
UNIVERZITET U BEOGRADU
MAŠINSKI FAKULTET

Srđa Lj. Perković

**ANALIZA UTICAJA PROMENLJIVOG I UDARNOG
OPTEREĆENJA NA PONAŠANJE ZAVARENIH
ČELIČNIH KONSTRUKCIJA IZRAĐENIH OD SUPER
DUPEKS ČELIKA**

doktorska disertacija

Beograd, 2023.

**UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Srđa Lj. Perković

**ANALYSIS OF DYNAMIC AND IMPACT LOADS
INFLUENCE ON WELDED STEEL STRUCTURES
MADE OF SUPER DUPLEX STAINLESS STEEL**

doctoral dissertation

Belgrade, 2023.

Mentor:

dr Zoran Radaković, redovni profesor
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Članovi komisije:

dr Zoran Radaković, redovni profesor
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Miloš Đukić, redovni profesor
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Radica Prokić-Cvetković, redovni profesor
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Aleksandar Sedmak, profesor emeritus
Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

dr Simon Sedmak, naučni saradnik
Inovacioni centar mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Datum odbrane:

PREDGOVOR

Želeo bih da se zahvalim svima koji su pomagali u izradi ove doktorske disertacije, a prvenstveno dr Zijahu Burziću, prijatelju i mentoru, koji mi je otvorio vrata tehnologije materijala i uputio me u svet metalurgije, bez čije inicijative i profesionalne radoznalosti ovo istraživanje, a i mnoga druga ne bi bila započeta.

Veliku zahvalnost dugujem profesoru emeritusu dr Aleksandru Sedmaku i dr Ljubici Radović pre svega na ogromnoj pozitivnoj energiji koju su mi ulivali tokom ovog procesa, a zatim, i na svom znanju i iskustvu koje su mi nesebično pružili.

Zahvaljujem se svim kolegama iz Vojnotehničkog instituta koji su mi pružali pomoć tokom rada na ovoj disertaciji i onima koji su imali razumevanja za moje potrebe tokom rada na ovom istraživanju, a posebno onima koji su mi stalno davali moralnu podršku, bez koje bi bilo teško postići ovaj rezultat.

Kolegama iz Inovacionog centra Mašinskog fakulteta veliko hvala što su mi pružili oazu za rad uz stručnu, tehničku i logističku podršku oko izrade ove disertacije.

Porodici i roditeljima hvala za razumevanje i podršku tokom prethodnih godina, a posebno hvala prijateljima koji su verovali u mene i bodrili me da ne odustanem.

ANALIZA UTICAJA PROMENLJIVOG I UDARNOG OPTEREĆENJA NA PONAŠANJE ZAVARENIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJA IZRAĐENIH OD SUPER DUPLEKS ČELIKA

REZIME

Tema ove doktorske disertacije je analiza mogućnosti upotrebe superdupleks nerđajućeg čelika S32750 za zavarene konstrukcije koje tokom eksploatacije mogu biti izložene niskim temperaturama do $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, kao i uticaj udarnog i promenljivog opterećenja na zavarene spojeve i na njihov integritet i vek. Za jednu vrstu dodatnog materijala i postupak zavarivanja koji su primenjeni na spajanje ploča dupleks čelika S32750, ispitan je dobijeni zavareni spoj analizom mikrostrukture i makrostrukture, hemijskog sastava i mehaničkih karakteristika, uključujući ispitivanja i detaljnu analizu ponašanja pri udarnom i promenljivom opterećenju, za tri zone spoja OM, MŠ i ZUT. Pri tome su poređeni rezultati analiza i razmatran je uticaj zavarenog spoja na integritet i vek cele konstrukcije u odnosu na osnovni metal, kao i ponašanje tog spoja kada je izložen udarnom i promenljivom opterećenju.

Ovim istraživanjem se pored slike o ponašanju super dupleks čelika S32750 dobija slika o ponašanju zavarenog spoja i to pored standardne sobne temperature ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) i na spektru niskih temperatura $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovim se proširuju dosadašnja istraživanja koja su uglavnom tretirala upotrebu ovog tipa čelika, ali na visokim temperaturama.

Na osnovu prikazanih analiza su uočene pojave kojima se potvrđuje izbor super dupleks čelika S32750 kao odgovarajućeg za njegove osnovne namene, a uz to se potvrđuje i izbor dodatnog materijala, metoda i parametara zavarivanja kao pogodnih za ovaj čelik. Osim navedenog dobijeni su i rezultati koji upućuju na ograničenja upotrebe zavarenih konstrukcija od čelika S32750, kao što je radna temperatura iznad $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dodatne ograničenja su u vezi integriteta i veka, u oba slučaja zbog zavarenih spojeva, odnosno heterogenosti mikrostrukture ZUT i MŠ i njihovih svojstava otpornosti na nastanak i rast prslina.

KLJUČNE REČI

Super dupleks čelik S32750, zavareni spojevi, udarno i ciklično opterećenje, integritet i vek konstrukcije, udarna žilavost, energije nastanka i rasta prsline.

Naučna oblast: Tehničke nauke – Mašinsko inženjerstvo.

Uža naučna oblast: Tehnologija materijala, mehanika loma

UDK: 621.791.052:669.15(043.3)

ANALYSIS OF DYNAMIC AND IMPACT LOADS INFLUENCE ON WELDED STEEL STRUCTURES MADE OF SUPER DUPLEX STAINLESS STEEL

ABSTRACT

The topic of this doctoral dissertation is the analysis of the possibility of using superduplex stainless steel S32750 for welded constructions that may be exposed to low temperatures up to $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ during operation, as well as the impact of impact and variable loads on welded joints on their integrity and life. For one type of additional material and welding procedure applied to the joining of S32750 duplex steel plates, the obtained welded joint was tested by analysing microstructure and macrostructure, chemical composition and mechanical characteristics, including tests and detailed analysis of the behaviour under impact and variable loading, for three joint zones BM, WM and HAZ. In doing so, the results of the analyses were compared and the influence of the welded joint on the integrity and life of the entire structure in relation to the base metal was considered, as well as the behaviour of that joint when exposed to impact and variable loads.

With this research, in addition to the view of the behaviour of the super duplex steel S32750, a view of the behaviour of the welded joint is obtained at the standard room temperature ($+20^{\circ}\text{C}$) and at the spectrum of low temperatures $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. This expands previous research that mostly dealt with the use of this type of steel, but at high temperatures.

Based on the presented analyses, phenomena were observed that confirm the choice of super duplex steel S32750 as appropriate for its basic purposes, and also confirm the choice of additional material, methods and welding parameters as suitable for this steel. In addition to the above, results were also obtained that point to the limitations of the use of welded structures made of S32750 steel, such as the operating temperature above $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Additional limitations are related to integrity and life, in both cases due to welded joints, i.e. the heterogeneity of the microstructure of HAZ and WM and their properties of resistance to the initiation and growth of cracks.

KEYWORDS

Super duplex steel S32750, welded joints, impact and cyclic loading, structural integrity and life, impact toughness, energy for crack initiation and growth

Scientific Field: Technical Sciences – Mechanical Engineering.

Subfield: Materials science, Fracture Mechanics

UDK: 621.791.052:669.15(043.3)

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Uvodna razmatranja	1
1.2	Tema istraživanja	3
1.3	Polazne hipoteze	5
1.4	Naučne metode istraživanja	6
1.5	Opis poglavlja disertacije	6
2	Pregled literature	8
2.1	Istorijat dupleks čelika	8
2.2	Savremena razmatranja problematike dupleks čelika	8
3	Osnove mehanike loma	16
4	Dupleks čelici	23
4.1	Uvodni deo	23
4.2	Postupak zavarivanja	24
5	Metode ispitivanja	27
5.1	Ispitivanje hemijskog sastava	27
5.2	Makro i mikrostruktura	27
5.3	Merenje tvrdoće	27
5.4	Ispitivanje zatezanjem	28
5.5	Ispitivanje udarne žilavosti	30
5.5.1	Ispitivanje prelazne temperature	32
5.5.2	Ispitivanje udarne žilavosti na spektru temperatura	32
5.5.3	Ispitivanje udarne žilavosti epruveta sa zamornom prslinom	34
5.6	Fraktografija	37
5.7	Ispitivanje parametara rasta zamorne prsline	37
6	Rezultati ispitivanja	39
6.1	Rezultati hemijskog sastava	39
6.2	Pregled makro i mikrostrukture	39
6.3	Merenje tvrdoće	41
6.4	Rezultati ispitivanja zatezanjem	42
6.5	Rezultati ispitivanja udarne žilavosti	45
6.5.1	Rezultati ispitivanja prelazne temperature	45
6.5.2	Rezultati merenja udarne žilavosti	46
6.6	Pregled fraktografije	68

6.7	Rezultati ispitivanja parametara rasta zamorne prsline zavarenog spoja	73
7	Obrada i diskusija rezultata	78
7.1	Analiza sastava	78
7.2	Diskusija makro i mikrostrukture	78
7.3	Diskusija tvrdoće	79
7.4	Diskusija ispitivanja zatezanjem	80
7.5	Analiza rezultata udarne žilavosti	81
7.6	Diskusija fraktografije	96
7.7	Ispitivanje parametara rasta zamorne prsline OM	98
8	Zaključci	100
	Literatura	103

Spisak korišćenih skraćenica i oznaka

a	zbir mašinski unete prsline i zamorne prsline na epruveti
a_0	inicijalna dužina zamorne prsline na epruveti
A_5	izduženje pri lomu zatezanjem (podrazumena samo plastično izduženje)
A, A_{tot}	ukupna energija udara
A_i	energija nastanka prsline
A_p	energija rasta prsline
Δa	prirast dužine prsline
CMOD	otvaranje usta prsline (eng. Crack Mouth Opening Displacement)
da/dN	brzina rasta zamorne prsline
F	sila
ΔK	opseg K -faktora (opseg faktora intenziteta napona)
ΔK_{th}	prag zamora
B	debljina epruvete
DSS	nerđajući dupleks čelik (eng. Duplex Stainless Steel)
E	Jangov modul elastičnosti
EPML	elasto-plastična mehanika loma
HB	tvrdoća po Brinelu
HRC	tvrdoća po Rokvelu tip C
HV	tvrdoća po Vickersu
IBR	Ispitivanje Bez Razaranja, eng. NDT – Non Destructive Testing
J -integral	Rajsov konturni integral oko vrha prsline
K	faktor intenziteta napona
K_c	kritična vrednost faktora intenziteta napona
K_{Ic}	kritična vrednost faktora intenziteta napona u uslovima ravnog stanja deformacija
KV	udarna žilavost
LEML	linearno-elastična mehanika loma
LS	linija stapanja
MKE	metod konačnih elemenata
MŠ	metal šava
OES	optička emisiona spektrografija
OM	osnovni metal
R_m	zatezna čvrstoća
$R_{p0,2}$	konvencionalni napon tečenja
RSD	ravno stanje deformacija
RSN	ravno stanje napona
SDSS	nerđajući super dupleks čelik (eng. Super Duplex Stainless Steel)
SEM	skenirajući elektronski mikroskop (eng. Scanning Electron Microscope)
$\sigma_{0,2}$	konvencionalni napon tečenja
σ_f	napon loma
σ_F	napon ojačanja
σ_u	zatezna čvrstoća
σ_Y	napon tečenja
σ_v	zatezna čvrstoća

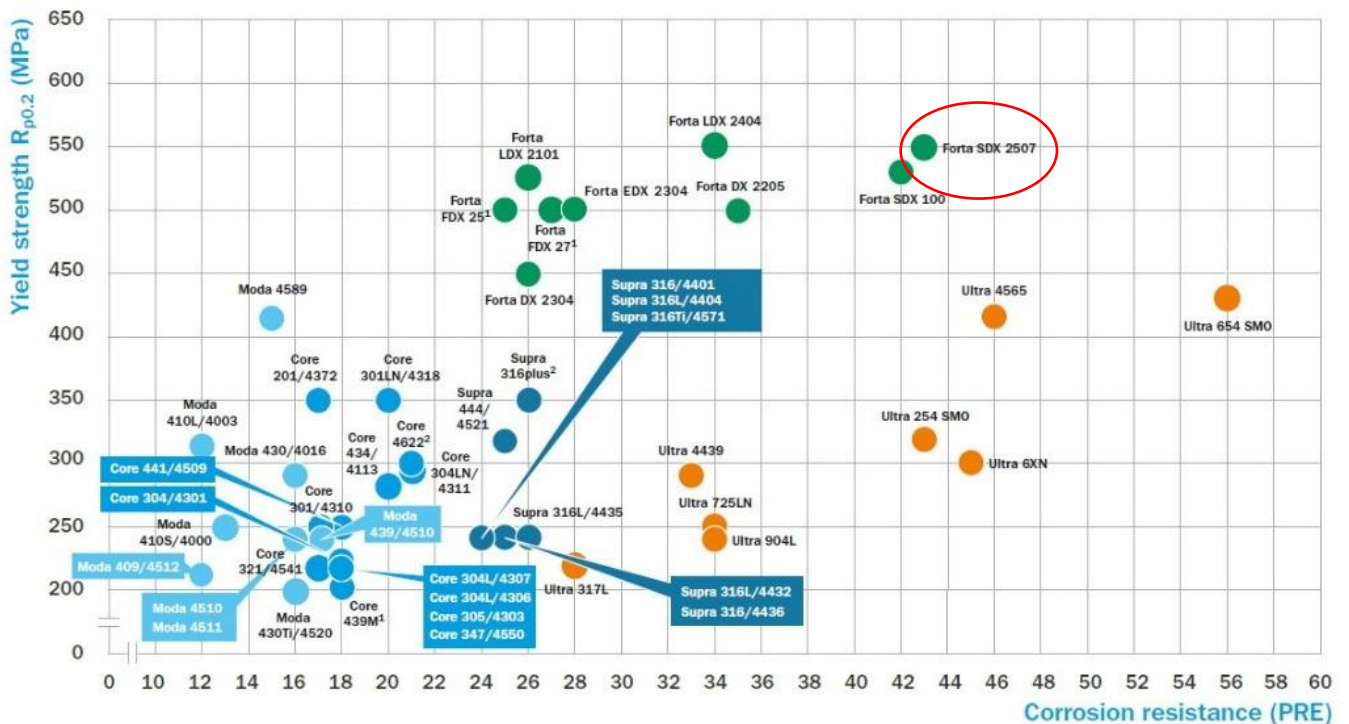
T	temperatura
T_p	prelazna temperatura
t	vreme
TPB	savijanje u tri tačke (eng. Tree Point Bending)
v	brzina zadavanja opterećenja – brzina deformacije
W	efektivna širina ispitivane epruvete
ZUT	zona uticaja toplote

1 Uvod

1.1 Uvodna razmatranja

Inspiracija za razmatranje ove teme je nastala tokom redovnih aktivnosti praćenja vazduhoplova u eksploataciji, remonta i izrade rezervnih delova. Primećen je problem pouzdanosti i kvaliteta elemenata hidrauličke instalacije, odnosno obezbeđivanja kvalitetnih odgovarajućih materijala i procedura za njihovu izradu. Jedno od mogućih rešenja problema je upotreba drugih materijala. Standardni materijali u vazduhoplovstvu su za potrebe elemenata koji su izloženi agresivnim uticajima obuhvatali uglavnom nerđajuće austenitne čelike sa dodatkom nikla.

Osnovni zahtevi po pitanju karakteristika materijala su visoka čvrstoća i otpornost na zamor, dobra otpornost na koroziju, široki opseg radnih temperatura, dobra zavarljivost, itd. Tokom potrage za zamenskim materijalom dupleks čelici su se nametnuli kao logičan izbor svojim mehaničkim karakteristikama, otpornošću na agresivnu sredinu i zavarljivošću, što je omogućilo pojednostavljenje tehnologije izrade delova kao i naknadne reparacije. [1] Na Slici 1.1 je prikazan dijagram odnosa granice tečenja i otpornosti na koroziju za više nerđajućih čelika iz ponude jednog od proizvođača.



Slika 1.1: Pozicija više vrsta nerđajućih čelika po odnosu granice tečenja i otpornosti na koroziju (izvor: Outokumpu – proizvođač nerđajućih čelika) [2]

Prema priloženom dijagramu najpoželjni čelici bi se nalazili u gornjem desnom delu, čime bi imali visoku čvrstoću i dobru otpornost na koroziju. Upravo taj deo dijagrama je slabo popunjen za razliku od donjeg levog dela dijagrama koji na raspolaganju ima veliki izbor čelika, tako da je po osnovu dve izabrane karakteristike izbor već sužen, a ostaje samo da se ispituju ostale zahtevane osobine izabranog čelika (zaokruženog crvenim na Slici 1.1).

1.2 Tema istraživanja

Predmet doktorske disertacije u osnovi je analiza uticaja promenljivog i udarnog opterećenja na procenu integriteta i preostalog radnog veka zavarenih čeličnih konstrukcija izrađenih od super dupleks čelika S32750, prema UNS standardu, ili W.Nr. 1.4410, prema EN standardu, ili X2CrNiMoN25-7-4 po ISO standardu, koji može nositi i trgovačku oznaku 2507. Ova vrsta materijala je prevashodno namenjena za visoko odgovorne dinamički opterećene konstrukcijske elemente u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, a u novije vreme može naći značajnu primenu i u vazduhoplovstvu, posebno kod izrade hidroinstalacija. Po dobijanju rezultata ispitivanja, uslediće analiza uticaja prisustva grešaka tipa prsline, na ponašanje osnovnog materijala i komponenata zavarenog spoja, predviđenih za rad u uslovima delovanja promenljivog i udarnog opterećenja, a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka konstrukcije, odnosno revitalizacije i produženja radnog veka.

Opšte je poznato da su mašinske konstrukcije u eksploataciji dominantno izložene delovanju promenljivog opterećenja, a problem se dodatno usložnjava prisustvom zavarenog spoja i mogućim i realno verovatnim prisustvom grešaka tipa prsline. U slučaju postojanja oštećenja, potrebno je precizno proceniti integritet konstrukcije i doneti odluku o njenoj daljoj eksploataciji. Zbog toga je porastao značaj procene integriteta i produženja radnog veka, kao i revitalizacije, kao načina da se starije mašinske konstrukcije zadrže u eksploataciji.

Kao polazni podatak o primenljivosti konstrukcijskih materijala i zavarenih spojeva služe karakteristike, koje se dobijaju zateznim ispitivanjem (napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje pri lomu), a one su i osnova za konstrukciju delova. Ove karakteristike opisuju globalno mehaničko ponašanje materijala, koje se dobija ispitivanjem glatkih epruveta. Dopunski podaci o ponašanju materijala se dobijaju udarnim ispitivanjem - energija loma epruvete sa zarezom. Ona predstavlja lokalno ponašanje materijala, uslovljeno postojanjem koncentracije napona u vidu zareza. Kod udarnih ispitivanja mogućnost razdvajanja ukupne energije udara na energiju stvaranja i energiju rasta prsline (loma) unela je novi pristup u proceni ponašanja materijala.

Za eksploatacijsku sigurnost konstrukcije, zbog pojave plastične deformacije na lokalnom nivou, najvažnije su mikromehaničke karakteristike, koje opisuju pojavu i rast prsline pod uticajem promenljivog opterećenja. Pojavu zamornih prsline na konstrukcijski glatkim i homogenim oblicima usled lokalne koncentracije napona na neizbežnim konstrukcijskim prelazima i promenama poprečnih preseka još uvek nije moguće opisati nekim jednostavnim zavisnostima opterećenja, napona, karakteristika materijala i veličine poprečnog preseka, pa se koriste empirijski izvedene zavisnosti, po pravilu uslovljene obimnim eksperimentalnim i laboratorijskim ispitivanjima.

Danas postoje dve opšte prihvaćene metode za određivanje zamornog veka inženjerskih konstrukcija. Tradicionalni, S-N pristup, korišćen već dugi niz godina, zasnovan je na eksperimentalnom određivanju zavisnosti amplitude napona od broja ciklusa do loma. Opšte prihvaćena karakteristika u tom slučaju je zamorna čvrstoća, koja određuje nivo napona pri kome ne dolazi do pojave prsline. U skladu sa tim, projektovanje konstrukcijskih delova na osnovu mogućeg zamora materijala zasnovano je na korišćenju zamorne čvrstoće i iskustvenim preporukama, izvedenim iz analize otkaza delova u

eksploataciji i obimnih ispitivanja. Pojava zamorne prsline uslovljava da se dalje ponašanje materijala oko vrha prsline razmatra na osnovu mikromehaničkog aspekta umesto globalnog aspekta, koji je primenljiv na glatke i homogene konstrukcijske oblike delova.

Drugi, noviji i složeniji metod odnosi se na upotrebu parametara mehanike loma, zasnovana na različitim modelima zamornog rasta prsline i delovanja impulsnog opterećenja na materijal koji u sebi sadrži grešku tipa prsline. Jedna od glavnih prednosti ovog pristupa je korišćenje vrlo malih epruveta, i mogućnost određivanja preostalog veka delimično polomljenih komada ili oštećene konstrukcije.

Prvi model, zasnovan na linearno elastičnoj mehanici loma (LEML), potiče od Parisovog rada iz 1962. godine, i još je u širokoj primeni. Parisov zakon rasta prsline, koji uspostavlja zavisnost delujućeg promenljivog opterećenja, odnosno njegovog opsega i odgovarajućeg opsega faktora intenziteta napona, i rasta prsline po ciklusu, je danas opšte prihvaćen, jer načelno opisuje mikromehaničko ponašanje rastuće prsline. Međutim, veliki broj uticajnih faktora mikromehaničkog aspekta čini zakon Parisa nedovoljno detaljnim, što je dovelo do razvoja velikog broja zavisnosti, uglavnom iskustvenim proširenjem Parisove jednačine. Ovo ukazuje na to da mikromehanički aspekt ponašanja materijala, odnosno inicijacija i rast prsline, još uvek nisu potpuno proučeni. Tome u prilog govori i mikromehanička karakteristika materijala, nazvana prag zamora, čijom se veličinom opisuje nivo opsega opterećenja, odnosno, opsega faktora intenziteta napona, pri kojem nema rasta postojeće prsline. Ova karakteristika ukazuje na područje u kojem zakon Parisa ne važi, pa tada treba tražiti druge zavisnosti u okviru mikromehaničkog aspekta, s obzirom da singularitet na vrhu prsline već postoji.

Drugi, savremeniji model spada u kategoriju elastoplastične mehanike loma (EPML) gde se suština ispitivanja materijala zasniva na određivanju energije udara. Ta metoda je u današnjoj primeni, dobila nove prilaze i nove poglede i razmišljanja. Pri određivanju energije udara, kao novi prilaz se pojavljuje instrumentiranje, a novi pogledi i razmišljanja pripadaju mehanici loma, odnosno, delovanju impulsnog (udarnog) opterećenja na materijal, koji u sebi sadrži grešku tipa prsline.

Prikupljena saznanja o rastu zamorne prsline bi omogućila da se sa dovoljnom sigurnošću, utvrdi preostali vek komponente sa prslinom i na taj način proceni da li komponenta može da radi do sledeće kontrole. U skladu sa tim, čak i najodgovornije komponente se ne zamenjuju pre nego što se redovnim kontrolama otkriju prsline ili slične greške.

Značaj ovih istraživanja posebno dobija na težini imajući na umu aktuelne trendove revitalizacije zavarenih konstrukcija, a o čemu danas piše više eminentnih naučnih radnika iz Evrope i sveta. Zbog toga se u novije vreme velika pažnja poklanja ispitivanjima materijala namenjenih za rad u uslovima delovanja promenljivog i udarnog opterećenja, ispitivanju samih konstrukcija, a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka korišćenja.

Osnovni naučni cilj istraživanja u okviru ove disertacije je da se na osnovu izvršenih mehaničko eksploatacijskih ispitivanja, a pre svega udarnim ispitivanjima epruveta sa prslinom, korišćenjem tzv. „Crack Intensity“ metode, izvrši izbor kriterijuma prihvatljivosti grešaka u osnovnom materijalu i komponentama zavarenog spoja, što predstavlja osnovni uslov za pouzdanu procenu integriteta i preostalog veka zavarene čelične konstrukcije u toku eksploatacije. Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja biće analiziran uticaj eksploatacionih uslova na ponašanje osnovnog materijala i zavarenog spoja super dupleks

čelika, pri delovanju promenljivog i udarnog opterećenja, i dat praktičan doprinos poboljšanju kvaliteta zavarenih spojeva, a sve u cilju revitalizacije i produženja radnog veka vitalnih komponenata zavarenih konstrukcija.

1.3 Polazne hipoteze

Za savremene zavarene konstrukcije postavljaju se sve strožiji zahtevi u pogledu nivoa sigurnosti u eksploataciji i otpornosti prema lomu, naročito kod visokolegiranih čelika u koji spada i super dupleks čelik S32750. Za razvoj novih, ali i za bezbednu eksploataciju postojećih zavarenih konstrukcija, neophodno je znati njihovo ponašanje u zoni koncentracije napona (zavareni spoj je najveća koncentracija napona na zavarenoj konstrukciji), kao i u prisustvu greške tipa prsline.

Osnovna hipoteza od koje se polazi u predlogu disertacije je da kod zavarenih konstrukcija izrađenih od super dupleks čelika izloženih promenljivom i udarnom opterećenju, problemi u eksploataciji se po pravilu javljaju u zavarenim spojevima, odnosno, u komponentama zavarenih spojeva, metalu šava (MŠ) i zoni uticaja toplote (ZUT). Analizu ovakvog problema otežava heterogenost strukturnih i mehaničkih osobina pojedinih područja zavarenih spojeva i njihovo ponašanje u eksploataciji. Ovi problemi nameću da se da odgovor, u kakvom je stanju osnovni materijal komponente zavarenog spoja i sama konstrukcija nakon dugogodišnje eksploatacije, i da li je na osnovu obimnih eksperimentalnih istraživanja moguće dati proceduru kojom se može izvršiti procena integriteta i preostalog veka korišćenja zavarene konstrukcije, namenjene za rad u uslovima delovanja promenljivog i udarnog opterećenja.

Da bi se do rešenja došlo postavljaju se sledeće hipoteze:

- Moguće je postaviti metodološke osnove za izradu i ocenu integriteta zavarenih konstrukcija izrađenih od super dupleks čelika S32750. Dobijeni eksperimentalni rezultati istraživanja u okviru ovog rada mogu se praktično primeniti i postati solidna osnova za izradu i eksploataciju zavarenih konstrukcija, prvenstveno namenjenih za eksploataciju u uslovima delovanja promenljivog i udarnog opterećenja.
- Da bi se obezbedila sigurnost zavarenih komponenata, potrebno je razjasniti njihovo ponašanje u prisustvu greške tipa prsline (brzina rasta zamorne prsline da/dN , i prag zamora ΔK_{th}), kao i ponašanje pri delovanju udarnog (impulsnog) opterećenja na delove koji u sebi sadrže koncentraciju napona tipa zarez. Problem delovanja promenljivog i impulsnog opterećenja u prisustvu greške tipa prsline treba razmatrati sa teorijskog i eksperimentalnog aspekta, imajući u vidu veliki broj istovremeno delujućih faktora. Poznavanje ovih karakteristika materijala i komponenata zavarenog spoja, treba da kao konačno rešenje, da veću sigurnost od pojave loma, kao i manju masu ugrađenog materijala u konstrukciju.

Poznavanje statičkih i dinamičkih parametara mehanike loma, odnosno, mogućnosti primene parametara prsline u oceni integriteta zavarene konstrukcije, u konačnoj varijanti treba da omogući definisanje optimalnih parametara kao što su izbor odgovarajućeg materijala i tehnologije zavarivanja za izradu novih zavarenih konstrukcija.

Na osnovu predstavljenog predmeta, cilja, kao i metoda istraživanja i ispitivanja, očekuje se da osnovni doprinos ove disertacije bude u osvajanju i uvođenju nove metode određivanja parametara mehanike loma ("Crack Intensity" metode), implementaciji izvedenih istraživanja, kao i u definisanju osnovnih parametara i kriterijuma prihvatljivosti, koji će omogućiti sigurnost u eksploataciji zavarenih konstrukcija za rad u uslovima delovanja promenljivog i udarnog opterećenja.

1.4 Naučne metode istraživanja

Osnovne metode u toku istraživanja odnose se na teorijske, numeričke i eksperimentalne, gde je predviđeno istraživanje uticaja delovanja promenljivog i udarnog opterećenja na promenu mehaničko-eksploatacijskih i strukturnih svojstava osnovnog materijala i komponenti zavarenog spoja, izrađenog od super dupleks čelika S32750.

Polazna osnova za ove metode istraživanja su već postojeći postupci za procenu integriteta i preostalog veka konstrukcije, koji će se dopuniti eksploatacionim ispitivanjima, a sve u cilju revitalizacije i produženja radnog veka vitalnih komponenata zavarenih mašinskih konstrukcija izrađenih od dupleks čelika.

1.5 Opis poglavlja disertacije

Pored uvodnih razmatranja, obrazloženja ideje i inspiracije za izradu ove disertacije i opisa primenjenih naučnih metoda u ovoj studiji koji su predstavljeni u prvoj glavi, ova doktorska disertacija je podeljena u ukupno osam logičkih glava koji se nadovezuju i dopunjuju jedna drugu.

U drugom poglavlju je prikazan pregled literature koja se bavi kako opštom problematikom dupleks čelika tako i dosadašnjim istraživanjima koja tretiraju zavarene spojeve duplaks čelika i njihovo ponašanje u različitim uslovima eksploatacije. Pored navedenog razmatrana je i literatura koja se bavi metodologijom procene integriteta zavarenih konstrukcija.

U trećem poglavlju su prikazane osnove mehanike loma koja predstavlja temelj za sva dalja ispitivanja, analize i ocene, kako materijala tako i zavarenih spojeva. Pored definisanja pojmova, u ovom poglavlju su i ukratko opisani i standardi po kojima su vršena ispitivanja i analizirani rezultati.

Četvrto poglavlje daje osnovne informacije i karakteristike o dupleks čeliku S32750, kao osnovnom materijalu, i o dodatnom materijalu koji je korišćen u procesu zavarivanja.

Takođe je, u ovom poglavlju opisan i postupak zavarivanja, a zatim i metodologija dalje pripreme standardizovanih uzoraka – epruveta, a sve u cilju priprema za ispitivanje.

Peto poglavlje definiše metode ispitivanja i merenja uz kratke opise postupaka koji su bili deo priprema za ispitivanje. U ovom poglavlju je navedena aparatura i uređaji koji su bili korišćeni za ispitivanje.

U šestom poglavlju su predstavljeni rezultati ispitivanja i merenja koja su vršena na samom materijalu i zavarenom spoju, počevši od hemijske analize, snimaka, preko merenja tvrdoće i karakteristika materijala zatezanjem, pa do ispitivanja udarne žilavosti na instrumentiranom Šarpijevom klatnu i ispitivanja brzine rasta prsline usled promenljivog opterećenja. Svi rezultati ispitivanja su prikazani tabelarno i dijagramima, u pokušaju da njihov prikaz bude što sistematičniji i podaci uporedljivi na očigledan način, a sve u cilju dalje lakše analize. U ovom poglavlju su takođe dati i mikroskopski prikazi prelomnih površina dobijenih stereo mikroskopom i skenirajućim elektronskim mikroskopom.

U sedmom poglavlju je izvršena analiza dobijenih rezultata svih ispitivanja uz primenu kriterijuma definisanih u prethodno navedenim standardima.

Osmo poglavlje daje zaključke ove studije na osnovu analiza rezultata obrađenih u prethodnom poglavlju.

2 Pregled literature

2.1 Istorijat dupleks čelika

Nerđajući čelici su razvijani tokom prvih decenija dvadesetog veka i Britaniji i Nemačkoj. Najranije vrste su bili martenzitno feritni Fe-Cr čelici, ali su ubrzo austenitni Fe-Cr-Ni čelici postali dominantni. Rast austenitnih čelika se zasnivao na njihovoj lakoj proizvodnji, obradi i naročito zavarljivosti. Rat u Koreji (1950.-1951) je prouzrokovao manjak nikla na međunarodnom tržištu, što je dovelo do daljeg istraživanja dupleks čelika sa relativno niskim sadržajem nikla. Tokom kasnih 1960-ih i ranih 1970-ih su dva faktora ubrzala razvoj i upotrebu dupleks čelika. Kao prvo se pojavila još jedna nestašica nikla zbog koje su skočile cene austenitnih čelika, kombinovano sa povećanom aktivnošću vađenja nafte pomoću morskih bušotina, što je zahtevalo nerđajuće materijale otporne na agresivno okruženje. Kao drugo, tehnologija proizvodnje čelika je značajno napredovala. Noviji razvoj je označio uvod u treću generaciju dupleks čelika, što ukazuje na to da je uspostavljena metalurgija proizvodnje i zavarivanja.[1] Trenutna geopolitička i makroekonomska dešavanja, sa skokom cena Mg i Ni ponavljaju događaje iz prošlosti što ukazuje na mogući ponovni rast popularnosti duplaks čelika, čija je prednost što sadrže za oko 50% manju količinu nikla od austenitnih čelika. U prilog ovome govori podatak da je do 2030. godine očekivan porast potražnje nikla za 65% (izvor: IEA – International Energy Agency), što neće biti praćeno porastom proizvodnje, pa će najverovatnije uticati na skok vrednosti ove sirovine.

2.2 Savremena razmatranja problematike dupleks čelika

Po pravilu dupleks nerđajući čelici imaju dobru čvrstoću i otpornost prema koroziji. Njihova primena je porasla u industriji usled zahteva za dužim vekom u teškim uslovima sredine. Ponašanje zamornog rasta prslina u zoni uticaja toplote (ZUT) zavarenog spoja je proučeno u radu [3]. Autori dobijaju mnogo brži rast prslina u ZUT kod super dupleks čelika u odnosu na osnovni materijal. Ispitivanje zamora je obavljeno akustičnom emisijom u režimu vremenske frekvencije.

Skup tehnologija zavarivanja sa obradom komercijalnih označavanja dupleks ili super dupleks čelika, sa aspekta metalurških osobina (fazni dijagrami, mikrostruktura, sadržaj ferita, termička obrada i starenje) je obrađeno u radu [4].

Ispitivanja u uslovima temperature, napona, i sredine sa niskim pH, visokim sadržajem hlorida i H₂S, razaranje super dupleks čelika je moguće razvojem prslina pod uticajem sredine, [6]. Uzorci čelika tipa UNS S32750 su podvrgnuti kritičnim uslovima sredine, sa izazivanjem prslina usled naponske korozije. Analizirani su rezultati statičkih ispitivanja zatezanjem i savijanjem u 4 tačke u sličnim uslovima, a dobijene prsline pokazale su različito ponašanje parametara mehanike loma, što je dopunski istražuje optičkom i

skening elektronskom mikroskopijom. Mehanizmi oštećenja super dupleks čelika zavise od sredine (u ovom slučaju H_2S), gde se javlja vodonična krtost, a i od metode ispitivanja, sa izazivanjem anodnog rastvaranja ferita pri ispitivanju savijanjem u 4 tačke u sličnoj sredini.

Prsline usled naponske korozije kod austenitnog nerđajućeg čelika UNS S31603, dupleks nerđajućeg čelika UNS S32205 i super dupleks čelika UNS S32750 su istražene metodom sa kapljicama sintetičke morske vode (eng. DET - *drop evaporation test*, odnosno, ispitivanjem isparljivim kapljicama), [7]. Ovde dupleks i super dupleks čelici ne pokazuju sklonost ka pojavi prslina usled naponske korozije pri opterećenju 50% napona tečenja. Pri najvećem opterećenju (100% napona tečenja), ovaj lom je prisutan, transkristalnim napredovanjem prslina, a posebno kod super dupleks čelika, prsline napreduju duž fazne granice ferit/austenit, premda je takođe prisutan i interkristalni krti lom. Ovo su važni aspekti loma vezani za metode mehanike loma u linearno elastičnoj oblasti.

U radu [8] se izučava uticaj temperature i vremena izoternskog starenja na mikrostrukturu i mehaničke osobine rastvorno ojačanog UNS S32750 super dupleks nerđajućeg čelika (SDSS legure). Ispitivanja su obavljena metodama SEM-EBSD mikroskopijom (eng. *Scanning Electron Microscopy - Electron Backscatter Diffraction*, odnosno, skening elektronska mikroskopija - difrakcijom povratno rasejanih elektrona), zatezanjem i udarnim ispitivanjem. Analizirane su mikrostrukturne karakteristike (raspodela i morfologija konstituenata, mape raspodele modalne orijentacije zrna) i dobijene su mehaničke osobine komercijalne UNS S32750 SDSS legure nakon termičkih obrada starenjem. Termička obrada starenjem ne izaziva promene u vezi sa morfologijom faza, veličinom zrna i raspodelom modalne orijentacije zrna, a značajne promene nastaju u mehaničkim osobinama (zatezna čvrstoća, konvencionalni napon tečenja, i izduženje pri lomu) usled izdvajanja sekundarnih faza. Najuticajnija sekundarna faza je R-faza, uočena kod starenja. Ovo stanje, u odnosu na stanje posle rastvarajućeg žarenja, pokazuje smanjenje plastičnosti pre loma, kao i porast zatezne čvrstoće i napona tečenja. U radu [9] se pokazuje povećanje udela ferita uz pad sadržaja austenita sa porastom temperature rastvarajućeg žarenja. Udarna energija i piting potencijal legure UNS S32750 prvo se poboljšavaju, a zatim slabe, dok se tvrdoća ponaša suprotno, usled kombinovanih efekata raspodele hemijskih elemenata, mikrostruktura i izdvajanja precipitata. Otpornost prema koroziji i mehaničke osobine su direktno povezane sa udelom s faze. Porast temperature izaziva faznu transformaciju $g \rightarrow a$, a udeli Cr i Mo koji utiču na izdvajanje elemenata opadaju, čime se smanjuju žilavost i otpornost prema koroziji, uz porast tvrdoće. Najpovoljniji odnos a/g kod čelika UNS S32750 je bio 1:1, sa najboljim postignutim svim osobinama. Ova istraživanja daju uvid u stanje termički obrađenog čelika pre bilo kojih ispitivanja.

Mikrostruktura super dupleks nerđajućih čelika se sastoji iz dve faze, feritne (a) i austenitne (g), čime se istovremeno poboljšavaju mehaničke osobine i otpornost prema koroziji. Međutim, zavarivanje ovih čelika je kritična operacija, i stoga se određuje žilavost loma ispitivanjem kritičnog otvaranja vrha prsline (CTOD) u zavarenom spoju (na primer, standardima BS 7448-1 i BS 7448-2), sa zadatim unosom toplote, na vazduhu, i u prisustvu vodonika, [10]. Analizom mikrostrukture se određuju relevantni aspekti (a/g balans, unutar-austenitno međurastojanje i g morfologija), koji se porede sa rezultatima CTOD. Do smanjenja CTOD dolazi zbog razlika u g morfologiji, a veliko statističko rasipanje austenitnih rastojanja ukazuje na malu pouzdanost u primeni pojedinih standarda u prisustvu velike anizotropije. U ovom radu se razmatraju najbolji pristupi u proceni parametara mehanike loma kod dupleks nerđajućih čelika sa unetim vodonikom: linearno elastična mehanika loma i/ili elastoplastična mehanika loma.

Uticaj parametara zavarivanja elektronskim snopom bez primene dodatnog materijala na oblik šava, mikrostrukturu, izdvajanje sekundarnih faza kod super dupleks čelika je prikazan sa variranjem unosa toplote i istraživanjem nastalih intermetalnih faza, [11]. Legure tipa SDSS po pravilu zadržavaju svoja svojstva posle termičke obrade kontrolisanim rastvarajućim žarenjem, čime se održava sličan udeo δ ferita i austenita (γ). Svaki novi postupak termičke obrade ili zavarivanja menja udeo početnih faza ili dovodi do pojave štetne faze (na pr. s) i tada, opadaju svojstva otpornosti prema koroziji, [12]. Ovde su za ispitivanja, karakterizaciju uzoraka i određivanje prisustva s i d faza pokazale pouzdanim primenjene elektromagnetne metode: konvencionalna metoda vrtložnih struja (*Eddy Current Testing - ECT*) i vrtložnim strujama niske frekvencije sa zasićenjem (*Saturated Low Frequency Eddy Current - SLOFEC*).

U radu [13] se razmatraju problemi pri zavarivanju usled nepoželjnih osobina zone uticaja toplote (ZUT), uglavnom vezani za granični sadržaj azota. Mali sadržaj azota usporava stvaranje austenita u ZUT, što ima za posledicu previše ferita, taloženje hrom nitrida, lošu žilavost i lošu otpornost na koroziju. Neodgovarajuća količina toplote pri zavarivanju najčešće se pojavljuje zbog zahteva većeg unosa toplote. Kao rezultat, može se pojaviti talog hrom nitrida i/ili stvoriti sekundarni austenit i/ili se mogu taložiti intermetalna jedinjenja u metalu šava, izloženom ponovljenim termičkim ciklusima pri višeslojnom zavarivanju. Opet je rezultat loša žilavost i loša koroziona otpornost. Dodatni materijal sa viškom nikla zahteva više temperature da bi se rastvorila sigma faza, koja nastaje tokom zagrevanja do temperature žarenja. Rezultat može biti vrlo krt šav sa lošom korozionom otpornošću.

Dupleks nerđajući čelici, tokom poslednje decenije, su prošireni novim klasama i visokolegiranim hiperdupleksima, [14]. Većina preporuka za zavarivanje je veoma slična onima iz devedesetih. Ovaj rad govori o najsavremenijim trendovima u zavarivanju dupleks nerđajućih čelika i zasnovan je na iskustvima svetske zavarivačke asocijacije, uključujući korisnike i proizvođače čelika i potrošnog materijala za zavarivanje, kao i literaturu. U većini slučajeva postoji konsenzus o preporukama, ali razlike u praksi postoje, posebno za nove kategorije čelika gde su granice za, na pr. dozvoljeni unos toplote, manje dokumentovane.

U radu [15] su prikazani najčešći oblici korozije zavarenih spojeva: galvanska, piting, interkristalna i naponska korozija i vodonična krtost. Opisane su metode ispitivanja prikazanih oblika korozije zavarenih spojeva i dati su postupci sprečavanja korozije zavarenih spojeva, što je osnov za razumevanje uticaja korozije u opštem slučaju. Pojava metastabilnog δ ferita u strukturi dupleks nerđajućih čelika može dovesti tokom zagrevanja u proizvodnim i eksploatacionim uslovima do izdvajanja niza sekundarnih faza, što ima za posledicu heterogenizaciju strukture i pogoršanje svojstava. Stepen degradacije materijala zavisi od vrste i udela obrazovanih sekundarnih faza i poseban problem predstavlja izdvajanje s faze, koja pored toga što drastično smanjuje korozionu postojanost dovodi do pojave krtosti. Zato je važno poznavati temperaturnu oblast stabilnosti sekundarnih faza i kinetiku njihovog obrazovanja. U radu [16] je učinjen pokušaj da se utvrdi dejstvo polaznog mikrostrukturnog stanja čelika i parametara termičke obrade na proces razlaganja δ ferita, kao i međudejstvo razmatranih faktora. Pokazalo se da je δ ferit prisutan u strukturi ispitivanog čelika termodinamički nestabilan i intenzivno se razlaže na sekundarni austenit, $M_{23}C_6$ karbid i s fazu, koja je dominantna. Faktori najvećeg uticaja na izdvajanje s faze i $M_{23}C_6$ karbida nisu isti. U slučaju s faze najuticajniji faktor je vreme, dok izdvajanje karbida

pokazuje najveću zavisnost od polaznog stanja čelika. Od mogućih interakcija, najveći uticaj na izdvajanje ove faze pokazuje sadejstvo polaznog stanja i temperature zagrevanja čelika.

U radu [17] dat je pregled površinskih termohemijskih obrada dupleks i super dupleks nerđajućih čelika difuzijom, posebno nitriranjem, u periodu od proteklih nekoliko godina. Obrađena je optimizacija nitriranja u cilju poboljšanja mehaničkih osobina i otpornosti prema habanju, ali ne na uštrb antikorozivnih osobina.

U radu [18] se pažnja poklanja efektu električne struje sa Džulovom toplotom na deformaciju metala, tzv. elektroplastični efekat (EPE). Danas se ovaj efekat koristi kod tzv. procesa sa električnim asistiranim oblikovanjem (EAF), ali razumevanje ovog fenomena još uvek nije dovoljno razjašnjeno. Dupleks nerđajući čelici imaju mikrostrukturu sastavljenu iz dve faze sa vrlo različitom energijom greške u redosledu (SFE), gde je niska SFE za austenit i visoka SFE za ferit. Ispitivanja su obavljena sa raznim vrednostima gustine struje pri zatezanju, između ostalog, i kod čelika UNS S32750. Rezultati su pokazali porast uniformnog izduženja kod ispitivanja električnom strujom u odnosu na toplotu, kao i porast ukupnog izduženja, a da pritom nije došlo do promene u naponu tečenja niti u zateznoj čvrstoći. Data objašnjenja pozitivnih efekata EPE doprinose u opravdanoj primeni ove metode.

Rad [19] je nastavak istraživanja u radu [18], gde se uzorci čelika UNS S32750 podvrgavaju elektroimpulsnoj obradi sa većim gustinama struje. Ispitivanja zatezanjem, korozije, rendgenskom difrakcijom, mikrotvrdoće i zaostalih napona se obavljaju pre i posle elektroimpulsne obrade. Rezultati pokazuju porast izduženja i pad mikrotvrdoće, čime se ova metoda može primeniti za umanjenje efekata deformacionog ojačavanja, bez potrebe za termičkom obradom žarenjem u odgovarajućim pećima.

Doktorska disertacija [20] se odnosi na istraživanje zaostalih napona i njihov uticaj na mehaničke osobine dupleks nerđajućih čelika. Primenjena je simulacija metodom konačnih elemenata za promene napona u jednoj fazi sa uticajem na elastičnu i plastičnu anizotropiju pojedinih faza, i to u uslovima cikličnog opterećenja.

Doktorska disertacija [21] se odnosi na problematiku zavarivanja pancirnog čelika, zbog visokog procenta ugljenika u osnovnom materijalu, prisustva grešaka u vidu prslina i pora, koje nastaju u zoni metala šava u toku procesa zavarivanja. Prslina u metalu šava, usled dinamičkog opterećenja, lako propagira prema osetljivoj liniji stapanja, nakon čega može nastupiti njen ubrzani rast. Instrumentiranim udarnim ispitivanjem na Šarpi „V“ epruvetama se određuje iniciranje i rast prslina. Dinamička udarna ispitivanja pokazuju visoku energiju za iniciranje i propagaciju prslina u zonama metala šava i linije stapanja. Zbog velike duktilnosti u zoni metala šava i u ZUT, žilavost loma se određuje preko vrednosti J_{IC} integrala i meri se brzina rasta prslina u svim područjima. U zoni metala šava se povećava otpornost na rast prslina jer pri rastu zamorne prslina dolazi do transformacije mekanog austenita u martenzit. Zbog spore difuzije, zadržani vodonik u zoni metala šava može imati štetan uticaj i ubrzati rast prslina u ovoj po zateznim karakteristikama najslabijoj zoni.

Knjiga [5] daje sažeta osnovna saznanja o zamoru i lomu dupleks nerđajućih čelika, dok se u knjizi [1] daje objedinjen pregled ključnih radova sa bitnih konferencija o dupleks nerđajućim čelicima, uz ostala saznanja na tu temu u prvoj polovini devedesetih. Knjiga [34] predstavlja priručnik za izradu komponenata od dupleks nerđajućih čelika. Date su

praktične informacije za uspešnu primenu ovih materijala, uz pretpostavku da korisnici već imaju određena iskustva.

Kao polazni podatak o primenljivosti konstrukcijskih materijala i zavarenih spojeva služe karakteristike, koje se dobijaju zateznim ispitivanjem (napon tečenja, zatezna čvrstoća, izduženje pri lomu), a one su i osnova za konstrukciju delova. Ove karakteristike opisuju globalno mehaničko ponašanje materijala, koje se dobija ispitivanjem glatkih epruveta. Dopunski podaci o ponašanju materijala se dobijaju udarnim ispitivanjem (energija loma epruvete sa zarezom). Ona predstavlja lokalno ponašanje materijala, uslovljeno postojanjem koncentracije napona u vidu zareza. Kod udarnih ispitivanja mogućnost razdvajanja ukupne energije udara na energiju stvaranja i energiju rasta prsline (loma) unela je novi pristup u proceni ponašanja materijala.

