

Procjena mehaničkih svojstava zavarenoga spoja primjenom instrumentirane Charpy metode

Mandić, Davor

Doctoral thesis / Disertacija

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:652529>

Rights / Prava: [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Davor Mandić

PROCJENA MEHANIČKIH SVOJSTAVA ZAVARENOGA SPOJA PRIMJENOM INSTRUMENTIRANE CHARPY METODE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Davor Mandić

PROCJENA MEHANIČKIH SVOJSTAVA ZAVARENOGA SPOJA PRIMJENOM INSTRUMENTIRANE CHARPY METODE

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Željko Alar, izv. prof.

Zagreb, 2019.



University of Zagreb

Faculty of mechanical engineering and naval architecture

Davor Mandić

EVALUATION OF WELDED JOINT MECHANICAL PROPERTIES BY INSTRUMENTED CHARPY METHOD

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:

Assoc. prof. Željko Alar, PhD

Zagreb, 2019.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU TABLICU

UDK:	621.791-026.56
Ključne riječi:	instrumentirana Charpy metoda, statičko vlačno ispitivanje, sila, dinamička čvrstoća, dinamička lomna žilavost, podatljivost, zavareni spoj, ograničavajući faktor, metoda kliznih linija
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	STROJARSTVO
Institucija na kojoj je izrađen rad:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor rada:	Izv. prof. dr. sc. Željko Alar
Broj stranica:	195
Broj slika:	109
Broj tablica:	26
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	87
Datum obrane:	14.06.2019.
Povjerenstvo:	Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić - predsjednik Izv. prof. dr. sc. Željko Alar - mentor Doc. dr. sc. Dario Iljkić - član
Institucija na kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAHVALA

Na početku, želim se zahvaliti mentoru profesoru Željku Alaru na vođenju tijekom studiranja te na pomoći pri izboru područja istraživanja. Njegove sugestije bile su značajan poticaj za ustrajno istraživanje na ovo temi.

Posebno se zahvaljujem inženjeru Donaldu R. Irelandu koji je svojim savjetima dao ogroman doprinos pri izradi ovoga rada. Nevjerojatna je sreća stupiti u kontakt s jednim od pionira istraživanja metode instrumentiranog udarnog ispitivanja koji i dalje ustrajno radi na problemima instrumentiranih Charpy uređaja.

Zahvaljujem se profesoru Ivici Garašiću na pomoći kod izrade zavarenih ploča. Isto tako zahvaljujem se inženjeru Slobodanu Buršiću i njegovim tehničarima na pomoći pri izradi ispitnih uzoraka.

Nadalje, iskreno se zahvaljujem inženjerima Matiji Sakomanu i Tamari Aleksandrov te profesorici Vesni Alar na pomoći pri ispitivanju uzoraka.

Zahvaljujem se inženjerima Mariju Lovriću i Nihadu Crnaliću na savjetima u vezi zavarivačkih postupaka.

Mojim dragim prijateljima i kolegama s FSB-a želim se zahvaliti na svim savjetima i za osmjeh na licu s kojim sam se uvijek vraćao iz Zagreba!

Na kraju, posebno se zahvaljujem mojim roditeljima te sestri s obitelji i djevojci na strpljenju, potpori, razumijevanju i ljubavi koju su mi pružili i koji su me bodrili kada je bilo najteže.

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
SUMMARY	II
KLJUČNE RIJEČI	III
KEY WORDS	III
POPIS OZNAKA	IV
POPIS SKRAĆENICA	IX
POPIS SLIKA	XI
POPIS TABLICA	XV
1. UVOD	1
1.1. Pregled trenutnog stanja u području istraživanja	2
1.2. Osnovna ideja.....	4
1.3. Cilj i hipoteza istraživanja	5
1.4. Metodologija i plan istraživanja.....	5
2. INSTRUMENTIRANA CHARPY METODA	8
2.1. Povijest instrumentirane Charpy metode.....	12
2.2. Razvoj normi udarnog ispitivanja	14
2.3. Ispitni uređaj	15
2.4. Ispitni uzorci	20
2.5. Postupak instrumentiranog ispitivanja	22
2.5.1. Utjecaj temperature ispitivanja na vrijednosti sila	23
2.5.2. Utjecaj brzine bata.....	24
2.5.3. Utjecaj geometrije ispitnog uzorka	25
2.6. Određivanje fizikalnih veličina i mehaničkih svojstava.....	25
2.6.1. Procjena sile pri granici razvlačenja i maksimalne sile.....	27

2.6.2. Procjena apsorbirane energije	29
2.6.3. Procjena dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja	30
2.6.4. Procjena dinamičke vlačne čvrstoće	31
2.6.5. Procjena dinamičke lomne žilavosti.....	35
3. DEFORMACIJA CHARPY UZORKA PRI SAVIJANJU	40
3.1. Ravninsko naprezanje i ravninsko stanje deformacija	40
3.2. Utiskivanje klina u ravnu podlogu	45
3.3. Poprečno savijanje Charpy uzorka.....	47
4. FRAKTOGRAFIJA CHARPY UZORKA	65
5. KARAKTERIZACIJA ZAVARENOG SPOJA.....	69
5.1. Čelici povišene čvrstoće	69
5.1.1. Zavarljivost čelika povišene čvrstoće.....	70
5.2. Postupci zavarivanja.....	71
5.3. Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom	72
5.4. Zahtjevi na postupak zavarivanja.....	74
5.4.1. Zahtjevi na zavarivača	76
6. EKSPERIMENTALNI DIO.....	78
6.1. Osnovni materijal.....	79
6.1.1. Statičko vlačno ispitivanje	79
6.1.2. Ispitivanje tvrdoće	83
6.1.3. Ispitivanje udarnog rada loma.....	85
6.1.4. Kemijski sastav	89
6.1.5. Analiza mikrostrukture	90
6.1.6. Fraktografija osnovnog materijala	91
6.2. Zavareni spoj.....	95

6.2.1. Statičko vlačno ispitivanje	97
6.2.2. Ispitivanje tvrdoće	101
6.2.3. Ispitivanje udarnog rada loma.....	103
6.2.4. Kemijski sastav	107
6.2.5. Analiza mikrostrukture	109
6.2.6. Fraktografija zavarenog spoja.....	112
6.3. Rezultati ispitivanja instrumentiranom Charpy metodom.....	115
6.3.1. Instrumentirano ispitivanje osnovnog materijala	115
6.3.2. Instrumentirano ispitivanje zavarenog spoja	118
7. DISKUSIJA.....	125
8. ZAKLJUČAK.....	140
9. LITERATURA	143
ŽIVOTOPIS	152
BIOGRAPHY	153
PRILOG I – Mehanička svojstva osnovnog materijala	154
PRILOG II – Tvrdoća zavarenoga spoja	155
PRILOG III – Udarni rad loma zavarenoga spoja.....	157
PRILOG IV – Dijagrami apsorbirana energija – pomak - brzina	163
PRILOG V – EDS površinska analiza zavarenoga spoja	165
PRILOG VI – Mikrostruktura zavarenoga spoja	167
PRILOG VII – Prijelomne površine zavarenoga spoja	173
PRILOG VIII – Izmjerene vrijednosti instrumentiranom metodom.....	178
PRILOG IX – Dijagrami sila – pomak – apsorbirana energija.....	190
PRILOG X – Vrijednosti ograničavajućeg faktora	193

SAŽETAK

Najpoznatija metoda za određivanje udarnog rada loma te procjenu ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja je Charpyjeva metoda. U ovom znanstveno-istraživačkom radu uspoređeni su rezultati ispitivanja dobiveni pomoću instrumentirane Charpy metode s rezultatima dobivenim statičkim vlačnim ispitivanjem u svrhu procjene prihvatljivosti rezultata ispitivanja instrumentiranom Charpy metodom kod zavarenih spojeva. Tu se prije svega misli na karakteristične sile (sila pri granici razvlačenja i maksimalna sila) te naprezanju pri granici razvlačenja i naprezanju pri maksimalnoj sili. U svrhu ispitivanja uzorci za Charpyjevu i statičku vlačnu metodu izrađeni su iz osnovnog materijala, metala zavara i zone utjecaja topline. Iz dijagrama sila-vrijeme i sila-pomak, dobivenih instrumentiranom Charpy metodom, određene su vrijednosti karakterističnih sila i dinamičkih čvrstoća pri istim silama. Norma za instrumentiranu Charpy metodu daje samo okvirne naputke na koji način odrediti vrijednosti karakterističnih sila, stoga se je prišlo pronalaženju nove metode njihove procjene koja je korištena u ovom radu. U svrhu proračuna dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja i dinamičke lomne žilavosti koristile su se poznate metode, dok je za proračun vrijednosti dinamičke vlačne čvrstoće korištena nova metoda procjene. Rezultati ispitivanja pokazali su dobru korelaciju između rezultata dobivenih instrumentiranom Charpyjevom metodom i rezultata dobivenih statičkim vlačnim pokusom što otvara mogućnost za daljnja istraživanja na tom području.

SUMMARY

The best known method for determining absorbed energy and evaluation of material behaviour under the impact conditions is Charpy impact test. In this research results of the mechanical properties obtained from instrumented Charpy method were compared with results obtained from static tensile test. The purpose is to evaluate the acceptability of the results obtained from the instrumented Charpy method of welded joints. Yield force, maximum force, dynamic yield strength and dynamic tensile strength are in the main focus of this work. Samples for instrumented Charpy method and for static tensile test are machined from the base material, weld metal and head affected zone. Yield and maximum forces, as well as the dynamic strengths at the stated forces were estimated from the force-time diagram and force-displacement diagram obtained from instrumented Charpy method. Standard for instrumented Charpy method gives only the general guide how to estimate values of the stated forces, hence the new method for its estimation is introduced. To estimate the dynamic yield strength and dynamic fracture toughness, common methods were used. New method was introduced to estimate dynamic tensile strength. Test results show good correlation between results given by instrumented Charpy method and results given by static tensile test which opens the possibility for further researches.

KLJUČNE RIJEČI

instrumentirana Charpy metoda, statičko vlačno ispitivanje, sila, dinamička čvrstoća, dinamička lomna žilavost, podatljivost, zavareni spoj, ograničavajući faktor, metoda kliznih linija

KEY WORDS

instrumented Charpy method, static tensile test, force, dynamic strength, dynamic fracture toughness, compliance, welded joint, constraint factor, slip-line method

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
A	Istezljivost	%
A_m	Koeficijent regresijske krivulje	
A	Vrijednost u polju kliznih linija	
a_0	Početna dubina zareza	mm
B	Debljina ispitnog uzorka	mm
B	Vrijednost u polju kliznih linija	
b	Širina noža	mm
C	Zamišljena podatljivost	mm/kN
C_{ekv}	Ekvivalent ugljika	%
C_{el}	Početna podatljivost	mm/kN
C_t	Ukupna podatljivost	mm/kN
C_m	Podatljivost uređaja	mm/kN
C_s	Podatljivost uzorka	mm/kN
c_0	Brzina zvuka kroz materijal	m/s
d_0	Početni promjer uzorka ili debljina osnovnog materijala	mm
d	Duljina u polju kliznih linija	mm
E	Modul elastičnosti	N/mm ²
F	Sila	N
f	Ograničavajući faktor	
FA	Udio smičnog loma	%
F_a	Dinamička sila na kraju nestabilnog širenja pukotine	N
F_f	Sila u trenutku nastanka pukotine	N
F_{gyd}	Sila razvlačenja pri dinamičkom opterećenju	N
F_m	Maksimalna sila pri statičkom vlačnom pokusu	N
F_{md}	Maksimalna sila pri dinamičkom opterećenju	N
F_{iu}	Dinamička sila na početku nestabilnog širenja pukotine	N
$F_{p0,2}$	Sila pri konvencionalnoj granici razvlačenja	N

G	Modul smika	N/mm^2
g	Ubrzanje sile teže	m/s^2
H	Količina difundiranog ugljika	%
h	Visina ispod zarez	mm
HV	Tvrdoća po Vickersu	
J	Riceov integral	
J_{Id}	Dinamička lomna žilavost	kJ/m^2
K	Apsorbirana energija	J
K_K	Apsorbirana energija u bilo kojoj točki	J
K_N	Potencijalna energija koju deklarira proizvođač ispitnog uređaja	J
K_p	Potencijalna energija ispitnog uređaja	J
KU_2	Apsorbirana energija, U zarez, promjer noža 2 mm	J
KU_8	Apsorbirana energija, U zarez, promjer noža 8 mm	J
KV_2	Apsorbirana energija, V zarez, promjer noža 2 mm	J
KV_8	Apsorbirana energija, V zarez, promjer noža 8 mm	J
k	Hidrostatički tlak	Pa
k	Konstanta	
L	Duljina ispitnog uzorka	mm
LE	Bočno širenje	mm
M	Moment savijanja	Nm
m_m	Osjetljivosti prirasta istezanja pri vlačnoj čvrstoći	
N	Broj ponavljanja	
n	Koeficijent očvršćenja materijala	
P	Opterećenje	N
P_{cm}	Parametar kemijskog sastava čelika prema Itto-Bessyo	%
P_w	Parametar pucanja	
R	Vrijednost u polju kliznih linija	
R	Veličina plastične zone	mm
R_{gyd}	Dinamička čvrstoća pri granici razvlačenja	N/mm^2
$R_{p0,2}$	Konvencionalna granica razvlačenja-naprezanje koje izaziva trajnu deformaciju od 0,2%	N/mm^2
$R_{t0,5}$	Konvencionalna granica razvlačenja-naprezanje koje izaziva ukupnu trajnu deformaciju od 0,5%	N/mm^2

R_e	Granica razvlačenja	N/mm^2
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm^2
R_{md}	Dinamička vlačna čvrstoća	N/mm^2
r	Faktor rotacije	
r_0	Polumjer zareza	mm
S	Razmak između vertikalnih oslonaca	mm
S_0	Površina	mm^2
s	Pomak	mm
s_{gyd}	Pomak pri sili razvlačenja	mm
s_{md}	Pomak pri maksimalnoj sili	mm
s_{iu}	Pomak u trenutku nestabilnog početka širenja pukotine	mm
s_a	Pomak na kraju nestabilnog širenja pukotine	mm
s_t	Ukupan pomak	mm
T	Vektor trakcije	
t	Vrijeme	s
t_f	Vrijeme u trenutku nastanka pukotine	s
t_K	Vrijeme u bilo kojoj točki	s
t_{gyd}	Vrijeme pri sili razvlačenja	s
u	Vektor pomaka	mm
v	Brzina	m/s
v_0	Početna brzina	m/s
v_{gyd}	Brzina pri granici razvlačenja	m/s
v_{md}	Brzina pri maksimalnoj sili	m/s
W	Širina ispitnog uzorka	mm
W_a	Energija na kraju nestabilnog širenja pukotine	J
W_{iu}	Energija na početku nestabilnog širenja pukotine	J
W_m	Energija pri maksimalnoj sili	J
W_{mr}	Revidirana energija	J
W_t	Ukupna energija	J
W_K	Gustoća energije deformiranja	J/m^3
W_i	Stvarna apsorbirana energija uzorka	J
$W_i^{'}$	Prividna energija pri nastanku pukotine	J
x	Udaljenost od korijena zareza	mm

z	Konstanta	
z	Udaljenost od površine uzorka	mm
α	Početni kut klatna	°
α_0	Kut zareza uzorka	°
α_c	Kritični kut	°
α_k	Elastični faktor koncentracije naprezanja	
$\alpha_{k(p)}$	Plastični faktor koncentracije naprezanja	
Γ	Krivulja	
Γ_t	Krivulja vrha zareza	
Δ_a	Produljenje pukotine	mm
Δ_{pl}	Pomak od točke nastanka pukotine do kraja stabilnog širenja pukotine	mm
γ	Kut u polju kliznih linija	°
γ_{ij}	Kutna deformacija	mm
$\dot{\epsilon}_m$	Prirast istezanja kod statičkog vlačnog pokusa	s ⁻¹
$\dot{\epsilon}_{md}$	Prirast istezanja pri maksimalnoj sili kod Charpy metode	s ⁻¹
$\dot{\epsilon}_{gyd}$	Prirast istezanja pri granici razvlačenja kod Charpy metode	s ⁻¹
ϵ_{ij}	Tenzor deformacije	mm
η_{gy}	Faktor pri granici razvlačenja	
η_m	Faktor pri maksimalnoj sili	
θ	Nagib tangente na liniji α ili β familije	°
λ	Kut u polju kliznih linija	°
ν	Poissonov koeficijent	
ζ	Konstanta	
π	Matematička konstanta	
σ_{ij}	Tenzor naprezanja	N/mm ²
σ_e	Naprezanje pri granici razvlačenja	N/mm ²
σ_{max}	Maksimalno naprezanje	N/mm ²
σ_n	Nazivno naprezanje	N/mm ²
τ_{ij}	Tenzor tangencijalnog naprezanja	N/mm ²
τ_e	Tangencijalno, smično, naprezanje pri granici razvlačenja	N/mm ²
τ_t	Vrijeme jednog titraja	s

$\tau_{\max}$	Maksimalno tangencijalno naprezanje	N/mm ²
τ_{gyd}	Smično naprezanje pri granici razvlačenja	N/mm ²
τ_{md}	Smično naprezanje pri maksimalnoj sili	N/mm ²
φ	Kut savijanja uzorka	°
ψ	Kut u polju kliznih linija	°
ϑ	Temperatura	°C
ϑ_p	Prijelazna temperatura	°C

POPIS SKRAĆENICA

Skraćenica	Opis
ASTM	eng. <i>American Society for Testing and Materials</i> / Američko društvo za ispitivanje i materijale
API	eng. <i>American Petroleum Institute</i> /Američki institut za naftu
AWS	eng. <i>American Welding Society</i> / Američko društvo za zavarivanje
BCC	eng. <i>Body Centered Cubic</i> / prostorno centrirana kubična
BSED	eng. <i>Backscatter electron detector</i> / detektor povratnog raspršenja
CCR	eng. <i>Compliance Changing Rate</i> / metoda promjene podatljivosti
COD	eng. <i>Crack Opening Displacement</i> / otvor pukotine
CRM	eng. <i>Certified Reference Materials</i> / certificirani referentni materijali
CTOD	eng. <i>Crack Tip Opening Displacement</i> / otvor vrška pukotine
CVN	eng. <i>Charpy V-notch</i> / Charpy uzorak s V-zarezom
EDS	Energijska disperzivna spektroskopija
EN	Eng. European Standard / Europska norma
ETD	eng. <i>Everhart Thornley detector</i> / detektor sekundarnih elektrona
FCAW	eng. <i>Flux Cored Arc Welding</i> / elektrolučni postupak zavarivanja u plinskoj zaštiti praškom punjene žice
FCAW-S	eng. <i>Flux Cored Arc Welding</i> / elektrolučni postupak zavarivanja u plinskoj zaštiti praškom punjene žice bez dodatnog zaštitnog plina
FCAW-G	eng. <i>Flux Cored Arc Welding</i> / elektrolučni postupak zavarivanja u plinskoj zaštiti praškom punjene žice s dodatnim zaštitnim plinom
FCC	eng. <i>Face Centered Cubic</i> / Plošno centrirana kubična
FESEM	eng. <i>Field Emission Scanning Electron Microscopy</i> / Skenirajući elektronski mikroskop s emisijom polja
FFT	eng. <i>Fast Fourier transform</i> / metoda separacije varijabli
GDS	eng. <i>Glow Discharge Spectroscopy</i> / Optička emisijska spektrometrija
HRN	Hrvatska norma
ISO	eng. <i>International Organization for Standardization</i> / Međunarodna organizacija za normizaciju
MZ	Metal zavara
MIG	eng. <i>Metal inert gas</i> / Elektrolučno zavarivanje uz zaštitu inertnih plinova

NIST	eng. <i>National Institute of Standards and Technology</i> / Nacionalni institut za standardizaciju i tehnologiju
OSN	Osnovni materijal
PCVN	eng. <i>Precracked Charpy V-notch</i> / Charpy uzorak s V-zarezom koji sadrži namjerno iniciranu pukotinu u korijenu zareza
PPŽ	Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
SVI	Statičko vlačno ispitivanje
SZW _c	eng. <i>Critical stretch zone width</i> / širina kritične zone istezanja
TMCP	eng. <i>Thermomechanically controlled processing</i> / termomehanički postupak valjanja
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS SLIKA

Slika 1. Presjeci Russellovog ispitnog uređaja [36].....	8
Slika 2. Russellov ispitni uređaj iz godine 1898. [36]	9
Slika 3. Charpyjev uređaj iz godine 1901. [37]	10
Slika 4. Shematski prikaz Dunnove metode mjerenja pomaka projiciranjem svjetla na pomičnu fotografsku traku [1]	12
Slika 5. Shematski prikaz Watanabeovog rješenja. 1 – disk od kvarca, 2 – čelični blok, 3 – oslonci, 4 – ispitni uzorak, 5 - nož [1]	13
Slika 6. Stvarni dijagram dobiven instrumentiranom Charpy metodom	14
Slika 7. Suvremeni instrumentirani Charpy uređaj [40]	15
Slika 8. Skica prednjeg i bočnog pogleda na uređaj RKP 450 [40].....	16
Slika 9. Konfiguracija dijelova uređaja ispitne metode prema Charpyju [41]	17
Slika 10. Shematski prikaz temelja [40].....	17
Slika 11. Instrumentirani nož polumjera oštrice 2 mm a); klasični nož polumjera oštrice 2 mm b); geometrija oštrice noža c).....	18
Slika 12. Instrumentirani nož polumjera oštrice 8 mm a); klasični nož polumjera oštrice 8 mm b); geometrija oštrice noža c).....	18
Slika 13. Kabel za spajanje instrumentiranog noža a); instrumentirani nož b)	19
Slika 14. V-zarez a); U-zarez b)	20
Slika 15. Polumjeri zarez, odnosno oznake uzoraka iz dijagrama: V – 0,25 mm; E – 0,02 mm; R – 0,00 mm [47]	22
Slika 16. Utjecaj temperature i polumjera oštrice noža na vrijednosti karakterističnih sila [45]	23
Slika 17. Prikaz jakih oscilacija sile na stvarnom dijagramu sila - pomak	24
Slika 18. Karakteristični dijagrami sila – pomak (A, B, C, D, E, F). Gdje je 1 - tip dijagrama sila – pomak; 2 - Shema dijagrama; 3 - Stvarni dijagram sila – pomak [2]	27
Slika 19. Određivanje sile pri granici razvlačenja F_{gyd} i maksimalne sile F_{md}	28
Slika 20. Geometrija savinutog uzorka gdje je φ kut savijanja [55]	33
Slika 21. Zarez u dvodimenzionalnom polju deformacije. Γ je bilo koja krivulja koja okružuje vrh zarez, a Γ_1 je krivulja vrha zarez [57]	35
Slika 22. Shematski prikaz CCR metode [24]	36
Slika 23. Shematski prikaz korekcije energije [24]	37
Slika 24. Područje zone rastezanja SZW _c [59]	38
Slika 25. Ravninsko stanje naprezanja a); ravninsko stanje deformacije b); osnosimetrično stanje c) [61].....	40
Slika 26. Komponente tenzora naprezanja	41
Slika 27. Linije klizanja:	44
Slika 28. Polje kliznih linija:	46
Slika 29. Raspodjela naprezanja ispod korijena zarez [67]	48

Slika 30. Elastično-plastična raspodjela naprezanja ispod korijena zareza [67]	48
Slika 31. Plastična deformacija Charpy uzorka, $z = 0$ mm, povećanje 20 X [68]	51
Slika 32. Plastična deformacija Charpy uzorka, $z = 5$ mm, povećanje 60 X [68]	52
Slika 33. Utjecaj opterećenja na rast plastične zone [67]	53
Slika 34. Procjena stanja ravninske deformacije Charpy uzorka [68]	53
Slika 35. Promjena maksimalnog naprezanja s veličinom plastične zone [68]	54
Slika 36. Razvoj plastične deformacije. Desno-ravninska deformacija; lijevo-ravninsko naprezanje. Kut $\Phi = \alpha_0$ [69]	56
Slika 37. Deformacija nakon granice razvlačenja [69]	56
Slika 38. Shematski prikaz linija klizanja [17]	57
Slika 39. Polako poprečno savijanje Charpy uzorka:	58
Slika 40. Shematski prikaz polja kliznih linija pri $\alpha_0 > 2\alpha_c$ [70]	60
Slika 41. Polje kliznih linija s idealiziranom ravnom bazom noža pri ispitivanju Charpy metodom [20]	63
Slika 42. Fraktografija Charpy uzorka [71]	66
Slika 43. Jamičasti lom:	67
Slika 44. Rascjepni lom:	68
Slika 45. Rascjepni lom:	68
Slika 46. FCAW postupak zavarivanja:	73
Slika 47. Platforma Apollo	76
Slika 48. Zavarene ploče	78
Slika 49. Ispitni uređaji za statičko vlačni ispitivanje:	80
Slika 50. Shema uzorkovanja ispitnih uzoraka	80
Slika 51. Statičko vlačno ispitivanje:	81
Slika 52. Dijagram naprezanje – istezanje	82
Slika 53. Ispitivanje tvrdoće:	83
Slika 54. Ispitivanje udarnog rada loma:	85
Slika 55. Shema uzorkovanja ispitnih uzoraka	86
Slika 56. Charpy uzorci	86
Slika 57. Zarez ispitnog uzorka	87
Slika 58. Dijagram ispitivanja udarnog rada loma	88
Slika 59. Uređaj za ispitivanje kemijskih svojstava, model GDS 500A	89
Slika 60. Mjerna mjesta određivanja kemijskog sastava na API 5L X80	89
Slika 61. Uređaj za brušenje i poliranje model LaboPol-5	90
Slika 62. Analiza mikrostrukture:	91
Slika 63. Optički stereomikroskop	92
Slika 64. Pretražni elektronski mikroskop:	92
Slika 65. Fotografije prijelomnih površina Charpy uzorka, povećanje 10X	93
Slika 66. Prijelomne površine Charpy uzorka	94

Slika 67. Radiogram ploča:	96
Slika 68. Ispitni uzorci:	97
Slika 69. Shematski prikaz uzorkovanja:	98
Slika 70. Poprečni presjeci ispitnih uzoraka.....	98
Slika 71. Dijagram naprezanje – istezanje MZ.....	100
Slika 72. Dijagram naprezanje – istezanje ZUT	100
Slika 73. Izbrusak zavarenog spoja pripremljen za mjerenje tvrdoće.....	101
Slika 74. Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće.....	102
Slika 75. Shematski prikaz uzorkovanja zavarenog spoja [81]	103
Slika 76. Radiogram uzoraka, ploča 3L:.....	105
Slika 77. Radiogram uzoraka, ploča 4L:.....	105
Slika 78. Dijagram promjene apsorbirane energije i brzine ispitivanja obzirom na pomak, ploča 2D	106
Slika 79. Otisci mjerenja kemijskog sastava na MZ.....	107
Slika 80. Mikrostruktura metala zavora, ploča 1D, povećanje 500 X.....	109
Slika 81. Mikrostruktura metala zavora. BSED detektor, ploča 1D	110
Slika 82. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 1D, povećanje 500 X	110
Slika 83. Mikrostruktura zone utjecaja topline. BSED detektor, ploča 1D.....	111
Slika 84. Prijelomne površine MZ, ploča 2D	112
Slika 85. EDS analiza kemijskog sastava uključaka MZ, ploča 2D, b) Primjer spektra jednog mjerenja	113
Slika 86. Šupljine unutar metala zavora.....	114
Slika 87. Dijagram sila-vrijeme, osnovni materijal	116
Slika 88. Dijagram promjene sile i apsorbirane energije obzirom na pomak.....	117
Slika 89. Dijagram sila-vrijeme zavarenog spoja	119
Slika 90. Dijagram sila-pomak s dodanom osi ordinate.....	120
Slika 91. Usporedba sila kod osnovnog materijala.....	126
Slika 92. Usporedba sila kod metala zavora.....	127
Slika 93. Usporedba sila kod zone utjecaja topline	127
Slika 94. Usporedba sila kod metala zavora između ploča 2D, 3L i 4L	128
Slika 95. Usporedba sila u zoni utjecaja topline između ploča 2D, 3L i 4L	129
Slika 96. Usporedba mehaničkih svojstava osnovnog materijala.....	130
Slika 97. Korelacija između vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$, osnovni materijal	131
Slika 98. Korelacija između vrijednosti R_{md} i R_m , osnovni materijal	131
Slika 99. Usporedba mehaničkih svojstava metala zavora.....	132
Slika 100. Korelacija između vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$, metal zavora	132
Slika 101. Korelacija između vrijednosti R_{md} i R_m , metal zavora.....	133
Slika 102. Usporedba mehaničkih svojstava zone utjecaja topline	133
Slika 103. Korelacija između vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$, zona utjecaja topline	134
Slika 104. Korelacija između vrijednosti R_{md} i R_m , zona utjecaja topline	134

Slika 105. Usporedba mehaničkih svojstava metala zavora.....	135
Slika 106. Usporedba mehaničkih svojstava zone utjecaja topline	136
Slika 107. Usporedba vrijednosti dinamičke lomne žilavosti	137
Slika 108. Usporedba vrijednosti apsorbirane energije.....	138
Slika 109. Usporedba vrijednosti ograničavajućeg faktora.....	139

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije uzorka s V-zarezom	21
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika API 5L X80	70
Tablica 3. Kemijski sastav čelika API 5L X80.....	70
Tablica 4. Slijed ispitivanja.....	79
Tablica 5. Srednje vrijednosti izmjerenih mehaničkih svojstava čelika API 5L X80.....	81
Tablica 6. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala	84
Tablica 7. Rezultati mjerenja udarnog rada loma osnovnog materijala	87
Tablica 8. Srednje vrijednosti izmjerenog kemijskog sastava čelika API 5L X80.....	90
Tablica 9. Parametri zavarivanja	95
Tablica 10. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava MZ.....	99
Tablica 11. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava ZUT	99
Tablica 12. Srednje vrijednosti tvrdoće, lice zavara	102
Tablica 13. Srednje vrijednosti tvrdoća, korijen zavara.....	102
Tablica 14. Slike uzoraka zavarenoga spoja.....	104
Tablica 15. Srednje vrijednosti udarne radnje loma	106
Tablica 16. Srednje vrijednosti izmjerenog kemijskog sastava MZ	107
Tablica 17. Srednje vrijednosti kemijskog sastava MZ	108
Tablica 18. Srednje vrijednosti kemijskog sastava ZUT.....	108
Tablica 19. Kemijski sastav uključaka.....	113
Tablica 20. Srednje vrijednosti sila i mehaničkih svojstava osnovnog materijala.....	115
Tablica 21. Srednje vrijednosti sila i mehaničkih svojstava MZ i ZUT, ploča 2D.....	118
Tablica 22. Srednje vrijednosti sila MZ i ZUT ploča 3L i 4L.....	120
Tablica 23. Srednje vrijednosti zone utjecaja topline ploča 3L i 4L.....	121
Tablica 24. Rezultati mjerenja mehaničkih svojstava MZ, ploča 3L.....	122
Tablica 25. Rezultati mjerenja mehaničkih svojstava MZ, ploča 4L.....	123
Tablica 26. Srednje vrijednosti ograničavajućeg faktora	124

1. UVOD

Iako počeci Charpyjeve metode ispitivanja sežu od početka 20. stoljeća, bilo je potrebno oko šezdeset godina kako bi se postigla preciznost i ponovljivost mjerenja koja zadovoljavaju zahtjeve industrije. Razvoj klasične metode isprepliće se s razvojem instrumentirane u pogledu istraživanja deformacije odnosno načina i uzroka loma kako gotovih proizvoda tako i prvih idejnih uzoraka, što je i bila ideja istraživača. Dostupnost tehnologije i razumijevanje problema trenutnog loma, širenja pukotine, onemogućava brži razvoj Charpy metode, kako klasične tako i instrumentirane. Instrumentirano ispitivanje Charpy metodom kakvo danas poznajemo, a čiji počeci sežu u daleku godinu 1897., i dalje zahtjeva daljnji razvoj zbog velike nesigurnosti mjerenja sile pri dinamičkim uvjetima u vrlo kratkom vremenu [1]. Zbog velikih nesigurnosti mjerenja te sve bolje kvantifikacije utjecajnih veličina i klasičnu i instrumentiranu Charpy metodu danas bi trebalo "pomladiti" u smislu promjena na ispitnim uzorcima (oštriji zarezi, smanjiti poprečni presjek, napraviti dodatne bočne zareze), a isto tako potrebne su i promjene kod načina ispitivanja gdje se prije svega misli na smanjenje brzine ispitivanja zbog koje dolazi do jakih oscilacija na dijagramu sila-vrijeme odnosno sila-pomak što stvara poteškoće kod određivanja vrijednosti sila. Oštriji zarezi na uzorku bi svakako doprinijeli smanjenju oscilacija zbog lakšeg stvaranja pukotine.

