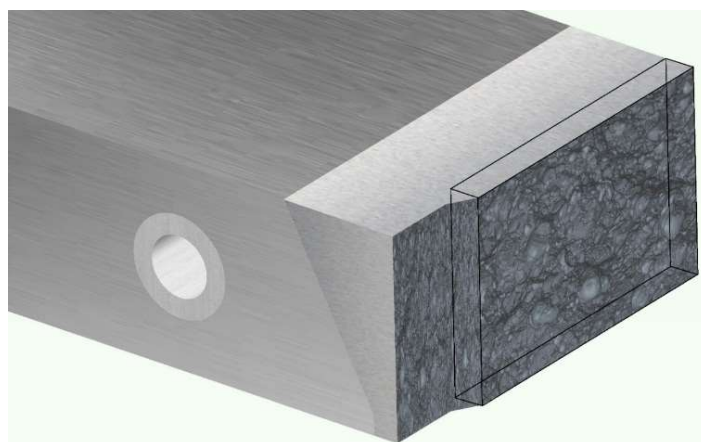




Slika 4.45. Dijagram a)  $P - V$  i b)  $J - R$  kriva za zarez u metal šavu.

### Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla u metal šavu

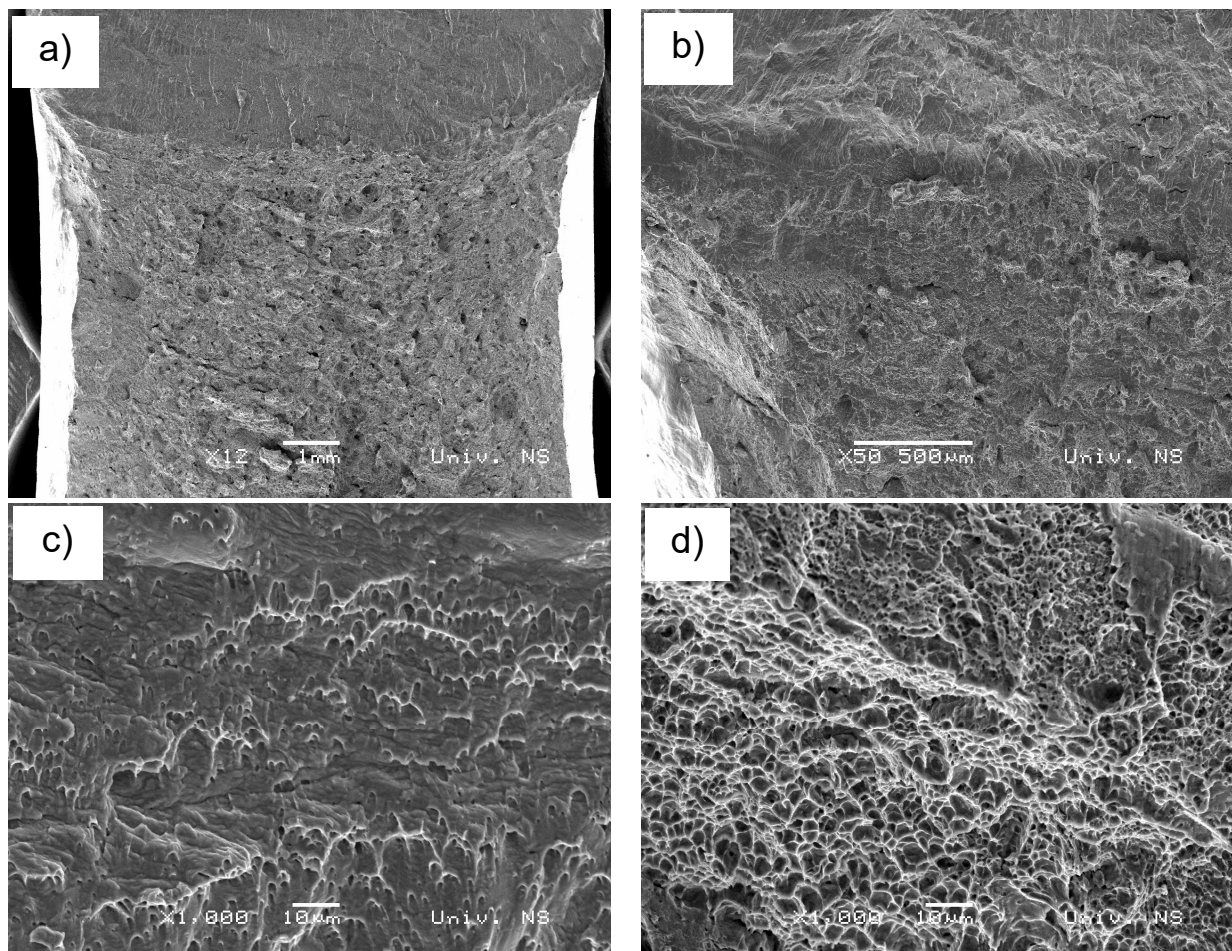
Karakterizacija površine je urađena na epruveti sa oznakom SE (B) W<sub>3</sub>. Položaj isecanja prikazan je na slici 4.46.



Slika 4.46. Položaj isecanja uzorka iz metal šava.

Fraktografija površine preloma je urađena na epruveti SE(B) W<sub>3</sub>. Površina preloma je duktilna. U početku rasta prsline površina preloma je duktilna, sa jasno vidljivim duktilnim jamicama [slika 4.47. a\) i b\)](#). Sa rastom prsline površina preloma je i dalje duktilna sa vidljivim duktilnim jamicama [slika 4.47. c\) i d\)](#).



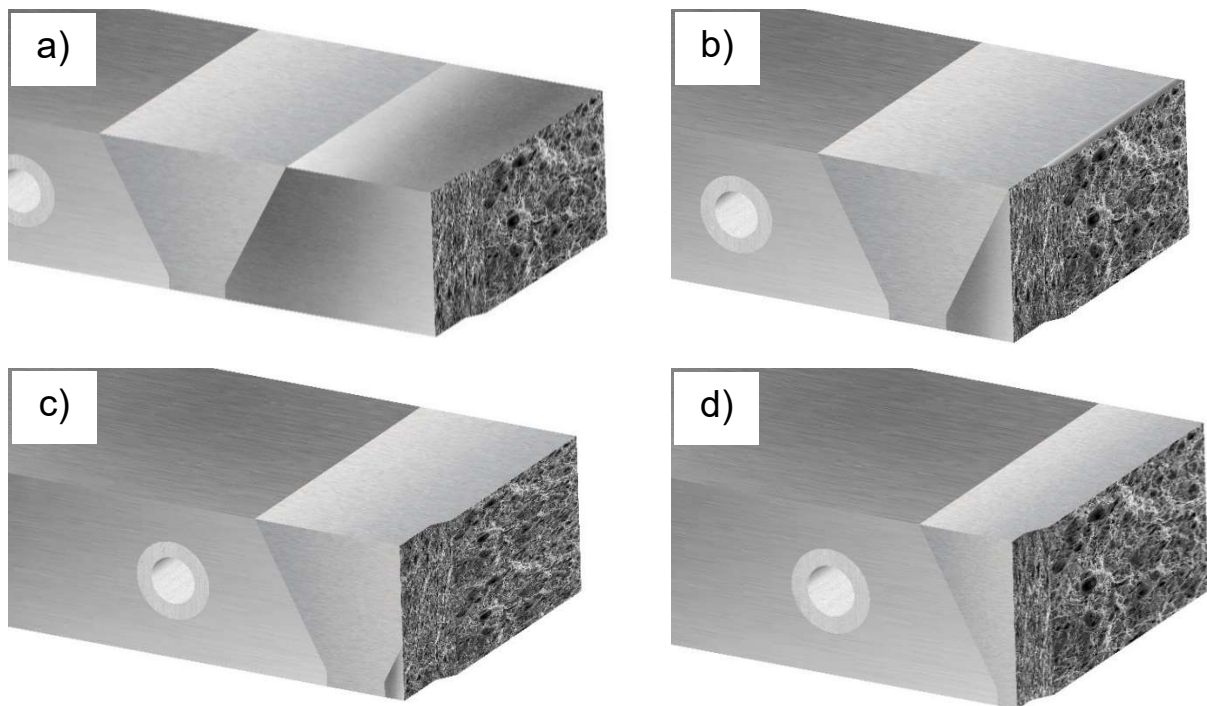


**Slika 4.47.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta sa zarezom u metal šavu.

#### 4.4 Rezultati rasta zamorne prsline u zavarenom spoju pancirnog čelika

Brzina rasta zamorne prsline ispitana je za različita područja zavarenog spoja, tako što je vrh zarez bio smešten u osnovnom materijalu, zoni uticaja toplote, liniji stapanja i metal šavu. Sva ispitavanja su urađena na sobnoj temperaturi. Karakteristični dijagrami brzine rasta zamorne prsline,  $da/dN$  - promena opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , izračunati su za epruvete sa vrhom zamorne prsline u osnovnom materijalu, ZUT-u, ZUT-metal šavu i metal šavu. Šema isecanja epruveta iz zavarenog spoja, osnovni materijal, ZUT, ZUT-metal šav i metal šav su prikazani na [slici 4.48](#).

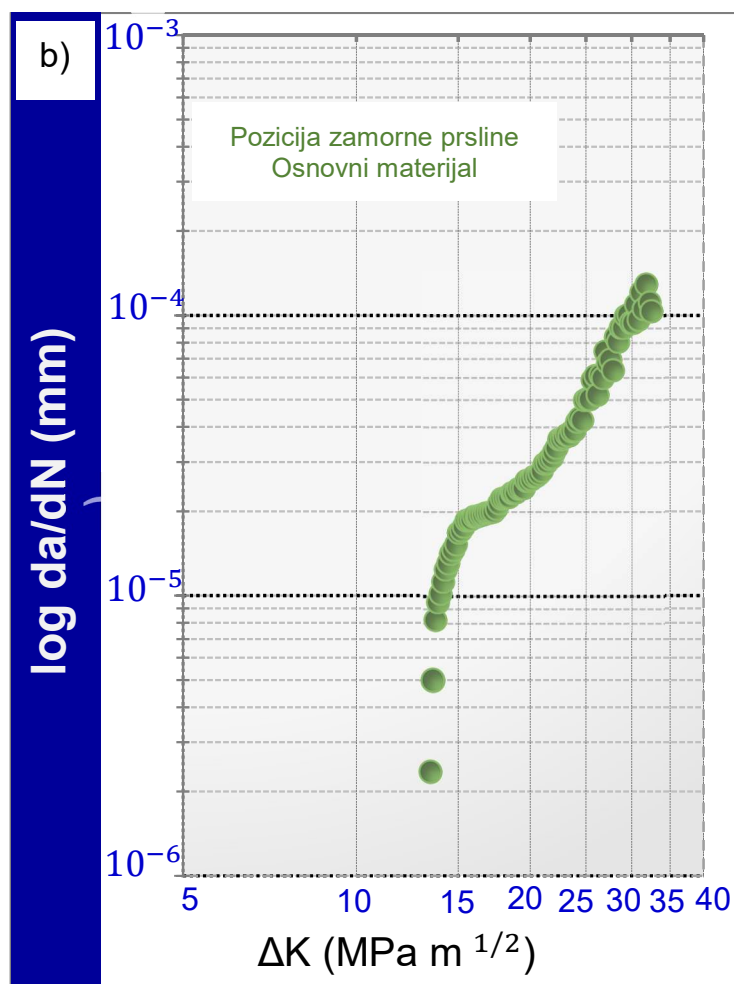
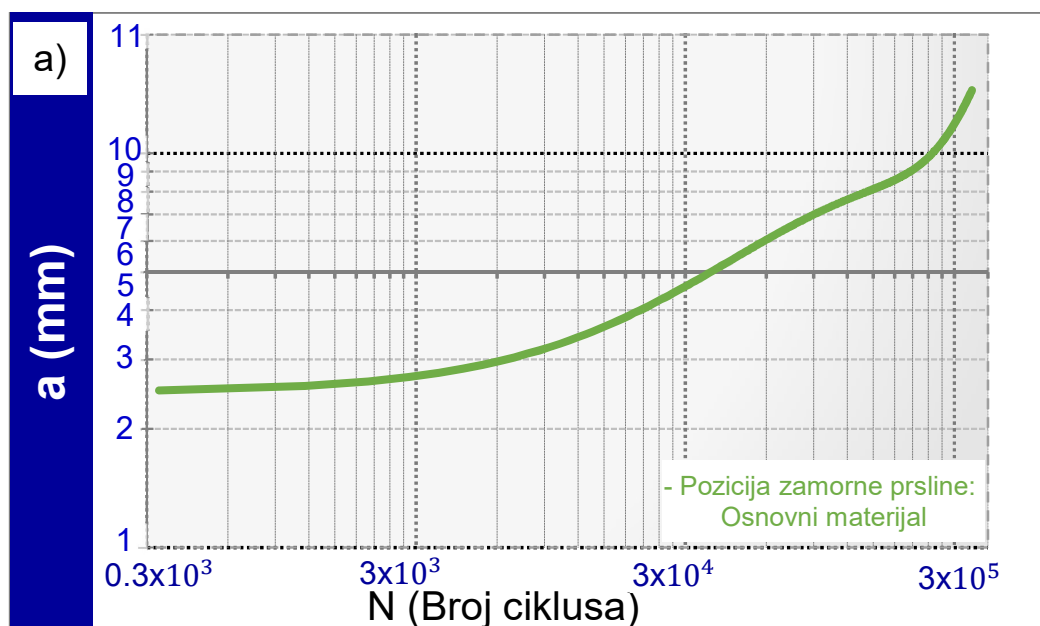




**Slika 4.48.** Šema položaja zarez i rasta prsline iz zavarenog spoja, a) osnovi materijal, b) ZUT, c) ZUT/metal šav i d) metal šav.

#### 4.4.1. Rezultati parametara rasta zamorne prsline u osnovnom materijalu i fraktografija površine preloma

Dijagram povećanja dužina prsline  $a$  - sa brojem ciklusa opterećenja,  $N$ , kao i dijagram  $da/dN$  u zavisnosti od  $\Delta K$ , su prikazani na [slici 4.49 a\)](#) i [b\)](#). Centralni, pravolinijski deo krive je definisan Paris-Erdoganovom jednačinom  $da/dN = C^*(\Delta K)^m$ , u kojoj je brzina rasta prsline u funkciji konstante materijala  $C$  i  $m$  kao i opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ . Konstante su određene fitovanjem krive na osnovu eksperimentalnih rezultata i prikazane su u [tabeli 4.12](#).



**Slika 4.49.** Dijagram zavisnosti dužina prsline od broja ciklusa optrećenja a) i brzine rasta zamorne prsline po ciklusu  $da/dN$  u zavisnosti od faktora intenziteta napona,  $\Delta K$  b), za zarez u osnovnom materijalu.

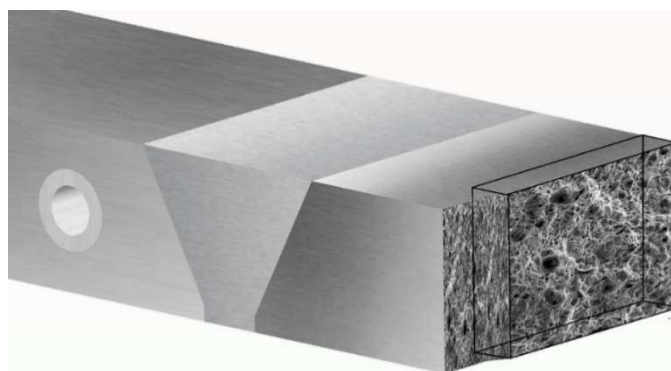
Prag zamora,  $\Delta K_{th}$ , se dobija na osnovu brzine rasta  $da/dN=10^{-6}$  mm. Dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta  $C$  i eksponenta  $m$ , praga zamora  $\Delta K_{th}$ , su srednja vrednost dva ispitivanja. Radi poređenja, brzina rasta zamorne prsline,  $da/dN$ , određena pri vrednosti  $\Delta K=20$  MPa\*m<sup>1/2</sup>-za sve pozicije zareza.

**Tabela 4.12.** Parametri parisove jednačine za prslinu u osnovnom materijalu.

Epruveta	Temperatura ispitivanja	Prag faktora intenziteta napona	Koeficijent	Eksponent	Brzina rasta prsline $da/dN$ na $\Delta K=20$ [MPa*m <sup>1/2</sup> ]
	$T$	$\Delta K_{th}$	$C$	$m$	$da/dN$
	°C	[MPa*m <sup>1/2</sup> ]			[nm/ciklus]
SE(B)PM	20	13,4	$1,0 \cdot 10^{-9}$	3,35	$2,32 \cdot 10^{-5}$

### Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla u osnovnom materijalu

Nakon ispitivanja brzine rasta zamorne prsline, pristupilo se analizi površine preloma, [slika 4.50](#).

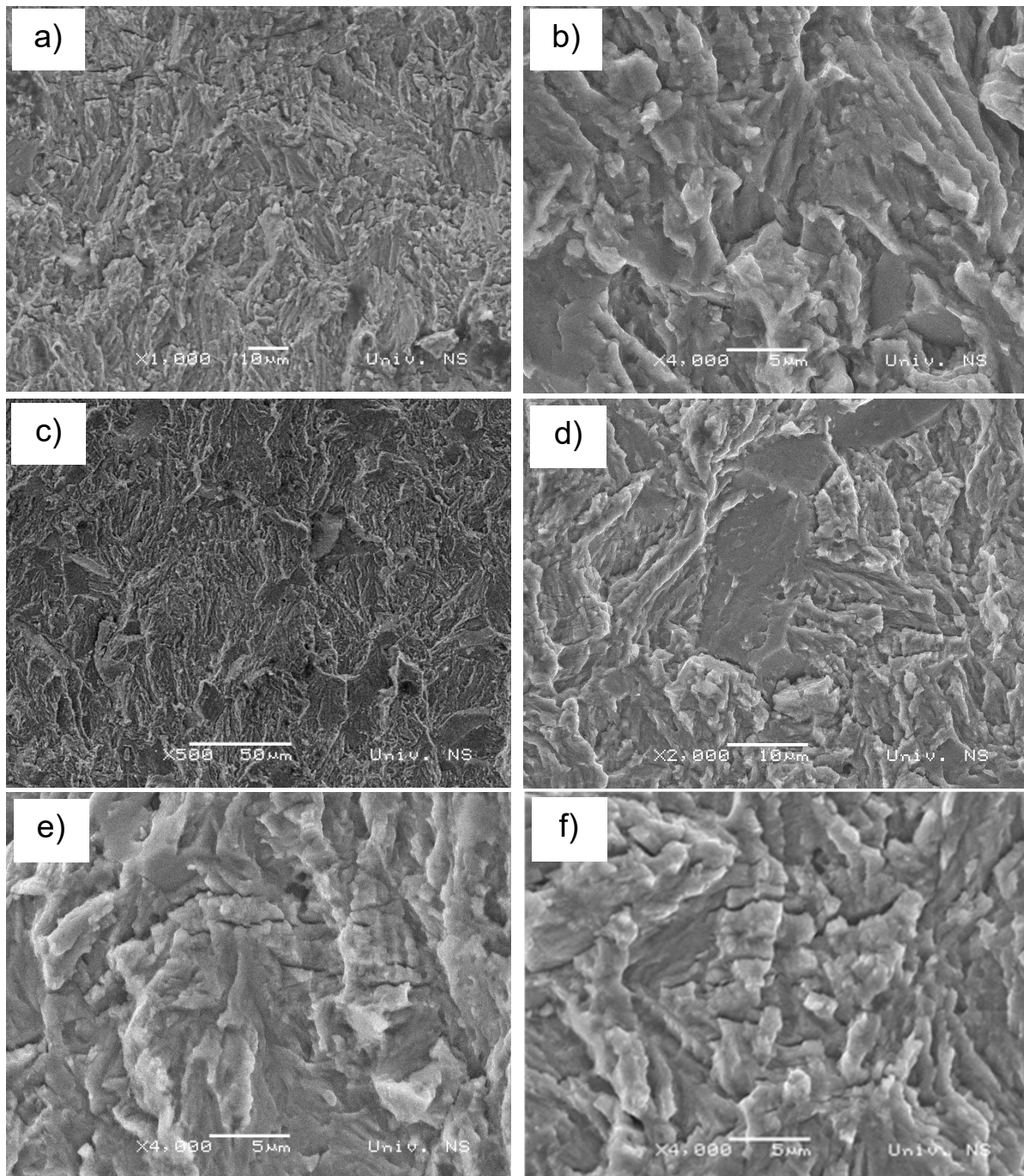


**Slika 4.50.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju sa zarezom u osnovnom materijalu.

Slike od [4.51. a](#)) do [4.51. f](#)) kontinualno prikazuju rast prsline od mesta iniciranja do konačnog loma. Brzina rasta prsline,  $da/dN$ , se povećava sa povećanjem dužine prsline, međutim izgled površina preloma se neznatno menja od mesta iniciranja, [slika 4.51. a i b](#)) do regiona [slika 4.51. e i f](#)) kada nastaje statički lom, odnosno kada epruveta ne može da nosi opterećenje. [Slika 4.51. a](#)) je blizu zareza a na uvećanoj slici [4.51. b](#)) se na površini preloma vide brazdice, tipične za lom usled zamora. Na rastojanju 4 mm od zareza se vidi da prslina raste po različito orjentisanim ravnima, [slika 4.51. c i d](#)). koje su vidljive pri većim uvećanjima, [slike 4.51. e i f](#)). Količina



brazdica zamaranja biva sve izaženija, [slika 4.51. e i f](#)). Na površini preloma su zapažene i male sekundarne prsline [slika 4.51. e i f](#)).



**Slika 4.51.** *Fraktografija površine preloma ispitivane epruvete na brzinu rasta zamorne prsline u osnovnom materijalu.*

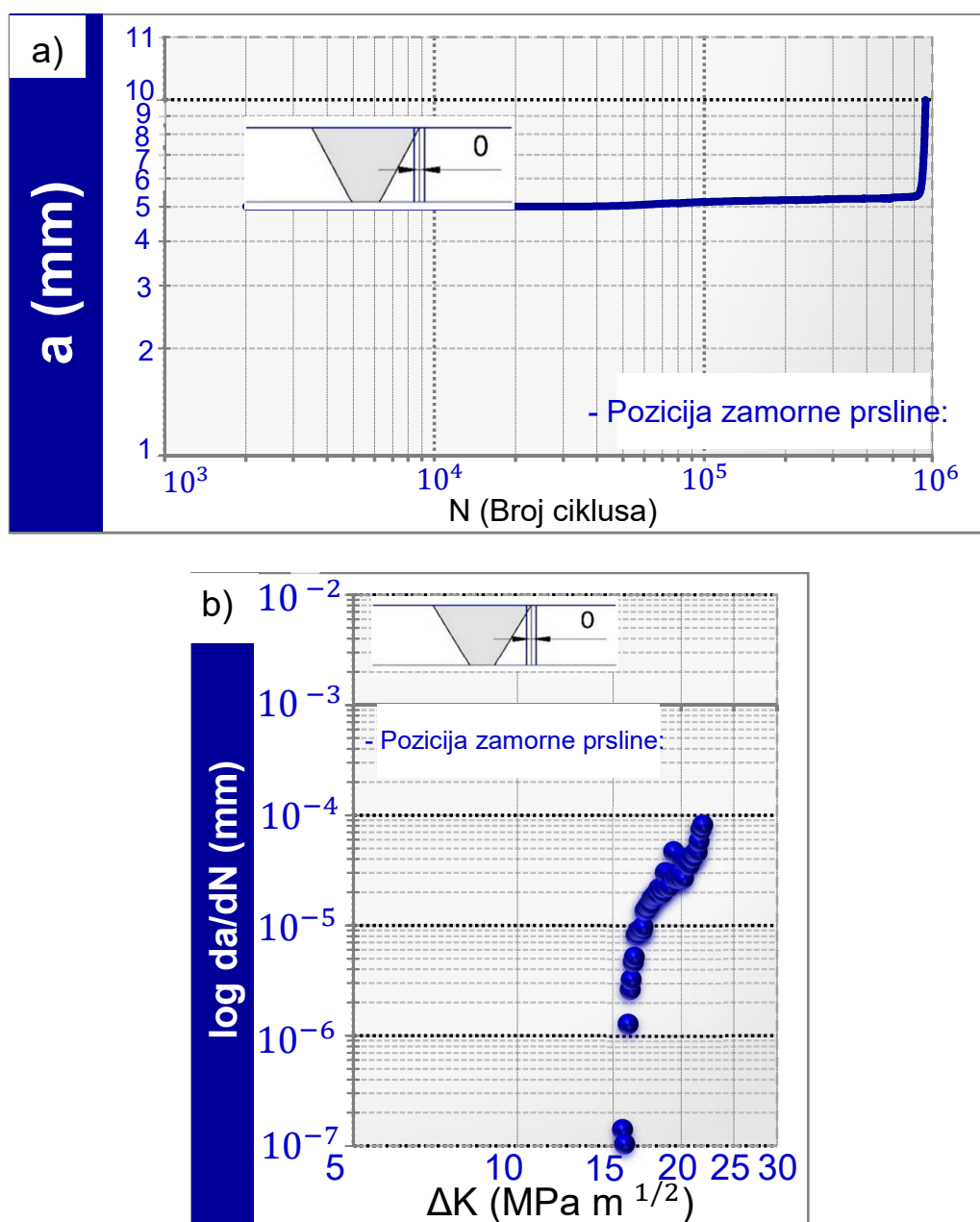
#### **4.4.2. Rezultati parametara rasta zamorne prsline u zoni uticaja toplote i fraktografija površine preloma**



#### 4.4.2.1. Rezultati parametara rasta zamorne prsline u zoni uticaja toplote

Karakteristični dijagrami dužina prsline,  $a$ , sa brojem ciklusa,  $N$ , i brzina rasta zamorne prsline,  $da/dN$  - promena opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za epruvete sa vrhom zamorne prsline u ZUT-u prikazani su na slici 4.52 a) i b).

Dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta  $C$  i eksponenta  $m$ , praga zamora,  $\Delta K_{th}$ , i brzine rasta zamorne prsline,  $da/dN$ , pri vrednosti  $\Delta K=20\text{MPa m}^{1/2}$ , date su u tabeli 4.13. za epruvete sa prslinom u ZUT-u.



**Slika 4.52.** Dijagrami a) zavisnosti dužina prsline  $a$ , od broja ciklusa,  $N$ , i b) brzine rasta zamorne prsline po ciklusu,  $da/dN$ , u zavisnosti od faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za zamornu prslinu u ZUT-u.

Dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta  $C$  i eksponenta  $m$ , praga zamora  $\Delta K_{th}$ , su srednja vrednost dva ispitivanja.

**Tabela 4.13.** Parametri Parisove jednačine za prslinu u zoni uticaja toplote.

Epruveta	Temperatura ispitivanja	Prag faktora intenziteta napona	Koeficijent	Eksponent	Brzina rasta prsline na $\Delta K = 20$ [MPa*m <sup>1/2</sup> ]
	$T$	$\Delta K_{th}$	$C$	$m$	da/dN
	°C	[MPa*m <sup>1/2</sup> ]			nm/ciklus
SE(B)HAZ	20	10,22	$6,0 \cdot 10^{-13}$	5,97	$3,51 \cdot 10^{-5}$

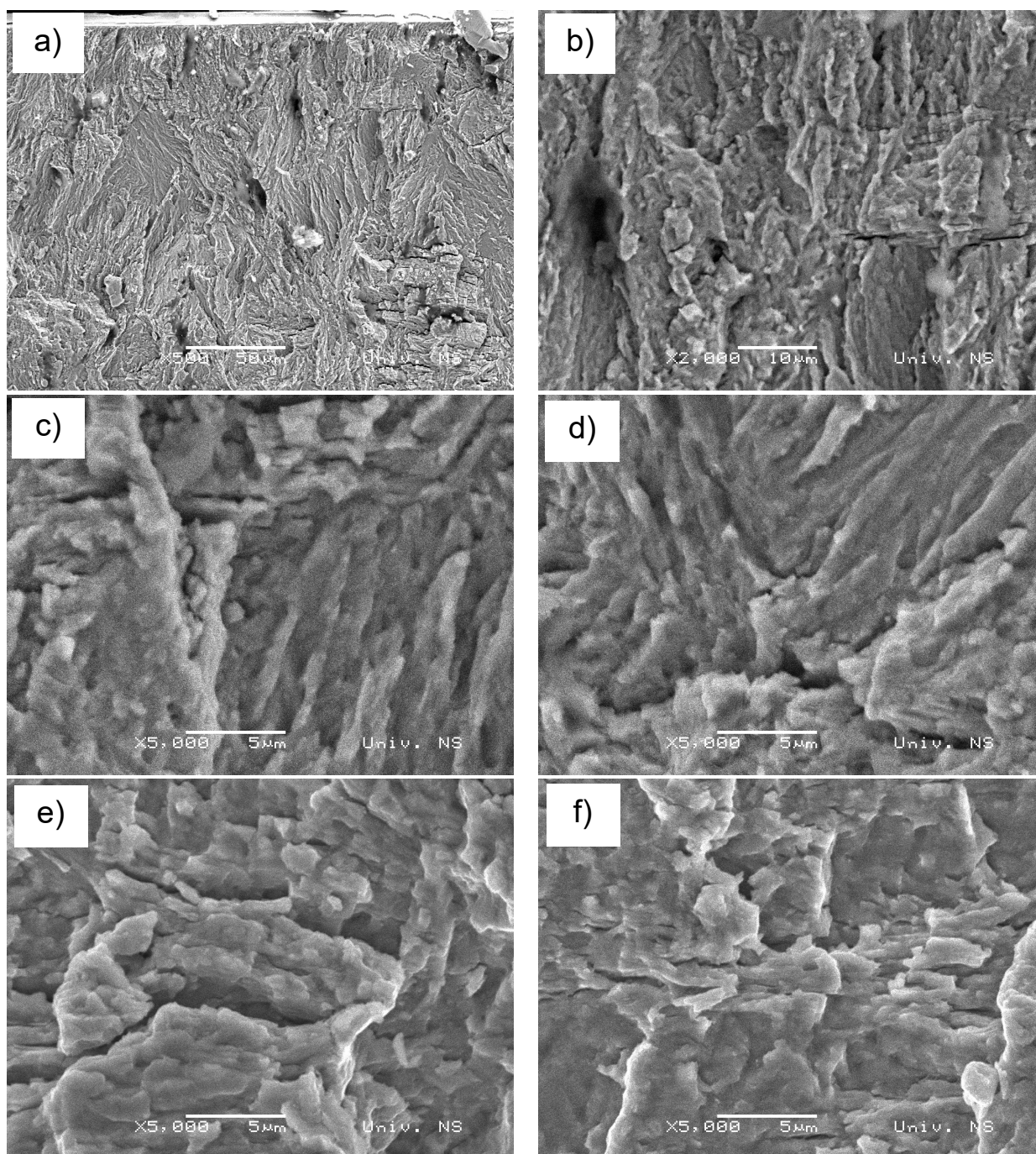
### Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla u ZUT-u

Nakon ispitivanja brzine rasta zamorne prsline, pristupilo se analizi površine preloma. Položaj isecanja ispitivanog komada je prikazan na [slici 4.53](#).



**Slika 4.53.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju sa zarezom u ZUT-u.

[Slike 4.54. a i b](#)) na 500  $\mu\text{m}$  od zamorne površine, potom [slike 4.54. c i d](#)) 2,8 mm od zamorne površine i [slike 4.54. e i f](#)), 4 mm od zamorne površine kontinualno prikazuju rast prsline od mesta iniciranja do konačnog loma. Brzina rasta prsline,  $da/dN$  se povećava sa povećanjem dužine prsline, a kao rezultat toga se i površina preloma menja kontinualno od mesta iniciranja do regiona kada nastaje brzi lom. Na [slici 4.54. a i b](#)) je prikazana površina preloma blizu zareza, na većem uvećanju [slika 4.54 b](#)) se vide brazdice. Na, [slici 4.54. c i d](#)) prikazana je površina preloma na oko 2 mm, sa sekundarnim prslinama, a na [slici 4.54. c](#)) dužina prsline je 4 mm, na [slici 4.54 d](#)) dužina prsline je 6 mm, tu je skoro kraj prsline. Na površini preloma se vide tipične brazdice zamaranja.



**Slika 4.54.** Fraktografija površine preloma ispitivane epruvete na brzinu rasta zamorne prsline u ZUT-u.

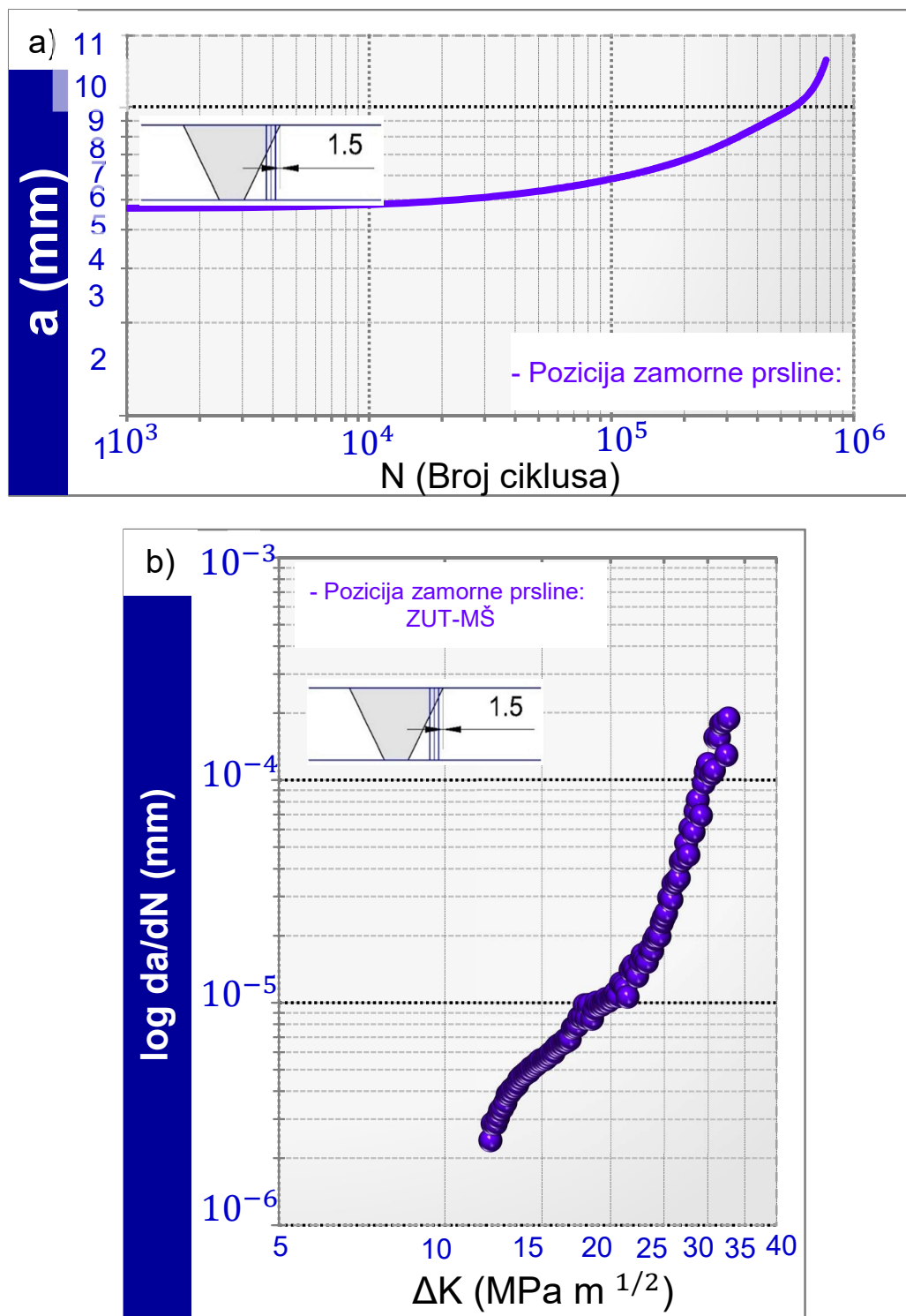
#### 4.4.2.2. Rezultati parametara rasta zamorne za prslinu u ZUT/ metal šavu

Karakteristični dijagrami dužina prsline,  $a$ , sa brojem ciklusa,  $N$ , i brzina rasta zamorne prsline,  $da/dN$  - promena opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za epruvete sa vrhom zamorne prsline u ZUT/metal šavu, prikazani su na [slici 4.55. a\) i b\)](#),

Dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta  $C$  i eksponenta  $m$ , praga zamora  $\Delta K_{th}$ , i brzine rasta zamorne prsline,  $da/dN$ , pri vrednosti  $\Delta K=20$  MPa



$m^{1/2}$ , date su u tabeli 4.17 za epruvete sa prslinom u ZUT-u.