Za eksploatacijsku sigurnost konstrukcije, zbog pojave plastične deformacije na lokalnom nivou, najvažnije su mikromehaničke karakteristike, koje opisuju pojavu i rast prsline pod uticajem promenljivog opterećenja. Pojavu zamornih prsline na konstrukcijski glatkim i homogenim oblicima usled lokalne koncentracije napona na neizbežnim konstrukcijskim prelazima i promenama poprečnih preseka još uvek nije moguće opisati nekim jednostavnim zavisnostima opterećenja, napona, karakteristika materijala i veličine poprečnog preseka, pa se koriste empirijski izvedene zavisnosti, po pravilu uslovljene obimnim eksperimentalnim i laboratorijskim ispitivanjima.

Danas postoje dve opšte prihvaćene metode za određivanje zamornog veka inženjerskih konstrukcija. Tradicionalni, S-N pristup, korišćen već dugi niz godina, zasnovan je na eksperimentalnom određivanju zavisnosti amplitude napona od broja ciklusa do loma. Opšte prihvaćena karakteristika u tom slučaju je zamorna čvrstoća, koja određuje nivo napona pri kome ne dolazi do pojave prsline. U skladu sa tim, projektovanje konstrukcijskih delova na osnovu mogućeg zamora materijala zasnovano je na korišćenju zamorne čvrstoće i iskustvenim preporukama, izvedenim iz analize otkaza delova u eksploataciji i obimnih ispitivanja. Pojava zamorne prsline uslovljava da se dalje ponašanje materijala oko vrha prsline razmatra na osnovu mikromehaničkog aspekta umesto globalnog aspekta, koji je primenljiv na glatke i homogene konstrukcijske oblike delova.

Drugi, noviji i složeniji metod odnosi se na upotrebu parametara mehanike loma, zasnovana na različitim modelima zamornog rasta prsline i delovanja impulsnog opterećenja na materijal koji u sebi sadrži grešku tipa prsline. Jedna od glavnih prednosti ovog pristupa je korišćenje vrlo malih epruveta, i mogućnost određivanja preostalog veka delimično polomljenih komada ili oštećene konstrukcije.

Prvi model, zasnovan na linearno elastičnoj mehanici loma (LEML), potiče od Parisovog rada iz 1962. godine, i još je u širokoj primeni. Parisov zakon rasta prsline, koji uspostavlja zavisnost delujućeg promenljivog opterećenja, odnosno, njegovog opsega i odgovarajućeg opsega faktora intenziteta napona, i rasta prsline po ciklusu, je danas opšte prihvaćen, jer načelno opisuje mikromehaničko ponašanje rastuće prsline. Međutim, veliki broj uticajnih faktora mikromehaničkog aspekta čini zakon Parisa nedovoljno detaljnim, što je dovelo do razvoja velikog broja zavisnosti, uglavnom iskustvenim proširenjem Parisove jednačine. Ovo ukazuje na to da mikromehanički aspekt ponašanja materijala, odnosno inicijacija i rast prsline, još uvek nisu potpuno proučeni. Tome u prilog govori i mikromehanička karakteristika materijala, nazvana prag zamora, čijom se veličinom opisuje nivo opsega opterećenja, odnosno, opsega faktora intenziteta napona, pri kojem nema rasta postojeće prsline. Ova karakteristika ukazuje na područje u kojem zakon Parisa ne važi, pa

tada treba tražiti druge zavisnosti u okviru mikromehaničkog aspekta, s obzirom da singularitet na vrhu prsline već postoji.

Drugi, savremeniji model spada u kategoriju elastoplastične mehanike loma (EPML) gde se suština ispitivanja materijala zasniva na određivanju energije udara. Ta metoda je u današnjoj primeni, dobila nove prilaze i nove poglede i razmišljanja. Pri određivanju energije udara, kao novi prilaz se pojavljuje instrumentiranje, a novi pogledi i razmišljanja pripadaju mehanici loma, odnosno, delovanju impulsnog (udarnog) opterećenja na materijal, koji u sebi sadrži grešku tipa prsline.

Prikupljena saznanja o rastu zamorne prsline bi omogućila da se sa dovoljnom sigurnošću, utvrdi preostali vek komponente sa prslinom i na taj način proceni da li komponenta može da radi do sledeće kontrole. U skladu sa tim, čak i najodgovornije komponente se ne zamenjuju pre nego što se redovnim kontrolama otkriju prsline ili slične greške.

Značaj ovih istraživanja posebno dobija na težini imajući na umu aktuelne trendove revitalizacije zavarenih konstrukcija, a o čemu danas piše više eminentnih naučnih radnika iz Evrope i sveta. Zbog toga se u novije vreme velika pažnja poklanja ispitivanjima materijala namenjenih za rad u uslovima delovanja promenljivog i udarnog opterećenja, ispitivanju samih konstrukcija, a sve u cilju procene integriteta i preostalog veka korišćenja.

Jedan od ciljeva istraživanja u okviru ove disertacije je da se na osnovu izvršenih mehaničko eksploatacijskih ispitivanja, a pre svega udarnim ispitivanjima epruveta sa prslinom, korišćenjem tzv. "Crack Intensity" metode, izvrši izbor kriterijuma prihvatljivosti grešaka u osnovnom materijalu i komponentama zavarenog spoja, što predstavlja osnovni uslov za pouzdanu procenu integriteta i preostalog veka zavarene čelične konstrukcije u toku eksploatacije. Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja biće analiziran uticaj eksploatacionih uslova na ponašanje osnovnog materijala i zavarenog spoja super dupleks čelika, pri delovanju promenljivog i udarnog opterećenja, u spektru niskih temperatura, i dat praktičan doprinos poboljšanju kvaliteta zavarenih spojeva, a sve u cilju revitalizacije i produženja radnog veka vitalnih komponenata zavarenih konstrukcija.

Udarne žilavost je jedna od najvažnijih karakteristika materijala, koju je definisao Šarpi (Charpy) pre više od 120 godina, kao ukupnu energiju koja je potrebna da dođe do loma epruvete sa zarezom jednim udarcem padajućeg klatna [21,22]. Kasnije su instrumentalizovana klatna sposobna da mere silu tokom vremena omogućila razdvajanje ukupne energije na energiju nastajanja prsline i energiju rasta prsline, kako je i opisano u [23]. Važno je napomenuti da materijali, a naročito zavareni spojevi, imaju totalno drugačije ponašanje u slučaju dominantne energije nastajanja prsline u odnosu na materijale sa dominantnom energijom rasta prsline, iako imaju iste ukupne energije [23].

Mada ne direktno, ispitivanje instrumentiranim Šarpijevim klatnom se može koristiti na polju procedura procene integriteta konstrukcije, kako je i objašnjeno u slučaju procene vrednosti udarne žilavosti, bilo kroz koncept krive „the master curve concept“ [24] ili mikro-mehaničkim modeliranjem materijala [25]. Uz navedeno, primena Šarpi ispitivanja sa V zarezom na instrumentiranom klatnu, kao alata za procenu integriteta konstrukcija je prezentovana u [22,26].

Kako je prethodno pomenuto, zavareni spojevi su od posebnog značaja kada se analizira udarna žilavost jer obe energije, za nastajanje prsline i za rast prsline, značajno variraju u slučaju heterogenog materijala koji se sastoji od osnovnog metala (OM), metala

šava (MŠ) i zone uticaja toplote (ZUT), uključujući i podzone, krupnozrnu –(eng. coarse grain - CG) i sitnozrnu (eng. fine grain - FG)) [27-29]. Prelaz iz žilavog u krt lom je drugo važno stanovište zavarenih spojeva usled njihove heterogenosti, kako je i prikazano 3D analizom epruveta za ispitivanje udarne žilavosti na Šarpijevom klatnu [30]. U slučaju dva čelika za rad na povišenim temperaturama koji su razmatrani u [28,31,32], prikazani su štetni uticaji mikrostruktura složenih zavarenih spojeva. Dva čelika su ispitana - SA 387 Gr. B and SA 387 Gr. 91, pri čemu oba pokazuju veću otpornost na nastajanje i rast prsline u ZUT-u nego u MŠ [28,31,32].

Ovde razmatramo nerđajući dupleks čelik S32750 (W. 1.4410) koji se često koristi za dinamički opterećene komponente u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, a od skorije nalazi primenu i u vazduhoplovnoj industriji. Upotreba ovog čelika je u agresivnim korozivnim sredinama pri čemu je radna temperatura ograničena maksimumom od 350 °C [33]. Dupleks legura opisuje legure kod kojih su dve faze prisutne u značajnim količinama, kao što je slučaj sa osnovnim dupleks čelicima sa feritno/austenitnom Fe-Cr-Ni legurom sa 30%-70% ferita. Tokom 1980-ih su razvijene vrste dupleks čelika koje su više legirane, kako bi podnele agresivnije sredine. Takozvane superdupleks vrste čelika sadrže oko 25% Cr, 6-7% Ni, 3-4% Mo, 0.2-0.3% N, 0-2% Cu, and 0-2% W, koa što je slučaj sa nerđajućim čelikom S32750 koji je namenjen za visoko korozivne sredine [31].

Nedavno, posebno izdanje posvećeno napretku nerđajućih dupleks čelika (DSS - duplex stainless steels) [19] je predstavilo mehaničke osobine i otpornost na koroziju u odnosu na sastav i termičku obradu, tj. mikrostrukturu, [35, 36], obuhvatajući i novitete u zavarivanju [37,38]. Poseban akcenat je dat difuznim i nedifuznim (diffusive and diffusionless) fazama transformacije koje su prouzrokovane prisustvom metastabilne austenitne faze i nestabilnošću ferita na visokim temperaturama, što potencijalno utiče na antikorozivne karakteristike i mehničke osobine.

Mikrostruktura DSS-a je takođe analizirana u odnosu na proces deformacije, obuhvatajući i elektro-plastični efekat, [39], toplu deformaciju, [40], i numeričku simulaciju napona merenih digitalnom optičkom metodom (eng. Digital image correlation - DIC) [41]. Sprovedeno je istraživanje elektro-plastičnog efekta na četiri različita nerđajuća dupleks čelika i prezentovano u [39], a karakterisano optičkom mikroskopijom, radiografijom i ispitivanjem jednoosnim zatezanjem (zatezna čvrstoća., izduženje i granica tečenja). U istraživanju predstavljenom u [18], se određuje optimalni opseg temperature deformacije uzimajući u obzir da i austenit i ferit imaju različito ponašanje pri deformaciji na povišenim temperaturama usled njihovih različitih morfoloških, fizičkih i mehničkih osobina. Lokalna raspodela napona kod dupleks čelika tokom zatezanja je dobijena digitalnom optičkom metodom (DIC), što je predstavljeno u [40], sa inverzijom eksperimenta za simuliranje nanoostećenja primenom MKE (Metoda konačnih elemenata) na austenitne i feritne faze dupleks čelika, kako bi se dobila zavisnost napon-deformacija u ove dve faze. Dalje je vršena numerička simulacija lokalnog napona i deformacije nerđajućih dupleks čelika pomoću zapreminskih elemenata i parametara materijala dobijenih inverzionom metodom [40].

Generalno gledano, S32750 dupleks nerđajući čelik ima dobru zavarljivost i visoku mehničku čvrstoću, ali njegovi zavareni spojevi još uvek nisu ispitani detaljno, naročito ako se uzme u obzir otpornost na prsline. Kao primer takvog istraživanja može se pogledati primer zavarenog spoja različitih materijala (S32750 duplks nerđajući čelik i 316L nerđajući čelik) koji je izveden pulsirajućim laserom [38]. Pokazano je da unos toplote (između 45, 90,

i 120 J/mm) ne utiče značajno na balans feritno-austenitnih faza ni na mikrotvrdoću u zoni spajanja [38].

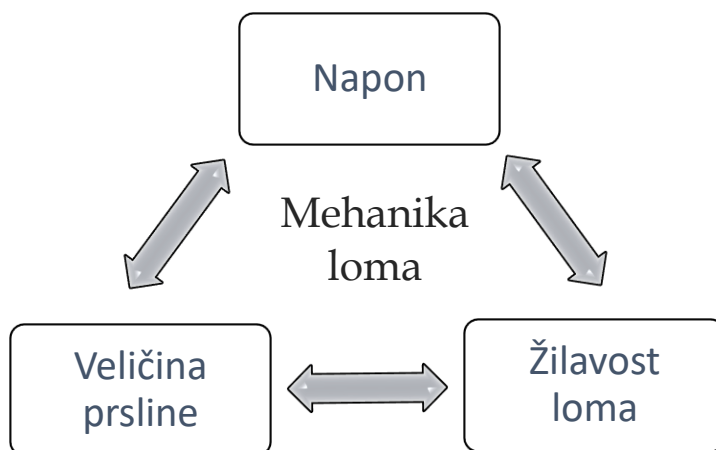
Mehaničke osobine i mikrostruktura zavarenih spojeva austenitno-feritnih dupleks nerđajućih čelika, izvedenih procesom hibridizacije (laserom i elektrodom u atmosferi inertnog gasa - TIG) i EPP (elektrolučno zavarivanje pod praškom) su predstavljeni u [41], gde je ukazano prisustvo feritno-austenitnih mikrostrukture kako u OM tako i u MŠ, a takođe i visoke zatezne čvrstoće i visoke žilavosti u obe zone, MŠ i ZUT. Slično istraživanje je izvedeno i sa laserski zavarenim spojem dupleks nerđajućeg čelika S32520, kako je prikazano u [42], u kome je pokazano da parametri procesa zavarivanja utiču na zateznu čvrstoću na složen način zbog promena u efikasnosti toplotne energije usled promene parametara. Takođe je prikazano da smanjenje čvrstoće daje zavarene spojeve sa većom žilavošću.

U početnom istraživanju, zavareni spojevi od dupleks nerđajućeg čelika S32750 su ispitani na različitim temperaturama na instrumentiranom Šarpi klatnu sa ciljem da se proceni otpornost na nastajanje i rast prsline u OM, MŠ i ZUT. Deo rezultata za OM je već objavljen u [44], gde je pokazano da je dupleks nerđajući čelik S32750 imao visoku ukupnu udarnu žilavost na svim ispitnim temperaturama. Pokazano je, takođe, da su energije rasta prsline bile znatno veće od energija nastajanja prsline na svim ispitnim temperaturama, što je povoljna raspodela energije sa aspekta integriteta konstrukcije. Stoga su izvršena dodatna testiranja zavarenih spojeva dupleks nerđajućeg čelika u cilju određivanja raspodele energije u MŠ i ZUT, što je prikazano u [45], kako bi se pokazalo da li je i u tom slučaju povoljna raspodela energija nastajanja i rasta prsline. Uz to su izvršene mikrografske i fraktografske analize, korišćenjem stereo optičkog mikroskopa i elektronskog skenirajućeg mikroskopa, na svim ispitanim uzorcima kako bi se utvrdio odnos duktilnih i krutih zona na površini loma, a time bolje objasnile izmerene vrednosti energija nastajanja i rasta prsline [45].

3 Osnove mehanike loma

Mehanika loma je naučna disciplina koja se bavi problemima prslina i njihovog uticaja na ponašanje materijala i konstrukcija. Mehanika loma (prvobitno nazvana mehanikom prslina) je počela svoj razvoj početkom XX veka radovima Inglisa o koncentraciji napona [45] i Grifita o brzini oslobađanja energije [46], a pedesetih godina Irvin je postavio temelje linearno elastične mehanike loma uvođenjem faktora intenziteta napona i njegove kritične vrednosti [47,48]. Dalji razvoj ove naučne discipline obuhvatio je njeno proširenje na elasto-plastičnu oblast analizom plastične zone ispred vrha prslina [49,50] i uvođenjem odgovarajućih parametara - otvaranja vrha prslina [51] i J integrala [52].[53]

Primena mehanike loma se u početku zasnivala na analizi parametara loma i uticajima opterećenja, geometrije dela ili konstrukcije, a zatim i geometrije prslina, uključujući svojstva samog materijala i njegovo ponašanje sa aspekta rasta prslina. Kada su svi ovi faktori povezani i zaokruženi teorijskim i empirijskim zavisnostima, postavljen je temelj za novu naučnu disciplinu nazvanu integritet konstrukcija. Prednost teorije mehanike loma je u tome što se ne mora tretirati linearno, već u zavisnosti od raspoloživih podataka u odgovarajućim fazama projektovanja, se na osnovu poznatog zavisnostima može doći do traženog. Ovo se jasnije prikazuje relacijom klasičnog trougla mehanike loma, prikazanom na Slici 3.1.



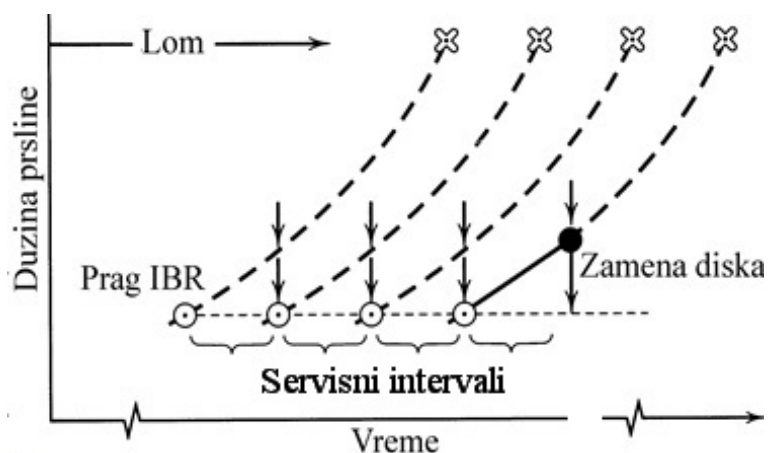
Slika 3.1: Trougao mehanike loma

Ovaj iskorak znači da dotadašnje mogućnosti ograničene na analizu lomova, odnosno njegovo veštačenje u potrazi za uzrocima, dignuto na viši nivo gde se moglo analizirati očekivano ponašanje konstrukcije. Uz razvoj MKE, koji je omogućio detaljniju analizu naponskih stanja u složenijim geometrijama mogle su se definisati kritične zone pre nastanka prslina, a zatim i izvršiti procena veka konstrukcije. Ovo je vrlo značajno za odgovorne delove koji rade u uslovima koji su pogodni za nastajanje i rast prslina kao što su izrazita dinamička opterećenja, visoke ili niske radne temperature ili njihova promena, agresivna sredina i slično.

Projektovanje konstrukcija izloženih promenljivom opterećenju, koje uzima u obzir zamor materijala se ranije oslanjalo na konzervativni pristup (tzv. „safe-life“ princip). Metodologija ovog pristupa se ogleda u tome da je konstrukcija projektovana tako da tokom planiranog životnog veka u eksploataciji ne dođe do pojave greške tipa prsline. Ovaj pristup podrazumeva konstruisanje Velerove krive i uz primenu sigurnosnih faktora se definiše vek elementa ili konstrukcije. Savremeni metodi projektovanja i analize zamora u vazduhoplovnoj industriji pored navedenog „safe life“ principa koriste i „damage tolerance“ procenu. [79] Pristup „damage tolerance“ toleriše postojanje greške tipa prsline, ali propisuje procedure za njihovu detekciju praćenje i servisiranje pre dostizanja kritične veličine. Ovaj pristup se zasniva na redovnim pregledima čiji su intervali propisani tako da se izbegene kritični otkaz, vodeći računa o tome da ne budu suviše česti jer bi se time povećali troškovi bez uticaja na povećanje bezbednosti.

Poređenjam ova dva navedena principa [80] su prikazani nedostaci „safe-life“ principa, koji se ogledaju u tome da se on zasniva na zameni elemenata, bez ikakve provere mogućnosti njihove dalje upotrebe što je uzrok visokih troškova, a bez realnog uticaja na bezbednost i integritet konstrukcije. Zamenjeni elementi, a i ostatak konstrukcije se najčešće ne kontrolišu, pa nema realne procene preostalog veka upotrebe. Čak se primenom ovog principa ne mogu proceniti korišćeni faktori sigurnosti koji mogu biti nedovoljni ili preveliki što dovodi do preteških i skupljih konstrukcija. Sa druge strane princip „damage tolerance“ ima svoju problematiku koja obuhvata definisanje servisnog intervala kao i odgovarajuće tehnologije za pregled i detekciju grešaka tipa prsline.

Primer iz prakse za prednosti u primeni „damage tolerance“ principa je prikazan u radu [79] gde je ispitivanjem tokom upotrebe 23 motora F100 (korišćenih u vazduhoplovstvu SAD uglavnom za F-15 i F16) procenjena ušteda za period od 20 godina eksploatacije motora iznosi više od 1,21 milijarde USD (ekvivalentno današnjoj vrednosti od 3,35 milijardi USD). Ova procena je zasnovana na uštedi od preko 900 miliona USD na izbegavanju nepotrebne zamene delova i na preko 300 miliona dolara u izbegnutim troškovima remonta. Studijom su bili obuhvaćeni diskovi i rotori visokog pritiska na kompresoru i turbini, a istraživanje je motivisala činjenica da je samo 1 od 1000 zamenjenih diskova (u predviđenom interval po „safe life“ pristupu) imao detektovanu grešku tipa prsline dužine 0,76 mm (0,03 inča). Grafički je ovaj primer prikazan Slikom 3.2.



Slika 3.2: Šema upotrebe kroz eksploataciju primenom principa „damage tolerance“

Kroz navedeni primer je pokazano da je moguće za elemente sa poznatom geometrijom produžiti očekivani vek upotrebe; i na kraju omogućava znatne uštede u eksploataciji jer se odgovorni delovi ne moraju menjati po isteku fiksnog perioda, već se može preći na „održavanje po stanju“ gde se redovnim pregledima utvrđuje stanje, a čak i u slučaju postojanja prsline, koja je manja od kritične, dozvoljena je dalja upotreba elementa, pod uslovom da je ocenjen preostali vek duži od planiranog perioda do naredne kontrole ili remonta. Ovakav pristup, naravno ne bi bilo moguće primeniti bez intenzivnog razvoja ispitivanja bez razaranja (IBR, eng. NDT – Non-Destructive Testing).

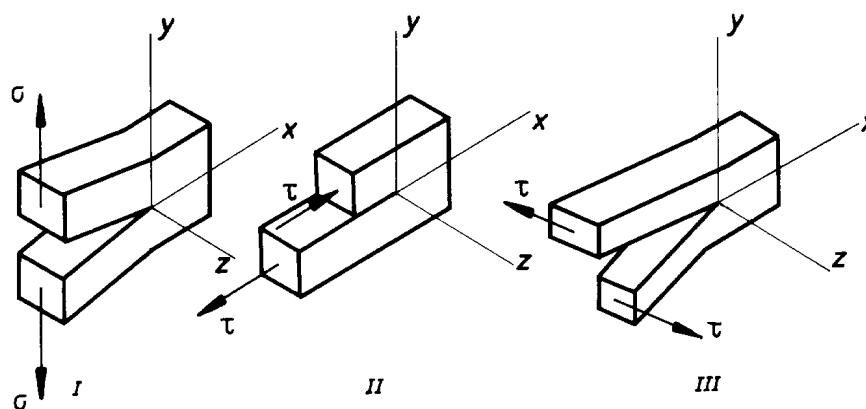
Očigledna je uloga mehanike loma koja oslanja na tri stuba – napon, veličinu prsline i žilavost loma, kao što je jasno prikazano na Slici 3.1, pa se onda na temeljima zavisnosti ova tri parametara uvek uz poznavanje dva može doći do trećeg. Tako na primer, uz poznat napon i podatke o žilavosti loma, koje možemo dobiti ispitivanjem, možemo izračunati kritičnu veličinu prsline pa time i dimenzionisati konstrukciju; ili na osnovu pretpostavljene veličine prsline, koja je često definisana mogućnostima IBR metoda, uz poznavanje žilavosti loma možemo doći do dozvoljenih napona odnosno do radnih ograničenja konstrukcije. Ovi principi, uz razvoj savremenih programskih paketa, omogućavaju iterativni pristup inženjerskoj analizi pa se konstrukcija može optimizovati po bilo kom kriterijumu, odnosno po prioritarnom zahtevu koji definiše upotreba same konstrukcije ili sam korisnik.

Ovakav iskorak u mehanici loma je bio revolucionaran jer je u inženjersku praksu uveo postojanje prsline i grešaka tipa prsline, uz njihovo prihvatanje kroz uticaj na integritet konstrukcije, čak i u početnim fazama projektovanja. Time je uticaj mehanike loma, sa samog kraja životnog ciklusa konstrukcije premešten na sam početak, u faze inženjerskog projektovanja i dimenzionisanja.

Kroz razvoj mehanike loma je definisano više parametara i kriterijuma kojima se može prikazati ili uporediti karakteristika materijala i njegovo ponašanje u prisustvu prsline ili slične greške. Nije moguće uvesti opšti, univerzalni parametar jer postoje specifičnosti za svaku teoriju, bilo da se radi o linearno-elastičnim teorijama ili o elasto-plastičnom pristupu. U oblasti elastičnog ponašanja materijala merodavan parametar je faktor intenziteta napona K , a za oblaast elasto-plastičnog ponašanja materijala se najčešće koriste otvaranje vrha prsline CTOD, J-integral i J-R kriva.

Faktori intenziteta napona daju korelaciju napona i geometrije oko vrha prsline. Faktoru intenziteta napona se dodaje u indeksu oznaka koja bi definisala dejstvo napona u blizini vrha prsline. Kroz teoriju se razmatraju tri osnovna oblika pomeranja površine prsline, koji su vezani za različita dejstva napona (Slika 3.3) [54]:

- Oblik I - cepanje - simetrično otvaranje površina prsline - napon zatezanja σ .
- Oblik II - klizanje površina prsline u istoj ravni - napon smicanja τ .
- Oblik III - smicanje površina prsline u različitim ravnima - napon smicanja τ .



Slika 3.3: Osnovni oblici razvoja prslina [55]

Oblik I – cepanje je najčešći vid nastajanja i rasta prslina, a upravo ovakav raspored napona se koristi u stanardizovanim testovima koji se obavljaju u cilju dobijanja parametara mehanike loma. U ovom slučaju veza napona i faktora intenziteta napona ima sledeći oblik:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.1)$$

Prema jednačini 3.1, jedinica za faktor intenziteta napona je $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Kako je u razmatranim problemima veličina (dužina) prslina jedina bitna geometrijska veličina, iz toga sledi da relacija između K_I i udaljenog napona ima oblik:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.2)$$

Za slučaj ravnog stanja deformacije (RSD), gde se primenjuje linearno-elastična mehanika loma, kada je krti lom dominantan, možemo reći da je:

$$K_I = K_{IC} \quad (3.3)$$

Pri čemu je gde je K_I faktor intenziteta napona za oblik I - cepanje, a K_{IC} predstavlja njegovu kritičnu vrednost. U ovom slučaju K_{IC} je karakteristika materijala, a kao vrednost žilavosti materijala, određuje se prema standardnoj proceduri ASTM E399.

Na osnovu ovog tumačenja parametara teorije LEML, može se definisati jednostavan kriterijum za procenu integriteta konstrukcije:

- $K_I \leq K_{IC}$ - integritet konstrukcije nije ugrožen;
- $K_I > K_{IC}$ - integritet konstrukcije jeste ugrožen jer je moguć krti lom.

U slučaju da u okolini vrha prslina postoji plastična zona značajne veličine, nije više moguće primenjivati linearno-elastičnu teoriju, pa ni faktor intenziteta napona K_I ne opisuje jednoznačno stanje napona i deformacija.

Eksperimentalno određivanje parametara mehanike loma se može regulisati na više načina, ali od posebnog značaja je standard ASTM E1820, koji objedinjuje merenje žilavosti loma kao kritične vrednosti bilo kog od tri osnovna parametra mehanike loma - K_{IC} , $CTOD_{IC}$ ili J_{IC} . Ovaj standard pojedinačno definiše određivanje svakog parametra, uz definisanje načina obrade podataka, jer se K_{IC} određuje direktno prema definiciji, a da se standardni postupci merenja $CTOD$ i J integrala zasnivaju na posrednim, tj. izvedenim vrednostima.

Aneksom 17 standarda ASTM E1820 su definisani zahtevi za izvođenje i ocenu ispitivanja na šarpijevom klatnu epruveta sa zamornom prslinom, sa aspekta mehanike loma.

Dobijene dinamičke karakteristike mehanike loma su uporedive sa konvencionalnim ispitivanjima većih uzoraka pod uslovom da su ispunjeni kriterijumi iz Aneksa 8 i Aneksa A14 standarda ASTM E1820. Međutim, kako je šarpijeva epruveta malih dimenzija, ovi kriterijumi najčešće nisu ispunjeni. I pored toga, vrednosti dobijene mogu biti korišćene za istraživanje i razvoj materijala, u kontroli kvaliteta i proceni upotrebe kao sredstvo za upoređivanje relativnih promena sa uticajem promene temperature ili brzine uvođenja opterećenja na šarpi epruvetama sa zamornom prslinom [56].

Ovaj aneks opisuje ispitivanja na šarpijevom klatnu sa šarpi epruvetama sa zamornom prslinom kako bi se dobili dinamički parametri mehanike loma. Ovo predstavlja proširenje procedure ispitivanja epruveta sa V-zarezom opisanih u standard ASTM E23, a mogu se koristiti za procenu

Za sprovođenje ovog testa potrebna je upotreba instrumentiranog Šarpijevog klatna. Karakteristike parametara žilavosti loma zavise od ponašanja materijala koji se ogledaju u različitim dijagramima sila-vreme, koji su prikazani u Tabeli 3.1 i Slici 3.4. Napominjemo da se samo dijagram Tipa I (Slika 3.4) može primeniti linearno na lom.

Oznake korišćene za silu su P , dok standard ASTM E2298 koristi oznaku F , tako da korišćeni parametri P_{max} , P_{bf} , P_{gy} odgovaraju parametrima F_m , F_{bf} , F_{gy} u standardu ASTM E2298.

Što se tiče pripreme epruveta, njihove konfiguracije i dimenzija, koriste se uzorci u skladu sa Šarpi epruvetom tipa A definisanom u metodu iza ispitivanje ASTM E23, sa ili bez mašinskog V-zareza od 2 mm, ali sa zamornom prslinom. Zamorna prslina treba da bude dužine a_0 u opsegu $0,45 < a_0/W < 0,70$ (W je širina preseka epruvete). Preporučena je, ali ne i obavezna izrada bočnog žleba.

Poželjno je da uređaj za ispitivanje bude instrumentirano Šarpijevo klatno koje može biti modifikovano da ima promenljivu poziciju sa koje se oslobađa klatno.

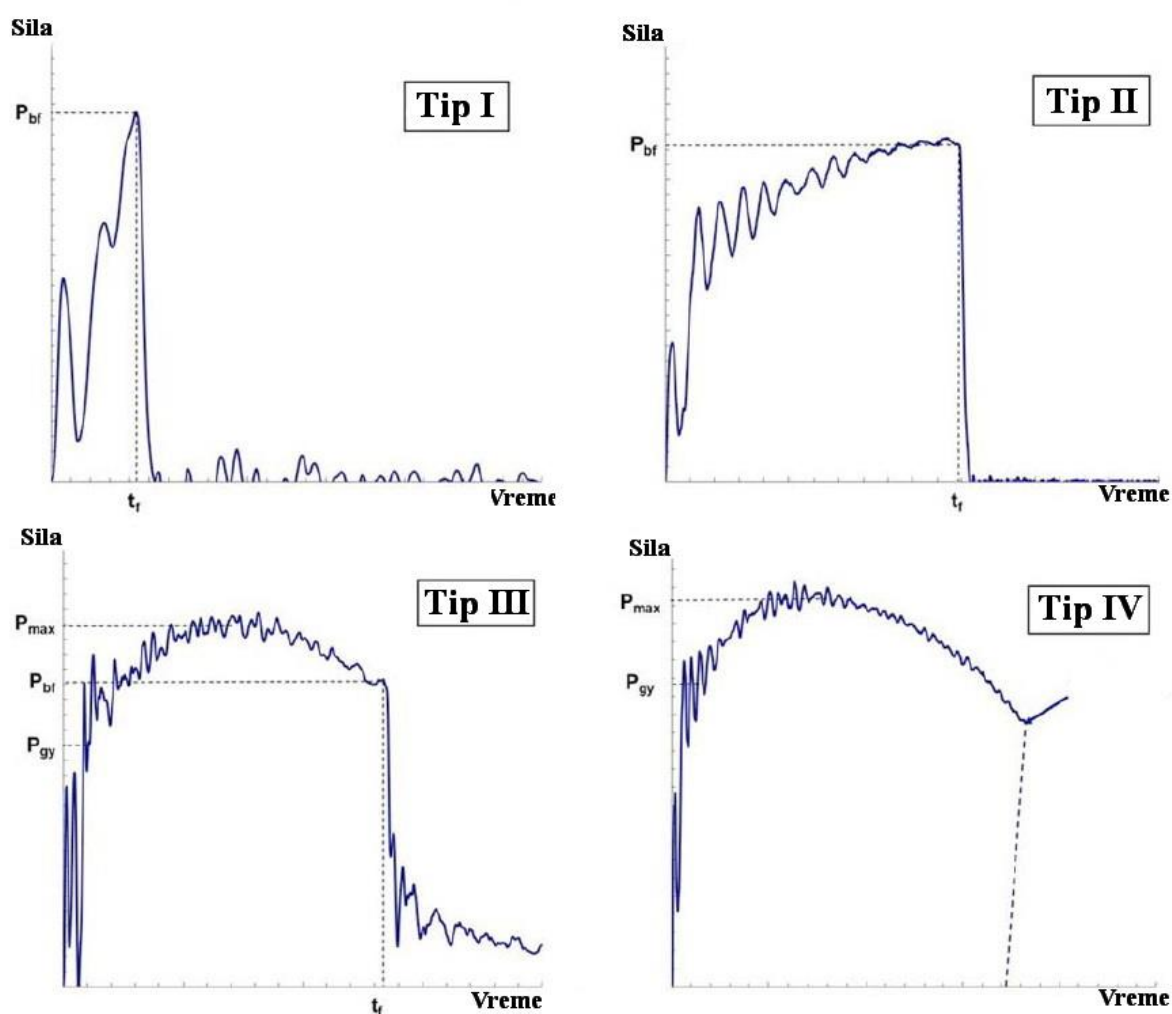
Potrebno je da uređaji imaju kvalitetan sistem akvizicije podataka koji je kalibrisan. Uz to kod uređaja kod kojih se beleži signal sile do trenutka vraćanja klatna u osnovni položaj se mora ispuniti jedan od sledećih zahteva:

(a) Razlika između KV i Wt treba da bude u granicama $\pm 15\%$ KV ili ± 1 J, šta god je veća vrednost, ili

(b) razlika između KV i Wt ne treba da pređe $\pm 25\%$ ili ± 2 J, šta god je veće.

Tabela 3.1: Parametri žilavosti loma koji se mogu definisati po tipu (Vidi Sliku 3.4)

Ponašanje materijala	Tip sa dijagrama	J-R kriva	Karakteristični parametri
Linearno-elastično	I	/	$J_{cd,X}$, $K_{Jcd,X}$
Elastično-plastično, nestabilan lom sa $\Delta a < 0,2$ mm	II	/	$J_{cd,X}$, (B)
Elastično-plastično, nestabilan lom sa $0,2 \text{ mm} \leq \Delta a \leq 0,15 (W-a_0)$	II	/	$J_{cd,X}$, (B, Δa)
Elastično-plastično, nestabilan lom sa $0,15 (W-a_0) \leq \Delta a$	III	$J_d - \Delta a$	$J_{Qd,X}$ ili $J_{Id,X}$
Elastično-plastično, bez nestabilnog loma	IV	$J_d - \Delta a$	$J_{Qd,X}$ ili $J_{Id,X}$



Slika 3.4: Šema tipičnih dijagrama sila - vreme

Postupak ispitivanja se vodi prema standardnom Šarpi metodi ASTM E23, uračunavajući i rukovanje hladnim ili grejanim uzorcima.

Snimanje podataka obuhvata dijagram sila-deformacija (hod) iz kog se dobijaju vrednosti P_{max} , P_{bf} , W_m , i W_t .

U slučaju da je vreme za nastajanje nestabilnog loma t_f manje od minimalnog vremena ispitivanja t_w , trenutak nastajanja prsline se ne može odrediti zbog oscilacija (vidi Sliku 3.4 Tip I), tada se žilavost loma ne može proceniti ovom metodom.

Vrednost J-integrala pri nestabilnom lomu, J_{cd} (dijagram sila - vreme Tip I i Tip II na Slici. 3.4) ili J_{ud} (dijagram sila - vreme Type III na Slici 3.4), ili pri završenom testu, J_d (dijagram sila - vreme Tip IV na Slici 3.4) se izračunavaju prema odgovarajućim formulama u aneksima A1.4-A1.6 osnovne metode ispitivanja po standardu ASTM E1820.

Faktor intenziteta napona se može izračunati iz odgovarajućeg J-integrala jednačinom:

$$K_{Jd} = \sqrt{\frac{E J_d}{1-\nu^2}} \quad (3.4)$$

Korišćenjem podataka ispitivanja jednog uzorka je moguće proceniti dinamičku J-R krivu korišćenjem tehnike redukcije normalizovanih podataka (eng. Normalization Data Reduction - NDR), kao što je opisano u [57].

4 Dupleks čelici

4.1 Uvodni deo

Materijal korišćen za ispitivanje je komercijalno proizveden i nabavljen super dupleks čelik sa oznakom UNS S32750 (W.EN 1.4410) (2507). Sastav materijala je prikazan u Tabeli 4.1, a njegove mehaničke osobine u Tabeli 4.2.

Dupleks čelici (DSS) se svrstavaju u grupu nerđajućih čelika, grupisani po svom hemijskom sastavu. Super dupleks čelici imaju sve odlike dupleks čelika, kao što je visoka čvrstoća i dvofazna struktura koja se sastoji od približno istih udela ferita i austenita. Ovakva mikrostruktura čini dupleks čelike oko dva puta jačim u poređenju sa monofaznim feritnim ili austenitnim čelicima, a uz to super dupleks čelici imaju veći sadržaj hroma i molibdena od svojih dupleks ekvivalenata, čime je znatno povećana otpornost na koroziju.

Super dupleks čelici se uglavnom koriste za sledeće namene:

- Toplotni izmenjivači;
- Cevovodi za procese koji sadržavaju hloride;
- Rezervoari za transport i pripadajući cevovodi;
- Osovine, rotori i hidrauličke instalacije.

Tabela 4.1: Hemijski sastav osnovnog metala u %: super dupleks čelik S32750 (2507) po ASTM A240, mas. %. [58]

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Ostalo
0,03	1,2	0,035	0,020	0,80	24-26	6-8	3-5	0,24-0,32	0,5	/

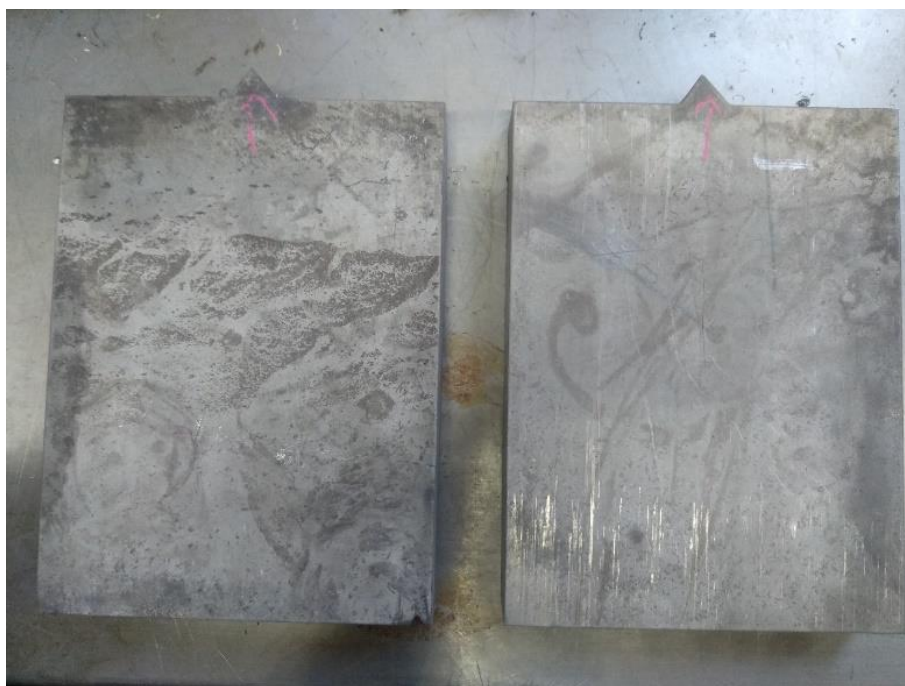
Tabela 4.2: Zahtevane mehaničke karakteristike superdupleks čelika S32750 (2507) po ASTM A240. [58]

Granica tečenja Rp _{0,2} , MPa, min.	Zatezna čvrstoća Rm, MPa, min.	Izduženje pri lom ^{*(1)} A, % min.	Tvrdoća Brinel/ Rockwell C max.
550	795	15	310 / 32

*⁽¹⁾ – Napomena: Dato izduženje je za merni deo epruvete L₀= 50 mm

Za potrebe ovog istraživanja su nabavljene ploče čelika S32750, dimezija 200x300 mm, debljine 25 mm.

Ploče su isečene uzdužno, u pravcu valjanja, na dve polovine, a zatim obrađene i pripremljene za zavarivanje.



Slika 4.1: Izgled ploča materijala S32750 pre obrade

4.2 Postupak zavarivanja

Zavarivanje je vršeno metodom sa volframovom elektrodom u inertnom gasu (TIG) koja se tipično koristi za zavarivanje visokolegiranih i dupleks čelika. Korišćen je uređaj KEMPPi MasterTig MLS 3003ACDC Režim zavarivanja je definisan na osnovu preporuka za ovaj tip materijala i iskustveno. K-šav je usvojen zbog debljine ploče, pre svega, ali i zbog lakšeg određivanja zona jer je prednost postojanje ravne strane u odnosu na „X“ šav.

Za dodatni materijal je korišćena žica TIG 22/9/3 LN (oznaka prema EN 12072 [59]), pri čemu je upotrebljena žica Ø2,4 za koreni prolaz vara, a Ø3,2 za prolaze ispune. Ovaj dodatni materijal je izabran zbog svojih mehaničkih karakteristika koje odgovaraju osnovnom metalu, kao i hemijskog sastava koji je sličan originalnom materijalu. Upotreba ovog dodatnog materijala omogućava dobijanje metala šava koji je otporan na agresivno okruženje, što je vrlo važna osobina s obzirom da se dupleks čelici koriste namenski upravo u ovakvim okruženjima. Hemijski sastav žice je dat u Tabeli 4.3, a mehaničke karakteristike, po katalogu proizvođača su date u Tabeli 4.4.

Tabela 4.3: Hemijski sastav dodatnog materijala, mas. % (prema katalogu dobavljača)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
<0.03	0.6	1.7	22.5	9.0	3.0	0.13

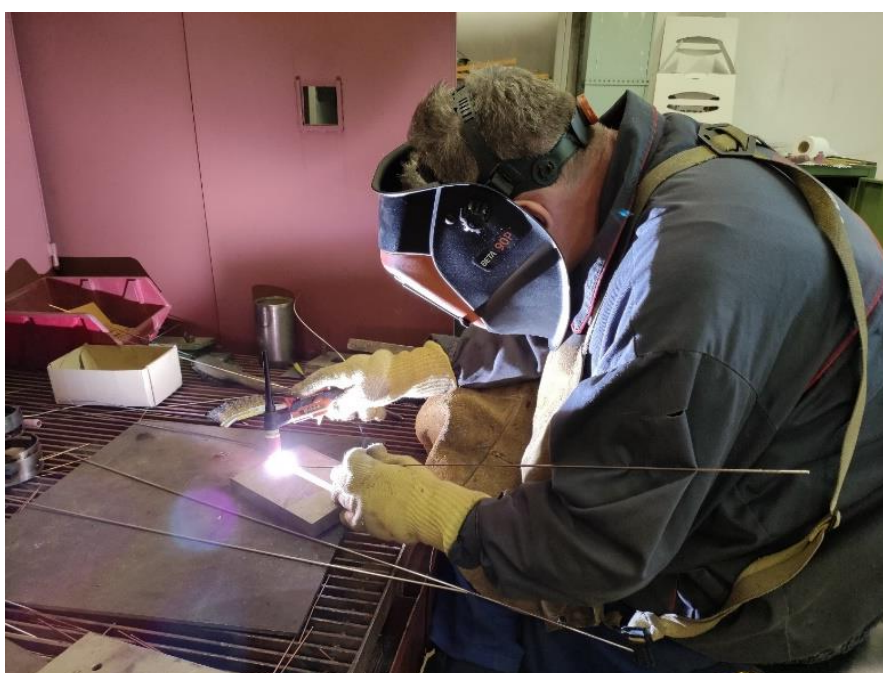
Tabela 4.4: Mehaničke karakteristike čistog metala šava (prema katalogu dobavljača)

Granica tečenja $R_{p0.2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje pri lomu A_5 , %	Udarna žilavost KV at 20 °C, J
>510	680–890	20	>47

Ploče su zavarene tako da su posle korenog prolaza naizmenično rađeni prolazi ispune sa jedne, pa zatim sa druge strane ploče, kako bi se optimizovao unos toplote i izbegla deformacija ploče. Parametri zavarivanja slede i Tabeli 4.5.

Tabela 4.5: Parametri zavarivanja na jednoj od ploča

Gornja strana ploče				Donja strana ploče			
Prolaz	Jač. struje (A)	Napon (V)	Trajanje (min)	Prolaz	Jač. struje (A)	Napon (V)	Trajanje (min)
Koren	170	14					
1	199	14	3:15	1	199	14	3:20
2	199	15	2:30	2	199	15	2:00
3	199	15.5	2:05	3	199	15.5	2:00
4	199	17	1:40	4	199	17	1:45
5	199	17.5	1:40	5	199	18	1:40



Slika 4.2: Postupak zavarivanja



Slika 4.3: Izgled jedne od zavarenih ploča dupleks čelika S32750

Ploče dimenzija (300x200) mm, debljine 25 mm, su isečene poprečno na pravac zavarenog spoja u trake širine 12 mm. Svaka traka se zatim po debljini sekla na pola, tako da su se dobijeni pripremci dimenzija (12x12x180) mm. Dupleks čelici se generalno teže mašinski obrađuju u odnosu na uobičajene austenitne čelike zbog svoje povećane tvrdoće, pa treba obratiti pažnju na izbor načina obrade. Zbog navedenog su sva sečenja rađena mlazom vode (eng. Waterjet), a i kako bi se izbegao dodatni unos toplote i naknadna promena mikrostrukture.

Uzorci za mikrostrukturu zavarenog spoja su pripremljeni mehaničkim brušenjem i poliranjem. Tako pripremljeni uzorci su nagrizeni u carskoj vodici (mešavina koncentrovane azotne kiseline i koncentrovane hlorovodonične kiseline) kako bi se što preciznije po zonama odredila pozicija zarezna na epruvetama za ispitivanje.

5 Metode ispitivanja

5.1 Ispitivanje hemijskog sastava

Analiza hemijskog sastava je izvršena u Laboratoriji za materijale Vojnotehničkog instituta, metodom optičke emisije spektrometrije (OES) na uređaju „Belec Compact Port HLC“. Uzorci su pripremljeni mehaničkim brušenjem i poliranjem.

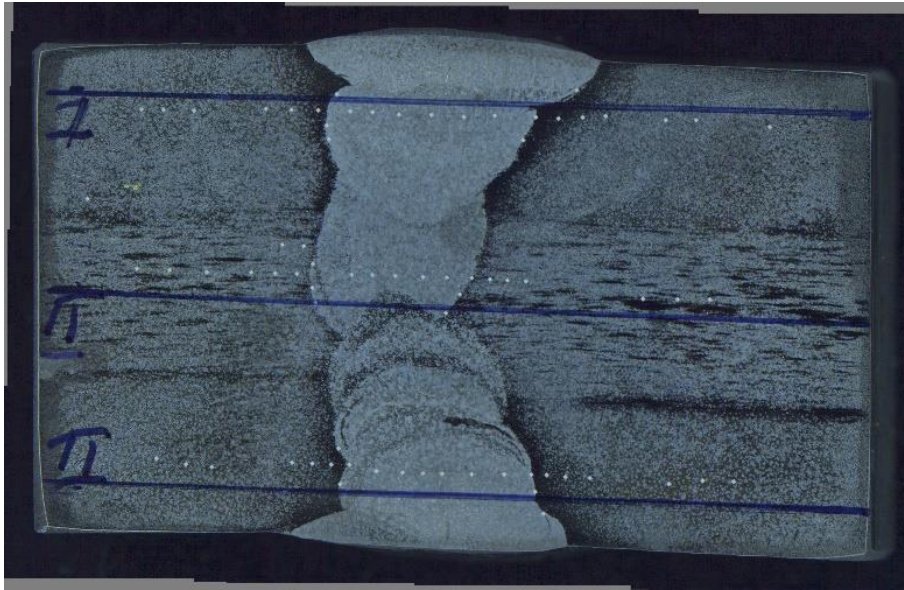
5.2 Makro i mikrostruktura

Makrostruktura zavarenog spoja je posmatrana u preseku (T-S). Uzorci su nagrizani u mešavini koncentrovane azotne kiseline i koncentrovane hlorovodonične kiseline, u trajanju od 30 sekundi.