Jedan od problema s kojim se istraživači danas susreću pri valorizaciji rezultata mjerenja Charpy metodom kod čelika visokih žilavosti, vrijednosti apsorbirane energije veće od 300 J potrebne za lom uzorka, je pojava da ne dolazi do loma uzorka već se uzorak savije te ga nož provuče kroz oslonce. Postavlja se pitanje da li se rezultati djelomično slomljenih uzoraka mogu uspoređivati s uzorcima kod kojih je nastupio potpuni lom. Jedna od mogućnosti kojom bi se izbjegao djelomičan lom uzorka je oštriji zarez. Uz standardni V-zarez, na Charpy uzorku moguće je u korijenu zareza napraviti i pukotinu umora materijala čime se otvara mogućnost mjerenja dinamičke lomne žilavosti premda u današnje vrijeme istraživači za ispitivanje dinamičke lomne žilavosti koriste i normirane Charpy uzorke.

Za razliku od klasične metode, instrumentirana metoda, zbog ugrađenih mjernih elemenata, pruža mogućnost mjerenja sila iz podataka o vremenu, putu i brzini, a što u konačnici doprinosi i procjeni mehaničkih svojstava u uvjetima udarnog opterećenja. Možemo reći da i klasična i instrumentirana Charpy metoda istraživačima danas daju puno podataka o

ponašanju materijala te da uz njen daljnji razvoj postoji mogućnost kvalitetne usporedbe s mehaničkim svojstvima dobivenih drugim metodama što će biti i okosnica ovoga rada. Jedan od važnijih problema šire upotrebe instrumentirane Charpy metode je visoka cijena uređaja te je u primjeni vrlo mali broj takvih uređaja koji se za sada isključivo nalaze u znanstvenim i istraživačkim institucijama. Iako je visoka cijena glavni razlog slabe upotrebe instrumentiranih Charpy uređaja, isti, uz daljnji razvoj te proširenje mogućnosti dobivanja šireg spektra vrijednosti mehaničkih svojstava, može postati jeftina i efikasna metoda ispitivanja mehaničkih svojstava s primjenom u industriji.

1.1. Pregled trenutnog stanja u području istraživanja

U svrhu procjene mehaničkih svojstava putem instrumentirane Charpy metode potrebno je na kvalitetan način odrediti karakteristične sile (sila pri granici razvlačenja i maksimalna sila). Trenutno važeća norma HRN EN ISO 14556:2015 [2] koja opisuje postupak instrumentiranog Charpy ispitivanja daje samo okvirne naputke na koji način procijeniti karakteristične sile. Današnji programski paketi, koji su sastavni dio ispitnog uređaja, nemaju razvijene kvalitetne algoritme pomoću kojih bi se dobili vjerodostojni rezultati sila odmah po završetku ispitivanja. Razlog tomu je činjenica da se pri udarnom ispitivanju razvijaju velike brzine bata, a što dovodi do velikih oscilacija sile. Istraživači su kroz povijest koristili tehniku pomičnih prosjeka pomoću koje su se velike oscilacije izgladile [3-5]. Druga metoda za izgladivanje oscilacija, koju koriste neki istraživači, je Furierova FFT metoda, a korištena je i u ovom radu i u preliminarnim ispitivanjima.

Istraživači Nacionalnog instituta za normizaciju i tehnologiju (eng. National Institute of Standards and Technology, NIST) objavili su niz radova na temu instrumentirane Charpy metode. Lucon E. i suradnici su u svojim radovima istraživali utjecaj raznih parametara na procjenu podatljivosti Charpy uređaja [6-8]. Utjecaj geometrije uređaja na procjenu dinamičke lomne žilavosti i novi način procjene dinamičke lomne žilavosti Lucon i suradnici opisali su u radovima [9-11]. Usporedba rezultata mjerenja sile, bočnog širenja, apsorbirane energije i podatljivosti između dva nacionalna mjeriteljska laboratorija pokazala je značajnu razliku pri mjerenju maksimalne sile i apsorbirane energije [12]. McCowan C. M. i suradnici istraživali su utjecaj polumjera noža na rezultate ispitivanja dinamičkih sila između više

ispitnih uređaja [13]. Lucon je u radu [14] istraživao novu metodu procjene dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja.

Kod pronalaženja vrijednosti maksimalne sile pri dinamičkom opterećenju isto tako ne postoji definirana procedura procjene već se istraživači služe opće prihvatljivom metodom kao što je primjena polinoma višeg reda. Nešto drugačija situacija je kod procjene dinamičkih čvrstoća. Server W. L. je u radu [15] dao jednadžbu za procjenu dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja kod ASTM metode (polumjer noža 8 mm) koristeći ograničavajući faktor (eng. *constraint factor*) te se je nadovezao na nekoliko ranijih istraživanja [16-19] od kojih treba istaknuti istraživanje Ewinga D. J. F. koji je u radu [20] dao možda i najznačajniji doprinos na tom području. Nastavak u tom smjeru istraživanja vidi se kroz rad Fanga J. [21] koji daje rezultate ispitivanja čvrstoće pri granici razvlačenja kod čelika API 5L X80 koristeći jednadžbu Servera W. L. pri čemu koristi nož polumjera oštice 8 mm. Dok kod procjene dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja poznajemo vrijednost ograničavajućeg faktora, njegova vrijednost pri dinamičkoj vlačnoj čvrstoći nije poznata. Međutim, Ewing u svome radu daje šest jednadžbi pomoću kojih je moguće izračunati vrijednost ograničavajućeg faktora. Tih šest jednadžbi korištene su u ovom radu. Khan I. A. i suradnici [22] razvijaju novu metodu koja potvrđuje vrijednosti ograničavajućeg faktora koje je dao Ewing. Lucon u radu [23] opisuje metodu procjene dinamičke vlačne čvrstoće putem prirasta istezanja tijekom udarnog ispitivanja, ali ne daje vrijednost ograničavajućega faktora.

Uz čvrstoću, podacima dobivenim instrumentiranim ispitivanjem moguće je procijeniti i vrijednost dinamičke lomne žilavosti. U dostupnoj literaturi navedeno je nekoliko načina na koji se može odrediti dinamička lomna žilavost [3, 24-28]. Kharchenko V. i suradnici predlažu novu metodu određivanja dinamičke lomne žilavosti postavljanjem mjernog uređaja na ispitni uzorak [29]. Moguće je koristiti standardne Charpy uzorke i Charpy uzorke s dodatno napravljenom pukotinom umora materijala. U ovom radu korištena je metoda predložena u radu Tsenga M. K. i suradnika [5] koja se pokazala vrlo pouzdanom [3, 4, 30-32]. Kako bi se procijenila dinamička lomna žilavost potrebno je odrediti trenutak nastanka pukotine što se Tsengovom metodom vrlo lako određuje. Metoda zahtjeva opsežnu obradu rezultata kako bi se izgladile velike oscilacije sile.

Usporedba rezultata dobivenih instrumentiranom Charpy metodom i statičkim vlačnim ispitivanjem dana je i u radu [33]. Novi pristup procjene ukupne podatljivosti, koji se pokazao dobrim, otvara mogućnosti za opsežno istraživanje na području procjene podatljivosti [34].

Novija dostupna istraživanja usmjerena su na procjenu mehaničkih svojstava te usporedba istih s mehaničkim svojstvima dobivenim drugim metodama. Međutim, kroz sva istraživanja povlači se problem mjerenja fizikalnih veličina poput sile i pomaka. Isto tako, problem procjene mehaničkih svojstava povezan je s elastičnom i plastičnom deformacijom ispitnog uzorka pri udarnom ispitivanju gdje i dalje postoji puno nepoznanica. Iako danas istraživači koriste metode simulacije savijanja ispitnog uzorka kako bi došli do određenih podataka, osnove i saznanja dobivena opsežnim istraživanjima do kojih se je došlo sredinom 20. stoljeća, a koja su opisana u poglavlju 3. ovoga rada i dalje služe u svrhu analize deformacije ispitnog uzorka i procjena mehaničkih svojstava.

1.2. Osnovna ideja

U industriji se kontrola zavarenih spojeva provodi nerazornim i razornim ispitivanjima. U Europi trenutno postoji jedanaest normi koje se odnose na razorno ispitivanje zavarenoga spoja. Korištenjem više metoda ispitivanja povećavaju se i troškovi proizvodnje (količina materijala, energija utrošena za izradu uzoraka, satnica radnika, vrijeme i novčana sredstva utrošena na ispitivanje).

Bez obzira na svrhu ispitivanja materijala (karakterizacija materijala za znanstvena ili industrijska istraživanja) cilj je dobiti što više relevantnih podataka o mehaničkim svojstvima materijala. Jasno, ako koristimo više metoda ispitivanja onda će troškovi materijala i vremena biti veći. Obzirom na kompleksnost nekih proizvoda ponekada je potrebno ispitati na stotine uzoraka što pored povećanja troškova proizvodnje dovodi i do velike količine gubitaka materijala koji nastane prilikom izrade ispitnih uzoraka. Za razliku od osnovnog materijala prilikom kontrole zavarivačkog postupka kontrolira se osoba koja zavaruje, parametri zavarivanja i gotovi zavareni spoj.

Ideja i motivacija za odabrano područje istraživanja proizašla je upravo iz problema oko velikih troškova proizvodnje u dijelu kontrole zavarivačkog postupka. Korištenjem

instrumentirane Charpy metode kod kontrole zavarenih spojeva, odnosno korištenje iste za dobivanje pojedinih vrijednosti mehaničkih svojstava umjesto provođenja statičkog vlačnog ispitivanja uvelike bi umanjilo troškove kontrole kvalitete proizvoda (materijal, radno vrijeme, ljudski resursi).

1.3. Cilj i hipoteza istraživanja

Cilj rada je dokazati da se instrumentiranom Charpy metodom mogu dobiti vrijednosti mehaničkih svojstava zavarenih spojeva koja su usporediva s mehaničkim svojstvima dobivenim statičkim vlačnim ispitivanjem, a sve u svrhu sveobuhvatnije kontrole kvalitete zavarenih spojeva. Također, u radu je primijenjena nova metoda procjene podatljivosti uređaja te procjene dinamičke vlačne čvrstoće.

U radu su pretpostavljene sljedeće hipoteze:

Instrumentiranom Charpy metodom s novim valoriziranim parametrima podatljivosti uređaja moguće je procijeniti mehanička svojstva materijala, kao što su vlačna čvrstoća, granica razvlačenja unutar prihvatljivih granica odstupanja pri mjerenju tih svojstava klasičnim statičkim vlačnim ispitivanjem.

Na temelju rezultata udarnog rada loma instrumentiranim Charpyjevim batom moguće je sveobuhvatnije ocijeniti mehanička svojstva zavarenog spoja odnosno njegovih pojedinih dijelova (zona utjecaja topline i sami zavar) te na temelju toga dati prosudbu o prihvatljivosti kvalitete zavarenog spoja.

1.4. Metodologija i plan istraživanja

Uz glavni cilj rada kojim se želi dokazati da se instrumentiranom Charpy metodom mogu dobiti vrijednosti približne onima dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem, u ovom radu uvedene su nove metode procjene koje doprinose boljem načinu obrade rezultata. Stoga se je u prvom planu krenulo u opsežno istraživanje literarnih izvora koji se odnose na teoriju elastičnosti i plastičnosti metalnih materijala, problematiku ispitivanja, vrste ispitnih uzoraka i obradu rezultata mjerenja. Nove metode procjene odnose se na ukupnu podatljivost sustava i

na dinamičku vlačnu čvrstoću. Novim načinom procjene ukupne podatljivosti moguće je doći do procijenjene vrijednosti podatljivosti Charpy uređaja, odnosno njegove krutosti za koju još ne postoji pouzdani postupak proračuna. Procjena dinamičke vlačne čvrstoće novim pristupom daje ohrabrujuće rezultate za nastavak istraživanja u vezi tog mehaničkog svojstva. Istraživanja koja se odnose na usporedbu dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja i dinamičke vlačne čvrstoće su nova i ima malo dostupnih informacija o ispitivanjima koja su provedena na osnovnom materijalu, dok ista ili slična objavljena istraživanja na zavarenim spojevima su vrlo rijetka. Preliminarna ispitivanja i stečena znanja navedena u pregledu dosadašnjih istraživanja su od velike koristi te su se koristila pri izradi ovog rada. Materijal koji je korišten za provedbu istraživanja je čelik povišene čvrstoće oznake API 5L X80 (europska oznaka: L555MB). Odabrani čelik je mikrolegiran i sadrži nizak udio ugljika. Ova vrsta čelika, a i svi drugi čelici povišene čvrstoće, podložni su pojavi hladnih pukotina uz druge pogreške zavarenog spoja. Upravo će zbog toga jedan segment istraživanja biti usmjeren i na ispitivanja mehaničkih svojstava s realnim (namjerno iniciranim) pogreškama koje se javljaju unutar zavarenog spoja. Odabrani postupak zavarivanja je automatsko elektrodužno zavarivanje praškom punjenom žicom, PPŽ (eng. FCAW). Ovaj postupak obično se koristi za cjevovode velikih promjera i prikladan je za širok raspon debljina materijala.

Temeljem dostupnih informacija iz literature i već provedenim preliminarnim ispitivanjima pristupilo se izradi plana istraživanja koji uključuje praćenje najnovijih literaturnih izvora, zatim eksperimentalni dio koji uključuje izradu zavarenih spojeva, izradu plana uzorkovanja i izradu ispitnih uzoraka kojih je ukupno bilo 150 komada te na kraju provedba ispitivanja. Od procijenjenog ukupnog broja uzoraka približno 80% odnosi se na uzorke napravljenima sukladno normama za ispitivanje udarnog rada loma. Ostatak se odnosi na uzorke za statičko vlačno ispitivanje, tvrdoću, kemijski sastav i metalografsku analizu. Za eksperimentalni dio uzorci za ispitivanje izradili su se iz osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavora. U svrhu istraživanja dio ispitivanja je proveden na pločama osnovnog materijala u nabavnom stanju. Drugi dio ploča iz iste šarže spojen je zavarivanjem. Na jednom dijelu zavarenih ploča namjerno su inducirane pukotine kako bi se simulirali mogući stvarni uvjeti u eksploataciji. Eksperimentalni dio koji se odnosi na ispitivanja uključio je ispitivanja mehaničkih i kemijskih svojstava, metalografsku analizu mikrostrukture te mikroskopsku analizu prijelomnih površina. Udarne ispitivanja provedena su na instrumentiranom Charpy uređaju sukladno normama HRN EN ISO 148-1:2012 i HRN EN 14556:2015, dok je

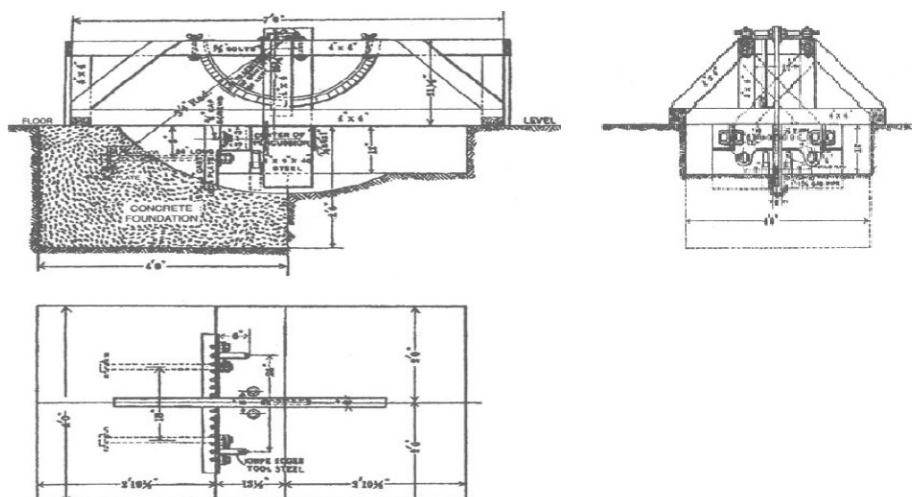
ispitivanje čvrstoća i istezljivosti provedeno na statičkoj kidalici primjenom bezkontaktnog ekstenzometra sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2016. Kemijska ispitivanja provedena su GDS metodom. Prijelomna površina analizirana je pretražnim elektronskim mikroskopom, dok je mikrostruktura analizirana svjetlosnim mikroskopom. Uz navedena mehanička ispitivanja provedena su mjerenja tvrdoće osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara Vickersovom metodom. Po provedenoj obradi rezultata dana je znanstvena analiza istih primjenom statističkih metoda. Zbog malo literarnih informacija u području istraživanja posebna pažnja dana je na instrumentiranu Charpy metodu kako bi se što bolje mogli interpretirati rezultati dobiveni tom metodom. Ovo uključuje i izradu matematičkog modela za uspostavljanje korelacijskih faktora za vrijednosti pojedinog mehaničkog svojstva dobivenog različitim metodama ispitivanja. U konačnici je dana znanstvena prosudba o mogućnostima sveobuhvatnije karakterizacije zavarenog spoja pomoću instrumentirane Charpyjeve metode.

Sva ispitivanja autor ovoga rada proveo je u Ustanovi Centar za istraživanje materijala Istarske Županije METRIS i na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

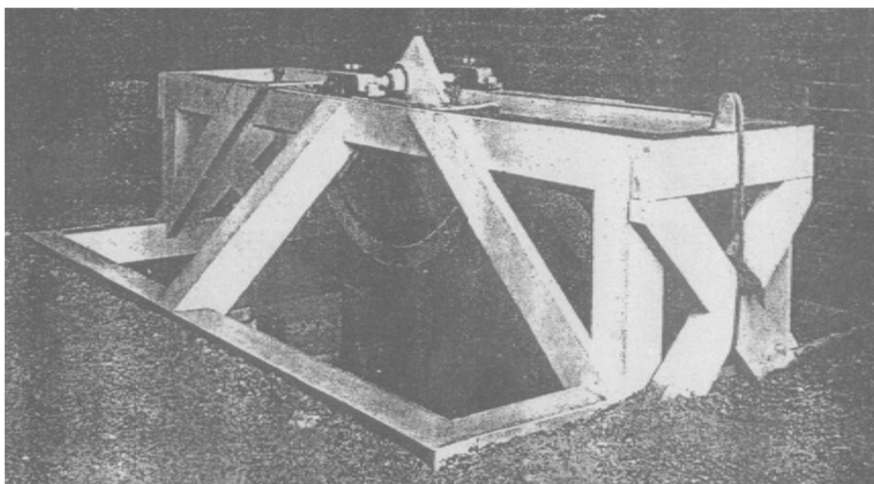
2. INSTRUMENTIRANA CHARPY METODA

Radi lakšeg razumijevanja razvoja instrumentirane Charpy metode dan je kratak osvrt na razvoj klasične Charpy metode.

Gotovo trideset godina razvoja bilo je potrebno za normizaciju klasične Charpy metode u svrhu ispitivanja materijala. Najraniji poznati objavljeni rad u kojemu se spominje udarno ispitivanje materijala datira iz godine 1824. autora Tredgolda T. [35]. Uređaj sa padajućim utegom je predstavljen godine 1857. od strane američkog časnika Rodmana T. J. Za razliku od krhkih materijala, kod žilavih materijala nije dolazilo do stvaranja pukotine već bi se samo savili stoga je Le Châtelier H. L. godine 1892. uveo uzorke sa zarezom. Sve do godine 1898. kada Russell S. B. predstavlja uređaj koji može mjeriti energiju potrebnu za lom uzorka, jedini podatak koji se je mogao dobiti od uređaja s padajućim utegom bio je da li je uzorak prelomljen ili nije. Russell je u svom radu dao analizu mehanike ispitivanja, centra ravnoteže i trenja te podatke o ispitivanju preko 700 uzoraka. Uređaj je bio velik i nezgrapan zbog toga što nisu postojali standardizirani uzorci već su se ispitivali gotovi proizvodi. Na slikama 1 i 2 prikazani su presjeci ispitnog uređaja i sam ispitni uređaj. Russell je svojim radom otvorio put prema kvantificiranju apsorbirane energije pri lomu materijala [36].



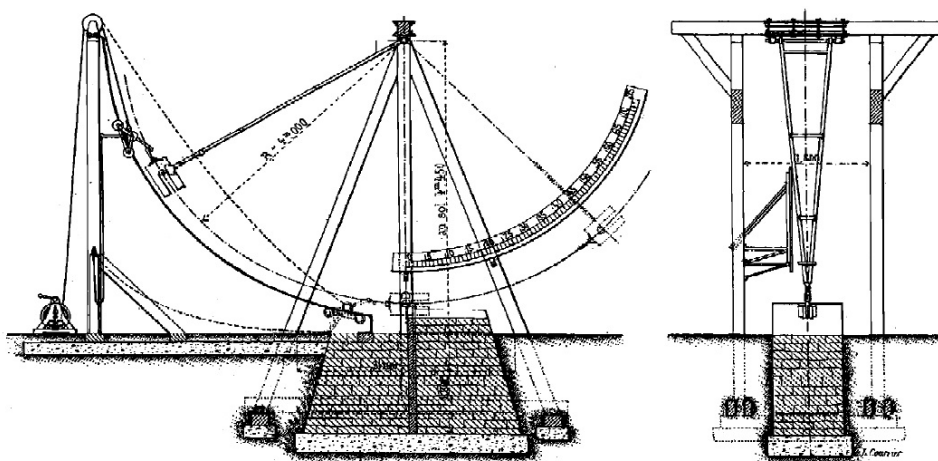
Slika 1. Presjeci Russellovog ispitnog uređaja [36]



Slika 2. Russellov ispitni uređaj iz godine 1898. [36]

Najsnažniji razvoj metode udarnog ispitivanja događao se je u razdoblju od godine 1901. do 1912. pod vodstvom Charpyja G. A. A. Zbog velikog zalaganja na području poboljšanja i standardizacije metode njegovo ime se je povezivalo s metodom. Godine 1901. Charpy izdaje rad pod nazivom „Note sur l'Essai des Metaux a la Flexion par Choc de Barreaux Entaillés” gdje opisuje uređaj koji je bio sličan nekim tadašnjima uređajima za udarno ispitivanje. Godine 1905. Charpy je predstavio uređaj, slika 3, u časopisu „The Engineer” koji je poboljšan te objavljuje i istraživanja na ispitnim uzorcima napravljenih od različitih materijala, dimenzija, oblika i dubine zareza [37]. U raznim časopisima počinju se navoditi termini poput (eng.: ”the Charpy test” ili ”the Charpy method”). Charpy je svoj rad nastavio sve do 1914. godine.

Do godine 1922. među istraživačima vodile su se rasprave o dimenzijama uzoraka, brzini i masi bata i načinu pričvršćenja na tlo što je otvorilo put prema normizaciji metode i izdavanju prvih normiranih dokumenata. Više o razvoju norma za udarno ispitivanje dano je u poglavlju 2.2 ovoga rada.



Slika 3. Charpyjev uređaj iz godine 1901. [37]

Najvažniji impuls za upotrebu udarnog ispitivanja u proizvodnji i karakterizaciji materijala bio je veliki broj havarija američke mornarice tijekom Drugog svjetskog rata. Nakon provedenih poboljšanja, broj lomova na brodovima se u dvije godine od 1944. do 1946. smanjio s nešto više od 130 mjesečno na manje od 5 mjesečno iako se je flota u tom periodu povećala s 2600 na 4400 brodova.

Nakon rata NIST, National Institute of Standards and Technology, (tadašnji U.S. National Bureau of Standards) je izdao dokument o važnosti udarnog ispitivanja. U radu su bila uključena ispitivanja kemijskog sastava, statičko vlačno ispitivanje, ispitivanje mikrostrukture i ispitivanje prema Charpy metodi. U tom dokumentu se navodi važan zaključak, a to je da limovi kod kojih se nije pojavila pukotina imaju višu udarnu energiju i nižu prijelaznu temperaturu. Ovaj podatak je bio važan zbog toga što prije nije postojala korelacija između kemijskog sastava, vlačnih svojstava i mikrostrukture. Dodatno, u izvještaju se navodi da minimalna apsorbirana energija treba iznositi 20 J te da posebnu pažnju treba obratiti na oblik zareza i da ispitivanja treba provoditi i na nižim temperaturama [38]. Sve ovo dovelo je do većeg korištenja Charpy metode.

Tijekom godina istraživači su pokušali smanjiti rasipanje rezultata ispitivanja između uređaja. Driscoll D. E. je godine 1955. u svom radu iznio rezultate istraživanja koji pokazuju da svi uređaji ne mogu zadovoljiti zahtjeve indirektnog umjeravanja ali da većina može zadovoljiti predložene zahtjeve uz uvjet da je uređaj održavan i da je ispitivanje provedeno pažljivo. Raspon u vezi rasipanja rezultata koji su uređaji morali zadovoljiti iznosio je $\pm 1,4$ J ili $\pm 5\%$

[38]. Usvajanjem procedura za umjeravanje uređaja više se nije moglo tvrditi da udarno ispitivanje ima veliko rasipanje rezultata. Rezultati umjeravanja pokazali su da 44% uređaja ne zadovoljava dane zahtjeve. Također se pokazalo da su se rezultati ispitivanja naglo poboljšali kada su se uređaji s lošim dizajnom stavili van uporabe, kvalitetni uređaji popravili i kada se veća pozornost obratila na proceduru ispitivanja. Uvođenjem ovih promjena procijenjeno je da više od 90 % uređaja može zadovoljiti zahtjeve od $\pm 1,4$ J ili ± 5 %.

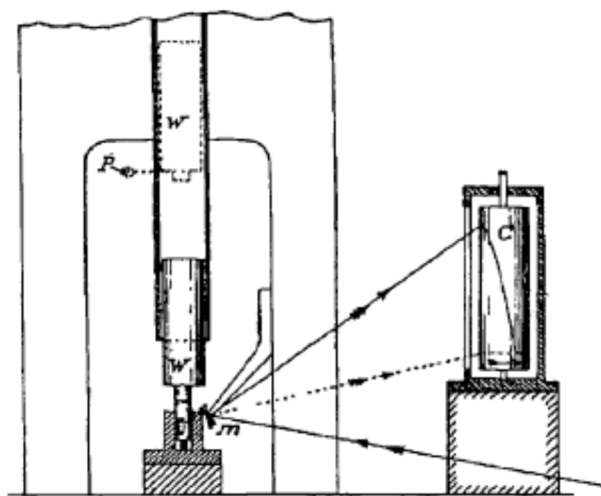
Fahey N. H. je godine 1961. naveo najvažnije razloge pogrešnih rezultata, a to su: neispravna instalacija uređaja, netočne dimenzije oslonaca i polumjera noža, veliko trenje kod pokretnih dijelova, labavi dijelovi, nedovoljan razmak između krajeva uzorka i bočnih oslonaca, loša strojna obrada ispitnih uzoraka i loša tehnika hlađenja uzoraka i ispitivanja [39].

Nakon što se riješio problem standardizacije ispitivanja ostalo je riješiti problem razlike u prijelaznim temperaturama između standardiziranih uzoraka i gotovih dijelova. Ta razlika je uočena nakon što su se rezultati ispitivanja gotovih dijelova na velikim Charpy uređajima usporedili s rezultatima dobivenim na standardnim uzorcima izrađenima od istog materijala. Djelomično rješenje ovoga problema je dobiveno razvojem metode s padajućim utegom. Ova metoda daje rezultate koji su slični onima dobivenim ispitivanjem gotovih dijelova ali samo kod limova određenih debljina. Prijelazna temperatura kod rezultata dobivenih Charpy metodom ovisi o veličini uzorka.

U međuvremenu se tijekom pedesetih godina dvadesetog stoljeća došlo do saznanja da je za puno točnije shvaćanje dinamičkog loma potrebno instrumentirati Charpy metodu i time odrediti silu, odnosno trenutak nastanka pukotine. Instrumentirano ispitivanje na uzorcima koji sadrže pukotinu umora materijala s namjerno napravljenim bočnim zarezima otvorilo je put prema analizi parametara mehanike loma važnih kod stvaranja i rasta pukotine pri udarnom opterećenju. Danas je instrumentirana Charpy metoda, na uzorcima s namjerno napravljenom zamornom pukotinom, široko prihvaćena kod ispitivanja materijala i istraživanja mehanike loma. Također, potrebno je napomenuti da rezultati ispitivanja dinamičke lomne žilavosti dobiveni ispitivanjem na standardnim Charpy uzorcima pokazuju dobru korelaciju s onim rezultatima dobivenim na uzorcima s zamornom pukotinom.

2.1. Povijest instrumentirane Charpy metode

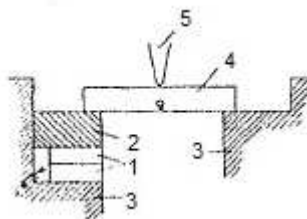
Prema Korberu F. i Storpu A. A. razvoj instrumentirane metode započinje godine 1897. objavljivanjem rada B. W. Dunna koji je svoje istraživanje proveo pomoću padajućega utega prikazanog na slici 4 [1]. Zanimljivo je napomenuti da je njegov rad objavljen prije rada S. B. Russella koji godine 1898. predstavlja njihalo pomoću kojega se mjeri ukupna apsorbirana energija slomljenog uzorka, danas znanog Charpyjevog njihala. Koristeći dvije zrake svjetlosti Dunn B. W. je nakon ispitivanja uspio zabilježiti podatke visoke rezolucije o vremenu i pomaku nakon čega bi diferenciranjem istih došao do podataka o brzini i sili [1]. Njegov rad smatra se prvim u kojemu je iscrtan dijagram sila-vrijeme. Sljedeći važniji napredak u načinu mjerenja sile i pomaka objavio je Gagarin A. u radu iz godine 1912. On je u svom istraživanju za mjerenje sile i pomaka koristio oprugu opterećenu na tlak, međutim problemi s vibracijama opruge doveli su do prekida u daljnjem radu na ovom području. Do godine 1927. istraživači su se orijentirali na mjerenje pomaka i vremena te su pomoću tih podataka diferenciranjem izračunavali podatke o sili.



Slika 4. Shematski prikaz Dunnove metode mjerenja pomaka projiciranjem svjetla na pomičnu fotografsku traku [1]

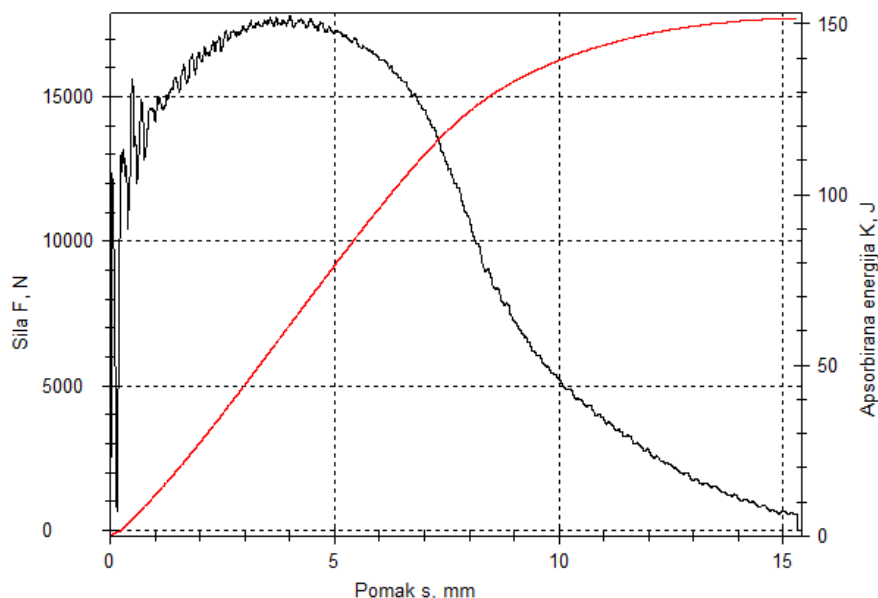
U kasnim dvadesetim godinama dvadesetog stoljeća u Japanu su za potrebe mjerenja korišteni piezoelektrični materijali i oscilografi. Watanabe S. je u svom radu koristio kristal kvarca smještenog ispod oslonca, slika 5, te je na niskougljučnom čeliku istraživao utjecaj brzine, polumjera zareza i debljine uzorka na krivulju dobivenu instrumentiranim mjerenjima.