**Slika 4.55.** Dijagrami a) zavisnosti dužina prsline  $a$ , od broja ciklusa,  $N$ , i b) brzine rasta zamorne prsline po ciklusu,  $da/dN$ , u zavisnosti od faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za rez u ZUT /metal šavu.



Rezultati parametara Parisove jednačine, su dobijene kao srednja vrednost dva ispitivanja.

**Tabela 4.14.** Parametri Parisove jednačine za brzinu rasta prsline na  $\Delta K = 20$  [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ] za prslinu u ZUT/metal šavu.

Epruveta	Temperatura ispitivanja	Prag faktora intenziteta napona	Koeficijent	EkspONENT	Brzina rasta prsline $da/dN$ na $20 \text{ MPa m}^{1/2}$
	$T$	$\Delta K_{th}$	$C$	$m$	$da/dN$
	$^{\circ}\text{C}$	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$			$\text{nm/ciklus}$
SE(B)H-PM <sub>1</sub>	20	12,13	$1,0\cdot 10^{-11}$	5,07	$3,95\cdot 10^{-5}$

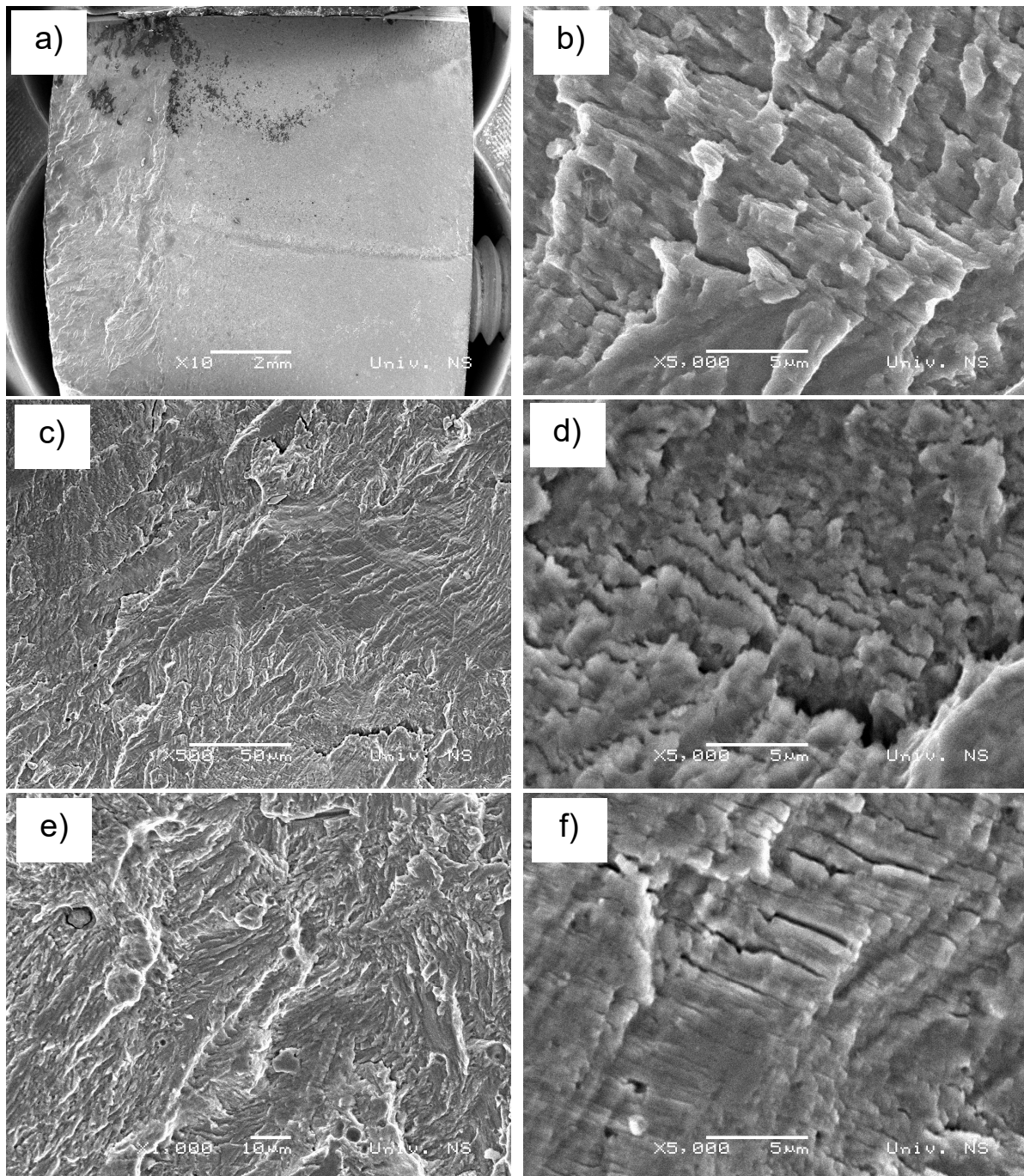
### Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla u ZUT/ metal šavu

Nakon ispitivanja brzine rasta zamorne prsline, pristupilo se analizi površine preloma. Položaj isecanja iz ispitivane epruvete je prikazan na slici 4.56.



**Slika 4.56.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju u ZUT/metal šavu.

Slike od 4.57. a) do 4.57. f) kontinualno prikazuju rast prsline od mesta iniciranja do konačnog loma. Slike 4.57. a) i b) na 700  $\mu\text{m}$  od mesta iniciranja, potom slike 4.57 c) i d) 2,16 mm od mesta iniciranja i slike 4.57 e) i f), 4 mm od mesta iniciranja. Brzina rasta prsline,  $da/dN$ , se povećava sa povećanjem dužine prsline, ali se površina preloma ne menja značajno. Zamorne brazdice su uočene na slikama 4.57. b-d), formiranoj na kraju rasta prsline. Prelomljena površina prikazana na slici 4.57. e) i f), sa jasno vidljivim jamicama, je tipična za zateznim opterećenjem prelomljenu površinu, kada je opterećenje preveliko i kada konstrukcija ne može da nosi opterećenje.

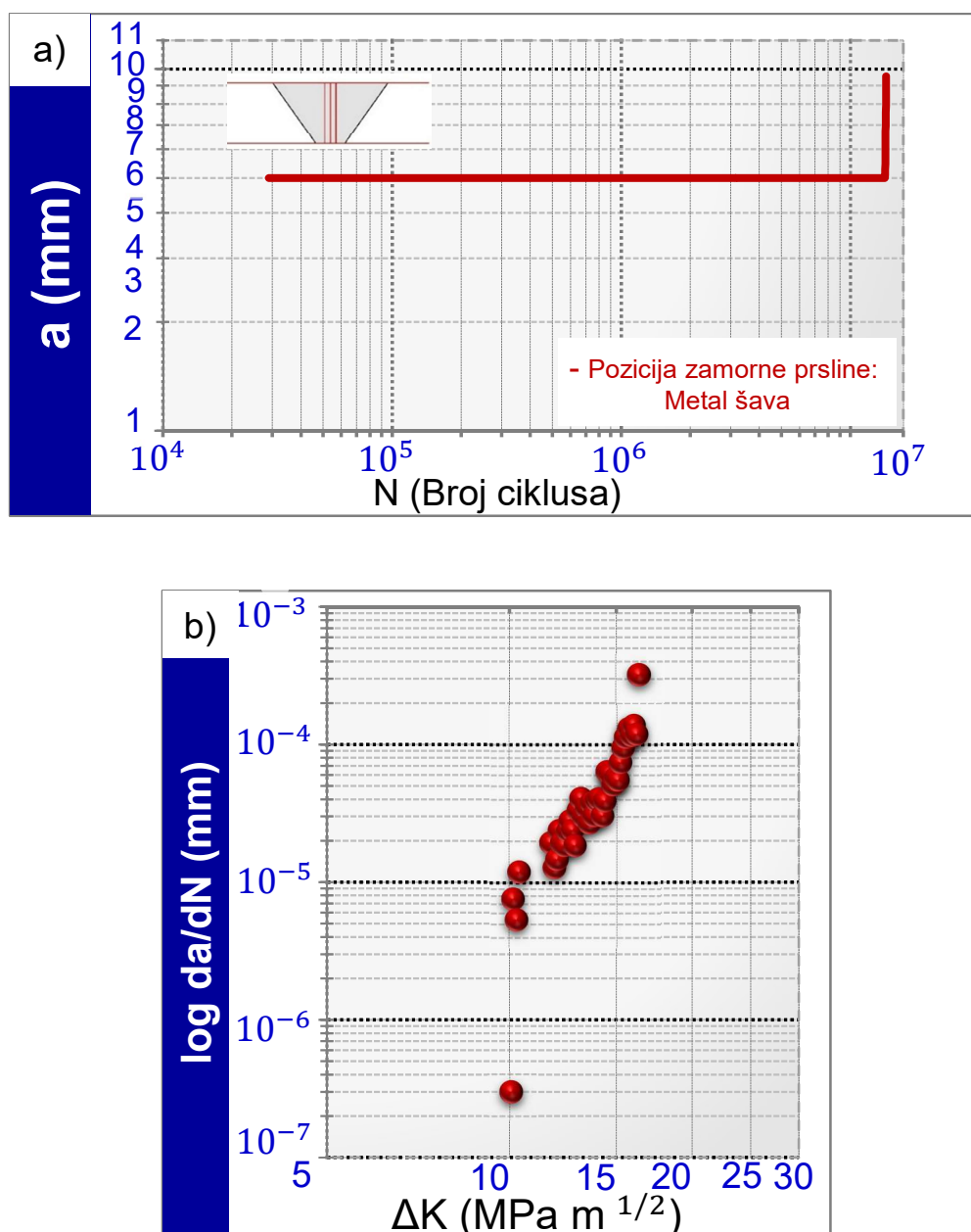


**Slika 4.57.** Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta na brzinu rasta zamorne prsline u ZUT/ metal šavu.

#### 4.4.3. Rezultati parametara rasta zamorne prsline u metal šavu i fraktografija površine preloma

Karakteristični dijagrami dužina prsline,  $a$ , sa brojem ciklusa  $N$  i brzina rasta zamorne prsline,  $da/dN$  - promena opsega faktora intenziteta napona,  $\Delta K$ , za epruvete sa vrhom zamorne prsline u metal šavu, prikazani su na slici 4.58. a) i b).

Dobijene vrednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta  $C$  i eksponenta  $m$ , praga zamora,  $\Delta K_{th}$ , i brzine rasta zamorne prsline,  $da/dN$ , pri vrednosti  $\Delta K=20$   $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , date su u tabeli 4.15. za epruvete sa zarezom u metal šavu.



**Slika 4.58.** Dijagram zavisnosti dužina prsline  $a$ , od broja ciklusa  $N$  a) i brzine rasta zamorne prsline po ciklusu  $da/dN$  u zavisnosti od faktora intenziteta napona  $\Delta K$  b), za zarez u metal šavu.



Rezultati parametara Parisove jednačine, su dobijeni kao srednja vrednost dva ispitivanja.

**Tabela 4.15.** Parametri Parisove jednačine za brzinu rasta prsline na  $\Delta K = 20$  [MPa\*m<sup>1/2</sup>] za prslinu u metal šavu.

Epruveta	Temperatura ispitivanja	Prag faktora intenziteta napona	Koeficijent	EkspONENT	Brzina rasta prsline da/dN na 20 MPa m <sup>1/2</sup>
	$T$	$\Delta K_{th}$	$C$	$m$	da/dN
	°C	MPa*m <sup>1/2</sup>			nm/ciklus
SE(B)W <sub>4</sub>	20	10,1	$4,0 \cdot 10^{-11}$	5,25	$2,71 \cdot 10^{-4}$

### Fraktografija površine preloma za prslinu koja je rasla u metal šavu

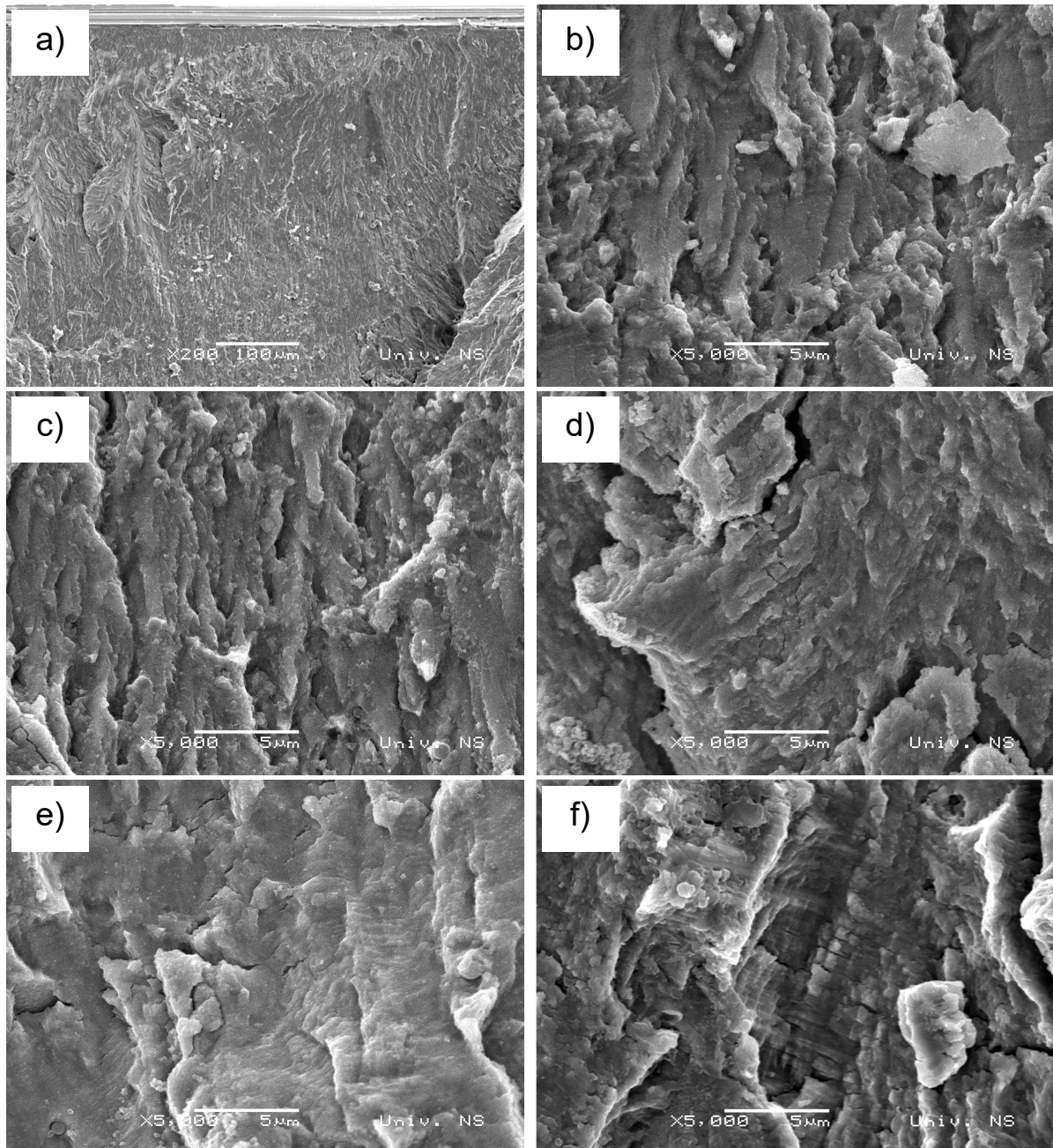
Nakon ispitivanja brzine rasta zamorne prsline, pristupilo se analizi površine preloma. Ispitivani komad, prikazan je na slici 4.59.



**Slika 4.59.** Položaj isecanja uzorka za fraktografiju iz metal šava.

Slike od 4.60. a) do 4.60. f) kontinualno prikazuju rast prsline od mesta iniciranja do pred kraj rasta. Slike 4.60. a i b) na mestu iniciranja, vidi se zarez na mestu iniciranja, potom slike 4.60. c i d) od mesta iniciranja i slike 4.60. e i f), 6 mm od mesta iniciranja. Brzina rasta prsline,  $da/dN$ , se povećava sa povećanjem dužine prsline kao rezultat toga je i površina preloma tipična za zamorni lom.

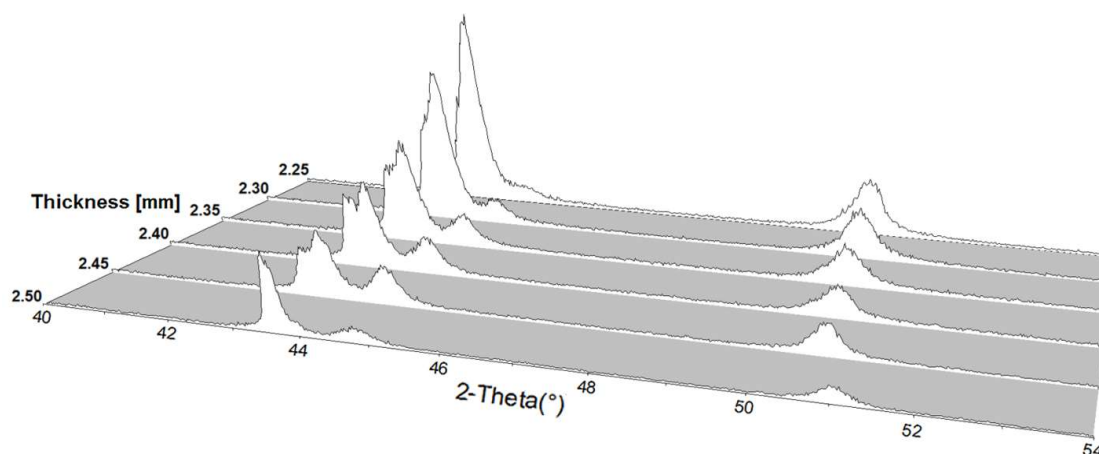




**Slika 4.60.** *Fraktografija površine preloma ispitivanih epruveta na brzinu rasta zamorne prsline u metal šavu.*

#### 4.4.4 Rezultati difrakcije X - zracima

Uzorak koji je ispitan difrakcijom je debljine 2,5mm. Na slici 4.61. su prikazani rezultati difrakcije X zracima  $\alpha'$  martenzita obrazovanog usled deformacije. Pri rastu zamorne prsline, dolazi do transformacije austenite u martenzit. Promena količine martenzita je prikazana po nivoima u odnosu na površinu preloma, posle snimanja, uzorak je stanjivan za 0,05 mm i opet sniman. Rezultati pokazuju dve faze austenit i martenzit. Obe faze imaju po dva pika. Austenit sa pikom  $2\theta$  od  $43,2^\circ$  do  $43,6^\circ$  i od  $50,4^\circ$  do  $50,9^\circ$ , dok je martenzit od  $43,5^\circ$  do  $44,2^\circ$  i od  $44,8^\circ$  do  $45,0^\circ$ . Pošto veća hrapavost površine uzrokuje povećano difuzno rasipanje X-zraka, intenzitet pikova je obrnuto u korelaciji sa debljinom uzorka koji se ispituje. Korišćenjem RIR metode (referentni odnos intenziteta), odnos integrisanih intenziteta između  $\alpha'$ -martenzitnih pikova i pikova difrakcije za austenit, pouzdano ukazuju na njihov težinski odnos u površinskim slojevima.



**Slika 4.61.** XRD-difraktogram epruvete koja je ispitana.

Najintenzivnije vrhovi za  $\alpha'$ -martenzit i austenit preklapaju se ne samo u našem uzorku, ali u brojnim ispitanim legurama objavljenim u kristalografskim bazama podataka [111]. Standardna devijacija svojstvena dekonvoluciji za veća preklapanja vrhova ih čini nepodobnim kod određivanje odnosa težina. Zbog toga su korišćeni drugi najjači pikovi. Korišćenje intenziteta koji su samo dva puta manji od najjačih intenziteta je apsolutno adekvatno za preciznu kalkulaciju težinskog odnosa.

U tabeli 4.16. je prikazana procentualna promena po nivoima u odnosu na površinu preloma. Prisutnosti  $\alpha'$ -martenzit je do nivoa 0,25 mm, ispod površine preloma. Na površini prelom se najveća količina austenita transformisala u  $\alpha'$ -martenzit, sa procentom od 55%. Količina  $\alpha'$ -martenzita opada sa rastojanjem u proseku do

≈5%/0,05 mm sa dubinom ispitivanja. Na rastojanju 0,25 mm količina transformisanog austenita je pala na vrednost od 24 %.

**Tabela 4.16.** Rezultati rendgenske strukturalne analize.

		Odnos Martenzita-Austenita					
Debljine uzorka	[mm]	2,50	2,45	2,4	2,35	2,30	2,25
Martenzit	[%]	55	50	46	34	30	24
Tolerancija	[%]	±3	±3	±2	±2	±2	±2

Martenzitna transformacija se odigrava zbog plastične deformacije na vrhu prsline. Prema proračunima, po izrazu 4.3, plastična zona u oblasti praga faktora koncentracije napona, za slučaj ravanskog stanja napona, veličina radijusa, iznosi  $r_{1p}^*=0,072$  mm, dok je za oblast linearnog rasta nešto veća i iznosi  $r_{1p}^*=0,14$  mm

$$r_{1p}^* = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{K_I}{\sigma_T} \right)^2 \cdot \left( 1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right) \quad 4.3$$

#### 4.5 Rezultati količine difundovanog i zadržanog vodonika

Parametri zavarivanja su snimani u toku nanošenja dodatnog materijala. Parametri zavarivanja su održavani konstantnim i prezentovani su u tabeli 4.17. Zbog konzistentnosti rezultata test difundovanog vodonika kod temperature predgrevanja od 150 °C i 160 °C je urađen po tri puta. Prva serija od tri pokušaja je ponovljena dva puta da bi se dobila sigurnost i ponovljivost rezultata ispitivanja. Kod ispitivanja zadržane količine vodonika u zoni metal šava, po tri epruvete su isečene iz sredine zavarenog spoja u zoni metal šava. Rezultati difundovanog i zadržanog vodonika su prikazali veoma dobru konzistentnost i ponovljivost.

**Tabela 4.17.** Parametri zavarivanja kod ispitivanja količine difundovanog vodonika.

Temperatura predgrevanja	Zaštitna atmosfera	Protok	Jačina struje	Unos toplote	Relativna važnost
[° C]		[l/min]	[A]	[kJ/mm]	[%]
150	Ar.+ 2.5%CO <sub>2</sub>	10	168	1,46	40
160	Ar.+ 2.5%CO <sub>2</sub>	10	168	1,46	40

Izmerene vrednosti difundovanog i zadržanog vodonik su prikazane u tabeli 4.18. Vrednosti difundovanog vodonika od 0,12 ml/100 g. i 0,11 ml/100 g., za temperature

predgrevanja od 150 °C i 160 °C, ilustruju nam da su odabrane temperature predgrevanja i međuprolaza dale nisku količinu vodonika u zoni metal šava. Niska količina vodonika u zoni metal šava nam otklanja mogućnost nepovoljnog njegovog uticaja na brzinu rasta zamorne prsline u zoni metal šava.

Kada je upitanju zadržana količina vodonika u zoni metal šava, njegova niska vrednost je očekivana s obzirom da je difundovana količina vodonika niska. Može se smatrati da je razlika difundovane i zadržane količine vodonika, vrednost količine vodonika koja je difundovala izvan zone metal šava u period od šest meseci.

**Tabela 4.18.** Nivo difundovanog vodonika izmeren za austenitni dodatni materijal kod temperature predgrevanja od 150 °C i 160 °C kao i količina zadržanog vodonika..

Temperatura testiranja	Test difundovanog vodonika		Test zadržanog vodonika [ml/100gr]
	Temperatura predgrevanja od 150 °C	Temperatura predgrevanja od 160 °C	
	[ml/100gr]	[ml/100gr]	
400 °C	0,12±0.09	0,11±0.085	0,06±0.009

#### 4.6 Rezultati ispitivanje balističke otpornosti

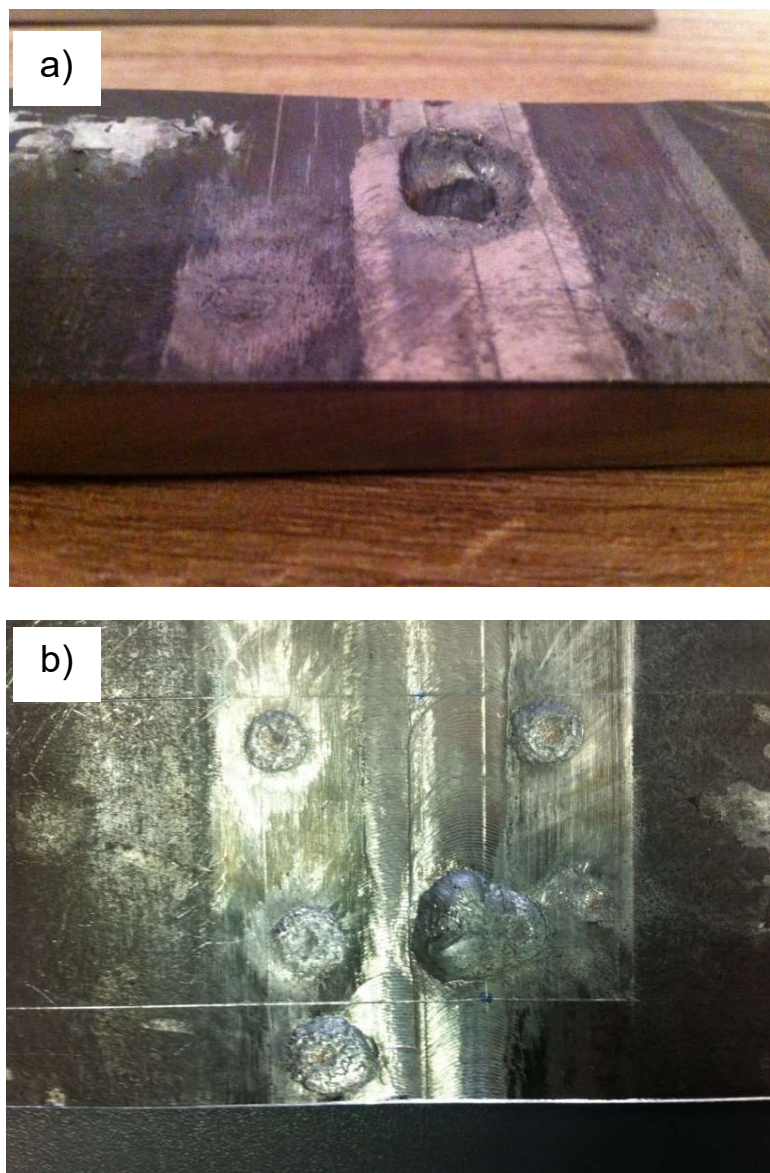
Rezultati ispitivanje balističke otpornosti zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500, su dati u tabelama 4.19. - 4.21. U tabeli 4.19., su prikazani rezultati ispitivanje balističke otpornosti za zonu metal šava zavarenog spoja Protac 500 čelika debljine 10 mm. Zavarena ploča je postavljene pod uglom 90° u odnosu na trajektoriju projektila. Ispitivanje balističke otpornosti su izvršena upotrebom municije 7,62 x 51 mm.

**Tabela 4.19.** Rezultati ispitivanje balističke otpornosti za zonu metal šava zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.

Redni broj	Početna brzina V10 [m/s]	Ekvivaletna daljina gađanja [m]	Ugao udara u odnosu na trajektoriju projektila [°]	Oštećenje metal šava
1	854,896	10	90	proboj
2	852,216	10	90	proboj
3	848,881	10	90	zador sa izbočinom



Rezultati početnih brzina projektila u [tabeli 4.19](#). pokazuju da su početne brzine projektila municije 7,62 x 51 mm od 854,896 do 848,881 m/s. Sertifikat o izmerenim brzinama je priložen u dodatku 5. Ekvivalentna daljina gađanja je 10 m. U ovoj zoni, na dva mesta je napravljen proboj dok je na trećem gađanju napravljen zador sa izbočinom. Oštećena površina u zoni metal šava je u dijapazonu od 70,24 – 90,6 mm<sup>2</sup>. Na [slici 4.62. a\) i b\)](#) su prikazana oštećenja za zonu metal šava. Ova zona je napravljena od austenitnog dodatnog materijala sa tvrdoćom od 200 HB. [Slika 4.62. a\)](#) pokazuje proboj dok je na [slici 4.62. b\)](#) prikazan zador sa izbočinom. Na oštećenju na unutrašnjoj strani zone metala šava se vidi prisustvo intenzivne plastične deformacije u smeru prolaska projektila.



**Slika 4.62.** Oštećenja zone metal šava: a) proboj (hitac 2); b) zador sa izbočinom (hitac 3).

**Tabela 4.20.** Rezultati ispitivanja balističke otpornosti u oblasti ZUT-a zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.

Redni broj	Početna brzina V10 [m/s]	Ekvivalentna daljina gađanja [m]	Ugao udara u odnosu na trajektoriju projektila [°]	Oštećenje oblasti metal šava
1	852,142	10	90	zador sa prslinom
2	851,321	10	90	zador krenuo čep
3	850,231	10	90	zador sa prslinom

Rezultati početnih brzina projektila za oblast ZUT-a prikazani u tabeli 4.20. pokazuju da su početne brzine projektila od 850,231 do 852,142 m/s. Ekvivalentna daljina gađanja je 10 m. U ovoj zoni na dve mesta je napravljen zador sa prslinom dok je na trećem gađanju napravljen zador krenuo čep. Oštećena površina u oblasti ZUT-a je u dijapazonu 60,9 – 80,6 mm<sup>2</sup>.

Na slici 4.63. a) i b) su prikazana oštećenja u oblasti ZUT-a. Tvrdoća u ovoj zoni na osnovu rezultata merenja je od 358 HV do 521 HV. Slika 4.63. a) i b) pokazuju zador sa prslinom na levoj strani dok je na desnoj strani prikazan zador krenuo čep.





**Slika 4.63.** Oštećenje u oblasti ZUT-a: a) leva strana zador sa prslinom (hitac 4 i 5); b) desna strana zador krenuo čep (hitac 6).

Rezultati početnih brzina projektila za oblast ZUT-a prikazani u [tabeli 4.21](#). pokazuju da su početne brzine projektila od 849,116 do 852,213 m/s. Ekvivalentna daljina gađanja je 10 m. U ovoj zoni na sva tri mesta je napravljen zador. Oštećena površina u zoni osnovnog materijala je u dijapazonu 30,9 – 40,6 mm<sup>2</sup>.

Na [slici 4.64](#). su prikazana oštećenja u oblasti osnovnog materijala. Tvrdća u ovoj zoni na osnovu rezultata merenja je od 499 HV do 508 HV. [Slika 4.64](#). pokazuje zador kod sva tri ispitivanja.

**Tabela 4.21.** Rezultati ispitivanje balističke otpornosti u oblasti osnovnog materijala zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.

Redni broj	Početna brzina V10 [m/s]	Ekvivaletna daljina gađanja [m]	Ugao udara u odnosu na trajektoriju projektila osnovnog materijala [°]	Oštećenje
1	849,116	10	90	zador
2	850,212	10	90	zador
3	852,313	10	90	zador



**Slika 4.64.** Oštećenje u oblasti osnovnog materijala: leva strana zador (hitac 7 i 8); desna strana zador (hitac 9).



## 5 DISKUSIJA

### 5.1 Diskusija procesa zavarivanja pancirnog čelika

#### 5.1.1 Diskusija KH dijagram pancirnog čelika

Analiza KH dijagrama je neophodna sa stanovišta razvoja sigurne procedure zavarivanja i postizanje zavarenog spoja određenog kvaliteta. KH dijagram nam daje vezu između faznih transformacija, brzine hlađenja, mikrostrukture i tvrdoće. Mikrostruktura i tvrdoća u različitim zonama ZUT-a se mogu predvideti analizom KH dijagrama i njegovih krivih hlađenja za različite brzine hlađenja. Prednost analize dilatometrijskih uzoraka je u većem volumenu ispitivanog uzorka u odnosu na proces zavarivanja gde je ta zona mala zbog temperaturnog gradijenta.

Adekvatan izbor temperature predgrevanja i međuprolazne temperature, zahteva dobro poznavanje KH dijagrama pancirnog čelika. Analizom KH dijagrama Protac 500 čelika [36], brzina hlađenja od 1 °C/s stvara mikrostrukturu koja se sastoji od kombinacije martenzita i beinita, dok brzina hlađenja od 7 °C/s, stvara mikrostrukturu od čistog martenzita. Dijagram temperatura-vreme za temperaturu predgrevanja i međuprolaznu temperaturu od 150 °C i 160 °C, slika 4.4 pokazuje da su brzine hlađenja kod prvog prolaza 1,83 °C/s, potom kod drugog, trećeg i četvrtog prolaza 1,53 °C/s 1,82 °C/s i 1,82 °C/s, respektivno. Na osnovu KH dijagrama Protac 500 čelika sve četiri pomenute brzine hlađenja stvaraju mešovito martenzitno beinitnu strukturu.

U industriji se za pancirne čelike Bissaloy 500 i Armox 500 koristi temperatura predgrevanja i međuprolazna temperatura u opsegu od 80 °C do 120 °C. U slučaju izbora temperature predgrevanja od 80 °C, brzina hlađenja bi bila ~24 °C/s [37]. Ovom brzinom hlađenja bi se dobila kaljena struktura kod Protac 500 čelika, jer se čist martenzit dobija već pri brzini hlađenja od 7 °C/s. Brzina hlađenja od ~24 °C/s je odgovarajuća kod Bissaloy 500 čelika kod koga se čist martenzit dobija sa brzinom hlađenja od ~30 °C/s, što rezultuje tvrdoćom od 550 HV. Manja brzina hlađenja od ~24 °C/s, kod Bissaloy 500 čelika dodatno smanjuje tvrdoću ispod 550 HV.

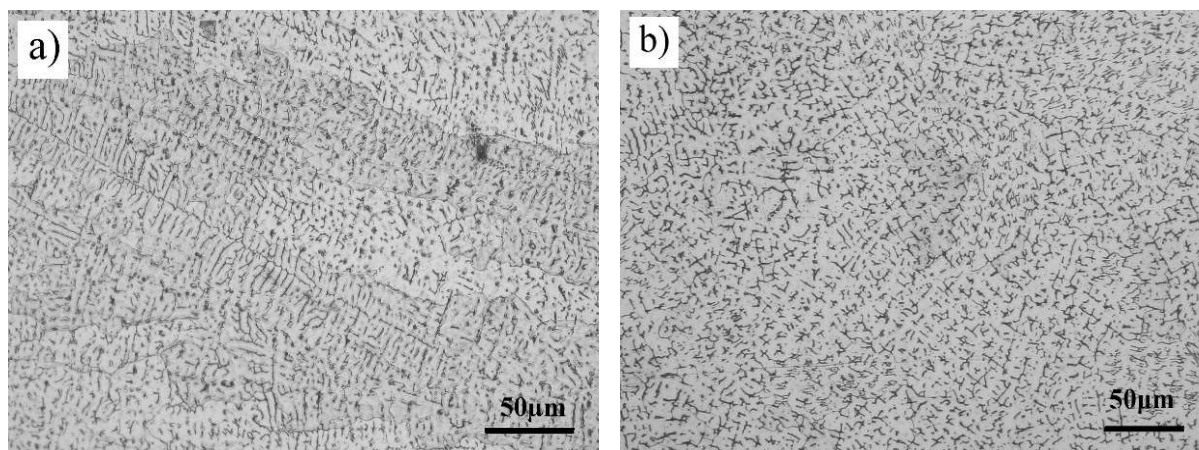
S obzirom na dobijenu brzinu hlađenja od ~1,82 °C/s, temperatura predgrevanja i brzina hlađenja od 150 °C i 160 °C se smatraju adekvatnim izborom u pogledu željene mikrostrukture Protac 500 čelika.