Karakterizacija mikrostrukture je rađena optičkim mikroskopom (OM) Leitz Metalloplan koji je opremljen kamerom DFC 295 i softverom za obradu slike LAS 4.3.1. Da bi zrna u strukturi bila vidljiva potrebno je bilo nagrizati uzorke u mešavini koncentrovane azotne kiseline i koncentrovane hlorovodonične kiseline, u trajanju od 15 sekundi.

5.3 Merenje tvrdoće

Uzorci za merenje tvrdoće zavarenog spoja su pripremljeni mehaničkim brušenjem i poliranjem, a zatim su nagrizani, kako bi se vizuelno definisale zone zavarenog spoja, držanjem u trajanju od 15 sekundi u mešavini koncentrovane azotne kiseline i koncentrovane hlorovodonične kiseline. Tvrdoća je, zbog pojave trakavosti tokom valjanja, merena u tri linije (niza) na poprečnom preseku zavarenog spoja dve ploče od dupleks čelika S32750. Nizovi, obeleženi na Slici 5.1 rimskim brojevima I, II i III, su postavljeni u gornjem sloju, po sredini uzorka i u donjem sloju, respektivno. Tvrdoća je u svakom nizu merena kroz zone zavarenog spoja, metodom Vickersa (eng. Vickers) HV10 na uređaju za merenje tvrdoće WOLPERT Diatestor 2RC, po standardu SRPS EN ISO 9015-1 [64].



Slika 5.1: Položaj mesta za merenje tvrdoće u tri niza kroz zavareni spoj.

5.4 Ispitivanje zatezanjem

Ispitivanje zatezanjem je obavljeno u Laboratoriji za eksperimentalnu čvrstoću Vojnotehničkog instituta, primenom standarda SRPS EN ISO 6892-1 [65]. Za ispitivanje je korišćena elektromehanička kidalica SCHENCK-TREBEL RM100, maksimalnog kapaciteta 100 kN. Uvođenje opterećenja se definiše preko brzine kretanja čeljusti, pa se tako kontroliše brzina uvođenja deformacije. Sistem akvizicije podataka je digitalizovan, a beleži vrednosti na tri kanala i to veličine: sila, pomeraj i izduženje. Podatak o naponu pri jednoosnom zatezanju se dobija posredno iz podatka sile i izmerenog prečnika epruvete. Ekstenzomer korišćen za merenje izduženja je radne dužine $L_0 = 25$ mm.

Za ispitivanje su izrađene standardizovane epruvete sa navojem (za prihvat u ispitni uređaj se koristi navoj M10) koje imaju radni deo prečnika $d = 6$ mm, dužine $L_r = 30$ mm. Izgled epruveta koje su ispitivane je prikazan na Slikama 5.3 i 5.4 dok je izgled postavke ispitivanja u kidalici prikazan na Slici 5.2.



Slika 5.2: Izgled ispitnog uređaja i postavke ispitivanja zatezanjem



Slika 5.3: Izgled epruveta OM za ispitivanje zatezanjem



Slika 5.4: Izgled epruveta zavarenog spoja za ispitivanje zatezanjem

5.5 Ispitivanje udarne žilavosti

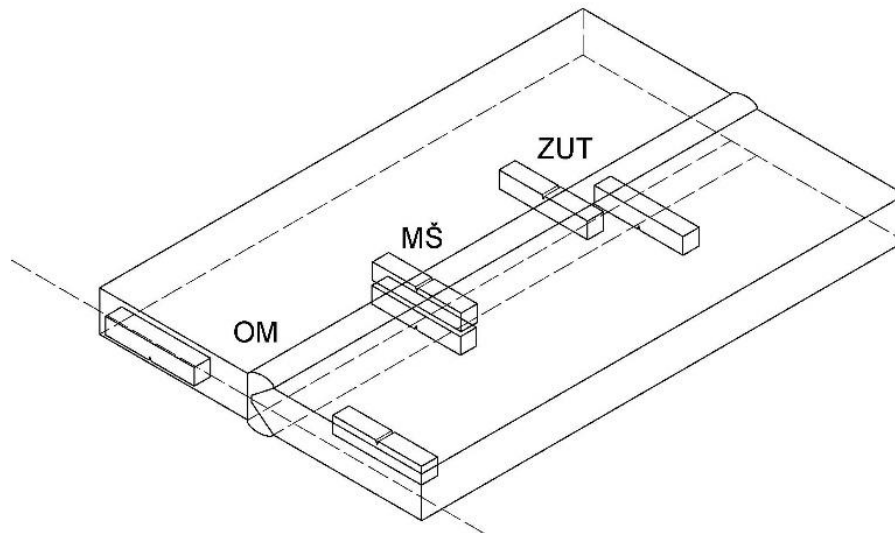
Ispitivanje udarne žilavosti je rađeno u skladu sa standardom SRPS EN ISO 148-1:2017 [66] koristeći standardizovane uzorke – epruvete prema standardu SRPS EN ISO 9016:2022 [67], kao što je prikazano na Slici 5.8.



Slika 5.5: Izgled instrumentiranog Šarpijevo klatna

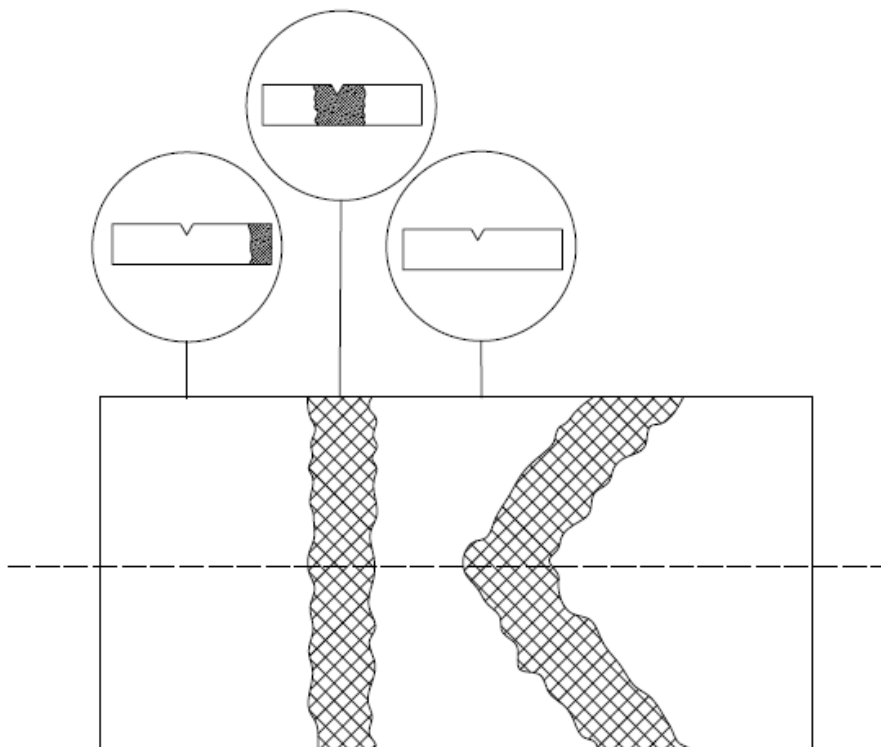
Za ispitivanje je korišćeno instrumentirano Šarpijevo klatno SCHENCK-TREBELL RPSW/A 150/300 J, prikazano na Slici 5.5. Klatno u realnom vremenu beleži podatke o sili na sečivu udarača i uglu klatna, sa frekvencijom od 1.000.000 podataka u sekundi. Namenski softver klatna ima mogućnost obrade podataka koje daje tabelarno ili dijagramima sila – vreme i energija – vreme. Kada korisnik definiše karakteristične tačke u softveru, dobijaju se podaci koji između ostalog sadrže podatke o ukupnoj energiji, energiji nastajanja prsline i energiji rasta prsline.

Standardni uslovi ispitivanja podrazumevaju sobnu temperaturu (+20 °C), a za niže temperature (do -40 °C) je korišćena komora Brabender 500/70, odnosno za još niže temperature mešavina tečnog azota i petrol-etil alkohola u odgovarajućoj razmeri (do temperature od -196 °C). Napominjem da je do temperature -196 °C ispitivan samo osnovni metal, dok su uzorci MŠ i ZUT bili ispitivani do temperature od -80 °C. Ova temperature je odabrana iz više razloga, prvi je što postoji opšta preporuka za upotrebu dupleks čelika do ove temperature, a drugo je što u slučaju upotrebe ovog čelika u vazduhoplovstvu, zbog ograničenja standardne atmosfere [77,78], radna temperatura nikako ne bi mogla biti niža od izabrane.

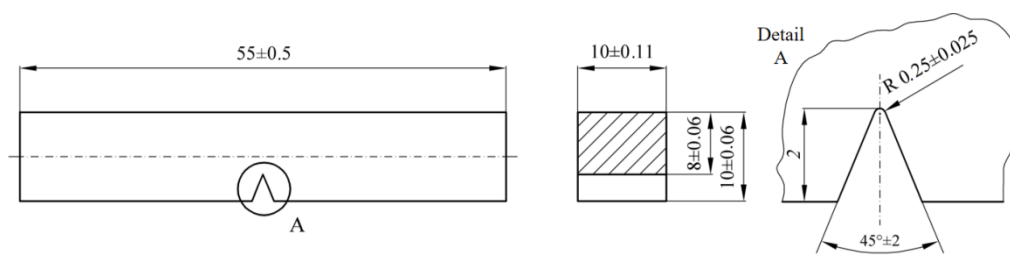


Slika 5.6: Skica lokacija za uzimanje uzoraka zona OM, MŠ i ZUT

U cilju što preciznijeg određivanja pozicije zarez, pripremak u vidu šipke je nagrizen rastvorom kiseline, a kada su zone postale jasno vidljive definisan je položaj zarez. Potom se pristupilo izradi standardne epruvete od pripremk sa označenim položajem zarez. Princip izbora lokacije položaja zarez u poprečnom preseku zavarenog spoja je prikazan na Slici 5.7



Slika 5.7: Šema zona za uzorke tipa Šarpi epruveta u poprečnom preseku zavarenog spoja



Slika 5.8: Oblik i dimenzije standardne epruvete sa V-zarezom za ispitivanje na Šarpijevom klatnu [67]

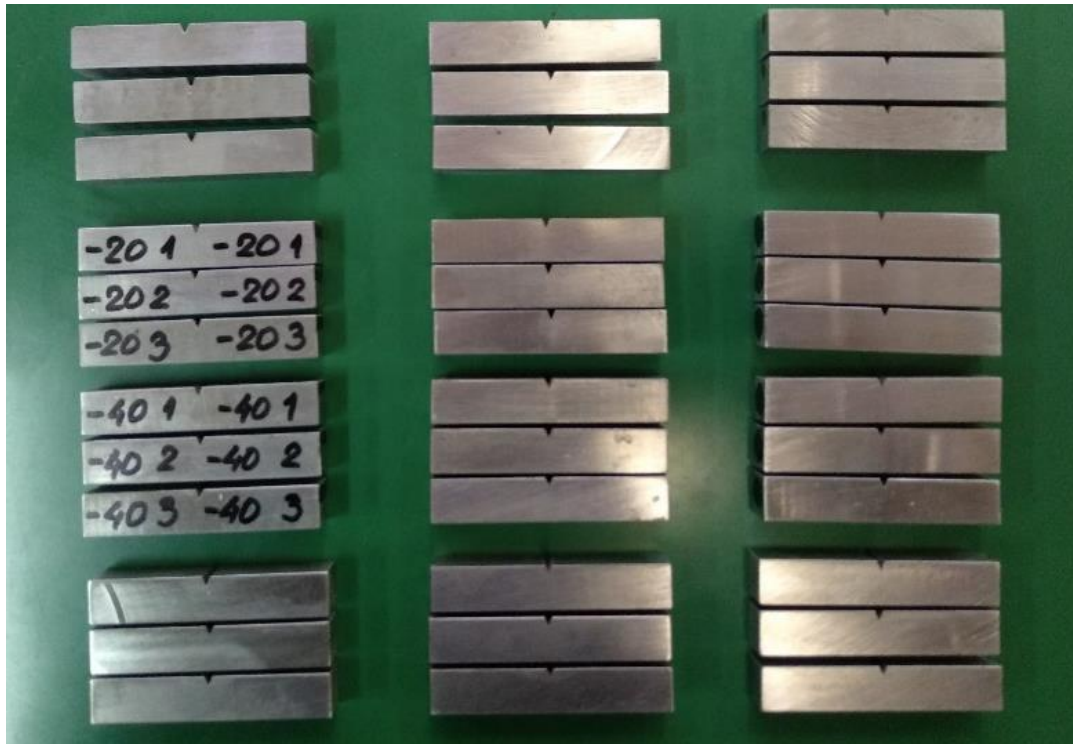
5.5.1 Ispitivanje prelazne temperature

Za dobijanje krive prelazne temperature potrebno je bilo uraditi što veći broj uzoraka na različitim temperaturama. Za ovo ispitivanje su korišćeni samo uzorci OM. Za te potrebe su izabrane sledeće temperature: -196°C , -135°C , -120°C , -100°C , -80°C , -60°C , -40°C , -20°C , $+20^{\circ}\text{C}$. Na svakoj od izabranih temperatura su ispitane po 3 epruvete. Epruvete su pripremane tako što su od trenutka stabilizacije temperature držane 30 minuta zbog homogenizacije temperaturnog polja. Do temperature od -40°C su postojale tehničke mogućnosti da se hlađenje obavlja u komori, dok je za niže temperature bilo potrebno držati epruvete u mešavini tečnog azota i petrol-etil alkohola, pri čemu je temperatura mešavine bila konstantno praćena. Samo ispitivanje je rađeno u vrlo kratkom vremenskom intervalu, kako ne bi došlo do velikog odstupanja temperature od zadane.

Za ispitivanje prelazne temperature MŠ i ZUT je broj ispitnih temperatura redukovan u odnosu na OM, pa je tako opseg ispitivanja obuhvatao ispitne temperature : -80°C , -60°C , -40°C , kao i referentnu sobnu temperaturu $+20^{\circ}\text{C}$.

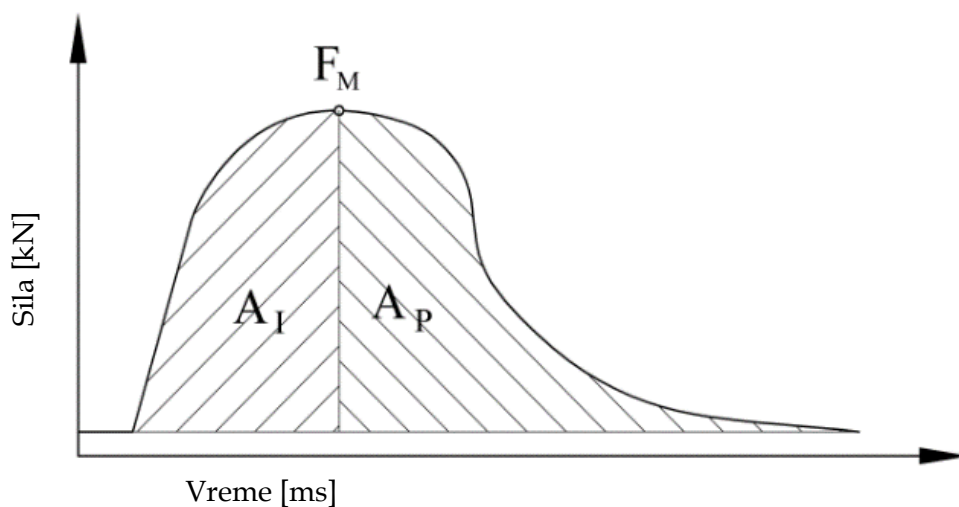
5.5.2 Ispitivanje udarne žilavosti na spektru temperatura

Za svaku odabranu temperaturu iz ispitnog opsega ($+20^{\circ}\text{C}$, -40°C , -60°C i -80°C) su pripremljena po 3 uzorka iz sve tri karakteristične zone, sa vrhom zarez pozicioniranim u OM, MŠ ili ZUT. U slučaju uzorka iz ZUT-a zarez je pozicioniran tako da bude što je moguće bliži MŠ (Slika 5.6), tj. u zoni krupnozrnog ZUT-a, kao tipične zone za najmanjom udarnom žilavosti u ZUT-u. U slučaju uzorka sa MŠ zarez je pozicioniran tako da bude u centralnoj liniji zavarenog spoja.



Slika 5.9: Izgled uzoraka pripremanih za ispitivanje na Šarpijevom klatnu

Ispitivanja su vršena instrumentiranim Šarpijevim klatnom, pa je moguće izvršiti razdvajanje energije nastajanja i rasta prsline, pa tako i izvršiti procenu uticaja položaja zarez na mehanizam loma pri udarnom opterećenju. Na ovaj način je moguće odrediti energije nastajanja i rasta prsline, čime se omogućava bolje razumevanje otpornosti na rast prsline u ispitivanom materijalu. Energije se razdvajaju prema maksimalnoj vrednosti sile, tako da površina ispod dijagrama levo od ove tačke predstavlja energiju nastajanja prsline, A_i , a površina ispod dijagrama desno od ove tačke predstavlja energiju rasta prsline, A_p (Slika 5.10). Sistem za merenje i akviziciju podataka je u skladu sa standardom SRPS EN ISO 14556:2016 [68].



Slika 5.10. Šema dijagrama sa razdvajanjem energija nastajanja i rasta prsline.

5.5.3 Ispitivanje udarne žilavosti epruveta sa zamornom prslinom

U cilju ispitivanja uticaja zamorne prsline na udarnu žilavost je bilo potrebno generisati zamorne prsline na standardnim šarpijevim epruvetama (10x10x55 mm). Za to je korišćen uređaj RUMUL Cracktronic, prikazan na Slici 5.11. To je rezonantni ispitni uređaj koji se koristi za istraživanje zamora i mehanike loma, a idealan je za upotrebu na manjim uzorcima (tipa Šarpi epruvete). Cilj je dobijanje parametra mehanike loma ispitivanjem jednog uzorka malih gabarita, prema standardnoj metodi ASTM 1820, Aneks 17.

Proces uvođenja zamorne prsline na šarpijevu epruvetu sa zarezom, kao inicijalnom prslinom, se ogleda u opterećenju epruvete promenljivim momentom savijanja. Moment savijanja se definiše tako da maksimalni moment ne generiše napone koji izlaze van elastične zone. Promena momenta savijanja se vrši po sinusnom zakonu a odnos minimalnog i maksimalnog momenta je $R=0,1$. Definisavanje opterećenja na uređaju se vrši zadavanjem srednjeg momenta savijanja (M_{sr}) i momenta dvostruke amplitude (M_{p-p} eng. Peak to peak moment - moment od dna do vrha sinusoide).

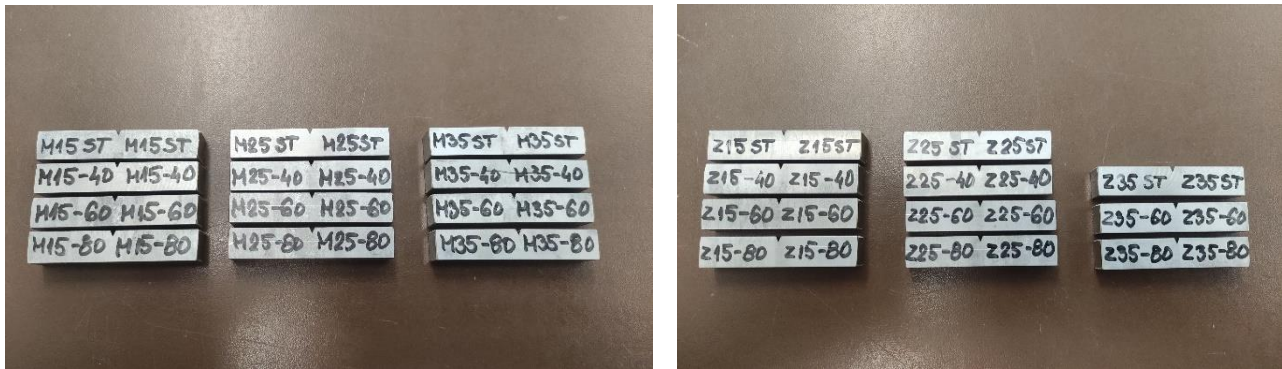
Način fiksiranja epruvete u uređaju je takav da se krajevi učvrste mehaničkim pritezanjem tako da se ne stvaraju naponi u zoni zareza, tj. nema momenta savijanja. Opterećenje se uvodi tako što a uređaj generiše moment savijanja, bez parazitnih napona u zoni zareza, glavnog napona prouzrokovanog savijanjem. Ovim metodom se izbegavaju potencijalni problemi koncentracije napona koji se mogu javiti kod savijanja u tri tačke (eng. Tree Point Bending - TPB).



Slika 5.11: Izgled uređaja Rumul Cracktronic

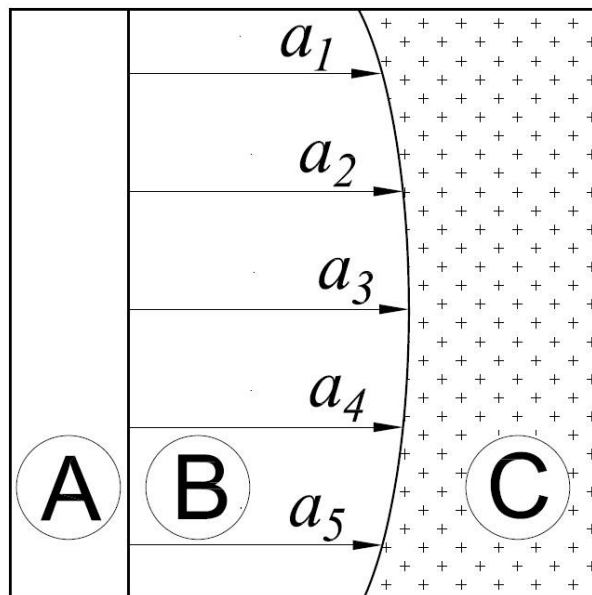
Namera je bila da se na Šarpi epruvetama iz sve tri zone pripreme zamorne prsline različitih dužina. Za ovu namenu nije korišćena folija za merenje dužine zamorne prsline, već su epruvete bile obeležene na bočnoj ivici zarezom koji je predstavljao željenu granicu

dužine prsline. Zatim bi se tokom ispitivanja vizuelno pratio rast prsline, a proces uvođenja promenljivog opterećenja je ručno zaustavljan. Naravno, ovaj metod ne daje tačne dužine prsline iz više razloga. Glavni razlog je što front prsline nije ravan već postoji zakrivljenje pri ivicama preseka (oblik nokta), a drugi razlog je što ovaj dupleks čelik nema uobičajeno ponašanje kao konvencionalni čelici kod kojih je lakše primetiti plastičnu deformaciju pri vrhu prsline, pa je time i znatno teže vizuelno uočiti ne samo vrh prsline već i postojanje cele prsline na boku epruvete. Izgled dela pripremljenih epruveta je dat na Slici 5.12.



Slika 5.12: Epruvete MŠ i ZUT pripremljenih za zamorne prsline

Po završenom procesu generisanja zamornih prsline epruvete su ispitane na Šarpijevom klatnu, na spektru temperatura, kako je opisano u poglavlju 5.4.2. Rezultati dobijeni ovim ispitivanjem su prikazani u kasnijim poglavljima, a epruvete, odnosno njihove polovine su podvrgnute merenju realne vrednosti zamorne prsline, za potrebe dalje analize. Merenje dužine prsline se obavlja na preseku loma u 5 tačaka prema skici na Slici 5.13. Uređaj pomoću koga se meri je mikrometar sa optičkim uvećanjem i končanicama.



Slika 5.13: Šema preseka epruvete i načina merenja zamorne prsline
(A) Mašinski zarez; (B) Zamorna prsline; (C) Površina loma

(B)



Slika 5.14: Reprezentativni presek epruvete na mestu preloma

Dužina zamorne prsline se računa po sledećem:

$$a_{sr} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5}{5} \quad (5.1)$$

gde je a_{sr} srednja vrednost zamorne prsline, pa je iz toga ukupne dužina prsline

$$a = a_0 + a_{sr} \quad (5.2)$$

pri čemu je a_0 dužina mašinski urađenog zareza.

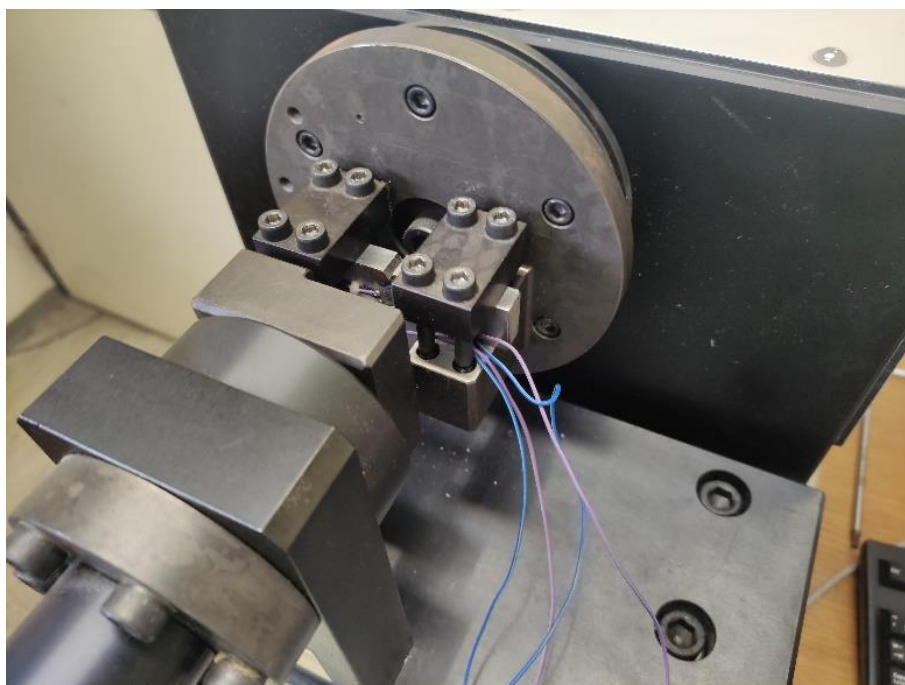
5.6 Fraktografija

Makrofraktografska analiza površina preloma žilavosnih epruveta je izvršena na stereo optičkom mikroskopu (LEICA M205A). Mikroskop je opremljen kamerom DFC 295 sa računarskim sistemom i softverom LAS 4.3.1 za akviziciju i obradu podataka.

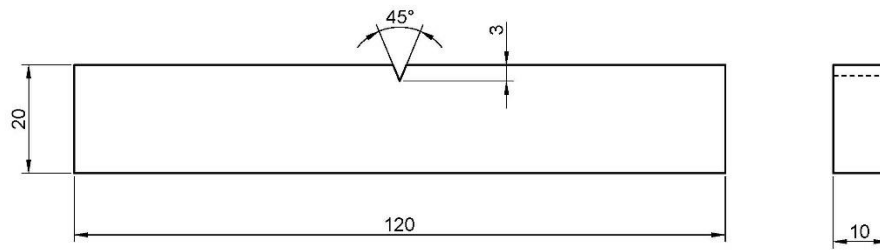
Mikrofraktografski pregled prelomnih površina žilavosnih epruveta izvršen je na skenirajućem elektronskom mikroskopu JEOL JSM 6010LV sa energodisperzivnim spektrometrom OXFORD X-Max metodom SEM/EDS (eng. Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive Spectroscopy).

5.7 Ispitivanje parametara rasta zamorne prsline

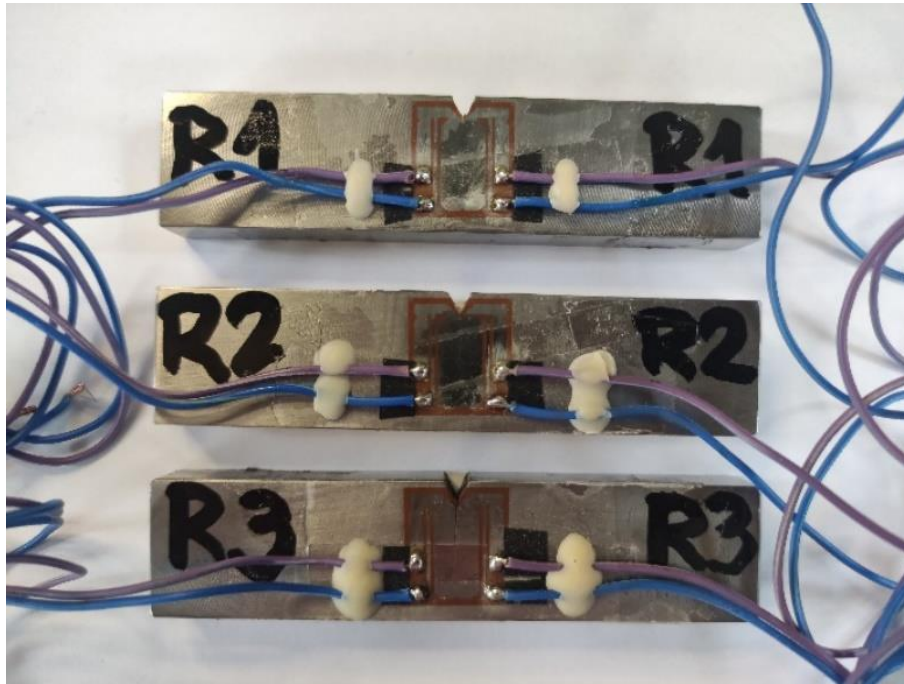
Za ispitivanje parametara rasta zamorne prsline - brzine rasta zamorne prsline (da/dN) je korišćen već pomenuti rezonantno frekventni pulzator RUMUL Cracktronic. U ovaj uređaj kapaciteta ± 160 Nm neophodno je dodatno koristiti i RUMUL Fractomat koji služi za kontinualno merenje dužine prsline. Dužina prsline se meri pomoću folije za merenje rasta prsline (tip HBM A10), koristeći metod indirektnog pada potencijala. Postavka epruvete u ispitnom uređaju je prikazana Slikom 5.15.



Slika 5.15: Postavka ispitivanja u uređaju Cracktronic



Slika 5.16: Epruveta tipa S(E)B za ispitivanje brzine rasta prsline



Slika 5.17: Pripremljene epruvete sa folijama za merenje prsline

U cilju ispitivanja potrebno je bilo izraditi epruvete, crtež prikazan na Slici 5.16, dimenzija 10x20x120 mm sa V-zarezom. Ovaj metod se razlikuje od principa merenja rasta zamorne prsline pomoću klasične S(E)B epruvete, kod koje se meri otvaranje usta prsline (CMOD), a zatim se na osnovu te vrednosti preračunava dužina prsline. Prednost je omogućeno direktno dobijanje vrednosti dužine prsline, pa je time moguće praćenje rasta prsline u realnom vremenu tokom ispitivanja. Kako bi se omogućilo kontinualno merenje rasta prsline na izrađenu epruvetu je bilo potrebno zalepiti mernu foliju za merenje prsline. Konačno pripremljene epruvete su prikazane na Slici 5.17.

6 Rezultati ispitivanja

6.1 Rezultati hemijskog sastava

Sastav OM, nerđajućeg dupleks čelika S32750 dat je u Tabeli 6.1.

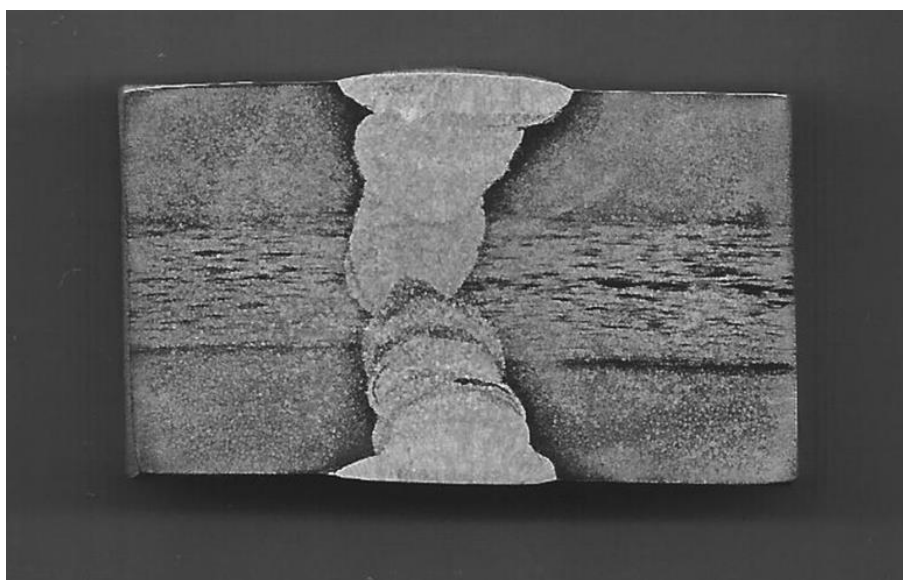
Tabela 6.1: Hemijski sastav osnovnog metala u mas. %:

(superdupleks nerđajući čelik S32750),

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr
0,040	0,36	0,86	0,028	<0,001	0,09	0,038	24,09
Mo	Ni	V	Ti	Nb	Co	W	N
3,69	6,43	0,041	0,007	0,023	0,095	0,097	0,33

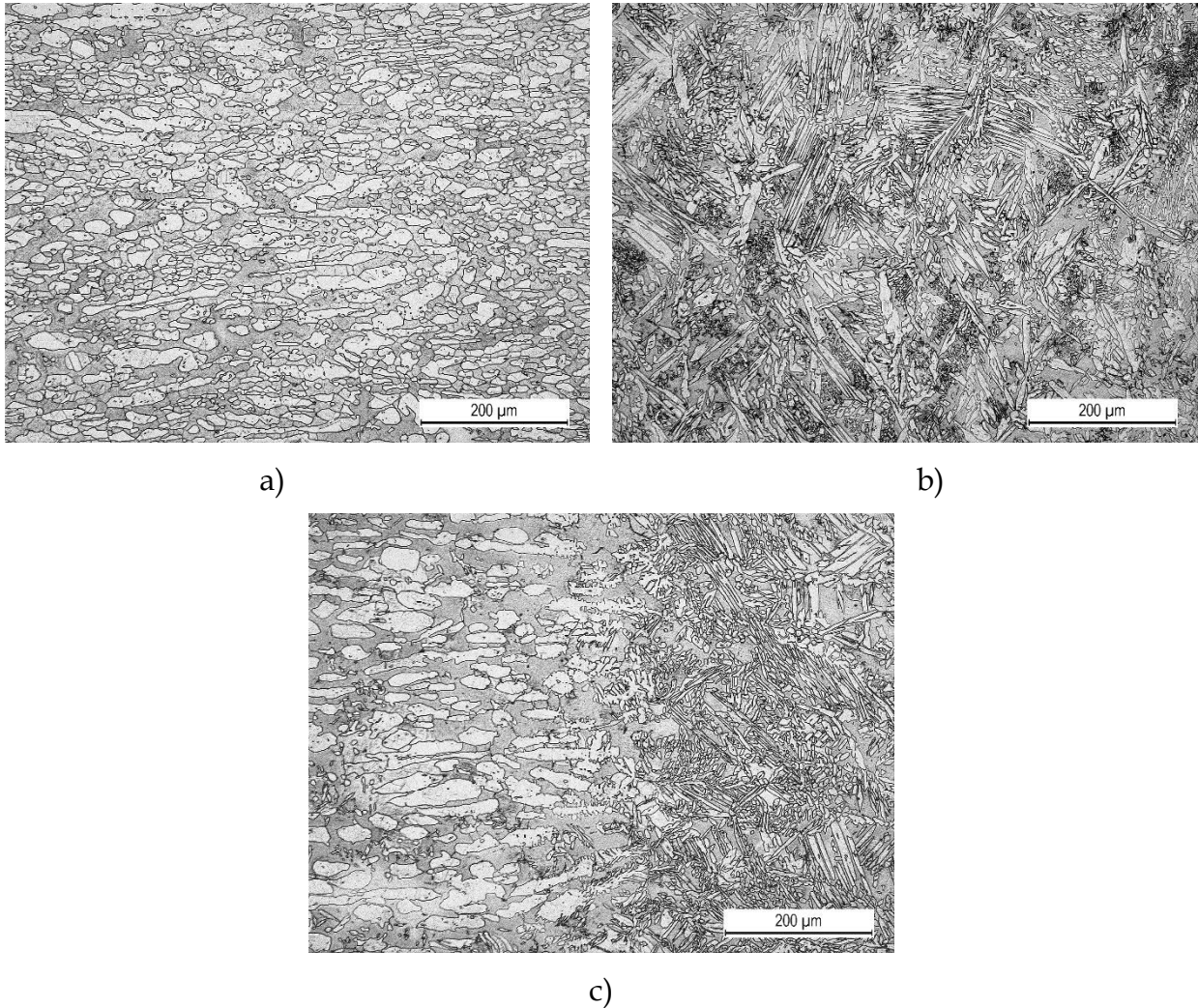
6.2 Pregled makro i mikrostrukture

Makrostruktura zavarenog spoja je prikazana na Slici 6.1. Uočavaju se sve karakteristične zone zavarenog spoja, zona uticaja toplote (ZUT), metal šava (MŠ), kao i osnovni metal (OM). Vidljivi su i prolazi pri zavarivanju. U makrostrukturi osnovnog metala se uočava heterogenost u vidu trakavosti u centralnom delu poprečnog preseka zavarene ploče.



Slika 6.1: Makrostruktura zavarenog K-spoja

Mikrostruktura zavarenog spoja je prikazana na slici 6.1. Mikrostruktura osnovnog metala se sastoji od austenitne (svetle) i feritne (tamne) faze (dupleks mikrostruktura). Austenit je prisutan u obliku izduženih zrna u feritnoj osnovi (Slika 6.2 a). U metalu šava austenit je izdvojen u obliku pločica ili Widmannstätten-ovih iglica (Slika 6.2 b). Klince austenita nastaju na granicama zrna ferit/ferit i rastu slučajno orjentisane u feritnu osnovu. Mikrostruktura u ZUT-u je izmenjena u odnosu na OM (Slika 6.2 c). Uočavaju se grublja austenitna zrna, dok su feritna zrna sitnija.



Slika 6.2: Mikrostruktura zavarenog spoja:
a) osnovni metal; b) metal šava; c) zona uticaja toplote

6.3 Merenje tvrdoće

Rezultati merenja tvrdoće, pri prolasku kroz zone zavarenog spoja: osnovni metal (OM), zona uticaja toplote (ZUT), linija stapanja (LS) i metal šava (MŠ), su dati u tabeli 5.2.

Tabela 6.2: Rezultati merenja tvrdoće HV 10

		Tvrdoća			HV 10			
		Zona						
Oznaka linije	Merenje broj	OM 1	ZUT 1	LS 1	MŠ	LS 2	ZUT 2	OM 2
I	1	437,0	434,9	437,0	432,8	434,9	432,8	434,9
	2	437,0	433,8	437,0	432,8	439,1	434,9	437,0
	3	434,9	432,8	437,0	430,7	437,0	432,8	437,0
	4				432,8			
	5				432,8			
	6				432,8			
II	1	437,0	434,9	437,0	434,9	441,3	437,0	434,9
	2	437,0	434,9	439,1	437,0	441,3	437,0	437,0
	3	434,9	434,9	437,0	437,0	439,1	437,0	437,0
	4				439,1			
	5				434,9			
III	1	437,0	434,9	437,0	434,9	437,0	434,9	434,9
	2	437,0	434,9	437,0	432,8	433,8	434,9	437,0
	3	437,0	434,9	437,0	432,8	434,9	437,0	437,0
	4				432,8			
	5				432,8			
	6				434,9			

6.4 Rezultati ispitivanja zatezanjem

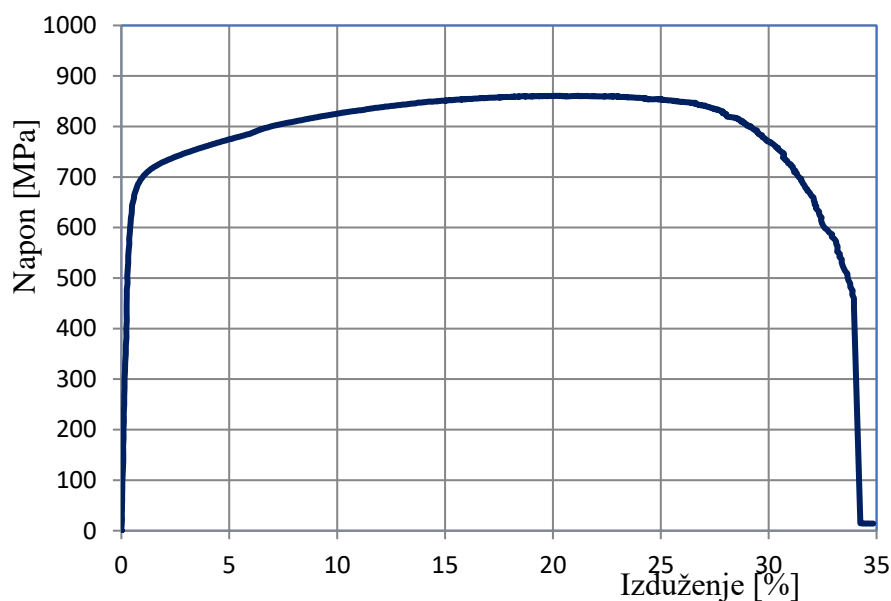
Rezultati ispitivanja zatezanjem su prikazani karakterističnim dijagramima napon - deformacija, za osnovni metal na Slikama 6.3 i 6.4, a za zavareni spoj na Slikama 6.5 do 6.7; i tabelarno u Tabeli 6.3 za osnovni metal i Tabeli 6.4 za zavareni spoj.

Tabela 6.3. Izmerene mehaničke karakteristike superdupleks čelika S32750.

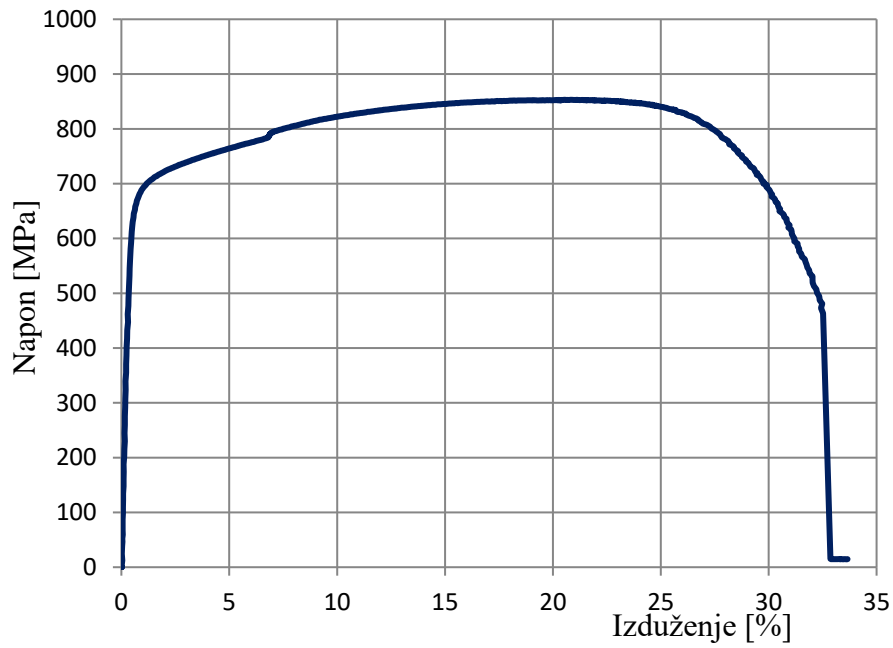
Broj uzorka	Granica tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje pri lomu A , %
01	665,0	860,8	33,7
02	658,5	853,0	32,3

Tabela 6.4. Izmerene mehaničke karakteristike zavarenog spoja.