Pomoću osciloskopa bilježeni su podaci o sili i vremenu te su se nakon daljnje obrade rezultata dobivale krivulje sile i pomaka.



Slika 5. Shematski prikaz Watanabeovog rješenja. 1 – disk od kvarca, 2 – čelični blok, 3 – oslonci, 4 – ispitni uzorak, 5 - nož [1]

Tanaka M. i Umekawa. S. godine 1958. predstavljaju poboljšanje Watanabine metode te na stražnji dio bata postavljaju Rochellov kristal soli pomoću kojega su se dobivali podaci o sili i vremenu. Ono S. u istoj godini objavljuje rad u kojemu koristi mjerne rastezne trake, tenzometrijske trake, postavljene na uzorak pri čemu su se bilježili podaci sile i vremena. Početak prikupljanja podataka ostvarivao se je pomoću zrake svjetla. Sakui S. i suradnici u svom radu iz godine 1961. koriste slično rješenje kao i Ono S., međutim oni tenzometrijske trake postavljaju na stražnju stranu bata. Konfiguracija predstavljena od strane Sakuija i suradnika koristi se i danas. Prvi komercijalni instrumentirani uređaj oznake PSWO proizveden je od strane Werkstoffprüfmachinen Leipzig GmbH iz Njemačke godine 1958. kod kojega je udarna sila mjerena pomoću piezoelektrične mjerne trake postavljene iza noža. Poboljšanja u načinu mjerenja i obrade podataka dogodila su se razvojem tenzometrijskih traka i softvera koji mogu obraditi veliku količinu podataka. Primjer dijagrama dobivenog pomoću softvera testXpert II tvrtke Zwick/Roell GmbH prikazan je na slici 6. Postavljanje tenzometrijskih traka na stražnju stranu bata ili noža pokazalo se je ključnim poboljšanjem kod instrumentirane metode.



Slika 6. Stvarni dijagram dobiven instrumentiranom Charpy metodom

2.2. Razvoj normi udarnog ispitivanja

Od prvog predstavljanja Charpy uređaja do prve norme trebalo je tridesetak godina, točnije godine 1933. ASTM objavljuje, nakon desetogodišnjeg rada, normu oznake E23-33T koja se odnosi na udarno ispitivanje metalnih materijala. Norma ASTM E23-33T navodi dva uređaja koja se koriste u ispitivanju, odnosno dvije metode Charpy i Izod te nije dana geometrija oštrice noža. Do godine 1940. revizijom norme dodani su polumjeri vertikalnih oslonaca, polumjeri noža (2 mm i 8 mm), metričke jedinice te U-zarez i zarez u obliku ključanice oba za Charpy metodu. Nova norma dobila je oznaku ASTM E23-41T. Udarno ispitivanje je postala korisna tehnika u karakterizaciji materijala, ali ne i česta do otkrića o mogućnosti određivanja prijelazne temperature između žilavog i krhkog loma.

Iako je do godine 1964. ASTM E23 norma u sebi navodila navedene varijable koje su dovodile do rasipanja rezultata, postalo je jasno da je jedina sigurna metoda za određivanje preciznosti mjerenja Charpyjevim uređajem ispitivanje na standardiziranim uzorcima. Nove norme prema ASTM-u za klasično i instrumentirano ispitivanje Charpy metodom nose oznake ASTM E23-16b, odnosno ASTM E2298-15.

U Europi su tijekom godina razni tehnički odbori bili uključeni u razvoj ispravnih procedura kod vrednovanja rezultata ispitivanja što je dovelo do objavljivanja norme za klasično i instrumentirano ispitivanje. Norma za klasičnu Charpy metodu objavljena je godine 1983., a najnovije izdanje nosi oznaku HRN EN ISO 148:2016 te sadrži tri dijela. Tehnički odbor je godine 1987. postavio temelje za normu ISO 14556. Godine 1993. njemački istraživači proveli su međulaboratorijsko ispitivanje prema specifikacijama norme ISO 14556 na oko 400 uzoraka kako bi se usporedila preciznost ispitivanja. Norma ISO 14556 službeno je uvedena godine 2000. Najnovije izdanje norme je iz godine 2015. oznake HRN EN ISO 14556 te je ista podloga za ispitivanje u ovome radu. Rezultati ispitivanja dinamičke lomne žilavosti pomoću instrumentirane Charpy metode doveli su do boljeg razumijevanja u ponašanju materijala te se je krajem dvadesetog i početkom dvadeset i prvog stoljeća krenulo u razvoj norme. Mjerenje dinamičke lomne žilavosti na uzorcima s zamornom pukotinom pomoću instrumentiranog Charpy uređaja opisano je u normi oznake ISO 26843:2015.

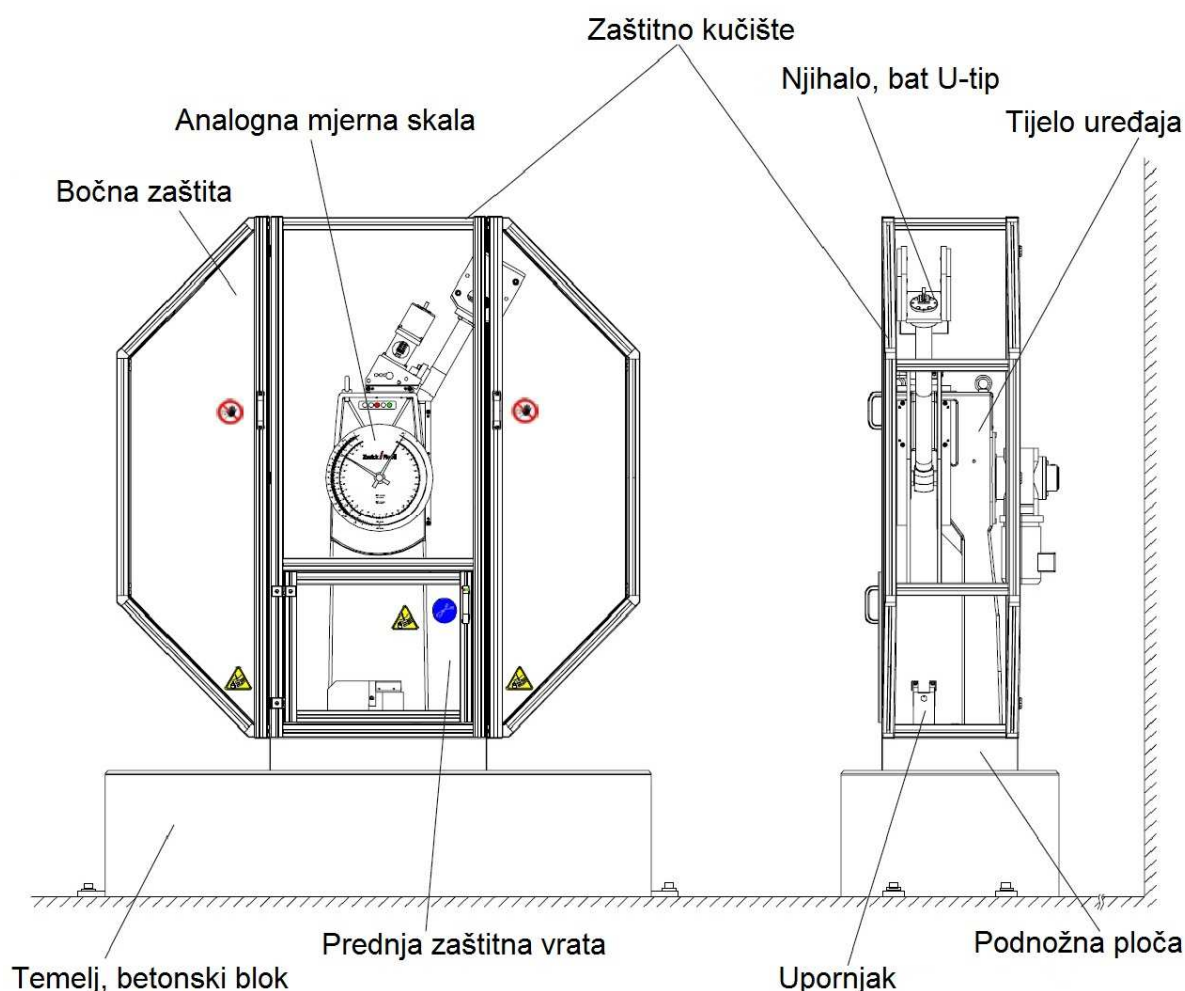
2.3. Ispitni uređaj

Uređaj za ispitivanje udarne radnje loma klasičnom ili instrumentiranom metodom treba biti instaliran i umjeren prema normi HRN EN ISO 148-2:2016. Na slici 7 prikazan je uređaj za udarno ispitivanje Charpy metodom [40].



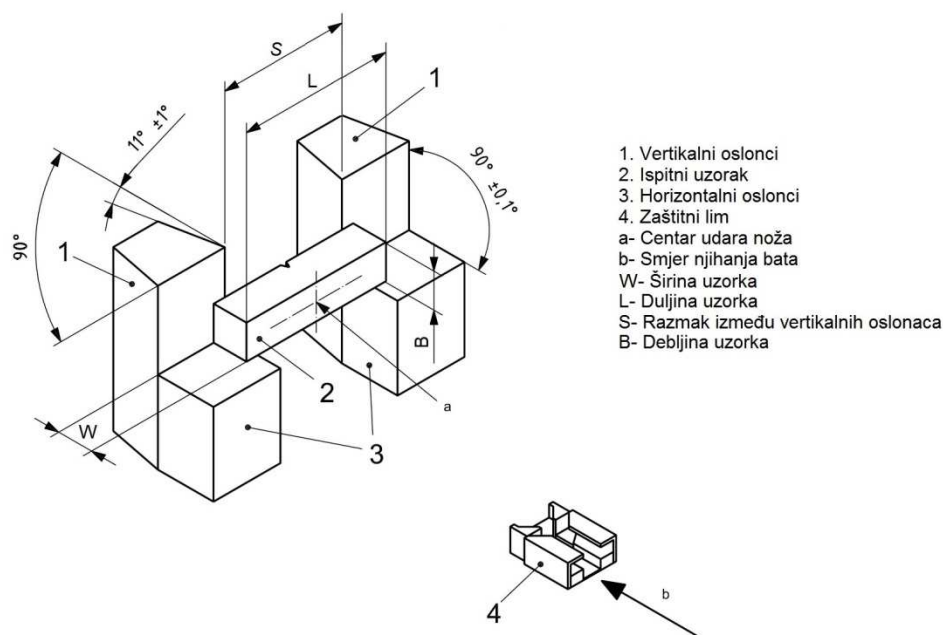
Slika 7. Suvremeni instrumentirani Charpy uređaj [40]

Na slici 8 prikazani su osnovni dijelovi uređaja RKP 450. Uređaj korišten u ovome radu opremljen batom U-tipa. Uz U-tip, uređaji se opremaju i s batom C-tipa. Charpy uređaj je preko elektronskog uređaja za kontrolu rada spojen na osobno računalo koje sadrži softver za obradu podataka dobivenih bilo klasičnom ili instrumentiranom metodom.



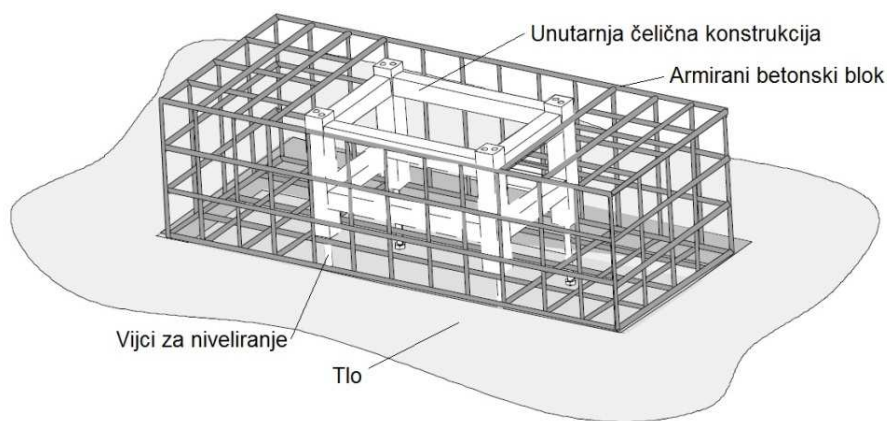
Slika 8. Skica prednjeg i bočnog pogleda na uređaj RKP 450 [40]

Neovisno o proizvođaču, svaki uređaj mora sadržavati osnovne dijelove dane prema normi HRN EN ISO 148-1:2016, a koji su prikazani na slici 9 [41].



Slika 9. Konfiguracija dijelova uređaja ispitne metode prema Charpyju [41]

Potrebno je napomenuti da je prilikom instaliranja uređaja iznimno važno obratiti pozornost na temelj na koji će se uređaj postaviti, slika 10 [40].



Slika 10. Shematski prikaz temelja [40]

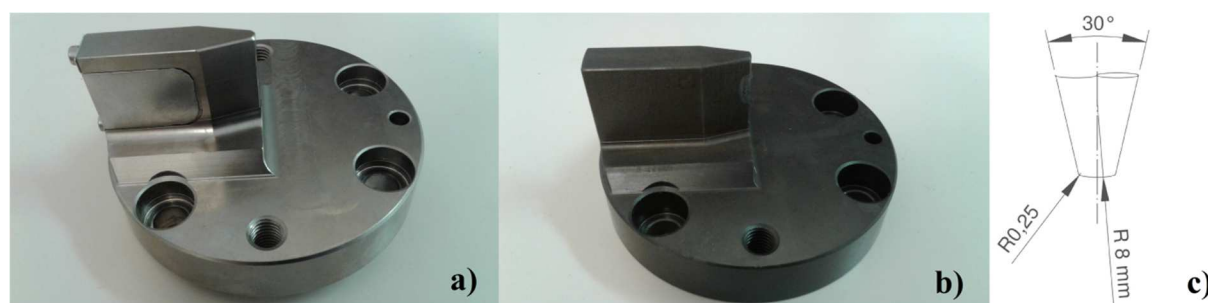
Svaki proizvođač uređaja daje upute o izradi betonskog bloka (dimenzije, kvaliteta i tip betona i nivelacija čelične konstrukcije). Kvaliteta temelja i način pričvršćenja ispitnog uređaja na temelj jako utječe na podatljivost ispitnog uređaja pri ispitivanju, a što dovodi do

loših rezultata ispitivanja. Porro F. i suradnici u svojem radu daju rezultate podatljivosti uređaja pri slabom pričvršćenju uređaja na temelj te slabog pričvršćenja oslonaca [42]. Pokazalo se je da nepažljivo pričvršćenje uređaja za temelj dovodi do vrlo loših rezultata mjerenja podatljivosti ispitnog uređaja. Lucon E. i suradnici u radu [43] istražuju utjecaj nepričvršćenih vijaka kod noža, oslonaca i temelja na rezultate apsorbirane energije i sila. Rezultati istraživanja nisu sistematični te variraju unutar 10 % kod žilavih materijala. Općenito, pokazalo se da će "dobar" uređaj dati odlične rezultate, uključujući i zadovoljavanje zahtjeva pri umjeravanju, iako ima nepričvršćene vijke.

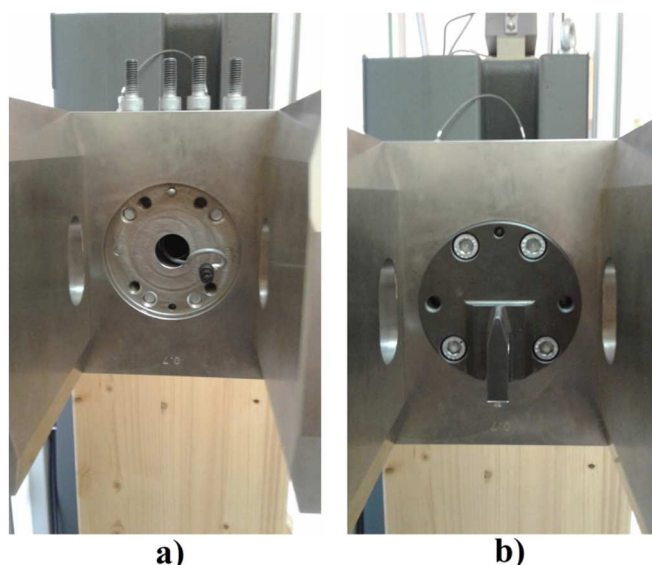
Razlika između klasičnog i instrumentiranog uređaja je mala. Jedina razlika je u softverskom paketu i izvedbi noža, slika 11 i 12. Instrumentirani uređaj opremljen je s nožem koji na stražnjoj strani ima ugrađen mjerni senzor te je kabelom spojen s upravljačkom jedinicom Charpy uređaja, slika 13.



Slika 11. Instrumentirani nož polumjera oštice 2 mm a); klasični nož polumjera oštice 2 mm b); geometrija oštice noža c)



Slika 12. Instrumentirani nož polumjera oštice 8 mm a); klasični nož polumjera oštice 8 mm b); geometrija oštice noža c)



Slika 13. Kabel za spajanje instrumentiranog noža a); instrumentirani nož b)

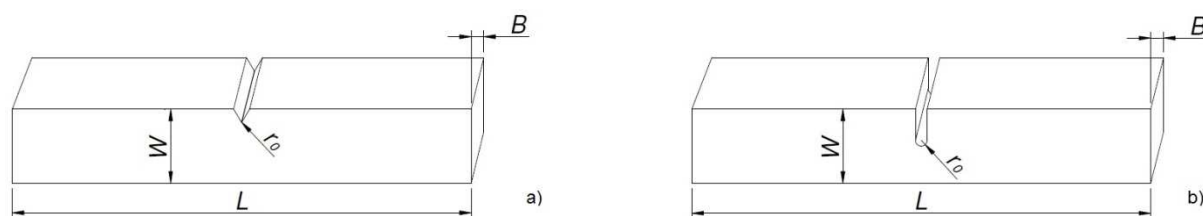
Norma HRN EN ISO 148-1:2016 uz nož polumjera oštrice 2 mm propisuje i oštricu polumjera 8 mm koja se inače koristi prema ASTM E23-16b normi, slika 12. Nekoliko istraživanja objavljenih u [44] pokazuje da postoji razlika u apsorbiranim energijama između dvije vrste noževa. Također, Lucon u radu [45] navodi razlike između podataka izmjerenih sila dobivenih noževima polumjera oštrice 2 mm i 8 mm.

Kod uzoraka niske energije, do 100 J, ne postoji značajna razlika između noževa te se ona kreće između 2 i 5 %. Međutim kod uzoraka više energije, iznad 200 J, navedena razlika iznosi oko 11 % s tendencijom rasta u korist ASTM noža [44, 45]. Lucon navodi da je razlog viših energija kod ASTM oštrice taj što interakcija između deformiranog uzorka i oštih rubova noža i između uzorka i oslonaca dovodi do povećanog trenja [45]. Ruth E. A. i suradnici su u svom radu istraživali utjecaj hrapavosti površine oslonaca i noža na količinu apsorbirane energije kod ASTM oštrice. U rezultatima istraživanja navode da su kod uzoraka niskih energija, 16 J, vrijednosti apsorbiranih energija niže za 0,4 J u odnosu na oslonce i nož koji nisu bili polirani. Kod uzoraka viših energija, 100 J, vrijednosti apsorbirane energije su niže za oko 2 J kod poliranog noža i oslonaca [46]. Isto tako navode da povišeno trenje između oslonaca i uzorka utječe na veće vrijednosti apsorbirane energije što je u skladu sa navodima Lucona. Nastavno na rad Lucona, utjecaj polumjera oštrice na silu pri granici razvlačenja, F_{gy} , je takav da su rezultati kod ISO oštrice nešto viši od ASTM oštrice s tendencijom opadanja s manjom žilavosti materijala. Rezultati maksimalne sile, F_m , su viši

kod ASTM oštrice te rastu što je veća žilavost materijala. Općenito rezultati dobiveni ISO oštricom pokazuju veće rasipanje. U radu [10] Lucon je istraživao utjecaj polumjera oštrice na elastično-plastičnu dinamičku lomnu žilavost, K_{Jd} , kod uzoraka s V-zarezom s dodatnom pukotinom. Rezultati ispitivanja pokazali su da ne postoji značajan utjecaj polumjera oštrice na rezultate elastično-plastične dinamičke lomne žilavosti. Nisu nađena objavljena istraživanja u vezi utjecaja polumjera oštrice na rezultate dinamičke lomne žilavosti kod standardnog V-zareza. Potrebno je naglasiti da je na području ispitivanja dinamičke lomne žilavosti kod standardnog V-zareza objavljeno svega nekoliko radova.

2.4. Ispitni uzorci

Postoje dvije vrste normiranih uzoraka te je njihova geometrija prikazana na slici 14. Ispitni uzorci s U-zarezom koriste se kod ispitivanja krhkih metalnih materijala i kod ispitivanja polimernih materijala. V-zarez je najčešće korištena vrsta zareza te se upotrebljava i kod krhkih i kod žilavih metalnih materijala. Uz ova dva zareza postoji i zarez u obliku ključanice čija je primjena jednaka primjeni uzorka s U-zarezom. Dimenzije normiranih ispitnih uzoraka s V-zarezom prikazani su u tablici 1 [41].



Slika 14. V-zarez a); U-zarez b)

Tablica 1. Dimenzije uzorka s V-zarezom

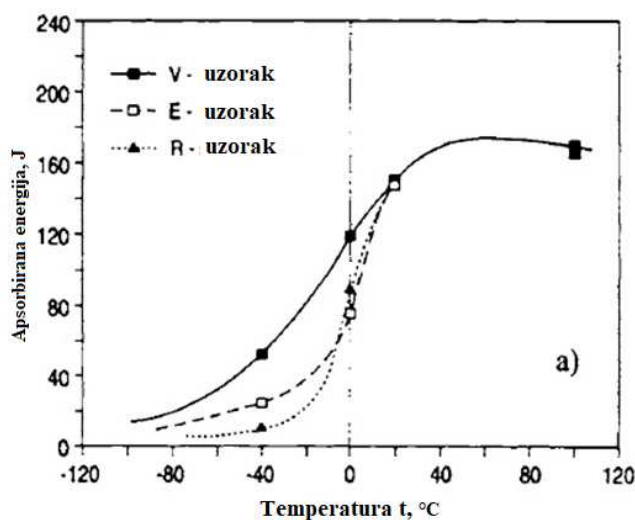
Veličina	Oznaka	Ispitni uzorak s V-zarezom	
		Nominalna dimenzija, mm	Tolerancija strojne obrade, mm
Duljina uzorka	L	55	$\pm 0,60$
Širina uzorka	W	10	$\pm 0,075$
Debljina uzorka:	B		
-standardni ispitni uzorak		10	$\pm 0,11$
-uzorak smanjenog presjeka		7,5	$\pm 0,11$
-uzorak smanjenog presjeka		5	$\pm 0,06$
-uzorak smanjenog presjeka		2,5	$\pm 0,05$
Kut zarez uzorka	α_0	45°	$\pm 2^\circ$
Visina ispod zarez	b	8	$\pm 0,075$
Polumjer zarez	r_0	0,25	$\pm 0,025$

Od samih početaka Charpy metode ispitni uzorci su jako važni te su istraživači tokom godina provodili ispitivanja na uzorcima različitih dimenzija kako bi ostvarili zadovoljavajuće rezultate u svrhu poboljšanja Charpy metode. Vrlo je važno brižljivo izraditi uzorak zbog toga što može doći do velikog rasipanja rezultata mjerenja. Općenito, Charpy metoda je podložna velikom rasipanju rezultata ukoliko se svi aspekti ispitivanja ne provode na propisani način. U ovom dijelu opisan je utjecaj geometrije zarez na rezultate ispitivanja, razmatrati će se samo ispitni uzorak s V-zarezom.

W. Böhme u svom radu daje rezultate istraživanja tri različite vrste V-zarez te njihov utjecaj na apsorbiranu energiju pri različitim temperaturama [47]. Polumjer korijena zarez iznosio je $\approx 0,25$ mm (standardni uzorak), $\approx 0,02$ mm (V-zarez s pukotinom sličnoj realnoj pukotini) te $\approx 0,00$ mm (V-zarez s zamornom pukotinom), dok su ispitne temperature iznosile $+100^\circ\text{C}$, $+20^\circ\text{C}$, -40°C te 0°C

Vrijednosti apsorbirane energije pri $+100^\circ\text{C}$ ne pokazuju značajnu razliku između različitih tipova zarez, razlog tome je izrazito žilavo ponašanje materijala. Rezultati pri 0°C pokazuju veliko rasipanje kod standardnog uzorka, a ono je još izraženije kod preostala dva tipa uzorka. Böhme ne navodi objašnjenje za date rezultate te smatra da se ovakvo ponašanje materijala treba prihvatiti kao fizikalnu realnost pri prijelaznoj temperaturi [47]. Pri -40°C vrijednosti apsorbirane energije opadaju s većom oštrinom zarez, odnosno $0,25 > 0,02 > 0,00$. Treba

naglasiti da je prijelazno područje uzoraka s pukotinom pomaknuto za oko $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ prema višim temperaturama u usporedbi s standardnim V-zarezom. Dijagram odnosa apsorbirane energije i temperature prikazan je na slici 15 [47].



Slika 15. Polumjeri zarez, odnosno oznake uzoraka iz dijagrama: V – 0,25 mm; E – 0,02 mm; R – 0,00 mm [47]

Objavljeni radovi u vezi utjecaja geometrije zarez na sile izmjerene instrumentiranim Charpy uređajem nisu našli te postoji široka mogućnost istraživanja na tom području.

2.5. Postupak instrumentiranog ispitivanja

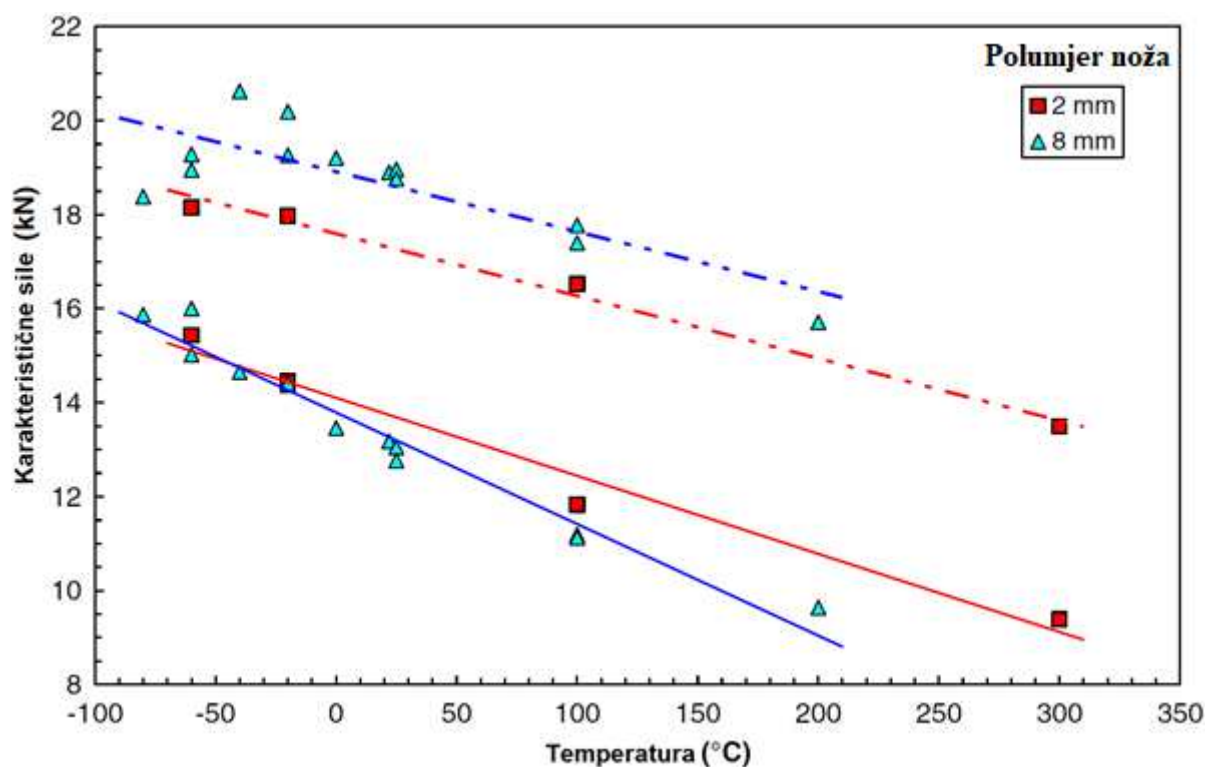
Postupak ispitivanja instrumentiranom Charpy metodom jednak je klasičnoj metodi te se i provodi prema normi HRN EN ISO 148-1:2016. Norma za instrumentirano ispitivanje HRN EN ISO 14556:2015 [2] je više orijentirana na način određivanja apsorbiranih energija i izmjerenih sila u određenom trenutku.

Prije nego što se pusti da bat udari u ispitni uzorak isti je potrebno na pravilan način postaviti na horizontalne i uz vertikalne oslonce kako je prikazano na slici 9. Ukoliko je uzorak prilikom ispitivanja odmaknut od vertikalnih oslonaca dolazi do značajnih utjecaja na rezultate ispitivanja. Lucon i suradnici u radu [43] navode značajan utjecaj na vrijednosti apsorbirane energije, viši od 10 %, kod uzoraka niskih energija ako je uzorak udaljen više od 0,5 mm od vertikalnih oslonaca, dok utjecaj udaljenosti uzorka od vertikalnih oslonaca na vrijednosti sila F_{gyd} i F_{md} iznosi ispod 10 % kod uzoraka niskih energija. Kod žilavijih

materijala utjecaj odmaknutog ispitnog uzorka od vertikalnih oslonaca je takav da su vrijednosti apsorbirane energije više za 5 % do 6 %, dok su vrijednosti maksimalne sile povišene za manje od 5 %, a sile pri granici razvlačenja povišene su za 5 % do 10 %.

2.5.1. Utjecaj temperature ispitivanja na vrijednosti sile

Lucon je u radu [45] analizirao utjecaj temperature ispitnog uzorka na vrijednosti karakterističnih sile F_{gyd} i F_{md} obzirom na polumjer oštrice noža, slika 16. Iz slike 16 puna crta predstavlja vrijednosti sile F_{gyd} , a isprekidana crta predstavlja vrijednosti sile F_{md} .

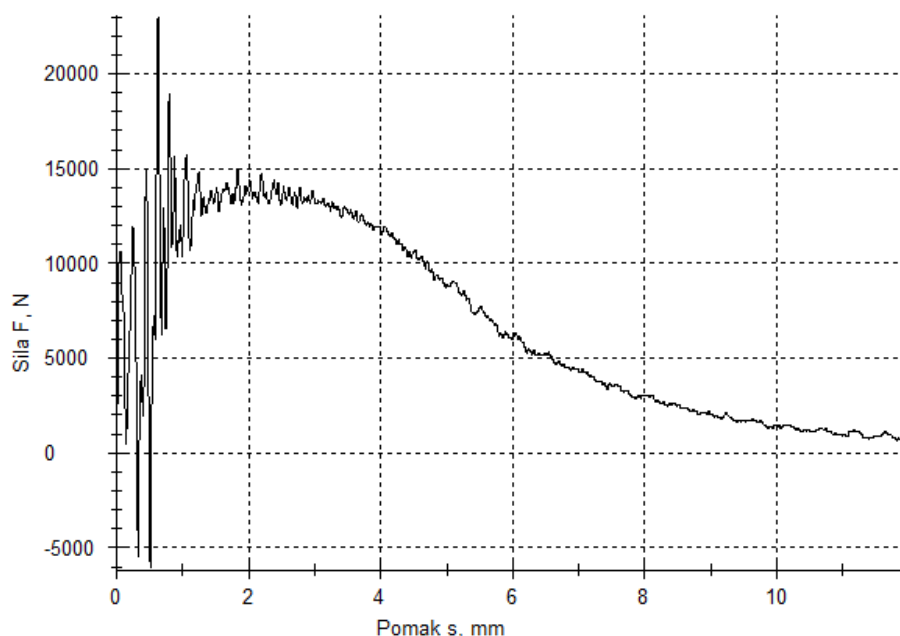


Slika 16. Utjecaj temperature i polumjera oštrice noža na vrijednosti karakterističnih sile [45]

Prema rezultatima istraživanja postoji veliki utjecaj oštrice noža na rezultate maksimalne sile F_{md} gdje su one kod noža polumjera 8 mm više za oko 2 kN. Kod mjerenja sile pri razvlačenju F_{gyd} vrijednosti su više kod oštrice polumjera 2 mm. Povišenjem temperature dolazi do pada vrijednosti sile F_{md} i F_{gyd} kod obje vrste oštrica. Potrebno je naglasiti da vrijednosti F_{gyd} mogu biti pod utjecajem raznih metoda procjene i tehnologije prikupljanja podataka.