### 5.1.2 Diskusija MIG proces zavarivanja

Cilj u prvom delu ispitivanja je postizanje kvalitetnog zavarenog spoja. Zavaren spoj bez pora i prslina je dao mogućnost daljeg, dubljeg ispitivanja i dobijanje merodavnih podatak.

Kod automatizovanog procesa zavarivanja, robotom, kao rezultat frekventnog oscilovanja pištolja, možemo očekivati značajno usitnjenje zrna [117]. Temperaturni gradijent,  $G$ , se smanjuje transferzalnim oscilovanjem luka, koji povećava kontinualno hlađenja, time i jednako-osni rast zrna.

Manuelnim postupkom zavarivanja nije moguće postići frekventno, precizno oscilovanje ljudskom rukom. Zatim, veličina oscilovanja nije ujednačene ili se dublje ulazi u osnovni materijal, čime se on dodatno omekšava, a time narušavaju balističke osobine pancirnog čelika. Na slici 5.1. je poredeći mikrostrukturu dobijenu manuelnim i automatizovanim procesom zavarivanja prikazan efekat frekvencije oscilovanja luka na usitnjavanje zrna u zoni metal šava.



**Slika 5.1.** Mikrostruktura metal šava pancirnog čelika, dobijenog optičkim mikroskopom za: a) manuelno zavarivanje i b) automatizovano zavarivanje.

Kao rezultat manuelnog zavarivanja, mali broj oscilovanje je ima kao rezultat strukturu sa grubim stubastim zrnima u zoni metal šava, slika 5.1 a). Kada je u pitanju automatizovano zavarivanje, transferzalno oscilovanje luka, sa frekvencijom oscilovanja od 1,5 mm, je rezultovalo značajnim usitnjavanjem ferita, slika 5.1 b).

Frekvencijom oscilovanja luka se očekuje i ometanje solidifikacije u metalnom kupatilu, što dovodi do rafinacije zrna. Usitnjavanjem zrna se povećava otpor u stvaranju prslina prilikom solidifikacije dok se mehaničke osobine metal šava povećavaju [118].

Kao što je napomenuto pre automatizovanog procesa, pancirne ploče su zavarene manuelnim postupkom. Manuelnim postupkom zavarene ploče su male zateznu čvrstoću od ~700 MPa. Nakon manualnog, prešlo se na automatizovano zavarivanje gde je nakon procesa zavarivanja izmerena zatezna čvrstoća od 830 MPa. Kada je u pitanju razlika u zateznoj čvrstoći zavarenog spoja između automatizovanog i manualnog procesa zavarivanja, može se konstatovati da je se razlika koja iznosi 130 MPa u korist automatizovanog postigla rafinacijom dendrita automatizovanim procesom zavarivanja.

Kod procesa zavarivanja pancirnog čelika u cilju što manjeg bočnog unosa toplote, a time i omekšavanja neophodno je težiti što manjim amplitudama oscilovanja. Amplitude od 3,2 mm, 5,5 mm, 3,4 mm i 3,4 mm za prolaz korena, popune, kao i desnog i levog pokrivnog prolaza, su najmanje vrednosti sa kojima se postiglo dobro mešanje osnovnog i dodatnog materijala, sa jedne, i niskog širenja unešene toplote i omekšavanje ZUT-a sa druge strane. Kao rezultat se postiglo neznatno smanjenje tvrdoće u ZUT-u u iznosu od 382 HV i formiranje otpuštenog martenzita.

Izabrana procedura zavarivanja koja se sastojala od MIG postupka, upotrebom robota i pune žice, postigla je mogućnost automatizacije procesa zavarivanja a time i njenu visoku produktivnost. Kontinualnim dodavanjem žice se obezbedilo neprekidno zavarivanje. Dok se upotrebom pune žice izostavilo međuprolazno čišćenje, čime se omogućila upotreba u sprej transferu, koja zahteva potpunu pripremu čelika u pogledu čišćenja, odmašćivanja i brušenja.

Izborom prečnika žice od 1,0 mm se postiglo fino podešavanje parametara zavarivanja i u transferu kratkog spoja i u sprej transferu. Može se zaključiti da je prečnik žice od 1,0 mm univerzalan i da se sa tim prečnikom žice može kvalitetno zavariti i u režimu transfera kratkog spoja i u režimu sprej transfera.

## **5.2 Diskusija tvrdoće, metalografije i zateznih karakteristika**

Od pancirnog čelika se zbog strogih uslova eksploatacije zahteva da poseduje visoku tvrdoću i otpornost na propagaciju prsline. Problemi kod procesa zavarivanja nastaju sa porastom tvrdoće i debljine ploče. Prilikom zavarivanja tvrdoća u gruboznoj zoni može da pređe vrednost od 550 HV. U tom slučaju prsline se veoma lako mogu stvoriti usled zaostalih napona ili usled prisustva čak i male količine vodonika. U skladu sa tim neophodno je izbalansirati vrednost tvrdoće sa jedne strane u pogledu pancirne

zaštite i balističke otpornosti a sa druge strane u pogledu rizika od stvaranja prsline u ovoj osetljivoj zoni.

### 5.2.1 Diskusija tvrdoće u zavarenom spoju

Rezultati mikrotvrdoće u ZUT-u su u granicama od 350 HV do 521 HV, tabele 4.5 do 4.6. Podaci tvrdoće ukazuju da je mikrostruktura u oblasti ZUT-a promenjena u odnosu na početnu martenzitnu, čija je tvrdoća 509 HV.

Tvrdoća osnovnog materijala od 509 HV je postignuta na rastojanju 14 mm merenom od ose metal šava, čime je ispunjen zahtev klauzule vojnog standarda [86] koji se odnosi na balističku otpornost. Sa tvrdoćom od 418 do 442 HV na liniji stapanja, postignut je balans između balističkih zahteva sa jedne i žilavosti zavarenog spoja sa druge strane. Ovim je izbegnuta sklonost prema stvaranju prsline, čija se propagacija može desiti tokom eksploatacije vojnog oklopnog vozila. U pogledu prsline uzrokovanih prisustvom vodonika, sa tvrdoćom od 442 HV na liniji stapanja, omogućena je veća dozvoljena količina vodonika, i ona iznosi od 1÷5 ml na 100 g metal šava. Tvrdoća na rastojanju 2 mm iznad donje površine ima optimalne vrednosti. Maksimalna tvrdoća u grubozrnoj zoni od 402 HV je optimalna u pogledu balističke otpornosti sistema zaštite oklopnog vozila. Kod sličnih pancirnih čelika, tvrdoće 500 HB, tvrdoća izmerena uz liniju stapanja iznosi 460 HV, [108] što je nešto iznad vrednosti postignute u ovom istraživanju. Sa stanovišta pancirne zaštite i balističke otpornosti od proboja streljačke municije važan je izbor unosa toplote jer će on uticati vrednost tvrdoće u grubozrnoj oblasti ZUT-a. Rezultati pokazuju da sa unosom toplote od 0,8 kJ/mm i 1,2 kJ/mm vrednost tvrdoće u grubozrnoj zoni iznosi 541 HV i 502 HV [81]. Rezultati u pomenutom istraživanju su slični sa rezultatima u ovoj doktorskoj disertaciji. Sa unosom toplote od 1,25 kJ/mm vrednost tvrdoće u ovoj doktorskoj disertaciji iznosi 521 HV. Nešto veća tvrdoća postignuta je zbog veće kaljivosti Protac 500 čelika, što je objašnjeno u prethodnom poglavlju. Kod pancirnog čelika klase AISI 4340 sa unosom toplote od 2,37 -1,33 kJ/mm, tvrdoća u grubozrnoj zoni iznosi od 403 -430 HV, [49]. Maksimalna tvrdoća u grubozrnoj oblasti od 443 HV je sa unosom toplote od 2,37 kJ/mm, [50]. Najmanji broj grešaka u zavarenom spoju kod hibridnog laser MIG postupka se postiže pripremom ivica u obliku duplog „Y,, [48]. Rezultati pokazuju da je tvrdoća od 509 HV na 6 mm od ose metal šava. Kada je u pitanju Bisalloy 500, sa temperaturom predgrevanja od 150 °C i unosom toplote od 1,2 kJ/mm



postignute su tvrdoće u grubozrnoj i finoizrnoj zoni 457 HV i 397 HV, [59]. Ako se poredi ispitivanje u ovoj doktorskoj disertaciji sa pomenutim, može se reći da je sa istom temperaturom predgrevanja i približno istim unosom toplote tvrdoća u finoizrnoj zoni skoro ista, međutim tvrdoća u grubozrnoj zoni je osetnije veća. Razlog treba tražiti u većoj kaljivosti Protac 500 čelika a koji je prikazan KH dijagramom, [36].

Kada je u pitanju ZUT oblast i balistička otpornost prodiranja zrna, možemo konstatovati da je za pancirne čelike čija se 100% martenzitna struktura dobija sa brzinom hlađenja od 25 °C/sek, unos toplote od 1,6 kJ/mm granica za pancirnu zaštitu. Veći unos toplote bi narušio balističku otpornost. Kada je u pitanju Protac 500, granica za sprečavanje prodiranja zrna je unos toplote od 1,8 kJ/mm. Unos toplote koji bi bio veći od veći 1,8 kJ/mm bi narušio balističku otpornost.

Vrednosti tvrdoće metal šava se neznatno menjaju po visini u ovoj zoni, slika 4.3. Možemo konstatovati da frekventno oscilovanje pištolja, čiji je cilj bio bolje mešanje osnovnog i dodatnog materijala, nije uticalo na povećanje tvrdoće u ovoj zoni. Za zonu metal šava, austenitnog dodatnog materijala, drugi autori [57] su dobili maksimalnu vrednost tvrdoće od 261 HV i 245 HV za elektrolučni i MIG postupak. Kod oba postupka, tvrdoće su veće u odnosu na tvrdoću od 200 HV prezentovanu u ovoj doktorskoj disertaciji. Međutim, energija udara u ovoj disertaciji je primetno veća u odnosu na ispitivanje energije udara sa pomenutim tvrdoćama. Unos toplote utiče na tvrdoću u zoni metal šava, sa unosom toplote od 0,7 kJ/mm i 0,9 kJ/mm tvrdoća u metal šavu iznosi 197 HV i 233 HV, [59]. Možemo konstatovati da bi unos toplote niži od 0,9 kJ/mm sigurno povećao tvrdoću u zoni metal šava, koja je ~200 HV. Međutim unos toplote niži od 0,9 kJ/mm bi narušio druge osobine u oblasti ZUT-a. Tvrdoća sa austenitnim dodatnim materijalom je niža u odnosu na dodatni materijal sa niskom količinom vodonika. U oba slučaja tvrdoće su znatno ispod zahtevanih vrednosti za pancirnu zaštitu. Međutim energija udara je znatno viša kod austenitnog dodatnog materijala. Stim u vezi, bolje je izabrati dodatni materijal koji ima veću energiju udara zbog uslova eksploatacije vojnih oklopnih vozila. Analiza unosa toplote i načina zavarivanja na raspored tvrdoće je važan aspekt sa stanovišta integriteta zavarene konstrukcije, sklonosti prema prslinama kao i balističkoj otpornosti sistema zaštite vojnog oklopnog vozila.

## 5.2.2 Diskusija metalografije zavarenog spoja pancirnog čelika

Zavareni spoj pancirnog čelika karakterišu promene na osnovnom materijalu usled zagrevanja, tako da je ZUT sastavljen od više zona sa različitim mikrostrukturama.

Najosetljivija zona zavarenog spoja pancirnog čelika je linija stapanja, tzv. bela zona. Linija stapanja razdvaja dve različite mikrostrukture, austenitnu sa površinski centriranom rešetkom i martenzitnu sa tetragonalnom. Na osnovu ispitivanja mikrostrukture optičkim mikroskopom, zaključuje se da prsline nisu prisutne na liniji stapanja. Niska količina difundovanog i zadržanog vodonika nisu mogle da utiču na stvaranje prsline. Veća temperatura predgrevanja i međuprolazna temperatura su omogućile da vodonik difunduje izvan zavareno spoja.

Problem koji se javlja kada se koristi međuprolazna temperature koja je veća od 170 °C, je proširivanje subkritične zone, što utiče na balističku otpornost zavarenog spoja.

Austenitna mikrostruktura metal šava zavarenog spoja prikazana na [slici 5.1. b\)](#) je po gustini slična sa MIG postupkom, austenitnim dodatnim materijalom, prikazanim na [slika 5.1. a\)](#), [49]. Frekventno oscilovanje pištolja, postignuto robotom, je dalo ravnomerniji raspored delta ferita, [slika 5.1. b\)](#) u odnosu na zavarivanje MIG postupkom i austenitnim dodatnim materijalom prikazanim na [slici 5.1. a\)](#). Veća vrednost zatezne čvrstoće i energije udara se može očekivati kod ravnomernijeg rasporeda delta ferita.

U austenitnoj osnovi metal šava je moguć i vermikularni ferit, [3]. Po rasporedu ferit u ovoj strukturi nije ravnomerno raspoređen, dok je zatezna čvrstoća 690 MPa. Pretpostavlja se da je nehomogen raspored delta ferita razlog niže zatezne čvrstoće u odnosu na zateznu čvrstoću od 830 MPa kod ravnomernog rasporeda delta ferita postignuto robotom.

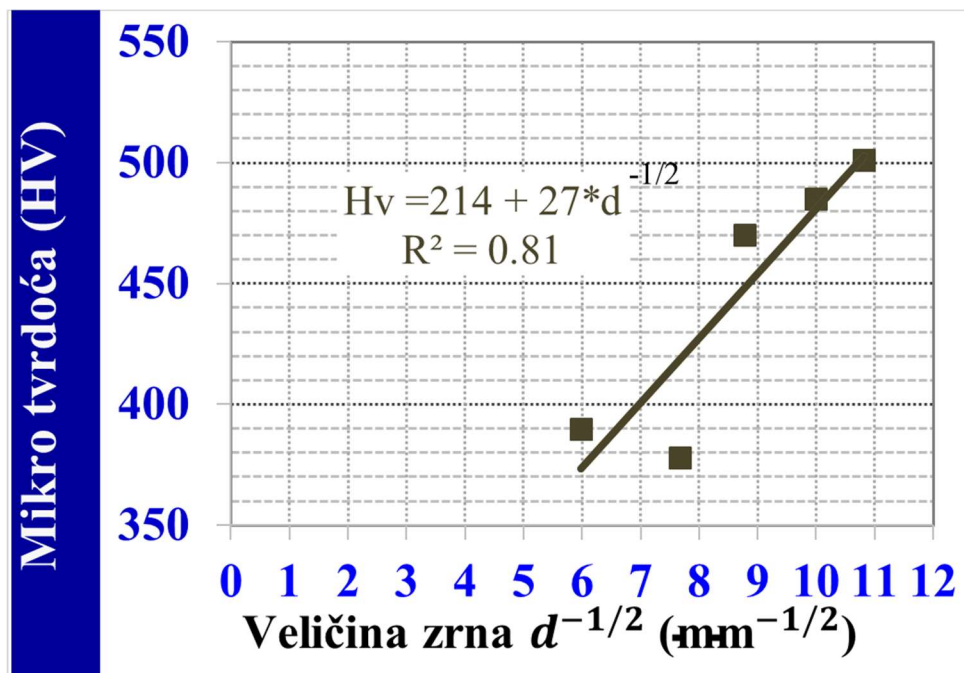
Korišćenjem veće međuprolazne temperature od 200 °C, interkritična zona se ne povećava ili se neznatno povećava, dok se u ZUT-u postiže optimalna tvrdoća, [37]. Tvrdoća se ne smanjuje u grubozrnoj oblasti ZUT-a, upotrebom međuprolazne temperature od 160 °C, dok se rizik od vodoničnih prsline smanjuje, [37].

Tvrdoća materijala, Hv, merena Vickers metodom je proporcionalna naponu tečenja kroz jednačinu  $H_v \sim 2.5 \cdot \sigma_y$ . Ona se može zameniti kroz jednačinu 5.1,

$$H_v = H_0 + K_{HP} \cdot d^{-1/2}$$

5.1

Gde su  $H_0$  i  $K_{HP}$  odgovarajuće konstante povezane sa rezultatima merenja. Hall-Petch-ova jednačina koja povezuje mikrotvrdoću i veličinu zrna je prikazana na slici 5.2. Veza između  $H_v$  i  $d$  je linearna. Konstante  $H_0$  i  $K_{HP}$  su izračunate metodom najmanjih kvadrata. Jednačina regresija koja opisuje vezu između tvrdoće i srednje veličine zrna je  $H_v=214+27*d^{-1/2}$ , sa koeficijenom korelacije  $R^2= 0,81$ .

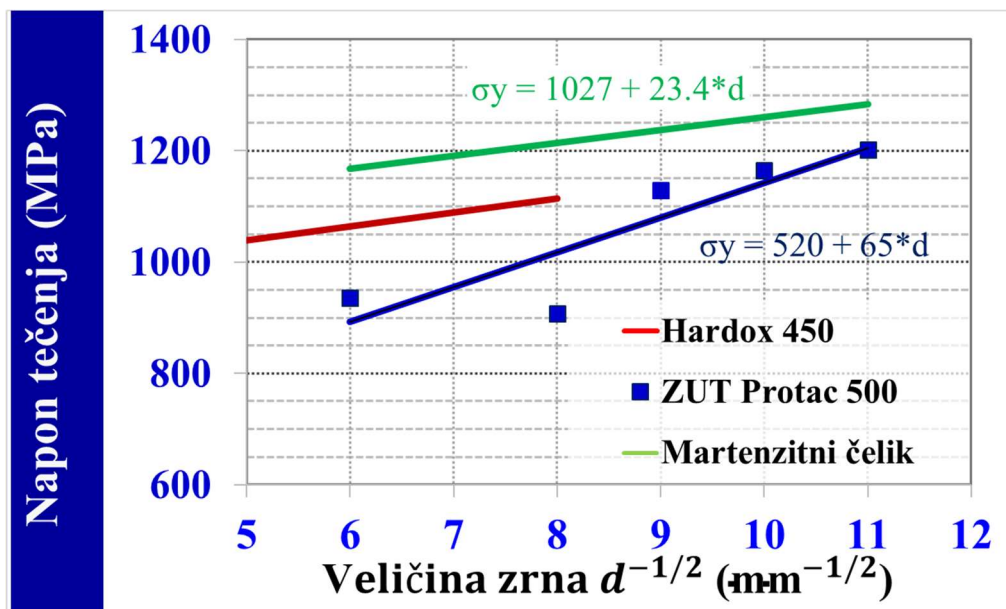


**Slika 5.2.** Vickers mikrotvrdoća u funkciji veličine zrna  $d^{-1/2}$  za ZUT oblast Protac 500 čelika, [116].

Može se konstatovati da se izmerene vrednosti tvrdoće u zavarenom spoju pancirnog čelika slažu sa dobijenom Hall Petchovom formulom  $H_v=214+27*d^{-1/2}$ .

Rezultati izmerenih veličina zrna u oblasti ZUT-a, su pokazala širok dijapazon njegovih veličina. Upoređivanjem dobijenih rezultata sa uzorkom osnovnog materijala, može se konstatovati da je došlo do trostrukog rasta prosečne veličine zrna. Utvrđeno je da je Hall-Petch odnos primenljiv na ZUT i osnovni materijal. Na osnovu rezultata autora koji su ispitali sličan čelik, Hardox 450 [119] i martenzitni čelik [120], izračunati su dijagrami zavisnosti veličine zrna sa ciljem poređenja sa koeficijentima dobijenim za Hall – Petch-ov odnos. Dijagram slika 5.3. pokazuje da postoje razlike između navedenih čelika koje imaju približno isti sastav ugljenika. Razlike su veće sa većom veličinom zrna. Treba napomenuti da su Hardox 450 i martenzitni čelik imali kontrolisano grejanje i hlađenje u cilju dobijanja željene mikrostrukture i veličine zrna. Dok je u slučaju Protac 500 čelika usled procesa zavarivanja i nemogućnosti preciznog i kontrolisanog grejanja i hlađenja, veličina zrna promenjena u određenim

pod oblastima ZUT-a. Razlike treba razmotriti na osnovu mikrostrukture. U čeliku Hardox 450, zbog kontrolisane hlađenja, dobijena martenzitna mikrostruktura za sve veličine zrna, dok se u čeliku Protac 500, usled ne jednakog hlađenja u različitim oblastima ZUT –a, pojavila mešavina martenzitno-beinitne mikrostrukture.



Slika 5.3. Proračunat odnos napona tečenja u funkciji veličine zrna  $d^{-1/2}$  za oblast ZUT-a čelika Protac 500, Hardox 450 [119] i martenzitnog čelika [120].

Dobijena jednačina za odnos tvrdoće prema veličine zrna se slaže sa vrednostima izmerene tvrdoće u zavarenom spoju pancirnog čelika.

### 5.2.3 Diskusija zateznih karakteristika

Zavareni spoj pancirnog čelika i kod manuelnog i kod robotom zavarenog spoja ispunjavaju zahtev standarda [20] koja se odnosi na zatezne karakteristike. Zahtev standarda da minimalna zatezna čvrstoća bude 550 MPa je zadovoljena, odnosno zatezna čvrstoća dobijena u ovom radu je za 230 MPa veća od zahtevane vrednosti.

Razlika zatezne čvrstoće dobijena manuelnim zavarivanjem i zavarivanjem robotom je 130 MPa, nastala je usled sitnijeg i ravnomernije raspoređenog  $\delta$ -ferita. U slučaju manuelnog načina, austenitnim dodatnim materijalom zatezna čvrstoća je u okviru standardnih vrednosti od 700 MPa, [51], kao i kod ispitivanja Murti i saradnika [81]. Zatezna čvrstoća zavarenog spoja robotom je velika za austenitni dodatni materijal, i bliska je vrednosti od 850 MPa izmerenog na zavarenom spoju sa niskovodoničnim feritnim dodatnim materijalom. Kada je u pitanju niskovodonični feritni dodatni materijal, razlika između napona tečenja i zatezne čvrstoće od 30 MPa



je mala, pa je energija udara niska, [53]. Za razliku od niskovodoničnog dodatnog materijala, robotom zavareni spojevi austenitnim dodatnim materijalom imaju veću razliku između zatezne čvrstoće i napona tečenja, u ovom radu razlika iznosi 300 MPa, što ukazuje na rezervu plastičnosti, odnosno da se zavareni spoj ne ponaša krto, a to je poželjna osobina za zavarene spojeve konstrukcije koja se kreće po gruboj podlozi.

### 5.3 Diskusija energije udara

U radu su ispitane zone osnovnog materijala, linije stapanja i metal šava na temperaturama od 20 °C do - 40 °C. Zavareni spoj pancirnog čelika se sastoji iz dve različite strukture, sa različitim zateznim karakteristikama, zbog čega je bilo interesatno videti kako prslina raste ako je vrh zareza na liniji stapanja. U literaturama postoji odgovarajući broj ispitivanja energije udara u zonama metal šava i osnovnog materijala, dok u ZUT-u, na liniji stapanja, ne postoje ispitivanja na tu temu. U svim zonama zavarenog spoja pancirnog čelika su postignute zaovoljavajuće vrednosti energije udara. Najveća vrednost energije udara je u metal šavu, zatim na liniji stapanja dok je najniža u osnovnom materijalu.

#### 5.3.1 Diskusija energije udara u zoni osnovnog materijala

Može se konstatovati da temperatura ne utiče previše na žilavost, odnosno na energiju udara ne samo kod Protac 500 već i kod ostalih pancirnih čelika, [121]. Za Protac 500 postoje podaci o ispitivanju energije udara na - 40 °C, [36] a zabeležena vrednost energije udara je 30 J, [87], što je slično sa rezultatom od 27,7 J u ovom ispitivanju. Energije udara od 36 J izmerena na temperaturi od 20 °C [36], približno je slična sa rezultatom od 35,2 J u ovoj disertaciji, tabela 5.1.

**Tabela 5.1.** *Uporedni rezultati energije u ispitivanjima Bernetič [36], Trajkovskog [87] sa rezultatima u ovom ispitivanju za zonu osnovnog materijala čelika Protac 500.*

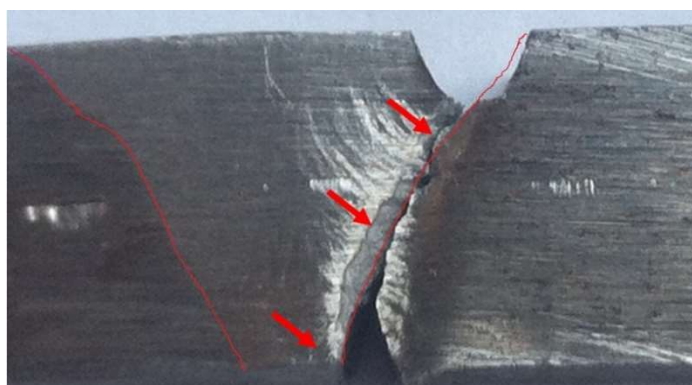
Ispitivanje energije udara u osnovnom materijalu				
Pozicija zarez	Temperatura ispitivanja [ °C]	Ispitivanje Čabrilo [J]	Ispitivanje Bernetič [J]	Ispitivanje Trajkovski [J]
Osnovni materijal	20	35,2	36	
	-40	27,7	23	30

Kada je u pitanju ispitivanje na temperaturi od 20 °C, energija za iniciranje prsline iznosi 30,4 J, [slika 5.5.](#), što je 86% utrošene energije za lom, što ukazuje na krto ponašanje, jer je mala energija potrebna za rast prsline, što se smatra očekivanim kada je u pitanju pancirni čelik.

Na temperaturi od -40 °C, energija za propagaciju prsline se neznatno smanjila u odnosu na energiju za iniciranje, i iznosi svega oko 2 J, [slika 5.5](#), što ukazuje na krto ponašanje čelika na toj temperaturi.

### 5.3.2 Diskusija energije udara u zoni linije stapanja

Pokazatelj kvaliteta zavarenog spoja jesu rezultati ispitivanja energije udara sa pozicijom zarez na liniji stapanja. Na osnovu ove vrednosti može se dati krajnja ocena kvaliteta zavarenog spoja pancirnog čelika. Rezultati pokazuju da prsline pri propagaciji prati liniju stapanja, [slika 5.4](#).



**Slika. 5.4.** *Šarpi epruvete sa prelomom koji prati liniju stapanja zavarenog spoja.*

Vrednost energije udara na svim temperaturama nam ukazuje da je propagacija prsline bila veoma otežana. Međutim, može se konstatovati da je došlo do izraženog pada energije udara sa padom temperature ispitivanja. Sa smanjenjem temperature od 20 °C na - 40 °C pad vrednosti energije udara iznosi sa 75,3 J na 40,0 J, [slika 5.5](#).

Smanjenje energije udara od 35,3 J, je najveće u odnosu na sve zone koje su ispitivane.

Na temperaturi od 20 °C, odnos energija za iniciranje i propagaciju iznosi 70:30. Kada je u pitanju ispitivanje na temperaturi od 0 °C, može se konstatovati da je energija za inicijaciju od 52 J visoka vrednost. Energija za propagaciju iznosi 23,3 J, što je isto visoka vrednost. Na krivoj energija - vreme, nakon energije za inicijaciju nastupio je blag pad. Što nam ukazuje da je bila potrebna veća energija za propagaciju prsline. Treba napomenuti da je na svim temperaturama energija stvaranja prsline jako promenljiva, to je iz razloga što prsline ne raste na liniji stapanja, malo prelazi iz jednog područja u drugo što se može videti i iz ispitivanja EDS, [slika 4.28](#).

Podacije energije udara se mogu povezati sa dobijenim vrednostima tvrdoće izmerene oko linije stapanja. Energija udara raste sa padom vrednosti tvrdoće. Na osnovu KH dijagrama prezentovanim u ispitivanju Bernetič [\[36\]](#), mikrostruktura sa vrednošću tvrdoće od 445 HV se sastoji od beinita i martenzita. Na osnovu istog autora osnovni materijal od 509 HV ima energiju udara od 36 J i 23 J, na temperatura od 20 °C i - 40 °C, respektivno. Kao što to [slika 4.10](#) pokazuje, tvrdoće oko linije stapanja su u opsegu od 418 HV do 441 HV, što indikuje da beinit povećava vrednost energiju za iniciranje i propagaciju prsline. Fraktografija SEM-om na -20 °C i -40 °C pokazuje da krti lom više preovlađuje.

Najveća krtost se pojavljuje u području ZUT pored šava, odnosno u grubozrnoj oblasti [\[46, 47\]](#). Pokazalo se da prelazna temperatura krtosti odgovara vrsti mikrostrukture.

Smanjenje energije udara je u oblasti linije stapanja odnosno grubozrnom području i području zagrejanom ispod ili iznad A3 [\[36\]](#).

### 5.3.3 Diskusija energije udara u zoni metal šav-a

Vrednost površine ispod krive napon deformacija kod ispitivanja zateznih karakteristika, potom i metalografski snimci ravnomernog rasporeda  $\delta$ -ferita su nam predskazali više vrednosti energije udara. Smanjenje energija udara sa 84,4 J na 64,4 J, dobijenim na temperaturama 20 °C i - 40 °C, je primetan. Veliki pad je karakterističan za duktilne materijale [\[122\]](#), zato što se smanjuje energija potrebna za propagaciju prsline. SEM mikroskopija je pokazala duktilni lom na svim temperaturama ispitivanja. Rezultati u ovom ispitivanju su pokazali veće vrednosti u

odnosu na ista ispitivanja na temu pancirnih čelika zavarenim austenitnim dodatnim materijalom. U [tabeli 5.2.](#) su prikazani uporedni rezultati ispitivanja [\[3 i 49\]](#).

**Tabela 5.2.** *Uporedni rezultati ispitivanja energije udara u zoni metal šava pancirnih čelika zavarenim austenitnim dodatnim materijom na temperaturi 20 °C.*

	Temperatura ispitivanja	Čabrilo	Murti	Magudeeswaran
Način zavarivanja		MIG	MIG	REL
Vrednost energije udara	[°C]	[J]	[J]	[J]
	20	84,4	65	62

U odnosu na metalografiju prikazanom u ispitivanju Murti [\[3\]](#) primetna je veća količina  $\delta$ -ferita. Potom, segregiran  $\delta$  - ferit je primetan u ispitivanju Magudeeswaran [\[57\]](#), dok je u rezultatima ovog rada on ravnomerno raspoređen, što može biti uzrok veće energije udara u odnosu na oba ispitivanja.

Gušći i ravnomerniji raspored  $\delta$  - ferita je dobijen REL postupkom u odnosu na MIG postupak u ispitivanju Magudeeswaran [\[79\]](#). Količina  $\delta$  - ferita izmerena u okviru ispitivanja ove doktorske disertacije je približno ista sa REL zavarivanjem u ispitivanju Magudeeswaran [\[79\]](#), sa napomenom da je raspored  $\delta$  - ferita u ovom ispitivanju ravnomerniji. Na osnovu ove činjenice je i energija udara nešto veća za 22,4 J i 25,4 J u odnosu na REL i MIG postupak respektivno.

Na krivoj energija-vreme, nakon energije za iniciranje nastupio je veoma blag pad, karakterističan za duktilni lom. Što nam ukazuje da je bila potrebna visoka energija za propagaciju prsline. Za razliku od osnovnog materijala i ZUT-a, u zoni metal šava je potrebna veća energija za propagaciju  $E_P$  i odnos energija je 35: 65 u korist energije za propagaciju prsline.

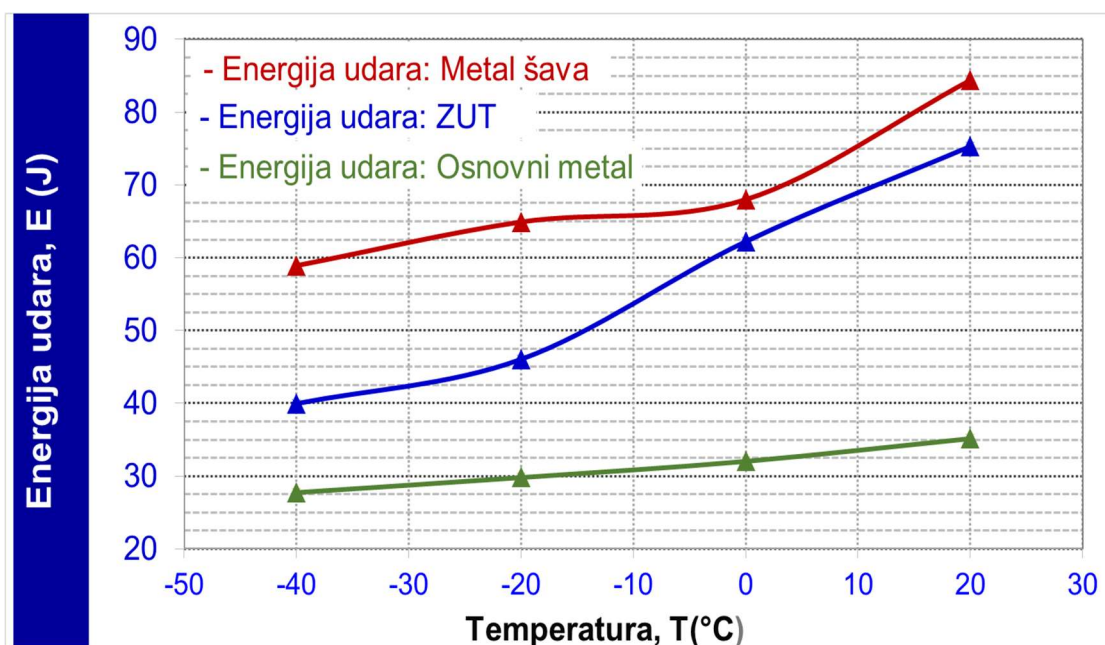
Kada je u pitanju temperatura od - 40 °C, odnos energija za propagaciju i iniciranje prsline je ostao isti 34 : 66% u korist energije za propagaciju, [slika 5.5](#). Nakon postizanja energije za inicijaciju od 20,8 J, dolazi do blagog pada krive i potrebna energija za propagaciju iznosi 40,7 J.

SEM mikroskopija nam ukazuje da je lom bio duktilan na svim ispitivanim temperaturama. Najveća duktilnost je pokazala površina koja je ispitana na sobnoj temperaturi.

Energije udara na temperaturama od - 40 °C i 20 °C su postignute zbog optimalne tvrdoće od 200 HV i visokog sadržaja nikla i mangana. Energija udara od 56 J potrebna



za iniciranje prslina je tipična za duktilne materijale. Austenitni dodatni materijal je pokazao smanjenje absorbovane energije sa smanjenjem temperature ispitivanja. Na temperaturi od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , energija udara za inicijaciju se značajno smanjila, [slika 5.5](#), ali je i dalje ostala visoka. Viša energija udara u odnosu na isti dodatni materijal i postupak zavarivanja u ispitivanju Magudeeswaran [57], se može povezati sa rezultatima zateznih karakteristika i veće površine ispod krive napon deformacija postignute u ovom radu.



**Slika 5.5.** Uporedni dijagram prelaznih temperatura krtosti za poziciju prslina u metal šavu, ZUT-u i osnovnom materijalu, za četvero prolazni MIG procesa zavarivanja.

## 5.4 Diskusija mehanike loma zavarenog spoja

U literaturi postoji veoma mali broj ispitivanja žilavosti loma u osnovnom materijalu pancirnog čelika, dok u ZUT-u i metal šavu skoro da i ne postoji ispitivanja na tu temu. U ovo istraživanju žilavost loma je određena u osnovnom materijalu, ZUT-u, ZUT/metal šav-u i metal šavu. U svim zonama zavarenog spoja pancirnog čelika su postignute zaovoljavajuće vrednosti žilavosti loma. Najveća vrednost žilavosti loma je u metal šavu, zatim u ZUT-u i ZUT/metal šavu dok je najniža u osnovnom materijalu.