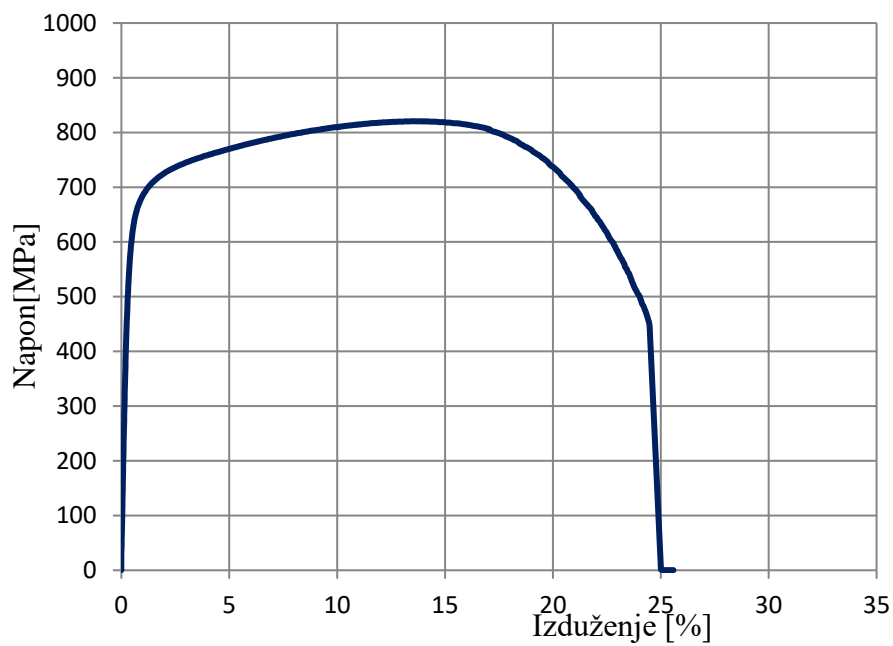
Broj uzorka	Granica tečenja $R_{p0,2}$, MPa	Zatezna čvrstoća R_m , MPa	Izduženje pri lomu A_5 , %
ZS1	623,3	820,6	24,2
ZS2	679,2	860,1	23,5
ZS3	644,1	850,6	26,1



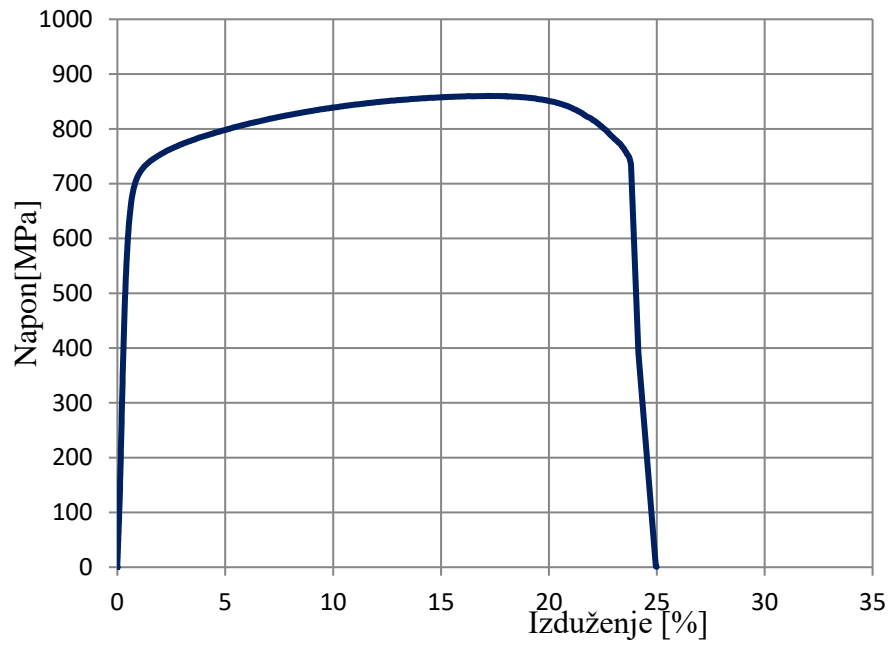
Slika 6.3: Dijagram napon-deformacija pri ispitivanju zatezanjem OM 1



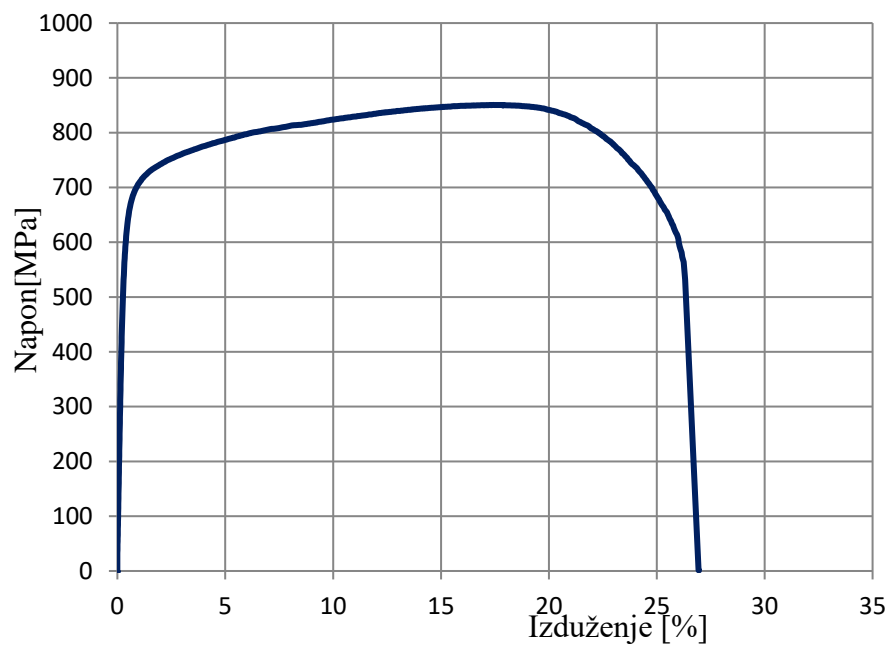
Slika 6.4: Dijagram napon-deformacija pri ispitivanju zatezanjem OM 2



Slika 6.5: Dijagram napon-deformacija pri ispitivanju zatezanjem zavarenog spoja ZS1



Slika 6.6: Dijagram napon-deformacija pri ispitivanju zatezanjem zavarenog spoja ZS2



Slika 6.7: Dijagram napon-deformacija pri ispitivanju zatezanjem zavarenog spoja ZS3

6.5 Rezultati ispitivanja udarne žilavosti

6.5.1 Rezultati ispitivanja prelazne temperature

Pod određenim okolnostima, uobičajeno je da se duktilni (žilavi) materijali lome krto. Faktori koji mogu uticati na ovaj prelazak iz duktilnog u krto lom su: sniženje temperature, povećanje brzine deformacije ili prisustvo koncentrata napona (zareza). Posebnu pažnju treba obratiti na uticaj temperature ispitivanja na energiju loma, pri čemu se prelaz iz žilavog loma u krto lom odvija u temperaturnom intervalu. Iz praktičnih razloga se definiše jedna određena temperatura koja se naziva prelazna temperatura. [69]

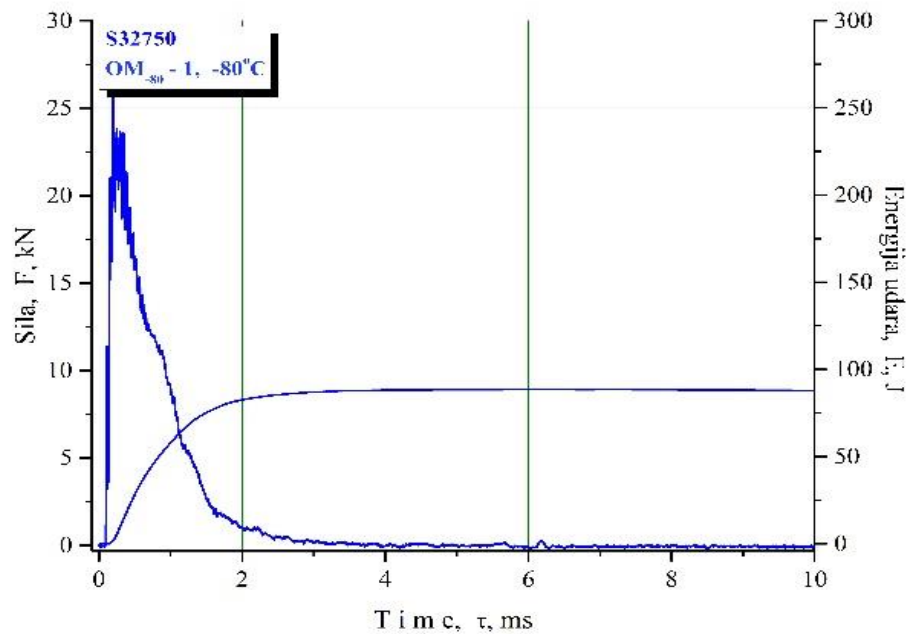
Za svaku temperaturu ispitane su po 3 epruvete i izračunata srednja vrednost merenja. Za OM su pripremane posebne epruvete za veći spektar temperatura, dok su za MŠ i ZUT rezultati za analizu prelazne temperature dobijani iz epruveta za analizu raspodele energija udara, pa će oni biti prikazani u narednom poglavlju.

Tabela 6.5: Rezultati ispitivanja udarne žilavosti OM na spektru temperatura

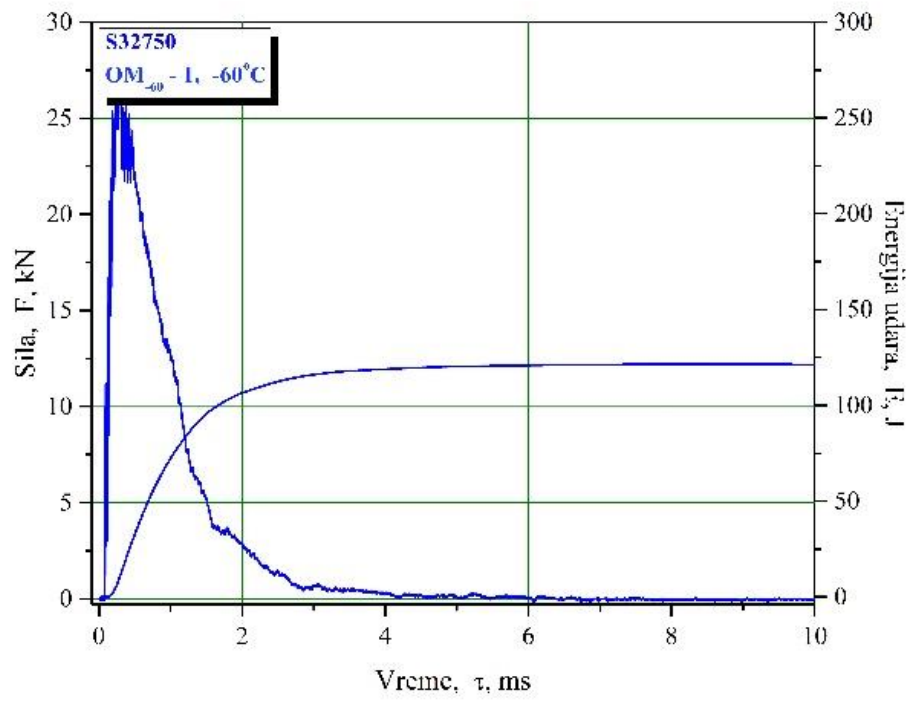
Temperatura ispitivanja [°C]	20,0	-20,0	-40,0	-60,0	-80,0	-100,0	-120,0	-135	-196,0
Prosečna energija udara [J]	299,0	244,7	201,6	123,8	81,7	42,8	67,0	51,4	16,6

6.5.2 Rezultati merenja udarne žilavosti

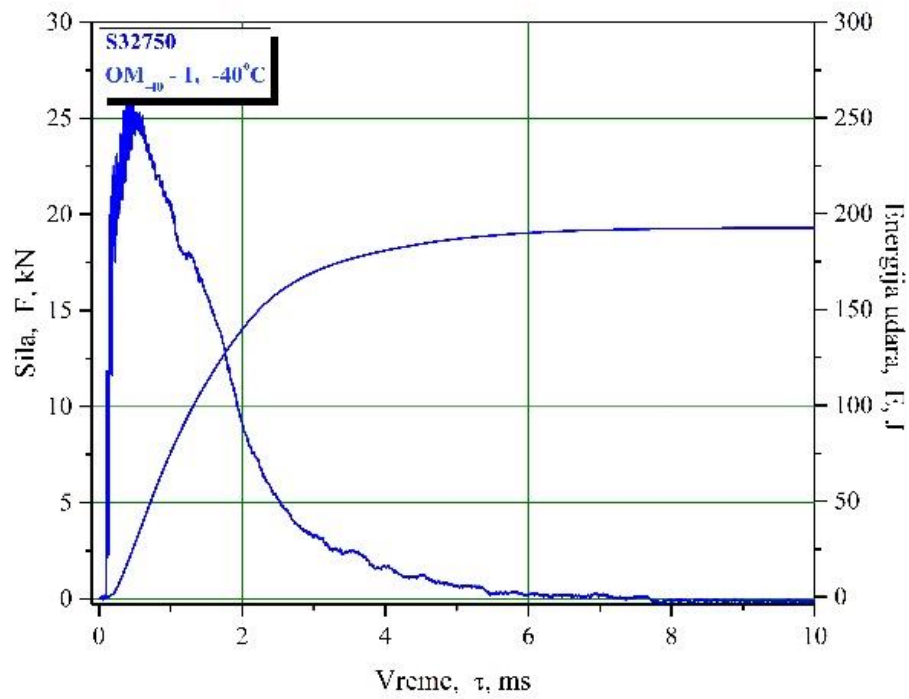
Rezultati merenja udarne žilavosti su podeljeni u dve grupe, prva grupa obuhvata standardne epruvete za Šarpijevo klatno sa V-zarezom iz OM, MŠ i ZUT, na kojima je vršena detaljna analiza prelazne temperature i raspodele energije udara; druga grupa su epruvete sa V-zarezom iz OM, MŠ i ZUT, sa dodatno urađenom zamornom prslinom, na kojima je analizirana osetljivost na rast prsline kao i uticaj postojanja same prsline na udarnu žilavost.



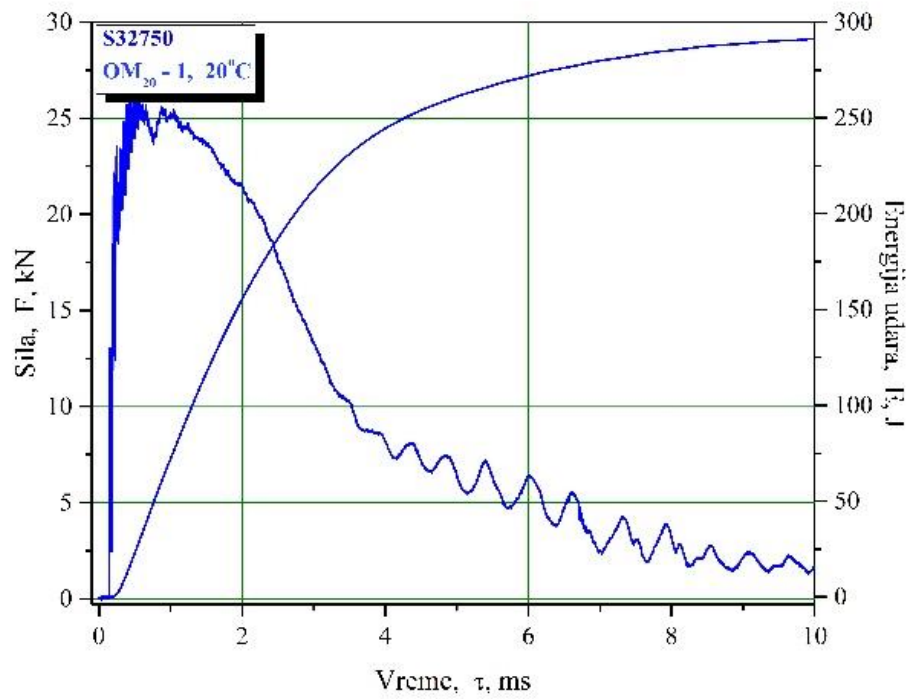
(a)



(b)

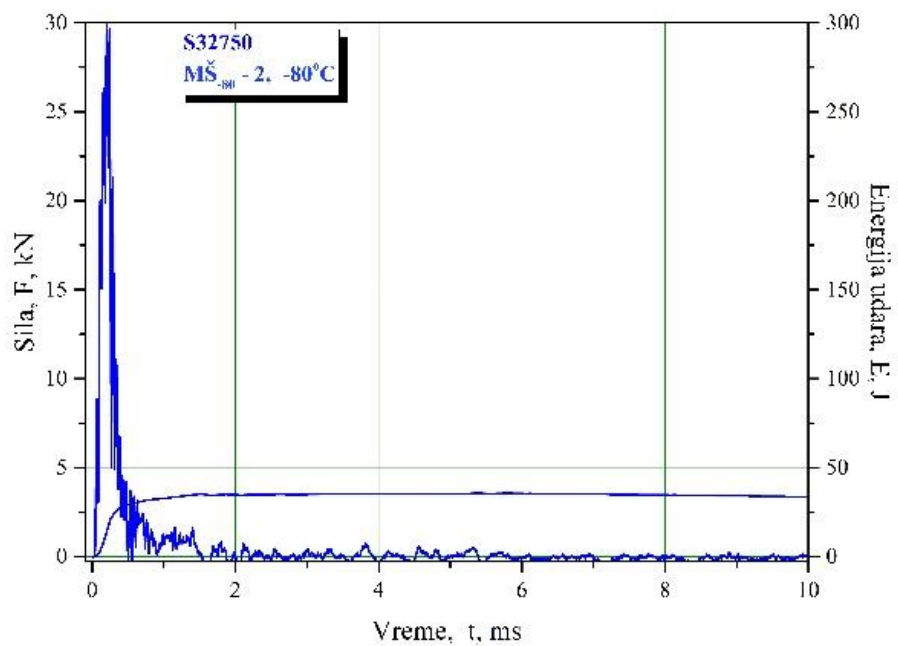


(c)

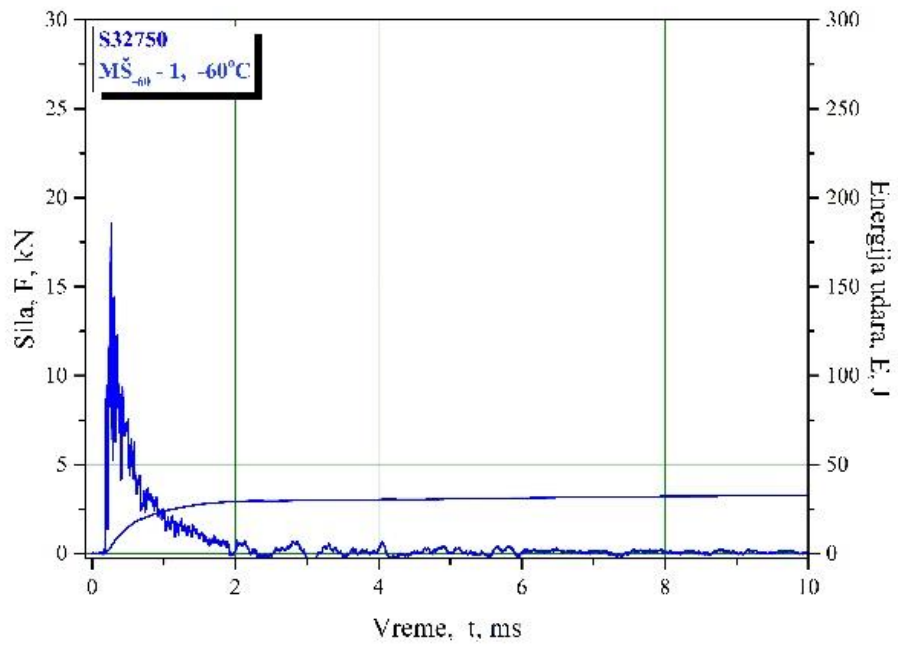


(d)

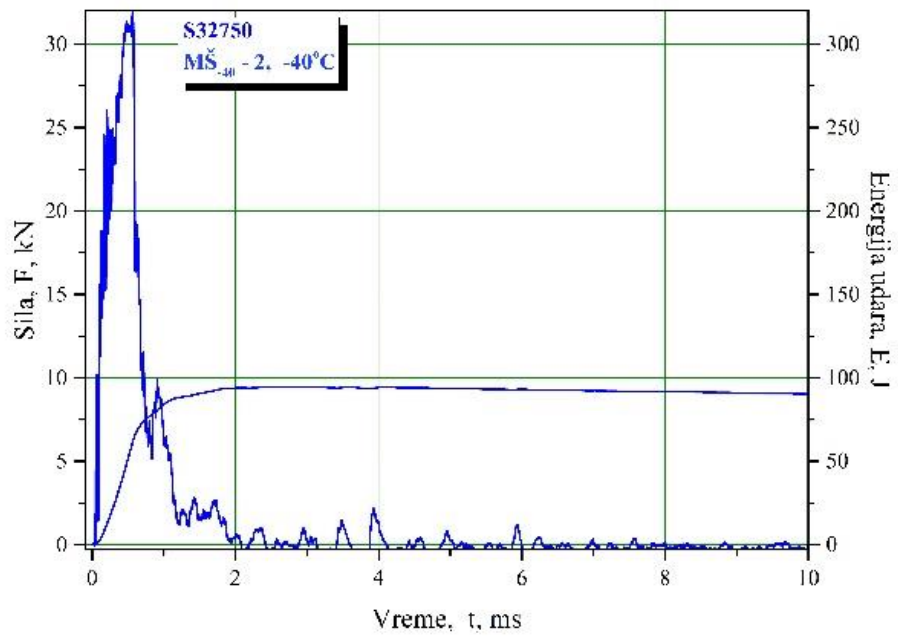
Slika 6.8: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke OM na temperaturama -80°C (a), -60 °C (b), -40 °C (c) i +20 °C (d)



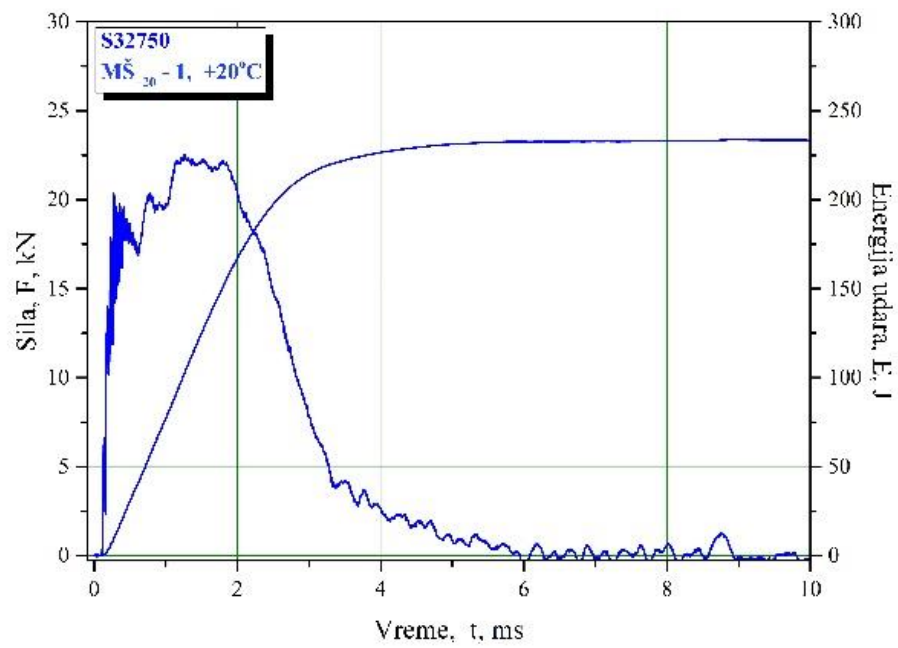
(a)



(b)

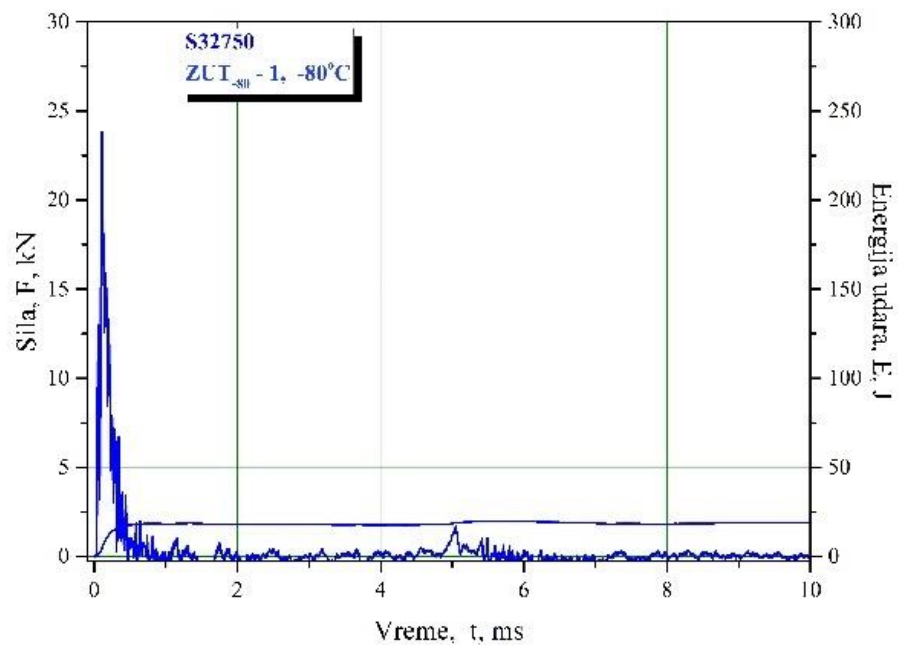


(c)

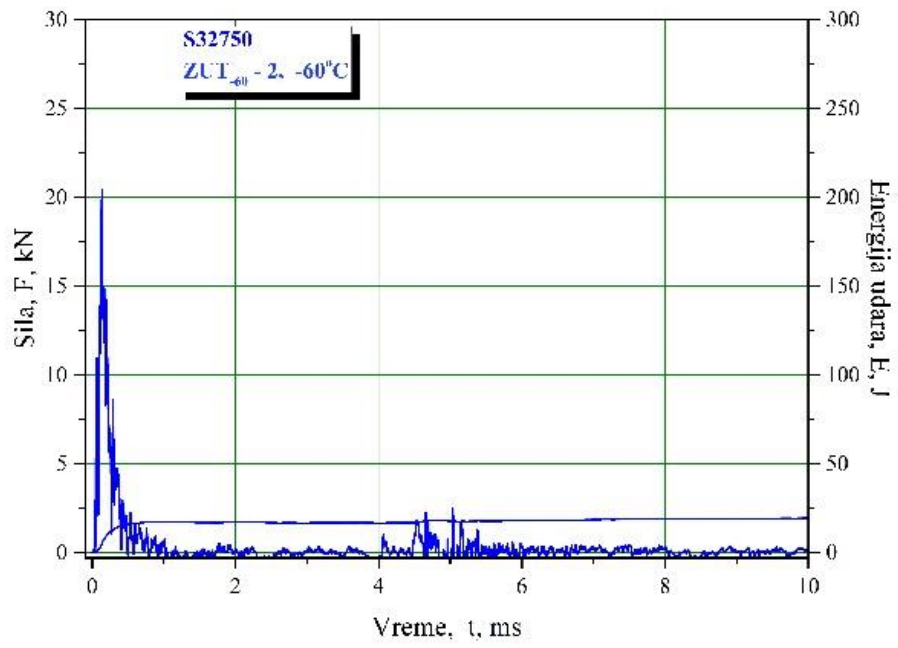


(d)

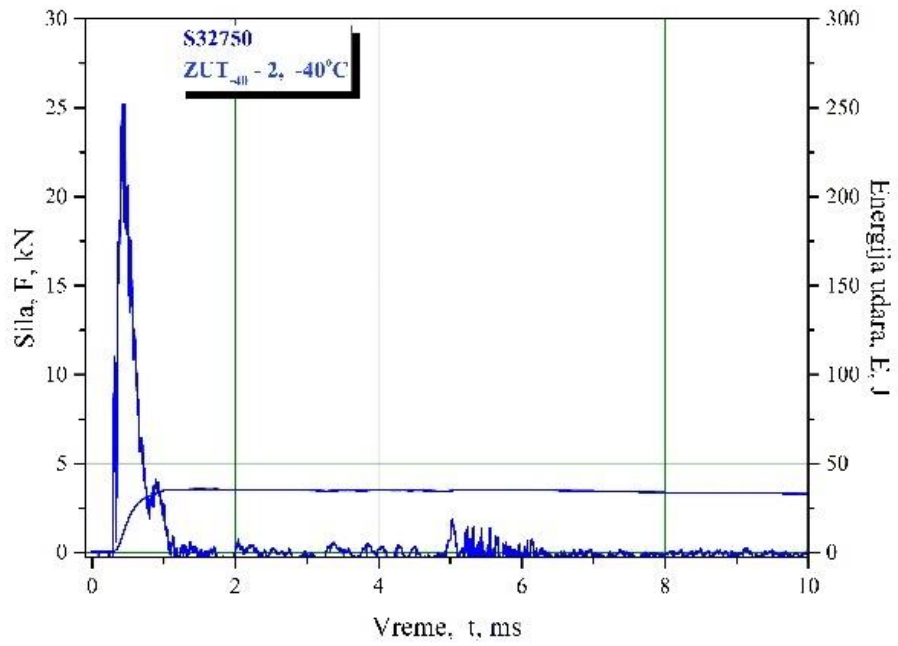
Slika 6.9: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke MŠ na temperaturama -80°C (a), -60 °C (b), -40 °C (c) i +20 °C (d)



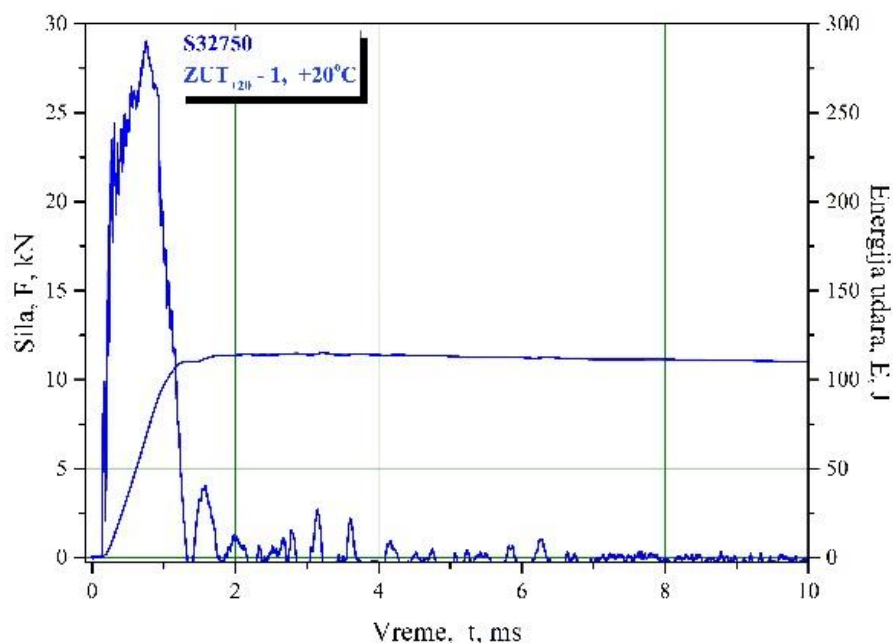
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 6.10: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke ZUT na temperaturama -80°C (a), -60 °C (b), -40 °C (c) i +20 °C (d)

Tabela 6.6: Rezultati ispitivanja udarne energije (srednja vrednost i odstupanje) za OM.

Temperatura °C	Ukupna udarna energija A_{tot} , J	Energija nastajanja prsline A_L , J	Energija rasta prsline A_P , J
-80	82 ± 6	17 ± 1	65 ± 5
-60	125 ± 11	25 ± 2	100 ± 9
-40	201 ± 11	45 ± 1	156 ± 10
+20	297 ± 3	52 ± 1	245 ± 3

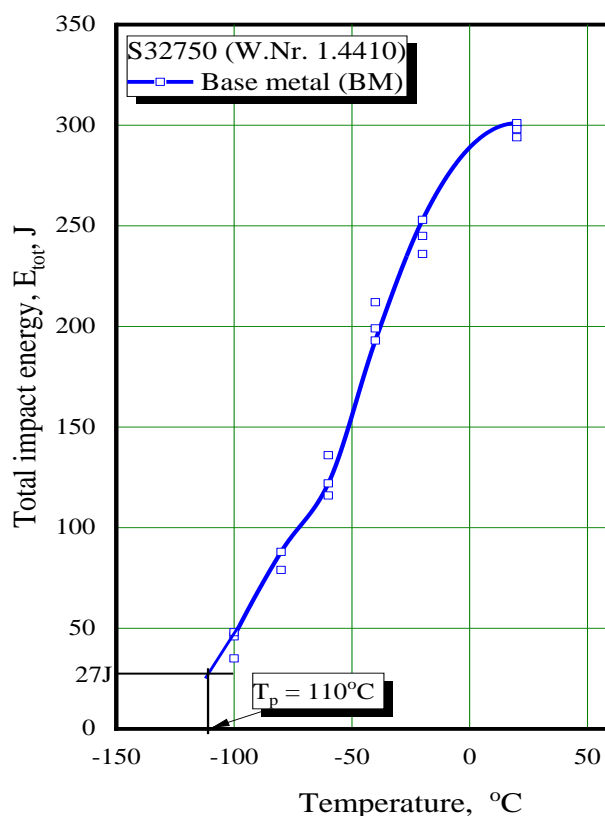
Tabela 6.7: Rezultati ispitivanja udarne energije (srednja vrednost i odstupanje) za MŠ.

Temperatura °C	Ukupna udarna energija A_{tot} , J	Energija nastajanja prsline A_L , J	Energija rasta prsline A_P , J
-80	$26,5 \pm 7,3$	$8,5 \pm 4,4$	$18,0 \pm 2,0$
-60	$34,1 \pm 1$	$7,2 \pm 2,9$	$26,9 \pm 1,9$
-40	$112,4 \pm 11,6$	$39,8 \pm 10,7$	$67,6 \pm 27,3$
+20	$229,3 \pm 5,6$	$99,0 \pm 3,3$	$130,3 \pm 2,4$

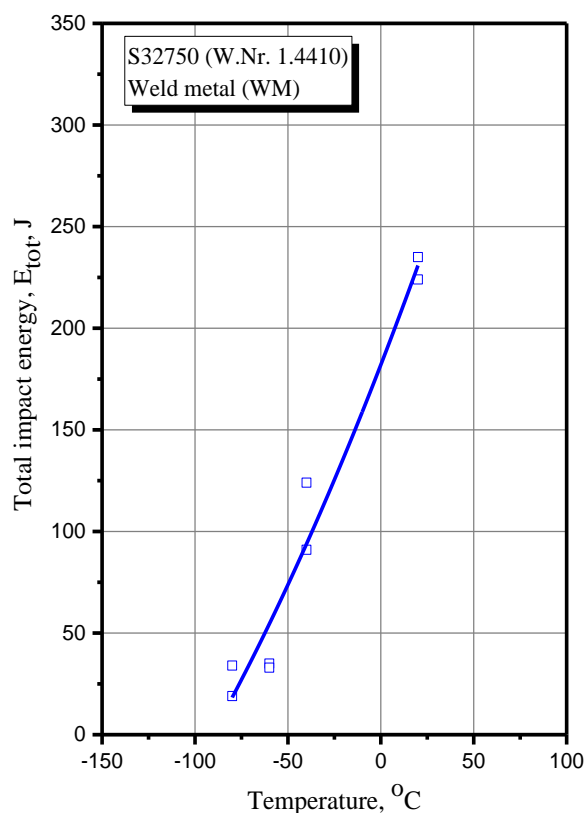
Tabela 6.8: Rezultati ispitivanja udarne energije (srednja vrednost i odstupanje) za ZUT.

Temperatura °C	Ukupna udarna energija A_{tot} , J	Energija nastajanja prsline A_L , J	Energija rasta prsline A_P , J
-80	$17,6 \pm 1,3$	$5,1 \pm 0,9$	$12,5 \pm 2,1$
-60	$20,3 \pm 0,8$	$5,5 \pm 0,7$	$14,8 \pm 0,1$
-40	$32,3 \pm 1,3$	$11,2 \pm 1,6$	$21,1 \pm 0,9$
+20	$87,7 \pm 22,9$	$48,5 \pm 22,0$	$39,2 \pm 0,9$

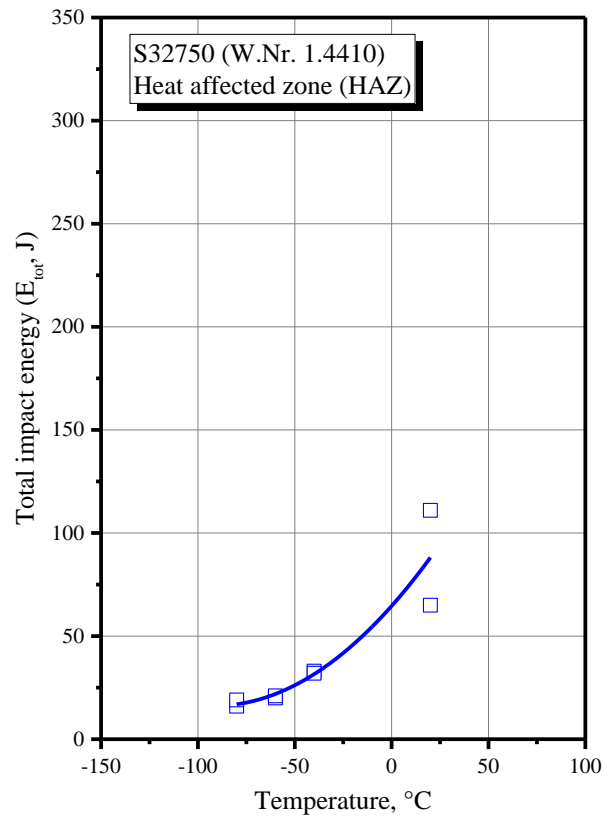
Na osnovu ovih rezultata možemo odrediti prelaznu temperaturu (eng. null ductility (transition) temperature - ND(T)T) što odgovara ukupnoj energiji udara od 27 J, a može se videti na Slici 6.11 gde su dijagramima prikazane relacije ukupne energije udara i temperature. Kako se može videti na Slici 6.11 (a) prelazna temperatura je $T_p = -110^\circ\text{C}$ za OM, dok je za MŠ -80°C (b) odnosno za ZUT -50°C (c).



(a)



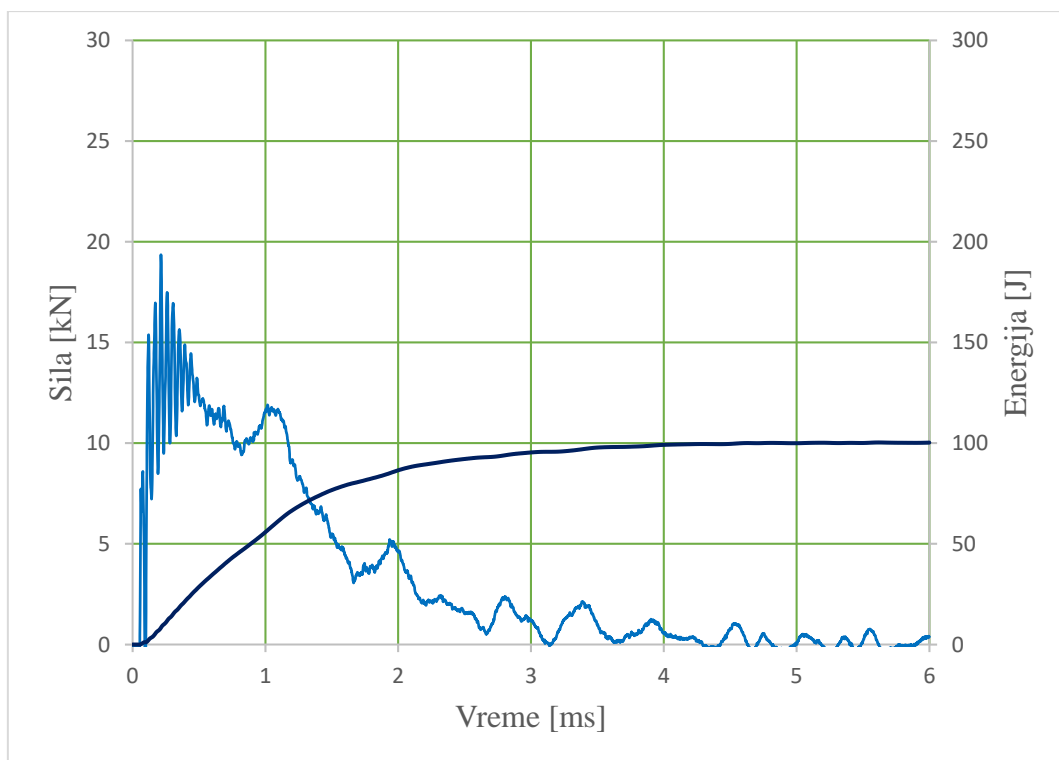
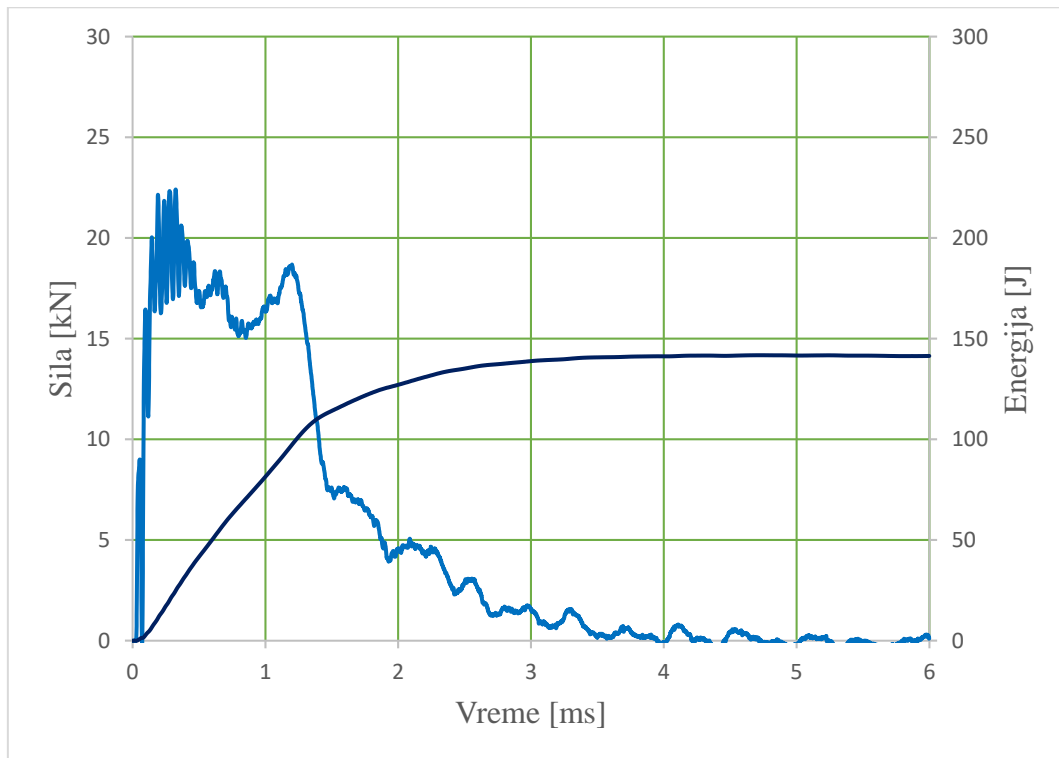
(b)



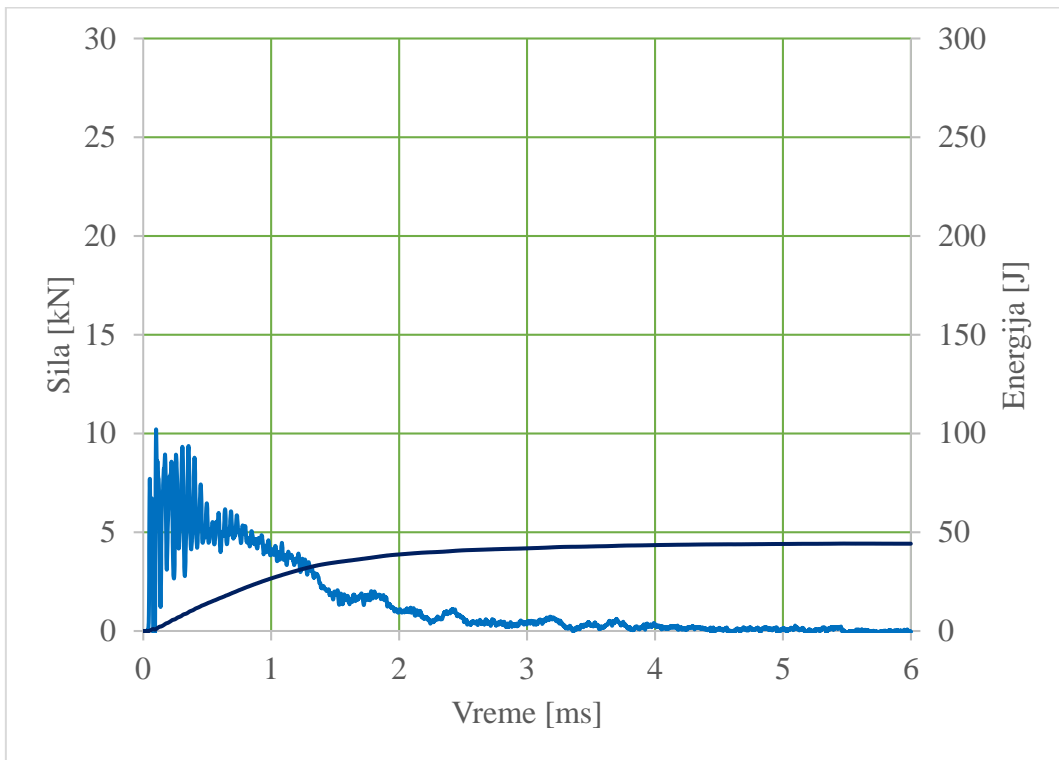
(c)

Slika 6.11: Dijagrami Energija udara – temperatura za: OM (a), MŠ (b) i ZUT (c).