2.5.2. Utjecaj brzine bata

Brzina bata ima veliki utjecaj na izgled dijagrama sila – vrijeme ili sila - pomak. Obzirom na vrstu materijala, žilav ili krhak, i njegovu nehomogenost visoka brzina može uzrokovati jake oscilacije sile, slika 17. Smanjenjem oscilacija olakšala bi se procjena karakterističnih sila. Međutim ako bi smanjili brzinu bata, ne bi došlo do loma ispitnog uzorka. Problem oscilacija mogao bi se umanjiti promjenom geometrije uzorka. Naime, korekcijom geometrije ispitnog uzorka (manji polumjer korijena zarez, dublji zarez, manji ispitni uzorak) kod žilavih materijala (vrijednost apsorbirane energije više od 250 J) omogućio bi se lakši lom uzorka te bi se smanjile i oscilacije sile. Na homogenost uzorka u industrijskoj primjeni ne može se puno utjecati, a izrada kvalitetnijih, homogenijih, uzoraka kakvi se koriste u znanstvene svrhe bi poskupjelo ispitivanje. Brzina bata pri udaru o ispitni uzorak ovisi o konfiguraciji uređaja, općenito brzina iznosi od 5 do 5,5 m/s. Ako bi se uspio postići potpuni lom ispitnog uzorka izrađenog iz materijala visoke žilavosti, tada bi i vrijednosti apsorbiranih energija bile kvalitetnije i međusobno usporedive u odnosu na ispitne uzorke kod kojih ne nastupa potpuni lom. Brzine udara do 7 m/s nemaju značajnog utjecaja na vrijednosti žilavosti, dok brzine preko 20 m/s smanjuju žilavost zbog smanjenog udjela plastične deformacije.



Slika 17. Prikaz jakih oscilacija sile na stvarnom dijagramu sila - pomak

2.5.3. Utjecaj geometrije ispitnog uzorka

Oblik i dimenzije zareza imaju veliki utjecaj na vrijednosti žilavosti materijala gdje ispitni uzorci s U-zarezom daju veće vrijednosti apsorbirane energije od uzoraka s V-zarezom. Prilikom ispitivanja, na uzorak djeluje normalno (vlačno) i tangencijalno naprezanje pod kutem od 45° koje izaziva klizanje kristalnih ravnina. Duljina ispitnog uzorka nema veliki utjecaj na vrijednosti žilavosti. Širina i visina uzorka imaju sličan utjecaj pri čemu je najvažniji odnos dubine zareza i debljine uzorka koji treba biti manji od 0,3 ako se želi postići veća žilavost [48].

2.6. Određivanje fizikalnih veličina i mehaničkih svojstava

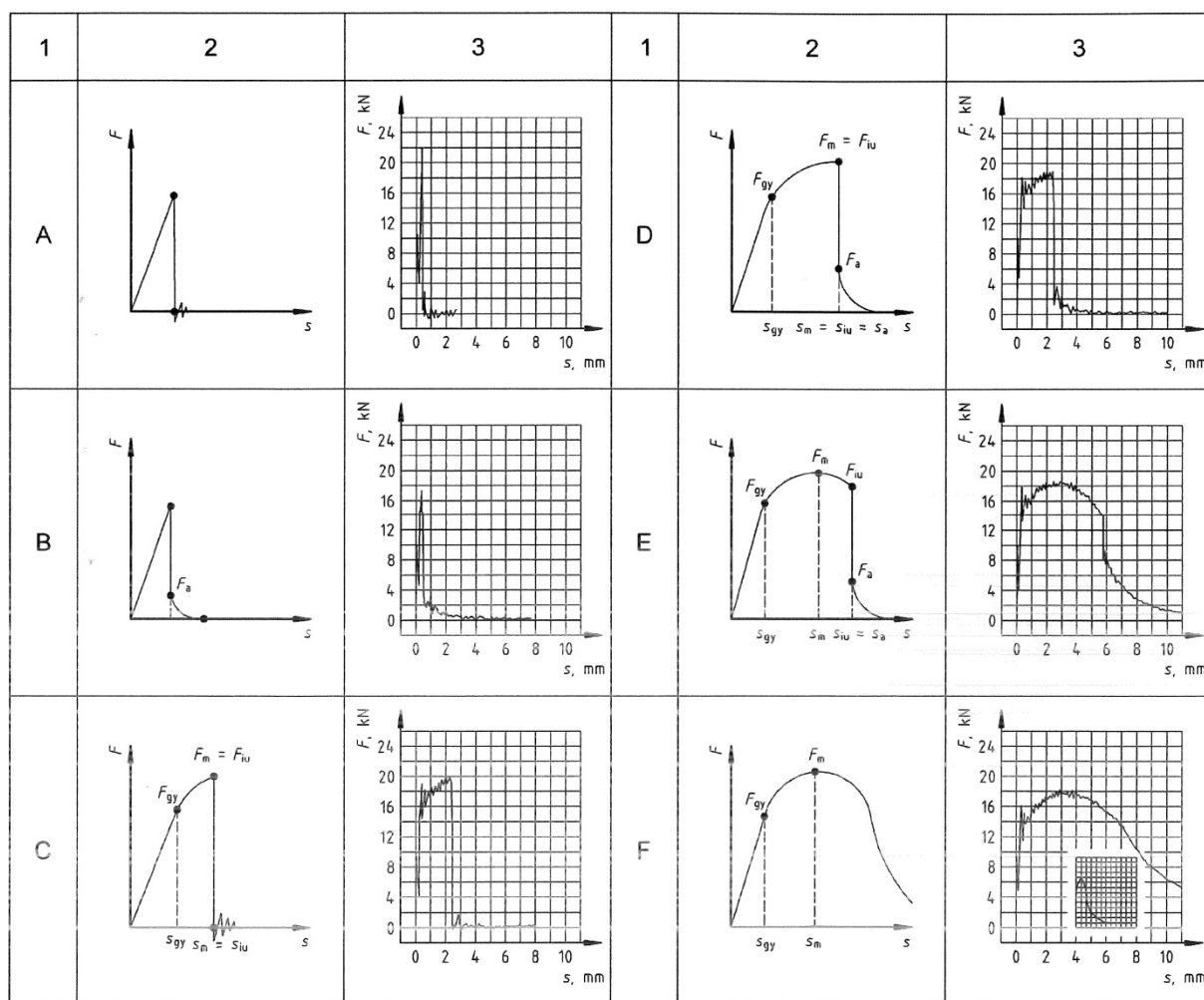
Norma za instrumentiranu Charpy metodu daje samo naputke na koji način izmjeriti fizikalne veličine prilikom udarnog ispitivanja. Razlog što norma striktno ne propisuje metode za mjerenje fizikalnih veličina leži u tome što se još sa sigurnošću ne može odrediti što se to točno događa s materijalom u samo nekoliko milisekundi koliko vremenski traje ispitivanje jednog uzorka. Isto tako, kako je ranije u tekstu navedeno, nije još razvijen softver koji može dati pouzdane rezultate karakterističnih sila te su ispitivači prepušteni metodama procjene danim u raznim istraživačkim radovima.

Prijašnji način mjerenja apsorbirane energije, a koji se i danas koristi, uključivao je očitavanje podataka s analogne mjerne skale, dok su se sila i vrijeme mjerili pomoću osciloskopa. Današnji softverski paketi nakon ispitivanja daju osnovne dijagrame sila-pomak ili sila-vrijeme. Dakako, na isti dijagram (ovisno o proizvođaču softvera) moguće je postaviti više osi ordinata (apsorbirana energija, brzina, sila) i više osi apscisa (vrijeme, pomak) te je na jednom dijagramu moguće analizirati više fizikalnih veličina.

Iako današnji softveri daju vrijednosti pomaka, potrebno je naglasiti da se te vrijednosti pomaka razlikuju od vrijednosti dobivenih putem proračuna iz podataka o usporenju bata tj. brzini bata i vremenu ispitivanja te iznose oko 5 %. Do ovih saznanja došlo se je analiziranjem podataka dobivenih iz mjerenja uzoraka korištenih u preliminarnim ispitivanjima i uzoraka korištenih u svrhu izrade ovoga rada. Sama norma za instrumentirano ispitivanje navodi da se pomak pri razvlačenju, s_{gy} , može odrediti samo aproksimacijom korištenjem mjernog uređaja te njegova vrijednost nema značajniju primjenu. Ukupni pomak,

s_t , se određuje samo ukoliko je došlo do potpunog loma uzorka. Ako vrijednost sile pri lomu ne dosegne vrijednost $F = 0$ kN već se samo asimptotski približava vrijednosti $F > 0$ kN, tada se, s_t , definira kao vrijednost koja odgovara $F = 0,02 * F_{md}$. Zbog naglog pada sile (slučaj D i E, slika 18) vrijednosti s_{iu} i s_a su približno iste, odnosno $s_{iu} \approx s_a$. Pomak pri maksimalnoj sili, s_m , može se odrediti iz dijagrama sila – pomak nakon što se odredi maksimalna sila, F_{md} [2]. U ovome radu koristile su se korigirane vrijednosti pomaka dobivene iz podataka o brzini bata i vremenu.

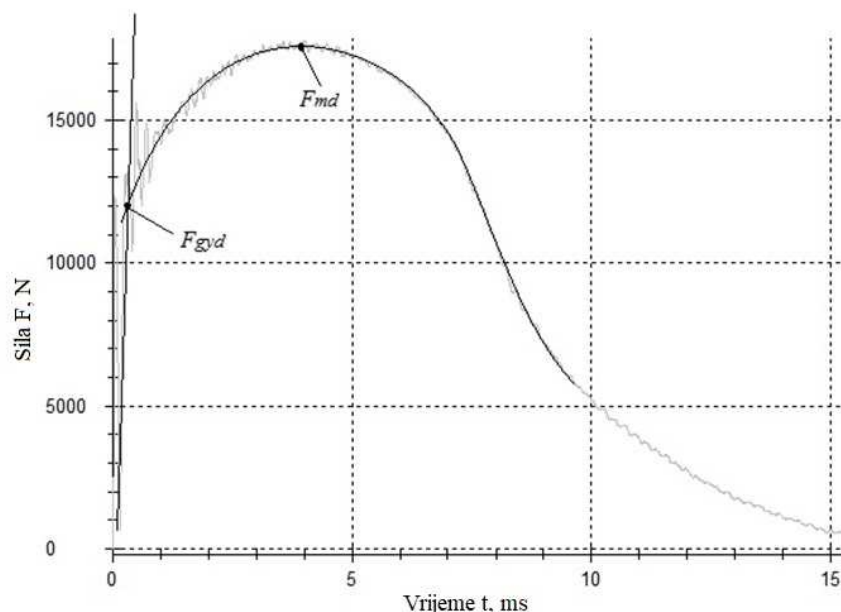
Ovisno o vrsti materijala, instrumentiranom Charpy metodom moguće je procijeniti vrijednosti karakterističnih sila iz dijagrama sila – vrijeme ili sila - pomak. Slika 18 prikazuje različite vrste dijagrama koji se najčešće javljaju pri instrumentiranom ispitivanju. Ovisno o materijalu koji se ispituje, instrumentiranom metodom može se odrediti sila pri granici razvlačenja, F_{gyd} , maksimalna sila, F_{md} , sila na početku nestabilnog širenja pukotine, F_{iu} te sila na kraju nestabilnog širenja pukotine, F_a . Sila na početku nestabilnog širenja pukotine, F_{iu} , nalazi se na sjecištu između polinomne krivulje, postavljene u području općeg tečenja, i naglog pada sile na krivulji dijagrama sila – pomak (slučaj D i E, slika 18). Sila na kraju nestabilnog širenja pukotine, F_a , nalazi se na sjecištu naglog pada sile i polinomne krivulje postavljene na preostali dio dijagrama sila – pomak (slučaj D i E, slika 18). Detaljniji opis određivanja sile pri granici razvlačenja i maksimalne sile opisano je u poglavlju 2.6.1.



Slika 18. Karakteristični dijagrami sila – pomak (A, B, C, D, E, F). Gdje je 1 - tip dijagrama sila – pomak; 2 - Shema dijagrama; 3 - Stvarni dijagram sila – pomak [2]

2.6.1. Procjena sile pri granici razvlačenja i maksimalne sile

Sila pri granici razvlačenja, F_{gyd} , određuje se postavljanjem linearnog pravca u elastičnom području dijagrama sila – pomak, slika 19. Isto tako u području općeg tečenja postavlja se krivulja opisana polinomom drugog ili viših redova. Red polinoma ovisi o podacima sile i vremena, odnosno jačini oscilacija te uzorci iz iste serije mogu biti opisani polinomima različitih redova. Sjecište linearnog pravca i krivulje predstavlja vrijednost sile pri razvlačenju.



Slika 19. Određivanje sile pri granici razvlačenja F_{gyd} i maksimalne sile F_{md}

Linearni pravac u elastičnom području predstavlja ukupnu podatljivost sustava tj. podatljivost ispitnog uređaja i ispitnog uzorka, odnosno elastičnu deformaciju ispitnog uređaja i ispitnog uzorka. Podatljivost je recipročna vrijednost krutosti te nam govori koliko će se neko tijelo deformirati ako na njega djelujemo jediničnom silom. Ukupna podatljivost dana je sljedećom jednačinom [49]:

$$C_t = C_s + C_m \quad (1)$$

Postoji više načina proračuna podatljivosti ispitnog uzorka [6, 15, 50]. U ovom radu koristila se je jednačina za proračun C_s , a koju je u svom radu naveo Ireland D. R. [51]:

$$\tau_t = 1,68 * \frac{S}{c_0} * \left(\frac{W}{S}\right)^{0,5} * (E * B * C_s)^{0,5} \quad (2)$$

gdje je S raspon između vertikalnih oslonaca, c_0 brzina zvuka kroz materijal, W je širina ispitnog uzorka, E je Youngov modul elastičnosti, B je debljina ispitnog uzorka, C_s je podatljivost ispitnog uzorka i τ_t je vrijeme jednog titraja, odnosno razmak između dva pika na krivulji sila – vrijeme.

Jednačina (2) pokazala se je dobrom procjenom prilikom proračuna vremena jednog titraja kod raznih veličina ispitnog uzorka i konfiguracija ispitnog uređaja. Vrijeme jednog titraja

CVN uzorka s razmakom vertikalnih oslonaca $S = 40$ mm općenito kod čelika iznosi $33 \mu s$ što odgovara vrijednostima izmjenjenim kod materijala koji se je koristio u ovome radu.

Ukupna podatljivost uređaja proračunava se pomoću podataka dobivenih prilikom ispitivanja niskim brzinama (eng. low-blow test), metodu je predložio Ireland [49]. Prilikom ispitivanja brzina bata iznosi oko 1 m/s pri čemu treba paziti da ne dođe do plastične deformacije ispitnog uzorka. U daljnjem tekstu opisan je novi način procjene podatljivosti uređaja.

Zbog velikih oscilacija sile potrebno je "izgladiti" dijagram sila – vrijeme. Razni autori u svojim radovima uglavnom koriste metodu pomičnih prosjeka kako bi izgladili oscilacije sile, koja daje dobre rezultate [32, 50, 52]. U ovom radu koristila se je modernija metoda separacije varijabli (u daljnjem tekstu FFT metoda) koja je brža i jednostavnija za korištenje. Za procjenu ukupne podatljivosti izgladuje se samo elastično područje, do granice razvlačenja, dok ostatak dijagrama i dalje sadrži oscilacije. Softverskom obradom podataka iz elastičnog područja izračunava se nagib pravca, odnosno ukupna podatljivost. Nakon proračuna podatljivosti uzorka pomoću jednadžbe (1) izračunava se podatljivost uređaja.

Nakon što se odredio nagib elastičnog pravca završen je prvi i najvažniji korak pri procjeni F_{gyd} . Drugi korak sastoji se od procjene maksimalne sile, F_{md} , postavljajući krivulju u području općeg tečenja koja je određena polinomom višeg reda. Kao što je ranije u tekstu navedeno, red polinoma ovisi o svakom uzorku iz iste serije zbog velikih oscilacija sile. Određivanjem vrijednosti karakterističnih sila, određeni su pomaci i vremena pri tim silama.

2.6.2. Procjena apsorbirane energije

Uz analogno očitavanje današnji instrumentirani uređaji putem softvera pružaju mogućnost procjene apsorbirane energije u bilo kojoj točki na dijagramu sila – pomak ili apsorbirana energija – pomak. Razlika vrijednosti ukupne apsorbirane energije između analognog i instrumentiranog očitavanja iznosi oko $0,5 \%$. Vrijednosti apsorbirane energije pri maksimalnoj sili, W_m , energije na početku nestabilnog širenja pukotine, W_{iu} , energije na kraju nestabilnog širenja pukotine, W_a te energije pri ukupnom pomaku, W_t , mogu se odrediti integriranjem površine ispod dijagrama sila – pomak što je u svom radu opisao Server W. L. [53]. Pomoću jednadžbe (3) moguće je izračunati vrijednost apsorbirane energije u bilo kojoj točki na dijagramu sila-pomak [53]:

$$K_K = v_0 \int_0^{t_K} F dt * \left[1 - \left(v_0 \int_0^{t_K} F dt / 4 * K_p \right) \right] \quad (3)$$

gdje je v_0 početna brzina, t_K je vrijeme u bilo kojoj točki, a K_p potencijalna energija ispitnog uređaja.

2.6.3. Procjena dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja

Server W. L. u svom radu daje jednadžbe (4) i (5) za procjenu dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja CVN i PCVN uzoraka [15]. Jednadžbe se odnose na ispitivanje uzoraka s nožem polumjera oštice 8 mm:

$$R_{gyd} = \frac{2,99 * F_{gyd} * W}{B * (W - a_0)^2}; \text{ za CVN uzorak} \quad (4)$$

$$R_{gyd} = \frac{2,85 * F_{gyd} * W}{B * (W - a_0)^2}; \text{ za PCVN uzorak} \quad (5)$$

gdje je W širina uzorka, B debljina uzorka, a_0 početna dubina zareza, a 2,99 i 2,85 su vrijednosti η_{gy} faktora izračunate pomoću jednadžbi (6 - 9) uz Trescin uvjet tečenja:

$$\tau_{gy} = \frac{R_e}{2} \quad (6)$$

$$f = \frac{2 * M}{\tau_{gy} * (W - a)^2} \quad (7)$$

$$M = \frac{F_{gyd} * W}{B} \quad (8)$$

$$\eta_{GY} = \frac{\tau_{gy}}{f} \quad (9)$$

gdje je R_e granica razvlačenja određena statičkim vlačnim ispitivanjem, M je moment savijanja Charpy uzorka, f je ograničavajući faktor, a τ_{gy} je smično naprezanje pri granici razvlačenja.

Server je u svoje jednadžbe uključio ograničavajući faktor te koristi Trescin kriterij tečenja. Jednadžbe (4) i (5) danas imaju široku primjenu te daju dobre aproksimacijske vrijednosti. Treba naglasiti da se jednadžbe temelje na nekoliko pretpostavki: a) analiza metodom kliznih

linija uz pretpostavku da je materijal kruto-idealnoelastično tijelo; 2) odabir Trescinog umjesto von Misesovog kriterija tečenja; c) vrijednost polumjera korijena kod PCVN je jednak nuli što vrlo vjerojatno nije točno zbog toga što će polumjer korijena otupiti do vrijednosti koja je iznad nule. Uz ove pretpostavke, vrijednosti dobivene pomoću udarnog ispitivanja i statičkog vlačnog ispitivanja pokazuju dobru korelaciju.

Zbog korištenja noža polumjera oštrice 2 mm u ovom radu korištene su vrijednost ograničavajućeg faktora za čiji je način procjene Ewing D. J. F. opisao postupak [20]. Ewing je za Charpy uzorak uz uvjete: polumjer zarez 0,25 mm, širina noža 2 mm i kut zarez 70° dao vrijednosti ograničavajućeg faktora koji za CVN uzorak iznosi 1,274 te za PCVN uzorak 1,279 pri čemu je uz von Misesov uvjet tečenja procjena dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja dana sljedećim jednadžbama (10) i (11).

$$R_{gyd} = \frac{2,719 * F_{gyd} * W}{B * (W - a_0)^2}; \text{ za CVN uzorak} \quad (10)$$

$$R_{gyd} = \frac{2,708 * F_{gyd} * W}{B * (W - a_0)^2}; \text{ za PCVN uzorak} \quad (11)$$

U poglavlju 3.3. opisan je način procjene vrijednosti ograničavajućeg faktora. U svrhu procjene dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja ograničavajući faktor je procijenjen za svaki uzorak zasebno u trenutku postizanja F_{gyd} .

2.6.4. Procjena dinamičke vlačne čvrstoće

Dok se metoda procjene dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja pokazala dobrom, metodu procjene dinamičke vlačne čvrstoće ne možemo kvalitetno ocijeniti zbog toga što gotovo da i ne postoje objavljeni radovi koji obrađuju tu temu. U ovom radu izvedena je nova jednadžba procjene dinamičke vlačne čvrstoće.

Vrijednost ograničavajućeg faktora moguće je izračunati pomoću šest jednadžbi iz Ewingovog rada [20]. Jednadžbe i njihov opis dan je u poglavlju 3.3. ovoga rada. Potrebno je naglasiti da je pri proračunu uzeta u obzir pretpostavka da je polumjer u korijenu zarez 0,25 mm jednaka nuli obzirom na činjenicu da se pukotina inicira netom prije ili u trenutku postizanja maksimalne sile. Umjesto von Misesovog uvjeta tečenja koristi se uobičajena aproksimirana

vrijednost omjera smične čvrstoće i vlačne čvrstoće koji iznosi 0,75 [54]. Sukladno navedenim kriterijima izvedena je sljedeća jednadžba (12):

$$R_{md} = \frac{\eta_m * F_{md} * W}{B * (W - a_0 - \Delta_a)^2}; \text{ za CVN uzorak} \quad (12)$$

gdje je Δ_a produljenje pukotine. Produljenja pukotine moguće je izračunati jednadžbom (13) [55]:

$$\Delta_a = W - \left(\left(\frac{F * W^{z+1}}{k * \Delta_{pl}^z} \right)^{\frac{1}{2}} + a_0 \right) \quad (13)$$

gdje je Δ_{pl} pomak od točke nastanka pukotine do kraja stabilnog širenja pukotine dok su z i k konstante određene postavljanjem krivulje u plastičnom području dijagrama sila – pomak korištenjem jednadžbi (14) i (15).

$$\frac{F * W}{(W - a_0)^2} = k * \left(\frac{\Delta_{pl}}{W} \right)^z \quad (14)$$

$$\Delta_{pl} = \frac{L}{2} * \sin \frac{\varphi}{2} \quad (15)$$

U svom radu Broek D. predlaže sljedeću jednadžbu za produljenje pukotine (16) [56]:

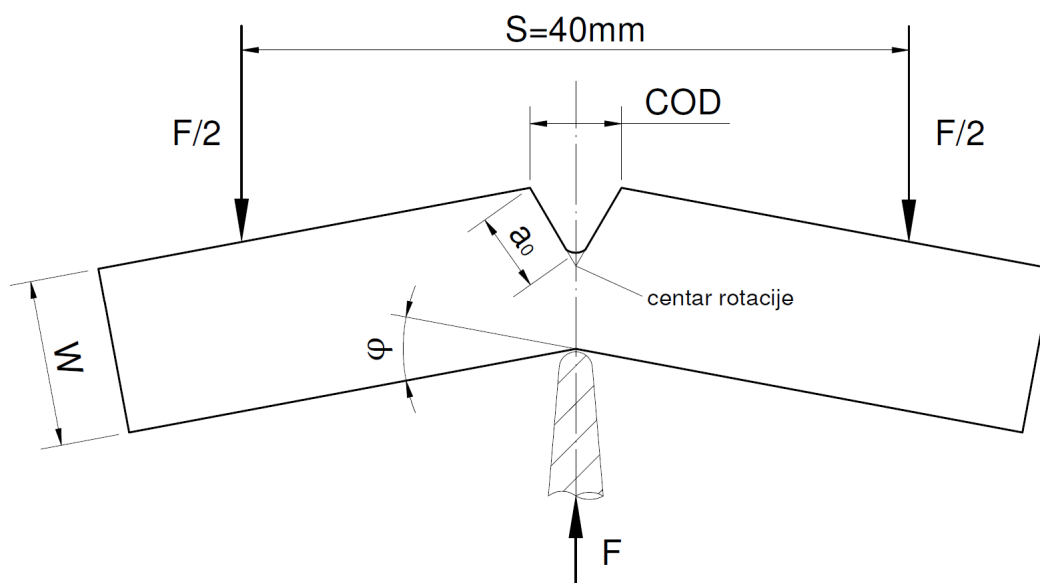
$$\Delta_a = 1,4 * (0,5 * COD) \quad (16)$$

gdje je COD otvor pukotine. Kobayashi je dao jednadžbe za procjenu otvora vrška pukotine ($CTOD$) tijekom tupljenja vrška pukotine (17) i tijekom širenja pukotine (18) [55]:

$$COD = 2 * r * (W - a_0) * \frac{2 * \Delta_{pl}}{S} \quad (17)$$

$$COD = 2 * r * (W - a_0 - \Delta_a) * \frac{2 * \Delta_{pl}}{S} \quad (18)$$

gdje je faktor rotacije $r \simeq 0,42$, a S razmak između vertikalnih oslonaca. Na slici 20 prikazana je geometrija savinutog uzorka.



Slika 20. Geometrija savinutog uzorka gdje je ϕ kut savijanja [55]

Da bi kvalitetno procijenili vrijednost dinamičke vlačne čvrstoće pomoću jednadžbe (12) potrebno je na ispravan način procijeniti produljenje pukotine. Procjena produljenja pukotine pri dinamičkom opterećenju pomoću jednadžbi (13) i (16) je vrlo gruba iz razloga što su navedene jednadžbe date za stanje kvazi-statičkog ispitivanja savijanjem. Nepostojanje poznate tehnologije, načina procjene, pomoću koje bi se moglo mjeriti širenje pukotine od trenutka nastanka do vrijednosti maksimalne sile trenutno onemogućava kvalitetnu procjenu R_{md} te je stoga za potrebe procjene korištena jednadžba koja ne uključuje vrijednost Δ_a . Jedan od mogućih načina mjerenja je korištenje „*high-speed*“ kamera, međutim problem se javlja kod instalacije takve kamere kako bi se snimila interakcija noža i ispitnog uzorka, odnosno otvaranje pukotine.

Lucon u radu [23] opisuje postupak proračuna dinamičke vlačne čvrstoće pri čemu koristi vrijednosti prirasta istežanja pri maksimalnoj sili. Istraživanje je provedeno s nožem polumjera oštrice 8 mm. U nastavku je opisan Luconov postupak.

Vrijednosti vlačne čvrstoće opisane su regresijskom krivuljom (eng. *power law regression*) koja je definirana jednadžbom (19):

$$\sigma_m = A_m * (\dot{\epsilon}_m)^{m_m} \quad (19)$$

gdje su A_m i m_m koeficijenti regresijske krivulje. Prirast istežanja pri maksimalnoj sili kod

Charpy metode, $\dot{\epsilon}_{md}$, koji je istovrijedan prirastu istezanja kod statičkog vlačnog ispitivanja određuje se preko prirasta istezanja pri granici razvlačenja, $\dot{\epsilon}_{gyd}$, pomoću jednadžbe (20):

$$\dot{\epsilon}_{md} = \frac{v_{gyd}}{v_{md}} * \dot{\epsilon}_{gyd} \quad (20)$$

Vrijednost dinamičke vlačne čvrstoće izračunata je pomoću jednadžbe (21):

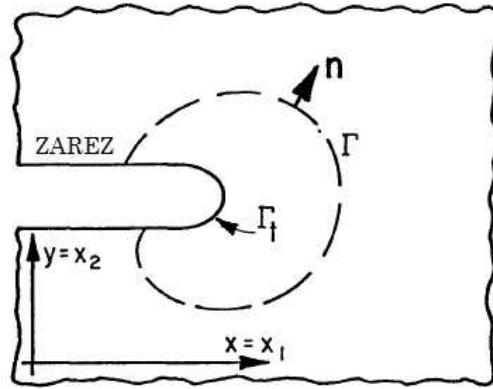
$$R_{md} = \frac{\eta_m * F_{md} * W}{B * (W - a_0)^2} \quad (21)$$

Vrijednost faktora η_m izračunata je minimiziranjem sume ostataka između vrijednosti dobivenih pomoću jednadžbe (19) i vrijednosti dobivenih pomoću jednadžbe (21). Lucon navodi srednju vrijednost η_m faktora koja iznosi 2,385. Istraživanje je provedeno na deset čelika različitih mehaničkih i kemijskih svojstava te je korišten nož polumjera oštrice 8 mm [23]. Potrebno je naglasiti da Lucon u svom radu nije dao vrijednost ograničavajućeg faktora f .

U ovom radu jednadžba (21) je korištena u svrhu procjene R_{md} iz razloga što nije bilo moguće izmjeriti produljenje pukotine Δ_a . Vrijednost ograničavajućeg faktora procijenjena je pod pretpostavkama: ukoliko je došlo do pojave pukotine netom prije ili u trenutku dosezanja maksimalne sile, F_{md} , tada se za potrebe proračuna smatra da polumjer vrha zareza više ne iznosi 0,25 mm nego je ta vrijednost jednaka $r_0 \approx 0$ mm; i produljenje pukotine nije uzeto u obzir.

2.6.5. Procjena dinamičke lomne žilavosti

Dinamičku lomnu žilavost, J_{Id} , moguće je odrediti na više načina te do sada nije poznato konačno rješenje. Oznaka J je u literaturi poznat kao Riceov integral [57]. Begley i Landes su u radu [58] pokazali da je J integral učinkovit alat pri analizi početka širenja pukotine. Isto tako J integral je primjenjiv i u uvjetima male ili velike plastične deformacije prije nastanka pukotine. Rice J. R. je dokazao da je J integral neovisan odnosno da ima istu vrijednost bez obzira na smjer krivulje Γ . Razmotrimo homogeno tijelo od linearnog ili nelinearnog elastičnog materijala oslobođeno od djelovanja sila i podvrgnuto dvodimenzionalnom polju deformacije (ravninsko stanje deformacije, poopćeno stanje naprezanja) tako da sva naprezanja σ_{ij} ovise samo o kartezijevim koordinatama ($x_1 = x$; $x_2 = y$). Pretpostavimo da tijelo sadrži zarez čije su stranice ravne i paralelne s osi x , slika 21.



Slika 21. Zarez u dvodimenzionalnom polju deformacije. Γ je bilo koja krivulja koja okružuje vrh zarez, a Γ_1 je krivulja vrha zarez [57]

J integral je definiran za dvodimenzionalne slučajeve sljedećom jednačbom (22) [57]:

$$J = \int_{\Gamma} W_K dy - T * \frac{\partial u}{\partial x} ds \quad (22)$$

gdje je W_K gustoća energije deformiranja, u je vektor pomaka, T je vektor trakcije definiran vanjskom normalom, n , po krivulji Γ , a ds je duljina jednog elementa luka po krivulji Γ .