### 5.4.1 Diskusija mehanike loma u osnovnom materijalu

U literature ima veoma malo podataka o žilavosti loma za pancirnih čelika klase 500 HB, u koji spada Protac 500. Veličina žilavosti loma, vrednost od  $86\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,

dobijena u ovom ispitivanju, omogućuje određivanje kritičnog opterećenja za veličinu prslina koja može da se pojavi u osnovnom materijalu. Za određivanje žilavosti loma korišćena je tehnika pada potencijala i popustljivosti epruvete [88]. Da bi se kao parametar dobila žilavost loma, neophodno je da u uzorku postoje uslovi koji mogu da se definišu linearno-elastičnom mehanikom loma, a to se proverava odnosom žilavosti loma  $K_{IC}$  i napona tečenja  $\sigma_T$ , prema standardu [102]. Zahtevi standarda su se ispunili na svih pet ispitanih epruveta pre čemu se na epruvetama nije primetio pop-in, dok je prslina rasla stabilno, što znači da nema nekih krkih područja kroz koje prslina brže napreduje. Žilavost loma je slična veličini dobijenoj u radu za isti materijal, [36]. Međutim, ona je nešto niža u odnosu na pancirni čelik iz iste klase, Bisalloy 500 [89], gde je dobijeno za  $K_{IC}$  u uzdužnom pravcu  $121 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , a u poprečnom  $111 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

Tunelovanje, odnosno zaostanje rasta prslina po bokovima epruvete se nije desilo, već je prslina ravnomerno rasla i po sredini i po bokovima sa najvećim odstupanjem između maksimalnog i minimalnog fronta od 0,1 mm. Fraktografija ispitana SEM-om ukazuje da u ovom slučaju postoji ravnomerna zona razvlačenja duž celog uzorka. Osnovni materijal je pokazao dobar i izbalansiran odnos između žilavosti loma i tvrdoće. Najniža žilavost loma u ovoj u odnosu na sve ostale zone zavarenog spoja je očekivana s obzirom na martenzitnu strukturu osnovnog materijala.

## 5.4.2 Diskusija mehanika loma u ZUT-u i ZUT-metal šav-u

### 5.4.2.1 Diskusija mehanika loma u ZUT-u

Žilavost loma  $K_{IC}$  je zbog linearno-plastičnog ponašanja dobijena posredno na osnovu  $J$ - $R$  krive.  $J$ - $R$  kriva je dobijena tehnikom pada potencijala, upotrebom jedne epruvete, čije su dimenzije 20x10x120 mm, prikazane na slici 3.16. Pozicija zamorne prslina je prikazana na slici 4.42. Dok kritična vrednost  $J_{IC}$  za iniciranje prslina, dužine 0,15 mm, iznosi  $J_{0.15\text{mm}}=355 \text{ kJ/m}^2$ .

Rast prslina je kroz neuniformnu strukturu. Izračunata vrednost žilavosti loma iznosi  $K_{IC}=285 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Poredeći vrednost žilavosti loma ove pozicije prslina sa prslinom u osnovnom materijalu može se konstatovati evidentna razlika od  $200 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ .

Površina preloma je mešovito duktilno krta sa vidljivo zonom razvlačenja.

Rezultati ispitivanja Zhang-a i Knott-a [123] pokazuju da na žilavost otpuštenog martenzita ne utiče temperatura austenitizacije, odnosno veličina austenitnih zrna.

Time mikrostrukturalni parametri koji su strogo vezani za temperaturu austenitizacije, kao što je veličina zrna i veličina martenzitnih paketa nisu faktori koji utiču za žilavost loma martenzita. Uočeni karbidi su fini sa dimenzijama manjim od 0,1 mm. Rezultati ispitivanja, Takebayash-a [124] pokazuju da na veličinu karbida ne utiče temperatura austenitizacije, odnosno veličina austenitnih zrna. U ovom ispitivanju se zaključuje da debljina karbida kontroliše žilavost loma otpuštenog martenzita.

#### 5.4.2.2 Diskusija mehanike loma u ZUT-metal šavu

Kritična vrednost  $J$ , za inicijaciju prsline dužine 0,15 mm, iznosi  $J_{0.15mm}=357 \text{ kJ/m}^2$ . U odnosu na žilavost loma u ZUT-u u ovoj zoni su veće vrednosti kritičnog  $J$ -integrala.

Posredno izračunata žilavost loma  $K_{IC}$  za poziciju zamorne prsline u ZUT-u je određena na osnovu  $J$ -integrala zbog linearno-plastičnog ponašanja ove oblasti [125, 126]. Vrednost žilavosti loma iznosi  $K_{IC}=285 \text{ MPa m}^{1/2}$ .

Površina preloma u ovoj oblasti je na pojedinim mestima je sa vidljivom zonom razvlačenja i vidi se da je prslina pri otvaranju ušla u oblast metal šava.

#### 5.4.3 Diskusija mehanike loma u metal šavu

Proces zavarivanja pancirnih čelika je kompleksan ne samo zbog visokog procenta ugljenika u osnovnom materijalu već i zbog mogućih grešaka, koje se pojavljuju u zoni metal šava u formiranja prsline i pora. Integritet konstrukcije vojnih oklopnih vozila je važan u pogledu sigurnosti u toku vojnih operacija i njenog servisnog veka.

Na osnovu zateznih karakteristika najslabija zona zavarenog spoja pancirnog čelika je metal šava. Za teške konstrukcije kao što su vojna oklopna vozila, koja su frekventno pod efektom udarnih i dinamičkih opterećenja, neophodno je poznavati žilavost loma najslabije zone zavarenog spoja pancirnog čelika. Posebno ako se ima u vidu činjenica da su ovoj zoni moguće greške u vidu prsline i pora.

Određivanje mehanike loma u zoni metal šava je urađena na SEN (B) epruvetama, inkrementalnom metodom prema standardu ASTM E 1820 [102]. Vrednost kritičnog  $J$  integrala,  $J_{IC}$ , iznosi  $545 \text{ kJ/m}^2$ . U odnosu na ostale pozicije zareza, otpornost rasta prsline u ovoj zoni je najveća.

Dobra kombinacija tvrdoće i žilavosti loma je postignuta sa finim skeletom  $\delta$  - ferita u austenitnoj osnovi, [slika 4.13. a i b](#)). Količina  $\delta$  - ferita iznosi 6,8 %. Dobra kombinacija žilavosti, čvrstoće i otpornosti na rast prsline je postignuta ravnomernim rasporedom  $\delta$ -ferita u austenitnoj osnovi. Hemijski sastav metal šava se sastoji od ~8,25% nikla. Brzina hlađenja u toku procesa zavarivanja i hemijski sastav dodatnog materijala imaju uticaj na količinu, oblik i homogenost  $\delta$  - ferita u austenitnoj osnovi. Delta ferit postaje finiji ako se brzina hlađenja smanjuje [\[54\]](#). Brzina hlađenja je definisana: unosom toplote, temperaturom predgrevanja i debljinom ploče koja se zavaruje. Unos toplote od 2,1 kJ/mm je rezultirao sporijom brzinom hlađenja. Osnovni materijal u zavarenom spoju je uvek veće tvrdoće u odnosu na metal šava. Visoka vrednost  $J_{IC}$  je postignuta optimalnom tvrdoćom kao i visokim sadržajem nikla i mangana. Izraženija otpornost rasta prsline u ovoj oblasti se može naći u uticaju nikla. Nikl stabilizuje austenit, i igra važnu ulogu u kontroli mikrostrukture. Poznato je da se sa povećanjem nikla povećava i žilavost loma metal šava [\[127\]](#). Žilavost loma se može uporediti sa rezultatom kod martenzitne nerđajuće livene strukture, 13% Cr-4%Ni, čelika 415, gde vrednost J-integrala iznosi  $416 \pm 71 \text{ kJm}^2$  [\[128\]](#). U martenzitnoj livenoj strukturi odlučujući faktor na vrednost J-Integrala ima raspored i veličina uključaka, kao i homogenost odnosno nehomogenost duktilnih jamica.

Osnovna prednost procene žilavost loma materijala je mogućnost proračuna potrebne veličine greške neophodne za lom kada su podaci kao što su  $K_{IC}$ ,  $\delta$  i  $\delta_{max}$  kao i koncentracija opterećenja i priroda opterećenja poznati.

Na osnovu pomenutog tip ponašanja materijala  $K$  i  $\delta$  se mogu koristiti za realističku kalkulaciju dozvoljene veličine greške za praktične primene. Otvaranje prsline pri maksimalnom opterećenju,  $\delta_{max}$ , se može koristiti za procenu dozvoljene veličine greške za svrhu komparacije materijala [\[129\]](#).

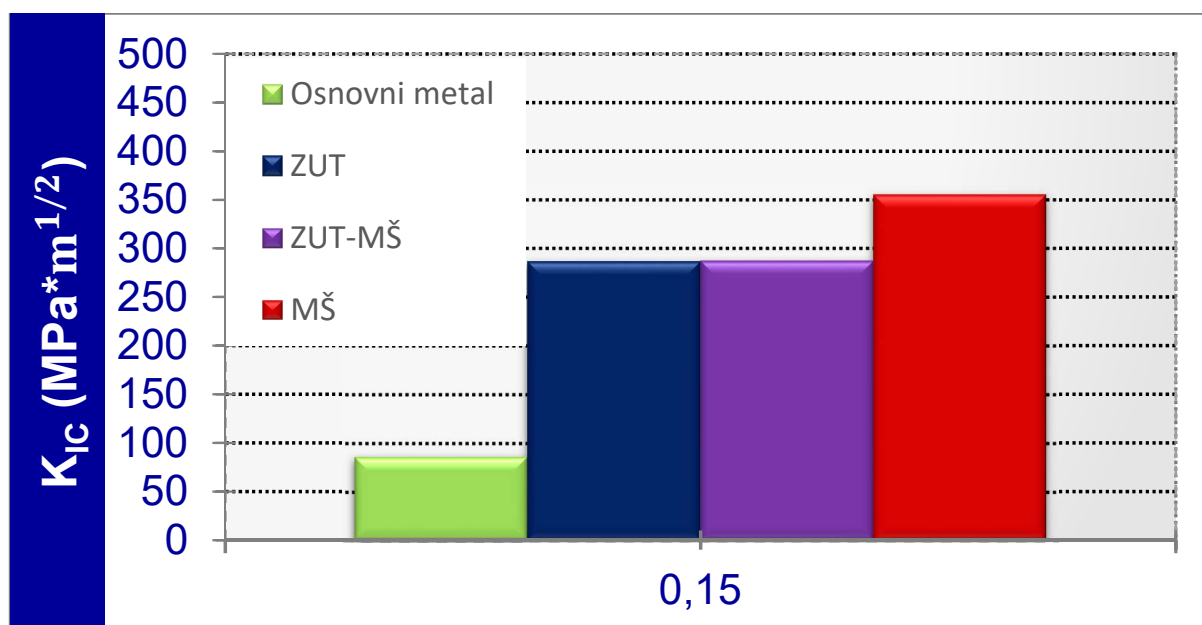
U većem broju publikacija [\[130, 131\]](#) je predložen metod za proračun dozvoljene veličine greške na osnovu podataka žilavosti loma [\[132\]](#). Dozvoljena veličina je dva puta veća od kritične veličine. Proračun je urađen na osnovu prethodne publikacije gde je opterećenje  $500 \text{ N/mm}^2$ . Neophodno je naglasiti da je proračun urađen sa greškom u obliku elipse sa odnosom dužina visina 5:1 i debljinom ploče 10 mm. Rezultati prikazani u [tabeli 5.3](#). pokazuju da je najveća dozvoljena dužina prsline dužine 80,6 mm dok je najmanja 4,7 mm. Kada su u pitanju zone ZUT i ZUT-metal šav ne postoji značajna razlika u dužini prsline dok maksimalna dužina iznosi 25 mm.



**Tabela 5.3.** Najveća dozvoljena dužina prsline za dozvoljenu žilavost loma.

Materijal	Napon tečenja	Žilavost loma	Dozvoljena veličina prsline
	$\sigma$	$K_{IC}$	dužina
	N/mm <sup>2</sup>	[MPa*m <sup>1/2</sup> ]	mm
Osnovni materijal	1206	86	4,7
ZUT	/	286	52,3
ZUT-Metal šav	/	287	52,7
Metal šav	833	355	80,6

Uporedne vrednosti žilavosti loma,  $K_{IC}$ , za sve četiri oblasti zavarenog spoja su prikazane na slici 5.6. Žilavost loma za poziciju zamorne prsline u osnovnom materijalu pokazuje jasne karakteristike krtog loma. Zatim žilavost loma u ZUT-u i ZUT metal šavu jasno govori da se ona može povećati drugačijom mikrostrukturom koja se formirala procesom zavarivanja. Na osnovu rezultata pokazano je da žilavost loma veća u grubozrnoj oblasti ZUT-a u odnosu na zonu osnovnog materijala. Može se primetiti da se žilavost loma,  $K_{IC}$ , povećava sa približavanjem zoni metal šava. Žilavost loma,  $K_{IC}$ , u ZUT-u i ZUT-metal šavu se drastično povećala u odnosu na osnovni materijal. Vrednost žilavosti loma,  $K_{IC}$ , je bliže vrednosti zone metal šava nego vrednosti osnovnog materijala.

**Slika 5.6.** Uporedna vrednost žilavosti loma,  $K_{IC}$ , za pozicije prsline u osnovnom materijalu, ZUT-u, ZUT metal šavu i metal šavu zavarenog spoja pancirnog čelika.

## 5.5 Diskusija parametara rasta zamorne prsline u zavarenom spoju pancirnog čelika

U radu su ispitane zone osnovnog materijala, ZUT-a. ZUT/metal šava i metal šava na temperaturi od 20 °C. U literaturama postoji veoma mali broj ispitivanja brzina rasta zamorne prsline u osnovnom materijalu i metal šavu pancirnog čelika, dok u ZUT-u ne postoje ispitivanja na tu temu. U svim zonama zavarenog spoja pancirnog čelika su postignute zaovoljavajuće vrednosti brzine rasta zamorne prsline. Najveća otpornost na rast prsline je zabeležena u ZUT-u i ZUT/metal šavu, dok je najniža u osnovnom materijalu.

### 5.5.1 Diskusija parametara rasta zamorne prsline u osnovnom materijalu

Prag faktora intenziteta napona u zoni osnovnog materijala iznosi  $10.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Vrednost praga faktora intenziteta napona,  $K_{th}$ , za čelike sa sličnom čvrstoćom, AISI 4340 i 300M iznosi  $5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  [133]. Pancirni čelici, koji imaju visoku tvrdoću pokazuju osetljivost čak i na male faktore koncentracije napona. Rezultat nam ukazuje da visoka čvrstoća, koju poseduje čelik Protac 500, nije negativno uticala na njegove zamorne karakteristike.

Brzina rasta zamorne prsline od  $10,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  je veća od rezultata  $4,62 \text{ MPa}/\text{m}^{1/2}$  za isti pancirni čelik Protac 500 predstavljen u doktoratu Bernetič. Ispitivanje je pokazalo da brzina rasta prsline zavisi od njene orijentacija u odnosu na pravac segregacije pancirnog čelika [1, 89].

Pancirni čelici su osetljivi čak i kod veoma malih opterećenja, zbog čega nastala prsline u toku proizvodnje ovih čelika može postati opasna tokom eksploatacije vojnih oklopnih vozila. Ranija ispitivanja [89], predstavljaju da pancirni čelik ima veću žilavost u L-T poprečnom u odnosu na T-L uzdužnu orijentaciju. Ova različitost u brzini rasta zamorne prsline je povezana sa orijentacijom mikrostrukture nastale kao posledica proizvodnje pancirnog čelika. Pravac slojevite segregacije se poklapa sa orijentacijom u T-L poprečnom pravcu.

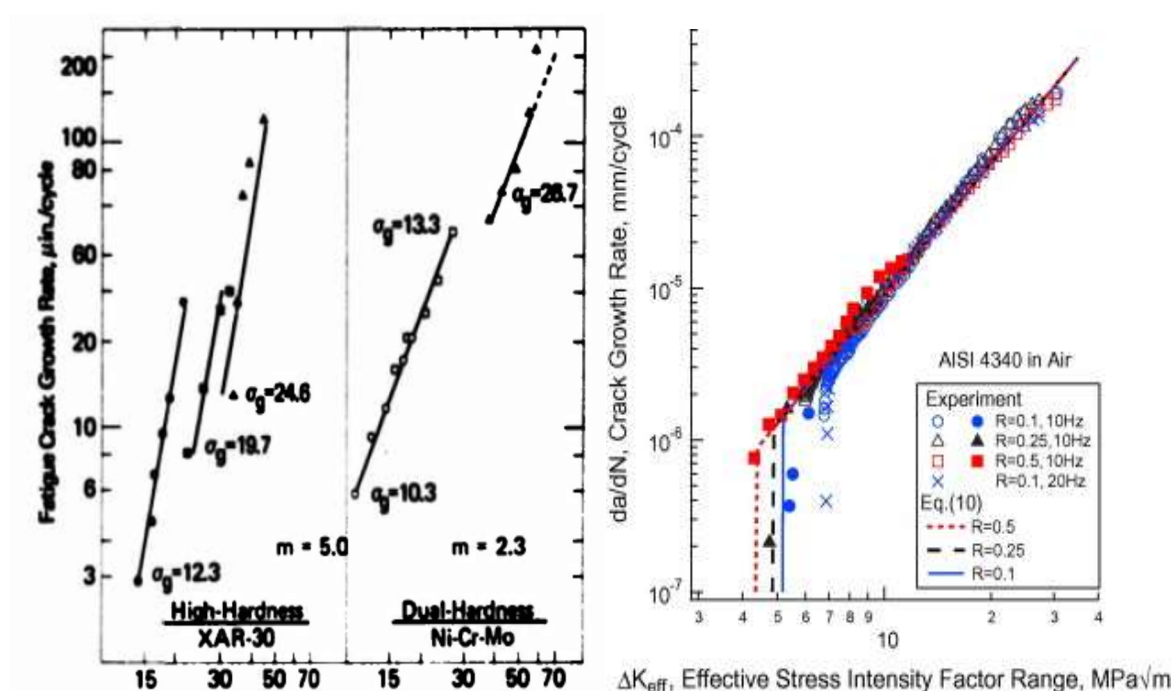
Analiza fraktografije pancirnog čelika testiranog pod različitim opterećenjima su nam dale vredne informacije o modelu loma. U ispitivanju je pokazano da se sekundarni rast prsline pojavio u njenoj ravni rasta kao posledica pravca slojevite segregacije. Sekundarna prsline je jasnija kod uzoraka testiranih u L-T pravcu nego u odnosu na T-L pravac [slika 4.48](#). Jasno je sa [slika 4.48](#) da slojevita segregacija

direktno utiče na interakciju sa primarnom prslinom. Ova interakcija je prvo vodila do rasta prsline do sloja segregacije, što je dovelo do njenog loma. Dok je ostatak nastavio da raste normalno u odnosu na pravac segregacije. Ovo ponašanje je vodilo do usporavanja rasta prsline.

Ozbiljna briga se mora voditi za problem stvaranja prsline u vojnim oklopnim vozilima. Borbeno vozilo se mora kontrolisati na strukturalne prsline sa jasnom orijentacijom u odnosu na pravac valjanja naročito za zavarene konstrukcijske spojeve gde se mogu javiti prsline koje mogu uticati na katastrofalni lom.

U pancirnom čeliku sa tvrdoćom 500 HB [1, 2], prag faktora koncentracije napona iznosi  $16,22 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$  u T-L pravcu i  $18,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$  L-T pravcu za brzina rasta prsline od  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ . Dok je za pancirne čelike sa tvrdoćom do 460 HV [50], prag faktora koncentracije napona iznosi  $9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$ , za dužinu prsline od  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ .

Jedno od najvažnijih pitanja u ovom delu rada je poređenje brzine rasta prsline Protac 500 čelika i ostalih pancirnih čelika. Na slici 5.5 su prikazane krive brzine rasta prsline za pancirne čelike klase AISI 4340 [96, 134], Ni-Cr-Mo i XAR 30 [135]. Ni-Cr-Mo čelik i XAR 30 čelik imaju najveću brzinu rasta prsline. Eksponent brzine rasta prsline „ $m$ “, je za XAR 30 čelik  $m=5,0$  dok je za AISI 4340 on  $m=2,6$  [96], pri čemu Ni-Cr-Mo čelik ima nešto nižu vrednost od AISI 4340, dok za Protac 500 vrednost faktora „ $m$ “, iznosi  $m=3,079$ .



Slika 5.7. Parisova kriva za pancirne čelike AISI 4340 [124], Ni-Cr-Mo i XAR 30 [32].

Kada su u pitanju pancirni čelici odnos  $a/W$  ne utiče na prag faktora intenziteta napona [134]. Vrednost koeficijenta  $m$  za čelik AISI 4340 iznosi 2,36 [134]. Prag faktora koncentracije napona za čelik AISI 4340, kod odnosa napona  $R=0,1$  iznosi  $K_{th}=8,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$  [136]  $K_{th}=5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$  [137]. Kod većeg odnosa napona  $R=0,5$ , prag faktora koncentracije napona je nešto veći i iznosi  $K_{th}=9,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1/2}$  [136].

## 5.5.2 Diskusija parametara rasta zamorne prsline u ZUT-u i ZUT - metal šav-u

### 5.5.2.1 Diskusija parametara rasta zamorne prsline u ZUT-u

Vrednost praga faktora koncentracije napona,  $K_{th}$ , u zoni ZUT-a iznosi  $12,7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Prag faktora koncentracije napona je za 20% veći u odnosu na osnovni materijal. Slično rezultatima kod ispitivanja mehanike loma i kod testa brzine rasta zamorne prsline pokazane su veće vrednosti u odnosu na osnovni materijal.

Metalografsko ispitivanje je pokazalo da su pločice donjeg beinita nastale na mestu austenitnog zrna, dok su pločice martenzita u okolini donjeg beinita. Pločice donjeg beinita su pod velikim uglom orjentisane jedna prema drugoj, što je uticalo na granjanje i menjanje orjentacije prsline. Zbog čega je prag faktora koncentracije napona porastao u odnosu na osnovni materijal, dok je brzina rasta prsline opala. Protac 500 sadrži i veću količinu silicijuma, zbog čega su se stvorili karbidi za vreme beinitne transformacije, dok se tanak film zaostalog austenita formirao na granici prethodnog austenitnog zrna. Tanak zaostali austenitni sloj filma ne samo da je eliminisao štetan efekat karbida i odvojio beinitne pločice i finu mikrostrukturu već je i zatupio zamornu prslinu. Ovo zatupljenje je smanjilo faktor koncentracije napona, zbog čega se povećao otpor rastu zamorne prsline i smanjila stopa propagacije prsline.

Poredeći metalografske uzorke osnovnog materijala i ZUT-a, [slika 4.12 h](#)) [36] i [slika 4.2 f](#)), respektivno, može se primetiti da je mikrostruktura osnovnog materijala 100% od otpuštenog martenzita. Dok su paketi martenzita pod malim uglom u dezorijentaciji. Za razliku od osnovnog materijala, ZUT se sastoji od martenzitno beinitnih paketa, dok su im međusobne orjentacije pod velikim uglom u dezorijentaciji, što utiče na sporiji rast prsline [138].



### 5.5.2.2 Diskusija parametara rasta zamorne prsline u ZUT-metal šav-u

Vrednost praga faktora koncentracije napona,  $12,7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , u zoni ZUT-a je za 20% veća u odnosu na osnovni materijal. Slično rezultatima kod ispitivanja mehanike loma i kod testa brzine rasta zamorne prsline su pokazane veće vrednosti u odnosu na osnovni materijal.

Metalografsko ispitivanje je pokazalo da su pločice donjeg beinita, nastale na mestu austenitnog zrna, dok su pločice martenzita u okolini donjeg beinita. Pločice donjeg beinita su pod velikim uglom orjentisane jedna prema drugoj, što je uticalo na granjanje i menjanje orjentacije prsline. Zbog čega je prag faktora koncentracije napona porastao u odnosu na osnovni materijal, dok je brzina rasta prsline opala. Protac 500 sadrži i veću količinu silicijuma, zbog čega su se stvorili karbidi za vreme beinitne transformacije, dok se tanak film zaostalog austenita formirao na granici prethodnog austenitnog zrna. Tanak zaostali austenitni sloj filma ne samo da eliminisao štetan efekat karbida i odvojio beinitne pločice i finu mikrostrukturu već je i zatupio zamornu prslinu. Ovo zatupljenje je smanjilo faktor koncentracije napona, zbog čega se povećao otpor rastu zamorne prsline i smanjila stopa propagacije prsline.

Poredeći metalografske uzorke osnovnog materijala i ZUT-a, [slika 4.12](#), može se primetiti da je osnovni materijal kompletno napravljen od otpuštenog martenzita. Dok su paketi martenzita pod malim uglom u dezorijentaciji. Za razliku od osnovnog materijala, ZUT se sastoji od martenzitno beinitnih paketa, dok su im međusobne orijentacije pod velikim uglom u dezorijentaciji.

### 5.5.3 Diskusija parametara zamorne prsline u metal šavu

Dobra kombinacija čvrstoće i žilavosti je postignuta finim rasporedom  $\delta$ -ferita u austenitnoj osnovi [[139](#), [140](#)]. Metal šava je u prethodnom ispitivanju zateznih karakteristika pokazao veću zateznu čvrstoću u odnosu standardnu vrednost od 690 MPa. Materijal sa većim naponom tečenje ima veću unutrašnju energiju, što je uticalo povoljno u otporu na rast prsline [[141](#)].

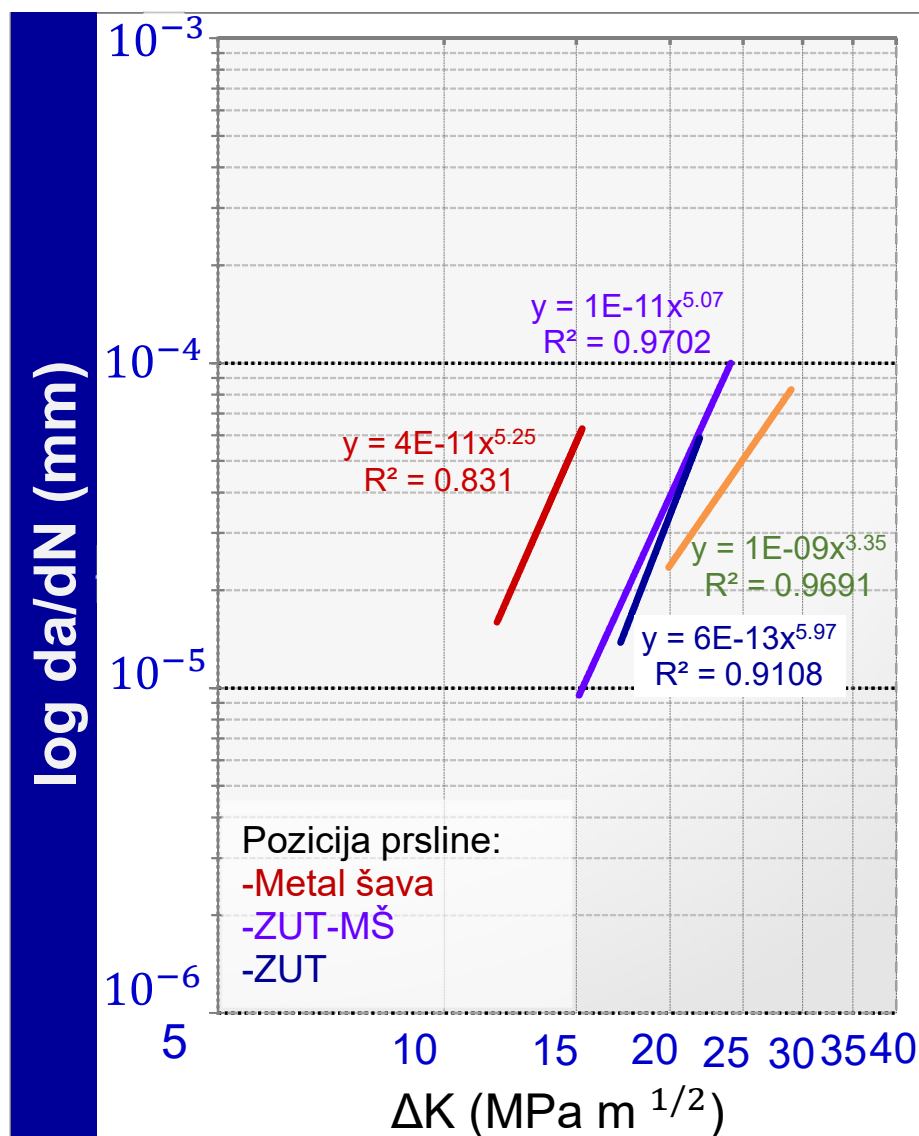
Zamorna prslina počinje sa propagacijom kada spoljna energija bude veća od unutrašnje energije materijala. Veličina platične zone će biti veća kod materijala sa većom žilavošću loma i većom duktilnošću. Dok će materijal sa manjim naponom tečenja proizvesti manju plastičnu zonu a time će i brzina propagacija prsline biti veća.

Pomenuti zaključci su glavni razlozi boljih performansi spoja dobijenog korišćenjem austenitnog u odnosu na osnovni materijal. Količina  $\delta$ -ferita u metal šavu zavisi od hemijskog sastava i od istorije zagrevanja i hlađenja.  $\delta$ -ferit u metal šavu je pod uticajem brzine hlađenja u rastopljenom stanju. Brzina hlađenja zavisi od unosa toplote i debljine osnovnog materijala [142]. Količina  $\delta$ -ferita dostiže maksimalnu vrednost pri srednjoj brzini hlađenja. Slično sa brzinom hlađenja, velika brzina hlađenja smanjuje količinu  $\delta$ -ferita. Unos toplote i brzina hlađenja utiču na morfologiju, veličinu, oblik i distribuciju ferita. Ferit biva finiji ako je unos toplote niži, dok je brzina hlađenja sporija.

Zatezne osobine spoja dobijenog niskovodoničnim dodatnim materijalom su superiornije u poređenju sa austenitnim dodatnim materijalom. Veći napon tečenja i zatezna čvrstoća niskovodoničnog dodatnog materijala povećavaju granicu izdržljivosti spoja a time i vreme potrebno za inicijaciju prsline. Otpornost na rast zamorne prsline kod niskovodoničnog dodatnog materijala [50, 51] je veća u odnosu na austenitni dodatni materijal, predstavljen u ovom ispitivanju.

Kada su u pitanju zavareni spojevi pancirnog čelika, metal šav je uvek sa nižim zateznim karakteristikama u odnosu na osnovni materijal. Napon tečenja niskovodoničnog dodatnog materijala je veći u odnosu na austenitni dodatni materijal, time je i očekivana bolja otpornost na stvaranje inicijalne prsline kod ovog dodatnog materijala.

Na slici 5.8. dati su parametri Parisove krive za pozicije zareza u osnovnom materijalu, ZUT, ZUT/metal šavu i metal šavu [35]. Brzina rasta zamorne prsline je najveća u metal šavu, potom u ZUT-metal šavu, zatim u ZUT u, dok je najmanja u osnovnom materijalu. Treba naglasiti da su brzine rasta zamorne prsline u osnovnom materijalu i ZUT, i ZUT-metal šavu bliske, dok je drastično veća brzina rasta zamorne prsline u metal šavu.



Slika 5.8. Uporedni dijagram brzine rasta prsline za svaku zonu zavarenog spoja pancirnog čelika Protac 500.

## 5.6 Diskusija količine difundovanog i zadržanog vodonika

Izbor dodatnog materijala [7] u ovom ispitivanju se vodio činjenicom da je prednost austenitnog u odnosu na feritni spora difuzija vodonika kroz njenu strukturu [37, 86]. Pomenuta činjenica je važna kada se zavaruju pancirni čelici. Međutim, zarobljen vodonik u austenitnoj osnovi metal šava može nepovoljno da utiče i ubrza propagaciju prsline. Cilj ovog dela ispitivanja je ispitivanje kako su međuprolazna i temperatura predgrevanja uticale na količinu difundovanog i zadržanog vodonika u austenitnoj osnovi odnosno u zoni metal šava. U literaturi, kada je u pitanju austenitni dodatni materijal, postoji manji broj ispitivanja uticaja međuprolazne i temperature predgrevanja na količinu difundovanog i zadržanog vodonika. U ovom delu ispitivanja je urađena serija eksperimenata kako bi se kvantifikovao efekat međuprolazne i temperature predgrevanja na količinu difundovanog i zadržanog vodonika u zavarenom spoju pancirnog čelika. Relewatna otkrića testa vodonika su diskutovana u sledećoj sekciji.

### 5.6.1 Diskusija efekta međuprolazne i temperature predgrevanja na količinu difundovanog vodonika

Vodonik po prirodi difunduje prema oblasti koja najkasnije očvršćava. Zbog otežane difuzije u austenitnoj strukturi, vodonik biva zadržan u zoni metal šava. Zadržan vodonik u zoni metal šava nema mogućnost da difunduje prema osetljivoj liniji stapanja. Kada su u pitanju pancirni čelici, prsline na liniji stapanja nastaju i sa malom količinom vodonika od 5 ml na 100 g. metal šava [7, 37]. Otežanom difuzijom vodonika austenitni dodatni materijal štiti liniju stapanja i grubozrnu oblast ZUT-a od mogućih prsline. Odnosno, mikrostruktura austenitnog dodatnog materijala ima veliku rastvorljivost što utiče da veća količina vodonika biva zadržana u zoni metal šava.

Smer hlađenja nakon procesa zavarivanja utiče na redistribuciju i položaj vodonika u zavarenom spoju, dok brzina hlađenja utiče na njegovu količinu. Prema opštem modelu redistribucije vodonika, u slučaju sporog hlađenja i dok je temperatura spoljne površine i dalje visoka vodonik neposredno ispod površine difunduje izvan metala. U slučaju brzog hlađenja stvara se temperaturna razlika između površine i jezgra-središnjeg dela metala. U isto vreme temperatura površine pada rapidno i dolazi do smanjene difuzije vodonika sa delova neposredno uz gornju površinu. U ovom delu rada je ispitan izbor parametara procesa zavarivanja, međuprolazne i temperature



predgrevanja na količinu vodonika u zoni metal šava. Cilj ispitivanja je analiza mogućeg štetnog efekta vodonika na brzinu rasta zamorne prsline.

Niska količina difundovanog i zadržanog vodonika od 0,12 i 0,11 ml, respektivno na 100 g. deponovanog metal šava je rezultat povećanja vremena hlađenja u temperaturnom opsegu od 1000 °C do 500 °C, što je uticalo da vodonik difunduje izvan zone metal šava.

Različite tehnologije zavarivanja zahtevaju različite tipove austenitnog dodatnog materijala. Trenutno se manuelni i poluautomatski MIG postupak u kombinaciji sa fluksnom žicom, najviše koristi kod zavarivanja pancirnog pancirnog čelika. U slučaju zahteva za visoku produktivnost procesa zavarivanja pancirnog čelika, izbor pune žice će dati mogućnost automatizacije procesa. Niska količina vodonika je očekivana s obzirom da je u prethodnim ispitivanjima [7, 37] pokazano da puna žica ima najnižu količinu vodonika u odnosu na metalom i rutilom punjene žice.

Razlog niske količine vodonika je rezultat odsustva rutila koji kupi vlagu iz okolne sredine. Struktura pune žice je takva da ne postoji mogućnost unosa i zadržavanje vlage prema njenoj unutrašnjosti. Pomenute osobine pune žice smanjuju rizik od hladnih prsline. Potom, niska količina difundovanog i zadržanog vodonika je razlog dužeg vremena hlađenja, što je omogućilo da veća količina vodonika difunduje izvan zone metal šava.