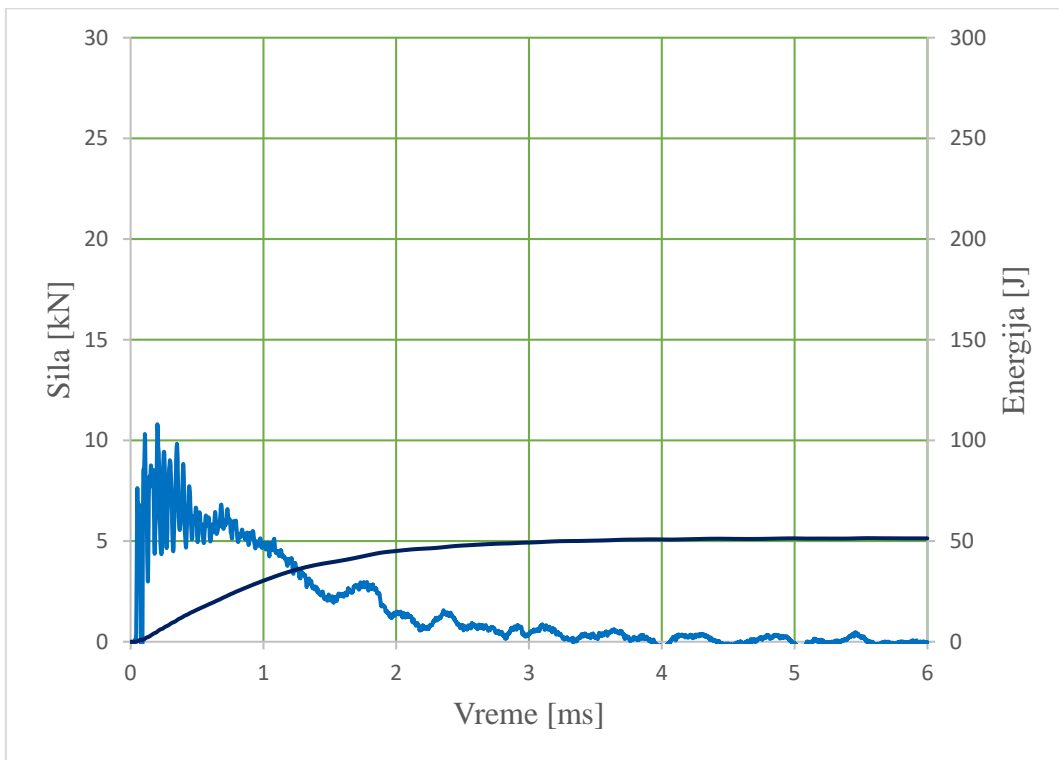
Rezultati merenja udarne žilavosti epruveta sa zamornom prslinom



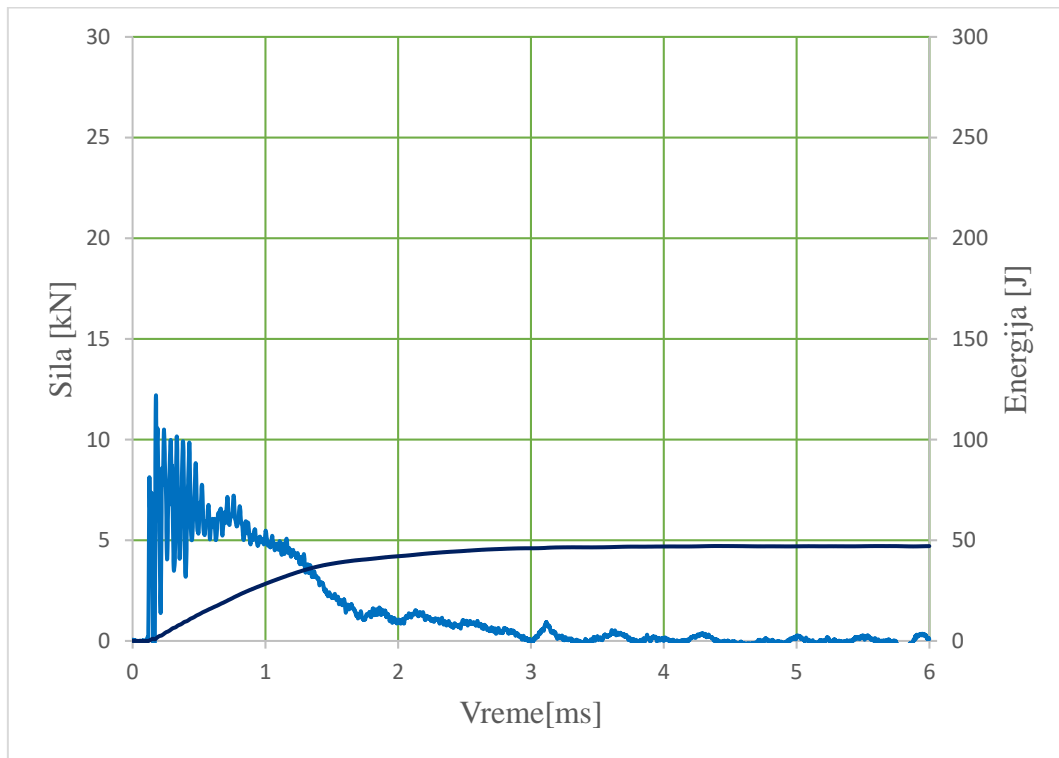
Slika 6.12: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke OM na temperaturi -40°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=3,15$ mm; b) $a=4,11$ mm



(a)

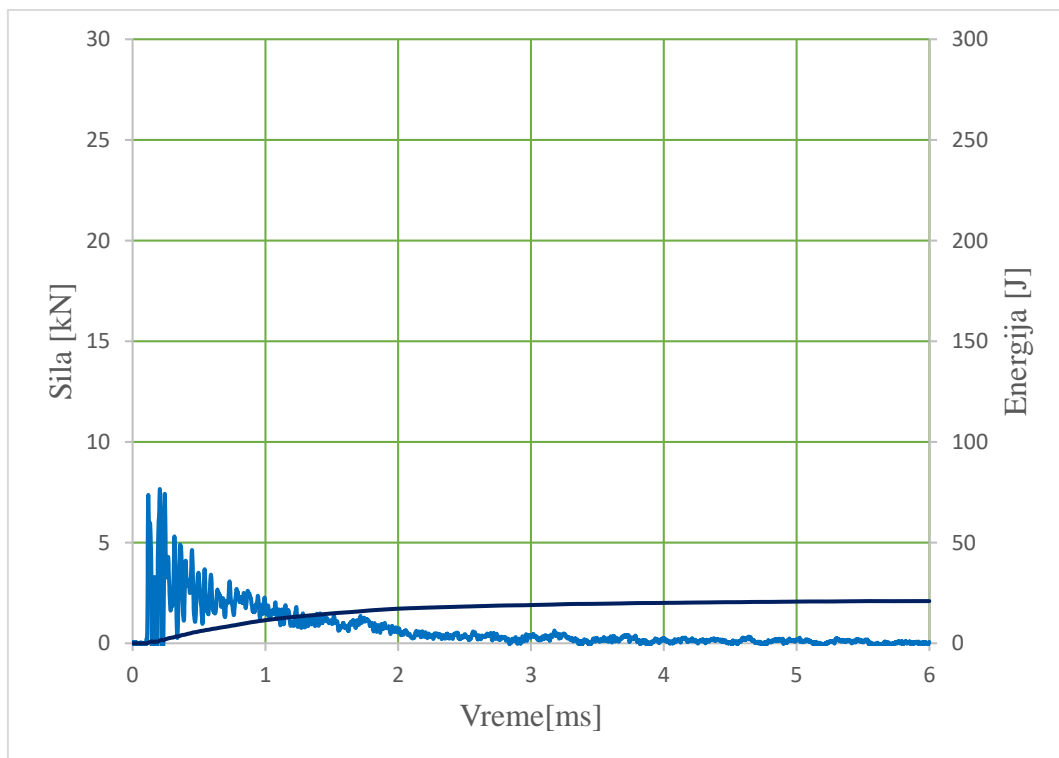


(b)

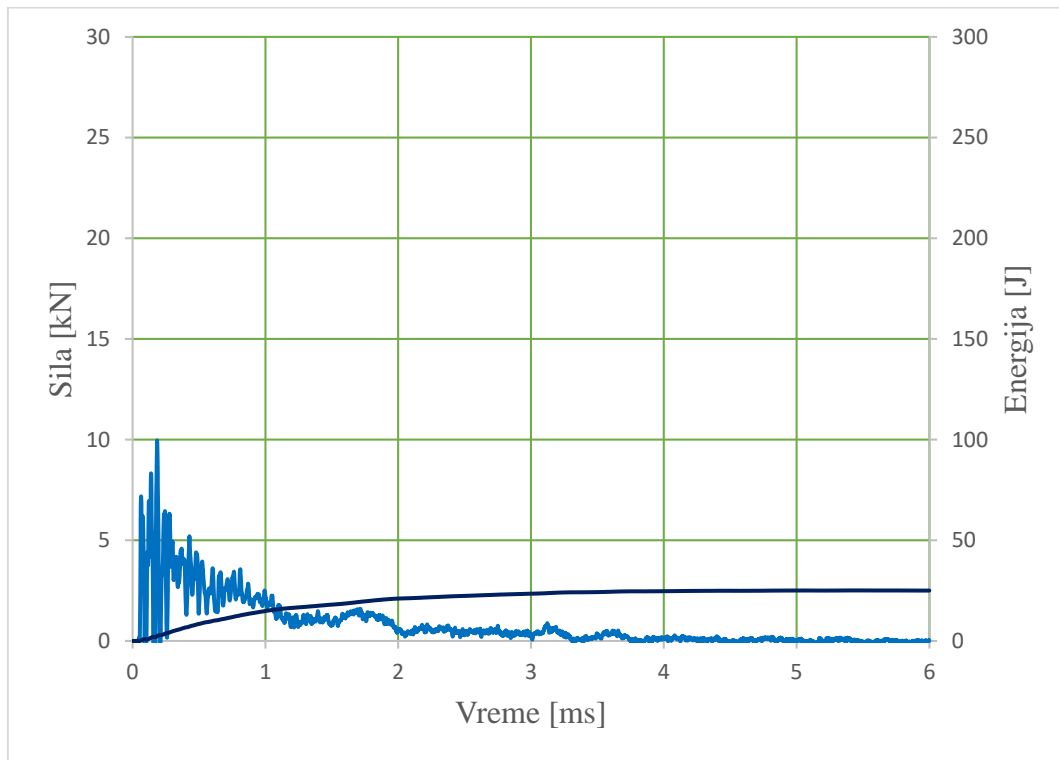


(c)

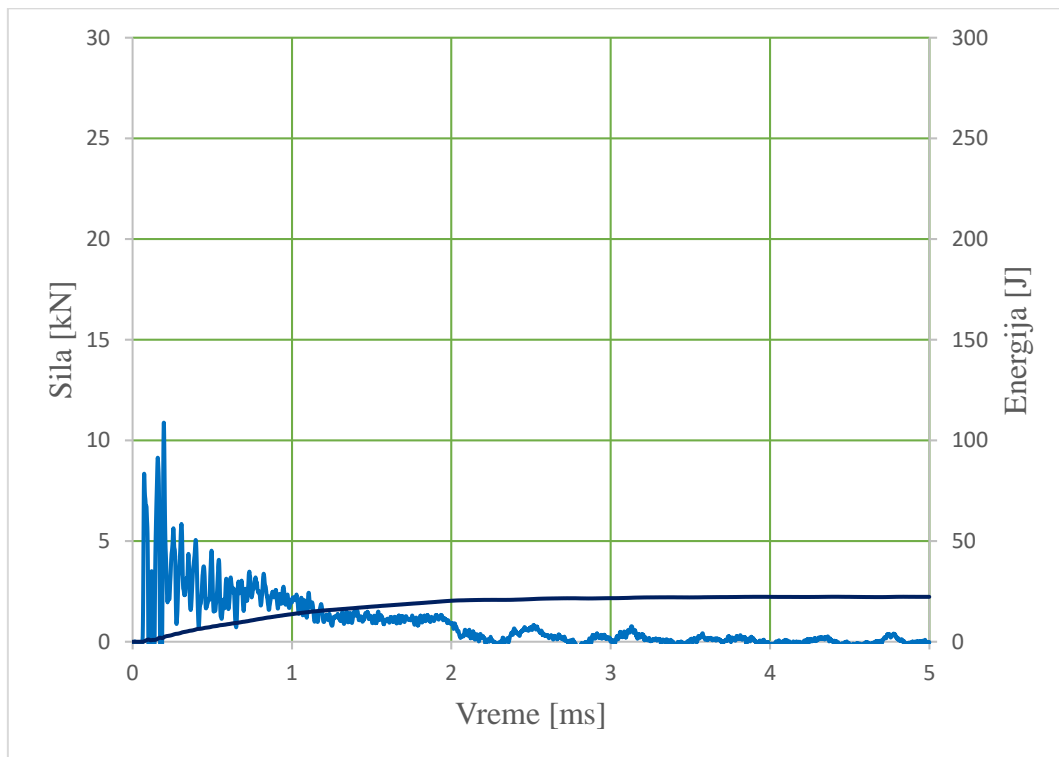
Slika 6.13: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke OM na temperaturi -60°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=6,32$ mm; b) $a=5,66$ mm; c) $a=6,02$ mm



(a)

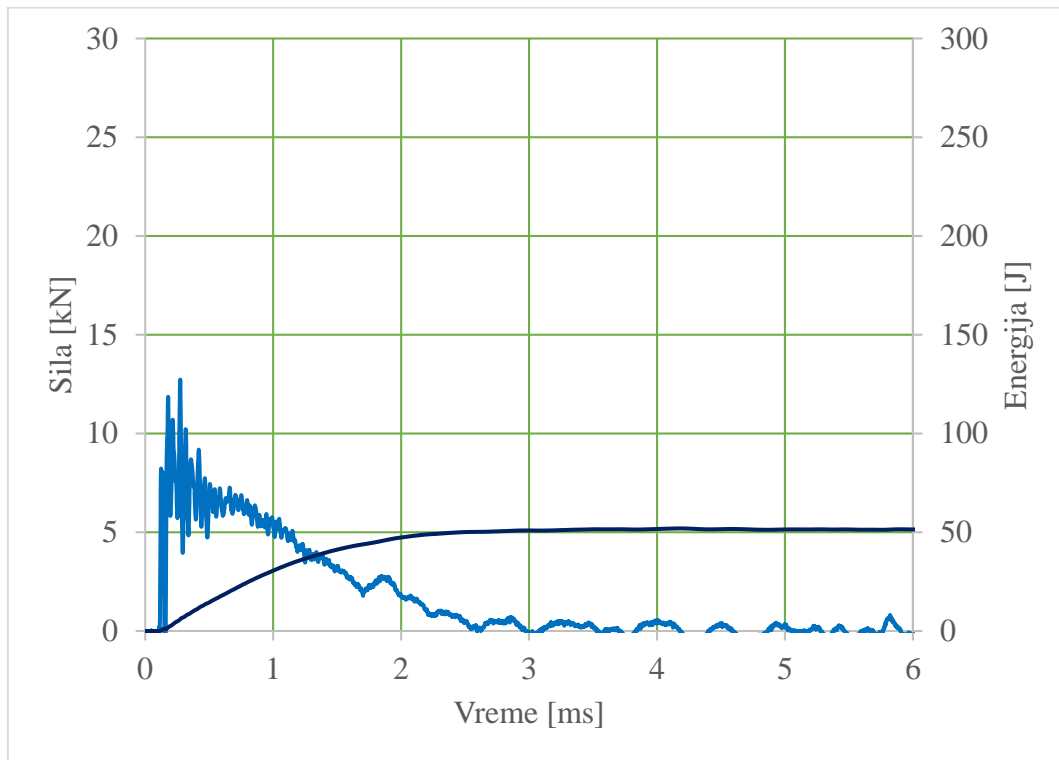


(b)

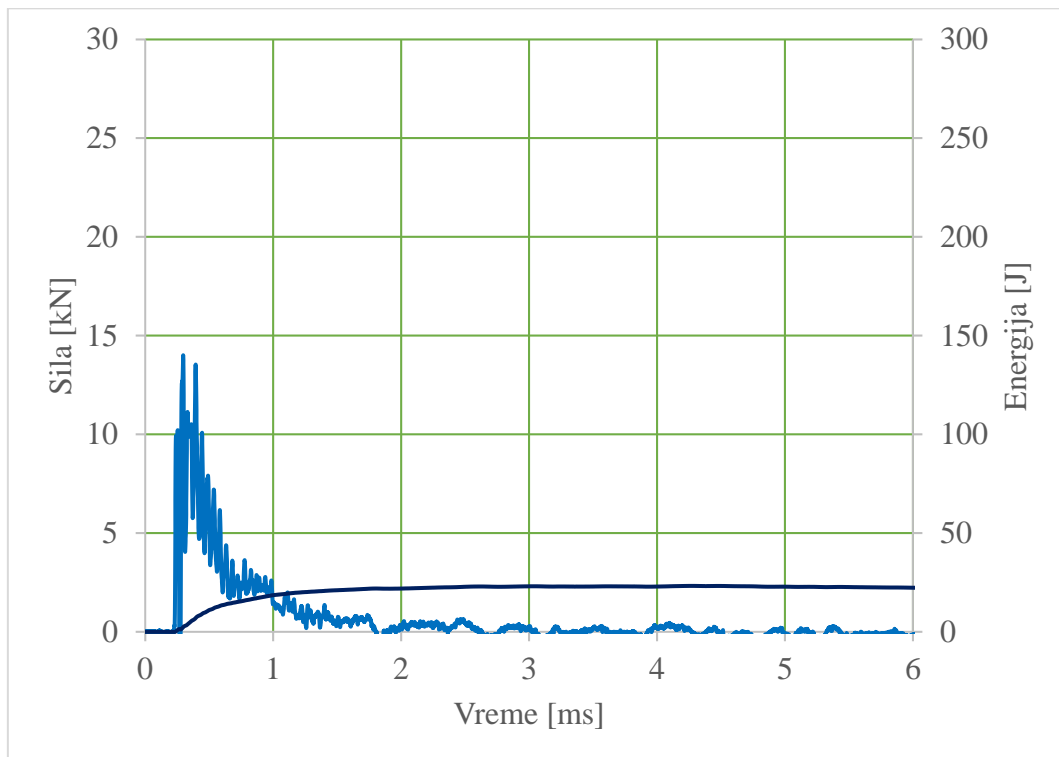


(c)

Slika 6.14: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke OM na temperaturi -80°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=7.51$ mm; b) $a=7.16$ mm; c) $a=7.41$ mm

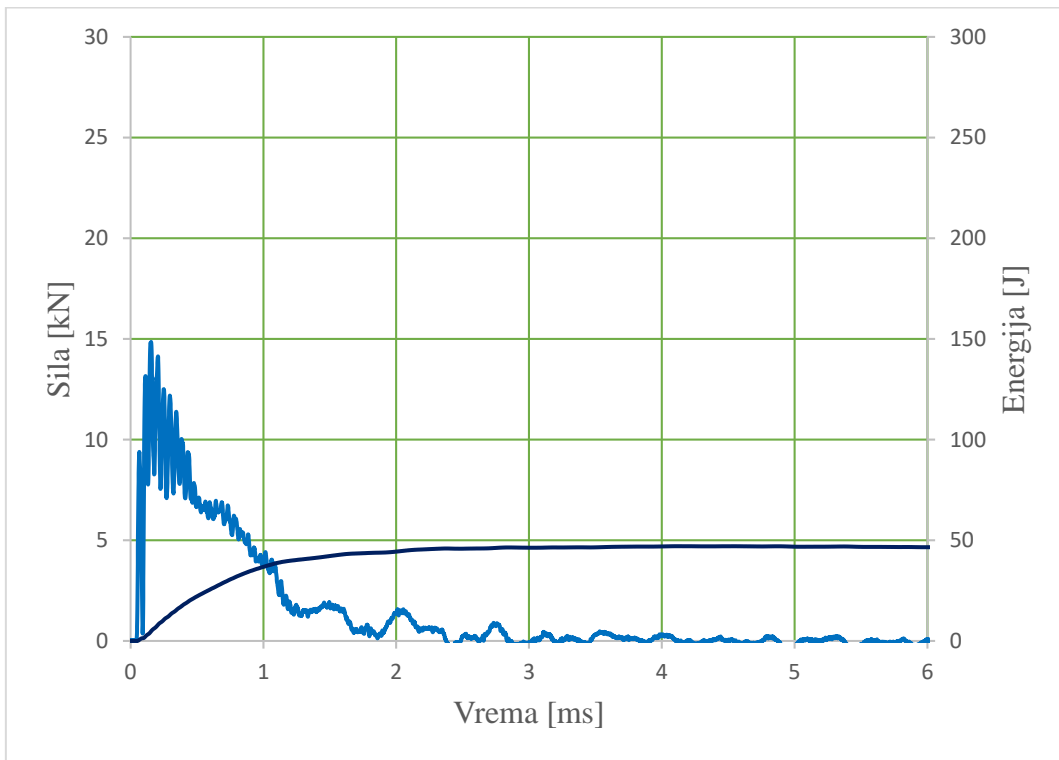


(a)

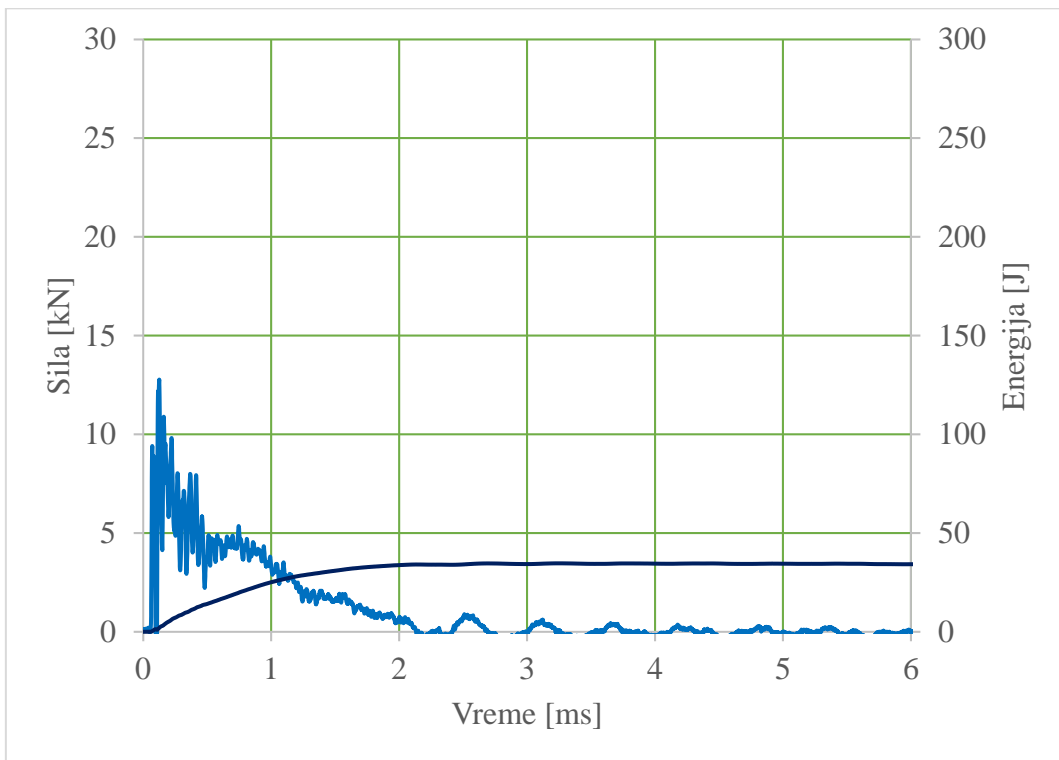


(b)

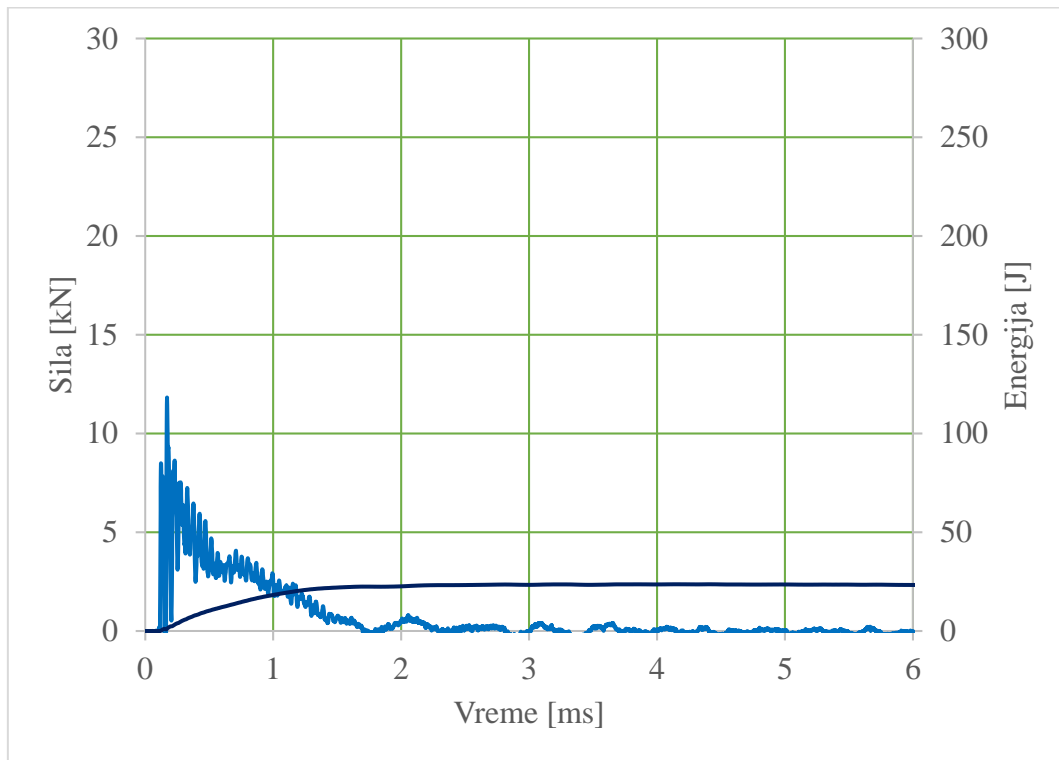
Slika 6.15: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke MŠ temperaturi -40°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=5,31$ mm; b) $a=5,04$ mm



(a)

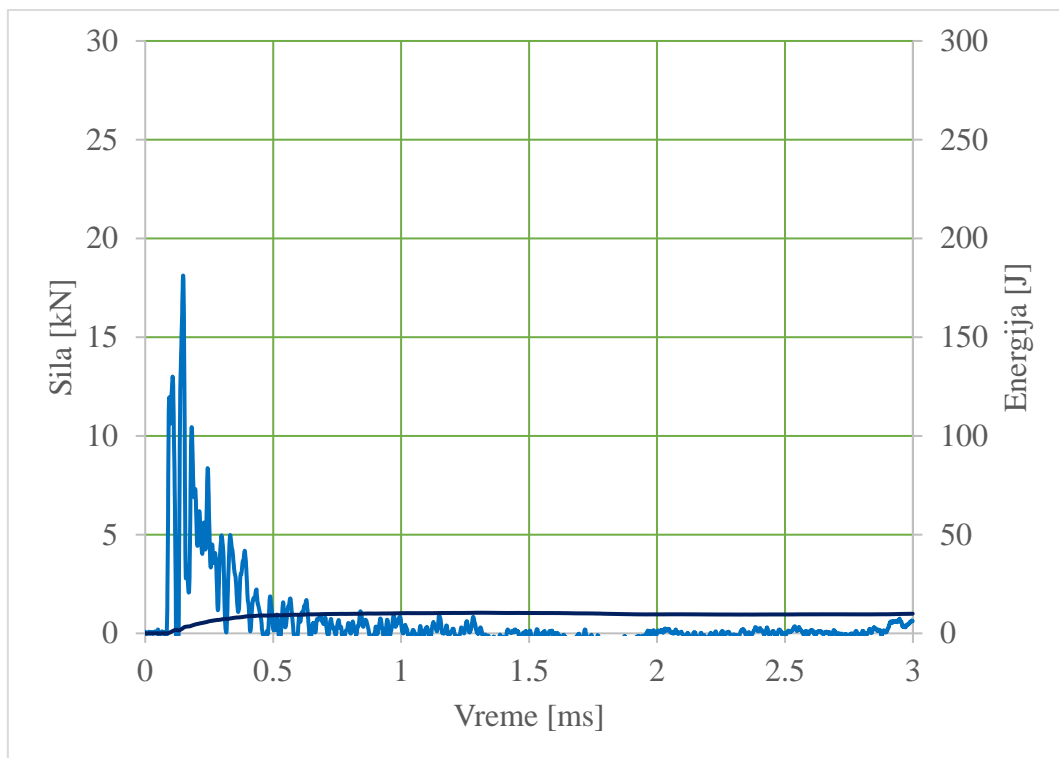


(b)

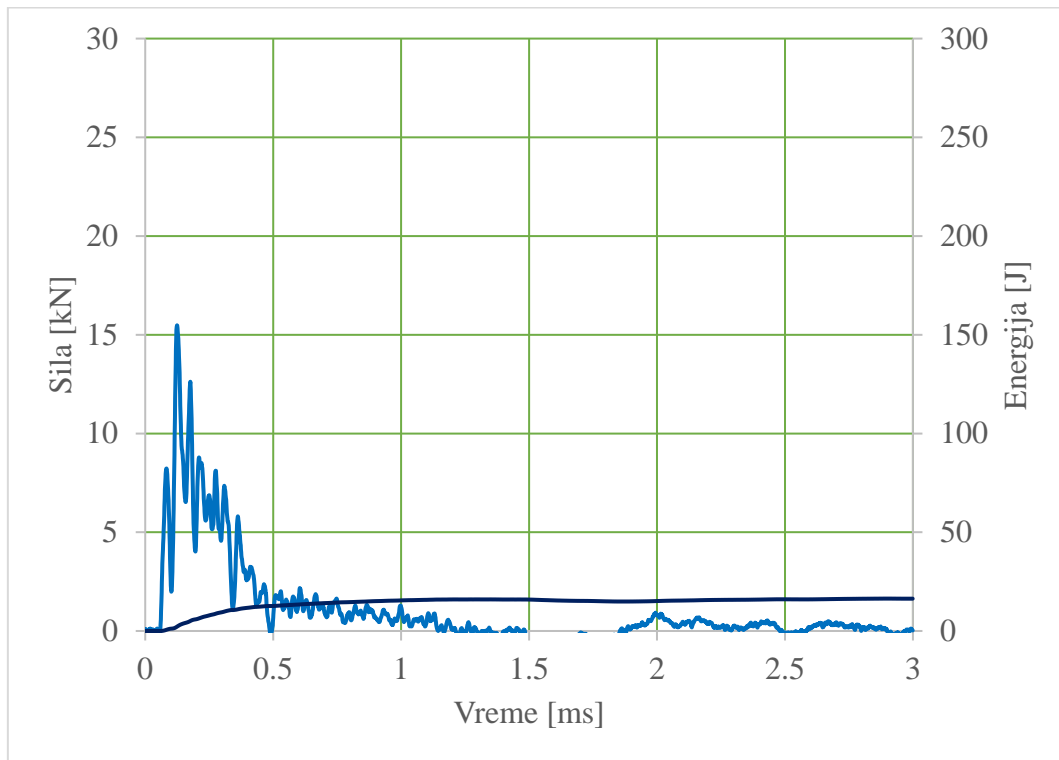


(c)

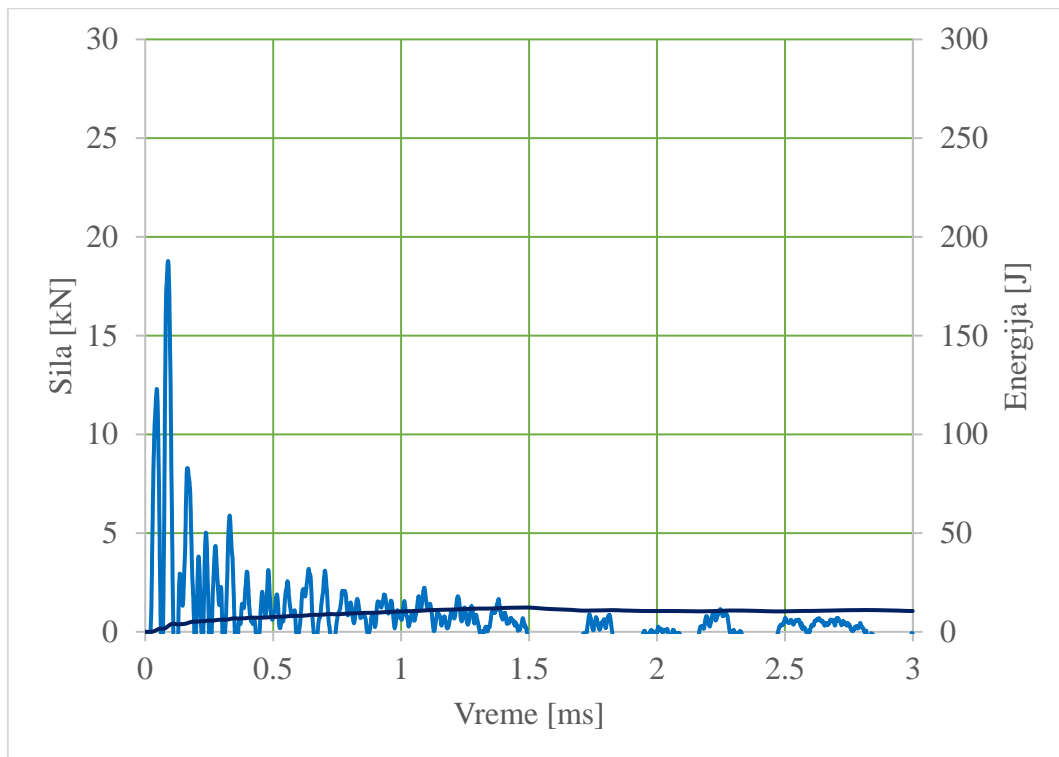
Slika 6.16: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke MŠ na temperaturi -60°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=4,08$ mm; b) $a=5,62$ mm; c) $a=6,01$ mm



(a)

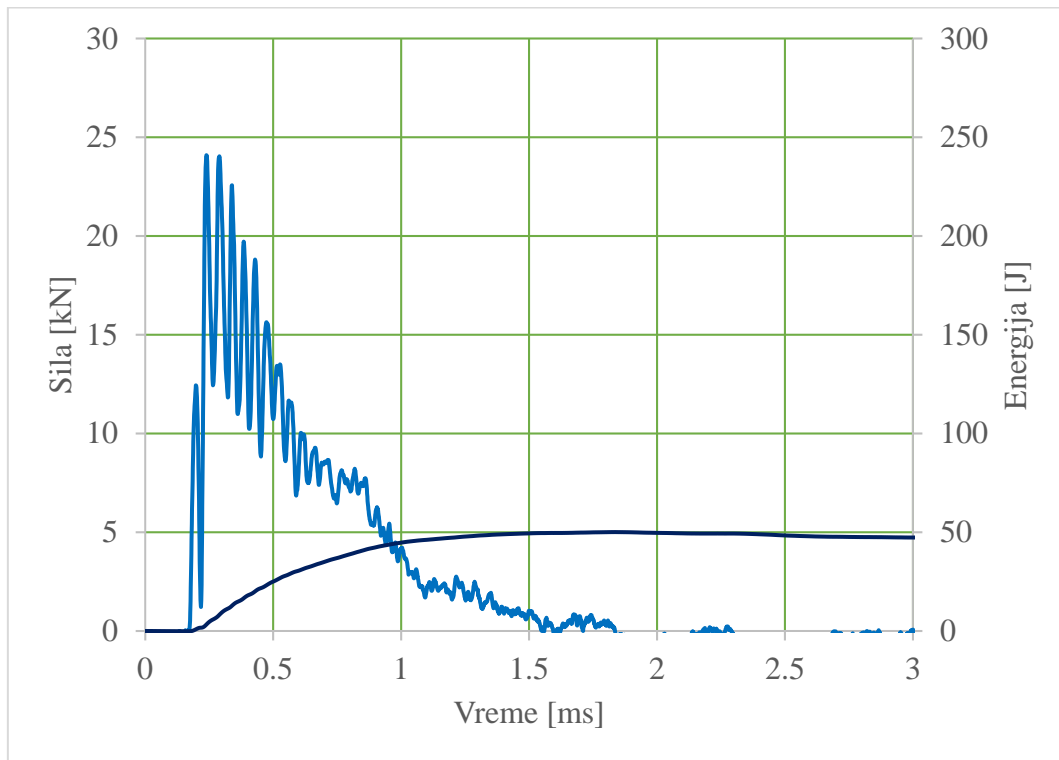


(b)

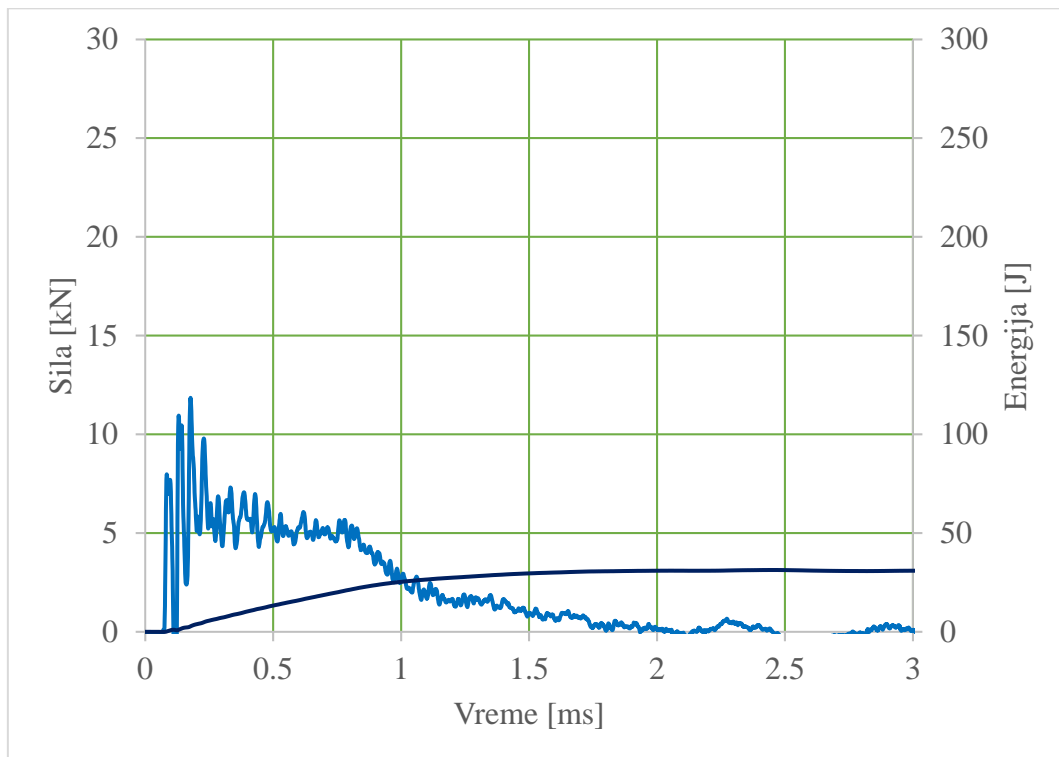


(c)

Slika 6.17: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke MŠ na temperaturi -80°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=4,85$ mm; b) $a=4,44$ mm; c) $a=5,74$ mm

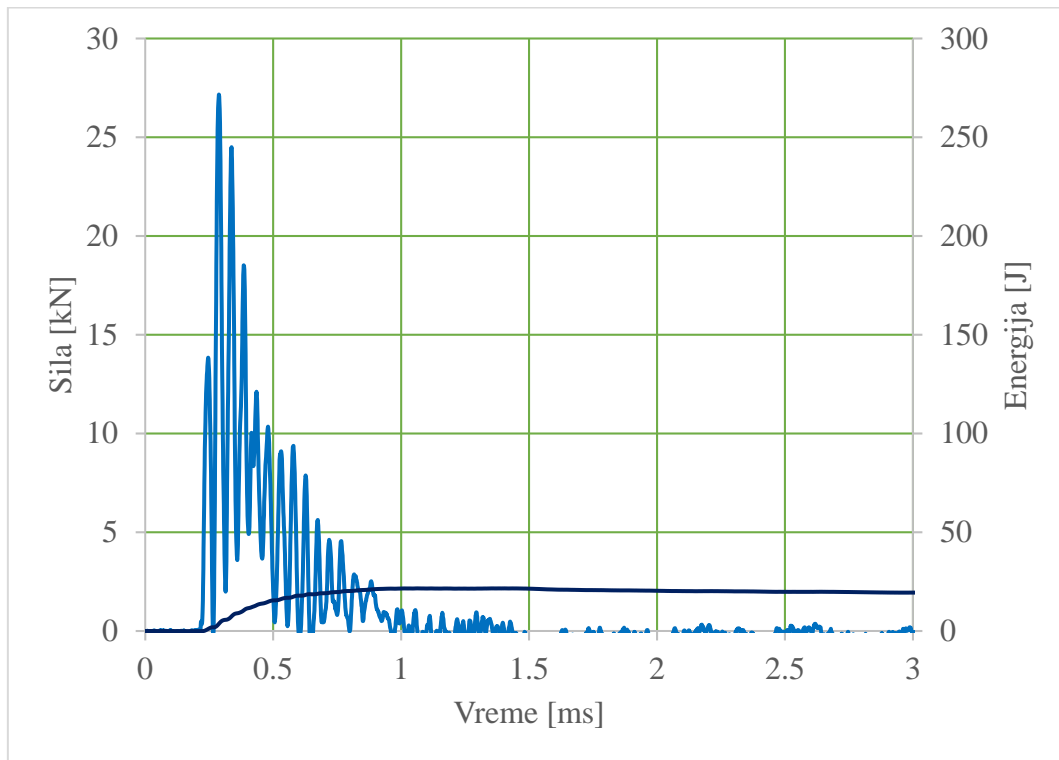


(a)

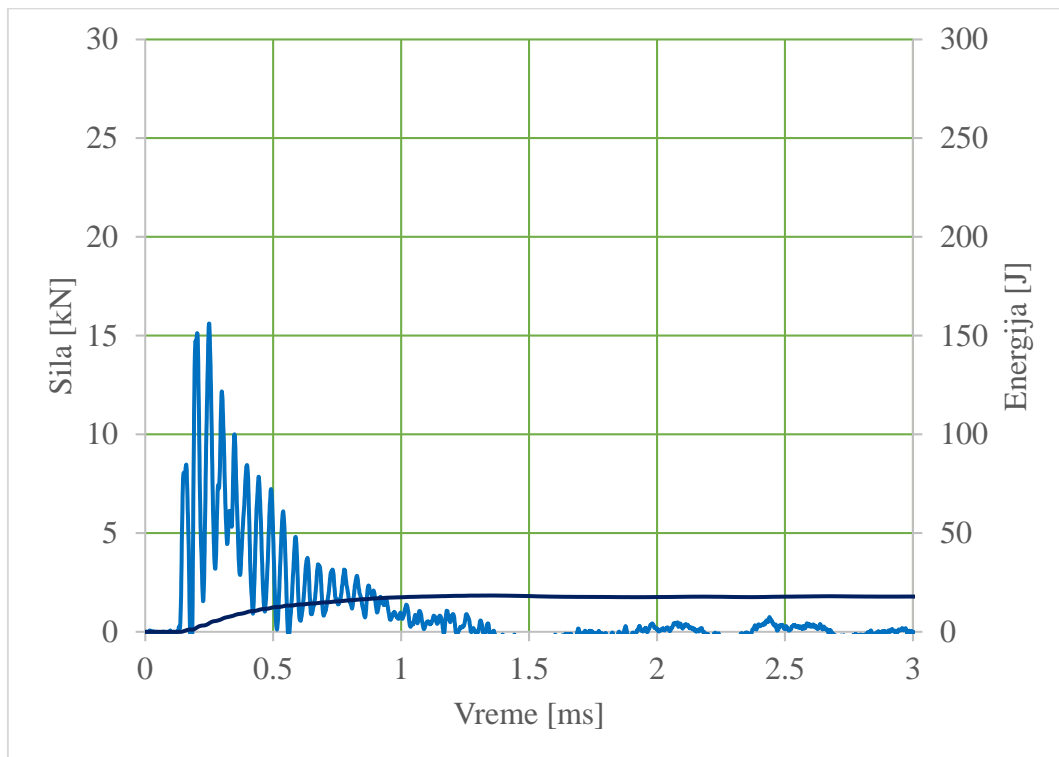


(b)

Slika 6.18: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke ZUT na sobnoj temperaturi, sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=4,10$ mm; b) $a=5,77$ mm

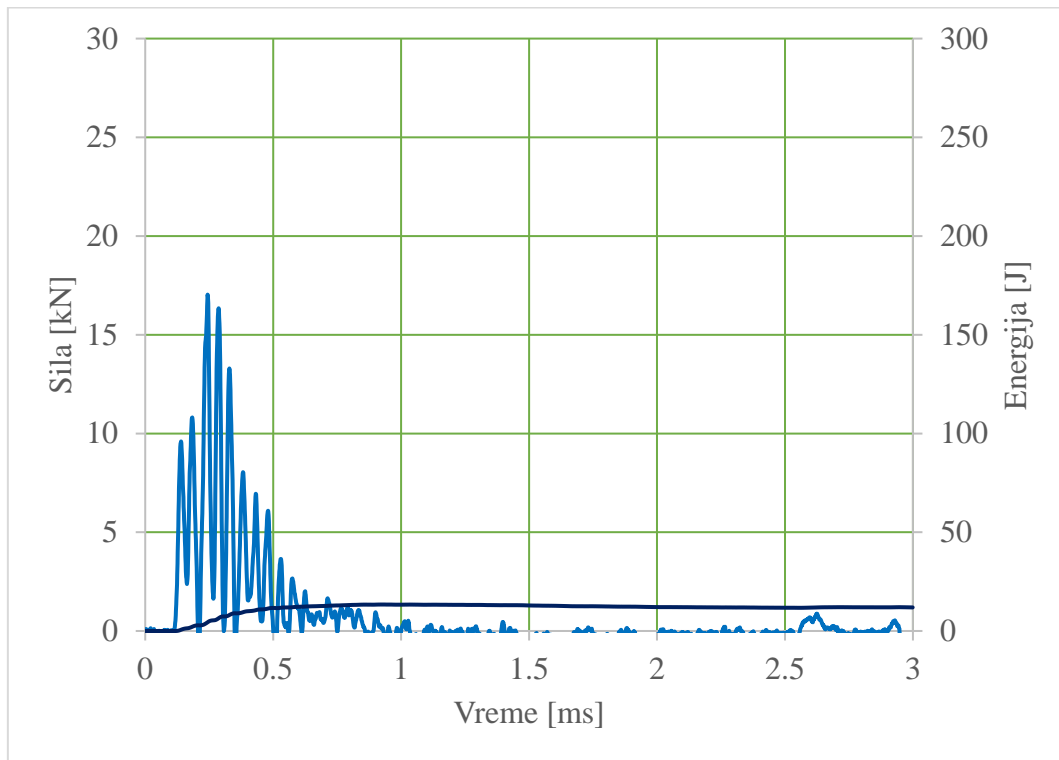


(a)

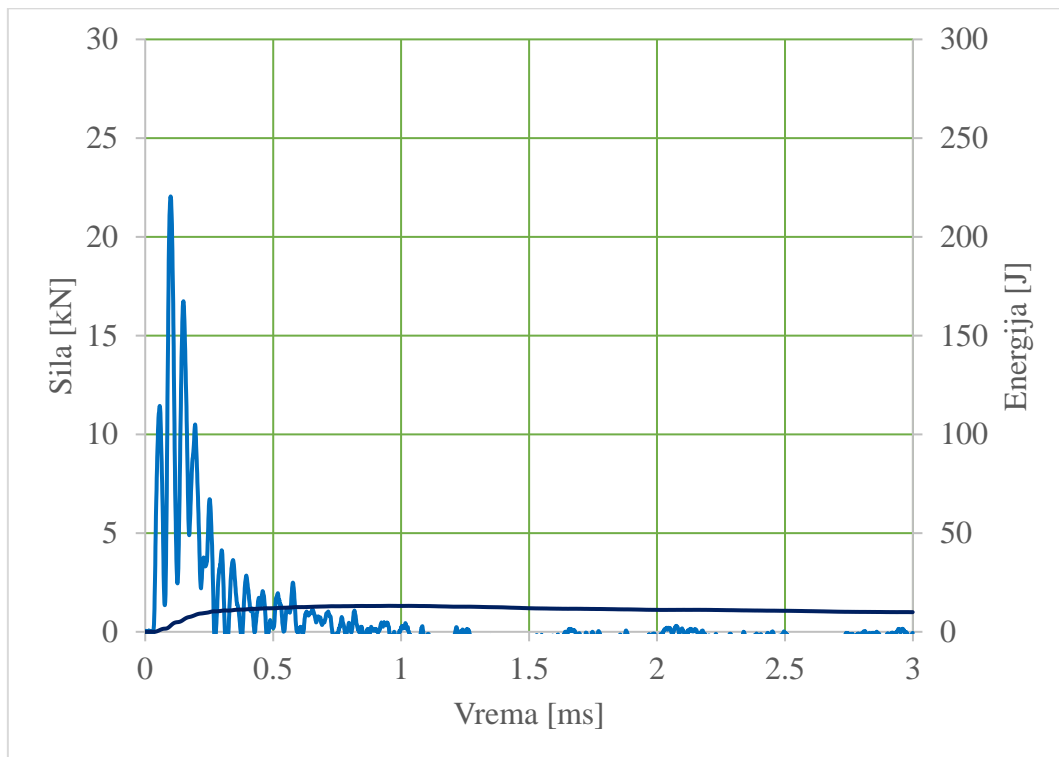


(b)

Slika 6.19: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke ZUT na temperaturi -40°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=4,50$ mm; b) $a=5,12$ mm

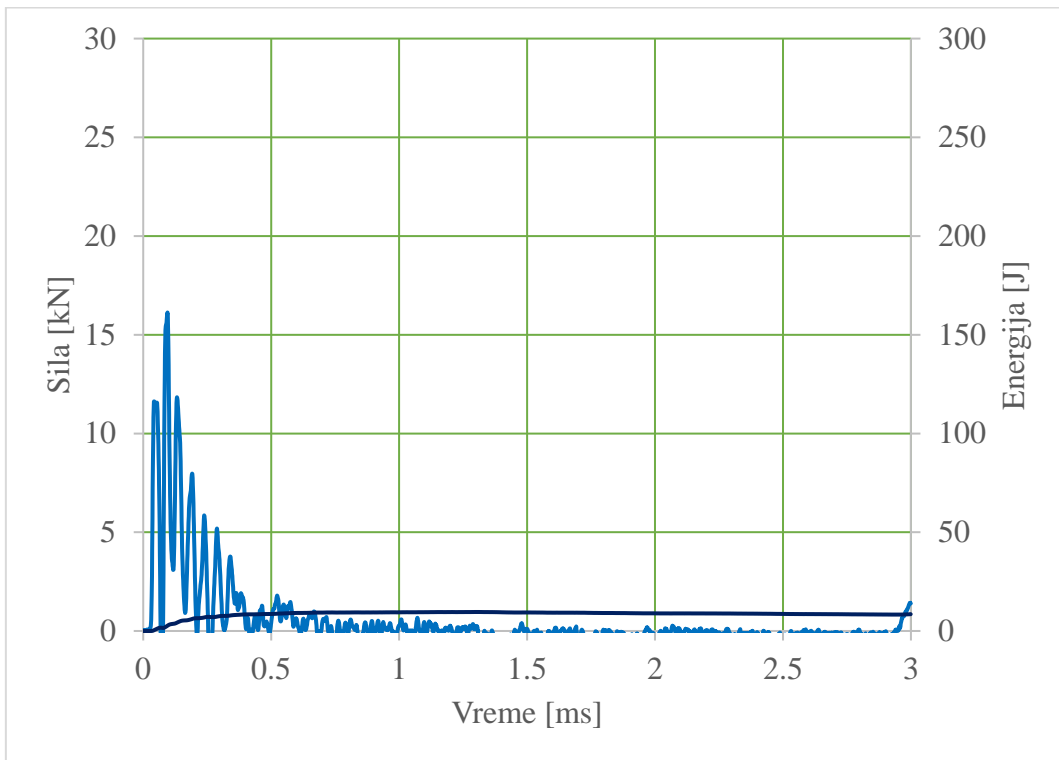


(a)

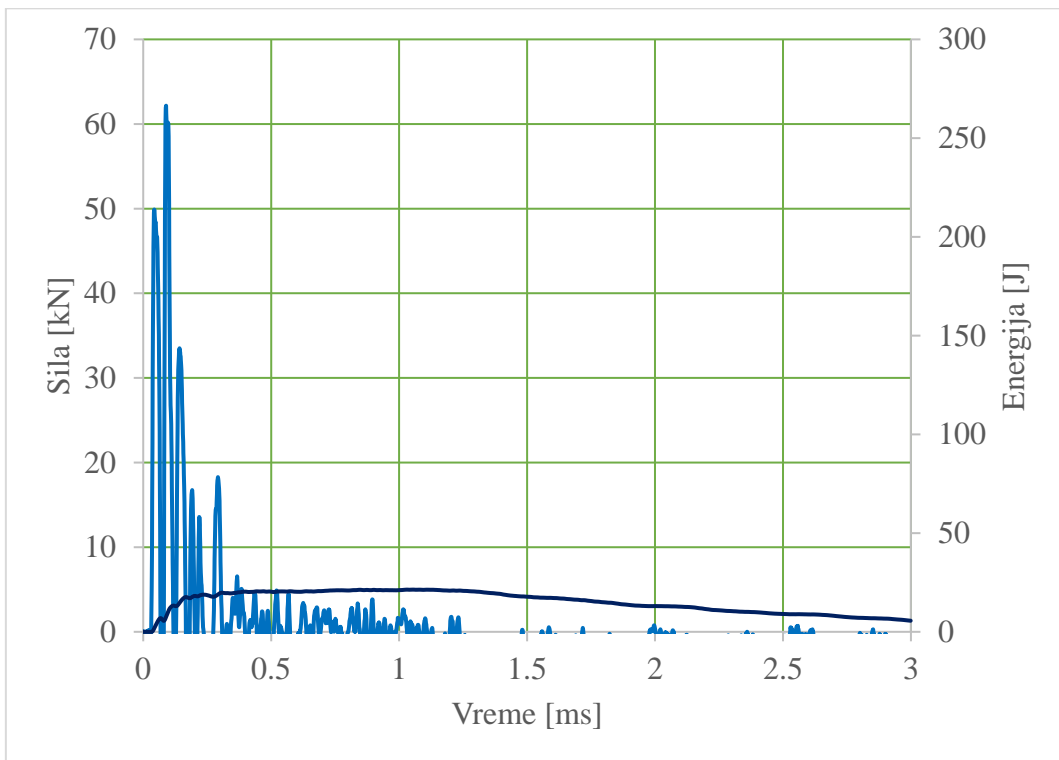


(b)

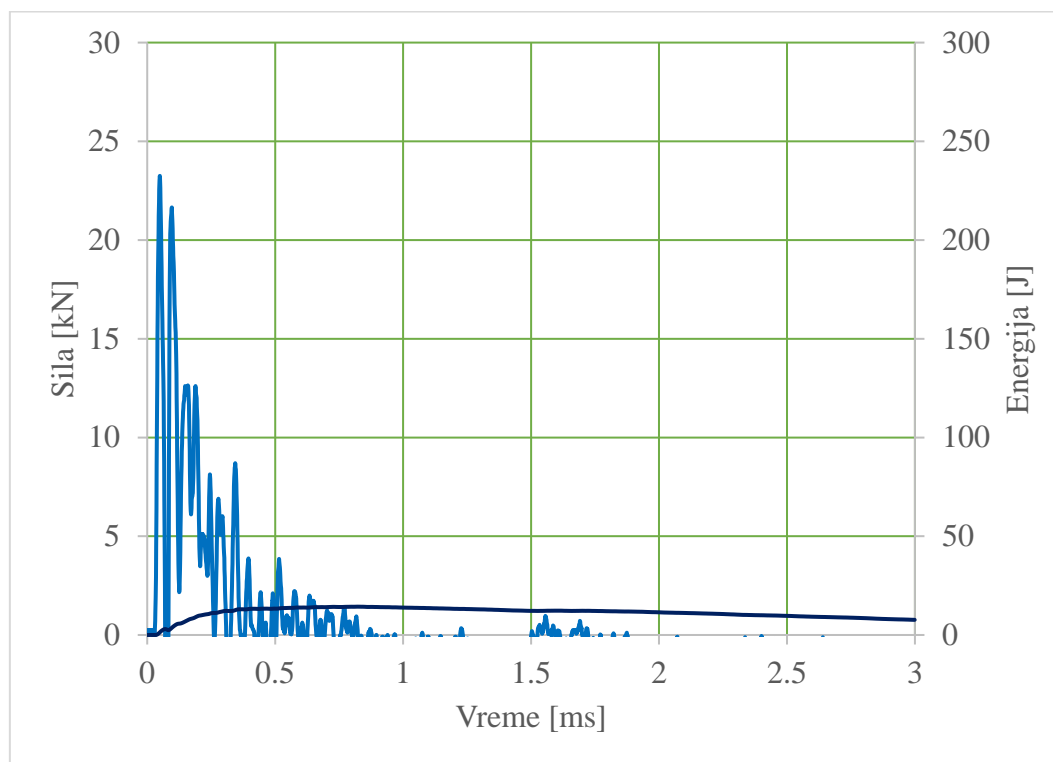
Slika 6.20: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke ZUT na temperaturi -60°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=5,03$ mm; b) $a=4,99$ mm



(a)



(b)



(c)

Slika 6.21: Dijagrami Sila-vreme i Energija-vreme za uzorke ZUT na temperaturi -80°C , sa različitim dužinama zamornih prslina a) $a=4,80$ mm; b) $a=5,66$ mm; c) $a=6,18$ mm

Rezultati dobijeni ispitivanjem Šarpi epruveta sa dodatnom zamornom prslinom su predviđeni za dalju obradu u cilju dobijanja parametara mehanike loma u skladu sa standardom ASTM 1820 (vidi tabelu 3.1). Prema klasifikaciji navedenoj u standardu po obliku dijagrama dobijenih ispitivanjima (Slika 3.4) ispitani uzorci pripadaju grupi Tip I, sa linearno elastičnim ponašanjem materijala. Uslov za dalju obradu podataka, postavljen navedenim standardom, je da vreme za nastajanje nestabilnog loma t_f mora biti manje od minimalnog vremena ispitivanja t_w , pri čemu se ono dobija po formuli:

$$t_w = \frac{2\pi}{\sqrt{k_s/M_{eff}}} \quad (6.1)$$

Gde su:

k_s – krutost uzorka na pravcu uvođenja opterećenja (N/m)

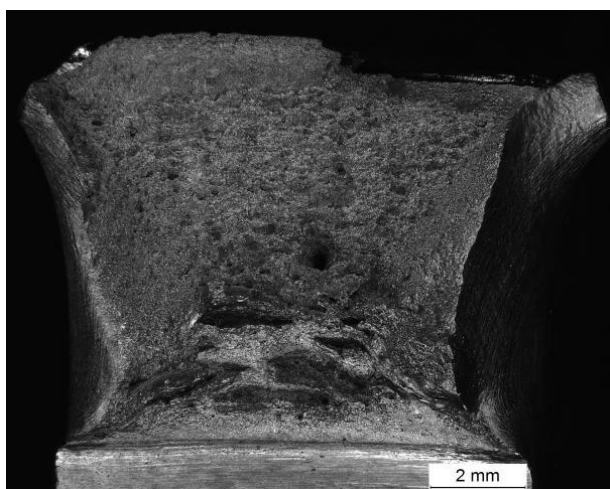
M_{eff} – efektivna masa uzorka, a iznosi polovinu ukupne mase uzorka (kg)

Izračunavanjem vrednosti po formuli 6.1 dolazi se do minimalnog vremena ispitivanja koje iznosi $t_w = 0,0005$ s = 0,5 ms. Kako je po standardu vreme za nastajanje nestabilnog loma t_f definisano na dijagramu položajem vršne vrednosti sile, očigledno je, na svim dijagramima prikazanim na slikama od 6.12 do 6.21, da nije ispunjen uslov $t_f > t_w$. Iz navedenog sledi da nije moguće izvršiti procenu žilavosti loma ovom metodom.