Gustoća energije deformiranja definirana je jednačbom (23):

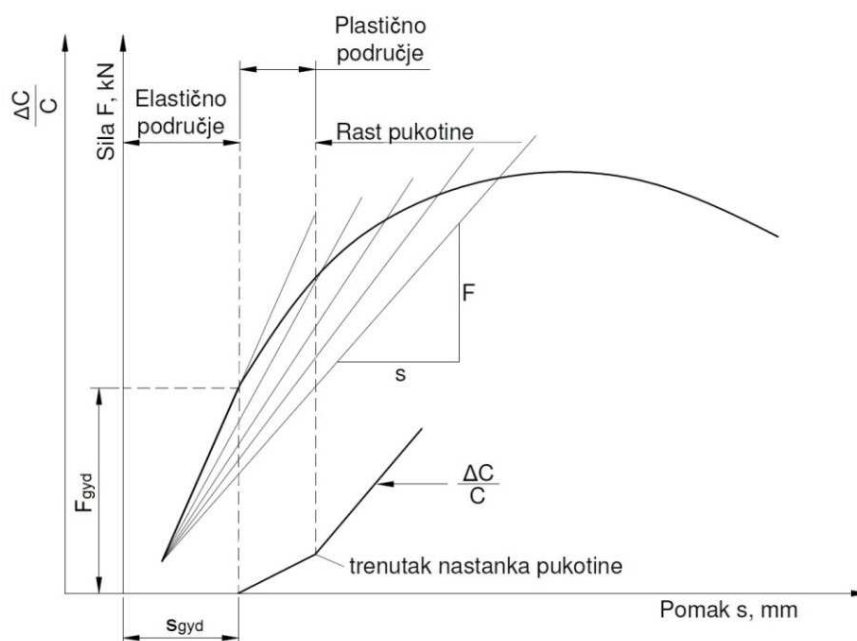
$$W = W(x, y) = W(\epsilon_{ij}) = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (23)$$

gdje je ϵ_{ij} infinitezimalan tenzor deformacije. U početku istraživanja dinamičke lomne žilavosti putem Charpy metode koristili su se PCVN uzorci dok se u novije vrijeme koriste i CVN uzorci. Današnje poznate metode za procjenu J_{Id} jesu: a) metoda promjene podatljivosti (eng. *compliance changing rate* (CCR)), b) metoda energije pri maksimalnoj sili (eng. *maximum energy method*), c) metoda mjerenjem kritične širine zone rastezanja (eng. *critical stretch zone width* (SZW_c)), d) metoda revidirane energije (eng. *energy revised method* (ER)).

Metoda promjene podatljivosti, koju je uveo Tseng M. K., daje vrlo dobru procjenu J_{Id} te ima široku primjenu. Veliki značaj metodi dao je Kobayashi T. koji je s suradnicima objavio niz radova od kojih su neki navedeni u ovome radu. Promjena podatljivosti definirana je jednadžbom (24) [24]:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{C - C_{el}}{C_{el}} \quad (24)$$

gdje je C zamišljena podatljivost od početne točke do bilo koje točke na dijagramu sila – pomak, slika 22. C_{el} je početna podatljivost u linearnom elastičnom području dijagrama do F_{gyd} odnosno njegova vrijednost jednaka je ukupnoj podatljivosti C_t . Kako bi se dobio podatak o trenutku nastanka pukotine, crta se krivulja promjena podatljivosti $\Delta C/C$ i pomaka pri čemu se na dijagramu uočava trenutak nagle promjene pravca, slika 22. Točka nagle promjene pravca je trenutak nastanka pukotine.

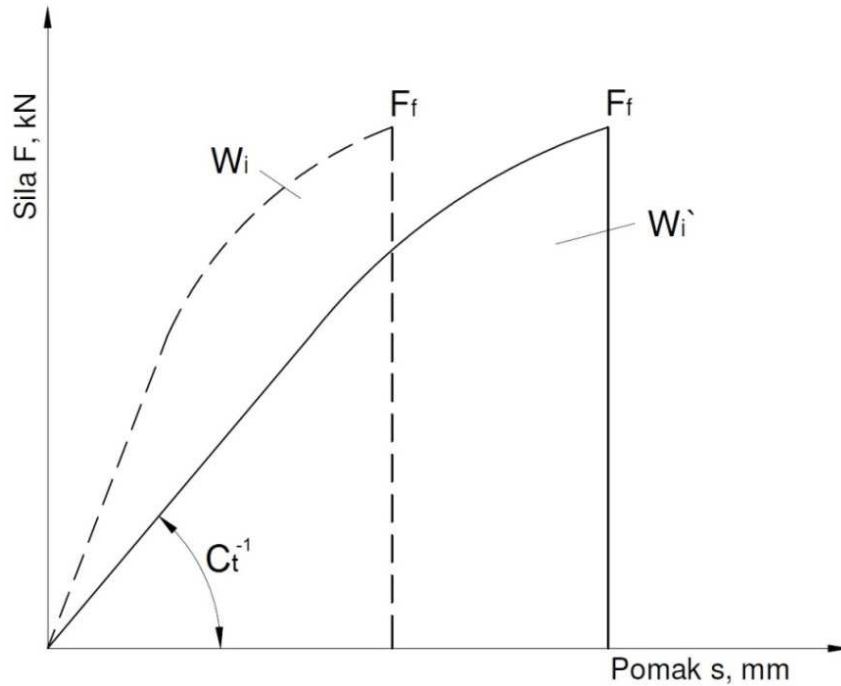


Slika 22. Shematski prikaz CCR metode [24]

Nakon što se odredio trenutak nastanka pukotine, potrebno je odrediti stvarnu apsorbiranu energiju uzorka W_i pomoću jednadžbe (25) [24]:

$$W_i = W_i' * \left(\frac{C_s}{C_t} \right) \quad (25)$$

gdje je W_i' prividna energija pri nastanku pukotine. Na slici 23 prikazano je poimanje jednadžbe (24). F_f je sila pri nastanku pukotine.



Slika 23. Shematski prikaz korekcije energije [24]

Dinamička lomna žilavost procijenjena je modificiranom Riceovom jednadžbom (26) [59].

$$J_{Ia} = \frac{2 * W_i}{B * (W - a_0)} \quad (26)$$

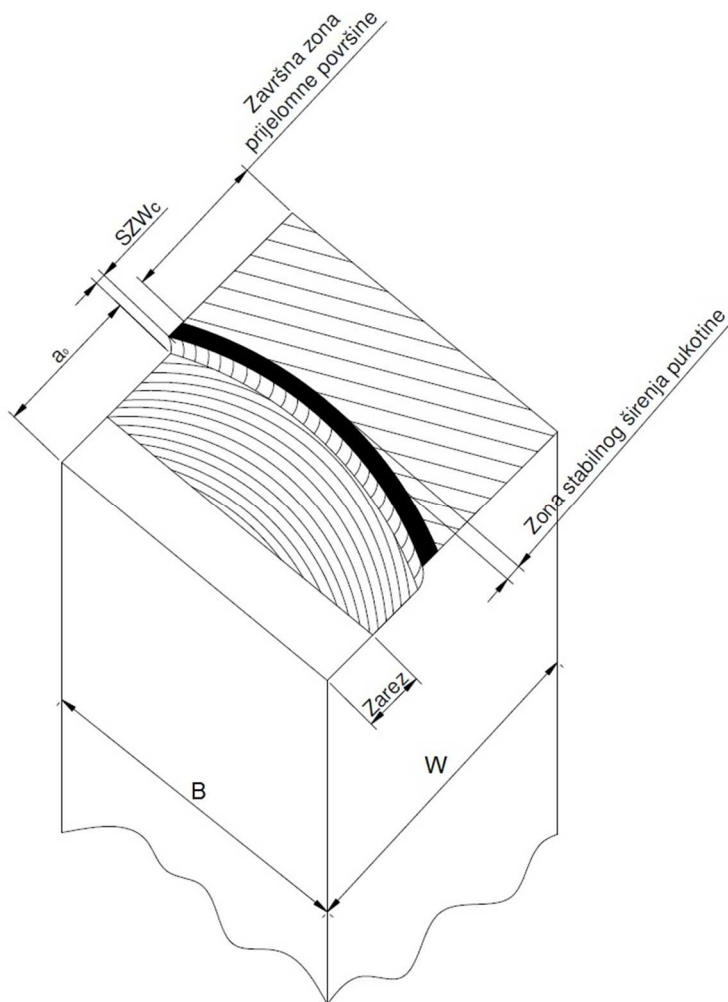
Procjena dinamičke lomne žilavosti putem energije pri maksimalnoj sili je vrlo jednostavno te se definira sljedećom jednadžbom (27):

$$J_{Ia} = \frac{2 * W_m}{B * (W - a_0)} \quad (27)$$

gdje je W_m energija pri maksimalnoj sili.

Metoda mjerenja zone rastezanja, SZW_c, daje relativno veliku pogrešku zbog kompliciranog mjerenja što bitno poskupljuje cijeli postupak. Pri elastično-plastičnoj deformaciji uzorka

ispred vrha pukotine stvara se zona rastezanja uslijed koncentracije naprezanja na vrhu pukotine što uzrokuje klizanje kristalnih ravnina odnosno plastičnu deformaciju. Posljedica ovoga stanja je zatupljenje vrha pukotine, a upravo taj tupi dio čini zonu rastezanja nakon loma uzorka, slika 24.



Slika 24. Područje zone rastezanja SZW_c [59]

Širina i dubina zone rastezanja rastu s stupnjem tupljenja vrha pukotine te će lokalne mikropukotine postajati veće kada lokalna zona rastezanja dosegne svoju kritičnu veličinu. Kritična veličina zone rastezanja ovisi o naprezanju i istezanju na vrhu pukotine i o svojstvima materijala. Pukotina će se početi širiti kroz cijeli presjek nakon što se u cijelom području postigne kritična vrijednost zone rastezanja. Zona rastezanja može se mjeriti na prijelomnim površinama pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa. Poveznica zone rastezanja i J_{Id} dana je sljedećom jednadžbom (28) [59]:

$$J_{Id} = f * \sqrt{2} * R_{gyd} * SZW_c \quad (28)$$

gdje je vrijednost ograničavajućeg faktora f dana sljedećom jednadžbom (29) [59]:

$$f = \frac{1}{0,54 * (1 + n)} * \frac{2}{\sqrt{3}} * [(1 + \nu) * (1 + n) * \frac{R_{gyd}}{n * E}] \quad (29)$$

gdje je n koeficijent očvršćenja materijala, a ν Poissonov koeficijent.

Metoda revidirane energije, W_{mr} , sastoji se od ponovnog proračuna energije pri maksimalnoj sili iz dijagrama sila–pomak. Revidirana energija je kritična energija potrebna za rast pukotine koja se može izraziti jednadžbom (30):

$$W_{mr} = W_m - \left(\frac{F_{md}^2}{2} \right) * \left[\frac{v_0 * t_{gyd}}{F_{gyd}} - \frac{v_0^2 * t_{gyd}^2}{8 * K_p} - \frac{C_s}{B - E} \right] \quad (30)$$

gdje je t_{gyd} vrijeme do sile razvlačenja. Podatljivost uzorka C_s može se izračunati pomoću jednadžbe (2). Vrijednost dinamičke lomne žilavosti dana je jednadžbom (31) [59].

$$J_{Id} = \frac{2 * W_{mr}}{B * (W - a_0)} \quad (31)$$

Od četiri navedene metode, metoda revidirane energije pokazala se je najboljom kod procjene J_{Id} na jednom uzorku. Metoda je jednostavna i nije skupa za razliku od CCR i SWZ_c metoda. Metoda energije pri maksimalnoj sili pokazuje veće rezultate mjerenja J_{Id} pri povišenim temperaturama dok pri sniženim temperaturama daje pouzdane rezultate [59].

Da bi procijenjene vrijednosti dinamičke lomne žilavosti bile pravovaljane moraju se zadovoljiti sljedeći uvjeti veličine uzorka [60]:

$$\Delta_a, h, W \geq 25 \frac{J_{Id}}{\sigma_f}; \text{ pri jamičastom lomu} \quad (32)$$

$$\Delta_a, h, W \geq 50 \frac{J_{Id}}{\sigma_f}; \text{ pri rascjepnom lomu} \quad (33)$$

gdje je σ_f naprezanje pri tečenju te iznosi:

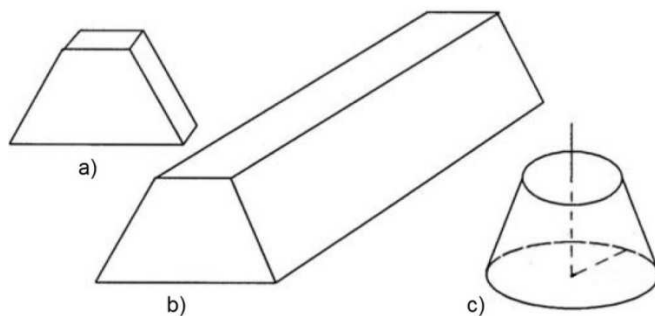
$$\sigma_f = \frac{F_{gyd} + F_{md}}{2} \quad (34)$$

3. DEFORMACIJA CHARPY UZORKA PRI SAVIJANJU

Tijelo je elastično deformirano sve dok na njega djelujemo malim opterećenjem. Znatno povećanje opterećenja uzrokuje plastičnu deformaciju tijela. Ponašanje tijela pri plastičnoj deformaciji ovisi o samom materijalu tijela i o vanjskim uvjetima kao što su temperatura, način opterećenja, vrijeme trajanja nekog procesa itd. Na problemima kod savijanja štapova s pukotinom, ili zarezom, kroz povijest bavilo se niz autora od kojih su najznačajnije radove na tom području objavili Neuber H., Hill R., Green A. P., Wilshaw T. R., Tetelman A. S., Alexander J. M. i drugi. Plastična deformacija u uvjetima ravninskog naprezanja i ravninske deformacije je karakterizirana oblikom plastičnih zona.

3.1. Ravninsko naprezanje i ravninsko stanje deformacija

Stanje ravninskog naprezanja, ravninske deformacije i osnosimetrični problemi su tri vrlo važna problema u teoriji plastičnosti i inženjerstvu općenito. Radi lakšeg razumijevanja na slici 25 predloženi su primjeri ova tri stanja.



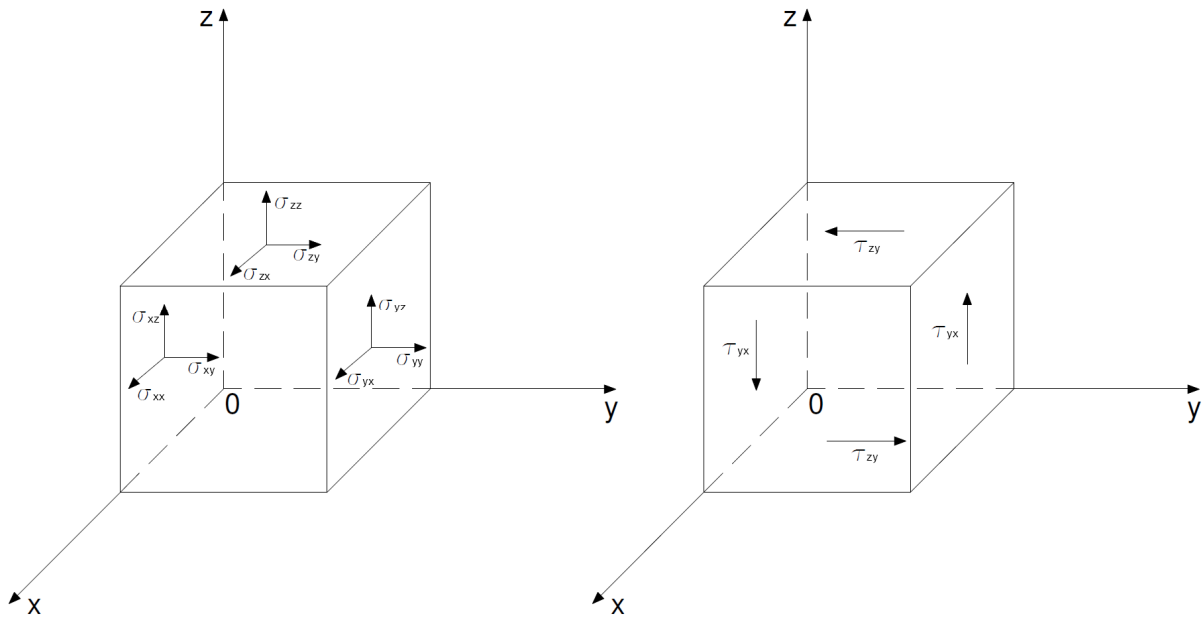
Slika 25. Ravninsko stanje naprezanja a); ravninsko stanje deformacije b); osnosimetrično stanje c) [61]

Stanje ravninskog naprezanja javlja se kod vrlo tankog tijela deformiranog pod djelovanjem sile koja leži u njegovoj ravnini simetrije. Stanje ravninske deformacije proizlazi kod debelog tijela gdje u smjeru z (dužina tijela) nema deformacije. U osnosimetričnom stanju problemi su simetrični u uvjetima geometrije, graničnih vrijednosti i vanjskog opterećenja oko osi.

Uobičajna matrica tenzora naprezanja dana je u obliku:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (35)$$

Komponente $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ su normalna naprezanja dok su τ_{ij} komponente tangencijalnog naprezanja gdje je $\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$. Na slici 26 prikazane su komponente tenzora naprezanja.



Slika 26. Komponente tenzora naprezanja

Osim navedenih naprezanja, stanje naprezanja može biti određeno i pomoću glavnih naprezanja koja su zapravo ekstremne vrijednosti maksimalnih naprezanja i ona se pojavljuju kada su tangencijalne komponente jednake nuli. Matrica glavnih naprezanja $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ima oblik:

$$[\sigma_i] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Pomoću jednadžbe (37) možemo odrediti glavna naprezanja u svakoj točki.

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (37)$$

Maksimalno tangencijalno naprezanje dano je jednadžbom:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (38)$$

Kut koji ekstremna normalna naprezanja čine s osi x dan je prema:

$$\tan 2(\alpha) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (39)$$

Smjer maksimalnog tangencijalnog naprezanja u odnosu na glavna naprezanja iznosi 45°.

Kako bi potpuno opisali deformaciju tijela uz komponente tenzora naprezanja potrebno je poznavati i komponente tenzora duljinske i kutne deformacije. Uobičajna matrica tenzora deformacije dana je u obliku:

$$[\varepsilon_{ij}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yx}}{2} & \varepsilon_y & \frac{\gamma_{yz}}{2} \\ \frac{\gamma_{zx}}{2} & \frac{\gamma_{zy}}{2} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (40)$$

Gdje su $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ komponente duljinske, linijske, deformacije dok su γ_{ij} komponente kutne, tangencijalne, deformacije. Analogno prema jednadžbama naprezanja možemo pisati:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (41)$$

Ako vektor naprezanja stalno leži u istoj ravnini tada je naprezanje ravninsko. Jednadžbe koje opisuju stanje ravninskog naprezanja jesu:

$$\sigma_x = \sigma_x(x, y), \quad \sigma_y = \sigma_y(x, y), \quad \tau_{xy} = \tau_{xy}(x, y), \quad \sigma_z = 0, \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0. \quad (42)$$

Hookeov zakon za ravninsko stanje naprezanja, ukoliko su nam poznate deformacije i konstante materijala E, G i ν , dan je prema:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_x + \nu * \varepsilon_y) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_y + \nu * \varepsilon_x) \\ \tau_{xy} &= G * \gamma_{xy}\end{aligned}\tag{43}$$

Ravninsko stanje deformacija je dvodimenzionalna deformacija tijela u kojemu su pomaci svih točaka paralelni s x, y ravninom, a vrijednosti tih pomaka ne ovise o udaljenosti z koja je okomita na ravninu x, y .

Stanje ravninske deformacije vrijedi kada je jedna dimenzija puno veća od preostale dvije, kada sile ravnine ne mijenjaju svoju veličinu u smjeru najveće dimenzije i kada su sile koje djeluju okomito na ravninu poprečnog presjeka zanemarive. Jednadžbe koje opisuju stanje ravninske deformacije jesu:

$$\varepsilon_x = u_x(x, y), \quad \varepsilon_y = u_y(x, y), \quad \varepsilon_z = 0, \quad \sigma_z \neq 0.\tag{46}$$

Hookeov zakon za ravninsko stanje deformacije dan je prema:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y)\end{aligned}\tag{47}$$

U nastavku razmotriti će se problem kliznih linija.

Rješavanje problema deformacije Charpy uzorka pri poprečnom savijanju (savijanje u tri točke) zahtjeva izostavljanje elastične komponente deformacije. Odnosno radi lakše analize ravninske deformacije i kliznih linija pretpostavimo da je tijelo idealno kruto pri opterećenjima nižim od granice razvlačenja i da modul elastičnosti ima beskonačnu

vrijednost. Ovo hipotetsko tijelo može se odnositi na kruti-idealnoplastični materijal.

Teorija kliznih linija bavi se idealnim materijalom kod kojega izostaje deformacijsko očvrnuće pri plastičnoj deformaciji. Idealni materijal u stvarnosti ne postoji ali se u stanju ravninske deformacije i teoriji kliznih linija koristi kako bi se olakšala analiza deformacije nekog tijela. Idealno tijelo daje vrlo dobru prvu aproksimaciju na koji način će se materijal deformirati.

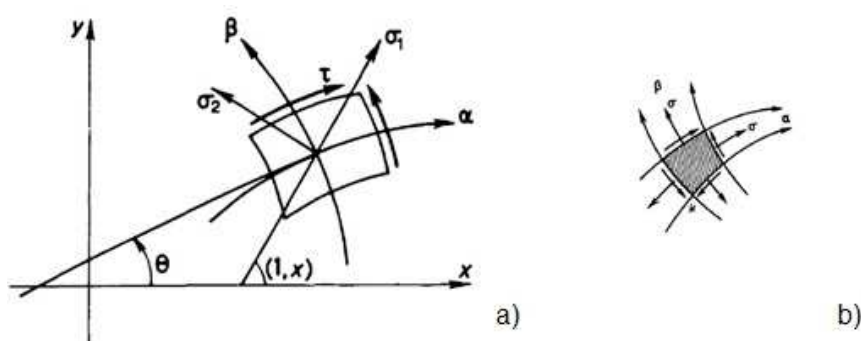
Teoriju linija u ravnini predložio je Kötter F., a neki od istaknutijih istraživača koji su kasnije razvili teoriju jesu Prandtl L., Hencky H., Geiringer H., Hill R., Prager W. i drugi.

Linija klizanja je linija koja je tangenta svakoj točki na površini gdje vlada maksimalno tangencijalno naprezanje. Postoje dvije familije kliznih linija koje su međusobno ortogonalne i definirane su sljedećim jednadžbama iz [62]:

$$x = x(\alpha, \beta) \quad (48)$$

$$y = y(\alpha, \beta) \quad (49)$$

gdje su α i β familije kliznih linija. Linije familije α odgovaraju konstantnim vrijednostima linijama familije β i obratno. Glavni smjer prve linije α ili β familije nalazi se pod nagibom od $\theta = 45^\circ$, slika 27 a, [62]. Linije klizanja prekrivaju područje s ortogonalnom mrežom. Na infinitezimalan element izdvojen iz ortogonalne mreže djeluju jednaka naprezanja u smjeru kliznih linija, slika 27 b [62].



Slika 27. Linije klizanja:

a) linije klizanja (α i β familije),

b) element izdvojen iz ortogonalne mreže [62]

Kut θ je nagib tangente na α liniji. Diferencijalne jednadžbe α i β familija:

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta, \quad \frac{dy}{dx} = -\cot \theta \quad (50)$$

Svojstva linija klizanja [63]:

- linije klizanja su neprekinute linije;
- linije klizanja sastoje se od dviju ortogonalnih familija krivulja α i β ;
- linije klizanja jedne familije ne sijeku se među sobom osim u singularnoj točki;
- ako je odsječak linije klizanja jedne familije, primjerice α , između dviju linija druge familije, primjerice β_3 i β_6 , dužina, tj. dio pravca, onda su svi odsječci familija α između β_3 i β_6 također dužine jednake duljine;
- linije klizanja sijeku trajektorije naprezanja pod kutom $\theta = \pm \pi/4$;
- kut θ pod kojim linija klizanja siječe rub ovisi o uvjetima trenja na rubu i iznosi:

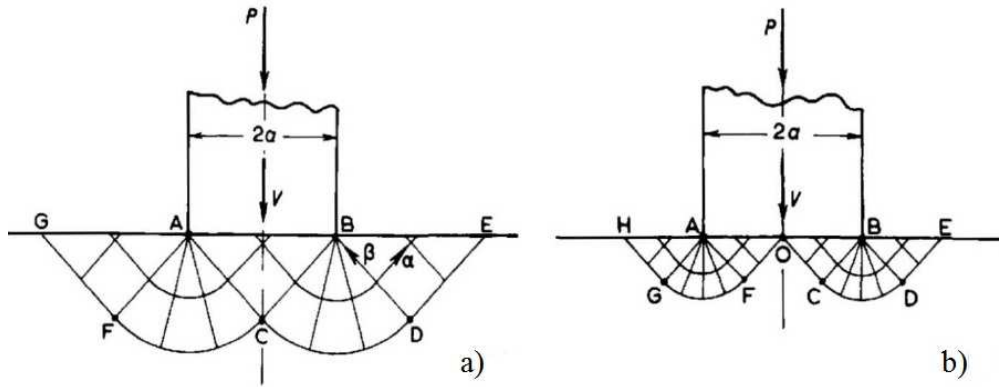
$$\theta = \frac{(\arccos \tau/k)}{2} \quad (51)$$

ako je $\tau = 0$, onda je $\theta = \pm \pi/4$; naime, u tom slučaju rub je trajektorija naprezanja;

- promjena srednjeg normalnog naprezanja σ_0 duž linije klizanja proporcionalna je kutu zakreta tangente na liniju klizanja;
- kut među tangentama na dvije bliske linije klizanja jedne familije, primjerice α_1 i α_2 , u točkama u kojima ih sijeku linije druge familije, primjerice $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ itd., je konstantan - 1. Henckyjev poučak;
- polumjer zakrivljenosti linije klizanja jedne familije mijenja se za iznos prijašnjeg puta po liniji klizanja druge familije - 2. Henckyjev poučak.

3.2. Utiskivanje klina u ravnu podlogu

Razmotrimo problem plastičnog tečenja uslijed utiskivanja krutog klina koji ima ravnu bazu u ravnu podlogu. Na slici 28 prikazana su polja kliznih linija koja su u svojim radovima predložili Prandtl L. i Hill R. [64, 65].



Slika 28. Polje kliznih linija:

a) Prandtlovo rješenje,

b) Hillovo rješenje [62]

Klin koji se kreće brzinom v pritisnut je na podlogu, a trenje između klina i podloge je zanemarivo. Pretpostavlja se da je deformacija mala tako da ne dolazi do promjene oblika podloge. Prema Prandtlu pretpostavimo da je raspodjela tlaka ispod klina jednolika te se polje kliznih linija, slika 28 a, može konstruirati kako slijedi: između klina i podloge vlada jednoliko naprezanje, točnije na trokute AFG i BDE djeluje tlačno naprezanje paralelno s podlogom. U trokutu ABC naprezanje (tlak) σ je nepoznato dok su parametri θ i ξ dani jednadžbama (52) [62]:

$$\theta = \frac{1}{4}k, \quad \xi = \frac{\sigma}{2k} + \frac{1}{4}\pi \equiv \xi_1 \quad (52)$$

gdje je k hidrostatski tlak čija je vrijednost jednaka srednjoj vrijednosti zbroja normalnih naprezanja $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$:

$$\sigma_0 = -k = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (53)$$

U trokutu BDE parametri su definirani sljedećim jednadžbama:

$$\sigma = -k, \quad \theta = \frac{1}{4}\pi, \quad \xi_2 = -\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\pi. \quad (54)$$

Gdje je parametar ξ konstantan po linijama α familije te je stoga $\xi_1 = \xi_2$, i $\sigma = -k(1 + \pi)$.

Nakon čega slijede vrijednosti naprezanja u trokutu ABC:

$$\sigma_x = -k\pi, \quad \sigma_y = -k(2 + \pi) \quad (55)$$

Granično opterećenje dano je jednadžbom:

$$P = 2ak(2 + \pi) \quad (56)$$

Drugo rješenje dao je Hill i prikazano je na slici 28 b. I ovdje je pretpostavljeno da jednoliko naprezanje djeluje uzduž linije AB. Prema tome u području OCDEB vlada isto polje naprezanja kao i u području ACDEB Prandtlovog rješenja. Iako je vidljivo da u liniji AOB vlada isto jednoliko naprezanje pri čemu granično opterećenje ima istu vrijednost. Iako su polja kliznih linija različita oba daju isto rješenje [62]. Ova razmatranja Prandtlovog i Hillovog rješenja daju približan uvid u ponašanje materijala pri udarnom opterećenju. Potrebno je naglasiti da Prandtl i Hill svoja rješenja temelje pri kvazistatičkom opterećenju.

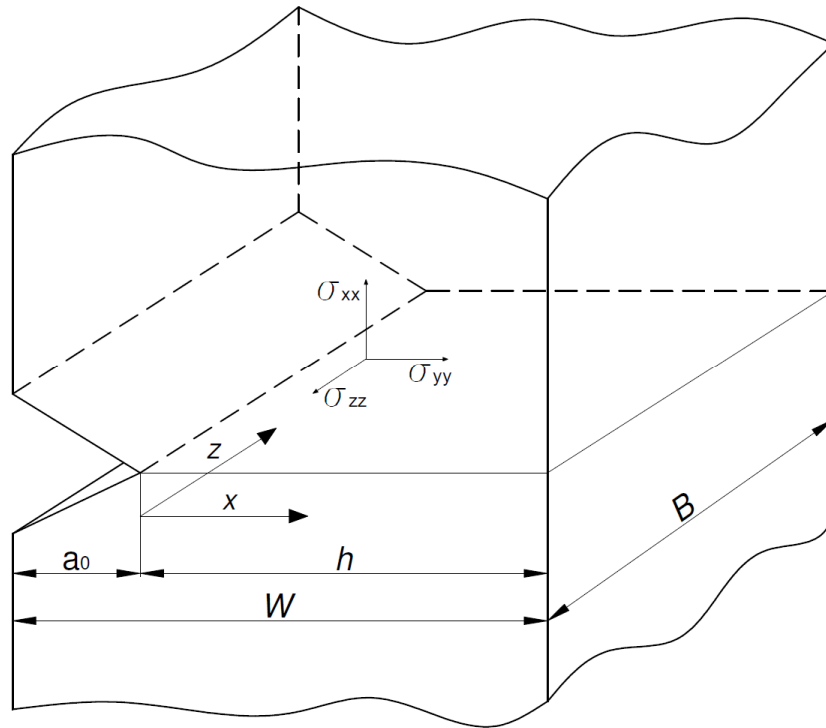
3.3. Poprečno savijanje Charpy uzorka

Lokalno elastično naprezanje oko zareza raste uslijed međusobnog približavanja silnica. Svojstvo zareza da povisi elastično naprezanje određeno je elastičnim faktorom koncentracije naprezanja koji je definiran prema:

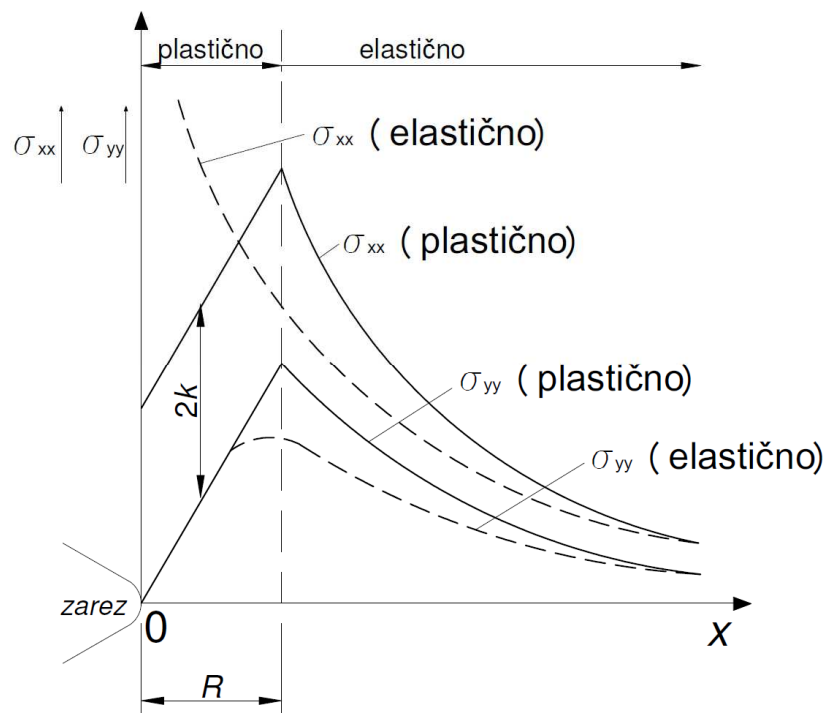
$$\alpha_k = \frac{\sigma_e}{\sigma_n} \quad (57)$$

Gdje je σ_e naprezanje pri granici razvlačenja materijala, a σ_n nazivno naprezanje.