### 5.6.2 Suma ispitivanja količine vodonika

Različiti izvori iz literatura smatraju različit nivo vodonika sigurnim od vodoničnih prsline. Prema autoru [144] maksimalna količina vodonika za pancirne čelike iznosi 4 ml. na 100 g. deponovanog metal šava. Američko udruženje mašinskih inženjera [103] smatraju da maksimalna dozvoljena količina vodonika iznosi 4 ml. na 100 g. deponovanog metal šava. Mandolfino [145] tvrdi da je maksimalna dozvoljena količina vodonika od 2-5 ml vodonika na 100 g. deponovanog metal šava. Niža vrednost, 2 ml., se smatra sigurnim kada je u pitanju feritni dodatni materijal. Nešto veći nivo vodonika u metal šavu se može smatrati sigurnim kada je u pitanju austenitni dodatni materijal.

Količina difundovanog vodonika je najveća na visokim temperaturama. Odnosno, najveći deo difundovanog vodonika izlazi izvan metal šava nekoliko sekundi nakon

solidifikacije [146, 147]. Mala varijacija u vremenskom periodu od delovanja luka do vremena kada dolazi do brzog hlađenja značajno utiču na količinu vodonika.

Niska izmerena vrednost difundovanog vodonika je reflektovala i nisku količinu zadržanog vodonika prisutnog u površinski centriranoj rešetci. Izmerena količina vodonika u metal šavu se može smatrati sigurnom od vodoničnih prslina. Ako se prema tome doda da je difuzija vodonika u austenitnom dodatnom materijalu otežana, niska količina pronađenog vodonika će otežano difundovati prema osetljivoj liniji stapanja.

## 5.7 Diskusija ispitivanja balističke otpornosti

### 5.7.1 Ispitivanje balističke otpornosti

#### 5.7.1.1 Oštećenje

Na veličinu oštećenje svake oblasti zavarenog spoja utiču najviše dva parametara: tvrdoća i debljina ploče. Čelik treba da ima visoku tvrdoću, ali ne sme da bude krt.

Pri udaru projektila u duktilniji deo zavarenog spoja, deformacija može da bude veća, rezultujući većim otvorom, odnosno, većom oštećenom površinom. S druge strane, udar projektila u deo zavarenog spoja sa krtim osobinama, može u većoj meri da izazove krti lom ligamenata, takođe rezultujući većom oštećenom površinom.

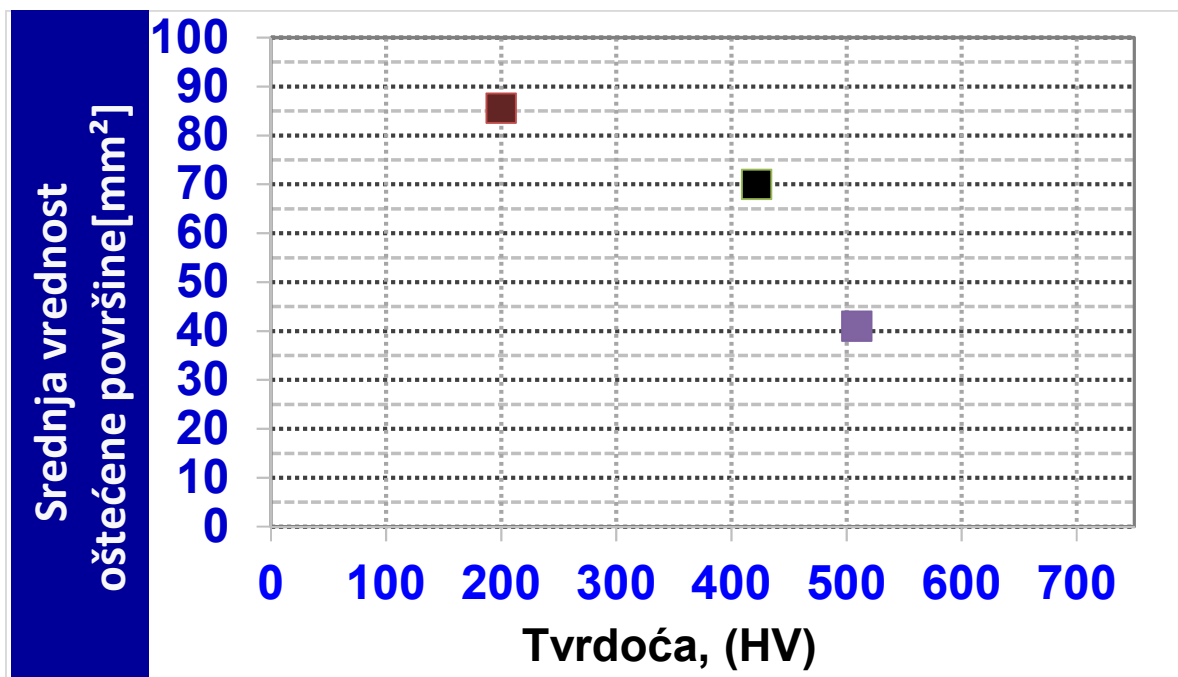
Veća debljina ploče predstavlja veću prepreku širenju prsline, tako da oštećena površina može biti manja, dok s druge strane, na ploči manje debljine su zatezne komponente savojnih napona manje, pa bi se moglo očekivati da broj ligamenata koji se prekidaju prilikom udara bude manji.

Navedeni parametri: tvrdoća materijala i debljina ploče mogu imati i kombinovan efekat [55, 98]. Iz istih razloga, kod razmatranja uticaja duktilnosti, potrebno je vršiti poređenje između zahteva balističke otpornosti sa jedne i udarnih karakteristika zavarenog spoja sa druge strane.

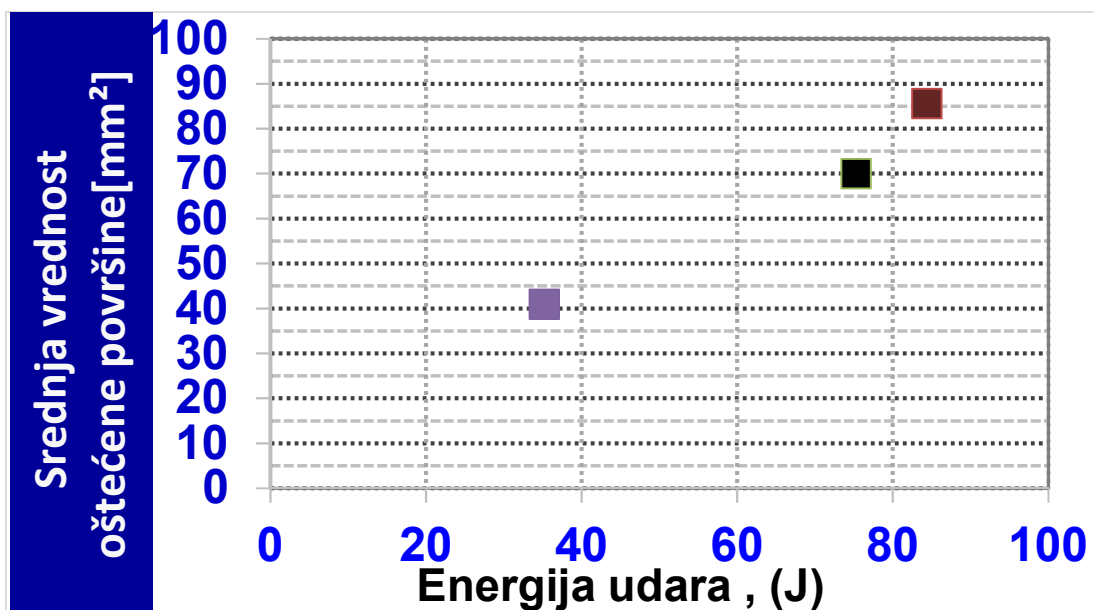
#### Uticaj tvrdoće i energije udara

Na dijagramima datim na slici 5.9. je data je zavisnost parametara oštećenja zone metal šava, ZUT-a i osnovnog materijala od tvrdoće dok je na slici 5.10. data zavisnost parametara oštećenja, pomenutih zona, od energije udara.

Na osnovu dijagrama na slici 5.9., za metal šav, ZUT i osnovni materijal, respektivno, može da se konstatuje da što je tvrdoća materijala niža, odnosno duktilnost veća, srednja vrednost oštećene površine je veća. Kada su u pitanju dijagrami na slici 5.10. za metal šav, ZUT i osnovni metal, respektivno, može da se konstatuje da što je energija udara materijala veća, odnosno duktilnost veća, srednja vrednost oštećene površine je veća.



Slika 5.9. Zavisnost srednje vrednosti oštećene površine od tvrdoće materijala u zoni metal šava, ZUT-a i osnovnog materijala.



Slika 5.10. Zavisnost srednje vrednosti oštećene površine od energije udara materijala u zoni metal šava, ZUT-a i osnovnog materijala.

Na osnovu iznetog, može se konstatovati da je dominantni parametar oštećenja zavarenog spoja, oštećena površina. Ona je manja, ukoliko je zona zavarenog spoja tvrđa i veća energija udara.

### 5.7.1.2 Ispitivanje balističke otpornosti

Rezultati ispitivanje balističke otpornosti u zoni metal šava, debljine 10 mm, su dati u [tabeli 4.19](#). U slučaju upotrebe municije 7,62 x 51 mm, od ukupno tri ispaljena projektila, svaki projektil je ostvario proboj. To se može objasniti većom duktilnošću, zatim tvrdoćom od 200 HV, koji kao takav predstavlja manju prepreku prolasku projektila kroz zavareni spoj [\[121\]](#). U prilog tome govori značajna plastična deformacija kao posledica prolaska projektila kroz metal šav, prikazana na [slikama 4.63 a\) i b\)](#). Na taj način, kriterijum da od tri ispaljena projektila [\[138\]](#), nijedan ne bude zaustavljen, nije ispunjen.

Rezultati ispitivanje balističke otpornosti, [tabeli 4.19](#), su pokazala da metal šava ne ispunjava uslove standarda. Ovi rezultati pokazuju da je nakon prolaska projektila kroz metal šav potrebna dodatna zaštita za zaustavljanje projektila. U suprotnom, projektil ima dovoljno kinetičke energije da ostvari proboj kroz metal šav. Na ovu činjenicu je potrebno posebno obratiti pažnju pri montaži nehomogenih predoklopa na vozilo.

Rezultati ispitivanje balističke otpornosti u ZUT-u, debljine 10 mm, dati su u [tabeli 4.20](#). U slučaju upotrebe municije 7.62 x 51 mm, od ukupno tri ispaljena projektila, nijedan projektil nije ostvario proboj. To se može objasniti nižom duktilnošću ove zone u odnosu na zonu metal šava, koji kao takav, predstavlja veću prepreku prolasku projektila kroz ovu zonu. Na taj način, kriterijum da od tri ispaljena projektila [\[138\]](#), nijedan ne izvrši proboj ispunjen je tri puta. Na osnovu toga se može konstatovati da postoji mogućnost obezbeđenja zahtevanog stepena zaštite (od tri ispaljena projektila) u ZUT-u, pri upotrebi ploče debljine od 10 mm.

Rezultati ispitivanje balističke otpornosti u zoni osnovnog materijala ploče, debljine 10 mm, dati su u [tabeli 4.21](#). U slučaju upotrebe municije 7,62 x 51 mm, od ukupno tri ispaljena projektila, nijedan projektil nije ostvario proboj. To se može objasniti optimalnom duktilnošću ove zone, koji kao takav, predstavlja veću prepreku prolasku projektila. U prilog tome govori niska plastična defomacija. Na taj način, kriterijum da od tri ispaljena projektila, nijedan ne izvrši proboj ispunjen je tri puta.



Na osnovu pomenutog može se konstatovati da postoji mogućnost obezbeđenja zahtevanog stepena zaštite (od tri ispaljena projektila) u osnovnom materijalu, pri upotrebi ploče debljine od 10 mm.

Rezultati ispitivanja balističke otpornosti u zoni osnovnog materijala, nedvosmisleno pokazuju da u slučaju upotrebe materijala visoke ili ultra visoke čvrstoće, dominantna mehanička osobina nije zatezna čvrstoća, napon tečenja ili energija udara, već tvrdoća.

### 5.7.2 Analiza površine preloma

U zoni metal šava, na površini gde je prošao projektil [slike 4.63. a\) i b\)](#) se uočava pojava intenzivne plastične deformacije. [Slike 4.63 a\) i b\)](#) su u skladu sa drugim pokazateljima duktilnosti ovog dodatnog materijala, kao što je duktilni karakter loma uzoraka ispitivanih energijom udara prikazanim na [slikama 4.30 - 4.34](#).

Kod ZUT-a je primetno neznatno prodiranje zrna, [slike 4.64 a\) i b\)](#). Što je u skladu sa energijom udara u ovoj zoni i duktilnim karakterom prelomljenih površina prikazanim na [slikama 4.24 - 4.28](#). Energija udara ovog materijala je relativno visoka.

Kada je u pitanju osnovni materijal, [slike 4.65 a\) i b\)](#), tvrdoća iznad 550 HV daje materijalu krtost što može narušiti balističku otpornost ako se meta više puta pogodi u isto mesto. Tvrdoća od 500 HV je optimalna u pogledu zahteva balističke otpornosti i žilavosti materijala. Na pogođenoj površini jasno je vidljivo neznatno udubljenja, dok se materijal nije okrnio što su odlike određene duktilnosti pancirnog čelika.

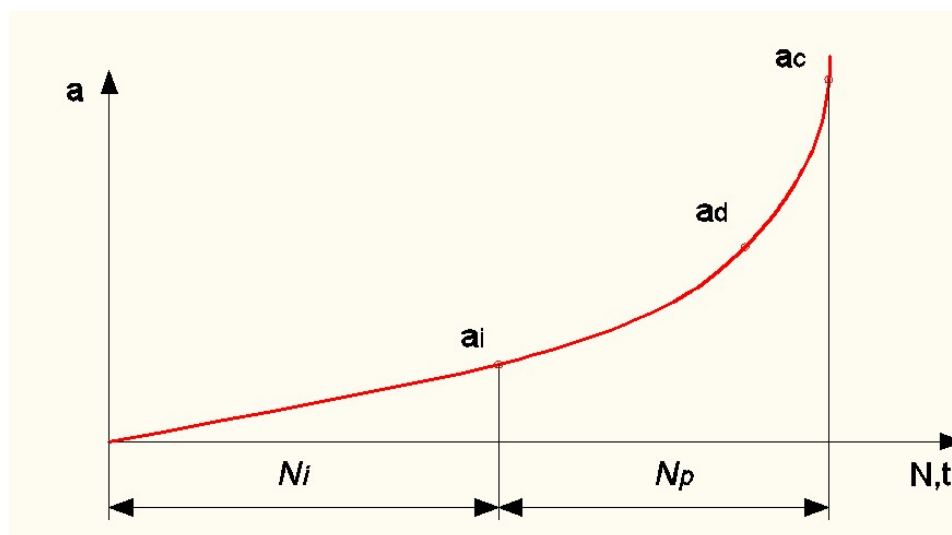
### 5.7.3 Masena efikasnost

Osnovni materijal i ZUT, imaju masu po jedinici površine 85.8 kg/m<sup>2</sup>, na osnovu čega se može konstatovati da je masena efikasnost sistema zaštite ova dva dela zavarenog spoja iznosi 1,33.

## 6 PREDVIĐANJE PREOSTALOG VEKA SA ASPEKTA DELOVANJA PROMENLJIVOG OPTEREĆENJA

Predviđanje radnog veka konstrukcije vojnog oklopnog vozila opterećenog dinamičkim opterećenjima su potrebna kako pri konstruisanju tako i za definisanje intervala kontrole za otkrivanje i otklanjanje oštećenja nastalih u eksploataciji. U slučaju da prslina postoji u zavarenoj konstrukciji vojnog oklopnog vozila proces zamora i loma se može podeliti u tri vremenske faze [88]: 1. stvaranja mikroprslina  $a_i$  i njenog daljeg rasta do veličine nazvane inženjerskom prslinom,  $a_0$ . Mikroprslina može biti i minimalna dužina prsline koja se može otkriti,  $a_{pr}$ . 2. Stabilni rast makroprsline do pojave nestabilnosti pri dužini,  $a_c$ . 3. Fazu nestabilnog rasta i konačnog kvazistatičkog loma.

Na slici 6.1. je prikazan pristup faze iniciranja i rasta mikroprsline i pristup faze rasta makroprsline kod ocene udela tih faza u ukupnom veku zamora.



**Slika 6.1.** Udeo perioda iniciranja  $N_i$  i perioda rasta zamorne prsline  $N_p$  u ukupnom veku zamora  $N_f$  [88].

U praksi je najčešće slučaj da se uočava koja faza zamora je dominantna, nakon čega se ona zasebno razmatra. Kod konstrukcija mašina i opreme je pretpostavka da u njihovim elementima nema grešaka, zbog čega se konstruktor opredeljuje za prvu fazu, fazu iniciranja prsline. U slučajevima kada se zavaruju čelici visoke tvrdoće gde su greške sasvim verovatne konstruktor se opredeljuje za pristup da su greške već prisutne i da je potrebno odrediti kako se brzo one razvijaju. Takve konstrukcije su

vojna oklopna vozila, tenkovi i ostala borbena vozila gde je potrebna oklopna zaštita. Radni vek takvih konstrukcija se sastoji od razvoja postojećih grešaka.

Empirijski modeli sa manjim ili većim uspehom opisuju rast prsline za takve uslove. Ti idealizovani modeli mogu koristiti za predviđanje veka zamora komponenti koje su izložene opterećenjima sa približno konstantnim vrednostima opsega  $\Delta K$  i opsega  $R$ . Sa pretpostavkom da se zna promena [88].

$$\frac{da}{dN} = \phi(\Delta K, R) \quad 6.1$$

integracijom se dobija vek

$$\Delta N = \int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{f(\Delta K, R)} \quad 6.2$$

Kako je najčešće funkcija  $f(\Delta K, R)$  složena, zbog čega se integracija sprovodi numerički. Odnosno, izraz 6.2 dobija oblik [88].

$$\Delta N = \frac{1}{c} \int_{a_0}^{a_d} \frac{da}{\left[ Y \left( \frac{a}{W} \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \right) \right]^m} \quad 6.3$$

gde je  $\Delta N$  broj ciklusa neophodan za rast prsline od početne  $a_0$  do kritične  $a_c$ , odnosno dozvoljene dužine prsline  $a_d$ . Korekcionni faktor  $Y = Y(a/W)$  za prslinu u komponenti je dat u tabelarnom obliku pa se, i pod uslovom da je  $\Delta \sigma = const$  i da ne zavisi od  $a$  nameće rešavanje problema numeričkom integracijom. Ovakva integracija se najlakše rešava uz primenu kompjutera, ali i bez njega postupak nije neprihvatljivo vremenski dug. Treba reći da se tokom navedenih postupaka linearne integracije ne uzima u obzir, sa stanovišta sigurnosti, pozitivna pojava retardacije, pa se dobijaju konzervativni rezultati, sa većom sigurnosti.

Ukoliko se u prvoj aproksimaciji usvoji da  $Y$  ne zavisi od dužine prsline  $a$  tada se izraz 6.3 može napisati u obliku

$$\Delta N = \frac{1}{c [Y \Delta \sigma \sqrt{a}]^m} \int_{a_0}^{a_d} a^{-\frac{m}{2}} da \quad 6.4$$

pa se nakon integracije dobija rešenje u zatvorenom obliku

$$\Delta N = \frac{1}{c[Y\Delta\sigma\sqrt{a}]^m} * \frac{a_0^{\left(\frac{1-m}{2}\right)} - a_d^{\left(\frac{1-m}{2}\right)}}{\frac{m}{2}-1} \quad 6.5$$

Treba napomenuti da ova aproksimacija dovodi do nekonzervativnog rešenja u odnosu na rešenja koja uzimaju u obzir činjenicu da je  $Y = Y(a)$  i koja se moraju odrediti numeričkim metodama [88].

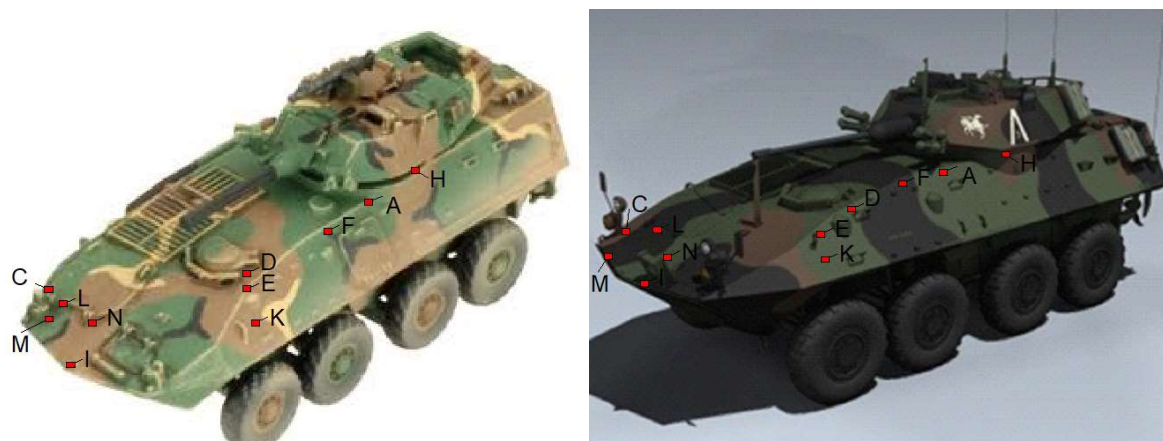
### 6.1. Predviđanje preostalog veka vojnog oklopnog vozila

Cilj ovog ispitivanja je da se na osnovu eksploatacionih merenja na samim vojnim oklopnim vozilima odredi preostali vek sa aspekta delovanja promenljivog opterećenja. Dobijeni rezultati ispitivanja i njihova analiza treba da daju praktičan doprinos oceni uticaja eksploatacionih uslova na ponašanje osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja vojnog oklopnog vozila predviđenog za rad, a čiji je cilj procena integriteta i preostalog veka konstrukcije.

Lav-25 je vojno oklopno vozilo čija šasija ima osam točkova. Naoružano je automatskom puškom prečnika 25 mm, postavljenom na okretnom postolju, [slika 6.2](#). Za konstrukciju vojnog oklopnog vozila se koristi pancirni čelik tvrdoće 500 HB. Ova klasa materijala ima potencijal da razvije prsline pod određenim eksploatacionim uslovima. Nastanak i rast prsline može uticati i na strukturni integritet i balističku otpornost ovih vozila. Kao rezultat pomenutog, neophodno je razumeti ponašanje prsline u različitim zonama zavarenog spoja. Razmatranje ovog zadatka je kompleksno, jer se prsline mogu stvoriti kao rezultat grešaka koje su rezultat procesa proizvodnje pancirnih ploča ili greškama u proceduri zavarivanja. Takve prsline se mogu dodatno povećati prisustvom u prisustvu visokih zaostalih napona.

Opterećenja su merene pomoću rozeta senzora koji su postavljeni na kritičnim lokacijama dok je vozilo prošlo kroz niz tipova terena. Odabrane lokacije opterećenja, [slika 6.2.](#), su bili srednji i maksimalni efektivni naponi. Izmereni radni naponi su obezbedili dinamične podatke o naponima neophodnim za ispravnu laboratorijsku simulaciju servisnog okruženja LAV-25.





**Slika 6.2.** Pozicija mernih traka na Vojnom oklopnom vozilu Lav – 25, [2].

Rezultati merenja dinamičkih opterećenja na vojnom oklopnom vozilu LAV-25 su prikazani u tabeli 6.1, [2]. Ispitivanja napon/vreme na raznim lokacijama vojnog oklopnog vozila LAV-25 su pokazala da su pojedine lokacije pod relativno visokim opterećenjem. Dinamički naponi u vozilu nastaju usled saobraćanja po gruboj podlozi, zatim vibracijama povezanim sa radom motora i kočenjem vozila. Značajno opterećenje se razvilo u prednjem delu vojnog oklopnog vozila kao rezultat prisustva motora i kočenja vozila. Ovo je verovatno rezultat vibracije od kompletnog oslanjanja motorne jedinice koje se prenelo na gornje ploče vojnog oklopnog vozila. Oslanjanje motorne jedinice su držači koji su zavareni na unutrašnjost okolpnog vozila. Pozicija dva držača je definisano u liniji rozeta C i N kao i M i L. Tabela 6.1 pokazuje da rozete C i M imaju najveće opterećenje.

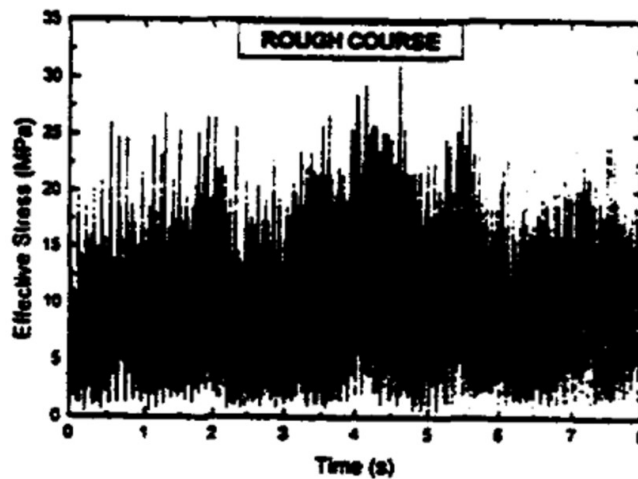
**Tabela 6.1.** Efektivno opterećenje izmereno na odabranim pozicijama vojnog oklopnog vozila LAV 25, [2].

Maksimalno opterećenje (MPa)				
Rozeta	Prva klasa puteva [MPa]	Gruba podloga [MPa]	Druga klasa puteva [MPa]	Različite klase puteva [MPa]
A	3,4	4,2	4,0	4,5
F	2,5	8,2	6,3	11
C	11	31	16	24
N	7,1	30	13	17
L	2,9	16	11	41
M	11	71	21	49

Najveće opterećenje je na gruboj podlozi i na promenjivim topografijama terena. Za razliku od rozeta u okolini motora C, L, M i N, rozete A i F, koje su na sredini vojnog oklopnog vozila, imaju mnogo niža opterećenja. Najveća opterećenja su zabeležena kod rozeta L i M, koje su postavljene na prednjem delu vozila, kada je prednji deo trupa vozila slučajno upao u rupu nastalu od točkova. Ovo je prilično teško opterećenje, jer se naponi sa terena prenose normalno na strukturu vozila putem senzora postavljenim na vozilima. Broj obrtaja motora utiče na prednji deo vozila gde su postavljene rozete M i N. Ove rozete dobijaju znatno opterećenja kada je broj obrtaja od 700 do 3000 rpm. Kombinacija broj obrtaja motora zajedno sa kočenjem vozila značajno utiče na povećanje opterećenje na ovim rozetama.

Predviđanje veka zamora za opterećenja konstantne amplitude, odnosno broj ciklusa neophodan za rast prsline od početne  $a_0$  do kritične  $a_c$  ili dozvoljene dužine prsline  $a_d$  izračunava se po formuli 6.5. Polazni parametri ispitivanja su

- Položaj prsline, u osnovnom materijalu, ZUT-u, ZUT – metal šavu ili metal šavu.
- Početna prslina  $a_0$  je prslina koja se može detektovati ispitivanjima bez razaranja sa spoljne strane, a koja za vojno oklopno vozilo ne sme da bude prosečno preko dužine 1 mm.
- Opterećenja na vojnom oklopnom vozilu, za radni napon i njegovu frekvenciju prikazanoj na slici 6.3, a koja su uzeta za rozetu C. Opterećenje na rozeti C je uzeto kod izmerenih vrednosti koje se desilo pri saobraćanju po gruboj podlozi. Frekvencija opterećenja je 10 ciklusa po sekundi.
- Vreme eksploatacije vojnog oklopnog od 8000 km/godišnje je uzet kao podatak izmerene vrednosti.
- Dužina kritične ili dozvoljene prsline je takođe menjana od veličine 2 mm do veličine kritične dužine prsline  $a_c$  dobijene ispitivanjem parametara mehanike loma, za osnovni materijal, ZUT, ZUT-metal šava, i metal šava.
- Vrednosti  $C$  i  $m$  su konstante Parisove jednačine određene ispitivanjem parametara rasta zamorne prsline, takođe, za osnovni materijal, ZUT, ZUT-metal šava i metal šava.
- Koeficijent  $Y$  je geometrijski član koji zavisi od odnosa dužine prsline i debljine pancirne ploče, i dat je u literaturi [88] za slučaj površinske prsline i za različite odnose  $a/W$ .



**Slika 6.3.** Efektivni napon / vreme kod Rozete C u slučaju saobraćanja po gruboj podlozi, [2].

Rezultati određivanja preostalog zamornog veka vojnog oklopnog vozila, odnosno broja ciklusa  $\Delta N$ , za grubu podlogu, su dati u tabeli 6.2 za osnovni materijal, tabeli 6.3, za ZUT, u tabeli 6.4 za ZUT-metal šav, i tabeli 6.5 metal šav.

Zavisnost preostalog perioda eksploatacije od dužine prsline je prikazan grafički na [slici 6.4.](#) za slučaj prsline u osnovnom materijalu, [slici 6.5.](#) za slučaj prsline u ZUT u, [slici 6.6.](#) za slučaj prsline ZUT-MŠ, [slici 6.7.](#) za slučaj prsline u metal šavu.

**Tabela 6.2.** Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u osnovnom materijalu.

OSNOVNI METAL									
Pozicija Rosete Gruba podloga	Y	$\Delta\sigma$	a	a0	ad	m	C	$\Delta N$	Vek (god.)
A	1.43	4.2	0.002	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.02E+13	1778845
	1.79	4.2	0.003	0.001	0.009	3.35	0.000000001	2.44E+12	422846
	2.38	4.2	0.004	0.001	0.009	3.35	0.000000001	5.73E+11	99558
	3.42	4.2	0.005	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.17E+11	20326
	5.22	4.2	0.006	0.001	0.009	3.35	0.000000001	2.08E+10	3613
F	1.43	8.2	0.002	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.09E+12	188492
	1.79	8.2	0.003	0.001	0.009	3.35	0.000000001	2.58E+11	44806
	2.38	8.2	0.004	0.001	0.009	3.35	0.000000001	6.08E+10	10550
	3.42	8.2	0.005	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.24E+10	2154
	5.22	8.2	0.006	0.001	0.009	3.35	0.000000001	2.2E+09	383
C	1.43	31	0.002	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.25E+10	2176
	1.79	31	0.003	0.001	0.009	3.35	0.000000001	2.98E+09	517
	2.38	31	0.004	0.001	0.009	3.35	0.000000001	7.01E+08	122
	3.42	31	0.005	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.43E+08	25
	5.22	31	0.006	0.001	0.009	3.35	0.000000001	25451676	4
N	1.43	30	0.002	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.4E+10	2429
	1.79	30	0.003	0.001	0.009	3.35	0.000000001	3.33E+09	577
	2.38	30	0.004	0.001	0.009	3.35	0.000000001	7.83E+08	136
	3.42	30	0.005	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.6E+08	28
	5.22	30	0.006	0.001	0.009	3.35	0.000000001	28411428	5
L	1.43	16	0.002	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.15E+11	20013
	1.79	16	0.003	0.001	0.009	3.35	0.000000001	2.74E+10	4757
	2.38	16	0.004	0.001	0.009	3.35	0.000000001	6.45E+09	1120
	3.42	16	0.005	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.32E+09	229
	5.22	16	0.006	0.001	0.009	3.35	0.000000001	2.34E+08	41
M	1.43	71	0.002	0.001	0.009	3.35	0.000000001	7.77E+08	135
	1.79	71	0.003	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1.85E+08	32
	2.38	71	0.004	0.001	0.009	3.35	0.000000001	43504008	8
	3.42	71	0.005	0.001	0.009	3.35	0.000000001	8881649	2
	5.22	71	0.006	0.001	0.009	3.35	0.000000001	1578567	0.3

*Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 1,0 \cdot 10^{-9}$ ,  $m = 3,35$ .*



**Tabela 6.3.** Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u ZUT-u.

ZUT									
Pozicija Rosete Gruba podloga	Y	$\Delta\sigma$	a	a0	ad	m	C	$\Delta N$	Vek (god.)
A	1.43	4.2	0.002	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.95037E+21	338605050264230
	1.79	4.2	0.003	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.51296E+20	26266672431027
	2.38	4.2	0.004	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.15387E+19	2003244419228
	3.42	4.2	0.005	0.001	0.009	5.97	6E-13	6.82785E+17	118538995762
	5.22	4.2	0.006	0.001	0.009	5.97	6E-13	3.15717E+16	5481202293
F	1.43	8.2	0.002	0.001	0.009	5.97	6E-13	3.5929E+19	6237678635999
	1.79	8.2	0.003	0.001	0.009	5.97	6E-13	2.78713E+18	483876602945
	2.38	8.2	0.004	0.001	0.009	5.97	6E-13	2.12562E+17	36903155776
	3.42	8.2	0.005	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.2578E+16	2183689112
	5.22	8.2	0.006	0.001	0.009	5.97	6E-13	5.81605E+14	100973032
C	1.43	31	0.002	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.28081E+16	2223629273
	1.79	31	0.003	0.001	0.009	5.97	6E-13	9.93565E+14	172494006
	2.38	31	0.004	0.001	0.009	5.97	6E-13	7.57749E+13	13155365
	3.42	31	0.005	0.001	0.009	5.97	6E-13	4.48387E+12	778449
	5.22	31	0.006	0.001	0.009	5.97	6E-13	2.07332E+11	35995
N	1.43	30	0.002	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.55776E+16	2704442824
	1.79	30	0.003	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.2084E+15	209792245
	2.38	30	0.004	0.001	0.009	5.97	6E-13	9.21596E+13	15999939
	3.42	30	0.005	0.001	0.009	5.97	6E-13	5.45341E+12	946772
	5.22	30	0.006	0.001	0.009	5.97	6E-13	2.52164E+11	43778
L	1.43	16	0.002	0.001	0.009	5.97	6E-13	6.64229E+17	115317547762
	1.79	16	0.003	0.001	0.009	5.97	6E-13	5.15264E+16	8945549543
	2.38	16	0.004	0.001	0.009	5.97	6E-13	3.92969E+15	682238005
	3.42	16	0.005	0.001	0.009	5.97	6E-13	2.32534E+14	40370415
	5.22	16	0.006	0.001	0.009	5.97	6E-13	1.07523E+13	1866714
M	1.43	71	0.002	0.001	0.009	5.97	6E-13	9.09708E+13	15793535
	1.79	71	0.003	0.001	0.009	5.97	6E-13	7.05689E+12	1225155
	2.38	71	0.004	0.001	0.009	5.97	6E-13	5.38198E+11	93437
	3.42	71	0.005	0.001	0.009	5.97	6E-13	31847082205	5529
	5.22	71	0.006	0.001	0.009	5.97	6E-13	1472598101	256

*Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 6,0 \cdot 10^{-13}$ ,  $m = 5,97$ .*