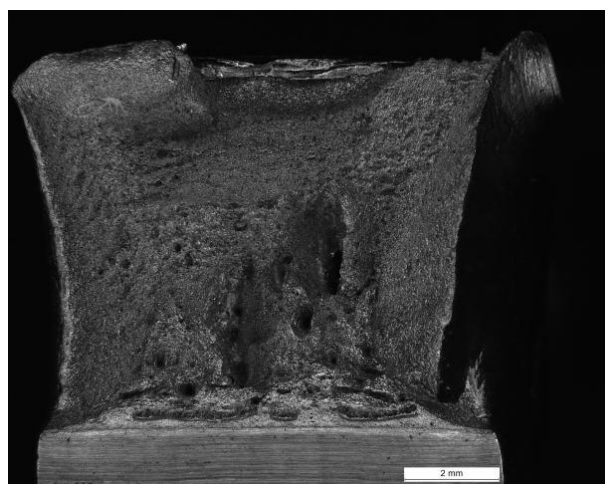
6.6 Pregled fraktografije

Makroskopski pogled prelomnih površina je prikazan na Slikama od 6.22 do 6.24 za OM, MŠ i ZUT, respektivno, za sve ispitne temperature. Po istom principu su prikazane fraktografske analize na Slikama od 6.25 do 6.27.

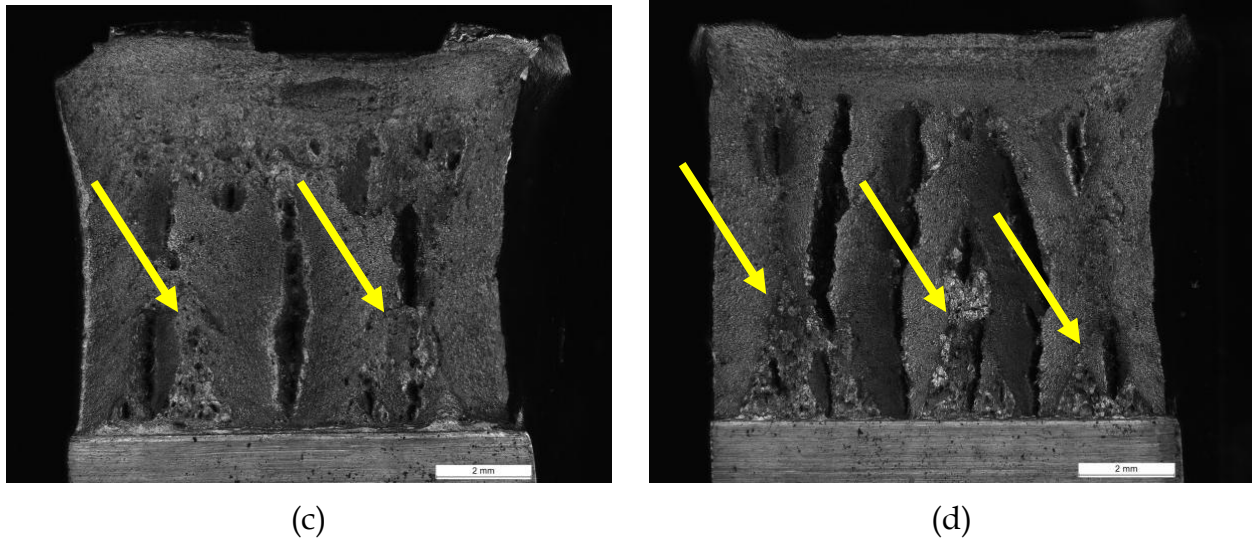
Osnovni metal: Prelomne površine uzoraka za ispitivanje udarne žilavosti koji su ispitani u temperaturnom opsegu od $+20\text{ °C}$ do -80 °C su prikazani na Slici 6.22. Posmatranjem makroskopski uzoraka osnovnog metala koji je ispitan na temperaturi $+20\text{ °C}$, uočavaju se izražene usne smicanja na obe strane površine loma uzoraka. Usne smicanja se takođe mogu videti i na ostalim uzorcima osnovnog metala koji su testirani, pa čak i na onima koji su ispitani na temperaturi -80 °C , ali je primetno da se smanjuju sa snižavanjem temperature. Duktilni jamičasti lom na prelomnim površinama je uočen na uzorcima ispitanim na svim temperaturama. U centru prelomne površine na uzorcima ispitanim na -40 °C pojavila se delaminacija i ta pojava je izraženija kako se ide ka nižim temperaturama. (-60 °C i -80 °C). Uočeno je da je delaminacija inicirana na vrhu zareza (Slika 6.22c,d) i prostire se upravno na pravac prostiranja glavne prsline. Na površini na vrhu zareza prisutne su duktilne jamice (Slika 6.22a) i trouglaste oblasti sa pretežno transkristalnim lomom, lomom cepanjem, označeno strelicama na Slici 6.22c i d i 6.25c pri većem povećanju. Ove karakteristike su još izraženije na uzorcima ispitanim na -80 °C (Slika 6.20d). [27]



(a)

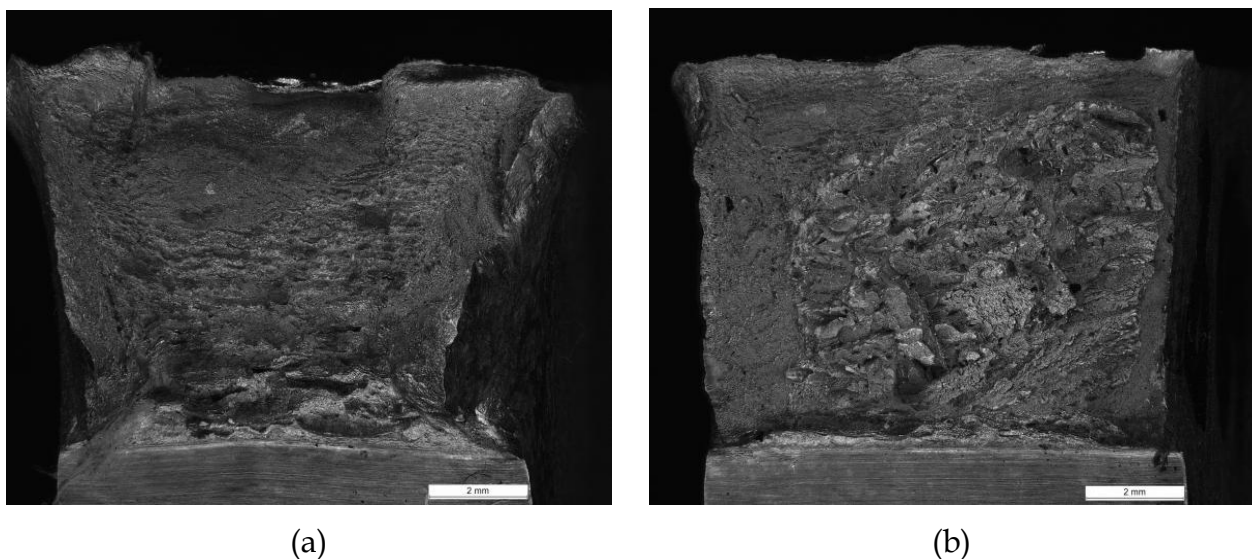


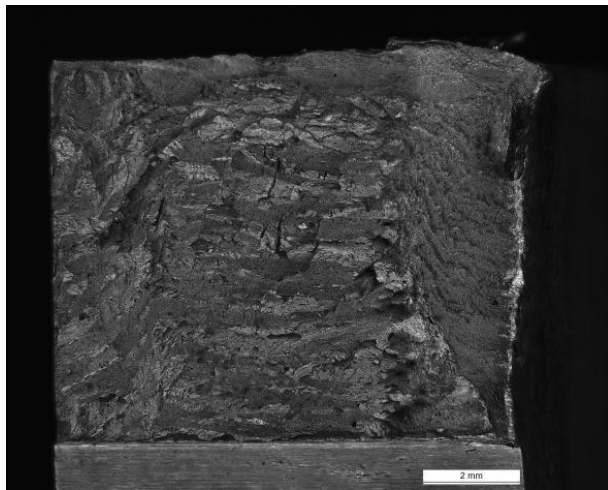
(b)



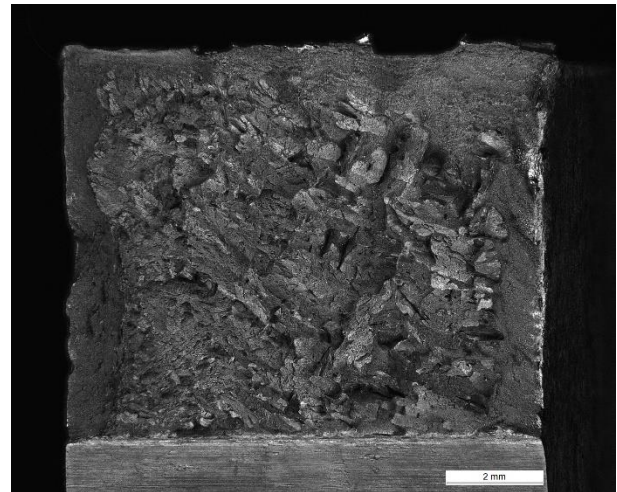
Slika 6.22: Prelomne površine uzoraka OM ispitivanih na temperaturama +20 °C (a), -40 °C (b), -60 °C (c) i -80 °C (d).

Metal šava: Površine preloma uzoraka za ispitivanje udarne žilavosti u opsegu temperatura od +20 °C do -80 °C su prikazane na Slici 6.23. Fotografije sa stereo mikroskopa ukazuju na postojanje usana smicanja na svim ispitnim temperaturama. Fotografije dobijene elektronskim mikroskopom (SEM) pokazuju da je površina preloma uzorka koji je ispitan na +20 °C prekrivena duktilnim jamicama. Uzorci koji su ispitivani na -80 °C pokazuju postojanje mešovitog loma, duktilnog jamičastog i krtoeg transkristalnog loma cepanjem (Slika 6.26).





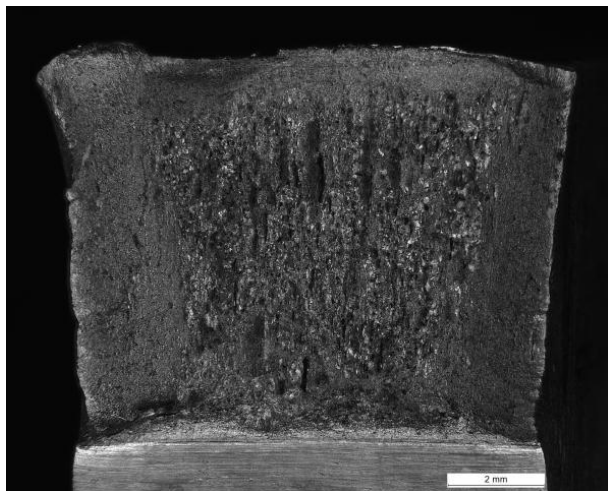
(c)



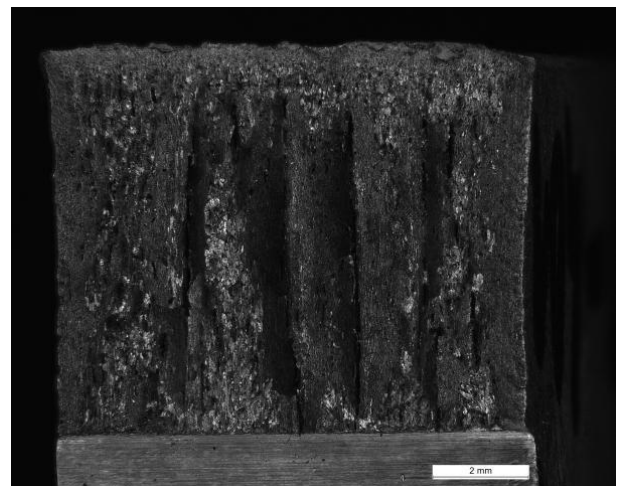
(d)

Slika 6.23: Prelomne površine uzoraka MŠ ispitivanih na temperaturama +20 °C (a), -40 °C (b), -60 °C (c) i -80 °C (d). °C.

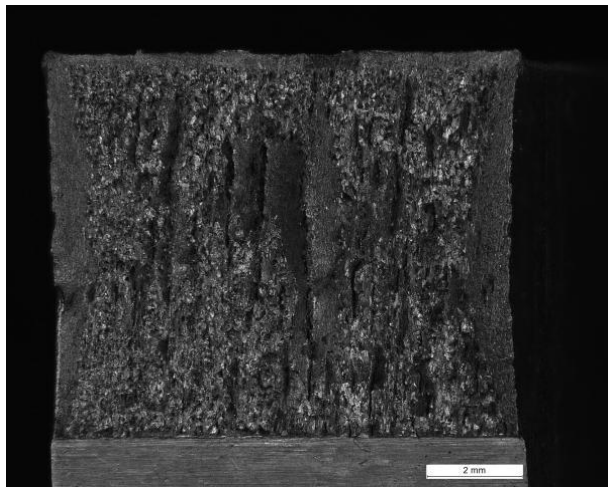
Usne smicanja se mogu primetiti i na ispitanim uzorcima kod kojih je vrh zareza bio pozicioniran u ZUT-u, a njihova širina se takođe smanjuje sa padom temperature, kao i kod prethodnih zona. Delaminacija je sve izraženija kod uzoraka ispitanih od -40 °C do -80 °C (Slika 6.24). U zoni propagacije prsline uočava se mešoviti lom i duktilni jamičasti na svim ispitnim temperaturama (Slika 6.24). Udeo krtoq loma cepanjem se povećava sa opadanjem temperature ispitivanja.



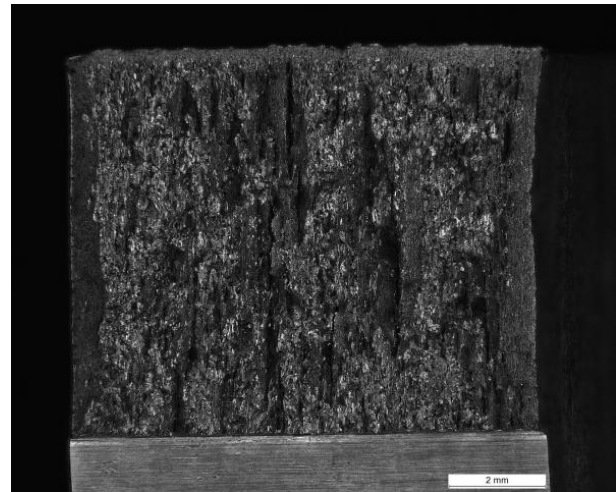
(a)



(b)

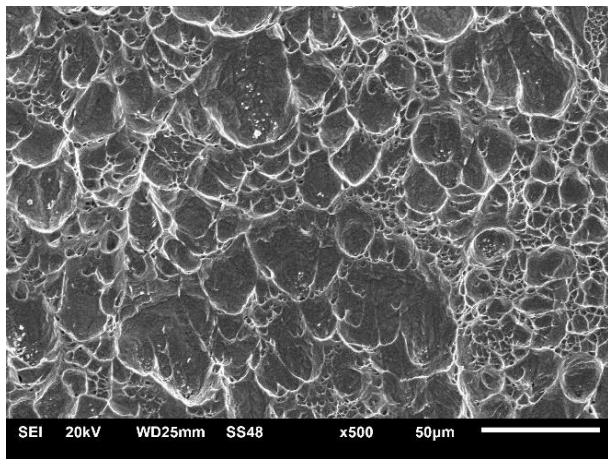


(c)

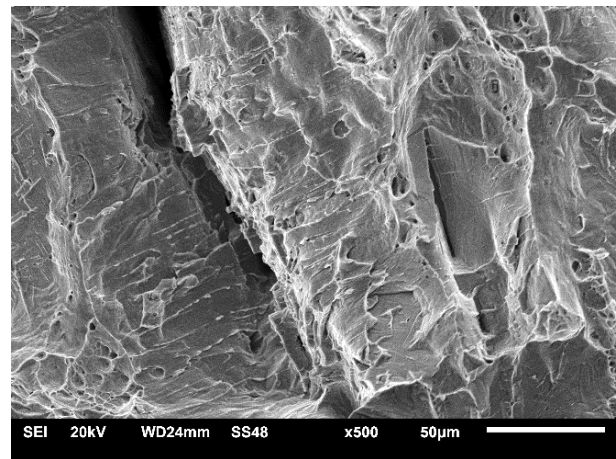


(d)

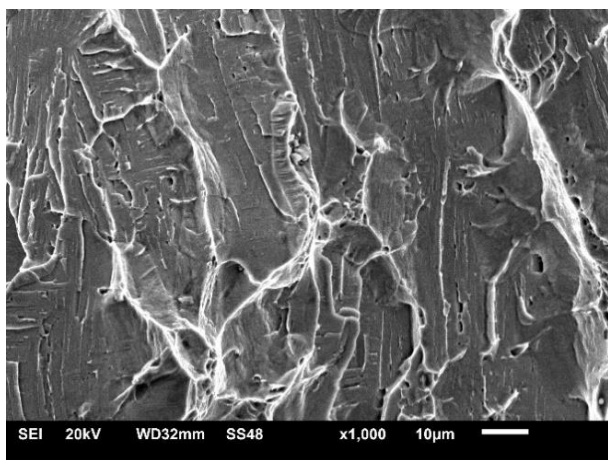
Slika 6.24: Prelomne površine uzoraka ZUT ispitanih na temperaturama +20 °C (a), -40 °C (b), -60 °C (c) i -80 °C (d).



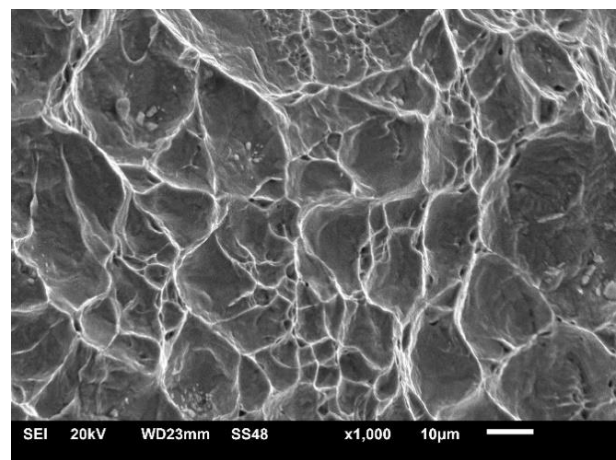
(a) duktilne jamice



(b) delaminacija

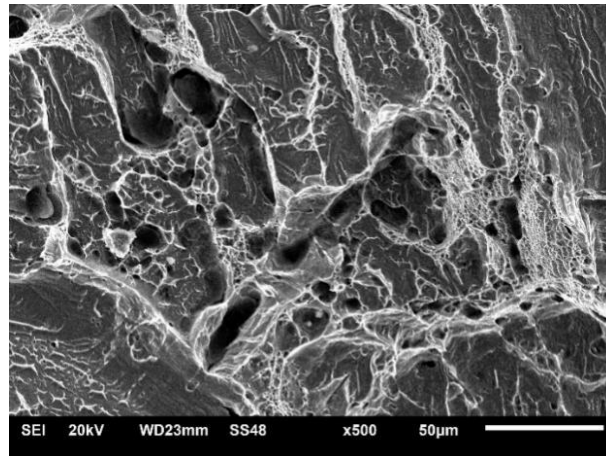


(c) trouglaste oblasti

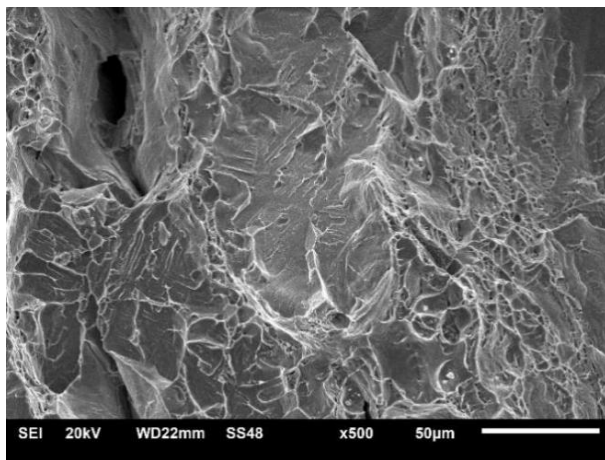


(d) oblast oko delaminacije

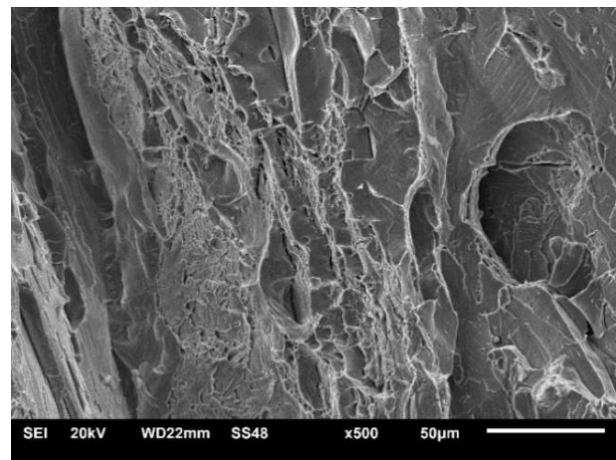
Slika 6.25: SEM mikrofotografije površina preloma osnovnog metala ispitanih na -80 °C.



Slika 6.26: Mešoviti lom u MŠ na -80 °C.



(a)



(b)

Slika 6.27: Mešoviti lom u ZUT-u: (a) +20 °C and (b) -80 °C.

6.7 Rezultati ispitivanja parametara rasta zamorne prslina zavarenog spoja

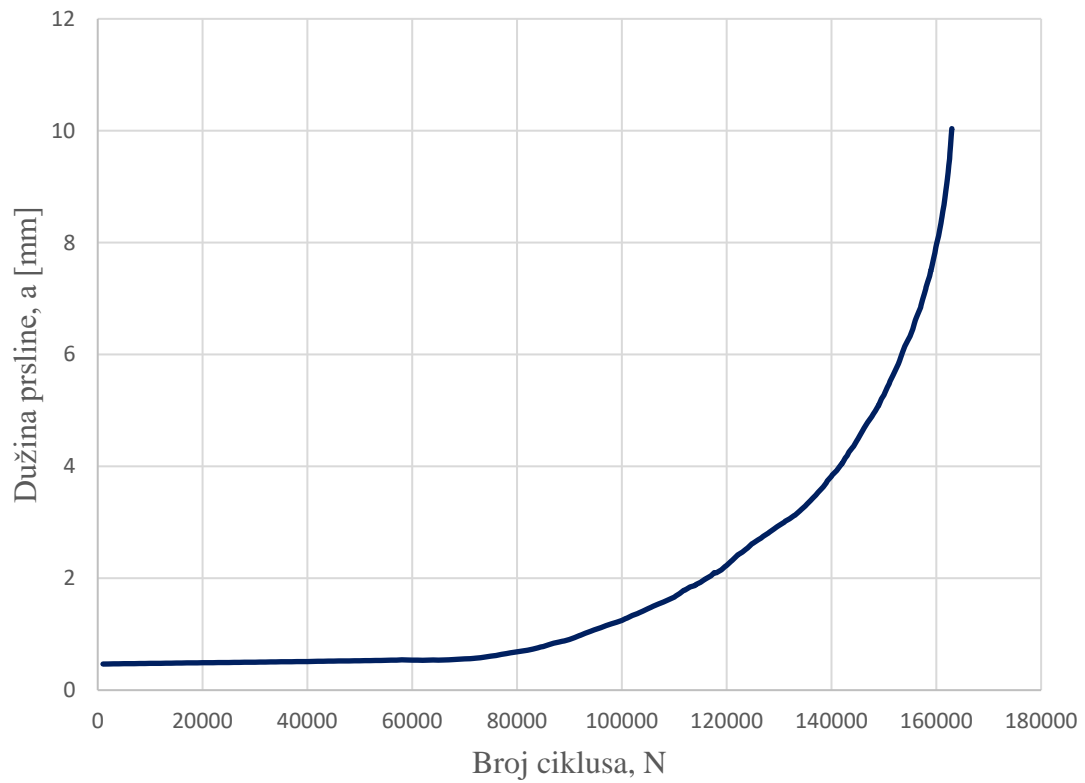
Na osnovu postavljene teorije linearno-elastične mehanike loma (LEML) formulisana je Parisova jednačina [74,75] za metale, oblika:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (6.2)$$

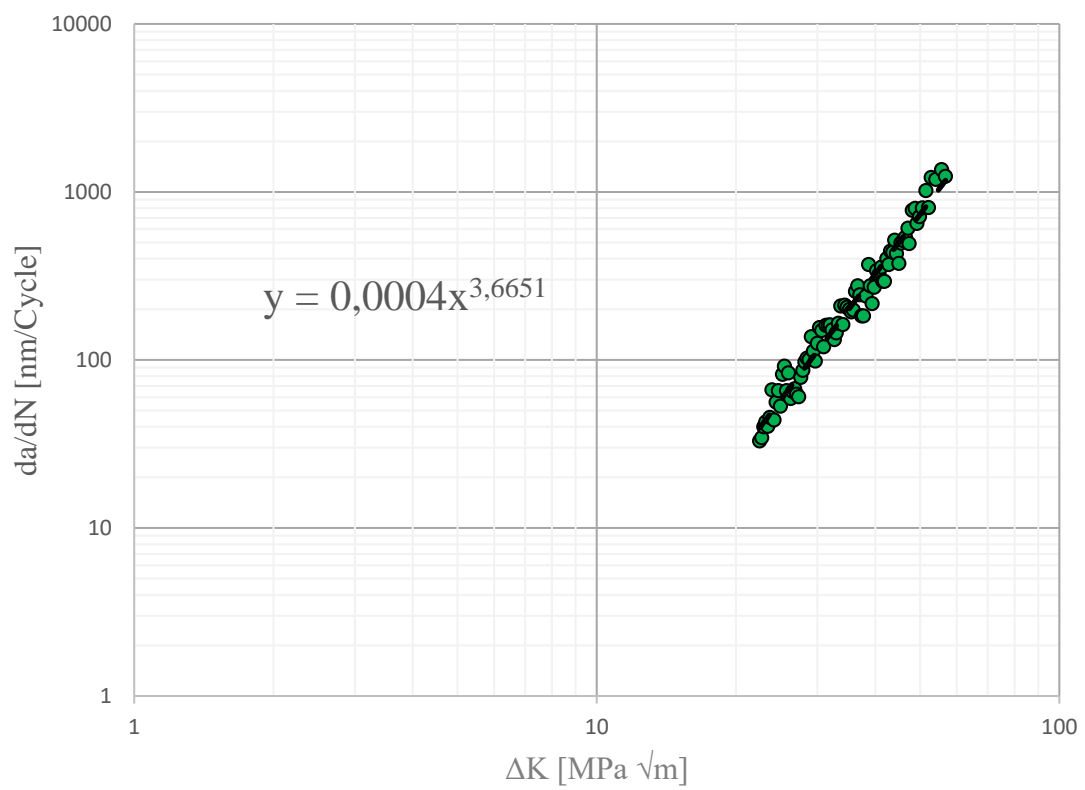
gde su C i m koeficijenti Parisove jednačine, a ΔK ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$) opseg faktora intenziteta napona. Mora se napomenuti da je opseg validnosti Parisove jednačine samo u zoni stabilnog rasta prslina koja se nalazi između zone male brzine rasta zamorne prslina, ograničene sa ΔK_{th} (prag zamora) i zone velike brzine rasta zamorne prslina definisane sa ΔK_c (kritična vrednost koja je povezana sa približavanjem K_{max} kritičnoj vrednosti žilavosti loma pri ravnoj deformaciji K_{Ic}).

Za određivanje brzine rasta prslina se koriste krive zavisnosti $a-N$ koje su za ispitane epruvete iz sve tri oblasti zavarenog spoja, OM, MŠ i ZUT, prikazane reprezentativnim dijagramima 6.28 (a), 6.29 (a) i 6.30 (a).

Iz izmerenih podataka dobijenih ispitivanjem programom RUMUL su dobijene zavisnosti brzine rasta prslina da/dN (mm/ciklusu) i opsega faktora intenziteta napona ΔK ($MPa\sqrt{m}$) za sve tri oblasti zavarenog spoja, OM, MŠ i ZUT, koje su prikazane dijagramima 6.28 (b), 6.29 (b) i 6.30 (b).

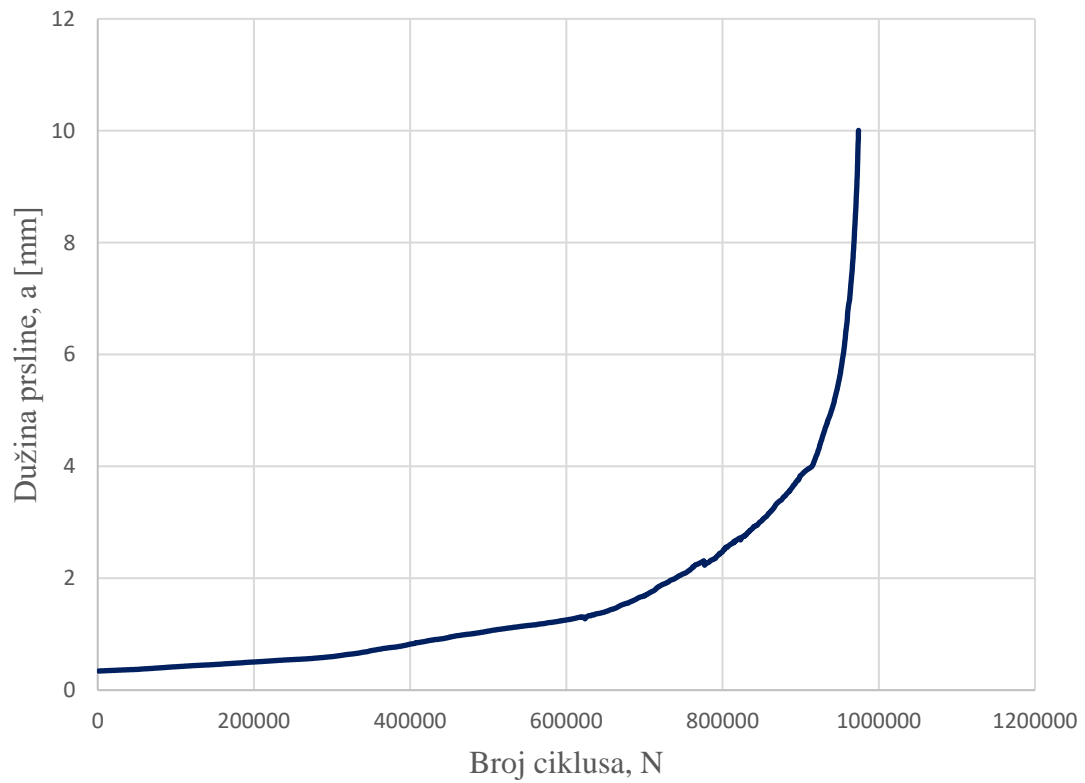


(a)

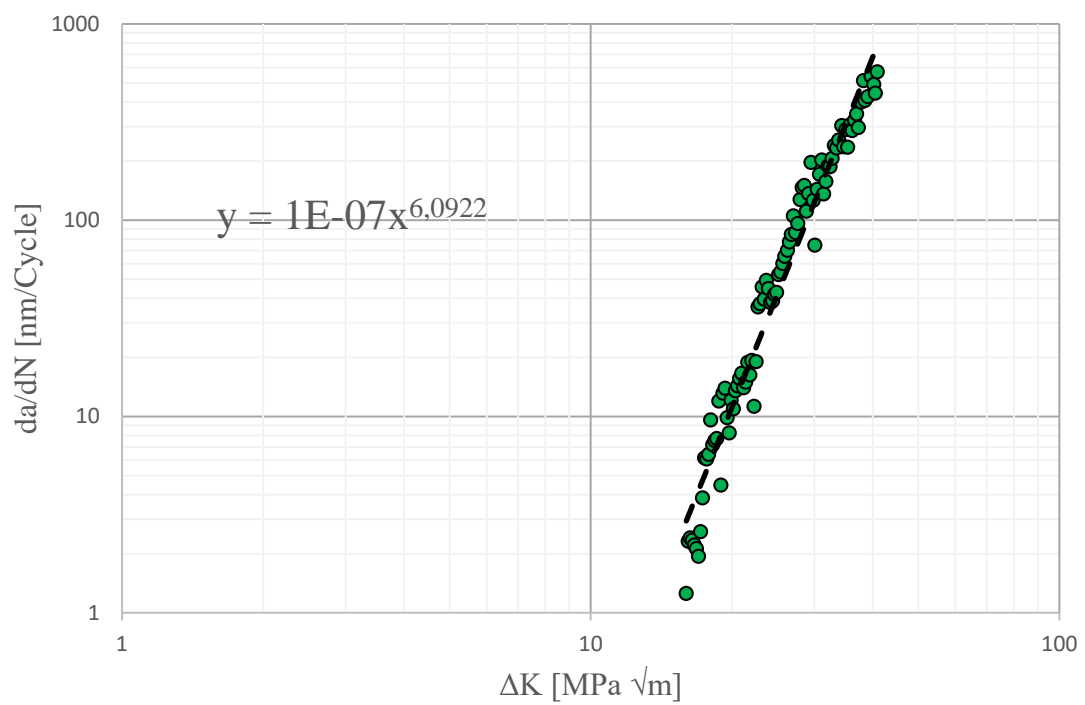


(b)

Slika 6.28: Dijagrami (a) a-N i (b) da/dN- ΔK za epruvetu OM

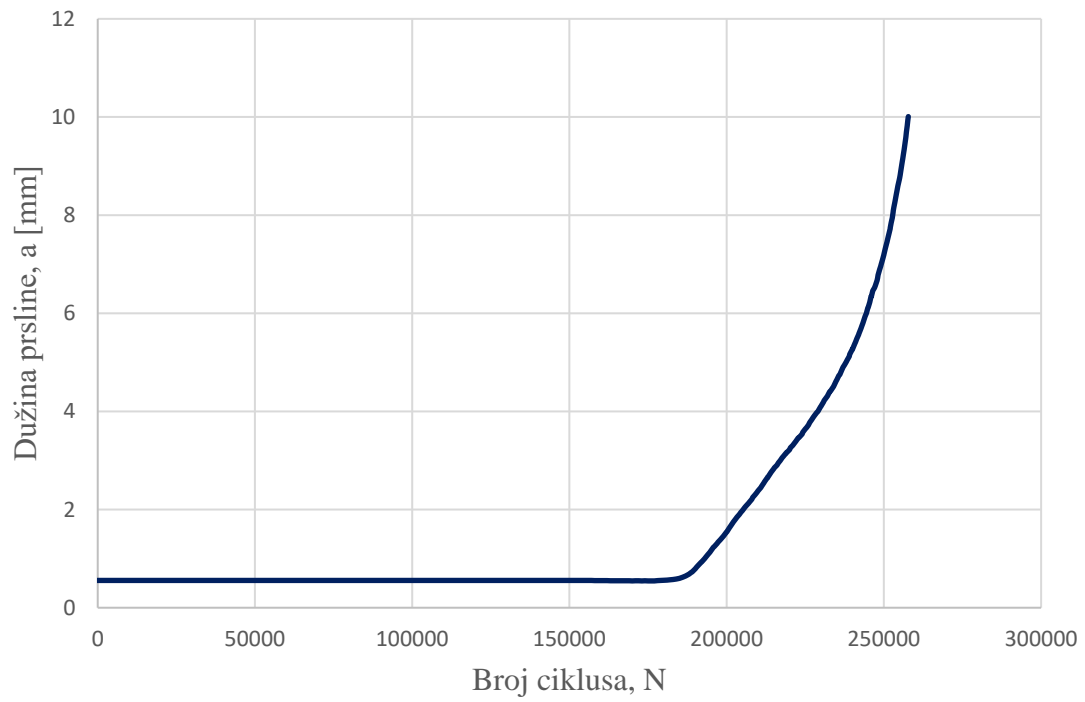


(a)

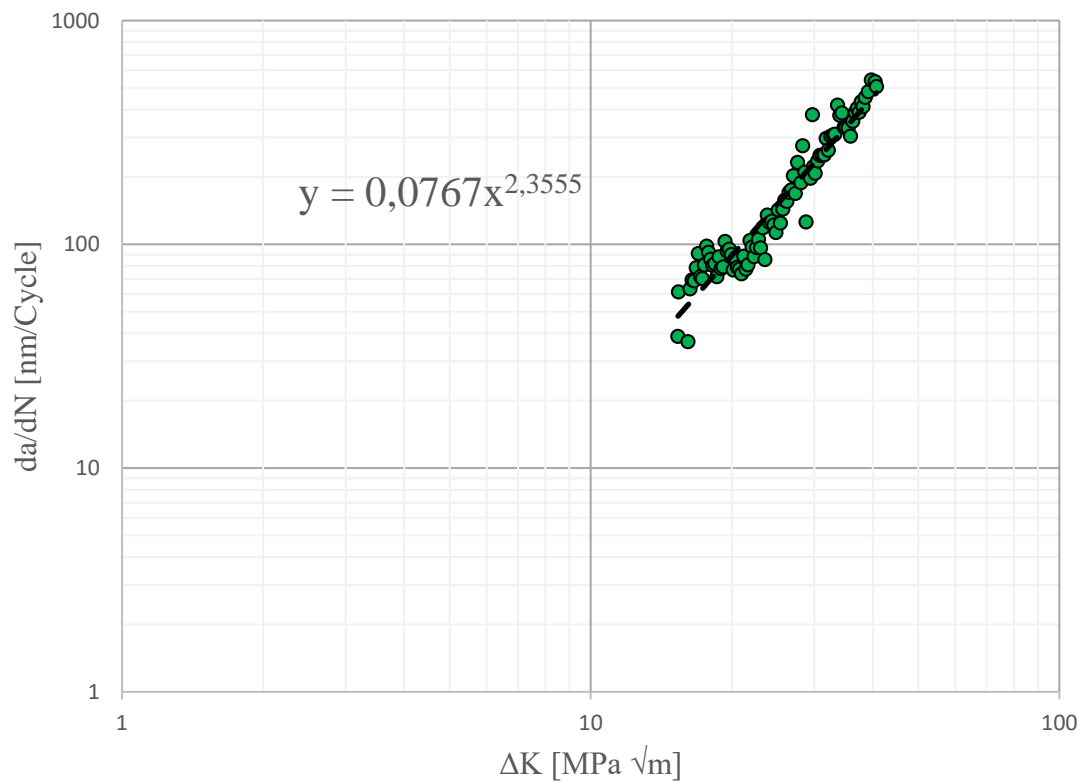


(b)

Slika 6.29: Dijagrami (a) a-N i (b) da/dN- ΔK za epruvetu MŠ



(a)



(b)

Slika 6.30: Dijagrami (a) a-N i (b) da/dN- ΔK za epruvetu ZUT

Na osnovu rezultata dobijenih ispitivanjem, sa dijagrama $da/dN - \Delta K$, se tačke mogu predstaviti ravnom linijom (sa logaritamskim osama) što predstavlja eksponencijalnu jednačinu oblika Parisove jednačine (6.2), pa se iz oblika jednačine direktno vide koeficijenti Parisove jednačine C i m . Ovi koeficijenti su za sve tri oblasti zavarenog spoja, OM, MŠ i ZUT dati u Tabeli 6.9.

Tabela 6.9: Koeficijenti Parisove jednačine dobijeni za oblasti zavarenog spoja dupleks čelika S32750

Oznaka epruvete	C	m
OM	4×10^{-4}	3,66
MŠ	1×10^{-7}	6,09
ZUT	$7,67 \times 10^{-2}$	2,35

7 Obrada i diskusija rezultata

7.1 Analiza sastava

Poređenjem sadržaja legirajućih elemenata dobijenih analizom uzorka osnovnog metala i preporukama definisanih standardom ASTM A240 možemo zaključiti sledeće:

Sadržaj hroma (Cr) od 24,09 % se nalazi na donjoj granici (24 - 26 %). Hrom poboljšava lokalnu otpornost na koroziju, ali treba voditi računa o njegovom sadržaju jer postoji granica pri kojoj se anulira njegovo korisno dejstvo, jer može doći do smanjenja obradivosti, žilavosti a i korozivnih karakteristika. Uz navedeno hrom stabilizuje ferite, pa u cilju održavanja odnosa ferit - austenit treba kod dupleks čelika voditi računa o ovom balansu. [1]

Molibden (Mo): prisustvo molibdena obezbeđuje korozionu postojanost u sredinama koje sadrže jone hlora. Preporučena je dodatak od minimum 3%, a analiza sastava je pokazala da je njegov sadržaj 3,69 % (granice po standardu su 3 -5 %)

Nikl (Ni) je element koji stabilise austenit, pa u cilju očuvanja balansa ferit - austenit treba voditi računa da njegov udeo bude usklađen sa stabilizatorima ferita. U ovom slučaju udeo nikla je 6,43 % što je u donjem delu preporučenih vrednosti (6 - 8 %), a izbalansirano je sa udelom hroma i molibdena, koji stabilisu ferit. [1]

Azot (N) ima višestuki uticaj na nerđajuće čelike. Dodatak azota stabilise austenitni rešetku, tako da omogućava smanjenje udela nikla i time se poboljšava zavarljivost. Dodatkom azota je kreirana nova podgrupa nazvana superdupleks čelici, kojima pripada i ovde ispitani čelik S32750. Analizirani uzorak je imao 0,33% azota, što je neposredno iznad granice (0,24 - 0,32 %).

7.2 Diskusija makro i mikrostrukture

Makrostruktura

Analizom makrostrukture zavarenog spoja, uočena je postojanje heterogenosti u osnovnom metalu. Ova heterogenost nastaje tokom procesa toplog valjanja. Debljina ploča koje su zavarivane je 25 mm. Posle postupka toplog valjanja, brzina hlađenja u sredini toplo valjane ploče je vrlo mala, što je uzrokovano niskim koeficijentom toplotne provodljivosti i velikom masom. Opšte je poznato da dolazi do preraspodele legirajućih elemenata (difuzijom) što dovodi do pojave trakavosti, kao što se može i videti na Slici 6.1. To znači da postoji mogućnost da se formiraju trake sa bogatijim ili siromašnijim sadržajem legirajućih elemenata [42-45]. Pokazano je da zbog povećanog sadržaja Mo i Cr dolazi do obrazovanja čestica sekundarnih faza u centralnom delu ploče, unutar traka, većinom sigma (FeCr) faze i manjim delom či (chi) faze (FeMoCr). Ove faze su delimično rastvorene u okolini

zavarenoog spoja usled unete toplote zavarivanjem, a brzo hlađenje onemogućava obrazovanje sigma faze [60-63].

Mikrostruktura.