Općenito su zarezi u materijalu definirani prema njihovoj geometriji (oštar, tup, plitak, dubok itd.). Green i Hundy su u radu [17] definirali plitak zarez kod prizmatičnih uzoraka preko omjera $a_0/h < 1,4$. Granične vrijednosti faktora α_k određene su parametrima geometrije uzorka (α_0, h, a_0) te one za Charpy uzorak iznose 2,82 odnosno 5,65. Prema Neuberu [66] teoretska vrijednost elastičnog faktora koncentracije naprezanja za Charpy uzorak iznosi 3,25. Uvođenjem faktora α_k tečenje materijala nastupiti će pri $\sigma_e = \sigma_n * \alpha_k$, pri čemu dolazi do elastično-plastičnog naprezanja. Na slikama 29 i 30 prikazana je raspodjela naprezanja ispod korijena zareza Charpy uzorka. Prema slici 30 maksimalnu vrijednost naprezanja predstavlja granica između elastične i plastične deformacije, a isprekidana linija predstavlja stanje potpunog elastičnog naprezanja pri istim uvjetima opterećenja. Iz slike 30, R je veličina plastične zone, a x udaljenost od vrha zareza.



Slika 29. Raspodjela naprezanja ispod korijena zareza [67]



Slika 30. Elastično-plastična raspodjela naprezanja ispod korijena zareza [67]

Plastični faktor koncentracije naprezanja definiran je omjerom maksimalnog naprezanja ispod korijena zareza i naprezanja pri granici razvlačenja, odnosno:

$$\alpha_{k(p)} = \frac{\sigma_{xx}^{max}}{\sigma_e} \quad (58)$$

Pretpostavimo li da na sredini ispitnog uzorka vrijedi stanje ravninske deformacije, vrijednost naprezanja σ_{zz} iznositi će:

$$\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (59)$$

Izraz (58) odgovara izrazu (47), odnosno Hookeovom zakonu za ravninsko stanje deformacije. Prema tome ispod korijena zareza postoji troosno stanje naprezanja koje možemo podijeliti na hidrostatički tlak, odnosno srednju vrijednost naprezanja σ_0 te na devijatorsku komponentu:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_0 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix}, \quad (60)$$

odnosno:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_0 & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_0 & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_0 \end{bmatrix}. \quad (61)$$

Iz izraza (61) upravo devijatorska komponenta naprezanja uzrokuje plastično tečenje materijala. Teorija plastičnosti pretpostavlja da hidrostatička komponenta naprezanja nema utjecaja na tečenje materijala te će stoga tečenje nastupiti prema Trescinom uvjetu tečenja koji možemo zapisati kao:

$$\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} = k, \quad \frac{(\sigma_x - \sigma_0) - (\sigma_z - \sigma_0)}{2} = k. \quad (62)$$

Gdje je parametar k svojstvo materijala te se određuje u pokusu čistog smicanja ili jednoosnog rastezanja, odnosno:

$$\tau_{max} = \tau_e, \quad k = \tau_e. \quad - \text{čisto smicanje} \quad (63)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_e, \quad \sigma_{max} = 2\tau_{max} = \sigma_e = 2\tau_e. \quad - \text{jednoosno raztezanje} \quad (64)$$

Prema jednadžbama (62), (63) i (64) oba pokusa daju istu vrijednost konstante k , odnosno:

$$k = \frac{\sigma_e}{2} = \tau_e \quad (65)$$

Gdje je τ_e smično naprezanje pri granica razvlačenja, a σ_e naprezanje pri granici razvlačenja. Koristimo li von Misesov uvijet tečenja u pokusu jednoosnog rastezanja ono nastaje kada je:

$$\sigma_x = \sigma_e, \quad \sigma_y = \sigma_z = 0. \quad (66)$$

Iz čega slijedi von Misesov uvijet tečenja:

$$k = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \quad (67)$$

Ako parametar k određujemo preko pokusa čistoga smicanja, tečenje nastaje kad je:

$$\tau = \tau_e. \quad (68)$$

Tada je:

$$\sigma_x = \tau = \tau_e, \quad \sigma_y = -\tau = -\tau_e, \quad \sigma_z = 0. \quad (69)$$

Završno imamo izraz:

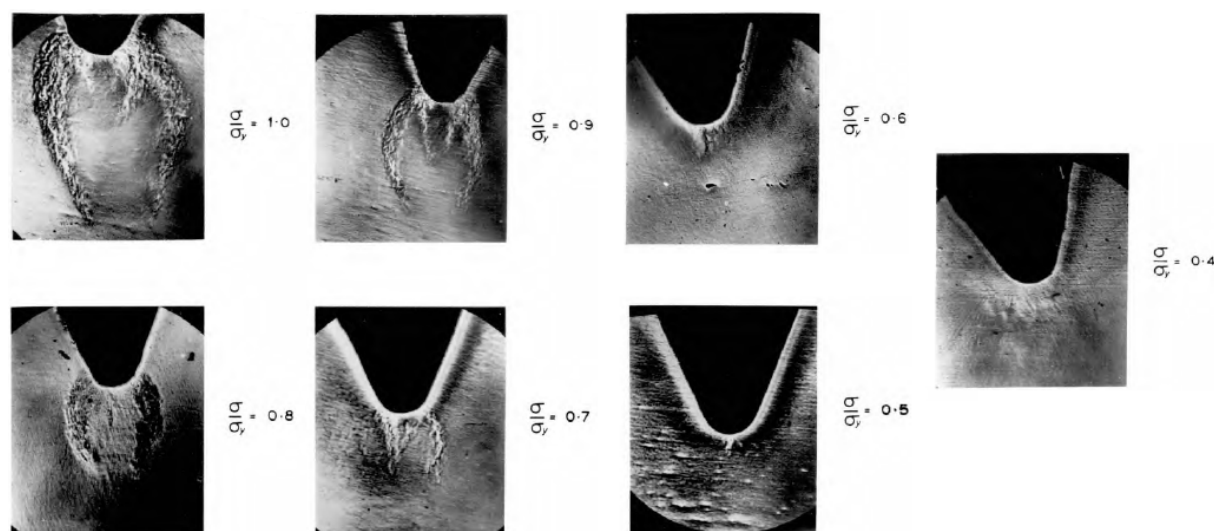
$$k = \tau_e = \frac{\sigma_e}{2}. \quad (70)$$

Ovisno o vrsti pokusa dobivaju se dvije različite vrijednosti za parametar k . Kod pokusa jednoosnog rastezanja von Misesova kružnica je opisana Trescinim šesterokutom, a kod pokusa smicanja von Misesova kružnica je upisana Trescinim šesterokutom [63].

Ukoliko je komponenta σ_z veća od σ_x tečenje neće nastupiti dok se ne povisi vrijednost komponente σ_x . Rastom opterećenja tečenje se širi od korijena zareza te je moguće opisati put plastične deformacije u materijalu ispod korijena zareza. Upravo taj put možemo opisati pomoću linija klizanja.

Prije analize linija klizanja ispod korijena zareza dan je osvrt na deformaciju Charpy uzorka na njegovoj površini, $z = 0 \text{ mm}$, i u sredini presjeka, $z = 5 \text{ mm}$, prije početka i nakon razvlačenja.

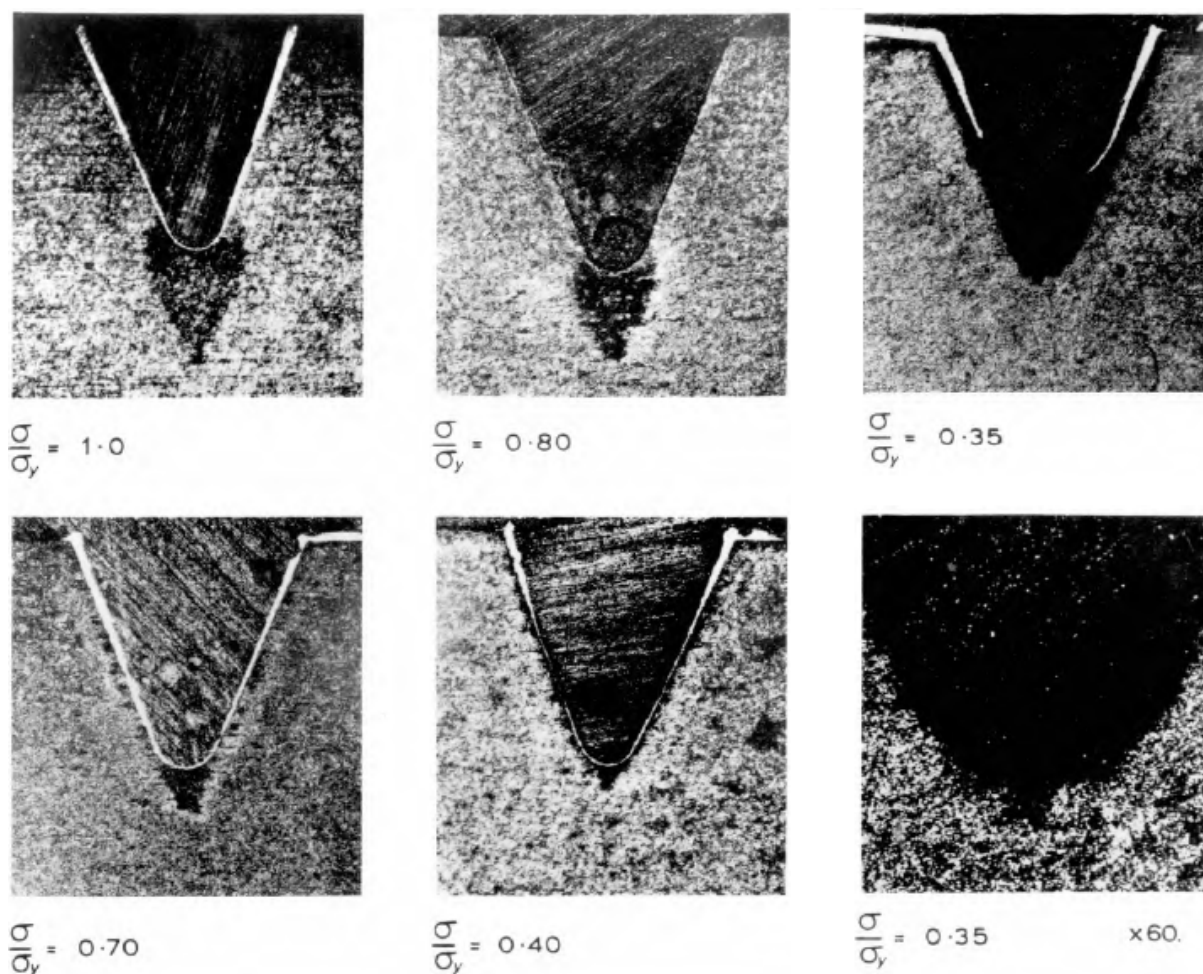
Pretpostavimo da na površini uzorka djeluje stanje ravninskog naprezanja. Wilshaw i Pratt su u radu [68] dali fotografije plastične deformacije Charpy uzorka pri poprečnom savijanju, slika 31.



Slika 31. Plastična deformacija Charpy uzorka, $z = 0 \text{ mm}$, povećanje 20 X [68]

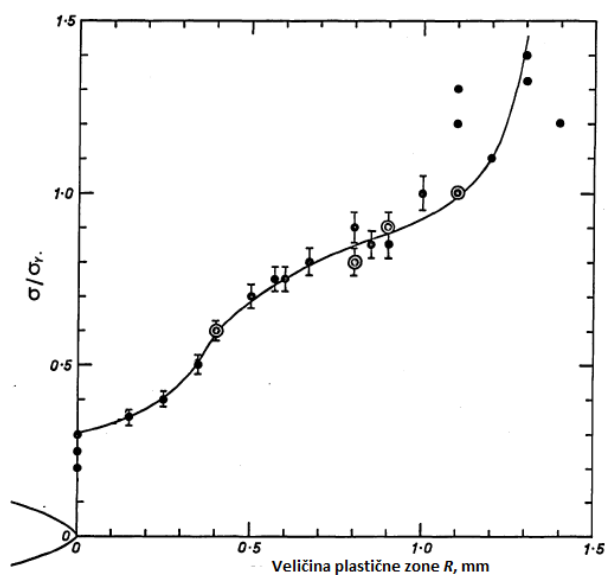
Iz slike 31, σ/σ_y odnosi se na vrijednost opterećenja gdje je σ nazivno naprezanje, a σ_y granica tečenja, prema oznakama u ovome radu $\sigma_y = \sigma_e$. Do vrijednosti $\sigma/\sigma_y = 0,4$ nije uočena plastična deformacija. Najmanja deformacija duljine oko 0,1 mm uočena je pri opterećenju $\sigma/\sigma_y = 0,5$. Prema tome plastična deformacija započinje negdje između vrijednosti opterećenja 0,4 i 0,5. Daljnje širenje deformacije obilježeno je pojavljivanjem zakrivljenih Lüdersovih linija koje se šire od rubova korijena zareza. Linije se šire sve dublje u materijal ispod zareza te se pri iznosu opterećenja od oko $\sigma/\sigma_y = 0,8$ pojavljuju sekundarne Lüdersove linije unutar kojih se nalaze primarne linije, $\sigma/\sigma_y = 0,9$. Izgled plastične zone ovisi o geometriji zareza, načinu opterećenja i tečenju materijala [68].

Pretpostavimo sada da u sredini presjeka uzorka, $z = 5 \text{ mm}$ djeluje stanje ravninske deformacije. Fotografije plastične deformacije u sredini Charpy uzorka pri poprečnom savijanju prikazane su na slici 32.



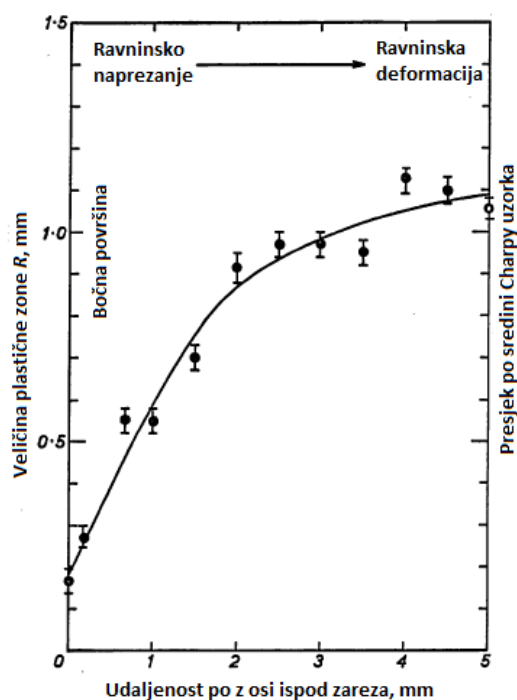
Slika 32. Plastična deformacija Charpy uzorka, $z = 5$ mm, povećanje 60 X [68]

Najmanja uočena plastična zona pojavila se pri opterećenju $\sigma/\sigma_y = 0,35$ te ima oblik klina. Daljnjim povećanjem opterećenja plastična zona se širi i produljuje ispod korijenu zarez a te poprima oblik zaokrenute kapljice vode. Ovakav klinasti oblik plastične deformacije predložili su u svojim radovima [18, 19]. Kako se opterećenje približava granici općeg tečenja, deformacija se širi na bočne stranice zarez a i dublje u materijal. Pri općem tečenju dubina plastične zone iznosi oko 1,0 mm. Veličina plastične zone, R , povezana je s opterećenjem σ/σ_y , slika 33. Isto tako vidljivo je da vrh zone ne teži daljnjem produljenju.



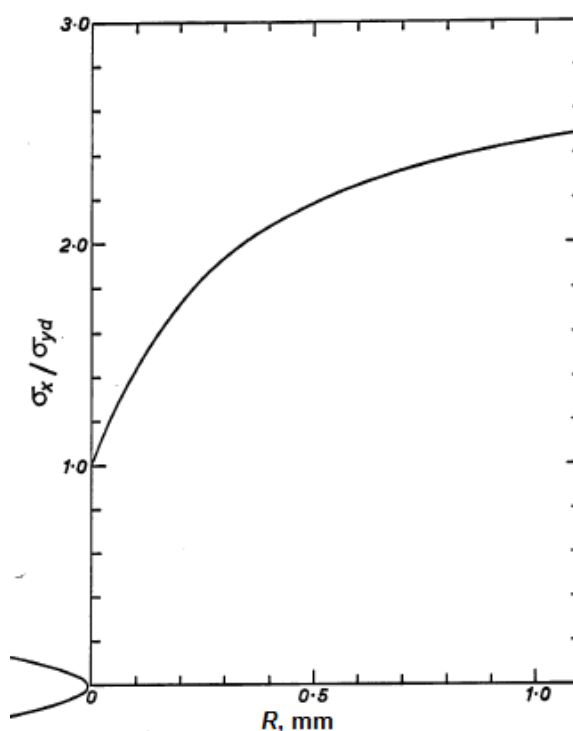
Slika 33. Utjecaj opterećenja na rast plastične zone [67]

Analizom plastične deformacije vidljivo je da se pri stanju ravninskog naprezanja javljaju Lüdersove linije, a pri stanju ravninske deformacije klinasti uzorak. Razmotrimo utjecaj širine uzorka, W , na stanje ravninskog naprezanja i deformacije. Na slici 34 prikazano je stanje ravninske deformacije s obzirom na širinu uzorka. Ispitni uzorak je opterećen do granice tečenja.



Slika 34. Procjena stanja ravninske deformacije Charpy uzorka [68]

Iz slike 34 može se vidjeti prijelaz iz ravninskog naprezanja (Lüdersove linije) i ravninske deformacije (klinasti uzorak) s obzirom na povećanje širine W po osi z . Oblik i veličina plastične zone nije se značajno promijenila nakon $z = 2,5 \text{ mm}$. Prema rezultatima iz slike 34 može se zaključiti da će se potpuno stanje ravninske deformacije postići u sredini uzorka, odnosno pri $z = 5 \text{ mm}$. Povećanjem širine materijala povećati će se količina materijala pod ravninskom deformacijom ali neće doći do značajnog povećanja maksimalnog naprezanja, slika 35 [68]. Usporedbom fotografija pri opterećenju $\sigma/\sigma_y = 0,4$ može se vidjeti da pri stanju ravninskog naprezanja nisu uočeni tragovi plastične deformacije dok je u sredini uzorka, stanje ravninske deformacije, vidljiva plastična deformacija duljine $0,25 \text{ mm}$ [68]. Iz svega navedenog vidljivo je da se plastična deformacija prvo javlja u sredini uzorka te se širi u smjeru osi z i y .



Slika 35. Promjena maksimalnog naprezanja s veličinom plastične zone [68]

Green i Hundy [17] su predložili teoretska rješenja ravninske deformacije pri početnom tečenju kod uzoraka koji sadrže zarez. Hill [65] je iz geometrije polja i Henckyjevih relacija pokazao da su blizu zareza, čiji je korijen polumjera r_0 , klizne linije logaritamske spirale. Vlačno naprezanje σ_x koje je okomito na presjek kod minimalnog presjeka, slika 29, definirano je prema jednadžbi [65]:

$$\sigma_x = 2k \left[1 + \ln \left(1 + \frac{x}{r_0} \right) \right] \quad (71)$$

Gdje je x udaljenost od korijena zareza, a r_0 polumjer zareza. Stoga maksimalno naprezanje možemo zapisati u obliku [67]:

$$\sigma_{max} = \sigma_e \left[1 + \ln \left(1 + \frac{R}{r_0} \right) \right] - Tresca \quad (72)$$

$$\sigma_{max} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_e \left[1 + \ln \left(1 + \frac{R}{r_0} \right) \right] - von Mises \quad (73)$$

Vrijednost R možemo izračunati iz jednadžbe:

$$R = r_0 (e^{(\pi - \alpha_0/2)} - 1) \quad (74)$$

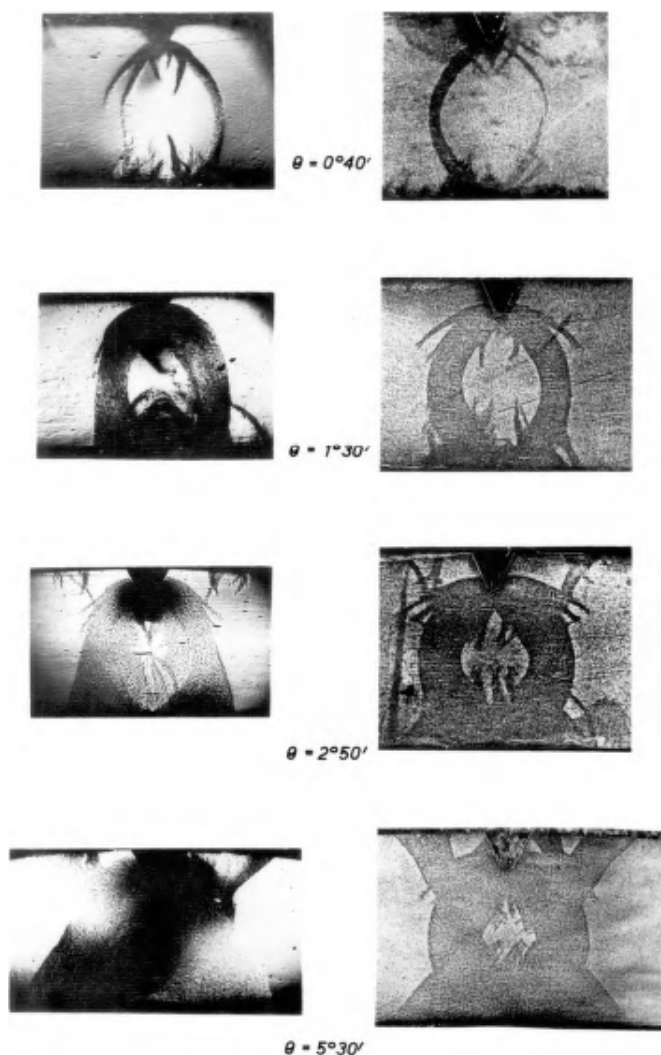
Jednadžbe (72) i (73), u ovisnosti o kutu zareza, α_0 , možemo zapisati u obliku [67]:

$$\sigma_{max} = \sigma_e \left[1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_0}{2} \right] - Tresca \quad (75)$$

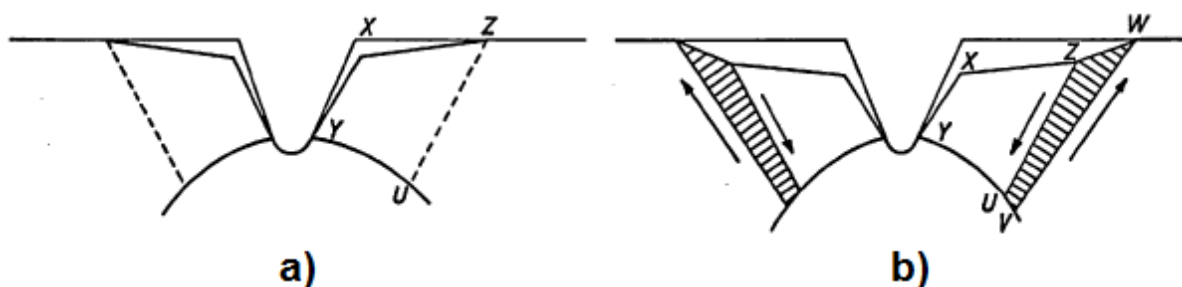
$$\sigma_{max} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_e \left[1 + \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_0}{2} \right] - von Mises \quad (76)$$

Nakon analize plastične deformacije prije granice razvlačenje razmotriti će se širenje plastične deformacije nakon granice razvlačenja. Iz slike 36 može se vidjeti način širenja Lüdersovih linija te da se klinasti uzorak, ravninska deformacija, gotovo ne proširuje. Daljnjom deformacijom povećava se polumjer zareza koji uzrokuje elastični nagib, linija ZU, slika 37 a. Pri $1^\circ 30'$ naprezanje na površini u točki Z postiže vrijednost koja uzrokuje tečenje u smjeru ZU te se stvara plastično deformirani materijal koji ima oblik krila i spaja s Lüdersovim linijama. Zatim u cijelom području elastično deformiranog materijala, YXZU, vlada smično naprezanje koje uzrokuje stvaranje novoga nagiba VW, a samim time i područje plastičnog materijala ZUWV, slika 37 b. Pri daljnjem povećanju naprezanja područja YXZU postaje potpuno plastično [69]. Nakon analize deformacije vidljivo je da se ona prvo pojavljuje u sredini uzorka, ravninska deformacija.

U uvjetima ravninskog naprezanja deformacija je popraćena Lüdersovim linijama koje se protežu od rubova korijena zareza dok se pri ravninskoj deformaciji plastična deformacija pojavljuje u obliku klina, a kasnije klin poprima oblik kapljice.



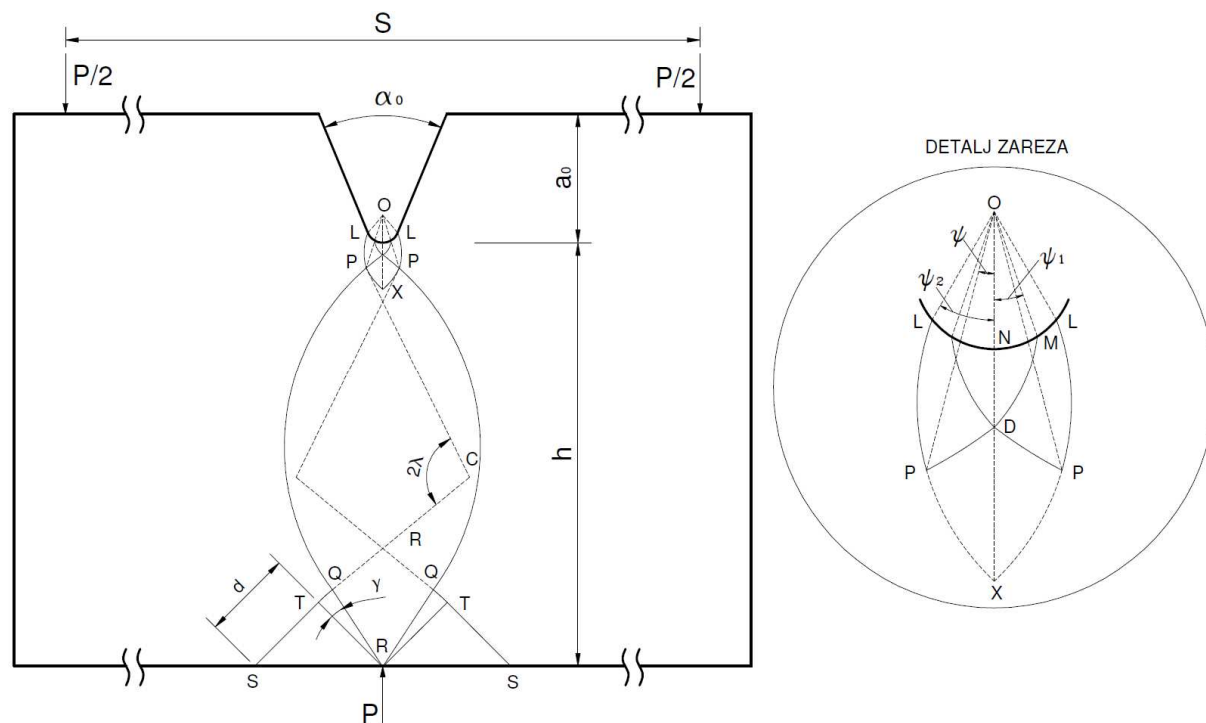
Slika 36. Razvoj plastične deformacije. Desno-ravninska deformacija; lijevo-ravninsko naprezanje. Kut $\Phi = \alpha_0$ [69]



Slika 37. Deformacija nakon granice razvlačenja [69]

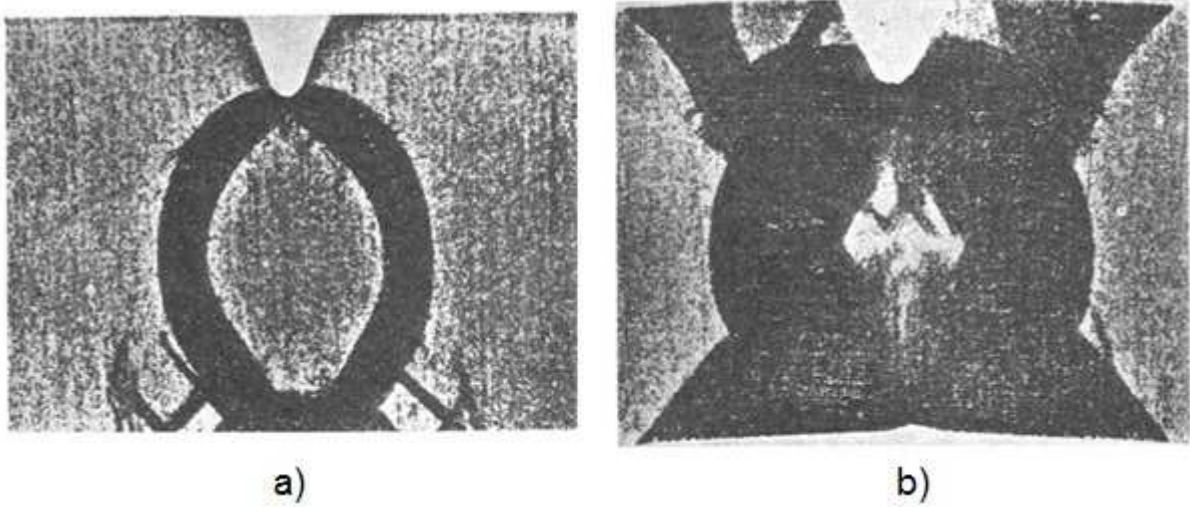
Primjenu teorije kliznih linija na Charpy i Izod uzorcima u svojim radovima dali su istraživači prema referencama [16-20]. Uzorak s zarezom u uvjetima poprečnog savijanja, slika 14, često se koristi pri istraživanju mehanike loma. U ovim uvjetima primjena teorije kliznih linija uz pretpostavku da je materijal krut-idealno plastičan može dati dobru aproksimaciju deformacije [70]. Teorija kliznih linija može se primijeniti za aproksimaciju hidrostatičkog tlaka koji ovisi o kutu zareza, dubini zareza i polumjeru vrha zareza. Rješenja dana u radovima [16-19] vrijede samo ako se polje kliznih linija ne širi na bočne stranice zareza odnosno ako je kut zareza manji od kritičnog kuta $2\alpha_c$. Ako je kut zareza veći od kritičnog kuta, $\alpha_0 > 2\alpha_c$, plastična deformacija širi se na bočne stranice zareza. Vrijednost kritičnog kuta za Charpy i Izod uzorak iznosi 65° .

Wu S. X. i suradnici su u radu [70] predložili rješenje za polje kliznih linija kod poprečnog savijanja uzoraka koji sadržavaju duboke zareze, $a_0/W \geq 0,20$ mm, s različitim kutevima, dubina i polumjera zareza. U ovome dijelu razmatrati će se polje kliznih linija gdje ne dolazi do širenja deformacije na bočne stranice zareza, $\alpha_0 < 2\alpha_c$, i polje kliznih linija, $\alpha_0 > 2\alpha_c$, gdje dolazi do širenja deformacije na bočne stranice zareza. Na slici 38 nalazi se shematski prikaz polja kliznih linija koje su dali Green i Hundy [17].