**Tabela 6.4.** Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u ZUT-Metal šav.

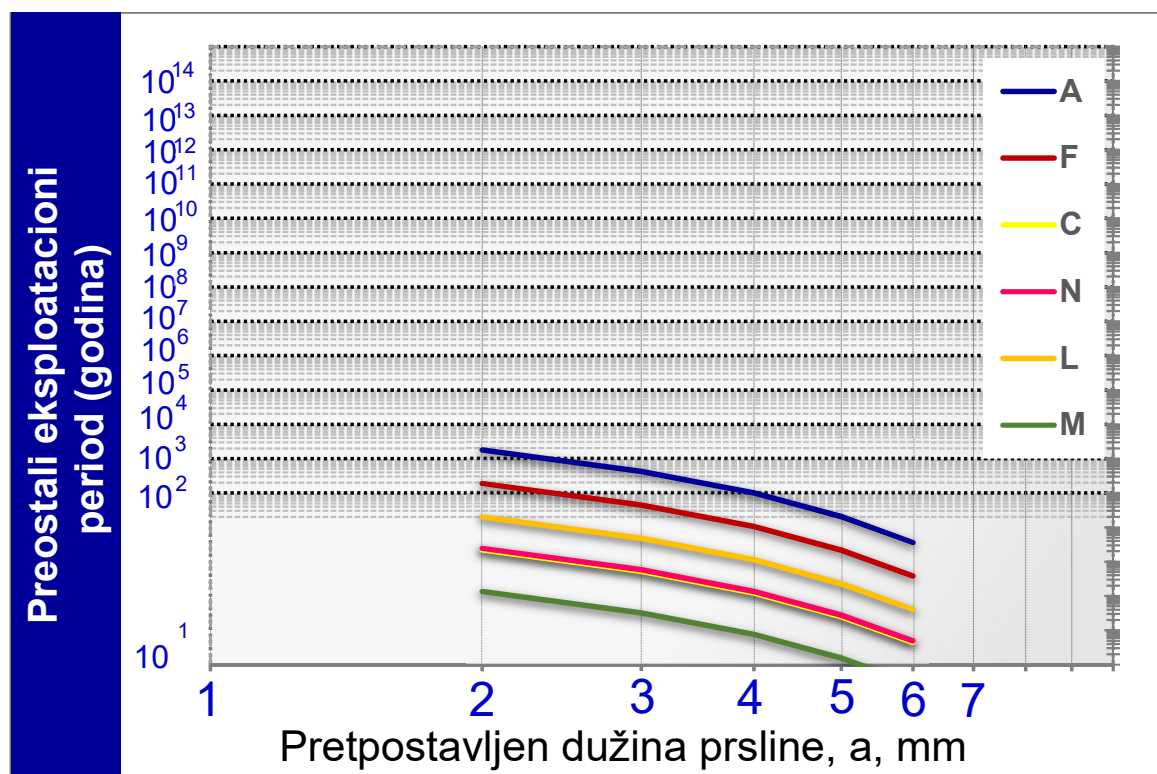
ZUT-MS									
Pozicija Rosete Gruba podloga	Y	$\Delta\sigma$	a	a0	ad	m	C	$\Delta N$	Vek (god.)
A	1.43	4.2	0.002	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.01964E+18	35063235671 2
	1.79	4.2	0.003	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.30338E+17	39989297449
	2.38	4.2	0.004	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.58934E+16	4495373601
	3.42	4.2	0.005	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.34651E+15	407379837
	5.22	4.2	0.006	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.72461E+14	29941131
F	1.43	8.2	0.002	0.001	0.009	5.07	1E-11	6.79379E+16	11794775024
	1.79	8.2	0.003	0.001	0.009	5.07	1E-11	7.74826E+15	1345183232
	2.38	8.2	0.004	0.001	0.009	5.07	1E-11	8.71016E+14	151217990
	3.42	8.2	0.005	0.001	0.009	5.07	1E-11	7.89332E+13	13703680
	5.22	8.2	0.006	0.001	0.009	5.07	1E-11	5.80134E+12	1007177
C	1.43	31	0.002	0.001	0.009	5.07	1E-11	8.01576E+13	13916246
	1.79	31	0.003	0.001	0.009	5.07	1E-11	9.1419E+12	1587135
	2.38	31	0.004	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.02768E+12	178417
	3.42	31	0.005	0.001	0.009	5.07	1E-11	93130541451	16168
	5.22	31	0.006	0.001	0.009	5.07	1E-11	6844800543	1188
N	1.43	30	0.002	0.001	0.009	5.07	1E-11	9.4655E+13	16433162
	1.79	30	0.003	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.07953E+13	1874187
	2.38	30	0.004	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.21355E+12	210686
	3.42	30	0.005	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.09974E+11	19093
	5.22	30	0.006	0.001	0.009	5.07	1E-11	8082762607	1403
L	1.43	16	0.002	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.29224E+15	397958313
	1.79	16	0.003	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.61428E+14	45386779
	2.38	16	0.004	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.93883E+13	5102128
	3.42	16	0.005	0.001	0.009	5.07	1E-11	2.66322E+12	462365
	5.22	16	0.006	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.95739E+11	33982
M	1.43	71	0.002	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.20024E+12	208375
	1.79	71	0.003	0.001	0.009	5.07	1E-11	1.36886E+11	23765
	2.38	71	0.004	0.001	0.009	5.07	1E-11	15388006059	2672
	3.42	71	0.005	0.001	0.009	5.07	1E-11	1394492194	242
	5.22	71	0.006	0.001	0.009	5.07	1E-11	102490770.3	18

*Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $m = 5,07$ .*

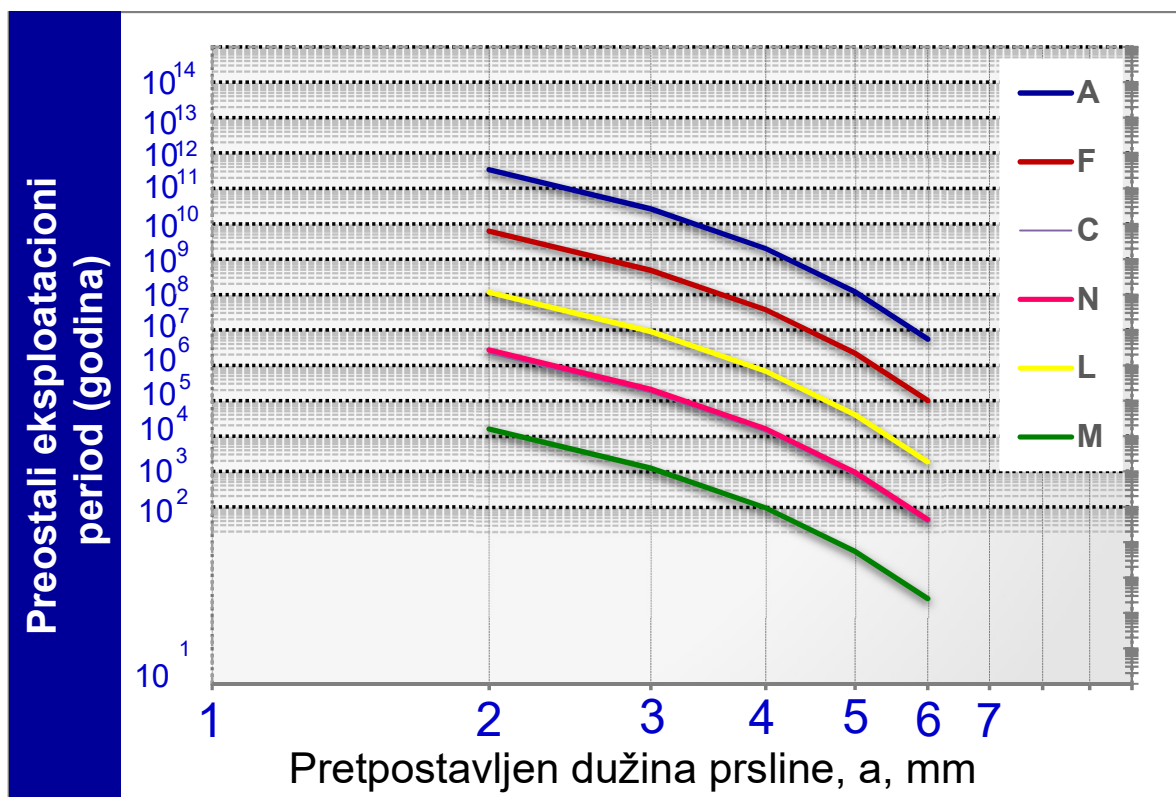
**Tabela 6.5.** Preostali eksploatacioni period vojnog oklopnog vozila u eksploataciji prsline u metal šavu.

METAL SAVA									
Pozicija Rosete Gruba podloga	$\gamma$	$\Delta\sigma$	$a$	$a_0$	$a_d$	$m$	$C$	$\Delta N$	Vek (god.)
A	1.43	4.2	0.002	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.13E+18	196706527583
	1.79	4.2	0.003	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.2E+17	20769905672
	2.38	4.2	0.004	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.24E+16	2160518125
	3.42	4.2	0.005	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.04E+15	179792001
	5.22	4.2	0.006	0.001	0.009	5.25	4E-11	6.94E+13	12044485
F	1.43	8.2	0.002	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.38E+16	5866172390
	1.79	8.2	0.003	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.57E+15	619399105
	2.38	8.2	0.004	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.71E+14	64430865
	3.42	8.2	0.005	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.09E+13	5361748
	5.22	8.2	0.006	0.001	0.009	5.25	4E-11	2.07E+12	359190
C	1.43	31	0.002	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.14E+13	5447894
	1.79	31	0.003	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.31E+12	575234
	2.38	31	0.004	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.45E+11	59837
	3.42	31	0.005	0.001	0.009	5.25	4E-11	2.87E+10	4979
	5.22	31	0.006	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.92E+09	334
N	1.43	30	0.002	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.73E+13	6471291
	1.79	30	0.003	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.94E+12	683293
	2.38	30	0.004	0.001	0.009	5.25	4E-11	4.09E+11	71077
	3.42	30	0.005	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.41E+10	5915
	5.22	30	0.006	0.001	0.009	5.25	4E-11	2.28E+09	396
L	1.43	16	0.002	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.01E+15	175488086
	1.79	16	0.003	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.07E+14	18529487
	2.38	16	0.004	0.001	0.009	5.25	4E-11	1.11E+13	1927466
	3.42	16	0.005	0.001	0.009	5.25	4E-11	9.24E+11	160398
	5.22	16	0.006	0.001	0.009	5.25	4E-11	6.19E+10	10745
M	1.43	71	0.002	0.001	0.009	5.25	4E-11	4.05E+11	70270
	1.79	71	0.003	0.001	0.009	5.25	4E-11	4.27E+10	7420
	2.38	71	0.004	0.001	0.009	5.25	4E-11	4.45E+09	772
	3.42	71	0.005	0.001	0.009	5.25	4E-11	3.7E+08	64
	5.22	71	0.006	0.001	0.009	5.25	4E-11	24783529	4

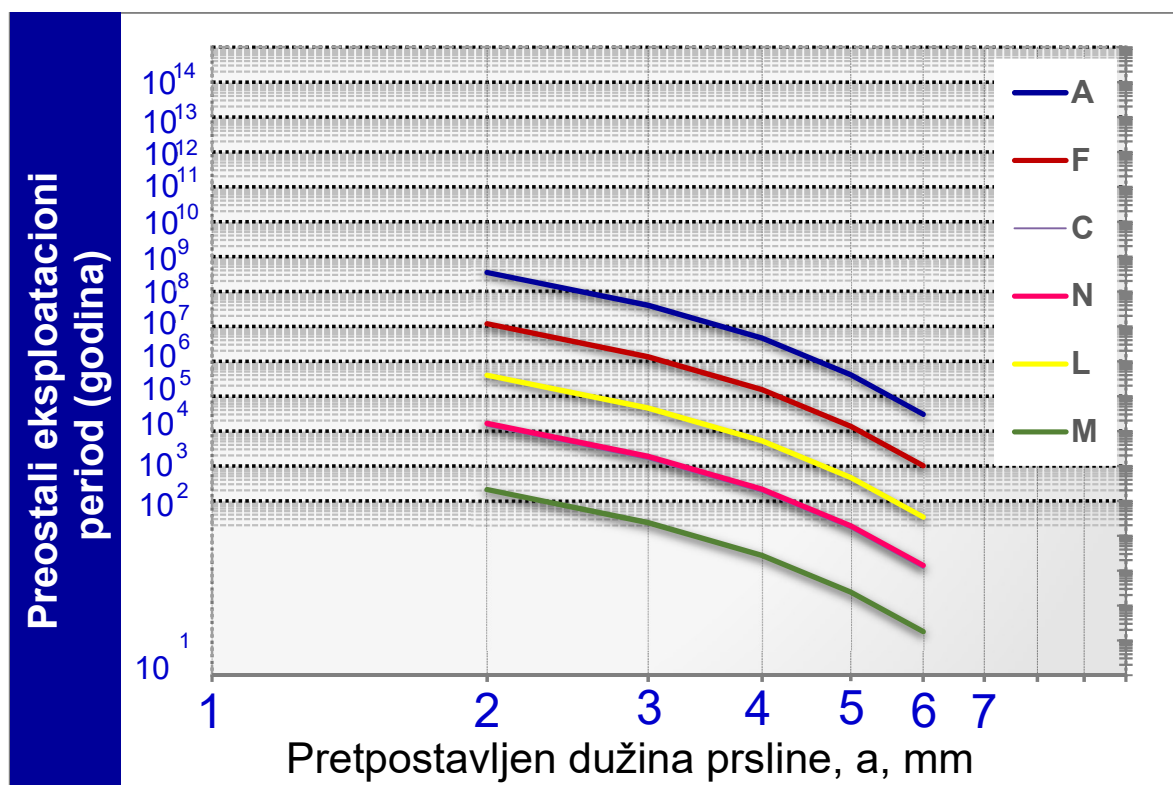
*Napomena: Važi u slučaju pojave inicijalne prsline dužine 1 mm. Za slučaj prsline u osnovnom materijalu:  $C = 4,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $m = 5,25$ .*



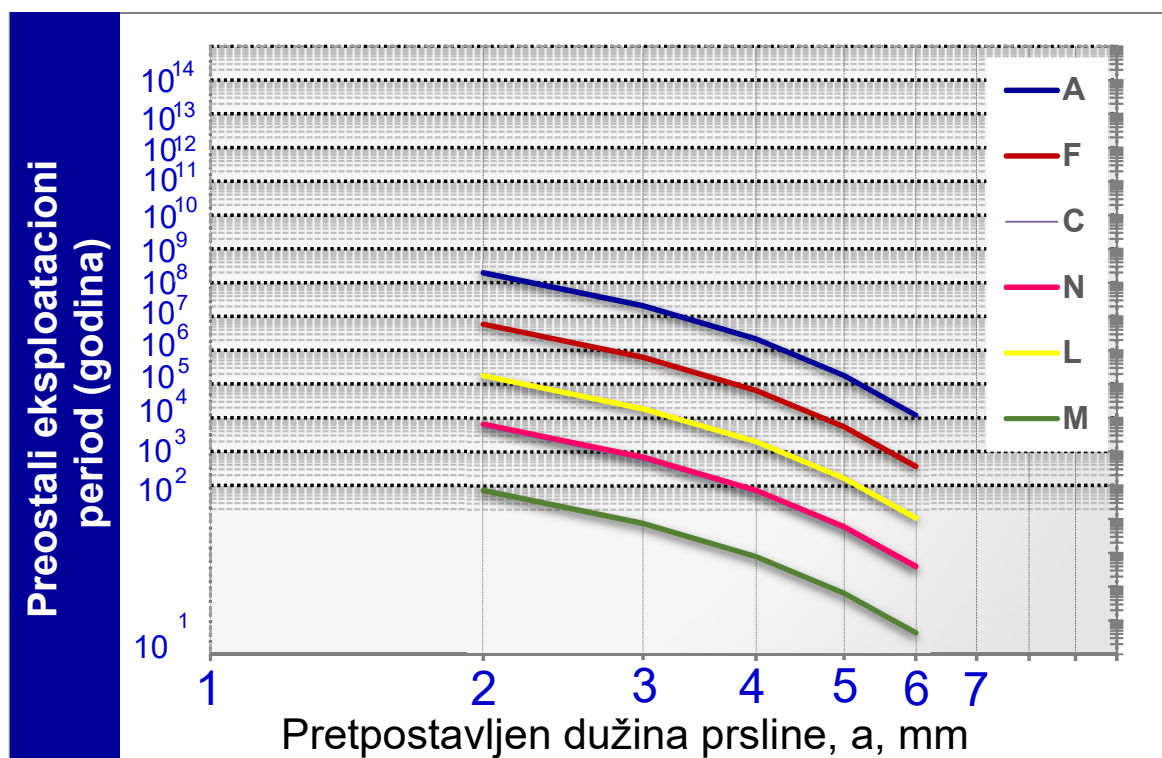
Slika 6.4. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod osnovnog materijala.



Slika 6.5. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT-a.



Slika 6.6. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod ZUT-MŠ.



Slika 6.7. Uticaj pretpostavljene dužine prsline na preostali eksploatacioni period kod metal šava.



Rezultati prikazani u [tabeli 6.2. do 6.5.](#), i grafički na [slikama od 6.4. do 6.7.](#), pokazuju da preostali vek vojnog oklopnog vozila u eksploataciji, odnosno broj ciklusa,  $\Delta N$ , do postizanja kritične dužine prsline,  $a_c$ , zavisi od: pretpostavljene dužine prsline,  $a$ , opsega dozvoljenog naprežanja,  $\Delta\sigma$ , i mesta inicijacije prsline.

Što je pretpostavljena dužina prsline i opseg dozvoljenog naprežanja veći, broj ciklusa do eventualne havarije i nekontrolisanog loma je manji. Pri pretpostavljenom radnom opterećenju (naponu) koje je jednak 71 MPa, broj ciklusa potreban da se postigne kritična dužina prsline je vrlo mali za zonu osnovnog materijala, [tabela 6.2.](#)

U slučaju kada je pretpostavljeno radno opterećenje (napon) realno, odnosno opterećenje koje je određeno primenom tenzometrijske metode na vojnom oklopnom vozilu i iznosi 31 MPa, broj ciklusa potreban da se postigne kritična dužina prsline je višestruko veći, jer je nivo napona niži. Ovaj nivo napona koji je niži, je ipak veći od nivoa napona pri pragu zamora,  $\Delta K_{th}$ , tako da do rasta pretpostavljene prsline u svakom slučaju dolazi.

Uticaj heterogenosti strukture komponenti zavarenog spoj direktno se reflektuje na brzinu rasta zamorne prsline  $da/dN$ , odnosno u direktnoj je vezi sa određenim parametrima Parisove jednačine, koeficijentom  $C$  i eksponentom  $m$ .

Iz [tabele 6.2 do 6.5](#), odnosno dijagrama datih na [slikama od 6.3. do 6.5.](#) a za slučaj stvarnog opterećenja od 31 MPa, za poziciju prsline u osnovnom materijalu. Za slučaj da inicijalna prslina dužine 2 mm u osnovnom materijalu dostigne kritičnu dužinu od 9 mm, potreban je eksploatacioni period od 2176 godinu, a da inicijalna prslina iste dužine u metal šavu, dostigne kritičnu dužinu od 9 mm, potreban je eksploatacioni period od 5,500,000 godina. Integritet zavarene konstrukcije vojnog oklopnog vozila se dovodi u pitanju kod prsline dužine 6 mm. Za slučaj da inicijalna prslina dužine 6 mm u osnovnom materijalu dostigne kritičnu dužinu od 9 mm, potreban je eksploatacioni period od 4 godina. Za slučaj da inicijalna prslina dužine 6 mm u metal šavu dostigne kritičnu dužinu od 9 mm, potreban je eksploatacioni period od 334 godinu. Oblasti ZUT a i ZUT metal šava nisu slaba mesta za integritet konstrukcije vojnog oklopnog vozila, kada je u pitanju ovaj nivo opterećenja.

Međutim ozbiljniji problemi su mogu očekivati kod dinamičkih opterećenja koja su 71 MPa i da je prilikom procesa zavarivanja ili proizvodnje čelika nastala greška sa prslinom veiličine od 4 do 6 mm. Ovo opterećenje je najkritičnije u najslabijoj zoni osnovnog materijala. Vreme eksploatacije u zoni osnovnog materijala bi bila 8, 3 i 0,3 godine za prsline dužine 4, 5 i 6 mm. Kod zone metal šava za iste dužine prsline i dinamička opterećenja od 71 MPa, period eksploatacije bi bio duži i iznosio bi 772, 64 i 4 godine za dužinu prsline od 4, 5 i 6 mm. Prsline u zoni metal šava dužine od 4 do 6 mm su sasvim moguće kao rezultat pogrešnog tehnološkog procesa zavarivanja. Oblasti ZUT-a i ZUT metal šava su sigurne oblasti za nivo opterećenja od 71 MPa. Za slučaj da je inicijalna prslina dužine 6 mm nastala u ZUT-metal šavu potreban je eksploatacioni period od 18 godina, da bi prslina dostigla dužinu od 9 mm. Kada je u pitanju oblast ZUT za inicijalnu prslinu iste dužine neophodan je period eksploatacije od 130 godina da bi prslina dostigla kritičnu dužinu od 9 mm.

Kako se intergritet konstrukcije vojnog oklopnog vozila, ZUT i ZUT – metal šava su sigurne zone. Kada se gleda sigurnost konstrukcije prema njenoj najslabijoj komponenti, zoni osnovnog materijala, može se konstatovati da za slučaj realnog opterećenja od 31 MPa, a za slučaj da inicijalna prslina od 2 mm dostigne kritičnu dužinu prsline od 9 mm, potreban je eksploatacioni period od najmanje 2176 godina rada. Problem možemo očekivati kod dinamičkih opterećenja od 71 MPa i ako je prslina u procesu proizvodnje čelika dostigla kritičnu dužinu od 6 mm, tada je eksplotacioni period svega 0,3 godine. Ovakav zaključak podrazumeva ulaznu kontrolu osnovnog materijala i kontrolu zone metal šava u toku tehnološkog procesa zavarivanja.

Kada se analiziraju ovi podaci, ZUT I metal šav su sigurne zone, međutim mora se uzeti u obzir da su tenzometrijski izmereni naponi veoma mali, da uvek kod zavarenog spoja postoje zaostali naponi koji mogu veoma da utiču na dobijene rezultate predviđanja preostalog veka .

## 7 ZAKLJUČCI

Cilj ove doktorske disertacije je bila optimizacija procesa zavarivanja, određivanje zateznih osobina, potom ispitivanja, energije udara, mehanike loma i brzine rasta zamorne prsline u svim delovim zavarenog spoja. Može se zaključiti da je cilj doktorske disertacije ispunjen.

Na osnovu dobijenih rezultata u radu, mogu se izvući sledeći zaključci:

- Zavarivanjem punom žicom sa temperaturom predgrevanja od 150 °C i 160 °C dobija se u zavarenom spoju niska količina difundovanog i zadržanog vodonika. Višom međuprolaznom i temperaturom predgrevanja je postignuta manja količina difundovanog i zaostalog vodonika u odnosu na standardne temperature predgrevanja od 80 °C.
- Automatizovanim načinom zavarivanja je dobijena ravnomerna raspodela tvrdoće po dužini metal šava. Preciznim i ponovljivim amplitudama i frekvencijama cik-cak kretanja robota postignut je isti profil tvrdoće i nije dozvoljeno značajno omekšavanje osnovnog materijala. Ovim je postignuta ponovljivost raspodele tvrdoće i mogućnost predviđanja širine naknadne balističke zaštite zavarenog spoja.
- Bolje zatezne karakteristike zavarenog spoja su postignute automatizovanim načinom zavarivanja usled sitnije i ujednačenije raspodele  $\delta$  – ferita u metal šavu.
- Postignute zatezne karakteristike, tvrdoća i kvalitet zavarenih spojeva zadovoljavaju zahteve stanadarda MIL-STAN-1185.
- Rezultati energije udara na sobnoj temperaturi za austenitni dodatni materijal pokazuju visoku energiju za iniciranje prsline (56 J) i propagaciju (29 J). Rezultati na -40 °C pokazuju značajno manju enegiju za iniciranje (41 J) i propagaciju (21 J) prsline. Za prslinu u ZUT-u, na sobnoj temperaturi je potrebna velika energija za iniciranje (48 J) i propagaciju (27 J), a na -40 °C dolazi do značajnog smanjenja potrebne energije za iniciranje (29 J) i propagaciju (11 J). Najnižu energiju za iniciranje (30 J) i propagaciju prsline (5 J) na sobnoj temperaturi ima osnovni materijal. U ovoj zoni je neznatan pad energije udara između temperature ispitivanja 20 °C i -40 °C.

- Vrednost žilavosti loma od  $86 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  je nešto niža u odnosu na pancirne čelike klase 500. Rezultati proračuna pokazuju da ZUT i ZUT/metal šava imaju trostruko veću žilavost loma od osnovnog materijala. Najveću žilavost loma ima metal šav, četverostruko veću od osnovnog materijala.
- Količina vodonika merena gasnom hromatografijom u metal šavu je veoma mala, difundovani (0,15 ml/100 gr metal šava) a zadržani vodonik (0,06 ml/100 gr metal šava), tako da ne može da utiče na stvaranje prsline.
- Najlakše će početi da raste prsline u metal šavu, a najteže u osnovnom metalu, jer je prag zamora za metal šav najmanji ( $\Delta K_{th}=10,1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), a za osnovni metal najveći ( $\Delta K_{th}=13,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), dok su vrednosti za zarez u ZUT-u i ZUT-metal šavu negde između ( $\Delta K_{th}=12,6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,  $\Delta K_{th}=12,1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ).
- Brzina propagacije prsline u oblasti linearnog rasta prsline u metal šavu je visoka ( $m=5,25$ ). Za zamornu prslinu u ZUT-u i ZUT-metal šavu, su dobijeni slični rezultati ( $m=5,26$ ) i ( $m=5,05$ ), u oblasti linearnog rasta. Najveću otpornost na propagaciju prsline u odnosu na sve zone zavarenog spoja ima osnovni materijal ( $m=3,35$ ).
- Kod propagacije prsline u zoni metal šava, usled plastičnog deformisanja ispred vrha prsline utvrđena je direktna transformacija  $\gamma$  - austenita u  $\alpha'$ -martenzit.
- Preostali vek određen prema brzini rasta zamorne prsline, pokazuje da u pogledu integriteta zavarene konstrukcije vojnog oklopnog vozila, najveću pažnju potrebno posvetiti zoni osnovnog materijala, gde opasnost predstavljaju prsline dužine  $\sim 6 \text{ mm}$ , dok su metal šav i ZUT sigurne zone. U zoni osnovnog materijala, lom se može desiti u periodu do 4 godine. U ovom proračunu, nisu uzeti u obzir zaostali naponi koji se javljaju kod zavarivanja, a u tom slučaju bi i ZUT i metal šava mogli biti potencijalno opasno mesto.
- Prema rezultatima ispitivanje balističke otpornosti, ako se uporede različite zone zavarenog spoja, osnovni materijal i ZUT su neprobojne oblasti. Mala tvrdoća kod zone metal šava, uzrokovala je najveće oštećenje površine. Tvrdoća metal šava, koji ima austentnu strukturu, je 200 HV, zbog čega je neophodna naknadna zaštita ove oblasti.

## LITERATURA

- [1] Shah Khan, M.Z., Alkemade, J.M., Weston, G.M. and Wiese, D.G. *Variable-amplitude fatigue testing of a high hardness armour steel*. International Journal of Fatigue Vol.20, No.3 pp.233-239 1998.
- [2] Cimpoeru, S.J. *The Measurement of Dynamic Structural Stresses in a Light Armoured Vehicle*. In 5 th Australian Aeronautical Conference, Melbourne 13-15 September 1993.
- [3] Murti, V.S.R., Sastry Y.R., Rao V.G.N. and Reddy G.M. *Some studies on the service weldability of HSLA steels using 18Cr, 8Ni, 6Mn type austenitic electrodes*. Journal of materials and processing technology, 37 (1993) 759-765.
- [4] Lan, L., Kong, X., Qiu, C. Zhao, D., *Influence of microstructural aspects on impact toughness of multi-pass submerged arc welded HSLA steel joints*, Materials and Design, 90 (2016) 488–498.
- [5] MIL-A-46100D (MR) w/INT. AMENDMENT 2 13 July 2007 USED IN LIEU OF. MILITARY SPECIFICATION ARMOR PLATE, STEEL, WROUGHT, HIGH-HARDNESS.
- [6] Advantages and disadvantages of metal cored wires. <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/advantages-and-disadvantages-of-metal-cored-wires.cfm>
- [7] Kuzmikova, L. Norrish, J., Li, H. and Callaghan, M. *Research to establish a systematic approach to safe welding procedure development using austenitic filler materijal for fabrication of high strength steel*. 16th International Conference on the Joining of Materijals (pp. 1-13).
- [8] Borvik. T., Dey, S. and Clausen, A.H. *Perforation resistance of five different high strength steel plates subjected to small-arms projectiles*. International Journal of Impact Engineering, Vol. 36, Issue 7, (2009), P.P. 948-964.
- [9] Palta, E., Gutowski, M. and Fang, H. *A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic Impacts*, International Journal of Solids and Structures 0 0 0, (2017), 1–16.
- [10] Kilic, N. Ekici, B., *Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition*, Materials and Design, 44, (2013) 35–48.
- [11] Jena, P.K., Senthil P. P. and Kumar K. S. *Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel*. Journal of Applied Research and Technology 14 (2016) 47–53.



- [12] Grabulov, V. *Current approach to Weldability testing of low alloy high strength steel* 3rd International Conference on Inovate Technologies for Joining of Advanced Materials, Timisoara, Romania, (2009), 57-64.
- [13] Whittington, W.R., Oppedal, A.L. Turnage, S. Hammi, Y. Rhee, H. Allison, C.K. Crane, P.G. Horstemeyer, M.F. *Capturing the effect of temperature, strain rate, and stress state on the plasticity and fracture of rolled homogeneous armor (RHA) steel*, Materials Science & Engineering A 594 (2014) 82–88.
- [14] Neimitz, A. *Ductile fracture mechanisms in the high-strength steel Hardox-400*. Microscopic observations and numerical stress-strain analysis. Procedia Materials Science 3, (2014), 270 – 275.
- [15] MIL-STD-1185. Department of defense manufacturing process standard: welding, high hardness armor; (2008) [SUPERSEDES MIL-W-62162].
- [16] U. S. Department of Defense, MIL-A-12560H-Armor plate, steel, wrought, homogenous. 1990: Washington, D. C.
- [17] Kılıç, N., Bedir, S., Erdik, A., Ekici, B., Tasdemirci, A., and Güden, M., *Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile*, Materials and Design 63 (2014) 427–438.
- [18] Ravid M, Hirschberg Y. Patent No.: 7,513,186 B2. Ballistic armor; 2009.
- [19] Baloš, S. *Nehomogeni dodatni razmaknuti metalni oklop za oklopna vozila*. Doktorska disertacija (2010).
- [20] <http://masters.donntu.org/2008/mech/trifonov/library/s12.htm>
- [21] Brošura Accelormital Armor plate, 2016
- [22] Brošura SSAB Oxelösund Armox 370T, 2017;
- [23] Brošura SSAB Oxelösund Armox 440T, 2011;
- [24] Brošura SSAB Oxelösund Armox 500T, 2011;
- [25] Brošura SSAB Oxelösund Ramor 550, 2017;
- [26] Brošura SSAB Oxelösund Armox 600T, 2007;
- [27] Benedetto, G., Matteisa, P. and Scavinoa, G., *Impact behavior and ballistic efficiency of armor-piercing projectiles with tool steel cores*. International Journal of Impact Engineering, 115, (2018) 10–18.
- [28] Atapek H., Development of a New Armor Steel its Ballistic Performance, Defence Sciences Journal, Vol. 63, No. 3, May 2013.

- [29] Sharma, V. and Shahi, A., S., *Quenched and tempered steel welded with micro-alloyed based ferritic fillers*, Journal of Materials Processing Tech. 253, (2018), 2–16.
- [30] Callahana, M. Hubert, O., Hild, F. Perlade, A. and Schmitt, J. H. *Coincidence of strain-induced TRIP and propagative PLC bands in Medium Mn steels*, Materials Science & Engineering A, 704, (2017), 391–400.
- [31] Xu, Z., and Huang F., *Plastic behavior and constitutive modeling of armor steel over wide temperature and strain rate ranges*. Acta Mechanica Solida Sinica, 25, 6, (2012).
- [32] Frasa, T., Murzyna, A. and Pawlowski, P. *Defeat mechanisms provided by slotted add-on bainitic plates against small-calibre 7.62 mm x 51 AP projectiles*, International Journal of Impact Engineering, 103, (2017), 241-253.
- [33] Pramanick, A.K., Das, H., Reddy, G.M., Ghosh, M. Das, G., Nandy, S., and Pal, T.K. *Development and design of microstructure based coated electrode for ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints*, Materials and Design 103, (2016), 52–62.
- [34] Ardghail, P. M., Harrison, N. and Leen, S. B., *A through-process, thermomechanical model for predicting welding-induced microstructure evolution and post-weld high-temperature fatigue response*. International Journal of Fatigue (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue>.
- [35] Wang, X.G., Wang, L. and Huang, M.X., *Kinematic and thermal characteristics of Lüders and Portevin-Le Chatelier bands in a medium Mn transformation-induced plasticity steel*, Acta Materialia, 124, (2017) 17-29.
- [36] Bernetic, J. *Development of model for predicting hardenability of high strength low alloy steels*, Ph. D. Thesis. Ljubljana, January 2013.
- [37] Kuzmikova, L., *An Investigation of the weldability of high hardness armour steels*, Ph. D. Thesis. Wollongong, (2013).
- [38] Makino, T. Neishe Y., Shiozawa D., Kikuchi S., Saito H., Kajiwara K. and Nakai Y., *Rolling Contact Fatigue Damage from Artificial Defects and Sulphide Inclusions in High Strength Steel*. Procedia Structural Integrity, 7, (2017), 468-475.
- [39] Luo X., Chen X., Wang T., Pan S., Wang Z., *Effect of morphologies of martensite-austenite constituents on impact toughness in intercritically reheated coarse-grained heat-affected zone of HSLA steel*. Material Sciences & Engineering A, 710, (2018), 192-199.
- [40] Zerbst, U., Ainsworth, R.A., Beier, H.Th., Pisarski, H., Zhang, Z.L., Nikbin, K. Nitschke-Pagel, T., Münstermann, S., Kucharczyk, P. and Klingbeil, D., *Review on fracture and crack propagation in weldments – A fracture mechanics perspective*, Engineering Fracture Mechanics 132 (2014) 200–276.

- [41] Robledo, D. M. *Development of welding procedure for MIL A 46100*. Dyna, ano 78, 168, (2011), pp. 65-71.
- [42] Čabrilo, A.
- [43] Zhao, Y. and Chung, H., *Numerical simulation of the transition of metal transfer from globular to spray mode in gas metal arc welding using phase field method*, Journal of Materials Processing Tech., 251, (2018) 251–261.
- [44] <https://www.canadianmetalworking.com/article/welding/pairing-metal-cored-wires-with-robotic-welding>.
- [45] Nowacki, J., Sajek, A., and Matkowski, P., *The influence of welding heat input on the microstructure of joints of S1100QL steel in one-pass welding*, Archives of civil and mechanical engineering, 16, (2016), 777 – 783.
- [46] Atabaki, M. M., Ma, J., Yang, G. and Kovacevic, R. *Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations*, Materials and Design, 64, (2014), 573–587.
- [47] Atabaki, M. M., Ma, J., Liu, W. and Kovacevic, R. *Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel*. Materials and Design, 67, (2015), 509–521.
- [48] Atabaki, M. M., Ma, J., Yang, G. and Kovacevic, R. *Hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel in different butt joint configurations*. Materials and Design Volume 64 (2014) 573–587.
- [49] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., and Madhusudhan G. R. *Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength quenched and tempered steel joints*. Material and Design 29 (2008) 1821-1827.
- [50] Magudeeswaran, G. Balasubramanian, V. Madhusudhan G. R. *Effect of welding processes and consumables on fatigue crack growth behaviour of armour grade quenched and tempered steel joints*. Defence Tecchnology 10 (2014) 47-59.
- [51] Magudeeswarana, G., Balasubramaniana, V. Madhusudhan G. R. *Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched and tempered steel weldments*. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008) 1897 – 1908.
- [52] Madhusudhan G. R, and Mohandas, T. *Ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments*. Journal of Materials Processing Technology 57 (1996) 23-30.
- [53] Madhusudhan G. R., Mohandas, T. and Papukutty, K. *Enhancement of ballistic capabilities of soft welds through hardfacing*. International Journal of Impact Engineering 22 (1999) 775-791.