Osnovni materijal je valjana rekristalisana struktura koju čine austenit i ferit, uz izdvojene sekundarne faze, najčešće sigma faza (FeCr). U toku hlađenja metala šava, prema dijagramu stanja [72] očvršćavanje se završava formiranjem čiste feritne strukture. Dobija se struktura koju karakteriše homogenost i oblika i hemijskog sastava. Zrna su ravnoosna, i njihove granice predstavljaju mesta na kojima daljim hlađenjem dolazi do formiranja klica austenitnih zrna. Austenitna zrna nastaju na granicama feritnih zrna, ali se u nekim slučajevima mogu javiti i unutar zrna. U zavisnosti od temperaturnog intervala, mogu imati dva oblika: ravnoosan, koji se javlja na višim temperaturama ili igličast, ako se javlja na nižim temperaturama ili pri povećanim brzinama hlađenja. Daljim hlađenjem prema sobnoj temperaturi, dolazi do izdvajanja sekundarnih faza, pre svega sigma ili čiči (chi) faze. One se na mikrofotografijama vide kao crne tačke. Zavarivanje je izvršeno u pet prolaza, tako da su uslovi hlađenja u svih pet slučajeva bili različiti. Za prvi prolaz (Slika 6.1) karakteristična je najveća brzina hlađenja. Najveća brzina hlađenja obezbeđuje najveće pothlađenje, tako da ne postoji pravac stvaranja klica koji je najpovoljniji, već su austenitna zrna orijentisana po svim pravcima. Ostali (pokrivni) prolaz već imaju manju brzinu hlađenja, tako da faza rasta postaje dominantna, i u skladu sa time austenitna zrna imaju približnu orijentaciju. U ZUT, pored linije stapanja su ostvarene temperature koje dovode do ponovnog formiranja feritne strukture, koja prolazi iste promene prilikom daljeg hlađenja kao i u slučaju metala šava. Razlika je što su formirana zrna sitnija, usled veće brzina hlađenja.

7.3 Diskusija tvrdoće

Standard ASTM A240 koji propisuje specifikacije nerđajućih čelika definiše da vrednost tvrdoće za nerđajući čelik S32750 bude veći od 310 HB (tvrdoća po Brinelu), odnosno 32 HRC (tvrdoća po Rokvelu tip C). Kako je za merenje tvrdoće korišćena metoda po Vickersu HV 10, pomoću konverzionih tabela je dobijena minimalna vrednost tvrdoće od HV 320.

Merenjem tvrdoće (poglavljju 5.2) su dobijeni rezultati u tri niza kroz sve zone zavarenog spoja. Sve vrednosti su znatno iznad zahtevanih standardom. U cilju lakše analize rezultata usrednjene vrednosti po zonama du prikazane u Tabeli 7.1.

Tabela 7.1: Prosečne vrednosti tvrdoće izmerene po HV 10

Linija	OM 1	ZUT 1	LS 1	MŠ	LS 2	ZUT 2	OM 2
I	436	434	437	432	437	433	436
II	436	435	437	437	440	437	436
III	437	435	437	434	435	435	436

Iz priloženog se može videti da vrednosti tvrdoće znatno premašuju minimalnu traženu vrednost od HV 320 u svim merenim zonama: osnovni metal, zona uticaja toplote, linija stapanja i metal šava; kako sa jedne, tako i sa druge strane zavarenog spoja i to sa vrednostima koje se kreću u opsegu od HV 430 do HV 440. Uz to se poređenjem tvrdoće sva tri niza u svim zonama, može zaključiti da pojava trakavosti, koja je vizuelno lako uočljiva na poprečnom preseku zavarenog spoja, a koja je posledica toplog valjanja, ne utiče na tvrdoću osnovnog metala i zavarenog spoja. Takođe se može videti da je tvrdoća u svim zonama zavarenog spoja na nivou tvrdoće osnovnog metala.

7.4 Diskusija ispitivanja zatezanjem

Rezultati ispitivanja zatezanjem su pokazali da u slučaju ispitivanja epruveta od osnovnog metala vrednosti ujednačene i znatno iznad minimalno propisanih. Granica tečenja definisana standardom ASTM A240 zahteva minimalnu vrednost od 550 MPa, a izmerene vrednosti su oko 660 MPa, što predstavlja oko 20% iznad propisane. Izmerene vrednosti zatezne čvrstoće sa prosekom oko 860 MPa takođe su više od minimalno zahtevane vrednosti od 795 MPa za više od 9%.

Na vrednost izduženja treba inače obratiti pažnju pri analizi jer se vrednost u standardu definiše za radnu dužinu ekstenzometra od 50 mm, dok su izmerene vrednosti dobijene ekstenzometrom sa radnom dužinom $L_0 = 25$ mm. U ovom slučaju su zahtevi standarda svakako zadovoljeni jer je minimalno traženo izduženje 15%, dok su izmerena izduženja iznad 30%.

Izmerenim zateznim karakteristikama je potvrđeno da ispitani materijal ispunjava zahteve standarda za klasifikaciju nerđajućih dupleks čelika S32750.

Ispitivanje zateznih karakteristika zavarenog spoja, odnosno epruvete izrađene tako da prolazi kroz sve zone zavarenog spoja, pokazuje sličan karakter krive napon – deformacija kao i kod dijagrama OM. Izmerene vrednosti su prilično ujednačene; prosečna vrednost granice tečenja je za 2% niža od prosečne vrednosti osnovnog metala (649 MPa u odnosu na 662 MPa). Kada pogledamo razliku zatezne čvrstoće zavarenog spoja i osnovnog metala (844 MPa u odnosu na 857 MPa), koja je još manja i iznosi 1,5%, možemo konstatovati da ne postoji znatan pad ovih zateznih karakteristika zavarenog spoja. Jedina znatna razlika se odnosi na smanjenje izduženja, koje iznosi prosečno 33% kod OM, dok je za zavareni spoj ta vrednost 24.6%, što predstavlja razliku od 34%, ali je važno istaći da čak i sa ovakvim umanjnjem relativnog izduženja kod epruveta zavarenog spoja dobijene vrednosti su više od minimuma zahtevanog standardom za čelik S32750.

Generalno gledano bliske vrednosti zateznih karakteristika ukazuju na dve stvari: jedno je dobar izbor dodatnog materijala, koji po svojom mehaničkim karakteristikama odgovara osnovnom metalu; a drugo je dobar izbor tehnologije zavarivanja, čime je očuvan nivo zateznih karakteristika kroz zavareni spoj. Sve navedeno još jednom potvrđuje dobru zavarljivost predmetnog nerđajućeg dupleks čelika S32750.

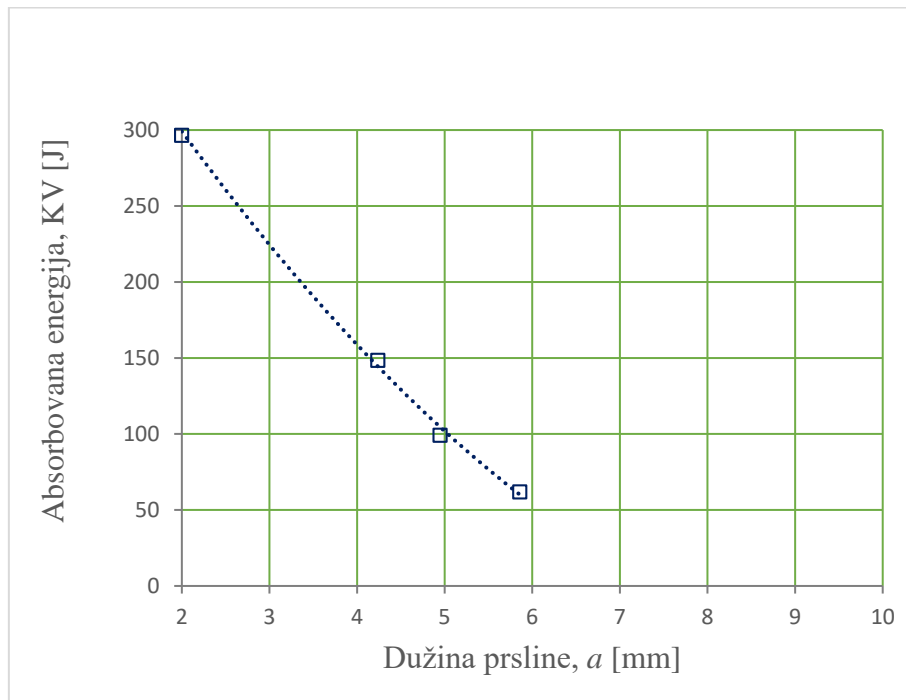
7.5 Analiza rezultata udarne žilavosti

Ukupna energija udara za OM, kako se može i videti u Tabeli 6.6, je znatno iznad kritične vrednosti, koja je usvojena na 27 J. Kako je i pokazano na Slici 6.9 prelazna temperatura za OM je $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prisustvo austenita u ovom čeliku obezbeđuje visoke vrednosti žilavosti i na niskim temperaturama. Takođe, fenomen prelazne temperature ne postoji u metalima i legurama sa površinski centriranom kubnom rešetkom. Sa druge strane prisustvo ferita povećava čvrstoću, ali donekle snižava žilavost. Kako se fenomen prelazne temperature javlja isključivo kod metala i legura sa prostorno centriranom kubnom rešetkom, sniženjem temperature dupleks mikrostruktura u ovom čeliku pokazuje blagi pad žilavosti, tako da je prelazna temperatura određena na $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kako je sniženje temperature najoštriji uslov eksploatacije, koji povećava krtost, rad ovih čelika je ograničen na $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ono što nije razmatrano, a predmet je ove analize, jeste ponašanje ostalih zona zavarenog spoja na nižim temperaturama. U slučaju MŠ i ZUT su prelazne temperature znatno više u odnosu na OM i iznose $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ odnosno $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, respektivno, što znači da su zavareni spojevi od nerđajućeg dupleks čelika S32750 bezbedni za upotrebu na temperaturama iznad $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Niža vrednost žilavosti metala šava na istoj temperaturi u odnosu na osnovni metal, posledica je obrazovane livene mikrostrukture.

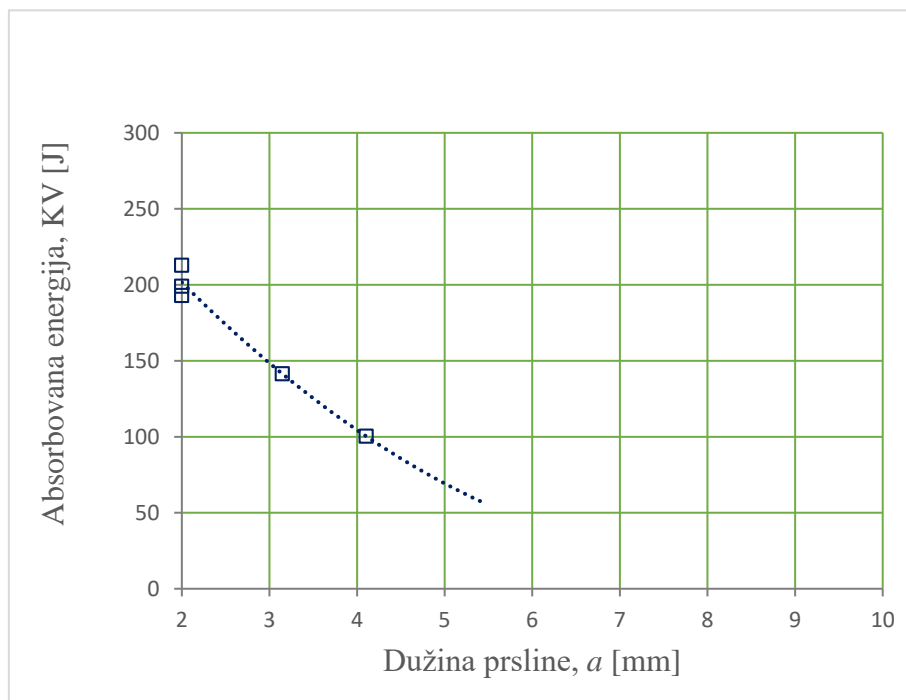
Kada se energija udara raščlani i analiziraju energije nastanka i rasta prsline, može se zaključiti, za slučaj svih zona (OM, MŠ i ZUT) da dominiraju energije rasta prsline, što obezbeđuje relativno dobru otpornost na rast prsline, gledajući zavareni spoj u celini. Opet se kao kritična zona pojavljuje ZUT kod koje je energija rasta prsline 21 J na temperaturi $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok je MŠ imao dovoljnu energiju rasta prsline iznad temperature $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dominantna energija rasta prsline je najpovoljnika varijanta. Kako se svaki zavareni spoj smatra mestom u konstrukciji u kome postoje različite vrste grešaka, a time i prsline, veoma je važno da se najveći deo absorbovane energije troši na rast prsline. Ovakav konzervativni pristup podrazumeva da je prisustvom prsline već utrošena energija za njen nastanak.

Ukoliko uporedimo OM sa MŠ i ZUT, očigledno je ne samo da su niže vrednosti svih energija, a naročito u ZUT, već postoje i znatna odstupanja od prosečnih vrednosti. Ovo je jasna naznaka heterogenosti mikrostrukture, ali to ne utiče na minimalnu zahtevanu žilavost ni u jednom od slučajeva.

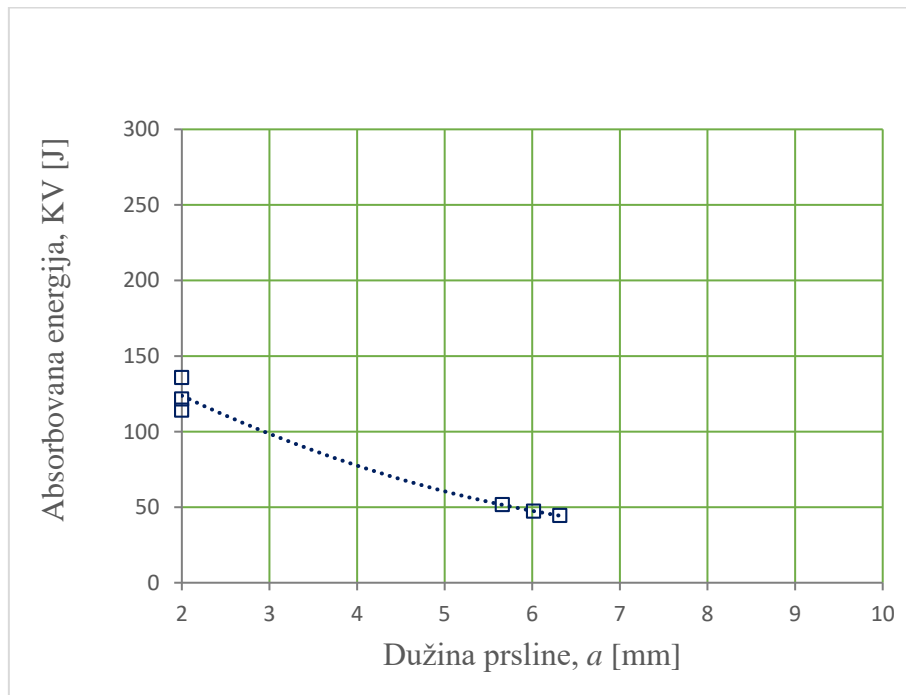
Odnosi energije udara (KV) i dužine prsline (a) za OM prikazani dijagramima na Slikama 7.1 -do 7.4 za različite temperature su aproksimirani polinomima 2. reda. Na osnovu ovih rezultata je određena vrednost faktora osetljivosti na rast prsline, definisanog kao odnos KV i KV_1 . Vrednost KV_1 predstavlja energiju koja na krivoj odgovara zamornoj prslini dužine 1 mm, što kada se uzme u obzir i dužina mašinski napravljenog zarez predstavlja ukupnu dužinu prsline $a = 3\text{ mm}$. Dobijeni rezultati su predstavljeni u Tabeli 7.2 za opseg ispitnih temperatura. Kako se može videti, osetljivost na rast prsline ima svoj maksimum za temperaturu ispitivanja od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. U svakom slučaju, može se konstatovati da su vrednosti osetljivosti na rast prsline relativno niske za OM, što uopšteno znači visoku žilavost materijala na ispitanom opsegu temperatura.



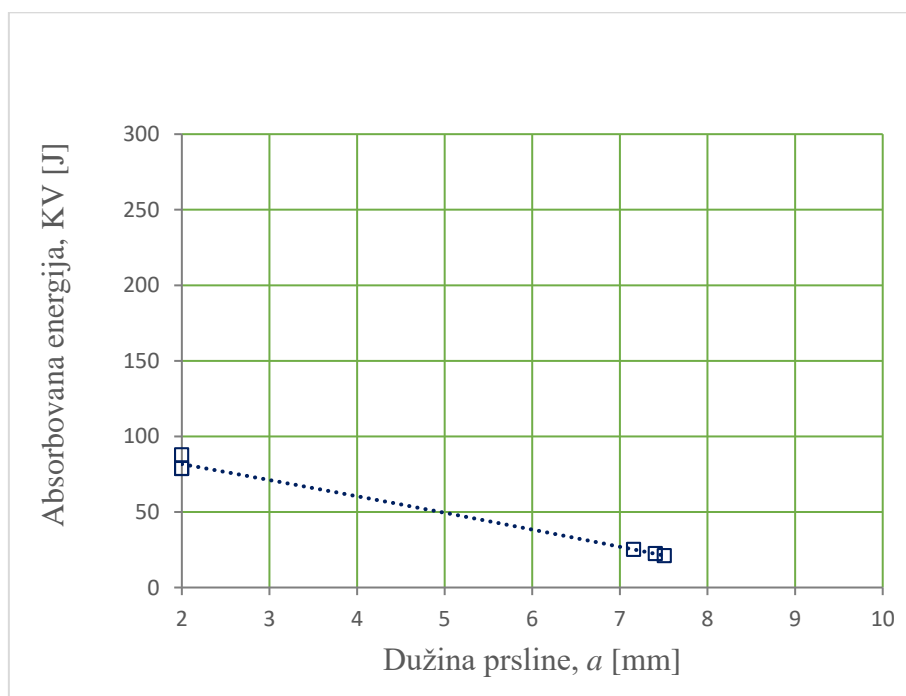
Slika 7.1: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za OM, na temperaturi +20°C.



Slika 7.2: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za OM, na temperaturi -40°C.



Slika 7.3: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za OM, na temperaturi -60°C .

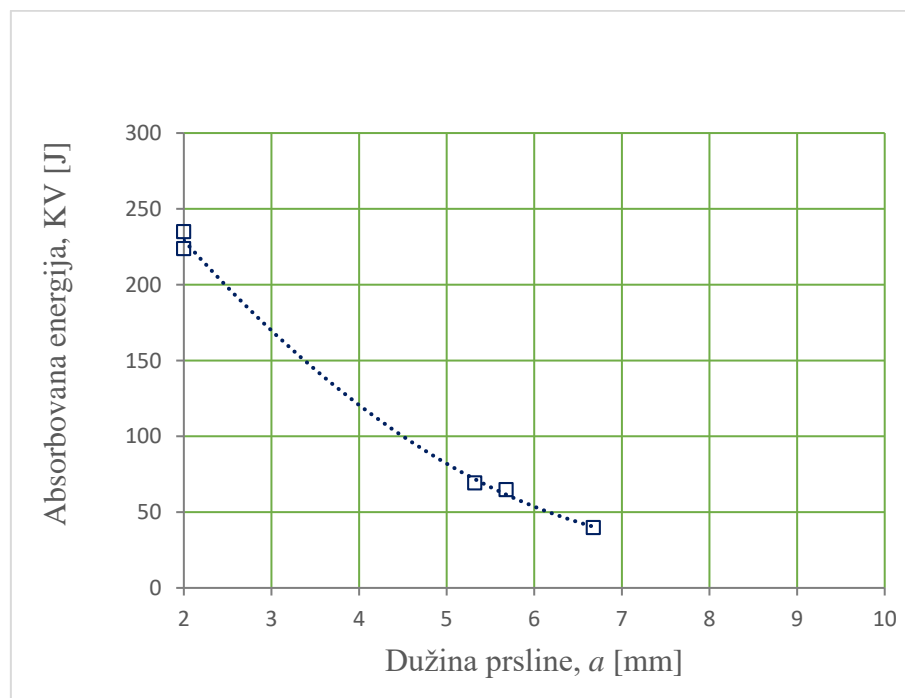


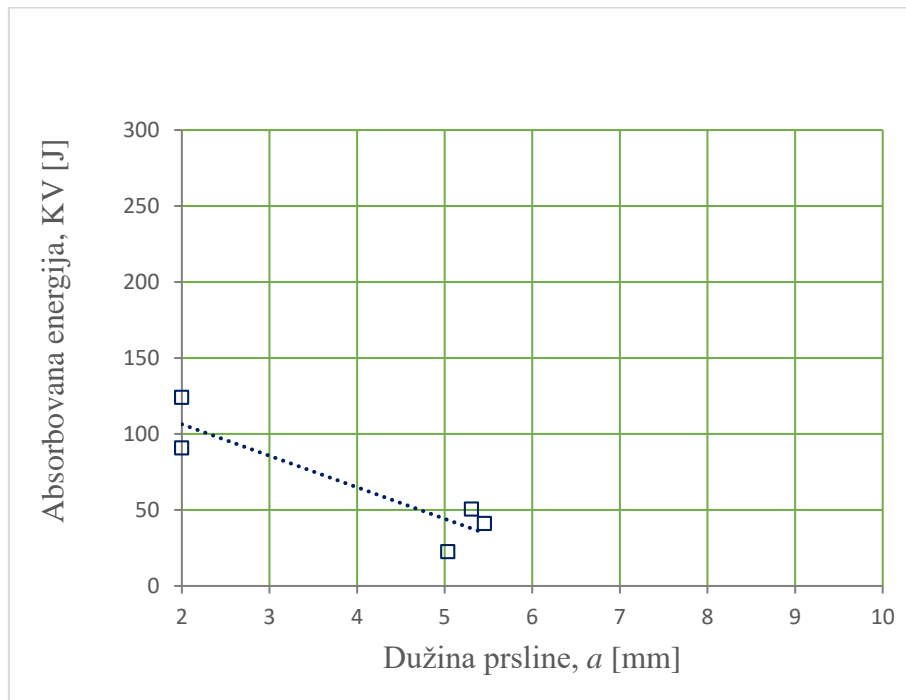
Slika 7.4: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za OM, na temperaturi -80°C .

Tabela 7.2: Faktor osetljivosti na rast prsline za dupleks čelik S32750.

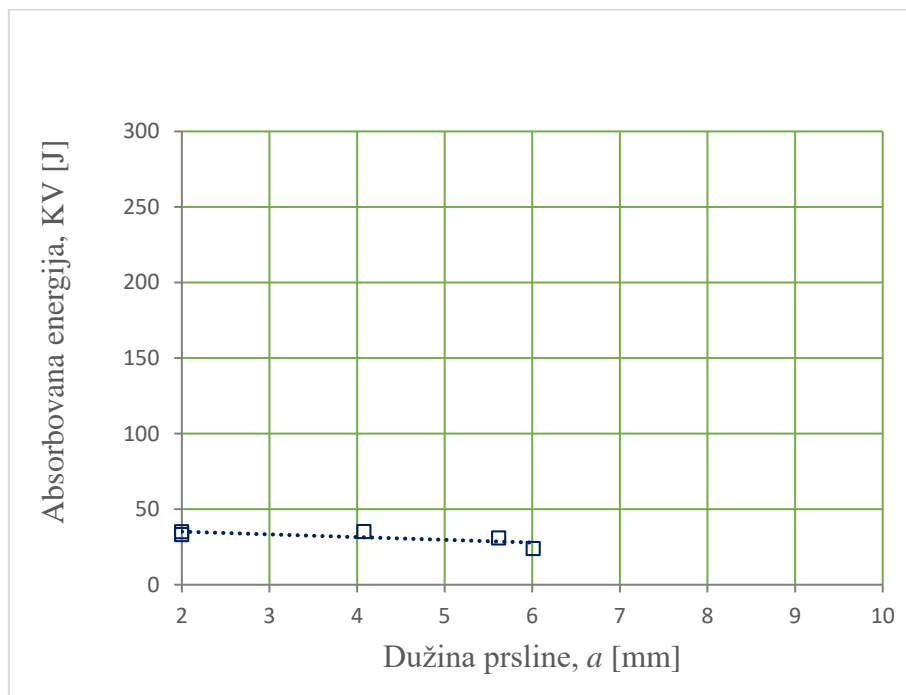
Specimen type	Epruveta sa zarezom	Epruveta sa zamornom prslinom	Osetljivost na rast prsline
	KV	KV1	KV/KV1
OM, +20 °C	299,0	224,5	1,33
OM, -40 °C	201,6	148,5	1,36
OM, -60 °C	123,8	98,6	1,26
OM, -80 °C	81,7	71,1	1,15

Isti metod analize je zatim primenjen i na rezultate ispitivanja epruveta iz zona MŠ i ZUT.

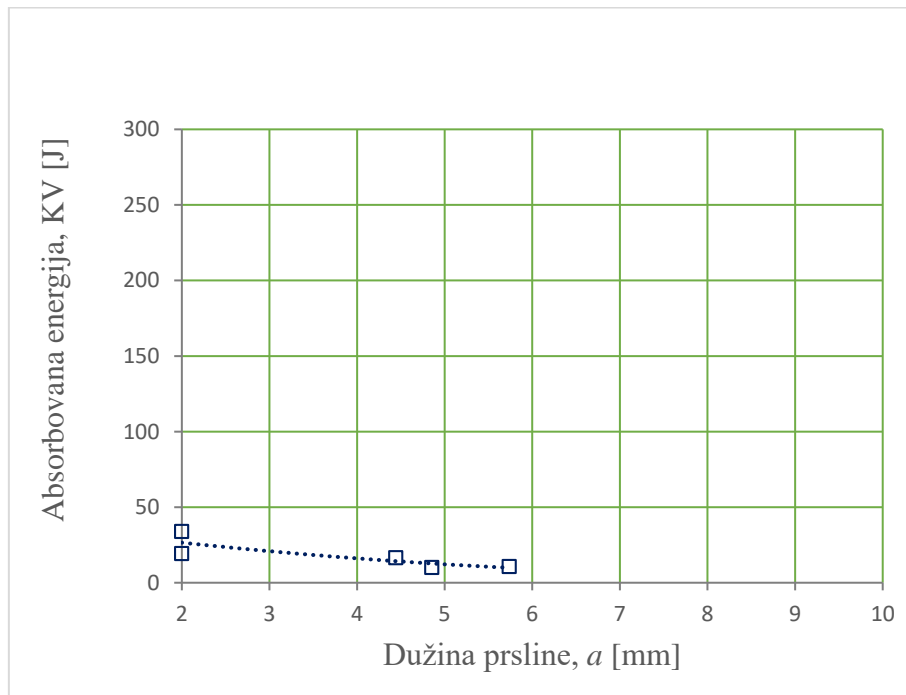
Slika 7.5: Dijagram energija udara – dužina prsline a , za MŠ, na temperaturi +20°C.



Slika 7.6: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za MŠ, na temperaturi -40°C .



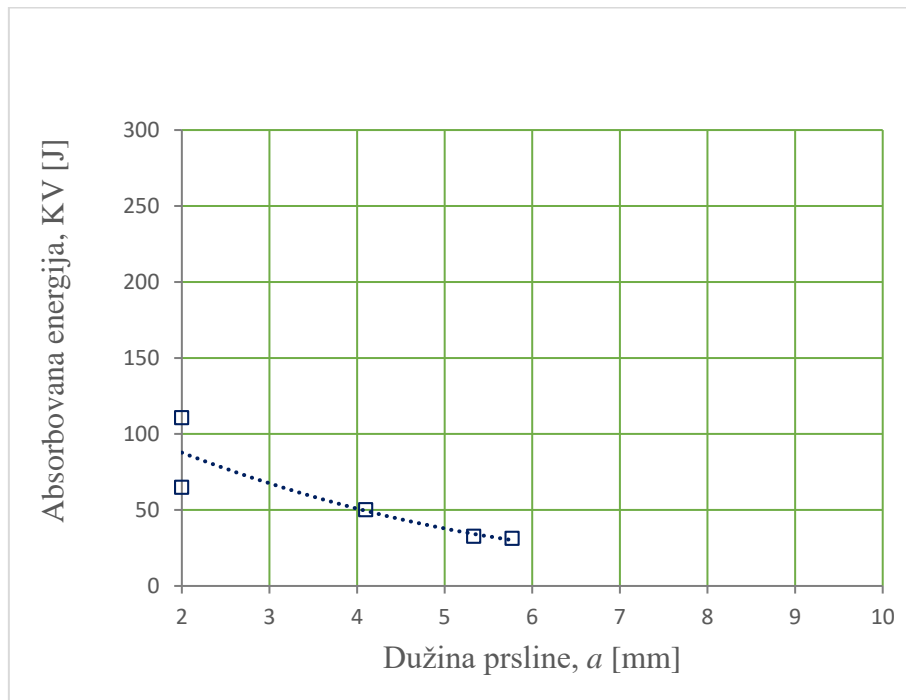
Slika 7.7: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za MŠ, na temperaturi -60°C .



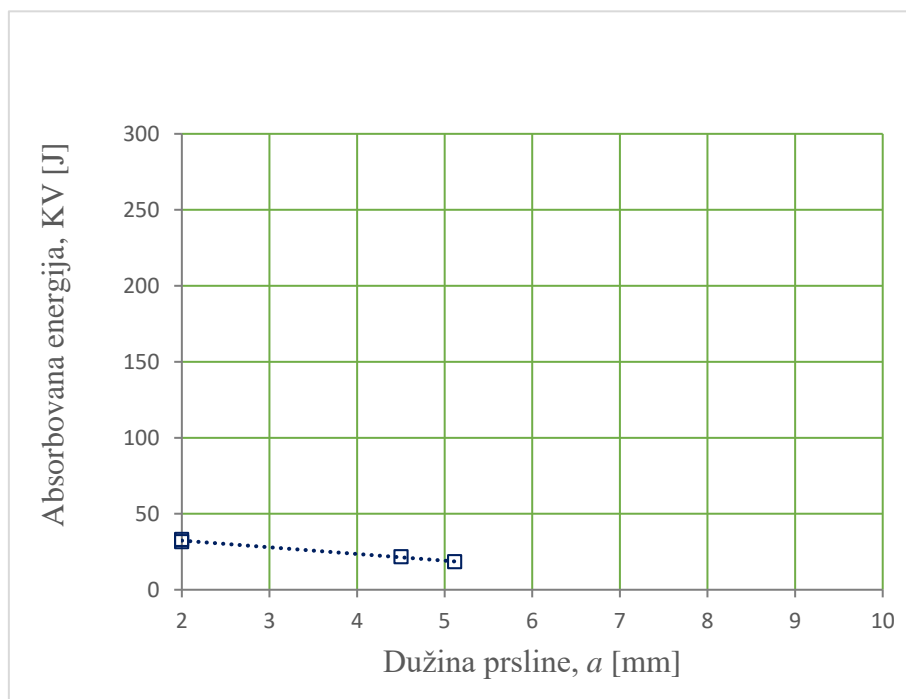
Slika 7.8: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za MŠ, na temperaturi -80°C .

Tabela 7.3: Faktor osjetljivosti na rast prsline za MŠ.

Specimen type	Epruveta sa zarezom	Epruveta sa zamornom prslinom	Osetljivost na rast prsline
	KV	KV1	KV/KV1
MŠ, $+20^{\circ}\text{C}$	229,3	169,8	1,35
MŠ, -40°C	107,4	85,7	1,25
MŠ, -60°C	34,1	33,3	1,02
MŠ, -80°C	26,5	20,9	1,27



Slika 7.9: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za ZUT, na temperaturi +20°C.



Slika 7.10: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za ZUT, na temperaturi -40°C.

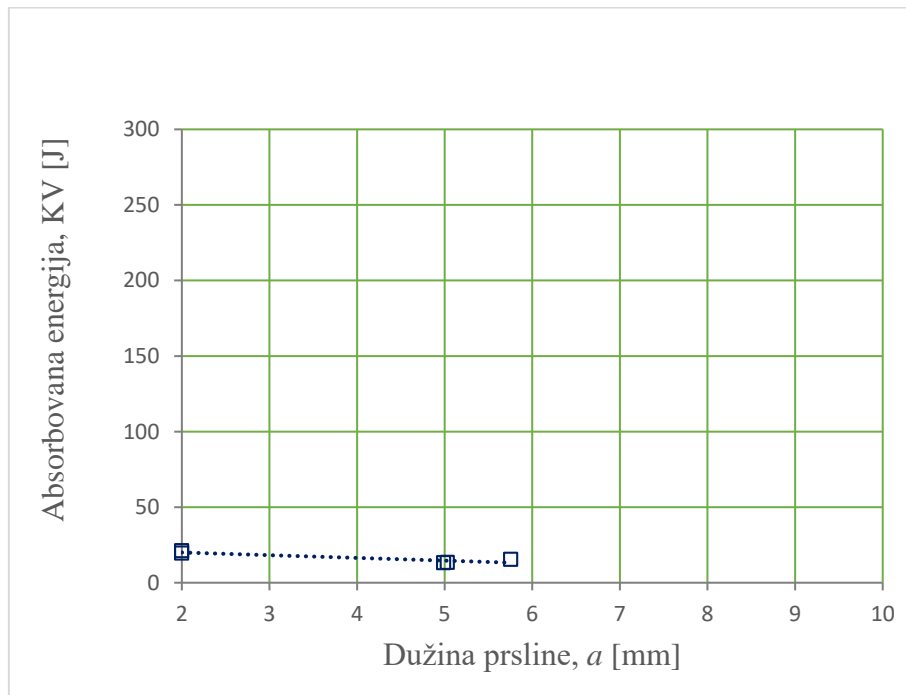
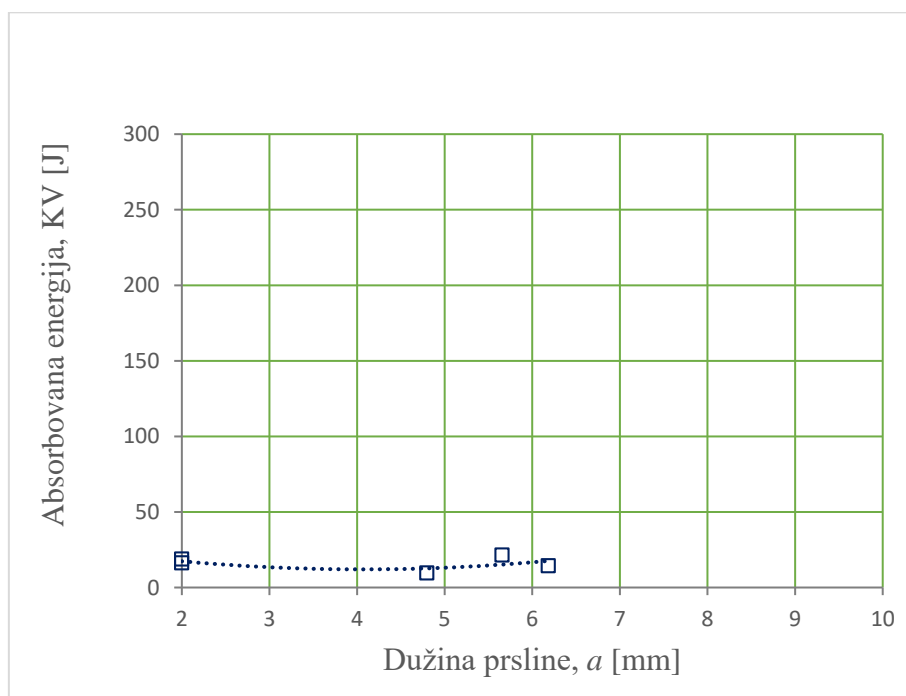
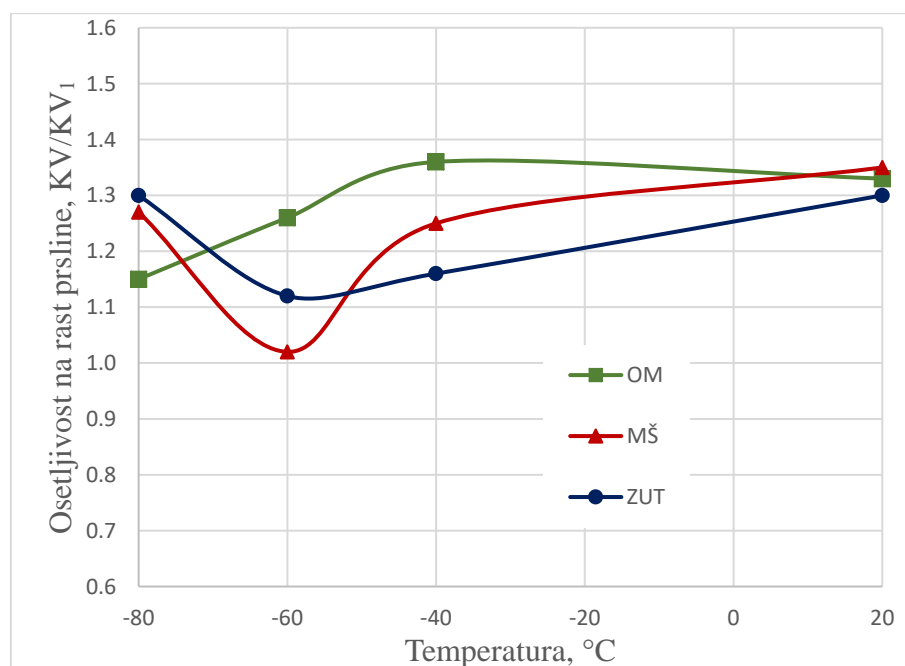
Slika 7.11: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za ZUT, na temperaturi -60°C .Slika 7.12: Dijagram energija udara - dužina prsline a , za ZUT, na temperaturi -80°C .

Tabela 7.4: Faktor osetljivosti na rast prsline za ZUT.

Specimen type	Epruveta sa zarezom	Epruveta sa zamornom prslinom	Osetljivost na rast prsline
	KV	KV1	KV/KV1
ZUT, +20 °C	87,7	67,5	1,30
ZUT, -40 °C	32,3	27,9	1,16
ZUT, -60 °C	20,3	18,2	1,12
ZUT, -80 °C	17,5	13,5	1,30

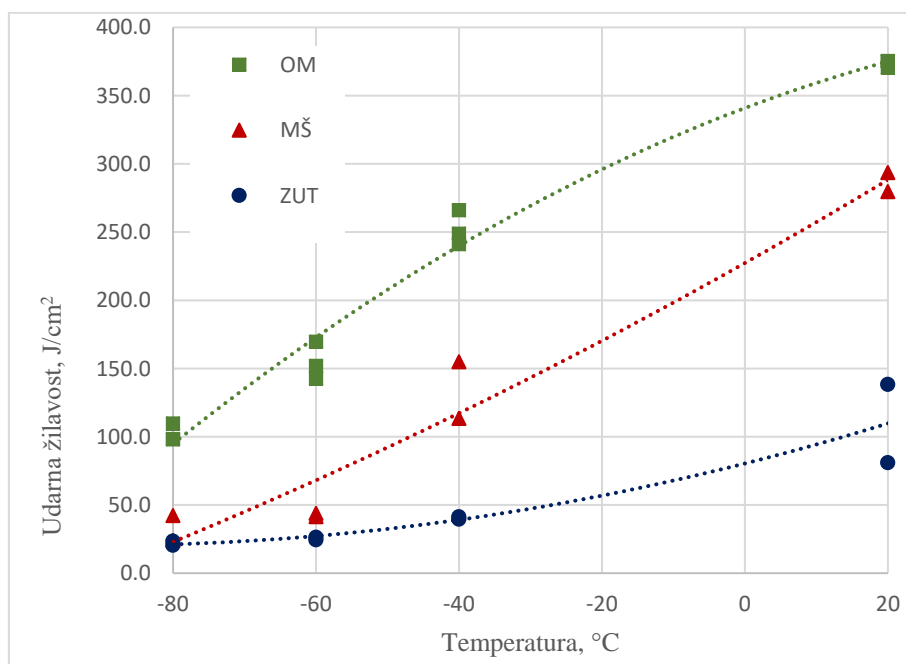
Sagledavanje uticaja zavarenog spoja na parametre mehanike loma se može dobiti poređenjem izračunatih vrednosti osetljivosti na rast prsline (KV/KV_1) za sve tri zone, OM, MŠ i ZUT. Vrednosti faktora osetljivosti na rast prsline u zavisnosti od temperature ispitivanja su za sve tri navedne zone dati respektivno u Tabelama 7.2 do 7.4. Radi lakše analize ove zavisnosti su prikazane dijagramom na Slici 7.13.

Slika 7.13: Dijagram zavisnosti faktora KV/KV_1 od temperature za OM, MŠ i ZUT

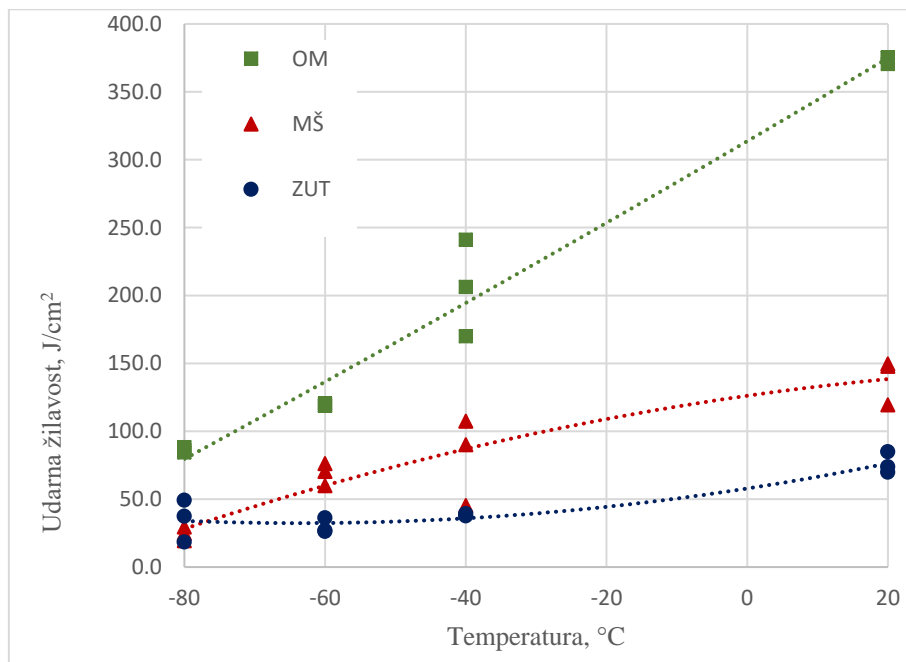
Analizom dijagrama se može uočiti da su vrednosti osetljivosti na rast prsline uglavnom niske, što je već i konstatovano za osnovni metal (OM), a sada očigledno da važi i za MŠ i ZUT. Osim toga vidljivo je ponašanje MŠ i ZUT koji pri temperaturi od -60°C imaju minimum vrednosti, odnosno pokazuju izuzetno malu vrednost osetljivosti na rast prsline.

Istraga za objašnjenje ove pojave je rađena pregledom prelomnih površina. Analiza prelomnih površina nije ukazala ništa što bi bio mogući razlog ove pojave. Simptomatično je što se pad za obe zone primećuje u blizini prelaznih temperatura, -80°C za MŠ i -50°C za ZUT. U cilju ispitivanja ove pojave potrebno je u budućim istraživanjima ispitivanja raditi sa gušćom raspodelom temperatura u zoni oko -60°C i većim brojem uzoraka, uz analizu prelomne površine, kako bi se potvrdila pojava smanjenja osetljivosti na rast prslina i našao uzrok ove pojave.

Ako ne razmatramo ukupnu energiju udara izmerenu Šarpijevim klatnom, već na osnovu izmerenih rezultata analiziramo udarnu žilavost, svedenu na jedinicu površine (J/cm^2), možemo napraviti dijagrame u funkciji temperature ispitivanja. Ovom analizom su obuhvaćene dve grupe ispitanih epruveta iz tri zone OM, MŠ i ZUT, pri čemu prva grupa epruveta obuhvata standardne šarpijeve epruvete sa V-zarezom dubine 2 mm; dok druga grupa obuhvata epruvete kojima je pored standardnog V-zareza napravljena i zamorna prslina, metodom opisanom u poglavlju 5.5.3, što je prikazano dijagramima na Slikama 7.14 i 7.15 respektivno. Zavisnost udarne žilavosti od temperature je, u cilju bolje preglednosti rezultata na navedenim dijagramima aproksimirana polinomima drugog reda.



Slika 7.14 Dijagram zavisnosti udarne žilavosti od temperature za epruvete sa V-zarezom, iz OM, MŠ i ZUT



Slika 7.15 Dijagram zavisnosti udarne žilavosti od temperature za epruvete sa V-zarezom i zamornom prslinom, iz OM, MŠ i ZUT

Analizom rezultata prikazanih dijagramom na Slici 7.14 se može zaključiti sledeće:

- Očigledan i očekivan trend za sve tri zone, odnosno pad udarne žilavosti sa padom temperature;
- Vrednost udarne žilavosti na svakoj temperaturi ispitivanja je najveća za OM, a najmanja za ZUT, što je na osnovu iskustva i bilo očekivano.

Analizom rezultata prikazanih dijagramom na Slici 7.15, na kojoj je prikazana zavisnost udarne žilavosti od temperature na ispitanim epruvetama koje su imale standardni mašinski V-zarez i uraženu zamornu prslinu različitih dužina se dolazi do istih zaključaka, kao i u prethodnom slučaju. Upoređivanjem vrednosti sa ova dva dijagrama se može zaključiti da je udarna žilavost na epruvetama koje imaju dodatnu zamornu prslinu manja od epruveta koje imaju samo mašinski zarez. Ovo se uglavnom odnosi na MŠ, a naročito je izraženo na sobnoj temperaturi (+20°C), a nešto manje na -40°C, gde je ova razlika primetna i za OM, kao i temperaturi od -60°C. Na najnižoj ispitnoj temperaturi -80°C su razlike udarne energije za ova dva tipa epruveta zanemarljive.

Sa opadanjem temperature razlike udarne žilavosti su sve manje, pa je pretpostavka da pri postojanju krtoq loma, kada imamo postojanje dodatne zamorne prsline ne postoji energija nastajanja prsline A_i , već samo A_p . To bi značilo da je u tom slučaju $A_p = A_{tot}$. Da bi se ovo detaljnije analiziralo izvršeno je sledeće poređenje. Tabelama 7.5 do 7.7 su prikazane srednje vrednosti energija udara, i njihova raspodela na energiju nastanka i energiju rasta prsline, za dve vrste epruveta: Šarpi epruvete sa V-zarezom i Šarpi epruvete sa dodatnom zamornom prslinom. Analiza je rađena samo za niske ispitne temperature -80°C, -60°C i -40°C, jer je u toj zoni nprethodno navedena pojava izražena i očekivana je pojava potpuno krtoq loma.

Tabela 7.5: Prosečne energije udara za OM.

Temp. °C	Epruveta sa V-zarezom			Epruveta sa dodatnom zamornom prslinom		
	Ukupna udarna energija A_{tot}, J	Energija nastajanja prsline A_L, J	Energija rasta prsline A_P, J	Ukupna udarna energija A_{tot}, J	Energija nastajanja prsline A_L, J	Energija rasta prsline A_P, J
-80	82	17	65	23	2	21
-60	125	25	100	48	3	45
-40	201	45	156	122	14	107

Tabela 7.6: Prosečne energije udara za MŠ.

Temp. °C	Epruveta sa V-zarezom			Epruveta sa dodatnom zamornom prslinom		
	Ukupna udarna energija A_{tot}, J	Energija nastajanja prsline A_L, J	Energija rasta prsline A_P, J	Ukupna udarna energija A_{tot}, J	Energija nastajanja prsline A_L, J	Energija rasta prsline A_P, J
-80	27	9	18	12	3	10
-60	34	7	27	33	3	31
-40	112	40	68	36	7	30

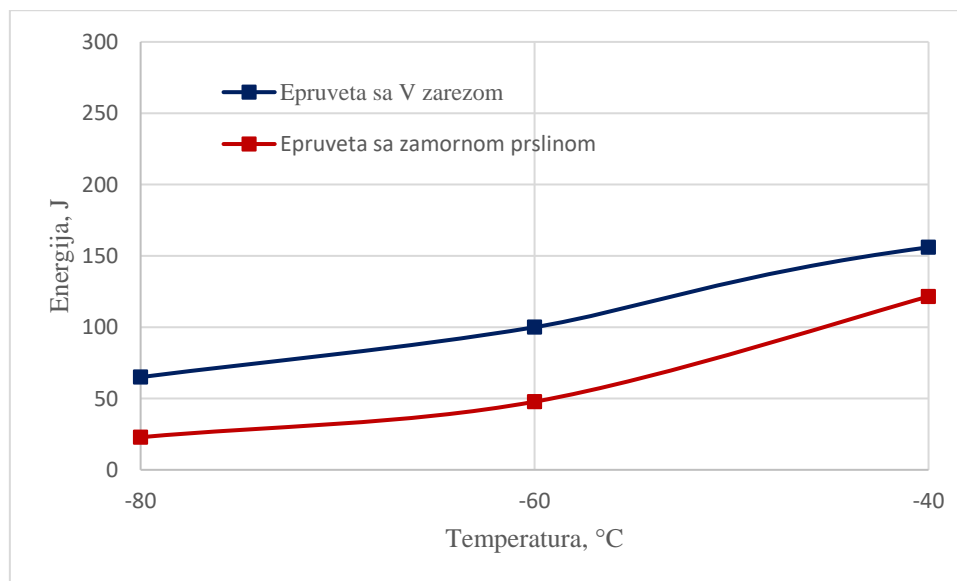
Tabela 7.7: Prosečne energije udara za ZUT.