Slika 38. Shematski prikaz linija klizanja [17]

Na slici 39 prikazani su tragovi plastičnog deformiranja Charpy uzorka u nagriženom stanju.



Slika 39. Polako poprečno savijanje Charpy uzorka:

a) kut savijanja 35',

b) kut savijanja 2° 20' b) [17]

Iz geometrije polja i pomoću Henckyjevog odnosa, Wu i suradnici za $\alpha_0 < 2\alpha_c$ daju sljedeće jednadžbe [70]:

$$F_{1x} = \tau d [\sin(\gamma + \pi/4) - (1 + 2\gamma) \cos(\gamma + \pi/4)] \quad (77)$$

$$F_{1y} = \tau d [(1 + 2\gamma) \sin(\gamma + \pi/4) + \cos(\gamma + \pi/4)] \quad (78)$$

$$M_1 = \tau \left[Rd + \frac{1}{2} (1 + 2\gamma) d^2 \right] \quad (79)$$

gdje su F_{1y} i F_{1x} sile na liniji klizanja QR, M_1 je moment savijanja na liniji klizanja QR, a τ je smično naprezanje.

Jednadžbe na liniji klizanja PQ:

$$F_{2x} = \tau R [(4\lambda - 2\gamma - 1) \sin(2\lambda + \gamma + \pi/4) \cos(2\lambda + \gamma + \pi/4) + (1 + 2\gamma) \sin(\gamma + \pi/4) - \cos(\gamma + \pi/4)] \quad (80)$$

$$F_{2y} = \tau R [(4\lambda - 2\gamma - 1) \cos(2\lambda + \gamma + \pi/4) - \sin(2\lambda + \gamma + \pi/4) + (1 + 2\gamma) \cos(\gamma + \pi/4) + \sin(\gamma + \pi/4)] \quad (81)$$

$$M_2 = 2\lambda \tau R^2 \quad (82)$$

Jednadžbe na liniji klizanja OP:

$$F_{3x} = -2\tau d_1 \ln(d_1/r) \sin \psi \quad (83)$$

$$F_{3y} = -2\tau d_1 \ln(d_1/r) \cos \psi \quad (84)$$

$$M_3 = \tau \left\{ -\frac{1}{2}(d_1^2 - r^2) + \ln(d_1/r) d_1 [d_1 + 2R \cos(2\lambda + \gamma - \pi/4 + \psi)] \right\} \quad (85)$$

Jednadžbe ravnoteže:

$$F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} = \frac{P}{2} \quad (86)$$

$$F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} = 0 \quad (87)$$

$$M_1 + M_2 + M_3 = \frac{P}{2} \left[\frac{S}{2} + R \sin(\gamma + \pi/4) - d \cos(\gamma + \pi/4) \right] \quad (88)$$

gdje je P granično opterećenje, a S je razmak između oslonaca.

Iz geometrije polja kliznih linija slijedi:

$$\frac{R}{b+r} = \frac{\cos(\gamma + \pi/4) - \frac{d_1}{b+r} \sin(2\lambda - \pi/4)}{1 - \cos 2\lambda} \quad (89)$$

$$\frac{d}{b+r} = \frac{\sin(\gamma + \pi/4) - \sin(2\lambda + \gamma + \pi/4) - \frac{d_1}{b+r} [\cos(2\lambda - \pi/4) - \cos \pi/4]}{1 - \cos 2\lambda} \quad (90)$$

Nadalje iz geometrije polja:

$$\ln(d_1/r) = 2\lambda - \gamma - 1 \quad (91)$$

$$\psi = 2\lambda + \gamma - \pi/2 \quad (92)$$

$$\psi_1 = \pi/2 - 2\gamma - 1 \quad (93)$$

$$\psi_2 = 4\lambda - 1 - \pi/2 \quad (94)$$

$$\alpha_c = \pi/2 - \psi_2 \quad (95)$$

Maksimalno hidrostatsko naprezanje u točki X dano je jednadžbom:

$$\sigma_m = (1 + 2\psi_2)\tau \quad (96)$$

Kut 2λ je dan prema jednadžbi [19]:

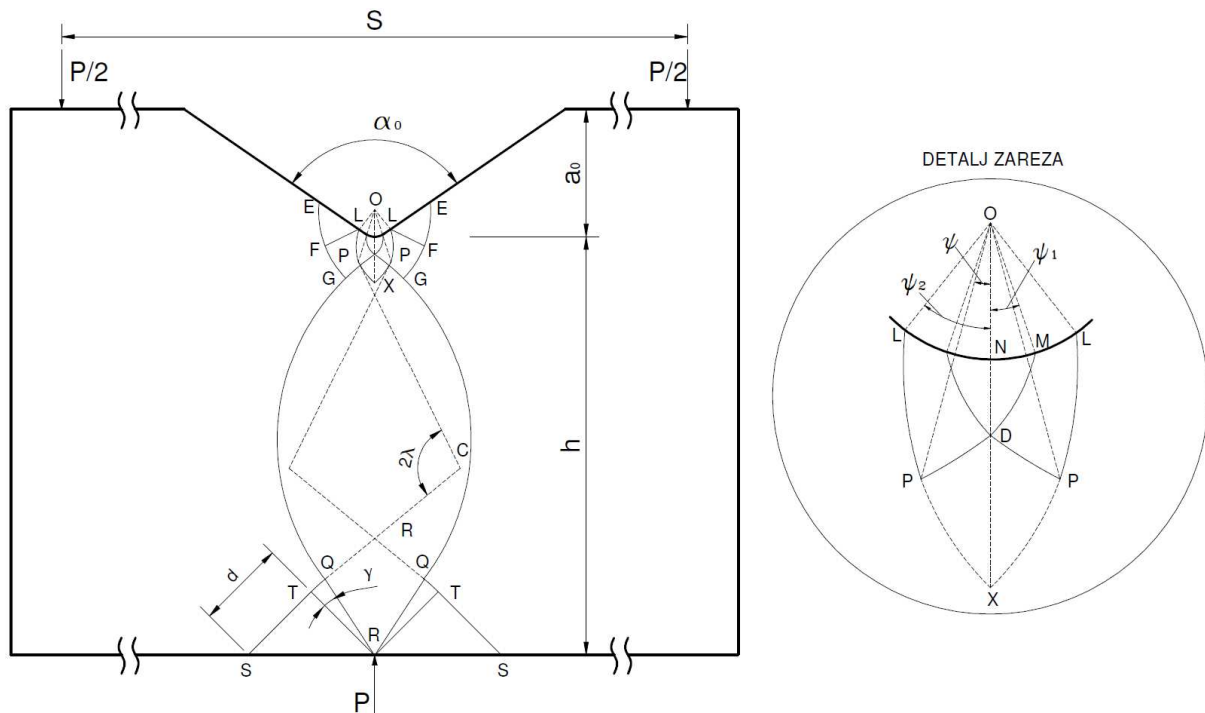
$$2\lambda = \frac{(\pi + 1 - \alpha/2)}{2} \quad (97)$$

Jednadžba za proračun kuta γ uz poznavanjem vrijednosti r_0/b i 2λ dana je sljedećom jednadžbom:

$$\begin{aligned} &1 + 2\gamma + \cos 2\gamma - \sin 2\lambda + (2\lambda - 2\gamma - 1) * \cos 2\lambda - \cos 2(\lambda + \gamma) \\ &- 2\lambda * \sin 2(\lambda + \gamma) + \frac{r}{b+r} e^{2\lambda-\gamma-1} \left[\left(\frac{2\lambda-3}{2} \right) * \sin \gamma + \left(2\lambda + \frac{1}{2} \right) \right. \\ &* \cos - \sin(2\lambda - \gamma) - (4\lambda - 1) * \sin(2\lambda + \gamma) - \frac{1}{2} \sin(4\lambda + \gamma) - \frac{1}{2} \cos(4\lambda + \gamma) \left. \right] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (98)$$

Uz poznavanje vrijednosti r_0 , b , i 2λ moguće je izračunati kut γ čime je moguće riješiti druge parametre polja linije klizanja R , d , d_1 , σ_m .

U uvjetima kada je $\alpha_0 > 2\alpha_c$ polje kliznih linija dano je na slici 40 [70].



Slika 40. Shematski prikaz polja kliznih linija pri $\alpha_0 > 2\alpha_c$ [70]

Kada je $\alpha_0 > 2\alpha_c$ polje kliznih linija se širi na bočne stranice zarezane ploče te se pojavljuje novo plastično područje LPGFE. Dužina PG je tangenta spirale MP i kružnog luka GQ . Duljina

dužine PG označena je s d_2 .

Iz geometrije polja Wu i suradnici daju sljedeće jednadžbe [70]:

$$F_{4x} = \tau d_2 [\sin(2\lambda + \gamma + \pi/4) + (4\lambda - 2\gamma - 1) \cos(2\lambda + \gamma + \pi/4)] \quad (99)$$

$$F_{4y} = \tau d_2 [\cos(2\lambda + \gamma + \pi/4) - (4\lambda - 2\gamma - 1) \sin(2\lambda + \gamma + \pi/4)] \quad (100)$$

$$M_4 = \tau d_2 \left[R + \frac{d_2}{2} (4\lambda - 2\gamma - 1) \right] \quad (101)$$

Uvrštavanjem ovih jednadžbi u jednadžbe ravnoteže (58)-(60) uz vrijednosti dužina QG, QG i OP slijedi:

$$\frac{R}{b+r} = \frac{\cos(\gamma + \pi/4) - \frac{d_1}{b+r} \sin(2\lambda - \pi/4) - \frac{d_2}{b+r} \sin 2\lambda}{1 - \cos 2\lambda} \quad (102)$$

$$\frac{d}{b+r} = \frac{d_2}{b+r}$$

$$+ \frac{\sin(\gamma + \pi/4) - \sin(2\lambda + \gamma + \pi/4) - \frac{d_1}{b+r} [\cos(2\lambda - \pi/4) - \cos \pi/4]}{1 - \cos 2\lambda} \quad (103)$$

Jednadžba (98) poprima sljedeći oblik:

$$\begin{aligned} & 1 + 2\gamma + \cos 2\gamma - \sin 2\lambda + (2\lambda - 2\gamma - 1) \cos 2\lambda - \cos 2(\lambda + \gamma) - 2\lambda \sin 2(\lambda + \gamma) \\ & + \frac{r}{b+r} e^{2\lambda-2\gamma-1} \left[\left(2\lambda - \frac{3}{2} \right) \sin \gamma + \left(\lambda + \frac{1}{2} \right) \cos \gamma - \sin(2\lambda - \gamma) \right. \\ & \quad \left. - (4\lambda - 1) \sin(2\lambda + \gamma) - \frac{1}{2} \sin(4\lambda + \gamma) - \frac{1}{2} \cos(4\lambda + \gamma) \right] \\ & - \frac{d_2}{\sqrt{2(b+r)}} [- (4\lambda - 1) \sin \gamma - (4\lambda + 1) \cos \gamma + \sin(2\lambda - \gamma) + \cos(2\lambda - \gamma) \\ & + (4\lambda + 1) \sin(2\lambda + \gamma) + (4\lambda - 1) \cos(2\lambda + \gamma) - \sin(4\lambda + \gamma) + \cos(4\lambda + \gamma)] = 0 \quad (104) \end{aligned}$$

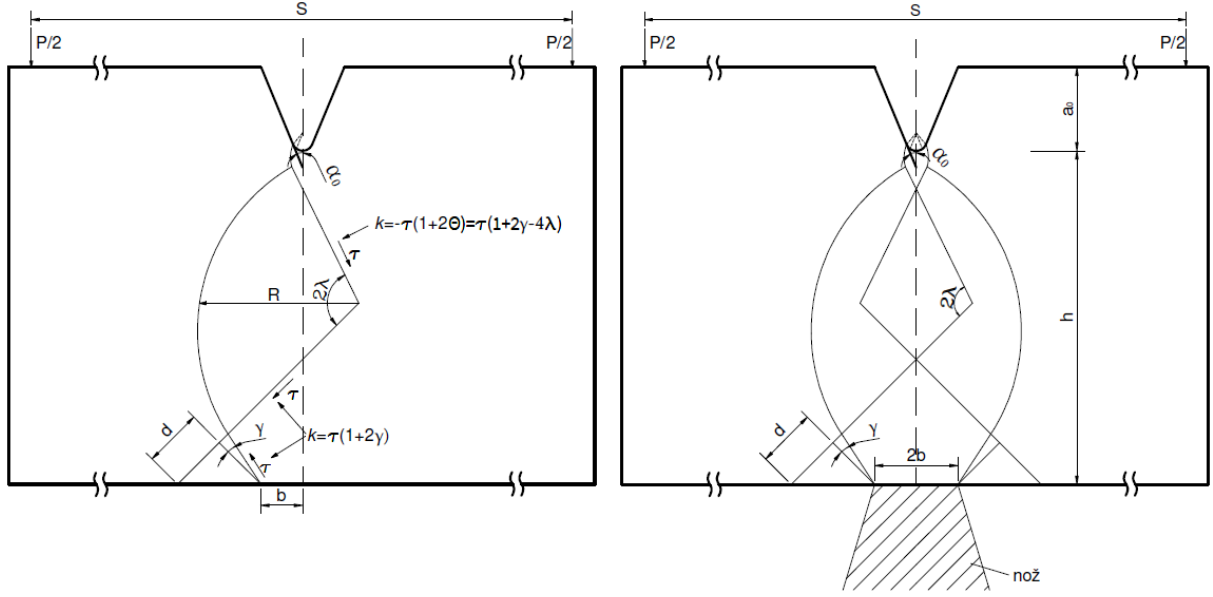
Uz poznavanje vrijednosti r_0 , b , d_2 i λ moguće je izračunati kut γ .

Istraživači navedeni u referencama [16-19] u svojim radovima nisu uključivali utjecaj noža na geometriju polja kliznih linija. Alexander i Komoly u radu [19] navode da bi za točniju analizu trebalo uvesti i utjecaj noža te predlažu da se u svrhu proračuna nož, koji ima zaobljeni vrh, zamjeni za klin s ravnom bazom. Ovaj prijedlog je u svom radu u svrhu analize polja kliznih linija koristio Ewing [20].

U svrhu procjene dinamičke čvrstoće pri razvlačenju Server W. L. naglašava važnost ograničavajućeg faktora te uz Trescin uvjet tečenja daje jednadžbe za proračun R_{gyd} . U nastavku je opisana analiza polja kliznih linija koje je dao Ewing. Treba naglasiti da je Ewing svoja istraživanja provodio pri kvazistatičkom poprečnom savojnom opterećenju.

Postoji više definicija što je to ograničavajući faktor. Ograničavajući faktor je faktor prema kojemu glavno osno naprezanje na minimalnom presjeku doseže stvarno naprezanje pri razvlačenju, odnosno on je mjera povećanja primijenjenog momenta savijanja ili vlačnog opterećenja potrebnog za stvaranje stanja općeg tečenja uzorka koji sadrži zarez u odnosu na uzorak koji ne sadrži zarez, a ima isti poprečni presjek i ispitan je pod istim uvjetima. Fizikalno, to je vrijednost glavnog hidrostatskog naprezanja koje postoji uzduž cijele strukture, uzorka koja sadrži zarez, pri općem tečenju [65-66]. Utjecaj širine noža na vrijednosti ograničavajućeg faktora je velika. Naime, ako se izostavi utjecaj širine noža na polje kliznih linija tada vrijednost ograničavajućeg faktora pada što je kut α_0 veći. Isto tako polumjer zarez utječe na ograničavajući faktor time što njegova vrijednost pada što je taj polumjer veći. Međutim, kada se u analizu polja kliznih linija uključi parametar širine noža tada vrijednost ograničavajućeg faktora raste što je kut α_0 veći. Isto tako što je polumjer zarez veći, uz parametar širine noža, to je vrijednost ograničavajućeg faktora veća. Najveća vrijednost ograničavajućeg faktora iznosi $1 + \pi/2 \approx (2,571)$, odnosno kada su suprotne stranice zarez paralelne, a polumjer korijen zarez je približno jednak nuli. Istraživači su predložili razne jednadžbe za proračun ograničavajućeg faktora za razne uzorke pod savojnim opterećenjem [16-20].

Kako je navedeno ranije u tekstu, Alexander i Komoly su predložili da se zaobljeni vrh noža teoretski zamjeni s ravnom bazom gdje je polumjer noža od 2 mm jednak vrijednosti $2b$. Pri analizi polja kliznih linija pretpostavlja se da nož ne može prodrijeti u materijal. Na slici 41 dano je polje kliznih linija koje je predložio Ewing.



Slika 41. Polje kliznih linija s idealiziranom ravnom bazom noža pri ispitivanju Charpy metodom [20]

Ewing je u radu [20] uz analizu polja kliznih linija dao šest jednadžbi pomoću kojih je moguće izračunati vrijednost ograničavajućeg faktora odnosno graničnu silu F kod Charpy uzorka:

$$B = R * (1 - \cos 2\lambda) \quad (105)$$

$$A + r_0 * e^\theta * \cos 2\lambda^* = (a + r_0) * \cos \gamma^* - b * \sin \gamma^* \quad (106)$$

$$B + r_0 * e^\theta * \sin 2\lambda^* = (a + r_0) * \sin \gamma^* + b * \cos \gamma^* \quad (107)$$

$$F_A - 2 * \theta * r_0 * e^\theta * \sin 2\lambda^* = F * \cos \gamma^* \quad (108)$$

$$F_B - 2 * \theta * r_0 * e^\theta * \cos 2\lambda^* = -F * \sin \gamma^* \quad (109)$$

$$G_D + r_0^2 * \theta * e^{2\theta} - \frac{1}{2} * r_0^2 * (e^{2\theta} - 1) = \left[l - r_0 * e^\theta * \sin(2\lambda + \gamma - \frac{1}{2} * \pi) \right] * F \quad (110)$$

gdje su $A, B, R, \lambda, \gamma, F$ nepoznanice. Ovdje θ označava kut koji je jednak $\psi_2 - \psi$. Slijedi:

$$G_D = \frac{1}{2} (A^2 + B^2) * (1 + 2\gamma) + AB - R^2 (2\lambda - \sin 2\lambda \cos 2\lambda) \quad (111)$$

$$A = d + R \sin 2\lambda \quad (112)$$

$$F_A = A + (1 + 2\gamma)B - 2R \sin 2\lambda + 2(2\lambda R \cos 2\lambda) \quad (113)$$

$$F_B = (1 + 2\gamma)A + B - 2(2\lambda R \sin 2\lambda) \quad (114)$$

Nepoznanice je moguće riješiti pomoću Henckyjevog odnosa:

$$\theta = 2\lambda - \gamma - 1 \quad (115)$$

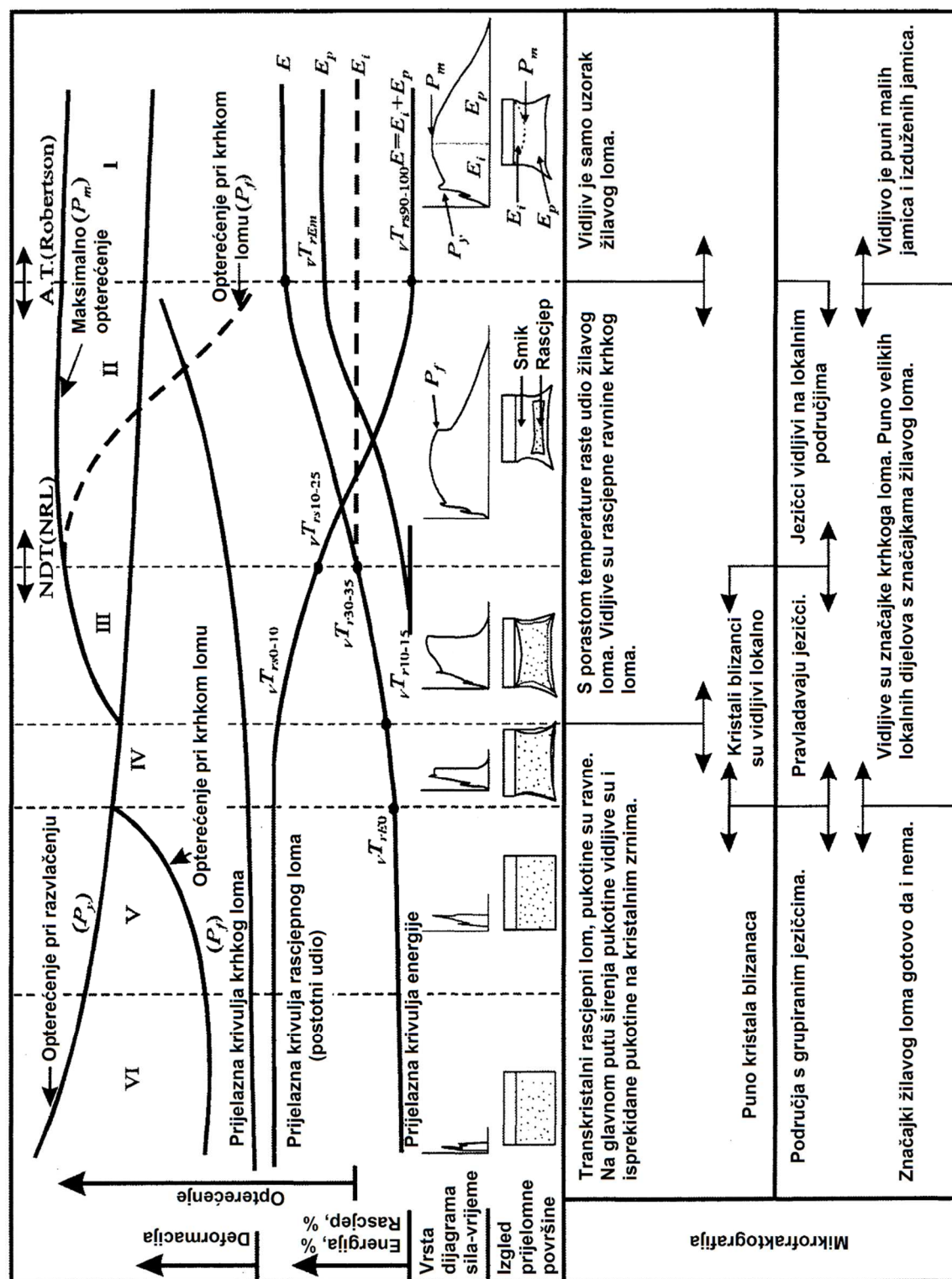
Ewingova analiza pokazala je da širina noža, b , utječe na vrijednosti ograničavajućeg faktora čija se vrijednost povećava s većom širinom noža.

4. FRAKTOGRAFIJA CHARPY UZORKA

Na izgled prijelomne površine Charpy uzorka utječe više čimbenika poput kemijskog sastava i mehaničkih svojstava čelika, temperature, mikrostrukture i oblika zareza. Kobayashi T. i suradnici su u radu [71] opisali utjecaj temperature na rezultate udarnog ispitivanja. U tu svrhu koristio se niskougljični čelik granice razvlačenja 333 N/mm^2 , odnosno vlačne čvrstoće 489 N/mm^2 . Sažetak rezultata ispitivanja dan je na slici 42, a može se povezati s karakterističnim dijagramima sila - pomak prikazanim na slici 19.

U području I vlada samo žilavi lom kojeg karakteriziraju jamice koje mogu biti male, velike ili mješavina njih, slika 43. Oblik jamica ovisi o načinu naprezanja pri čemu su jamice pravilne (nalaze se u obruču) kod jednoosnog naprezanja. Ovisno o mikrostrukтури i plastičnim svojstvima materijala, jamice mogu biti duboke i stožaste ili plitke. Kod višeosnog naprezanja jamice su izdužene i nisu kompletno u obruču. Pri jednostavnom otvaranju pukotine (kidanje) izdužene jamice orijentirane su u istom smjeru i zatvoreni krajevi pokazuju početak loma. Kod uzdužnog smicanja izdužene jamice su suprotno orijentirane s obzirom na suprotnu površinu. U stvarnosti jamice su rijetko iste veličine i orijentirane pod istim kutom na parnim površinama zbog toga što je lom rijetko čisto kidanje ili smik već je kombinacija kidanja, smicanja i poprečnog smicanja. Metalni materijali koji su izloženi značajnoj plastičnoj deformaciji i prijelomna površina se sastoji od velikih jamica te jamice često sadrže znakove deformacije na stjenci jamice. Ti znakovi deformacija pojavljuju se na površini jamica i imaju oblik kaskada koji su oštri i jasno definirani, a kasnije blagi poput valova. Ponekad se na stjenkama velikih izduženih jamica javljaju ovalne jamice.

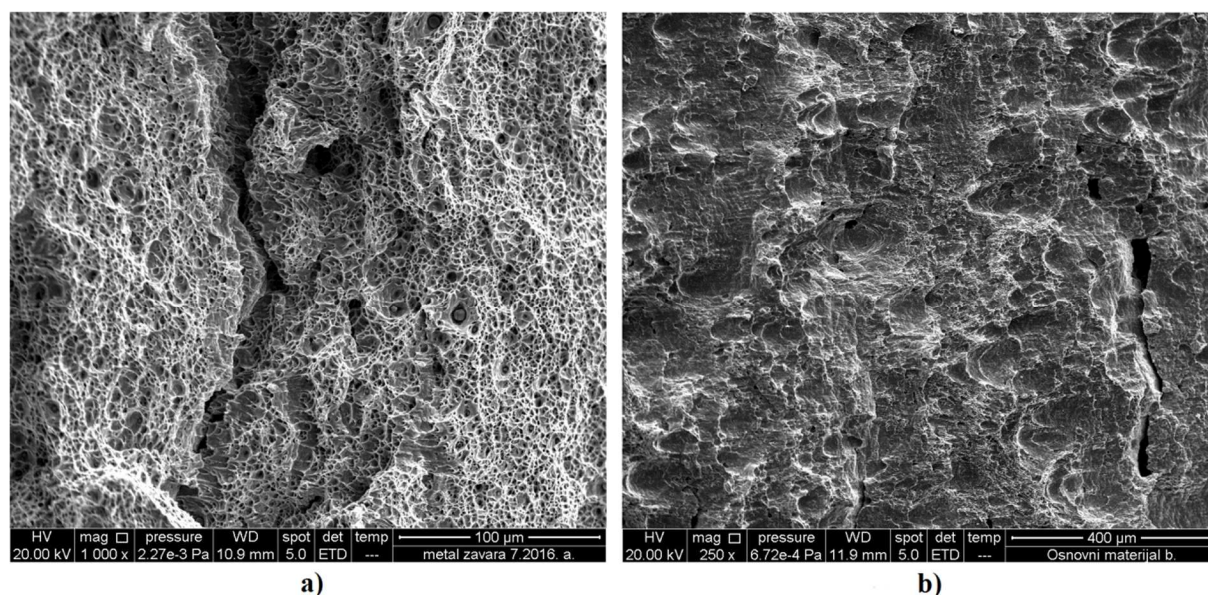
Objašnjenje oznaka iz slike 42: temperatura nulte duktilnosti (*eng. Nil Ductility Temperature, NDT*), apsorpcija energije od 15 ft-lb (${}_vT_{r15}$), bočno širenje od 15 mil (${}_vT_{r15mil}$), najviša temperatura pri 0% smičnog loma (${}_vT_{rs0}$), određivanje kraja širenja krhkog loma (*eng. crack arrest test; Robertson test*).



Slika 42. Fraktografija Charpy uzorka [71]

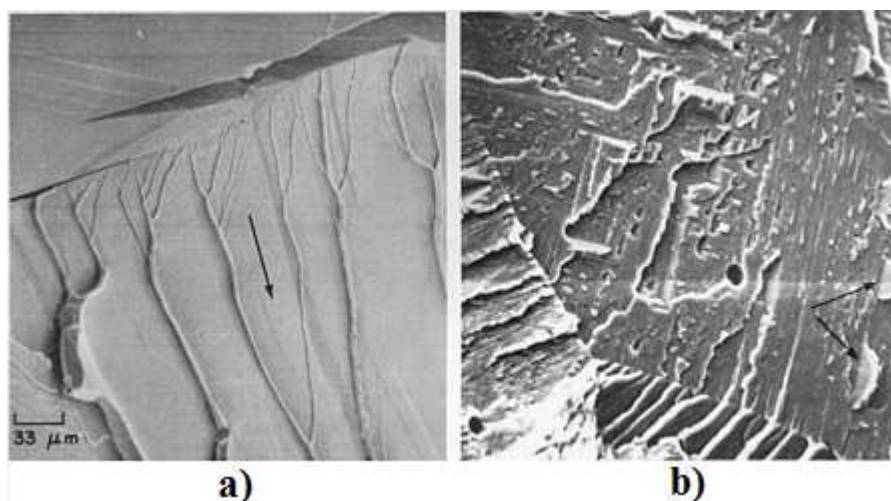
U području II lom je žilav te se širi neko vrijeme, a u jednom trenutku postaje krhak te zatim ponovno žilav. Prijelomna površina žilavog loma sadrži jamice između glatkih dijelova. Ti glatki dijelovi su zapravo velike izdužene jamice. Krhki odnosno rascjepni lom je lom niske energije. U teoriji ovaj lom treba imati savršene parne površine i treba biti skroz ravan bez dodatnih značajki.

Rascjepni lom nastaje zbog nesavršenosti poput polikristaličnosti, uključaka i granica zrna. Na prijelomnoj površini mogu se nalaziti razne značajke poput: stepeničastog rascjepa (*eng. cleavage steps*), riječnog uzorka (*eng. river pattern*), pernatog uzorka (*eng. feather markings*), riblje kosti (*eng. chevron marks*) i jezičaka (*eng. tongues*), slike 44 i 45. Prijelomna površina obiluje s puno rascjepnih ravnina (granice zrna ili subzrna), a širenjem pukotine broj ravnina se smanjuje spajanjem pri čemu se stvaraju visoke rascjepne stepenice. Kod riječnog uzorka, za lokalni smjer širenja pukotine, grane riječnog uzorka se spajaju u smjeru širenja pukotine. Širenje loma karakterizira stvaranje novih rascjepnih lomova sastavljenih od malih rascjepnih stepenica. Kako se lom širi veći broj rascjepnih ravnina se spaja što rezultira malim brojem individualnih ravnina i visokih stepenica. Pernati uzorak se na prijelomnoj površini karakterizira kao jako fine stepenice na velikim ravninama.



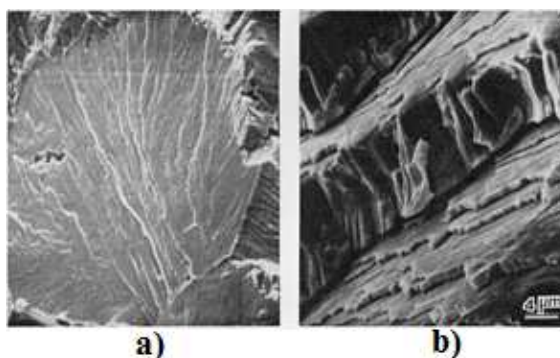
Slika 43. Jamičasti lom:

- a) uključci sulfida u većim jamicama,**
- b) izdužene velike jamice, vidljive praznine**



Slika 44. Rascjepni lom:

- a) riječni uzorak i rascjepne stepenice,
- b) jezičci na površini zavarenog spoja [72]



Slika 45. Rascjepni lom:

- a) pernat uzorak na kristalnom zrnu,
- b) rascjepne stepenice [72]

Područje III karakterizira lom koji je u početku žilav ali gotovo odmah prelazi u krhki lom. U ovom području na prijelomnim površinama nađeni su riječni uzorci s jezičcima.

U temperaturnom rasponu područja IV dolazi do loma pri granici razvlačenja. Nema značajki žilavog loma te je lom gotovo u cijelosti krhak.

Područja V i VI karakterizira gotovo potpuni krhki lom pri elastičnom opterećenju te se i širi pri elastičnom naprezanju.