- [54] Murti, V.S.R, Srinivas, P.D., Banadeki G.H.D. and Raju, K.S. *Effect of heat input on the metallurgical properties of HSLA steel in multi-pass MIG welding*. Journal of Materials Processing Technology, 37 (1993), 723-729.
- [55] Balakrishnan, M., Balasubramanian, V. and Madhusuhan G. R. *Effect of hardfaced interlayer thickness on ballistic performance of armour steel welds*. Materials and Design 44 (2013) 59–68.
- [56] Balakrishnan, M., Balasubramanian, V. and Madhusuhan G. R. *Effect of Hardfaced Interlayer Thickness and Low Hydrogen Ferritic Capping on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armour Steel Joints*. Journal of Iron and Steel Research, International 2013, (2012), 82-91.
- [57] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., Madhusudhan, R.G. Balasubramanian, T.S. *Effect of Welding Processes and Consumable on Tensile and Impact properties of High Strength Quenched and Tempered Steel Joints*, Journal of Iron and Steel Research, International. 2008, 15(6): 87-94.
- [58] G. Madhusudhan Reddy, T. Mohandas, K.K. Papukutty. *Effect of welding process on the ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments*. Journal of Materials Processing Technology, 74, (1998), 27–35.
- [59] Alkemade, S.J., *The weld cracking susceptibility of high hardness armour steel*. Defence Science and Technology Organization. 24 (1996).
- [60] Cabrilo A. and Geric, K. *Weldability of High Hardness Armor Steel*, Advanced Materials Research, Vol. 1138, pp. 79-84, 2016.
- [61] 701-en-Armox: Workshop Recommendation, (2017), Welding Recommendation. [www.solodesign.se](http://www.solodesign.se)
- [62] Padilha, A. F., Tavares, C. F., and Martorano, M. A. *Delta Ferrite Formation in Austenitic Stainless Steel Castings*. Materials Science Forum, Vol. 730-732, (2013), pp 733-738.
- [63] Silva, B.R.S., Salvio, F. Santos, D.S. *Hydrogen induced stress cracking in UNS S32750 super duplex stainless steel tube weld joint*. International journal of Hydrogen Energy, 40, (2015), I709I-I710I.
- [64] Mortazavi, E., Najafabadi, R. A. and Meysami, A. *Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of dissimilar*, Journal of Iron and Steel Research International, 24 (2017), 1248-1253.
- [65] Alipooramirabada, H, Paradowska, A., Ghomashch, R. and Reidb, R, *Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds*, Journal of Manufacturing Processes, 28 (2017), 70–81.

- [66] Gu, Y. Tian, P. Wang, X. Han, X., Liao, B. Xiaoa. F, *Non-isothermal prior austenite grain growth of a high – Nb x100 pipeline steel during a simulated welding heat cycle process*, Materials and Design, 89, (2016), 589–596.
- [67] Jun Hu, J., Du, L., Wang, J., Xie, H., Gao, C. and Misra, R., *High toughness in the intercritically reheated coarse-grained (ICRCG) heat-affected zone (HAZ) of low carbon microalloyed steel*, Materials Science & Engineering A, 590, (2014), 323–328.
- [68] Li, Y., Crowther, D.N., Green, M.J., Mitchell P.S. and Bakeer T.N. *The Effect of Vanadium and Niobium on the Properties and Microstructure of the Inter critically Reheated Coarse Grained Affected Zone in Low Carbon Micro alloyed Steels*, presented ISIJ International, (2000), 55.
- [69] Han, Y.C., Chen, X.D. Fan Z. C. and Bu H. Q. *Influences of Second Thermal Cycle on Reheat Cracking Susceptibility of Welding CGHAZ in Vanadium-Modified 2.25 Cr1 Mo Steel*. Procedia Engineering 130, (2015), 487-496.
- [70] Zhank, L., Kannengiesser, T., *Austenite grain growth and microstructure control in simulated heat affected zones of microalloyed HSLA steel*, Vol. 613, 8, (2014), PP 326-335.
- [71] Kima, Y., J., Ri Oha, N., R., Ohb, Y., H., Chob, Y., T., Leec, W., B., Kimc, S., K. and Honga, H., U., *Hetero-epitaxial nucleation of ferrite at a TiN encapsulating MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> during rapid solidification in a newly developed ferritic stainless steel*, Materials Characterization, 132, (2017), 348–353.
- [72] Guo, H., Gao, G., Gui, X, Misra, R.D.K. and Bai, B., *Structure-property relation in a quenched-partitioned low alloy steel involving bainite transformation*, Materials Science & Engineering A, 667 (2016), 224–231.
- [73] Beidokhti, B., Koukabi, A.H. and Dolati A. *Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel*. Journal of Materials Processing Technology Volume 209, Issue 8, 21 April 2009, Pages 4027-4035.
- [74] Devaa, A., Jhaa, B.K. and Mishra, N.S., *Influence of boron on strain hardening behaviour and ductility of low carbon hot rolled steel*, Materials Science and Engineering A, 528, (2011), 7375–7380.
- [75] Yang, H., Wang, X., and Qu, J. *Effect of Boron CGHAZ Microstructure and Toughness of High Strength Low Alloy Steels*. Journal of Iron and Steel Research, International Volume 21, 8, (2014), PP 787-792.
- [76] Haušild, P., Davydov, V., Drahekoupil, J., Landa, M. and Pilvin, P. *Characterization of strain-induced martensitic transformation in a metastable austenitic stainless steel*. Materials and Design, 31, (2010), 1821–1827.



- [77] Hu, J., Du, L. X., Ma, Y. N., Sun, G. S., Xie, H. and Misra, R.D.K., *Effect of microalloying with molybdenum and boron on the microstructure and mechanical properties of ultra-low-C Ti bearing steel*, Materials Science & Engineering A, 640, (2015), 259–266.
- [78] Hong, H.U., Kim, L.S., Choi, B.G., Yoo, Y.S., and Jo C.Y., *On the mechanism of serrated grain boundary formation in Ni-Based superalloys with low volume fraction*. Superalloys (2012): International Symposium on Superalloys.
- [79] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., Sathyanarayanan, S. and Madhusudhan, G. R. *Dynamic Fracture Toughness of Armour Grade Quenched and Tempered Steel Joints Fabricated Using Low Hydrogen Ferritic Fillers*, Journal of Iron and Steel Research, International. 2010, 17 (5), 51-56.
- [80] Babu, S.S. *The mechanism of acicular ferrite in weld deposits*. Current opinion in Solid state and Materials Science, 8, (2004), 267–278.
- [81] Murti, V.S.R., Srinivas, P.D., Banadeki, G.H.D. and Raju. K.S. *Effect of heat input on the metallurgical properties of HSLA steel in multi-pass MIG welding*. Journal of Material Processing Technology, 37 (1993) 723-729.
- [82] Hart, P., H., M. *Resistance to Hydrogen Cracking in Steel Weld Metals*, Based on a paper presented at the 65th AWS Annual Convention held in Dallas, Tex., April 9-13, 1984.
- [83] Jovicic, R. Sedmak, A. Burzic, Z., Grabulov, V., Lozancic, J. *Structural Integrity Assessment of Ferritic-Austenitic Welded Joints*. FME Transaction, 3, 6 (2008), 33-37.
- [84] Sharma, V. and Shahi, A.S., *Effect of groove design on mechanical and metallurgical properties of quenched and tempered low alloy abrasion resistant steel welded joints*, Materials and Design, 5,3 (2014), 727–736.
- [85] EN ISO 3690:2012. *Welding and allied processes. Determination of hydrogen content in arc weld metal*.
- [86] Kuzmikova, L., Li, H., Norrish, J., Pan, Z. S. and Larkin, N. *Development of safe optimized welding procedures for high strength Q&T steel welded with austenitic consumables*. Revista Soldagem e Inspecao, 18, (2013), 169-175.
- [87] Trajkovski, J., Kunc, R., Pepel, V. and Prebil, I. *Flow and fracture behavior of high-strength armor steel PROTAC 500*. Materials and Design 66 (2015) 37–45.
- [88] Čulafić, B, Vuk, *Uvod u mehaniku loma*, Mašinski fakultet Podgorica 1999.
- [89] Shah Khan, M.Z., Alkemade, S.J. and Weston, G.M. *Fracture Studies and High Hardness Bisalloy 500 Steel*. Martime Platform Division Aeronautical and Martime Research Laboratory DSTO-RR-0130.

- [90] Madaia, M., Ngoulab, D. T., Zerbsta, U., Beierb, H. T. *Approximation of the crack driving force for cracks at notches under static and cyclic loading*, Procedia Structural Integrity 5, (2017), 875–882.
- [91] Grujicic, M., Lai, S.G. and Gumbsch, P. *Atomistic simulation study of the effect of martensitic transformation volume change on crack-tip material evolution and fracture toughness*. Materials Science and Engineering A231 (1997) 151–162.
- [92] Paris, P.C., Gomez, M.P. and Anderson, W.E. *Rational Analytic Theory of Fatigue*, The Trend in Engineering, Vol. 13, pp.9 1961.
- [93] Tazoe, K, Hamada, S., and Noguchi, H., *Fatigue crack growth behavior of JIS SCM440 steel near fatigue threshold in 9-MPa hydrogen gas environment*, International journal of hydrogen energy, 42 (2017), 1315-13170.
- [94] Pascoe, J.A., Alderliesten, R.C. and Benedictus, R. *On the physical interpretation of the R-ratio effect and the LEFM parameters used for fatigue crack growth in adhesive bonds*, International Journal of Fatigue 97 (2017) 162–176.
- [95] Pau, S. K., *Numerical models of plastic zones and associated deformations for a stationary crack in a C(T) specimen loaded at different R-ratios*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 84, (2016), 183–191.
- [96] Weng, L., Zhang, J., Kalnaus, S. Feng, M., and Jiang, Y., *Corrosion fatigue crack growth of AISI 4340 steel*, International Journal of Fatigue, 48, (2013),156–164.
- [97] VPAM Association of test laboratories for bullet resistant materials and constructions. *VPAM AMPR 2006 - General basis for ballistic material, construction and product testing. Muenster*. VPAM Association of test laboratories for bullet resistant materials and constructions, 2009.
- [98] Balakrishnan, M., Balasubramanian, V., Madhusuhan G. R. and Sivakumar. K. *Effect of buttering and hardfacing on ballistic performance of shielded metal arc welded armour steel joints*. Materials and Design 32 (2011) 469–479.
- [99] Cabrilo A, Geric K, Klisuric O., Cvetinov M.: *Toughness behaviour in armour steel welds*, Technical Gazette, December 2018, Volume 25, [Issue 6](#)
- [100] [http://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/18042016000000T\\_Thermanit%20X\\_solid%20wire.pdf](http://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/18042016000000T_Thermanit%20X_solid%20wire.pdf)
- [101] EN 895: *Sučeono zavareni spojevi na metalnim materijalima - ispitivanje poprečnim zatezanjem (Welded butt joints in metallic materials - Transverse tensile test)*, 1995.
- [102] ASTM E1820-16, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

- [103] ASTM E813-89E01, *Test Method for JIC, A Measure of Fracture Toughness* (Withdrawn 1997), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1989.
- [104] Zhu, X., K. and Joyce, J. A. *Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization*, Engineering Fracture Mechanics 85, (2012), 1–46.
- [105] ASTM E647-15e1, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [106] Baudard, B. R., Cazacu, O. and Chandola, N. *Effect of the yield stresses in uniaxial tension and pure shear on the size of the plastic zone near a crack*, International Journal of Plasticity 102, (2018), 101–117.
- [107] Xiong, F. and Liu Y. *Effect of stress-induced martensitic transformation on the crack tip stress-intensity factor in Ni–Mn–Ga shape memory alloy*. Acta Materialia 55 (2007) 5621–5629.
- [108] Fenga, H., Lama, Y. C., Zhoua, K. Kumar, S. B., and Wua, W. *Elastic-plastic behavior analysis of an arbitrarily oriented crack near an elliptical inhomogeneity with generalized Irwin correction*, European Journal of Mechanics / A Solids, 67 (2018), 177–186.
- [109] Gallo, P., Remes, H., and Romanoff, J., *Influence of crack tip plasticity on the slope of fatigue curves for laser stake-welded T-joints loaded under tension and bending*, International Journal of Fatigue, 99, (2017), 125–136.
- [110] Paula, S. K., Nicole Stanford, N. and Hilditch, T., *Austenite plasticity mechanisms and their behavior during cyclic loading*, International Journal of Fatigue 106, (2018), 185–195.
- [111] Moallemi, M., Kermanpur, A., Najafizadeh, A., Rezaee, A., Baghbadorani, H.S. and Nezhadfar, P.D. *Deformation-induced martensitic transformation in a 201 austenitic steel: The synergy of stacking fault energy and chemical driving force*, Materials Science & Engineering A 653 (2016) 147–152.
- [112] Liu, J. and Kaoumi, D. *Use of in-situ TEM to characterize the deformation-induced martensitic transformation in 304 stainless steel at cryogenic temperature*, Materials Characterization 136, (2018), 331–336.
- [113] Amar, K.D., David, C. Murdock, C.M. Speer, J.G. and Matlock, K.D. *Quantitative measurement of deformation-induced martensite in 304 stainless steel by X-ray diffraction*, Scr. Mater. 50 (2004) 1445-1449.
- [114] G. Fargas, G., Roa, J. J. and Mateo, A. *Effect of shot peening on metastable austenitic stainless steels*, Materials Science & Engineering A, 641, (2015), 290–296.
- [115] EN ISO 5817:2014. Welding. *Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded)*. Quality levels for imperfections.

- [116] Cabrilo A, Geric K, Vukic L, Jovanovic M: *Weldability and impact energy properties of high hardness armor steel*, Journal of Materials Engineering and Performance, March 2018, Volume 27, [Issue 3](#), pp 1281–1295.
- [117] Yuan, T., Luo, Z., Kou, S., *Grain refining of magnesium welds by arc oscillation*. Acta Materialia, 116, (2016) 166-176.
- [118] Janaki, R., G., D., Murugesan, R., Sundaresan, S. *Fusion zone grain refinement in aluminum alloy welds through magnetic arc oscillation and its effect on tensile behavior*. Journal Material Engineering Perform. (1999) 8, 513-520.
- [119] Bialobrzeska, B., Konat, L., and Jasinski, R., 2017. *The Influence of Austenite Grain Size on the Mechanical Properties of Low-Alloy Steel with Boron*. Metals. 7, 26; doi:10.3390/met7010026.
- [120] Manufacturer's Data. Available online: [http://www.niobelcon.com/NiobelCon/niobium/niobium\\_in\\_automotive\\_flat\\_steel/auto\\_martensitic\\_steel/tough\\_martensite/](http://www.niobelcon.com/NiobelCon/niobium/niobium_in_automotive_flat_steel/auto_martensitic_steel/tough_martensite/)
- [121] Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D. and Nayak, N. *Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel*. Materials Science & Engineering A 640 (2015) 200–209.
- [122] Hu, J., Du, L. X., Xu, W., Zhai, J. H., Dong, Y., Liu, Y.J. and Misra, R.D.K. *Ensuring combination of strength, ductility and toughness in medium manganese steel through optimization of nano-scale metastable austenite*, Materials Characterization, 136, (2018), 20–28.
- [123] X. Z. Zhang and J. F. Knott. *Cleavage Fracture in Bainitic and Martensitic microstructure*. Acta mater. Vol. 47, No. 12, pp. 3483±3495, 1999.
- [124] Takebayashi, S., Ushioda, K., Yoshinaga N. and Ogata, S. *Effect of Carbide Size Distribution on the Impact Toughness of Tempered Martensitic Steels with Two Different Prior Austenite Grain Sizes Evaluated by Instrumented Charpy Test*, Materials Transactions, Vol. 54, No. 7 (2013) pp. 1110 to 1119.
- [125] ASTM E 1152-87, *Standard test method for determining J-R curves*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987.
- [126] Ravi, S., Balasubramanian, V., Nasser, S. N. *Effect of mis-match ratio (MMR) on fatigue crack growth behaviour of HSLA steel welds*. Engineering Failure Analysis 11 (2004) 413~428.
- [127] Pilhagen, J. and Sandström, R. *Influence of nickel on the toughness of lean duplex stainless steel welds*, Materials Science & Engineering, A 602, (2014), 49–57.

- [128] Foroozmehr, F., Verreman, Y., Chen, J., Thibault, D., Bocher, P., *Effect of inclusions on fracture behavior of cast and wrought 13% Cr-4% Ni martensitic stainless steels*. Engineering Fracture Mechanics 175 (2017) 262–278.
- [129] Christodoulou, P.I., Kermanidis, A.T. and Haidemenopoulos, G.N. *Fatigue and fracture behavior of pearlitic Grade 900A steel used in railway applications*, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 83, (2016), 51–59.
- [130] Zhu, X.-K. and Joyce, J. A. *Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization*, Engineering Fracture Mechanics 85, (2012), 1–46.
- [131] Zhu, X.-K., Zelenak, P. and McGaughey, T., *Comparative study of CTOD-resistance curve test methods for SENT specimens*, Engineering Fracture Mechanics 172, (2017), 17–38.
- [132] Park, J. S., Choi, Y. H. and Im, S. *Generation of plastic influence functions for J-integral and crack opening displacement of thin-walled pipes with a short circumferential through-wall crack*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 117-118, (2014), 17-24.
- [133] Liua, F., Lina, X., Yanga, H., Wena, X., Lia, Q. Liuc, F. and Huanga, W., *Effect of microstructure on the fatigue crack growth behavior of laser solid formed 300M steel*, Materials Science & Engineering A, 695, (2017), 258–264.
- [134] Putatunda, S.K. and Rigsbee, J.M. *Effect of specimen size on fatigue crack growth rate I AISI 4340 steel*. Engineering Fracture Mechanics. Vol 22. No2.2., (1985), 335-345.
- [135] Qua, S., Wuc, X. and Suna, Q. *Experimental study and theoretical analysis on the ultimate strength of highstrength-steel tubular K-Joints*, Thin-Walled Structures 123, (2018), 244–254.
- [136] Pape, J.A. and Neu, R.W. *A comparative study of the fretting fatigue behavior of 4340 steel and PH 13-8 Mo stainless steel*, International Journal of Fatigue 29 (2007) 2219–2229.
- [137] Weiss, M. P. *Estimating fatigue cracks, from the onset of loading, in smooth AISI 4340 specimens, under cyclic stresses*, International Journal of Fatigue, 14, 2, (1992), 91-96.
- [138] Trudel, A., Sabourin, M., Lévesque, M. and Brochu, M. *Fatigue crack growth in the heat affected zone of a hydraulic turbine runner weld*. International Journal of Fatigue, 66, (2014), 39–46.
- [139] Tsay, L.W., Liu, Y.C., Young, M.C. and Lin, D.Y. *Fatigue crack growth of AISI 304 stainless steel welds in air and hydrogen*. Materials Science and Engineering A 374 (2004) 204–210.



- [140] Mandolino, C., Lertora, E., Davini, L. and Gambaro, C. *Investigation on gas metal arc weldability of a high strength tool steel*. Materials and Design 56 (2014) 345–352.
- [141] Jang, C., Cho, P.Y. Kim, M. Oh, S.J. and Yang, J.S. *Effects of microstructure and residual stress on fatigue crack growth of stainless steel narrow gap welds*. Materials and Design, 31, (2010), 1862–1870.
- [142] Fakir, R., Barka, N. and Brousseau, J., *Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation*, Case Studies in Thermal Engineering, 11, (2018), 15–25.
- [143] Cabrilo A, Cvetinov M.: *Fatigue Crack Propagation and Charpy Impact Properties in Armor Steel Welds*, Material Plastice, December 2017, Volume 54 Issue 4, pp 601-806.
- [144] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-hydrogen-cracks-in-steels-prevention-and-best-practice-046/>
- [145] Mandolino, C. Lertora, E. Davini, L. Gambaro, C. *Investigation on gas metal arc weldability of a high strength tool steel*. Materials and Design, 56, (2014), 345–352.
- [146] Padhy, G. K., Terasaki, H., Komizo, Y., *Hydrogen distribution and hydrogen cracking susceptibility of a martensitic–austenitic steel welding wire*, Materials Letters, 136, (2014), 22–25.
- [147] Amin Latifi V., Miresmaeili, R. and Zadeh, A. A. *The mutual effects of hydrogen and microstructure on hardness and impact energy of SMA welds in X65 steel*, Materials Science & Engineering A, 679, (2017), 87–95.

## PRILOG

## PRILOG 1

	<b>METALURŠKO - HEMIJSKA LABORATORIJA</b> Livnica Kikinda A.i.Miloševački put 34, 23300 Kikinda, tel.: ++381 230 422 860, lok. 2400	List: 1
		Listova: 3

IZVEŠTAJ O ISPITIVANJU BR. SUL-15-47

<b>Naziv korisnika: Fakultet tehničkih nauka Novi Sad</b>	
Adresa : Trg Dositeja Obradovića 6 21000 Novi Sad	
Naziv uzorka: Osnovni metal: PROTAC 500, (P.M.C.A.1 i P.M.C.A.2) Dodatni materijal: Thermanit X. (W.M.C.A.1)	Šifra:47/15/3
Broj zahteva: telefonski razgovor	Datum prijema:01.07.2015
Broj uzoraka:3	Datum uzimanja uzorka: /
Uzorkovao:Korisnik	Stanje uzorka:
Vrsta materijala: Čelik	

<b>Opis usluge: Spektrohemijska analiza</b>
IZJAVA: Rezultati ispitivanja se odnose samo na ispitani uzorak.

Datum izdavanja:02.07.2015  
 Dostavljeno:  
 1 x MHL  
 2 x Korisnik

Potpis ovlašćenog lica:  
 Za Maja Božin

*Izjava: Ovaj izveštaj se ne sme umnožavati, izuzev u celini, bez pismene saglasnosti "Metalurško-hemijske laboratorije"*

 MHL	<b>METALURŠKO - HEMIJSKA LABORATORIJA</b> Livnica Kikinda A.i.Miloševački put 34, 23300 Kikinda, tel.: ++381 230 422 860, lok. 2400	List: 2
		Listova: 3

Ident. broj: 318353

Veza sa dokumentom: PR 071

## IZVEŠTAJ O ISPITIVANJU BR. SUL-15-47

<b>Vrsta ispitivanja</b>	spektrohemijska analiza
<b>Metoda</b>	OES OES SRPS C. A1.011 (2004)
<b>Aparat</b>	ARL 2460

### REZULTATI ISPITIVANJA±

Elementi u % Naziv uzorka	%C	%Si	%Mn	%S	%Cr	%P	%Al	%Cu	%Ni	%Mo	%V	%Sn
<b>P.M.C.A.1</b>	0.27	1.07	0.706	0.001	0.637	0.009	0.054	0.276	1.094	0.296	0.039	0.011
<b>P.M.C.A.2</b>	0.25	1.04	0.684	0.001	0.633	0.008	0.054	0.268	1.064	0.286	0.037	0.010
Nesigurnost U	±0.01	±0.01	±0,017	±0.001	±0.002	±0,001	±0,002	±0,005	±0,017	±0,005	±0,002	±0,001
<b>W.M.C.A.1</b>	0.08	0.89	6.29	<0.001	17.76	0.014	0.010	0.08	8.24	0.13	<0.03	0.011
Nesigurnost U	±0.01	±0.01	±0,03	±0.001	±0.05	±0,001	±0,001	±0,017	±0,03	±0,01	±0,002	±0,001

<b>Mišljenje:</b>
/

Datum ispitivanja:02.07.2015

Ispitivač: Jakovljević Hajnalka

Tehničko lice MH Laboratorije:



Za Maja Božin

Izjava: Ovaj izveštaj se ne sme umnožavati, izuzev u celini, bez pismene saglasnosti "Metalurško-hemijske laboratorije"

## PRILOG 2



voestalpine Böhler Welding Austria GmbH

Böhler-Welding-Str. 1 | 8905 Kapfenberg  
Austria  
T. +43 38 62-301-0  
F. +43 38 62-301-95193  
postmaster.bwg@voestalpine.com  
www.voestalpine.com/welding

ICI D.O.O.

Aleksandra Dupceka 5-9  
11080 Beograd, Zemun  
Serbia



## Inspection certificate 3.1

as per : EN 10204

No. : 2014-2031004445-900001-014

Rev. 0

Page 1 of 1

PO no.		of	03.09.2014
Order no.	1031002770		
Delivery note/pos./splitt	2031004445/000010/900001	of	03.09.2014
Product	GMAW wire electrode		107658
Trade name	BOEHLER A 7-IG		72476
Standard designation	EN ISO 14343-A: G 18 8 Mn		1SE1A00G
	AWS A5.9: ER307 (mod)		0025
Dimension	1,0 mm		
Heat no.	101355		
Quantity	225,0 KG		

## Chemical composition in % of the product

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu						
0,07	0,9	7,0	0,02	< 0,01	19,3	0,1	8,6	< 0,1						

## Mechanical properties

Tensile test						according to : EN ISO 6892-1/09	
Specimen preparation						according to : EN 876	
T	ReL / Rp 0,2	Rp 1,0	Rm	A (Lo = 5d)	Z	WBH	Remarks
	MPa	MPa	MPa	%	%	PWHT	
20°C	≥ 370		≥ 600	≥ 35			
Impact test						according to : EN ISO 148-1/10	
Specimen preparation						according to : EN 875 VWT 0/b	
T	Impact energy	Average	Lateral expansion	Shear fracture	WBH	Remarks	
	KV / J	KV / J	mm	%	PWHT		
-110°C	≥ 32						
20°C	≥ 100						

The product BOEHLER A 7-IG meets the requirements of the filler metal specification ASME sec II, part C, AWS A5.9: ER307 (mod) when tested in accordance with that specification. Produced according to AWS A5.01, class S3

Town  
Kapfenberg

Date  
03.09.2014

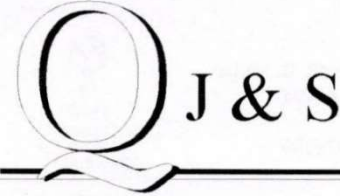

This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

Authorized representative  
Fiedler

**voestalpine**  
ONE STEP AHEAD.

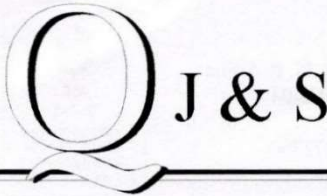

Sertifikat inspekcije mehaničkih osobina i hemijskog sastava korišćenog austenitnog dodatnog materijala.

## PRILOG 3

	<b>DOO "J&amp;S", 21131 Petrovaradin, Kačićeva 48, R. Srbija</b> Tel/fax +381216439157; +38163562494 E mail: jjsnsad@eunet.rs; PIB 101658992. MB 08579270. ŠD71200		
	<b>IZVEŠTAJ O RADIOGRAFSKOM ISPITIVANJU</b>		
Broj:	069-1/15	Datum:	19.02.2015.
		List/listova:	1/2
<b>Opšte :</b>			
Naručilac ispitivanja: Aleksandar Čabrilo		Proizvođač/Izvođač: Aleksandar Čabrilo	
Predmet - objekat ispitivanja: Tehnološke probe –provere zavarivača sa oznakam: A2 i A4 - 2 uzorka		Mesto ispitivanja: Novi Sad	
Obim ispitivanja, broj zahteva i naloga za ispitivanje: Zavareni spojevi po zahtevu poručioca ispitivanja i prema zahtevu i nalogu za ispitivanje broj 15-41			
<b>Informacije o predmetu koji se ispituje :</b>			
Materijal: Protec 500	Termička obrada: Nije bilo TO	Geometrijski oblici zavarenih spojeva: Sučeonni zavareni spojevi cevi.	
Debljine materijala : t= 11 mm	Postupak zavarivanja: MIG	Drugo: -----	
<b>Informacije o ispitivanju:</b>			
Metoda ispitivanja prema: SRPS EN 1435:2007 –Ispitivanje materijala bez razaranja – Radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva			
Uputstvo za ispitivanje: UP.01 - Uputstvo za sprovođenje radiografskog ispitivanja u "J&S" doo.			
Odstupanja od standarda ili uputstva: Nije bilo odstupanja.			
Tehnika i aranžman „Izvor –objekat ispitivanja-film-IKS tip i položaj “ u okviru tehnike ispitivanja prema : SRPS EN 1435:2007 -Tačka 6.1.4 Slika 5:Prozračivanje kroz jedan zid predmeta sa zakrivljenim zidom- „panorama“ IKS uz film			
Primenjeni sistem obeležavanja: < A- oznaka uzorka >-< 2/4 - redni broj uzorka >			
Klasa radiografske tehnike: B	Film vrsta: C4	Folije: Pb 0,1/0,1	Filteri: Bez filtera
Indikator kvaliteta slike zahtevana vrednost: t = 11 → w= 13 mm → žica W13		Način obrade filmova: Automatski, 28°C, 8 min	Zacrnljenje potrebno: >2,3±0,1
Izvor zračenja: <sup>75</sup> Se	Dimenzije fokusne tačke: 3x3	Aktivnost izvora: 1025,0 Gbq	Identifikacija glavne opreme: Defektoskop gamavolt SU 50; fab. broj 78871
Udaljenost izvor -film / Vreme ekspozicije: 400 mm / texp= 138 s			
<b>Klasifikacija nepravilnosti i kriterijumi ispitivanja:</b>			
Klasifikacija nepravilnosti u zavarenom spoju je prema: SRPS EN ISO 6520-1:2013			
Kriterijum prihvatljivosti prema: SRPS EN ISO 5817:2008 – nivo B			
<b>Napomene i prilozi:</b>			
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX			

Izveštaj o radiografskom ispitivanju ploča pod rednim brojem A-2 i A-4.






	<b>DOO "J&amp;S", 21131 Petrovaradin, Kačićeva 48, R. Srbija</b> Tel/fax +381216439157; +38163562494 E mail: jjsad@eunet.rs; PIB 101658992, MB 08579270, ŠD71200		 АТС 01-343 АКРЕДИТОВАНА ЛАБОРАТОРИЈА ЗА ИСПИТИВАЊЕ SRPS ISO/IEC 17025:2006		
	<b>IZVEŠTAJ O RADIOGRAFSKOM ISPITIVANJU</b>				
Broj:	102-1/15	Datum:	27.02.2015.	List/listova:	1/2
<b>Opšte :</b>					
Naručilac ispitivanja: Aleksandar Čabrilo			Proizvođač/Izvođač: Aleksandar Čabrilo		
Predmet - objekat ispitivanja: Tehnološke probe – sa oznakama: A5;A6 i A8 - 3 uzorka				Mesto ispitivanja: Petrovaradin	
Obim ispitivanja, broj zahteva i naloga za ispitivanje: Zavareni spojevi po zahtevu poručioca ispitivanja i prema zahtevu i nalogu za ispitivanje broj 15-65					
<b>Informacije o predmetu koji se ispituje :</b>					
Materijal: Protec 500		Termička obrada: Nije bilo TO		Geometrijski oblici zavarenih spojeva: Sučeoni zavareni spojevi cevi.	
Debljine materijala : t= 11 mm		Postupak zavarivanja: MIG		Drugo: -----	
<b>Informacije o ispitivanju:</b>					
Metoda ispitivanja prema: SRPS EN 1435:2007 –Ispitivanje materijala bez razaranja – Radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva					
Uputstvo za ispitivanje: UP.01 - Uputstvo za sprovođenje radiografskog ispitivanja u "J&S" doo.					
Odstupanja od standarda ili uputstva: Nije bilo odstupanja.					
Tehnika i aranžman „Izvor –objekat ispitivanja-film-IKS tip i položaj “ u okviru tehnike ispitivanja prema : SRPS EN 1435:2007 -Tačka 6.1.4 Slika 5:Prozračivanje kroz jedan zid predmeta sa zakrivljenim zidom- „panorama“ IKS na strani izvora					
Primenjeni sistem obeležavanja: < A- oznaka uzorka >< 5/6/8 - redni broj uzorka >					
Klasa radiografske tehnike: B		Film vrsta: C4		Folije: Pb 0,1/0,1	
Indikator kvaliteta slike zahtevana vrednost: t = 11 → w= 11 mm → žica W14		Način obrade filmova: Automatski, 28°C, 8 min		Filteri: Bez filtera Zacrtnjenje potrebno: >2,3±0,1	
Izvor zračenja: <sup>75</sup> Se		Dimenzije fokusne tačke: 3x3		Aktivnost izvora: 1025,0 Gbq	
Udaljenost izvor -film / Vreme ekspozicije: 400 mm / texp= 138 s		Identifikacija glavne opreme: Defektoskop gamavolt SU 50; fab. broj 78871			
<b>Klasifikacija nepravilnosti i kriterijumi ispitivanja:</b>					
Klasifikacija nepravilnosti u zavarenom spoju je prema: SRPS EN ISO 6520-1:2013					
Kriterijum prihvatljivosti prema: SRPS EN ISO 5817:2008 – nivo B					
<b>Napomene i prilozi:</b>					
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX					

Izveštaj o radiografskom ispitivanju ploča pod rednim brojem A-5, A-6 i A-8.