Temp. °C	Epruveta sa V-zarezom			Epruveta sa dodatnom zamornom prslinom		
	Ukupna udarna energija A_{tot}, J	Energija nastajanja prsline A_L, J	Energija rasta prsline A_P, J	Ukupna udarna energija A_{tot}, J	Energija nastajanja prsline A_L, J	Energija rasta prsline A_P, J
-80	18	5	13	15	4	11
-60	20	6	15	11	4	7
-40	32	11	21	20	4	16

Kako je prethodno navedeno, iz izloženih podataka je vršeno poređenje energija rasta prsline A_i izmerenih pri ispitivanju Šarpi epruvete sa V-zarezom i ukupnih energija udara A_{tot} izmerenih pri ispitivanju Šarpi epruveta sa dodatnom zamornom prslinom, koje je izloženo za sve oblasti zavarenog spoja OM, MŠ i ZUT, respektivno u Tabelama 7.8 do 7.10 i dijagramima na Slikama 7.16 do 7.18.

Tabela 7.8: Poređenje energija za OM.

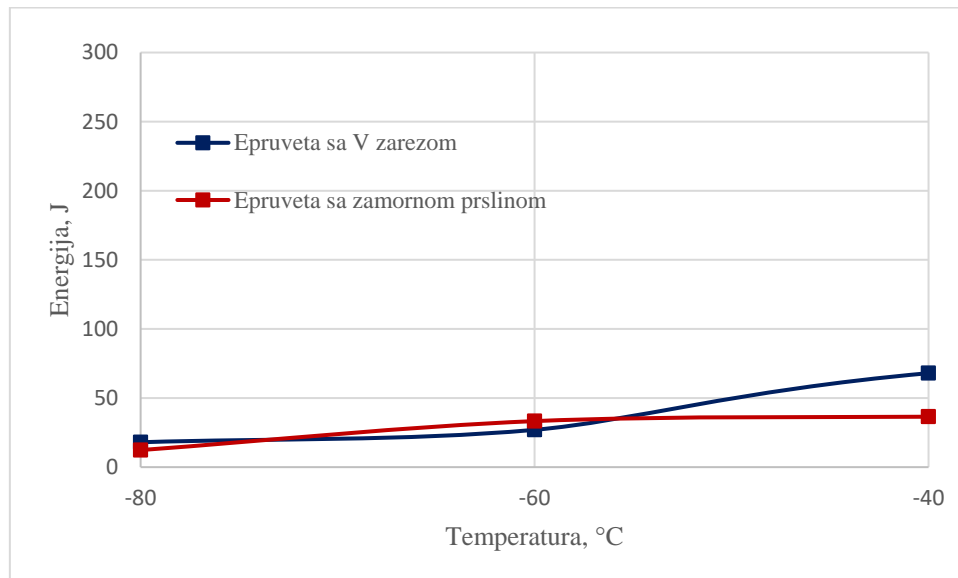
Temp. °C	Energija rasta prsline standardne epruvete A_P , J	Ukupna udarna energija epruvete sa dodatnom zamornom prslinom A_{tot} , J
-80	65	23
-60	100	48
-40	156	122



Slika 7.16 Dijagram poređenje energija za OM

Tabela 7.9: Poređenje energija za MŠ.

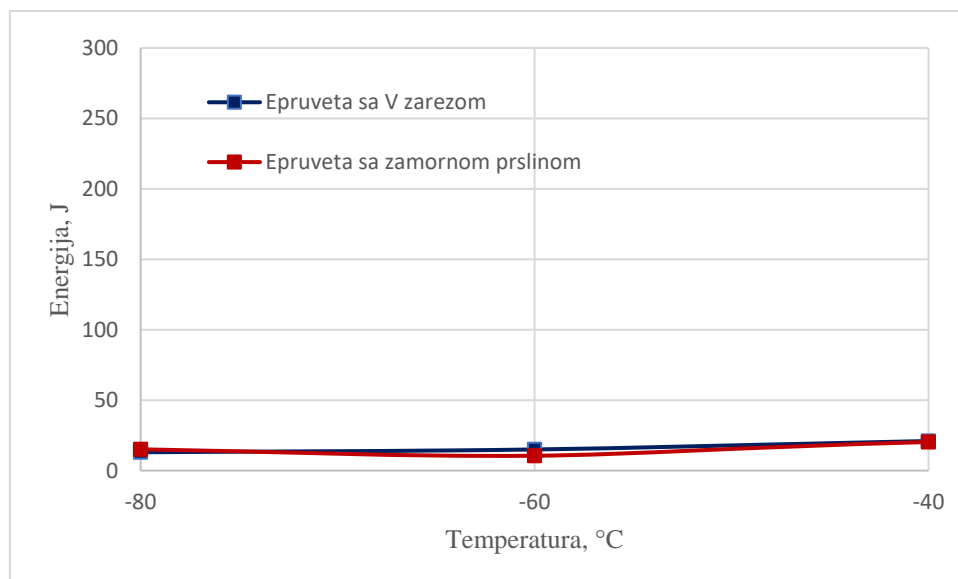
Temp. °C	Energija rasta prsline standardne epruvete A_P , J	Ukupna udarna energija epruvete sa dodatnom zamornom prslinom A_{tot} , J
-80	18	12
-60	27	33
-40	68	36



Slika 7.17 Dijagram poređenje energija za MŠ

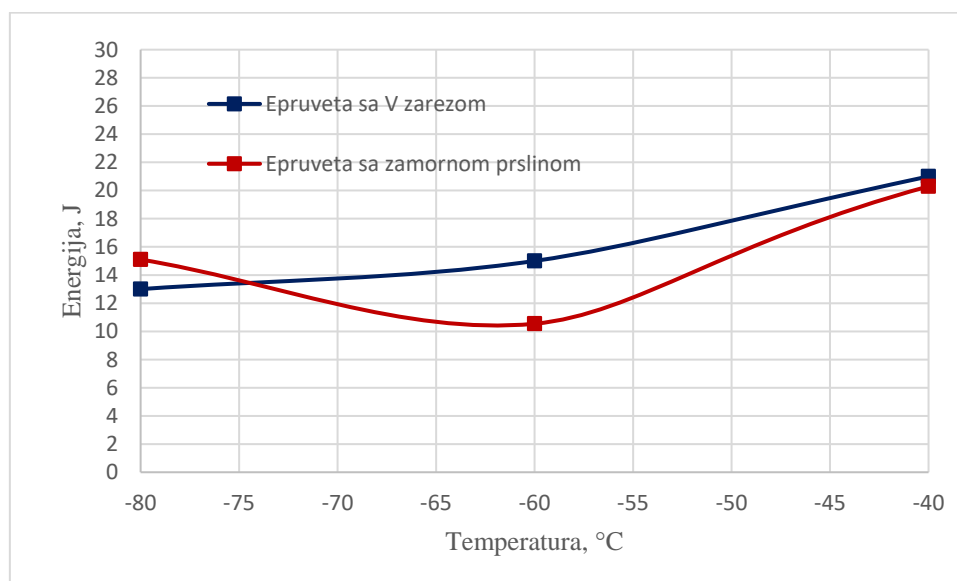
Tabela 7.10: Poređenje energija za ZUT.

Temp. °C	Energija rasta prsline standardne epruvete A_p , J	Ukupna udarna energija epruvete sa dodatnom zamornom prslinom A_{tot} , J
-80	13	15
-60	15	11
-40	21	20



Slika 7.18 Dijagram poređenje energija za ZUT

Krive poređene dijagramom na Slici 7.18 koja poredi energije dobijene ispitivanjem epruveta ZUT imaju veliko podudaranje, pa je u cilju bolje analize poređenje energija epruveta ZUT prikazano sa većom razmerom na Slici 7.19.



Slika 7.19 Uvećani dijagram poređenja energija za OM

Kao što se može videti sa slika 7.17 i 7.18 (kao i 7.19), vrednosti udarnih energija su pokazale jako dobro poklapanje u slučaju poređenja epruveta sa zarezom i epruveta sa prethodno unetom zamornom prslinom, za metal šava i zonu uticaja toplote. U slučaju poređenja ovih vrednosti za epruvete iz osnovnog metala, primećuje se znatna razlika – energija epruveta sa V zarezom je primetno veća od energije izmerene kod epruveta sa zamornom prslinom. Ovo se može objasniti činjenicom da u slučaju MŠ i ZUT epruveta došlo do krtoć loma, dok je osnovni metal pokazao duktilan karakter loma. Usled izrazite duktilnosti materijala koji je ispitan, mehanizam nastanka i rasta prsline je bio mnogo složeniji u odnosu na druge dve grupe epruveta. Kod ovako duktilnih materijala često dolazi do zatupljivanja prsline, što dovodi do privremenog prekida njenog rasta, praćenog formiranjem mikrošupljina ispred vrha prsline. Stoga se energija loma dalje troši na porast i spajanje ovih mikrošupljina, dok ne dođe do ponovnog rasta prsline. Kod epruveta iz osnovnog metala sa zamornom prslinom ovo nije bio slučaj (za razliku od epruveta sa V zarezom), budući da je prethodno opisani mehanizam loma već bio unet u epruvetu pre ispitivanja, preko zamorne prsline. Zbog ovoga je energija izmerena kod epruveta sa prslinom bila primetno manja. Kod epruveta iz MŠ i ZUT, lom je bio daleko jednostavnije (krte) prirode, i zato u tim slučajevima nije bilo značajne razlike sa i bez prsline. Svakako, uočene razlike energija navode da je potrebno dodatno istraživanje u cilju analize kako se tumače podele energija dobijenih instrumentiranim Šarpijevim klatnom, a naročito kod duktilnih materijala.

S obzirom da proverom uslova da vreme nastajanje nestabilnog loma mora biti manje od minimalnog vremena ispitivanja, nisu zadovoljeni kriterijumi standarda, što je obrađeno u poglavlju 6.6 nisu mogli biti proračunati karakteristični parametri mehanike loma po standard ASTM 1820 - Aneks 17. Ukoliko ne postoji mogućnost dobijanja parametara ovom metodom, u kom slučaju bi bilo moguće na osnovu jednog Šarpi uzorka

dobiti parameter mehanike loma, preostaje mogućnost ispitivanja ostalim klasičnim metodama koje zahtevaju veći broj uzoraka pruvetama većih dimenzija. Standard ostavlja mogućnost ispitivanja nestandardnim dimenzijama epruveta za Šarpi klatno, pri čemu bi morali biti ispunjeni svi uslovi definisani metodom u navedenom standardu, što može biti predmet daljeg istraživanja.

7.6 Diskusija fraktografije

Analizom uzoraka OM nakon ispitivanja udarne žilavosti mogu se konstatovati makroskopske karakteristike duktilnog loma. Uočene su izražene usne smicanja na uzorcima ispitanim na temperaturi $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, koje se smanjuju se sa sniženjem temperature, ali su vidljive čak i na uzorcima nakon ispitivanja na $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mikroskopskom analizom je potvrđeno da su na površinama preloma prisutne duktilne jamice, odnosno da se lom odvijao mehanizmom nastanka, rasta i spajanja mikrošupljina [73]. Dobijene visoke vrednosti energije udara na ovim uzorcima od oko 300 J na temperaturi $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 200 J na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ i oko 82 J $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ na (tabela 6.5), kao i dijagrami zavisnosti sila-vreme i energija-vreme, prikazani na slici 6.8, su u skladu sa uočenim makroskopskim i mikroskopskim karakteristikama površina preloma.

Makroskopska pojava delaminacije na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, koja je izraženija na nižim temperaturama, praćena sniženjem energije udara. Uočeno je da je delaminacija inicirana na vrhu zarez (Slika 6.22 c,d) i prostire se upravno na pravac prostiranja glavne prsline. Na površini na vrhu zarez prisutne su duktilne jamice (Slika 6.22a), kao i trouglaste oblasti (označeno strelicama na Slici 6.22c i d i 6.25c pri većem povećanju), na kojima je uočen lom cepanjem, koji je po prirodi transkristalni, krti lom. Ove karakteristike su još izraženije na uzorcima ispitanim na $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Slika 6.20d) [27]. Već izmerene energije rasta prsline u odnosu na energije inicijacije (tabela 6.6) su u skladu sa uočenim karakteristikama preloma. U zoni rasta prsline, čak i na uzorcima na ispitanim na $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ i u okolini delaminacije, prisutne su duktilne jamice. Iz ovoga je jasno da prelazna temperatura mora biti ispod ove temperature, što je merenjima i pokazano. Za OM prelazna temperatura je $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika 6.11a).

Uzorci metala šava, nakon ispitivanja udarene žilavosti, takođe su pokazali makroskopske karakteristike duktilnog loma (Slika 6.23). Fotografije sa stereo mikroskopa ukazuju na postojanje usana smicanja na svim ispitnim temperaturama. Mikroskopska analiza na skenirajućem elektronskom mikroskopu je potvrdila da su uzorci ispitani na $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ prekriveni duktilnim jamicama, dok su oni ispitivani na $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ pokazali karakteristike mešovito g loma, duktilnog jamičastog i krtog transkristalnog loma cepanjem (Slika 6.26). Znatno sniženje vrednosti energije loma na nižim temperaturama (tabela 6.7) su posledica pojave mešovito g loma, tj. povećanja udela krtog loma.

Površine preloma uzoraka kod kojih je vrh zarez bio pozicioniran u ZUT-u, su makroskopski pokazale manje usne smicanja i izraženiju pojavu delaminacije na odgovarajućim temperaturama, u odnosu na uzorke iz OM i MŠ. Pojava delaminacije je izraženija kod uzoraka ispitanih od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Slika 6.24). U zoni rasta prsline uočava se mešoviti lom i duktilni jamičasti na svim ispitnim temperaturama (Slika 6.24). Udeo krtog loma cepanjem se povećava sa opadanjem temperature ispitivanja. Povećan udeo krtog

loma i u zoni nastajanja i zoni rasta prsline, objašnjava niže vrednosti energija loma (tabela 6.8) u odnosu na prethodne uzorke.

Na osnovu fraktorgrafske analize se može zaključiti da na svim temperaturama ispitivanja lom ima dominantno duktilni karakter i da se sa sniženjem temperature povećava udeo krtoog loma, kako kod OM i kod svih zona zavarenog spoja. Ovakvo ponašanje se dovodi u vezu sa prisustvom austenita u mikrostrukturi čelika. Površinski centriranu rešetku (pov.c.k) karakteriše velika plastičnost, odnosno, veliki stepen deformacije pre pojave loma. Na ovaj način se pri udaru akumulira velika količina energije koja obezbeđuje dobru žilavost. Sa sniženjem temperature se u pov.c.k. metalima otežava proces poprečnog klizanja, tako da je za nastavak deformacije potrebno veće opterećenje. Ovo je razlog što se smanjuje akumulirana energija deformacije na vrhu prsline, a time dolazi do pada udarne žilavosti [71,72,73].

7.7 Ispitivanje parametara rasta zamorne prsline OM

Na osnovu dobijenih parametara Parisove jednačine C i m , urađen je primer procene preostalog veka upotrebe analizom broja ciklusa koji koristeći formulu:

$$N = \frac{1}{\left(\frac{m-2}{2}CY^m\pi^{\frac{m}{2}}\Delta\sigma^m\right)} \cdot \left(\frac{1}{a_0^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{a_c^{\frac{m-2}{2}}}\right) \quad (7.1)$$

Gde su:

N – broj ciklusa

C, m – koeficijenti Parisove jednačina (Tabela 6.9)

$\Delta\sigma$ – raspon opterećenja

Y – faktor geometrije (po preporuci $Y=1,12$)

a_0 – početna dužina prsline

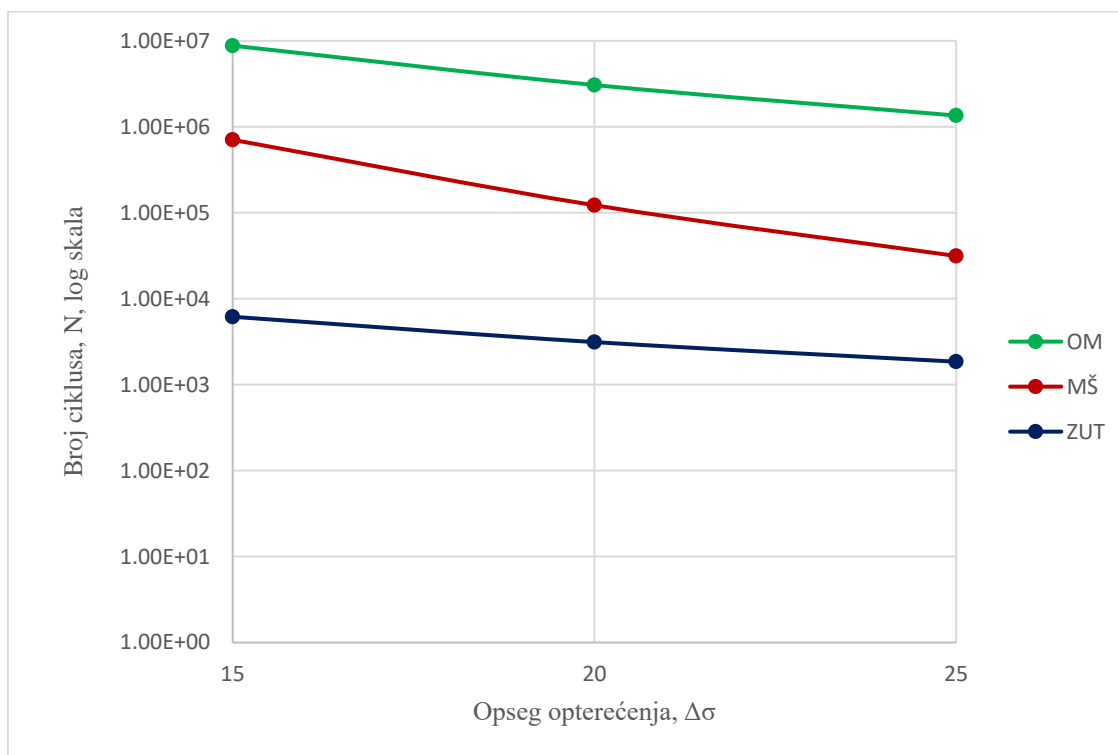
a_c – kritična dužina prsline

Za ovaj primer su usvojene vrednosti $a_0 = 1$ mm i $a_c = 5$ mm, a $\Delta\sigma$ je varirano sa 15, 20 i 25 predstavljajući različite vrste opsega opterećenja. Izbor početne dužine prsline odgovara dužini koja se može detektovati IBR metodama (Ispitivanje Bez Razaranja, eng. Non Destructive Testing – NDT), dok kritična dužina prsline predstavlja proizvoljan izbor za primer analize.

Izračunate vrednosti su prikazane tabelarno (Tabela 7.11) i dijagramom (Slika 7.20)

Tabela 7.11: Procena broja ciklusa za sve oblasti zavarenog spoja variranjem opsega opterećenja

Oblast	$\Delta\sigma$	N
OM	15	8793014
	20	3063549
	25	1352197
MŠ	15	706337
	20	122422
	25	31439
ZUT	15	6163
	20	3129
	25	1850



Slika 7.20: Dijagrami zavisnosti broja radnih ciklusa od opsega opterećenja za OM, MŠ i ZUT

Iz vrednosti prikazanih u Tabeli 7.11 se može zaključiti da je pad procenjenog veka znatan za MŠ, a naročito za ZUT u odnosu na OM gledano kroz broj ciklusa. To znači da ZUT najnepovoljnije utiče na procenjeni životni vek konstrukcije od super dupleks čelika sa zavarenim spojem.

Iz usvojenog primera je izračunato najveće skraćenje životnog veka kroz broj ciklusa na samo 0,07% od početnog broja ciklusa za OM, kada je usvojeno $\Delta\sigma=15$, dok ZUT pokazuje najbolji rezultat pri usvojenom $\Delta\sigma=25$ pri čemu je procenjeni vek smanjen na „samo“ 0,14% od početnog.

MŠ daje nešto bolje rezultate, pa je za $\Delta\sigma=15$ procena preostalog veka pala na 8,03% od početnog, dok je pri $\Delta\sigma=25$ procenjeni vek skraćen na čak 2,33% od početne procene za OM.

8 Zaključci

Istraživanja prikazana u ovom radu su imala za cilj da se ispita mogućnost upotrebe super dupleks nerđajućeg čelika S32750 na niskim temperaturama (do -80°C), kao i ponašanje zavarenih konstrukcija od ovog čelika izloženih udarnom i promenljivom opterećenju. U sklopu realizovanih istraživanja ispitan je uticaj na spektru niskih temperatura na sve tri oblasti zavarenog spoja: osnovni metal, metal šava i zonu uticaja toplote.

Na osnovu dobijenih rezultata merenja, njihove analize i diskusije može se zaključiti sledeće:

- Merenjem tvrdoće i ispitivanjem zateznih karakteristika osnovnog metala i zavarenog spoja je potvrđena dobra zavarljivost super dupleks nerđajućeg čelika S32750, jer uvođenjem zavarenog spoja nije došlo do značajne degradacije mehaničkih osobina. Dobrim izborom dodatnog materijala i tehnologije zavarivanja je dobijen kvalitetan zavareni spoj koji ne zahteva dodatnu termičku obradu, čime je izbegnut potencijalni dodatni izvor grešaka koji bi mogao uticati na skraćivanje radnog veka i havarije u eksploataciji;
- Makro i mikrostruktura potvrđuje dvofaznost OM dupleks čelika S32750 uz postojanje feritne i austenitne faze. Zapažanja izvedena za MŠ i ZUT su saglasna sa izmerenim udarnim energijama dobijenim ispitivanjem na Šarpijevom klatnu. Ispitivanjima tvrdoće i zatezanjem je pokazano da uočena pojava trakavosti u ploči osnovnog metala ne utiče na osnovne mehaničke osobine osnovnog metala;
- Ispitivanjem udarne žilavosti je potvrđeno da osnovni metal ima veoma veliku udarnu žilavost na svim ispitnim temperaturama, od 299 J na $+20^{\circ}\text{C}$ pa do 51 J na -135°C . U skladu sa iskustvom, heterogenost MŠ i ZUT je značajno uticala na udarnu energiju sa promenom ispitne temperature, jer je energija udara od 229 J pri ispitivanju MŠ na $+20^{\circ}\text{C}$ pala na 27 J pri ispitivanju na -80°C , a energija udara je od 88 J pri ispitivanju ZUT na $+20^{\circ}\text{C}$ pala na 18 J pri ispitivanju na -80°C ;
- Prelazna temperatura OM je vrlo niska i iznosi -110°C , ali je znatno viša za MŠ i ZUT, i iznosi -80°C i -50°C , respektivno, što znači da se zavarene konstrukcije od super dupleks nerđajućeg čelika S32750 mogu bezbedno koristiti samo na temperaturama iznad -50°C . Sa ovakvim rezultatima bi upotreba u vazduhoplovstvu bila ograničena jer po podacima o standardnoj atmosferi i projektnim zahtevima opseg temperature upotrebe vazduhoplova ima donju granicu od -80°C , pa bi korišćenje bilo ograničeno na manje visine ili geografske lokacije sa odgovarajućom temperaturom. Naravno, ovaj zaključak se odnosi samo na obrađeni postupak zavarivanja, bez naknadne termičke obrade;
- Raspodela udarne energije je povoljna jer je energija rasta prsline veća od energije nastajanja prsline. To znači da je će zavareni spoj od super dupleks

čelika, čak i ako dođe do pojave prsline ili greške tipa prsline, imati dovoljnu otpornost na rast prsline. U praktičnom smislu ovo znači da je sa nivoom energije potrebne rast prsline, taj proces spor pa ga je moguće pratiti i proceniti preostali vek do krtog loma, što je povoljno ukoliko se primenjuje projektovanje principom „damage tolerance“;

- Potvrđeno je da pri postojanju zamorne prsline totalna energija udara odgovara energiji rasta prsline pri ispitivanju ekvivalentnih epruveta bez zamorne prsline, za oblasti zavarenog spoja MŠ i ZUT kod kojih je dominantan krti lom, dok je kod OM, gde je značajan uticaj duktilnog loma, potrebno složenije objašnjenje za raspodelu energija. Zbog navedenog se tumačenje podele energija kod duktilnih materijala koje se dobija rezultatima ispitivanja na instrumentiranom Šarpi klatnu mora dodatno analizirati.
- Analiza fraktografije je u skladu sa dobijenim rezultatima udarnih ispitivanja kako na standardnim Šarpi epruvetama, tako i na epruvetama sa dodatnom zamornom prslinom, što se vidi iz udela duktilnog i krtog udela preloma, odnosno karakteristika prelomne površine, koji objašnjavaju vrednosti i raspodelu udarne energije;
- Analizom faktora osetljivosti na rast prsline je pokazano da je taj faktor vrlo mali za sve tri zone OM, MŠ i ZUT, a sa padom temperature, a da čak postoji i tendencija pada faktora osetljivosti, naročito za MŠ i ZUT na temperaturi -60°C . Odgovor za ovu pojavu je tražen u dostupnim podacima, ali nije bilo moguće izvući jasan zaključak. Da bi se objasnila ova pojava potrebno je dalje istraživanje sa većim brojem ispitivanja;
- Ispitivanjem jednog uzorka standardne Šarpi epruvete sa dodatnom zamornom prslinom nije moguće dobiti parametre mehanike loma, kako definiše postupak iz standarda ASTM 1820 Aneks 17, jer nisu ispunjeni svi kvalifikacioni uslovi za tu metodu, ali je moguće dalje istraživanje ispitivanjem epruveta nestandardnih dimenzija;
- Ispitivanjem i primenom parametara rasta zamorne prsline na procenu veka konstrukcije od čelika S32750 sa zavarenim spojem je pokazano da MŠ i ZUT znatno smanjuju procenjeni vek konstrukcije, a da je smanjanje veka izuzetno veliko za ZUT, čime se ograničava vek cele konstrukcije.

Rezultati ispitivanja ovog istraživanja daju praktičan doprinos oceni upotrebe super dupleks nerđajućeg čelika S32750 na niskim temperaturama (do -80°C), uz ocenu uticaja udarnog i promenljivog opterećenja na vek zavarenih konstrukcija od ovog čelika, sa ciljem analize upotrebe u vazduhoplovnoj industriji. Tokom istraživanja su uočeni problemi i pojave čija analiza predstavlja dodatni doprinos, a postavljena pitanja mogu biti teme za naredna istraživanja.

Shodno navedenom, osnovnu naučni doprinosi ove disertacije su:

- Utvrđen je uticaj mikrostrukture na raspodelu energije udara na energiju nastanka i energiju rasta prsline u svim oblastima zavarenog spoja primenom Šarpi epruveta sa zarezom i sa dodatnom zamornom prslinom, čime je omogućeno i određivanje faktora osetljivosti na prsline, [44,45].

- Na osnovu energije udara utvrđena je temperatura prelaska u kruti loma za sve oblasti zavarenog spoja, čime je određena minimalna temperatura eksploatacije, a na osnovu brzine rasta zamorne prsline, utvrđen je preostali vek, što čini praktični naučni doprinos. [44,45]

Smernice za dalje istraživanja

Pitanja i pojave koji su otkriveni tokom ovog istraživanja predstavljaju smernice za dalja istraživanja. Ona treba da budu usmerena ka analizi alternativnih postupaka zavarivanja i njihovom uticaju na ponašanje zavarenog spoja od dupleks čelika S32750 na niskim temperaturama, uz naročito obraćanje pažnje na karakteristike MŠ i ZUT. Takođe treba istražiti detaljnijim ispitivanjem pojavu pada osetljivosti na rast prsline u MŠ i ZUT na ispitnoj temperaturi -60°C . U cilju procene integriteta i preostalog veka je potrebno detaljnije razraditi metodologiju ispitivanja i procene parametara mehanike loma na osnovu udarnog ispitivanja instrumentiranim Šarpijevim klatnom. Uz to treba analizirati i dosadašnje tumačenje podela energije dobijenih instrumentiranim Šarpijevim klatnom kod duktilnih materijala. Takođe i pojava trakavosti može biti tema narednih istraživanja, iako u ovom radu nije pokazala bitan uticaj na ponašanje zavarenog spoja.

Literatura

- [1] Gunn N, *Duplex stainless steels / Microstructure, properties and applications*, 1997. Abington Publishing, Cambridge UK, ISBN: 9781855733183
- [2] <https://www.outokumpu.com/en/products/product-ranges/forta>
- [3] Do, Jae Yoon; Kim, Jin Hwan; Ahn, Seok Hwan; et al. (2002), *Fatigue crack propagation behavior and acoustic emission characteristics of the heat affected zone of super duplex stainless steel*, Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, 40(9): 924-931. ISSN 0253-3847
- [4] Van Nassau, L., Meelker, H., Hilkes, J. (1994), *Welding of duplex and super-duplex stainless steels*, Souder, 18(4): 35-51. ISSN 0246-1900
- [5] Johansson, R., *Fatigue and Fracture Properties of Duplex Stainless Steels*, in: ASM Handbook Vol.19, Fatigue and Fracture, 1997,
- [6] Tavares, S.S.M., Silva, V.G., Pardal, J.M., Corte, J.S. (2013), *Investigation of stress corrosion cracks in a UNS S32750 superduplex stainless steel*, Engineering Failure Analysis, 35: 88-94. ISSN 1350-6307. doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.12.013
- [7] Pereira, H.B., Panossian, Z., Baptista, I.P., de Farias Azevedo, C.R. (2019), *Investigation of stress corrosion cracking of austenitic, duplex and super duplex stainless steels under drop evaporation test using synthetic seawater*, Materials Research, 22(2): e20180211. ISSN 1516-1439. doi: 10.1590/1980-5373-mr-2018-0211
- [8] Cojocar, E.M., Raducanu, D., Vintila, A.N., et al. (2020), *Influence of ageing treatment on microstructural and mechanical properties of a solution treated UNS S32750/EN 1.4410/F53 Super Duplex Stainless Steel (SDSS) alloy*, Journal of Materials Research and Technology, 9(4): 8592-8605. ISSN 2238-7854. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.05.127
- [9] Li, J., Shen, W., Lin, P., et al. (2020), *Effect of solution treatment temperature on microstructural evolution, precipitation behavior, and comprehensive properties in UNS S32750 super duplex stainless steel*, Metals, 10(2020): 1481. ISSN 2075-4701. doi: 10.3390/met10111481
- [10] Lage, M.A., Assis, K.S., Mattos, O.R. (2015), *Hydrogen influence on fracture toughness of the weld metal in super duplex stainless steel (UNS S32750) welded with two different heat input*, Int. J Hydrogen Energy, 40(2015): 17000-17008. ISSN 0360-3199. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.150
- [11] Serafimov, S., Chavdarov, P. (2007), *Electron beam welding of superduplex stainless steel S32750*, originally presented at the Stainless Steel World 2007 Conf., Maastricht, the Netherlands, p.24.
- [12] Camerini, C., Sacramento, R., Areiza, M.C. (2015), *Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization*, J Magnetism and Magnetic Materials, 388(2015): 96-100. ISSN 0304-8853. doi: 10.1016/j.jmmm.2015.04.034
- [13] Kotecki, D.J. (2011), *Neke klopke pri zavarivanju dupleks nerđajućih čelika*, (prevod s engleskog), Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 2/2011, str. 63-69. ISSN 0354-7965
- [14] Karlsson, L. (2018), *Zavarivanje dupleks čelika- pregled sadašnjih preporuka*, (prevod s engleskog), Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 1/2018, str. 29-35. ISSN 0354-7965

- [15] Jegdić, B.V., Bobić, B.M. (2007), *Korozija zavarenih spojeva*, Integritet i vek konstrukcija, 7(2): 101-104. ISSN 1451-3749
- [16] Dimčić, B.D., Cvijović, Z.M., Radenković, G.M. (2003), *Stabilnost d ferita u strukturi dupleks nerđajućih čelika*, XLI Savetovanje Srpskog hemijskog društva, Beograd, 2003. ISBN 86-7132-014-6
- [17] Tahchieva, A.B., Llorca-Isern, N., Cabrera, J.-M. (2019), *Duplex and superduplex stainless steels: microstructure and property evolution by surface modification processes*, Metals, 9 (2019): 347. ISSN 2075-4701. doi: 10.3390/met9030347
- [18] Gennari, C., Pezzato, L., Simonetto, E., et al. (2019), *Investigation of electroplastic effect on four grades of duplex stainless steels*, Materials, 12(2019): 1911. ISSN 1996-1944. doi: 10.3390/ma12121911
- [19] Gennari, C., Pezzato, L., Tarabotti, G., et al. (2020), *Influence of electropulsing treatments on mechanical properties of UNS S32750 duplex stainless steel*, Materials, 13(2020): 1613. ISSN 1996-1944. doi:10.3390/ma13071613
- [20] Johansson, J., *Residual stresses and fatigue in a duplex stainless steel*, Doctoral dissertation, Division of Eng. Mater., Dep. of Mech. Eng., Linkopings Universitet, Linkoping, Sweden, (1999) p.110.
- [21] Čabrilo, A., *Mehaničke osobine i brzina rasta zamorne prsline u zavarenom spoju pancirnog čelika*, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad (2018), str. 258.
- [22] Charpy, G. Note sur l'essai des metaux a la flexion par choc de barreaux entaillés, Association internationale pour l'essai des materiaux – Budapest. *Int. J. Fract.* **1901**, 25, 287–305.
- [23] Tóth, L.; Rossmanith, H.-P.; Siewert, T.A. Historical background and development of the Charpy test. *Eur. Struct. Integr. Soc.* **2002**, 30, 3–19. <https://doi.org/10.1016/S1566-136980002-4>
- [24] Grabulov, V.; Burzić, Z.; Momčilović, D. *Significance of Mechanical Testing for Structural Integrity*; IFMASS 9: Belgrade, Serbia, 2008.
- [25] Viehrig, H.-W.; Boehmert, J.; Dzuga, J. Use of instrumented Charpy impact tests for the determination of fracture toughness values. *Eur. Struct. Integr. Soc.* **2002**, 30, 245–252. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20212469>.
- [26] Schmitt, W.; Varfolomeyev, I.; Böhme, W. Modelling of the Charpy test as a basis for toughness evaluation. *Eur. Struct. Integr. Soc.* **2002**, 30, 45–56. <https://doi.org/10.1016/S1566-136980005-X>.
- [27] Wallin, K.; Nevasmaa, P.; Planman, T.; Valo, M. Evolution of the Charpy-V test from a quality control test to a materials evaluation tool for structural integrity assessment. *Eur. Struct. Integr. Soc.* **2002**, 30, 57–68.
- [28] Jovanovic, M.; Camagic, I.; Sedmak, S.; Zivkovic, P.; Sedmak, A. Crack initiation and propagation resistance of HSLA steel welded joint constituents. *Struct. Integr. Life* **2020**, 20, 11–14.
- [29] Jovanovic, M.; Camagic, I.; Sedmak, S.; Sedmak, A.; Burzic, Z. The Effect of Material Heterogeneity and Temperature on Impact Toughness and Fracture Resistance of

- SA-387 Gr. 91 Welded Joints. *Materials* **2022**, *15*, 1854. <https://doi.org/10.3390/ma15051854>.
- [30] Prokic-Cvetkovic, R.; Popovic, O.; Radovic Lj. Sedmak A.; Cvetkovic I. Fracture Behavior of AlMg4.5Mn Weld Metal at Different Temperatures under Impact Loading. *Sustainability* **2023**, *15*, 1550. <https://doi.org/10.3390/su15021550>.
- [31] Tvergaard, V.; Needleman, A. 3D Charpy specimen analyses for welds. *Eur. Struct. Integr. Soc.* **2002**, *30*, 437–444. [https://doi.org/10.1016/S1566-1369\(02\)80049-8](https://doi.org/10.1016/S1566-1369(02)80049-8).
- [32] Čamagić, I.; Jović, S.; Radojković, M.; Sedmak, S.; Sedmak, A.; Burzić, Z. Delamarian, C. Influence of Temperature and Exploitation Period on the Behaviour of a Welded Joint Subjected to Impact Loading. *Struc. Integr. Life* **2016**, *16*, 179–185.
- [33] Jovanović, M.; Čamagić, I.; Sedmak, A.; Burzić, Z.; Sedmak, S.; Živković, P. Analysis of SA 387 Gr. 91 welded joints crack resistance under static and impact load. *Procedia Struct. Integr.* **2021**, *31*, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.008>.
- [34] Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, 3rd Ed. (2014), Published by the Int. Molybdenum Assoc. (IMOA), London, UK. ISBN 978-1-907470-09-7, p.68.
- [35] Pezzato, L.; Calliari, I. Advances in Duplex Stainless Steels. *Materials* **2022**, *15*, 7132. <https://doi.org/10.3390/ma15207132>.
- [36] Barella, S.; Ciuffini, A.F.; Gruttadauria, A.; Mapelli, C.; Mombelli, D.; Longaretti, E. Corrosion and Oxidation Behaviour of a Fe-Al-Mn-C Duplex Alloy. *Materials* **2019**, *12*, 2572. <https://doi.org/10.3390/ma12162572>.
- [37] Biserova-Tahchieva, A.; Cabrera, J.M.; Llorca-Isern, N. Study of the Thermochemical Surface Treatment Effect on the Phase Precipitation and Degradation Behaviour of DSS and SDSS. *Materials* **2020**, *13*, 165. <https://doi.org/10.3390/ma13010165>.
- [38] Silva Leite Carla Gabriela, da Cruz Eli Jorge Junior, Lago Mattia, Zambon Andrea, Calliari Irene and Ventrella Vicente Afonso, Nd: YAG Pulsed Laser Dissimilar Welding of UNS S32750 Duplex with 316L Austenitic Stainless Steel. *Materials* **2019**, *12*, 2906. <https://doi.org/10.3390/ma12182906>.
- [39] Rodriguez, B.R.; Miranda, A.; Gonzalez, D.; Praga, R.; Hurtado, E. Maintenance of the Austenite/Ferrite Ratio Balance in GTAW DSS Joints Through Process Parameters Optimization. *Materials* **2020**, *13*, 780. <https://doi.org/10.3390/ma13030780>.
- [40] Cojocaru, E.M.; Nocivin, A.; Raducanu, D.; Angelescu, M.L.; Cinca, I.; Balkan, I.V.; Serban, N.; Cojocaru, V.D. Microstructure Evolution during Hot Deformation of UNS S32750 Super-Duplex Stainless Steel Alloy. *Materials* **2021**, *14*, 3916. <https://doi.org/10.3390/ma14143916>.
- [41] Zhao, J.; Shi, Y.; Guo, S.; Zhu, M. Micromechanical Observation and Numerical Simulation for Local Deformation Evolution of Duplex Stainless Steel. *Materials* **2022**, *15*, 8076. <https://doi.org/10.3390/ma15228076>.
- [42] Krawczyk, R.; Słania, J.; Golanski, G.; Pfeifer, T. Mechanical Properties and Microstructure of Austenite–Ferrite Duplex Stainless Steel Hybrid (Laser +

- GMAW) and SAW Welded Joint. *Materials* **2023**, *16*, 2909. <https://doi.org/10.3390/ma16072909>.
- [43] Abdo, H.S.; Seikh, A.H. Mechanical Properties and Microstructural Characterization of Laser Welded S32520 Duplex Stainless Steel. *Materials* **2021**, *14*, 5532. <https://doi.org/10.3390/ma14195532>.
- [44] Perkočić S.; Radaković, Z.; Burzić, Z.; Sedmak, S.; Sedmak, A. Stress concentration effects on toughness value of duplex steel S32750, *Struct. Integr. Life* **2023**, *23*, 3–7.
- [45] Perkočić S., Sedmak A., Radaković Z., Burzić Z., Sedmak S., Radović L., Mandić J. *Effect of Temperature on S32750 Duplex Steel Welded Joint Impact Toughness*. MDPI *Materials*. 2023; 16(12):4432. <https://doi.org/10.3390/ma16124432>
- [46] C.E.Inglis, *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*. Proc. Inst. Naval Arch. 55: 219-241, 1913.
- [47] A.A.Griffith, *The phenomena of rupture and flow in solids*. Phil. Trans. Roy. Soc. London. A, 221: 163-198, 1920.
- [48] G.R.Irwin, J.A.Kies, *Fracturing and fracture dynamics*. Welding Journal. Res. Sup. 31(2): 95s-100s, 1952.
- [49] G.R.Irwin, J.A.Kies, *Critical energy rate analysis of fracture strength*. Welding Journal. Res. Sup. 33(4): 193s-198s, 1954.
- [50] G.R.Irwin, *Plastic zone near a crack and fracture toughness*. Proc. 7th Sagamore Research Conf. on Mechanics & Metals Behavior of Sheet Material. Vol. 4, 463-478. Racquette Lake, NY, 1960.
- [51] D.S.Dugdale, *Yielding of steel sheets containing slits*. J. Mech. Phys. Solids. 8: 100-104, 1960.
- [52] A.A.Wells, *Application of fracture mechanics at and beyond general yielding*. British Welding Journal 11: 563-570, 1963.
- [53] J.R.Rice, *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. J. Appl. Mech. 35, pp. 379-386, 1968.
- [54] Sedmak, A., *Primena mehanike loma na integritet konstrukcija (monografija)*.: Mašinski fakultet Beograd. 2003.
- [55] Anderson, T.L., *Fracture Mechanics, Fundamentals and Application*. CRC Press, Boca Raton, USA, 2005.
- [56] ASTM E1820-16 *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. 2016.
- [57] Lucon, E., *The Use of the Normalization Data Reduction Technique for Measuring Upper Shelf Toughness Under Impact Loading Rates*, Journal of ASTM International, Vol. 8, No. 10, November 2011.
- [58] ASTM A240 - *Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications*
- [59] EN 12072, 1999. Edition, - *Welding Consumables - Wire Electrodes, Wires and Rods for Arc Welding of Stainless and Heat-Resisting Steels - Classification*, 1999.

- [60] Stauffer, A.C., Koss, D.A. & McKirgan, J.B. *Microstructural banding and failure of a stainless steel*. Metall Mater Trans A **35**, 1317–1324 (2004). <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0306-2>
- [61] Miranda-Pérez, A.F.; Rodríguez-Vargas, B.R.; Calliari, I.; Pezzato, L. *Corrosion Resistance of GMAW Duplex Stainless Steels Welds*. Materials **16** (2023) 1847. <https://doi.org/10.3390/ma16051847>
- [62] Junhe Li, Wei Shen, Ping Lin, Fuming Wang and Zhanbing Yang, *Effect of Solution Treatment Temperature on Microstructural Evolution, Precipitation Behavior, and Comprehensive Properties in UNS S32750 Super Duplex Stainless Steel*, Metals **2020**, *10*, 1481; doi:10.3390/met10111481
- [63] Juan Manuel Salgado Lopez, María Inés Alvarado, Hector Vergara Hernandez, José Trinidad Perez Quiroz, Luis Olmos, *Failure of Stainless Steel Welds Due to Microstructural Damage Prevented by In Situ Metallography*, Soldagem & Inspeção. 2016;21(2):137-145 <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2102.03>
- [64] SRPS EN ISO 9015-1: *Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje tordoće – Deo 1: Ispitivanje tordoće elektrolučno zavarenih spojeva*, 2001.
- [65] SRPS EN ISO 6892-1: *Metalni materijali – Ispitivanje zatezanjem – Deo 1: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi*, 2020.
- [66] SRPS EN ISO 148-1: *Metalni materijali – Ispitivanje udarom Šarpijevim klatnom – Deo 1: Metoda ispitivanja*, 2017.
- [67] SRPS EN ISO 9016: *Ispitivanje sa razaranjem zavarenih spojeva metalnih materijala – Ispitivanje udarom – Postavljanje epruveta, orijentacija zarezova i ispitivanje* 2022.
- [68] SRPS EN ISO 14556: *Metalni materijali – Ispitivanje epruveta sa V-zarezom udarom Šarpijevim klatnom – Instrumentalna metoda ispitivanja*, 2016.
- [69] Radica Prokić Cvetković; Olivera Popović; *Metalurgija zavarivanja*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet Beograd 2019.
- [70] Pilhagen, J.; Sandstrom, R. *Delaminations by Cleavage Cracking in Duplex Stainless Steels at Sub-Zero Temperatures*. Met. Mat Trans. A **2014**, *45*, 4192. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2412-0>
- [71] Đ. Drobnjak, *Fizička metalurgija*. TMF. Beograd 2016.
- [72] G. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, MC Graw-Hill, London, 1988.
- [73] R.W.Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, John Wiley&Sons, Hoboken, USA, 1996.
- [74] PARIS, P.C., ERDOGAN, F., *A Critical Analysis of Crack Propagation Laws*, Trans. ASME, Journal Basic Eng., Vol. 85, No. 4, p. 528.
- [75] PARIS, P.C., SIH, G.C., *Stress Analysis of Cracks, Fracture Toughness Testing and Application*, STP 381, p. 30-83.
- [76] ASTM E399, *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*, 2022.
- [77] ISO 2533: *Standard Atmosphere*, 1975

-
- [78] MIL-STD 210C: Climatic information to determine design and test requirements for military systems and equipment, 1987.
- [79] Easy Access Rules for Large Aeroplanes (CS-25), EASA – European Union Aviation Safety Agency, 2018.
- [80] Lazzeri, Roberta. *A comparisson between Safe-life, Damage -tolerance and probabiilistic approaches to aircraft structure fatigue design*. L' Aerotecnica, Missili e Spazio. 2. (2002).
- [81] J.A.Harris Jr, *Engine component retirement for cause*, Vol. 1, Executive Summary, AFWAL-TR-87-4609, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1987

BIOGRAFSKI PODACI AUTORA

Srđa Lj. Perković je rođen 6.8.1973. u Beogradu. Završio je osnovnu školu „Marko Orešković“ u Beogradu, Elektro-mašinsku školu „Zemun“ u Beogradu. Mašinski fakultet u Beogradu je upisao 1992. godine. Diplomirao je 2000. godine na Katedri za vazduhoplovstvo sa diplomskim radom na temu “Određivanje i definisanje oblika letelice u početnoj fazi projektovanja” (sa ocenom 10,00 za diplomski rad) i prosečnom ocenom tokom studija 8,13. Doktorske studije je upisao školske 2012./2013. Ispite predviđene programom doktorskih studija položio je sa prosečnom ocenom 9,64. Uz vođenje Laboratorije za eksperimentalnu čvrstoću u Sektoru za vazduhoplovstvo Vojnotehničkog instituta, učesnik je na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja TR 36050 (Istraživanje i razvoj bespilotnog vazduhoplova za podršku praćenju saobraćajne infrastrukture).

Radno iskustvo

1996.	IAI - CAG (Israel Aircraft Industry - Civil Aviation Group), Izrael;
2001. - 2002.	Elektro-mašinska škola Zemun; Elektrotehnička škola Nikola Tesla;
2002.	Mašinski fakultet u Beogradu, Katedra za vazduhoplovstvo;
2002. - 2003.	“IT School @ Gozo”, Malta;
2003. - 2006.	PESIFIT Inženjering d.o.o. Beograd
2006. - 2010.	DAT Inženjering d.o.o. Beograd
2011. -	Vojnotehnički institutu u Beogradu

Prilog 1

Izjava o autorstvu

Autor

Srđa Lj. Perković

broj indeksa

D35/2012

Izjavljujem:

da je doktorska disertacija pod naslovom:

**ANALIZA UTICAJA PROMENLJIVOG I UDARNOG OPTEREĆENJA
NA PONAŠANJE ZAVARENIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJA
IZRAĐENIH OD SUPER DUPEKS ČELIKA**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i koristio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 20.10.2023.

Potpis autora

Prilog 2

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: Srđa Lj. Perković

Broj indeksa: D35/2012

Studijski program: Doktorske akademske studije

Naslov rada: **ANALIZA UTICAJA PROMENLJIVOG I UDARNOG OPTEREĆENJA NA PONAŠANJE ZAVARENIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJA IZRAĐENIH OD SUPER DUPLEKS ČELIKA**

Mentor : Prof. dr Zoran Radaković

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portal **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 20.10.2023.

Potpis autora

Prilog 3

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**ANALIZA UTICAJA PROMENLJIVOG I UDARNOG OPTEREĆENJA
NA PONAŠANJE ZAVARENIH ČELIČNIH KONSTRUKCIJA
IZRAĐENIH OD SUPER DUPLEKS ČELIKA**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo - nekomercijalno
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade
4. Autorstvo - nekomercijalno - deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo - bez prerade
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

U Beogradu, 20.10.2023.

Potpis autora