## PRILOG 4

### Snimak parametara zavarivanja kod ispitivanja difundovanog vodonika za temperaturu predgrevanja od 150 °C

Date of weld	20/10/2016						
Time of weld:	12:23:54 - 12:24:20						
Welding machine:	FASTMIG X 450 W/O X 37 T-BOX						
Welding machine serial number:	2392362						
Welding machine name:	Kemppi Fastmig x450						
Welding process:	MIG/MAG						
Duration of weld:	25.860 s						
Time	Duration [s]	WeldingVoltage [V]	WeldingCurrent [A]	WireFeedSpeed [m/min]	MotorCurrent [A]		
12:23:54.2	0	52.8	85	0	0.1	 Hotstart	
12:23:54.3	0.1	27.6	107	5.4	0.8		
12:23:54.4	0.2	18.7	132	7	1.3	 Welding phase	
12:23:54.5	0.3	16.2	132	7.5	1.5		
12:23:54.6	0.4	14.8	126	7.2	1.6	 Craterfill	
12:23:54.7	0.5	17	48	7.2	1.6		
12:23:54.8	0.6	18.7	21	6.8	2.4		
12:23:54.9	0.7	18.9	87	7.5	3.1	<b>AVERAGES</b>	
12:23:55.0	0.8	19.4	97	7.1	2.9		
12:23:55.1	0.9	25.8	123	7.5	2.6	WeldingVoltage	
12:23:55.2	1	25.8	79	7.2	2.3	<b>17.8</b>	
12:23:55.3	1.1	24.3	137	7.3	2		
12:23:55.4	1.2	20.1	130	7.3	1.9	WeldingCurrent	
12:23:55.5	1.3	20.1	143	7.4	1.7	<b>150.9</b>	
12:23:55.6	1.4	19.1	144	7.3	1.7		
12:23:55.7	1.5	17.7	147	7.4	1.6	WireFeedSpeed	
12:23:55.8	1.6	17.7	152	7.2	1.6	<b>7.3</b>	
12:23:55.9	1.7	17.3	151	7.3	1.6		
12:23:56.0	1.8	17.2	152	7.4	1.6	MotorCurrent	
12:23:56.1	1.9	17.2	150	7.3	1.5	<b>1.6</b>	
12:23:56.2	2	16.9	152	7.4	1.5		
12:23:56.3	2.1	16.9	148	7.4	1.5		
12:23:56.4	2.2	16.9	151	7.4	1.5		
12:23:56.5	2.3	16.9	147	7.2	1.5		
12:23:56.6	2.4	16.9	147	7.2	1.5		
12:23:56.7	2.5	16.8	152	7.2	1.5		
12:23:56.8	2.6	16.8	141	7.3	1.5		
12:23:56.9	2.7	16.8	151	7.3	1.5		
12:23:57.0	2.8	16.8	144	7.4	1.5		
12:23:57.1	2.9	16.9	147	7.3	1.5		
12:23:57.2	3	16.9	142	7.3	1.5		

12:23:57.3	3.1	16.8	155	7.4	1.5
12:23:57.4	3.2	16.8	144	7.4	1.5
12:23:57.5	3.3	16.8	147	7.3	1.5
12:23:57.6	3.4	16.8	144	7.5	1.5
12:23:57.7	3.5	16.9	144	7.5	1.5
12:23:57.8	3.6	16.8	150	7.4	1.5
12:23:57.9	3.7	16.7	167	7.4	1.5
12:23:58.0	3.8	16.7	172	7.2	1.5
12:23:58.1	3.9	16.7	150	7.4	1.5
12:23:58.2	4	17	149	7.3	1.5
12:23:58.3	4.1	17	161	7.3	1.5
12:23:58.4	4.2	17	132	7.1	1.5
12:23:58.5	4.3	17	166	6.9	1.6
12:23:58.6	4.4	17	117	7.2	1.6
12:23:58.7	4.5	17.1	124	7.4	1.6
12:23:58.8	4.6	17.2	112	7.5	1.7
12:23:58.9	4.7	17.2	108	7.2	1.7
12:23:59.0	4.8	17.6	90	7.2	1.7
12:23:59.1	4.9	17.8	96	7.3	1.7
12:23:59.2	5	17.8	139	7.5	1.7
12:23:59.3	5.1	17.3	120	7.4	1.7
12:23:59.4	5.2	17.3	46	7.5	1.6
12:23:59.5	5.3	17.3	107	7.4	1.6
12:23:59.6	5.4	17.5	134	7.4	1.6
12:23:59.7	5.5	17	153	7.3	1.6
12:23:59.8	5.6	16.9	161	7.4	1.6
12:23:59.9	5.7	16.9	161	7.3	1.6
12:24:00.0	5.8	16.9	154	7.4	1.6
12:24:00.1	5.9	16.9	160	7.3	1.6
12:24:00.2	6	16.9	166	7.3	1.6
12:24:00.3	6.1	16.9	155	7.3	1.6
12:24:00.4	6.2	16.9	152	7.3	1.6
12:24:00.5	6.3	16.9	158	7.3	1.6
12:24:00.6	6.4	16.9	161	7.3	1.5
12:24:00.7	6.5	16.8	162	7.3	1.5
12:24:00.8	6.6	16.8	158	7.3	1.6
12:24:00.9	6.7	16.8	169	7.3	1.6
12:24:01.0	6.8	16.8	163	7.3	1.6
12:24:01.1	6.9	16.8	170	7.3	1.5
12:24:01.2	7	16.8	169	7.5	1.5
12:24:01.3	7.1	16.9	158	7.3	1.5
12:24:01.4	7.2	16.9	158	7.5	1.5
12:24:01.5	7.3	16.9	163	7.2	1.5
12:24:01.6	7.4	16.9	161	7.3	1.6
12:24:01.7	7.5	16.9	153	7.2	1.6

12:24:01.8	7.6	16.9	158	7.4	1.6
12:24:01.9	7.7	16.9	156	7.1	1.6
12:24:02.0	7.8	16.9	147	7.3	1.6
12:24:02.1	7.9	16.9	149	7.1	1.6
12:24:02.2	8	16.9	146	7.3	1.6
12:24:02.3	8.1	16.9	145	7.2	1.6
12:24:02.4	8.2	16.9	141	7.4	1.6
12:24:02.5	8.3	16.9	144	7.3	1.6
12:24:02.6	8.4	16.8	150	7.4	1.6
12:24:02.7	8.5	16.8	160	7.4	1.6
12:24:02.8	8.6	16.8	148	7.4	1.6
12:24:02.9	8.7	16.8	160	7.3	1.6
12:24:03.0	8.8	16.8	158	7.4	1.6
12:24:03.1	8.9	16.8	162	7.3	1.6
12:24:03.2	9	16.8	153	7.4	1.6
12:24:03.3	9.1	16.8	162	7.3	1.6
12:24:03.4	9.2	16.8	158	7.3	1.6
12:24:03.5	9.3	16.8	166	7.3	1.5
12:24:03.6	9.4	16.8	168	7.2	1.5
12:24:03.7	9.5	16.8	160	7.2	1.5
12:24:03.8	9.6	16.9	161	7.3	1.5
12:24:03.9	9.7	16.9	163	7.2	1.5
12:24:04.0	9.8	16.8	163	7.4	1.6
12:24:04.1	9.9	16.8	161	7.3	1.6
12:24:04.2	10	16.8	164	7.4	1.6
12:24:04.3	10.1	16.8	164	7.4	1.6
12:24:04.4	10.2	16.8	164	7.5	1.6
12:24:04.5	10.3	16.8	160	7.2	1.6
12:24:04.6	10.4	16.8	164	7.3	1.5
12:24:04.7	10.5	16.8	158	7.3	1.5
12:24:04.8	10.6	16.9	166	7.4	1.6
12:24:04.9	10.7	16.9	153	7.2	1.6
12:24:05.0	10.8	16.9	153	7.4	1.5
12:24:05.1	10.9	16.9	148	7.2	1.5
12:24:05.2	11	16.9	152	7.3	1.5
12:24:05.3	11.1	16.9	155	7.3	1.5
12:24:05.4	11.2	16.9	143	7.3	1.5
12:24:05.5	11.3	16.9	152	7.1	1.5
12:24:05.6	11.4	16.9	149	7.3	1.5
12:24:05.7	11.5	16.9	146	7.2	1.5
12:24:05.8	11.6	17	121	7.5	1.6
12:24:05.9	11.7	17	89	7.3	1.6
12:24:06.0	11.8	26.4	50	7.3	1.6
12:24:06.1	11.9	31.3	77	7.4	1.6
12:24:06.2	12	31.3	127	7.2	1.6

---

12:24:06.3	12.1	24.9	81	7.2	1.7
12:24:06.4	12.2	24.1	88	7.4	1.7
12:24:06.5	12.3	23.9	101	7.3	1.7
12:24:06.6	12.4	21.6	63	7.3	1.7
12:24:06.7	12.5	31.6	82	7.1	1.7
12:24:06.8	12.6	32	112	7.6	1.7
12:24:06.9	12.7	26.9	113	7.4	1.8
12:24:07.0	12.8	26.9	108	7.4	1.8
12:24:07.1	12.9	24.3	87	7.3	1.8
12:24:07.2	13	21.1	133	7.5	1.8
12:24:07.3	13.1	21.1	165	7.3	1.7
12:24:07.4	13.2	19.1	169	7.4	1.6
12:24:07.5	13.3	18.1	171	7.1	1.6
12:24:07.6	13.4	18.1	175	7.2	1.6
12:24:07.7	13.5	17.3	177	7.1	1.5
12:24:07.8	13.6	17.2	174	7.3	1.5
12:24:07.9	13.7	17.1	179	7.2	1.5
12:24:08.0	13.8	17	173	7.3	1.5
12:24:08.1	13.9	17	166	7.2	1.5
12:24:08.2	14	16.9	171	7.3	1.5
12:24:08.3	14.1	16.9	161	7.4	1.5
12:24:08.4	14.2	16.9	171	7.3	1.5
12:24:08.5	14.3	16.9	166	7.3	1.5
12:24:08.6	14.4	16.9	165	7.4	1.5
12:24:08.7	14.5	16.9	172	7.3	1.5
12:24:08.8	14.6	16.9	167	7.3	1.5
12:24:08.9	14.7	16.9	172	7.2	1.5
12:24:09.0	14.8	16.9	174	7.3	1.5
12:24:09.1	14.9	16.9	166	7.1	1.5
12:24:09.2	15	16.9	166	7.2	1.5
12:24:09.3	15.1	16.9	168	7.2	1.5
12:24:09.4	15.2	16.9	170	7.3	1.5
12:24:09.5	15.3	16.9	170	7.2	1.5
12:24:09.6	15.4	16.9	158	7.3	1.5
12:24:09.7	15.5	16.8	161	7.2	1.5
12:24:09.8	15.6	16.8	166	7.4	1.5
12:24:09.9	15.7	16.8	159	7.3	1.5
12:24:10.0	15.8	16.9	161	7.4	1.5
12:24:10.1	15.9	16.9	158	7.3	1.5
12:24:10.2	16	16.9	162	7.5	1.5
12:24:10.3	16.1	16.9	164	7.3	1.5
12:24:10.4	16.2	16.9	165	7.5	1.5
12:24:10.5	16.3	16.9	156	7.2	1.5
12:24:10.6	16.4	16.9	161	7.3	1.5
12:24:10.7	16.5	16.9	163	7.1	1.5

---



12:24:10.8	16.6	16.9	156	7.2	1.5
12:24:10.9	16.7	16.9	161	7.2	1.5
12:24:11.0	16.8	16.9	163	7.2	1.5
12:24:11.1	16.9	16.9	162	7.2	1.5
12:24:11.2	17	16.9	155	7.2	1.5
12:24:11.3	17.1	16.8	170	7.1	1.6
12:24:11.4	17.2	16.8	157	7.3	1.5
12:24:11.5	17.3	16.8	162	7.3	1.5
12:24:11.6	17.4	16.8	162	7.3	1.5
12:24:11.7	17.5	16.8	162	7.2	1.5
12:24:11.8	17.6	16.8	162	7.4	1.5
12:24:11.9	17.7	16.8	162	7.3	1.5
12:24:12.0	17.8	16.9	154	7.4	1.5
12:24:12.1	17.9	16.9	165	7.2	1.5
12:24:12.2	18	16.9	153	7.3	1.5
12:24:12.3	18.1	16.9	166	7.2	1.5
12:24:12.4	18.2	16.9	160	7.3	1.5
12:24:12.5	18.3	16.9	154	7.1	1.5
12:24:12.6	18.4	16.9	156	7.3	1.5
12:24:12.7	18.5	16.8	160	7.2	1.5
12:24:12.8	18.6	16.8	155	7.3	1.5
12:24:12.9	18.7	16.8	161	7.2	1.5
12:24:13.0	18.8	16.8	156	7.3	1.5
12:24:13.1	18.9	16.9	170	7.2	1.5
12:24:13.2	19	16.9	159	7.4	1.5
12:24:13.3	19.1	16.8	155	7.3	1.5
12:24:13.4	19.2	16.8	162	7.4	1.5
12:24:13.5	19.3	16.8	170	7.3	1.5
12:24:13.6	19.4	16.8	163	7.4	1.5
12:24:13.7	19.5	16.8	163	7.3	1.5
12:24:13.8	19.6	16.8	164	7.3	1.5
12:24:13.9	19.7	16.8	168	7.4	1.5
12:24:14.0	19.8	16.8	156	7.3	1.5
12:24:14.1	19.9	16.8	164	7.2	1.5
12:24:14.2	20	16.9	166	7.1	1.5
12:24:14.3	20.1	16.9	167	7	1.5
12:24:14.4	20.2	16.9	161	7.2	1.5
12:24:14.5	20.3	16.9	165	7.2	1.5
12:24:14.6	20.4	16.9	163	7.2	1.5
12:24:14.7	20.5	16.8	172	7.2	1.5
12:24:14.8	20.6	16.8	160	7.3	1.5
12:24:14.9	20.7	16.8	165	7.2	1.5
12:24:15.0	20.8	16.8	159	7.4	1.5
12:24:15.1	20.9	16.8	157	7.2	1.5
12:24:15.2	21	16.8	156	7.3	1.5




12:24:15.3	21.1	16.9	162	7.2	1.5
12:24:15.4	21.2	16.9	168	7.4	1.5
12:24:15.5	21.3	16.8	164	7.3	1.5
12:24:15.6	21.4	16.8	165	7.4	1.5
12:24:15.7	21.5	16.8	169	7.2	1.5
12:24:15.8	21.6	16.8	169	7.4	1.5
12:24:15.9	21.7	16.8	161	7.3	1.5
12:24:16.0	21.8	16.8	169	7.4	1.5
12:24:16.1	21.9	16.8	161	7.2	1.5
12:24:16.2	22	16.9	160	7.4	1.5
12:24:16.3	22.1	16.9	163	7.2	1.5
12:24:16.4	22.2	16.8	166	7.2	1.5
12:24:16.5	22.3	16.8	163	7.3	1.5
12:24:16.6	22.4	16.8	161	7.2	1.5
12:24:16.7	22.5	16.8	165	7.4	1.5
12:24:16.8	22.6	16.8	155	7.3	1.5
12:24:16.9	22.7	16.8	161	7.4	1.5
12:24:17.0	22.8	16.8	160	7.3	1.5
12:24:17.1	22.9	16.8	161	7.4	1.5
12:24:17.2	23	16.8	164	7.3	1.5
12:24:17.3	23.1	16.9	166	7.4	1.5
12:24:17.4	23.2	16.9	164	7.3	1.5
12:24:17.5	23.3	16.9	161	7.3	1.5
12:24:17.6	23.4	16.9	164	7.2	1.5
12:24:17.7	23.5	16.9	158	7.2	1.5
12:24:17.8	23.6	16.9	160	7.2	1.5
12:24:17.9	23.7	16.9	161	7.2	1.5
12:24:18.0	23.8	16.8	161	7.3	1.5
12:24:18.1	23.9	16.8	171	7.2	1.5
12:24:18.2	24	16.8	156	7.2	1.5
12:24:18.3	24.1	16.8	161	7.1	1.5
12:24:18.4	24.2	16.8	161	7.3	1.5
12:24:18.5	24.3	16.8	157	7.1	1.5
12:24:18.6	24.4	16.8	152	7.3	1.5
12:24:18.7	24.5	16.9	158	7.2	1.5
12:24:18.8	24.6	16.9	158	7.3	1.5
12:24:18.9	24.7	16.8	164	7.2	1.5
12:24:19.0	24.8	16.8	162	7.3	1.5
12:24:19.1	24.9	16.8	163	7.4	1.5
12:24:19.2	25	16.8	167	7.2	1.5
12:24:19.3	25.1	16.8	168	7.3	1.6
12:24:19.4	25.2	16.8	159	7.2	1.6
12:24:19.5	25.3	16.8	164	7.3	1.6
12:24:19.6	25.4	16.8	165	7.3	1.6
12:24:19.7	25.5	16.8	169	7.3	1.5

12:24:19.8	25.6	16.9	157	7.2	1.5
12:24:19.9	25.7	16.9	169	7.3	1.6
12:24:20.0	25.8	16.8	176	7.3	1.6

### Snimak parametara zavarivanja kod ispitivanja difundovanog vodonika za temperaturu predgrevanja od 160 °C

Date of weld	20/10/2016				
Time of weld:	12:39:12 - 12:39:44				
Welding machine:	FASTMIG X 450 W/O X 37 T-BOX				
Welding machine serial number:	2392362				
Welding machine name:	Kemppi Fastmig x450				
Welding process:	MIG/MAG				
Duration of weld:	32.520 s				

Time	Duration [s]	WeldingVoltage [V]	WeldingCurrent [A]	WireFeedSpeed [m/min]	MotorCurrent [A]	
12:39:12.0	0	3	0	4.8	0.8	 Hotstart
12:39:12.1	0.1	13.2	62	5.8	1.1	
12:39:12.2	0.2	39.6	114	7.2	1.3	 Welding phase
12:39:12.3	0.3	39.6	106	7.2	1.4	
12:39:12.4	0.4	33.3	51	7.5	1.4	 Craterfill
12:39:12.5	0.5	26.1	45	7.2	1.5	
12:39:12.6	0.6	26.1	104	7.4	1.5	
12:39:12.7	0.7	22.5	96	7.4	1.4	<b>AVERAGES</b>
12:39:12.8	0.8	20.6	97	7.4	1.4	WeldingVoltage
12:39:12.9	0.9	20.6	70	7.3	1.4	<b>17.8</b>
12:39:13.0	1	18.6	72	7.6	1.5	WeldingCurrent
12:39:13.1	1.1	18.3	98	7.2	1.6	<b>139.3</b>
12:39:13.2	1.2	18.2	90	7.5	1.6	WireFeedSpeed
12:39:13.3	1.3	17.9	49	7.3	1.6	<b>7.3</b>
12:39:13.4	1.4	17.9	94	7.4	1.6	MotorCurrent
12:39:13.5	1.5	17.8	71	7.2	1.5	<b>1.6</b>
12:39:13.6	1.6	17.6	69	7.4	1.5	
12:39:13.7	1.7	17.5	103	7.3	1.5	
12:39:13.8	1.8	17.5	81	7.4	1.5	
12:39:13.9	1.9	17.5	82	7.2	1.5	
12:39:14.0	2	17.5	105	7.3	1.5	
12:39:14.1	2.1	17.2	80	7.2	1.5	
12:39:14.2	2.2	17.1	84	7.3	1.5	
12:39:14.3	2.3	17.1	91	7.2	1.5	
12:39:14.4	2.4	17.6	125	7.3	1.5	
12:39:14.5	2.5	17.7	107	7.3	1.4	
12:39:14.6	2.6	17.6	140	7.3	1.4	

---

12:39:14.7	2.7	17.1	116	7.3	1.5
12:39:14.8	2.8	17.1	145	7.4	1.5
12:39:14.9	2.9	17	127	7.4	1.5
12:39:15.0	3	17	151	7.5	1.5
12:39:15.1	3.1	17	149	7.3	1.5
12:39:15.2	3.2	16.9	154	7.4	1.5
12:39:15.3	3.3	16.8	162	7.2	1.5
12:39:15.4	3.4	16.8	146	7.4	1.5
12:39:15.5	3.5	16.8	158	7.3	1.5
12:39:15.6	3.6	16.8	162	7.3	1.5
12:39:15.7	3.7	16.8	163	7.2	1.5
12:39:15.8	3.8	16.8	158	7.3	1.5
12:39:15.9	3.9	16.8	159	7.2	1.5
12:39:16.0	4	16.8	163	7.4	1.5
12:39:16.1	4.1	16.8	149	7.3	1.6
12:39:16.2	4.2	16.8	153	7.4	1.6
12:39:16.3	4.3	16.8	156	7.3	1.5
12:39:16.4	4.4	16.9	161	7.5	1.6
12:39:16.5	4.5	16.9	153	7.3	1.6
12:39:16.6	4.6	16.9	154	7.3	1.6
12:39:16.7	4.7	16.9	155	7.3	1.6
12:39:16.8	4.8	16.9	155	7.4	1.6
12:39:16.9	4.9	16.9	153	7.4	1.6
12:39:17.0	5	16.9	154	7.4	1.6
12:39:17.1	5.1	16.9	154	7.4	1.6
12:39:17.2	5.2	16.8	154	7.3	1.6
12:39:17.3	5.3	16.8	158	7.3	1.6
12:39:17.4	5.4	16.8	156	7.4	1.6
12:39:17.5	5.5	16.8	156	7.2	1.6
12:39:17.6	5.6	16.8	151	7.4	1.6
12:39:17.7	5.7	16.8	160	7.2	1.6
12:39:17.8	5.8	16.9	154	7.4	1.6
12:39:17.9	5.9	16.9	164	7.2	1.6
12:39:18.0	6	16.8	164	7.4	1.6
12:39:18.1	6.1	16.8	172	7.3	1.5
12:39:18.2	6.2	16.8	156	7.4	1.5
12:39:18.3	6.3	16.8	152	7.3	1.6
12:39:18.4	6.4	16.9	160	7.5	1.6
12:39:18.5	6.5	16.9	148	7.4	1.6
12:39:18.6	6.6	16.8	156	7.4	1.6
12:39:18.7	6.7	16.9	144	7.3	1.6
12:39:18.8	6.8	17	148	7.5	1.6
12:39:18.9	6.9	16.9	152	7.3	1.6
12:39:19.0	7	16.9	152	7.4	1.6
12:39:19.1	7.1	16.9	154	7.3	1.6

---

---

12:39:19.2	7.2	16.9	148	7.3	1.6
12:39:19.3	7.3	16.9	149	7.1	1.6
12:39:19.4	7.4	16.9	149	7.3	1.6
12:39:19.5	7.5	16.9	155	7.2	1.6
12:39:19.6	7.6	16.9	166	7.2	1.6
12:39:19.7	7.7	16.9	150	7.1	1.6
12:39:19.8	7.8	16.9	152	7.4	1.6
12:39:19.9	7.9	16.9	156	7.3	1.6
12:39:20.0	8	16.8	160	7.4	1.5
12:39:20.1	8.1	16.8	155	7.4	1.5
12:39:20.2	8.2	16.8	155	7.3	1.5
12:39:20.3	8.3	16.8	164	7.4	1.5
12:39:20.4	8.4	16.8	156	7.2	1.5
12:39:20.5	8.5	16.8	163	7.3	1.5
12:39:20.6	8.6	16.9	159	7.4	1.5
12:39:20.7	8.7	16.9	150	7.2	1.5
12:39:20.8	8.8	16.9	155	7.2	1.5
12:39:20.9	8.9	16.8	149	7.1	1.5
12:39:21.0	9	16.8	153	7.2	1.5
12:39:21.1	9.1	16.8	146	7.2	1.5
12:39:21.2	9.2	16.9	149	7.3	1.5
12:39:21.3	9.3	16.9	147	7.2	1.5
12:39:21.4	9.4	16.9	142	7.3	1.5
12:39:21.5	9.5	16.9	148	7.3	1.5
12:39:21.6	9.6	16.9	150	7.4	1.6
12:39:21.7	9.7	16.8	147	7.3	1.6
12:39:21.8	9.8	16.9	147	7.4	1.6
12:39:21.9	9.9	16.9	150	7.3	1.6
12:39:22.0	10	16.9	145	7.4	1.6
12:39:22.1	10.1	16.9	154	7.4	1.6
12:39:22.2	10.2	16.9	149	7.5	1.6
12:39:22.3	10.3	16.9	152	7.3	1.6
12:39:22.4	10.4	16.9	152	7.4	1.6
12:39:22.5	10.5	16.9	149	7.3	1.6
12:39:22.6	10.6	16.9	153	7.3	1.6
12:39:22.7	10.7	16.8	161	7.4	1.6
12:39:22.8	10.8	16.8	159	7.3	1.7
12:39:22.9	10.9	16.8	153	7.4	1.7
12:39:23.0	11	16.8	156	7.3	1.7
12:39:23.1	11.1	16.8	157	7.3	1.7
12:39:23.2	11.2	16.9	153	7.3	1.7
12:39:23.3	11.3	16.8	160	7.3	1.6
12:39:23.4	11.4	16.8	157	7.4	1.6
12:39:23.5	11.5	16.8	165	7.4	1.6
12:39:23.6	11.6	16.8	159	7.4	1.7

---



12:39:23.7	11.7	16.8	160	7.3	1.7
12:39:23.8	11.8	16.8	151	7.4	1.6
12:39:23.9	11.9	16.8	163	7.4	1.6
12:39:24.0	12	16.8	154	7.3	1.6
12:39:24.1	12.1	16.8	150	7.3	1.6
12:39:24.2	12.2	16.8	158	7.3	1.6
12:39:24.3	12.3	16.9	150	7.1	1.6
12:39:24.4	12.4	16.9	154	7.3	1.6
12:39:24.5	12.5	16.9	151	7.2	1.6
12:39:24.6	12.6	16.9	149	7.3	1.6
12:39:24.7	12.7	17	145	7.2	1.6
12:39:24.8	12.8	17.5	100	7.3	1.7
12:39:24.9	12.9	17.5	137	7.1	1.6
12:39:25.0	13	17.5	102	7.4	1.7
12:39:25.1	13.1	17.5	107	7.4	1.7
12:39:25.2	13.2	17.5	111	7.1	1.8
12:39:25.3	13.3	17.8	77	7.5	1.7
12:39:25.4	13.4	18.3	101	7.5	1.8
12:39:25.5	13.5	18.3	122	7.4	1.8
12:39:25.6	13.6	17.8	126	7.2	1.8
12:39:25.7	13.7	17.5	103	7.2	1.8
12:39:25.8	13.8	17.4	121	7.3	1.8
12:39:25.9	13.9	17.1	119	7.4	1.8
12:39:26.0	14	17.1	111	7.3	1.8
12:39:26.1	14.1	17.1	108	7.4	1.9
12:39:26.2	14.2	17.4	124	7	2
12:39:26.3	14.3	17.4	127	7.3	1.9
12:39:26.4	14.4	17.3	139	7.2	1.9
12:39:26.5	14.5	17	126	7.2	1.9
12:39:26.6	14.6	17	139	7.2	1.9
12:39:26.7	14.7	17	101	7.2	1.8
12:39:26.8	14.8	17.1	127	7.4	1.8
12:39:26.9	14.9	17.1	130	7.2	1.8
12:39:27.0	15	17.4	113	7.4	1.8
12:39:27.1	15.1	17.6	123	7.4	1.7
12:39:27.2	15.2	17.6	81	7.5	1.7
12:39:27.3	15.3	17.3	61	7.3	1.8
12:39:27.4	15.4	17.3	40	7.3	1.7
12:39:27.5	15.5	17.3	65	7.3	1.7
12:39:27.6	15.6	18.8	132	7.3	1.8
12:39:27.7	15.7	18.5	124	7.2	1.7
12:39:27.8	15.8	18.2	93	7.2	1.7
12:39:27.9	15.9	18.4	61	7.5	1.7
12:39:28.0	16	18.4	57	7.2	1.7
12:39:28.1	16.1	18.4	74	7.3	1.7

12:39:28.2	16.2	18.5	73	7.4	1.7
12:39:28.3	16.3	18.5	63	7.5	1.8
12:39:28.4	16.4	17.9	65	7.4	1.8
12:39:28.5	16.5	17.6	58	7.5	1.8
12:39:28.6	16.6	17.6	98	7.4	1.8
12:39:28.7	16.7	17.6	154	7.5	1.7
12:39:28.8	16.8	17.6	56	7.4	1.7
12:39:28.9	16.9	17.6	24	7.4	1.6
12:39:29.0	17	29.7	86	7.3	1.6
12:39:29.1	17.1	30	97	7.3	1.6
12:39:29.2	17.2	30.1	29	7.2	1.6
12:39:29.3	17.3	31.2	86	7.2	1.6
12:39:29.4	17.4	31.2	116	7.2	1.6
12:39:29.5	17.5	28.6	124	7.2	1.6
12:39:29.6	17.6	24	153	7.2	1.6
12:39:29.7	17.7	22.6	79	7.3	1.6
12:39:29.8	17.8	22.6	78	7.3	1.6
12:39:29.9	17.9	23.8	79	7.2	1.6
12:39:30.0	18	23.8	37	7.3	1.6
12:39:30.1	18.1	22.3	86	7.3	1.5
12:39:30.2	18.2	21.9	121	7.1	1.5
12:39:30.3	18.3	21.9	129	7.5	1.7
12:39:30.4	18.4	29.7	131	7.2	1.7
12:39:30.5	18.5	30.3	109	7.6	1.8
12:39:30.6	18.6	29	136	7.3	1.8
12:39:30.7	18.7	21.2	94	7.3	1.8
12:39:30.8	18.8	20.9	80	7.4	1.8
12:39:30.9	18.9	20.4	96	7.4	1.8
12:39:31.0	19	19.4	99	7.5	1.8
12:39:31.1	19.1	19.4	130	7.4	1.8
12:39:31.2	19.2	19	95	7.3	1.8
12:39:31.3	19.3	18.8	114	7.2	1.7
12:39:31.4	19.4	18.8	125	7.4	1.7
12:39:31.5	19.5	18	109	7.3	1.8
12:39:31.6	19.6	17.7	117	7.2	1.8
12:39:31.7	19.7	17.7	101	7.4	1.9
12:39:31.8	19.8	17.8	83	7.4	1.8
12:39:31.9	19.9	17.8	157	7.3	1.7
12:39:32.0	20	17.7	138	7.4	1.7
12:39:32.1	20.1	16.9	157	7.3	1.7
12:39:32.2	20.2	16.9	158	7.4	1.7
12:39:32.3	20.3	16.8	168	7.2	1.7
12:39:32.4	20.4	16.7	150	7.3	1.7
12:39:32.5	20.5	16.7	154	7.2	1.7
12:39:32.6	20.6	16.8	154	7.4	1.7

12:39:32.7	20.7	16.9	152	7.3	1.7
12:39:32.8	20.8	16.9	151	7.5	1.7
12:39:32.9	20.9	16.8	155	7.3	1.7
12:39:33.0	21	16.8	155	7.2	1.7
12:39:33.1	21.1	16.8	147	7.3	1.7
12:39:33.2	21.2	16.8	156	7.2	1.7
12:39:33.3	21.3	16.9	149	7.3	1.6
12:39:33.4	21.4	16.8	160	7.1	1.6
12:39:33.5	21.5	16.8	153	7.2	1.6
12:39:33.6	21.6	16.8	155	7.2	1.7
12:39:33.7	21.7	16.8	152	7.4	1.7
12:39:33.8	21.8	16.9	155	7.2	1.7
12:39:33.9	21.9	16.9	156	7.3	1.7
12:39:34.0	22	16.9	143	7.3	1.7
12:39:34.1	22.1	17	152	7.4	1.7
12:39:34.2	22.2	17	152	7.3	1.7
12:39:34.3	22.3	16.8	159	7.4	1.7
12:39:34.4	22.4	16.8	159	7.4	1.7
12:39:34.5	22.5	16.8	150	7.4	1.7
12:39:34.6	22.6	16.8	155	7.3	1.7
12:39:34.7	22.7	16.8	156	7.4	1.7
12:39:34.8	22.8	16.8	155	7.5	1.7
12:39:34.9	22.9	16.8	159	7.4	1.7
12:39:35.0	23	16.8	156	7.4	1.7
12:39:35.1	23.1	16.8	167	7.3	1.7
12:39:35.2	23.2	16.8	160	7.3	1.7
12:39:35.3	23.3	16.8	162	7.2	1.7
12:39:35.4	23.4	16.8	157	7.3	1.7
12:39:35.5	23.5	16.9	160	7.4	1.7
12:39:35.6	23.6	16.9	161	7.2	1.7
12:39:35.7	23.7	16.8	163	7.4	1.7
12:39:35.8	23.8	16.8	165	7.2	1.7
12:39:35.9	23.9	16.8	162	7.3	1.7
12:39:36.0	24	16.8	165	7.1	1.7
12:39:36.1	24.1	16.9	158	7.4	1.7
12:39:36.2	24.2	16.8	164	7.3	1.7
12:39:36.3	24.3	16.8	174	7.4	1.7
12:39:36.4	24.4	16.8	171	7.3	1.7
12:39:36.5	24.5	16.8	168	7.4	1.7
12:39:36.6	24.6	16.9	168	7.2	1.7
12:39:36.7	24.7	16.9	155	7.4	1.6
12:39:36.8	24.8	16.8	169	7.2	1.6
12:39:36.9	24.9	16.8	160	7.4	1.6
12:39:37.0	25	16.8	167	7.1	1.6
12:39:37.1	25.1	16.8	170	7.3	1.6

---

12:39:37.2	25.2	16.9	159	7.2	1.6
12:39:37.3	25.3	16.9	166	7.3	1.6
12:39:37.4	25.4	16.9	159	7.2	1.6
12:39:37.5	25.5	16.9	172	7.4	1.6
12:39:37.6	25.6	16.9	169	7.3	1.6
12:39:37.7	25.7	16.8	167	7.4	1.6
12:39:37.8	25.8	16.9	170	7.4	1.6
12:39:37.9	25.9	16.8	168	7.3	1.6
12:39:38.0	26	16.8	169	7.3	1.7
12:39:38.1	26.1	16.8	168	7.4	1.7
12:39:38.2	26.2	16.8	164	7.3	1.7
12:39:38.3	26.3	16.9	155	7.3	1.7
12:39:38.4	26.4	16.9	166	7.2	1.7
12:39:38.5	26.5	16.9	162	7.3	1.7
12:39:38.6	26.6	16.9	162	7.1	1.7
12:39:38.7	26.7	16.9	162	7.3	1.7
12:39:38.8	26.8	16.9	167	7.1	1.7
12:39:38.9	26.9	16.9	163	7.2	1.7
12:39:39.0	27	16.9	158	7.1	1.7
12:39:39.1	27.1	16.9	169	7.3	1.7
12:39:39.2	27.2	16.9	165	7.2	1.7
12:39:39.3	27.3	16.9	152	7.4	1.7
12:39:39.4	27.4	16.9	161	7.3	1.7
12:39:39.5	27.5	16.9	152	7.3	1.7
12:39:39.6	27.6	16.9	157	7.3	1.7
12:39:39.7	27.7	16.9	159	7.4	1.7
12:39:39.8	27.8	16.9	159	7.4	1.7
12:39:39.9	27.9	16.8	160	7.4	1.7
12:39:40.0	28	16.8	166	7.2	1.7
12:39:40.1	28.1	16.8	168	7.3	1.7
12:39:40.2	28.2	16.8	166	7.2	1.7
12:39:40.3	28.3	16.9	170	7.3	1.7
12:39:40.4	28.4	16.9	162	7.2	1.7
12:39:40.5	28.5	16.8	163	7.2	1.7
12:39:40.6	28.6	16.8	164	7.3	1.7
12:39:40.7	28.7	16.8	162	7.3	1.7
12:39:40.8	28.8	16.9	159	7.3	1.7
12:39:40.9	28.9	16.9	161	7.3	1.7
12:39:41.0	29	16.9	156	7.2	1.7
12:39:41.1	29.1	16.9	164	7.4	1.7
12:39:41.2	29.2	16.9	163	7.3	1.7
12:39:41.3	29.3	16.7	174	7.5	1.7
12:39:41.4	29.4	16.7	156	7.4	1.7
12:39:41.5	29.5	16.7	172	7.4	1.6
12:39:41.6	29.6	16.8	167	7.3	1.6

---

---

12:39:41.7	29.7	16.9	157	7.4	1.6
12:39:41.8	29.8	16.9	165	7.2	1.6
12:39:41.9	29.9	16.8	161	7.3	1.7
12:39:42.0	30	16.8	161	7	1.7
12:39:42.1	30.1	16.8	161	7.2	1.7
12:39:42.2	30.2	16.9	162	7.2	1.7
12:39:42.3	30.3	16.9	165	7.2	1.7
12:39:42.4	30.4	16.8	167	7.1	1.7
12:39:42.5	30.5	16.8	169	7.3	1.7
12:39:42.6	30.6	16.8	164	7.2	1.7
12:39:42.7	30.7	16.8	171	7.4	1.8
12:39:42.8	30.8	16.9	168	7.3	1.8
12:39:42.9	30.9	16.9	172	7.4	1.7
12:39:43.0	31	16.9	164	7.3	1.7
12:39:43.1	31.1	16.9	168	7.3	1.7
12:39:43.2	31.2	16.9	174	7.3	1.7
12:39:43.3	31.3	16.8	169	7.3	1.7
12:39:43.4	31.4	16.8	160	7.3	1.7
12:39:43.5	31.5	16.8	171	7.3	1.8
12:39:43.6	31.6	16.8	170	7.2	1.8
12:39:43.7	31.7	16.8	166	7.2	1.8
12:39:43.8	31.8	16.8	174	7.2	1.8
12:39:43.9	31.9	16.8	165	7.3	1.8
12:39:44.0	32	16.8	160	7.2	1.8
12:39:44.1	32.1	16.8	159	7.3	1.7
12:39:44.2	32.2	16.9	158	7.2	1.7
12:39:44.3	32.3	16.9	167	7.3	1.7
12:39:44.4	32.4	16.9	168	7.3	1.7
12:39:44.5	32.5	16.9	164	6.4	1.6



**PRILOG 5**

**Izmerene brzine projektila kod ispitivanja zone metal šava.**

Measurement Name :  
**2016-09-26\_7.62x51mm NATO BALL OPTINA CEV**



Round	1 (Pc)	2 (Pp)	3 (Action time)	4 (V10)	5 (T50)	6 (dv)
	Time (ms)	Max (bar)	Time (ms)	Max (bar)	Time (ms)	Max (bar)
1	-	9.6	-	5.4	-	-
2	-	7.2	-	5.4	-	-
3	-	7.2	-	5.4	-	-
Avg	0.0000	8.0	0.0000	5.4	0.0000	0.0000
SD	0.00000	1.39	0.00000	0.00	0.00415	0.00000
Max	0.0000	9.6	0.0000	5.4	1.1780	0.0000
Min	0.0000	7.2	0.0000	5.4	1.1697	0.0000
Delta	0.0000	2.4	0.0000	0.0	0.0083	0.0000
WH(U)					1451.801	0.00

Target statistics	Avg [mm]
Method :	Statistical (default)
Impact Mean Point Xm :	0.0
Impact Mean Point Ym :	0.0
Radius Rm :	0.0
Radius R100 :	0.0
Radius R50 :	0.0
Radius Rdisp :	0.0
Diameter 2R100 :	0.0
Group Red. Width (W) :	0.0
Group Red. Height (H) :	0.0
Group Red. Sum WHH :	0.0
Largest Distance :	0.0



26.09.2016

Meredit brzina V10