5. KARAKTERIZACIJA ZAVARENOG SPOJA

5.1. Čelici povišene čvrstoće

Cilj razvoja ovih čelika je postignuće više granice razvlačenja i više vlačne čvrstoće pri čemu se prilikom konstruiranja smanjuju nosivi presjeci odnosno masa i volumen konstrukcije. U razvoju ovih čelika nastojao se zadržati povoljan omjer granice razvlačenja i vlačne čvrstoće (tzv. plastična rezerva) koji iznosi od 0,70 do 0,85 pri čemu prilikom preopterećenja prije dolazi do plastične deformacije, a ne do trenutnog loma [73].

Čelici povišene čvrstoće (eng. *high-strength low-alloy steels*; HSLA) sadrže malu količinu određenih legirnih elemenata u svrhu povećanja čvrstoće, žilavosti i bolje zavarljivosti kojoj doprinosi i nizak udio ugljika koji iznosi maksimalno oko 0,25%. Općenito se HSLA čelici isporučuju u valjanom ili normaliziranom stanju. Procesom valjanja postižu se određena mehanička svojstva, međutim toplinskom obradom (normalizacija, kaljenje, popuštanje) postižu se veće vrijednosti žilavost i čvrstoća. Za poboljšanje mehaničkih svojstava koristi se i poseban termomehanički postupak valjanja, TMCP (eng. *thermomechanically controlled processing*).

Čvrstoća se kod ovih čelika povisuje usitnjavanjem kristalnog zrna, precipitacijskim očvrnućem, očvrnuće hladnom deformacijom, očvrnuće kristalima mješancima i martenzitnom transformacijom. Najvažniji legirni elementi su niobij (Nb) i vanadij (V) čiji maksimalni maseni udio iznosi do 0,1 %. Kod limova većega poprečnog presjeka mogu se dodati još i nikal (Ni) i molibden (Mo). Za razliku od prijašnjih HSLA čelika kod kojih se dodavao dušik koji je imao štetan utjecaj na žilavost posebice u zoni utjecaja topline (ZUT), današnjim HSLA čelicima dodaje se titan (Ti) do maksimalno 0,025 % radi formiranja TiN s zaostalim dušikom čime se sprječava grubo zrno u zoni ZUTa pri čemu se poboljšava žilavosti. Također se kontrolira i maseni udio nečistoća poput sumpora i fosfora kako bi se poboljšala svojstva poput istezljivosti i žilavosti.

Granica razvlačenja tipičnih HSLA čelika iznosi maksimalno 760 N/mm², dok se kod suvremenih čelika poput X100 i X120 ta vrijednost penje do 840 N/mm² odnosno 1050 N/mm². Vlačna čvrstoća iznosi do maksimalno 830 N/mm², dok kod X100 i X120 ta vrijednost iznosi maksimalno 990 N/mm² odnosno 1145 N/mm². U usporedbi s API 5L X80,

vrijednosti čvrstoća kod čelika X100 i X120 su za oko 200 N/mm² do 350 N/mm² više.

Primjena ovih čelika je široka, od dijelova građevinskih strojeva, postolja vagona i vozila do dijelova "off shore" platformi i transporta nafte i plina.

U ovome radu korišten je čelik oznake API 5L X80. Ovaj čelik sadrži feritno-bainitnu mikrostrukturu ili žarenu bainitno-martezitnu mikrostrukturu. Osnovni kemijski sastav ovoga čelika sastoji se od niskog masenog udjela ugljika (C) i visokog udjela mangana (Mn) koji je mikrolegiran s niobijem (Nb) i titanom (Ti) ili niobijem (Nb) i vanadijem (V) uz mogući dodatak bakra (Cu), kroma (Cr), nikla (Ni), molibdena (Mo) i bora (B) [74].

Propisana mehanička svojstva i propisani kemijski sastav API 5L X80 čelika dani su u tablicama 2 i 3 [75].

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika API 5L X80

Mehanička svojstva		
$R_{t0,5}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²	A, %
555-675	625-700	Min. 18

Tablica 3. Kemijski sastav čelika API 5L X80

Kemijski element	C Maks.	Si Maks.	Mn Maks.	P Maks.	S Maks.	Mo Maks.	Ni Maks.	Nb Maks.	V Maks.	Cr Maks.	N Maks.
Maseni udio, %	0,16	0,45	1,8	0,025	0,02	0,1	0,3	0,06	0,1	0,3	0,012

5.1.1. Zavarljivost čelika povišene čvrstoće

Općenito novi HSLA čelici imaju odličnu zavarljivost ali posebnu pozornost treba obratiti na predgrijavanje i kontrolu vodika tijekom procesa zavarivanja.

Predgrijavanje ovisi o vrsti i debljini čelika, dodatnom materijalu, postupku zavarivanja i ekvivalentu ugljika (C_{ekv}). Najvažnija svrha predgrijavanja je smanjenje pojave vodikovih pukotina. Uz predgrijavanje vodikove pukotine mogu se još smanjiti i procesom zavarivanja, korištenjem elektroda s manje vlage. Kombiniranjem unosa topline pri zavarivanju i

prethodne toplinske obrade može se utjecati na izlazak vodika iz mikrostrukture ili se može dobiti mikrostruktura koja je manje osjetljiva na vodikove pukotine. Preporučeni minimalni unos topline ili predgrijavanja kod elektrolučnog zavarivanja određenog HSLA čelika treba se temeljiti na ekvivalentu ugljika prema metodi Itto-Bessyo (P_{cm}). Ta vrijednost može se jednostavno izračunati prema jednadžbi (116) [76]:

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (116)$$

gdje je P_{cm} parametar kemijskog sastava čelika. Prema normi AWS D1.1/D1.1M:2010 dan je pokazatelj podložnosti (eng. *susceptibility indeks*) prema stvaranju vodikovih pukotina u zoni utjecaja topline, jednadžba [76]:

$$Susceptibility Index = 12 * P_{cm} + \log_{10} H \quad (117)$$

gdje je H količina difundiranog vodika u mL/100g u deponiranom metalu zavora. Temperatura predgrijavanja mora biti dovoljno visoka kako bi se spriječio nastanak pukotina. Kod čelika koji sadrže nizak udio ugljika, uz visoku čvrstoću, dolazi do smanjenja vrijednost P_{cm} , stoga će biti potrebno smanjiti temperaturu predgrijavanja i prijelaznu temperaturu. Jednadžba (116) uz debljinu radnog materijala je osnova za minimalnu temperaturu predgrijavanja, T_{pmin} , koja se izračunava prema:

$$P_w = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{d_0}{600} \quad (118)$$

$$T_{pmin} = 1440 * P_w - 392 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (119)$$

gdje je P_w parametar pucanja, a d_0 debljina osnovnog materijala.

5.2. Postupci zavarivanja

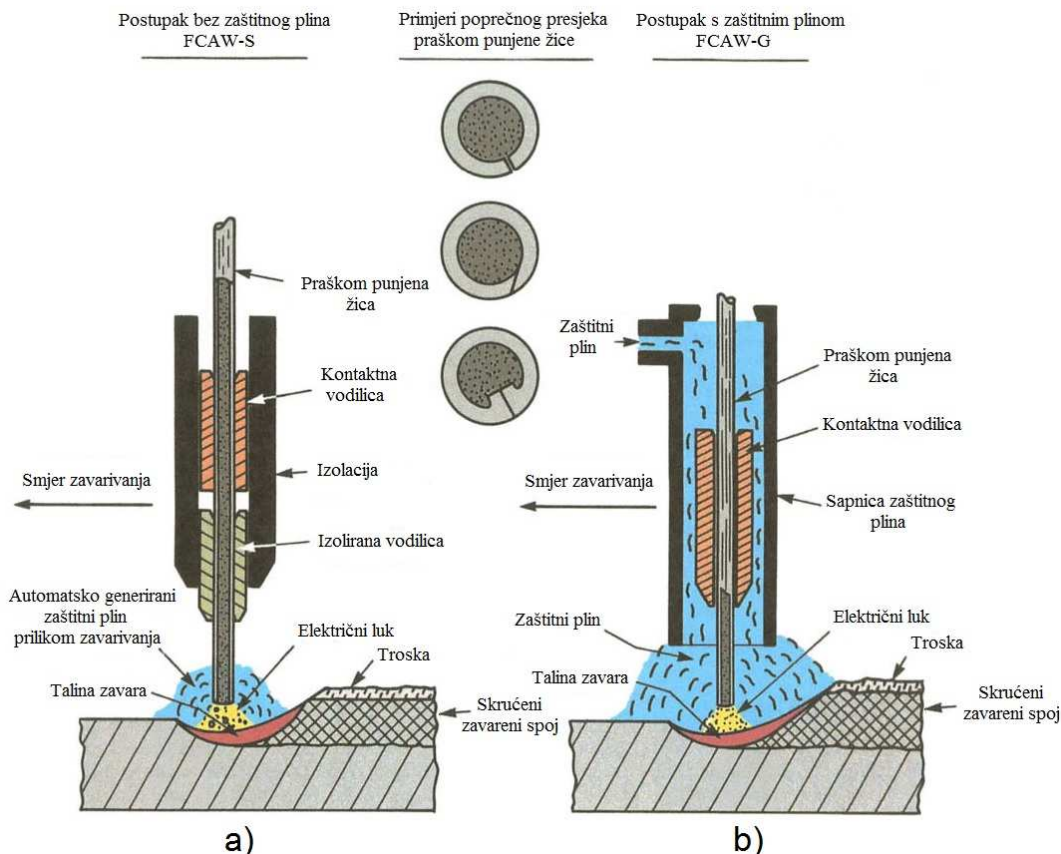
Čelici povišene čvrstoće mogu se zavarivati svim uobičajenim elektrolučnim postupcima. Najčešće se koristi ručno elektrolučno zavarivanje (REL), zavarivanje pod zaštitom inertnog plina (MIG), elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom (PPŽ) i elektrolučno zavarivanje pod troskom (EPT). Uobičajenu praksu za sprječavanje vodikovih pukotina treba primjenjivati kod svih postupaka kod kojih ekvivalent ugljika P_{cm} pokazuje podložnost ka

stvaranju pukotina. Općenito pri odabiru postupka zavarivanja HSLA čelika treba uzeti u obzir sljedeće:

- a) Zahtjevi na čvrstoću metala zavora;
- b) Ponašanje metala zavora prilikom višestrukih prolaza (efekt toplinske obrade na prethodnom prolazu);
- c) Zahtjevi na žilavost;
- d) Sklonost stvaranju pukotina u metalu zavora i zoni utjecaja topline;
- e) Otvrđivanje u zoni utjecaja topline.

5.3. Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom

Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom, PPŽ, (eng. Flux Cored Arc Welding, FCAW) je proces zavarivanja kod kojega se stvara električni luk između elektrode i taline zavora. Prostor u kojem se provodi zavarivanje zaštićen je praškom koji se nalazi unutar elektrode koja ima oblik cijevi, slika 46 [76]. Ovaj proces zavarivanja može se provoditi s ili bez dodatnog zaštitnog plina (eng. FCAW-G, FCAW-S). Zaštitni plin kod FCAW-G postupka može biti ugljični dioksid ili mješavina argona i ugljičnog dioksida koji tvore zaštitni omotač oko mjesta zavarivanja. Odabir između FCAW-S ili FCAW-G postupka ovisi o dostupnim elektrodama, vrsti opreme za zavarivanje, okolišnim uvjetima, zahtjevima na mehanička svojstva zavarenog spoja i vrsti spoja. FCAW postupak zavarivanja može biti poluautomatski ili automatski proces kod kojega se žica za zavarivanje dovodi mehaniziranim načinom do mjesta kontakta s radnim komadom.



Slika 46. FCAW postupak zavarivanja:

a) Bez zaštitnog plina (FCAW-S),

b) S dodatnim zaštitnim plinom (FCAW-G) [76]

Tijekom procesa zavarivanja električna energija luka pretvara se u toplinsku energiju pomoću koje se tale žica za zavarivanje, osnovni materijal i prašak. Rastaljeni prašak, tekuća troska, štiti električni luk i talinu zavara od vanjskog atmosferskog utjecaja.

U usporedbi s ručnim elektrolučnim zavarivanjem (REL), FCAW postupak je produktivniji što se odražava na manje sveukupne troškove po jedinici depozita dodatnog materijala. FCAW postupak daje visoko kvalitetne zavarene spojeve uz male troškove. U usporedbi s REL postupkom glavni nedostatak je visoka cijena opreme, relativno složeno postavljanje opreme i ograničenje na radnu udaljenost kalema s žicom za zavarivanje. Prilikom rada može doći do stvaranja velikih količina dimnih plinova zbog čega je u zatvorenim prostorima potrebno osigurati ventilaciju. U dodatne troškove može se navesti i uklanjanje troske za koju je u većini slučajeva potrebno minimalno vremena.

Prilikom zavarivanja HSLA čelika FCAW postupkom veliku pažnju treba obratiti na osnovni materijal i na materijal elektrode. Velike brzine hlađenja nakon zavarivanja mijenjaju mikrostrukturu ZUTa i osnovnog materijala u blizini zavarenog spoja.

5.4. Zahtjevi na postupak zavarivanja

Općenito propisi za postupke zavarivanja su potrebni radi planiranja samog postupka zavarivanja i kontrole kvalitete tijekom zavarivanja. Priprema propisa za određeni postupak zavarivanja daje potrebnu osnovu ali ne i garanciju da će zavareni spoj zadovoljiti potrebne zahtjeve. Opća pravila za specifikaciju i kvalifikaciju postupaka zavarivanja za metalne materijale dani su prema normi HRN EN ISO 15607:2004 [77]. Norma HRN EN ISO 15609-1:2008 daje specifikacije postupaka zavarivanja (*eng. Welding Procedure Specifications, WPS*) i odnosi se na elektrolučne postupke zavarivanja [78]. Zahtjevi za kvalifikaciju postupka zavarivanja dani su prema normi HRN EN ISO 15614-1:2017 [79]. Norma se odnosi na elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika te nikla i legura nikla. U normi je dana geometrija i položaj ispitnih uzoraka obzirom na vrstu ispitivanja koja se provode.

Certiifikacija postupka zavarivanja u brodogradnji vrijedi cijelo vrijeme dok se kao takav primjenjuje ili ne nastupe veće promjene u pravilima koja propisuju postupak atestacije, bez obzira na tip gradnje (brod, platforma, posude pod tlakom itd.). Atestaciju postupka u brodogradnji (*eng. Welding Procedure Qualification Record WPQR*) kontroliraju i potvrđuju tijela (Registri brodova) poput Lloyd's Register, Bureau Veritas, Det Norske Veritas, Germanischer Lloyd, American Bureau of Shipping itd. koja su angažirana od strane vlasnika gradnje.

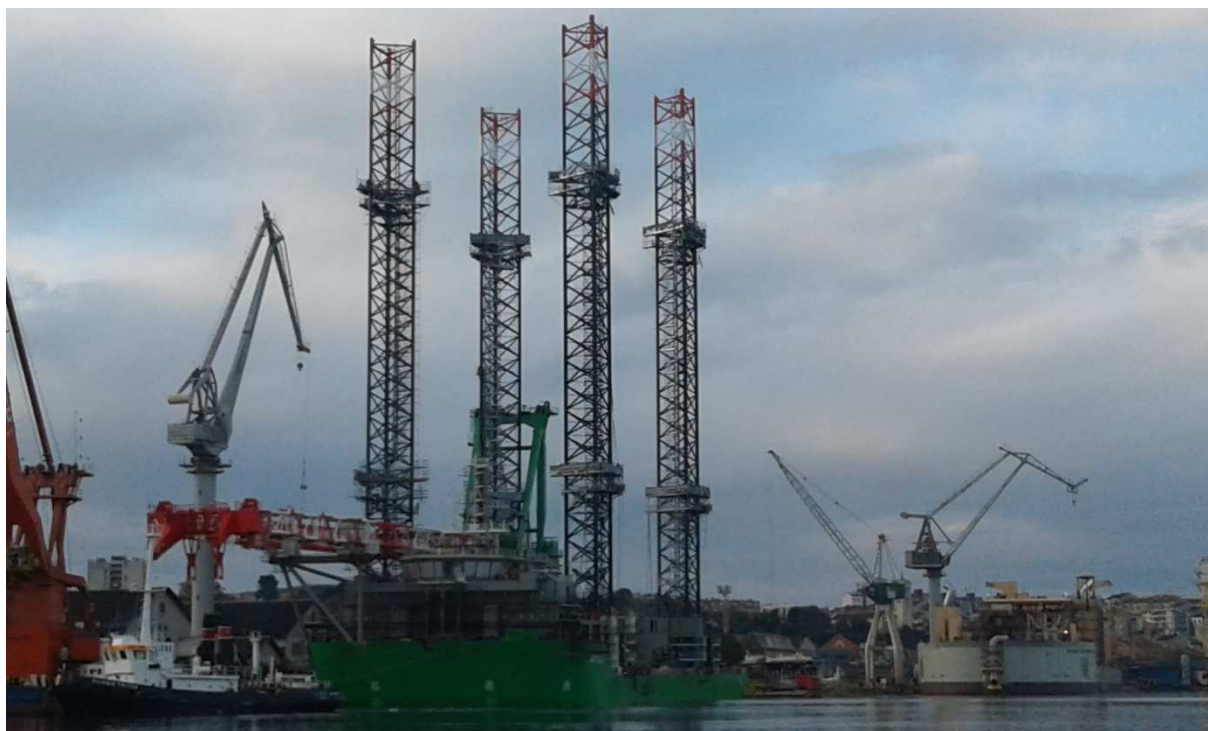
Prije pokretanja atestacije postupka brodogradilište, odnosno odjel tehnologije zavarivanja analizira pravila po kojima se treba izvesti zavarivanje, kvalitetu i debljinu osnovnog materijala te postupke koje bi primjenjivali. Analizom se utvrdi koji su postupci već pokriveni važećim atestima i koji nisu. Na osnovu toga izvrši se procjena, vodeći računa o područjima prekrivanja, kako bi se postigla maksimalna pokrivenost s minimalnim brojem potrebnih atesta. Za postupke čiji atest nedostaju naručuje se osnovni materijal, dodatni materijal za zavarivanje (žica, elektroda itd.) i izvrše se pokusna zavarivanja. Pokusnim zavarivanjima odredi se preliminarna specifikacija postupka zavarivanja (*eng. Preliminary Welding*

Procedure Specifications, PWPS). Ona služi kao polazna tehnologija za izvođenje atestacije postupka.

Proces atestacije postupka zavarivanja nadziru predstavnici registra (i ponekad naručitelja-brodovlasnika) te na kraju postupka Registar izdaje potvrdu o uspješno izvršenoj atestaciji postupka. U nekim slučajevima potvrđuje dokument izdan od strane brodogradilišta, ali taj dokument onda vrijedi samo za dotičnu zavarenu konstrukciju zbog koje se radi. Zavareni spojevi kontroliraju se nerazornim i razornim metodama ispitivanja. Potrebno je naglasiti da postoje i atesti postupaka popravka.

Navoditi koliki su ukupni troškovi atestacije za pojedinu gradnju je vrlo nepraktično zbog toga što je na jednoj gradnji moguće da svi postupci koji bi se primjenjivali već imaju pokriće u prethodnim atestacijama, a neke gradnje gdje se radi prema drugim pravilima i s drugim materijalima uopće nemaju niti jedan valjan atest postupka zavarivanja.

Ukoliko bi pokušali procijeniti troškove gradnje plovila za koji već postoje atestirani postupci, a potrebno je napraviti još dodatno i atestacije postupaka koji nedostaju tada možemo uzeti za primjer novogradnju 520 (jack-up platforma Apollo), slika 47. Za potrebe gradnje ukupno je bilo potrebno atestirati deset novih postupaka pri čemu cijena za svaki postupak iznosi nešto više od 3000 €. U slučaju da je bilo potrebno atestirati sve postupke na novogradnji, kojih je bilo šezdeset, tada troškovi atestacije rastu na preko 180.000,00 €. Ukupno vrijeme utrošeno na atestaciju je oko mjesec dana, a ukoliko je potrebno naručivati materijal tada se to vrijeme produžuje na dva do tri mjeseca.



Slika 47. Platforma Apollo

5.4.1. Zahtjevi na zavarivača

Kvaliteta zavarenog spoja ovisi o psihofizičkim sposobnostima zavarivača. Norma HRN EN ISO 9606-1:2017 opisuje proceduru provjere osposobljenosti zavarivača što ovisi o postupcima i uvjetima zavarivanja. Ova norma odnosi se na zavarivanje taljenjem te daje tehnička pravila za sustavnu kontrolu kvalifikacija zavarivača pri čemu su te kvalifikacije jedinstvene i neovisne od vrste proizvoda, lokacije i kontrolora. Prilikom kvalifikacije zavarivača naglasak je dan na njegovo rukovanje pištoljem za zavarivanje kako bi se proizveo zavareni spoj prihvatljive kvalitete [80].

Kvalifikacija zavarivača sastoji se od sljedećih ključnih varijabli:

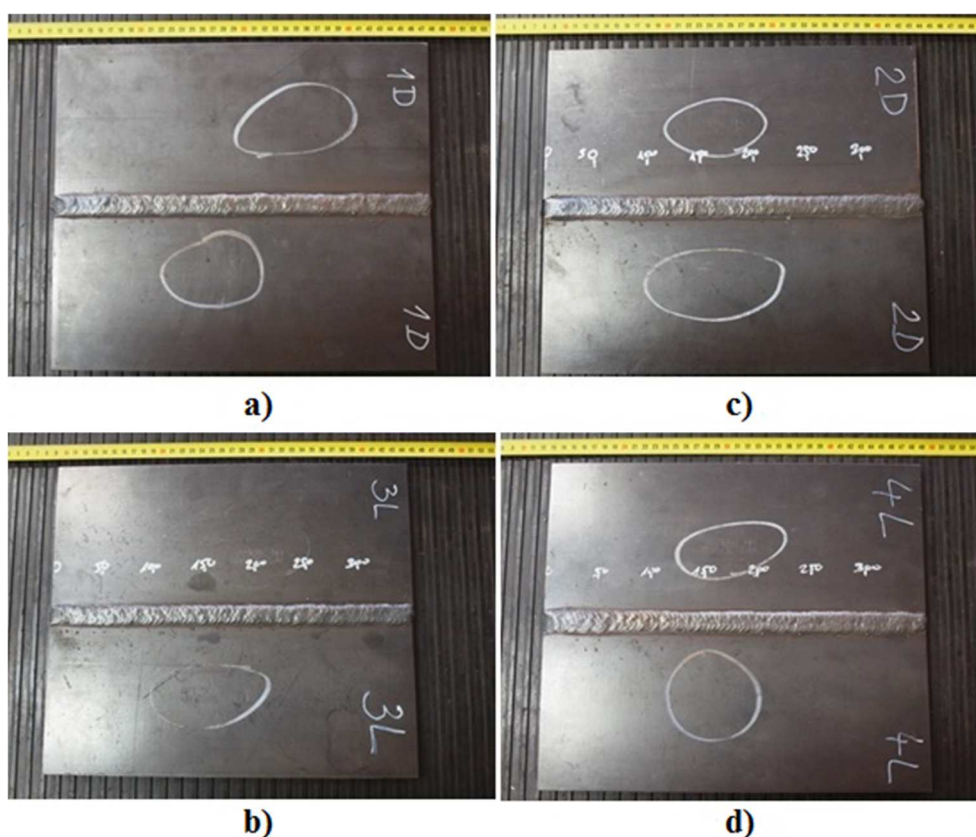
- a) Postupak zavarivanja;
- b) Tip proizvoda (lim ili cijev);
- c) Vrsta spoja zavarivanja (sučeljeni ili kutni);
- d) Grupa dodatnog materijala;
- e) Tip dodatnog materijala;
- f) Dimenzije (debljina lima ili vanjski promjer cijevi);
- g) Položaju zavarivanja;
- h) Detalji zavarivanja (podloge, dodatni plin, broj prolaza, jednostrani/dvostrani zavar itd.)

Zahtjevi na prihvatljivost grešaka u zavarenom spoju koje su nađene pomoću metoda ispitivanja danih prema normi HRN EN ISO 9606-1:2017 trebaju biti, ukoliko nije drugačije navedeno, ocijenjeni prema normi HRN EN ISO 5817:2014. Ukoliko greške prelaze maksimalne dozvoljene vrijednosti zavarivač nije prošao kvalifikacijski test te mu se pruža mogućnost ponavljanja bez prethodnog treninga [79].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela rada je analizirati povezanost mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem i rezultata dobivenih ispitivanjem instrumentiranom Charpyjevom metodom. U tu svrhu pripremljeni su zavareni spojevi čeličnih limova. Tendencija je instrumentiranom Charpy metodom dobiti podatke o kvaliteti zavarenoga spoja. Posebna pozornost dana je određivanju karakterističnih sila nakon udarnog instrumentiranog ispitivanja Charpy metodom. Ispitivanja su prvo provedena na osnovnom materijalu, a zatim na zavarenom spoju.

Zbog konstrukcije ispitnog uređaja, pri izradi ovoga rada, nije bilo moguće provesti ispitivanja pri niskim brzinama, u svrhu procjene podatljivosti ispitnog uređaja, stoga je prema radu [34] korištena metoda u kojoj je predložen novi način procjene ukupne podatljivosti, C_t , pri punoj brzini bata koja kod korištenog ispitnog uređaja iznosi 5,234 m/s. Prema planu ispitivanja korištene su četiri zavarene ploče iz kojih su se uzorkovali i ispitni uzorci osnovnog materijala, slika 48.



Slika 48. Zavarene ploče

Iz slike 48:

- a) Ploča 1D – zavareni spoj dobre kvalitete;
- c) Ploča 2D – zavareni spoj dobre kvalitete;
- b) Ploča 3L – zavareni spoj loše kvalitete;
- d) Ploča 4L – zavareni spoj loše kvalitete.

Slijed ispitivanja za osnovni materijal i zavareni spoj dan je u tablici 4.

Tablica 4. Slijed ispitivanja

Osnovni materijal	Zavareni spoj	
	Metal zavara	Zona utjecaja topline
1. Statičko vlačno ispitivanje 2. Ispitivanje tvrdoće 3. Ispitivanje udarne radnje loma 4. Ispitivanje kemijskog sastava materijala 5. Analiza mikrostrukture 6. Fraktografija		

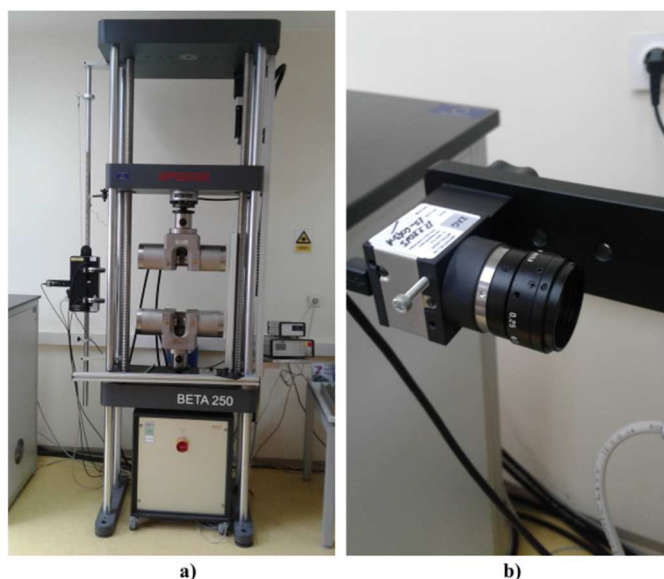
6.1. Osnovni materijal

Za potrebe ispitivanja koristili su se limovi dimenzija (širina x dužina x debljina) 300 x 360 x 10 mm izrađeni od čelika API 5L X80. Kako je navedeno u poglavlju 5.1. predmetni čelik pripada grupi čelika povišene čvrstoće s malim udjelom legiranih elemenata. Svi uzorci pripremljeni su prema uputama za pojedino ispitivanje. Svojstava osnovnog materijala ispitana su ispitivanjem mehaničkih i kemijskih svojstava te analizom mikrostrukture. Uzorkovanje je za pojedina ispitivanja provedeno u smjeru valjanja i okomito na smjer valjanja.

6.1.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje (SVI) provedeno je na kidalici proizvođača Messphysik Materials Testing GmbH, uz korištenje bezkontaktnog video ekstenzometra, slika 49 a i b. Ispitivanje vlačnih svojstava provedeno je prema normi HRN EN ISO 6892-1:2016 [81] uz pridržavanje svih sigurnosno-tehničkih uvjeta propisanih od strane proizvođača. Prije ispitivanju posebna

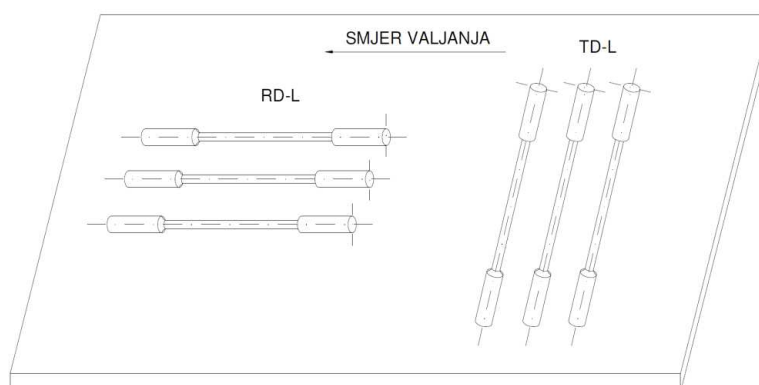
pozornost dala se je pri mjerenju dimenzija uzoraka kako bi se što manje utjecalo na rezultate ispitivanja.



Slika 49. Ispitni uređaji za statičko vlačni ispitivanje:

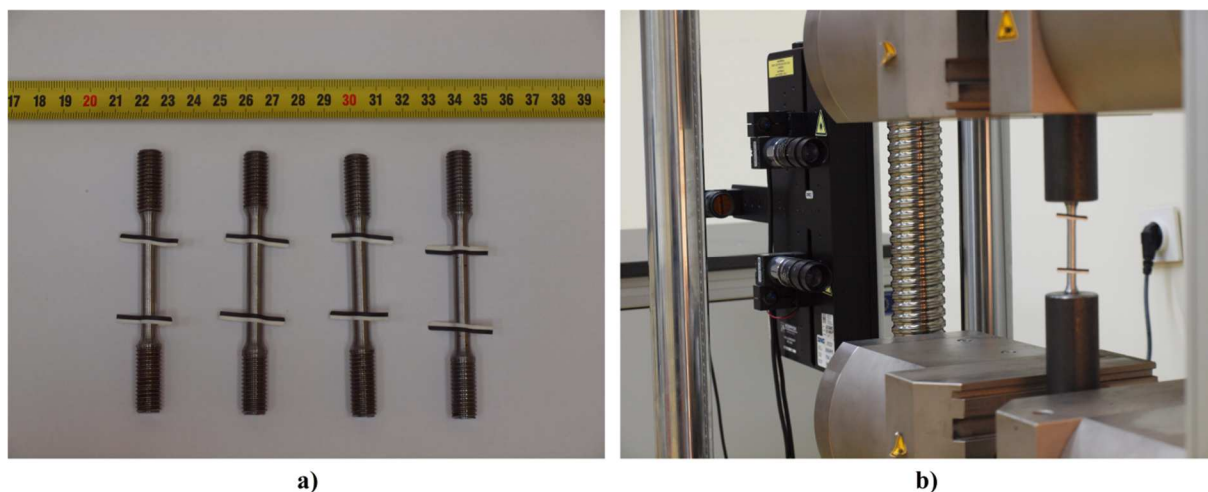
- a) kidalica model Beta 250,**
- b) video ekstenzometar, model NG**

Ispitivanja su provedena u različitom smjeru uzorkovanja. Na slici 50 dan je shematski prikaz uzorkovanja ispitnih uzoraka za statičko vlačno ispitivanje. Brzina razvlačenja uzorka tijekom cijelog vremena ispitivanja je iznosila 0,91 mm/min, sukladno normi za SVI.



Slika 50. Shema uzorkovanja ispitnih uzoraka

Na slici 51 prikazani su uzorci za statičko vlačno ispitivanje osnovnog materijala i trenutak prilikom ispitivanja. Zbog korištenja ispitnih uzoraka cilindričnog presjeka, ispitni uzorci su malih dimenzija, duljine otprilike 110 mm te je bilo potrebno korištenje pomoćnih naprava odnosno prihvata.



Slika 51. Statičko vlačno ispitivanje:

a) ispitni uzorci,

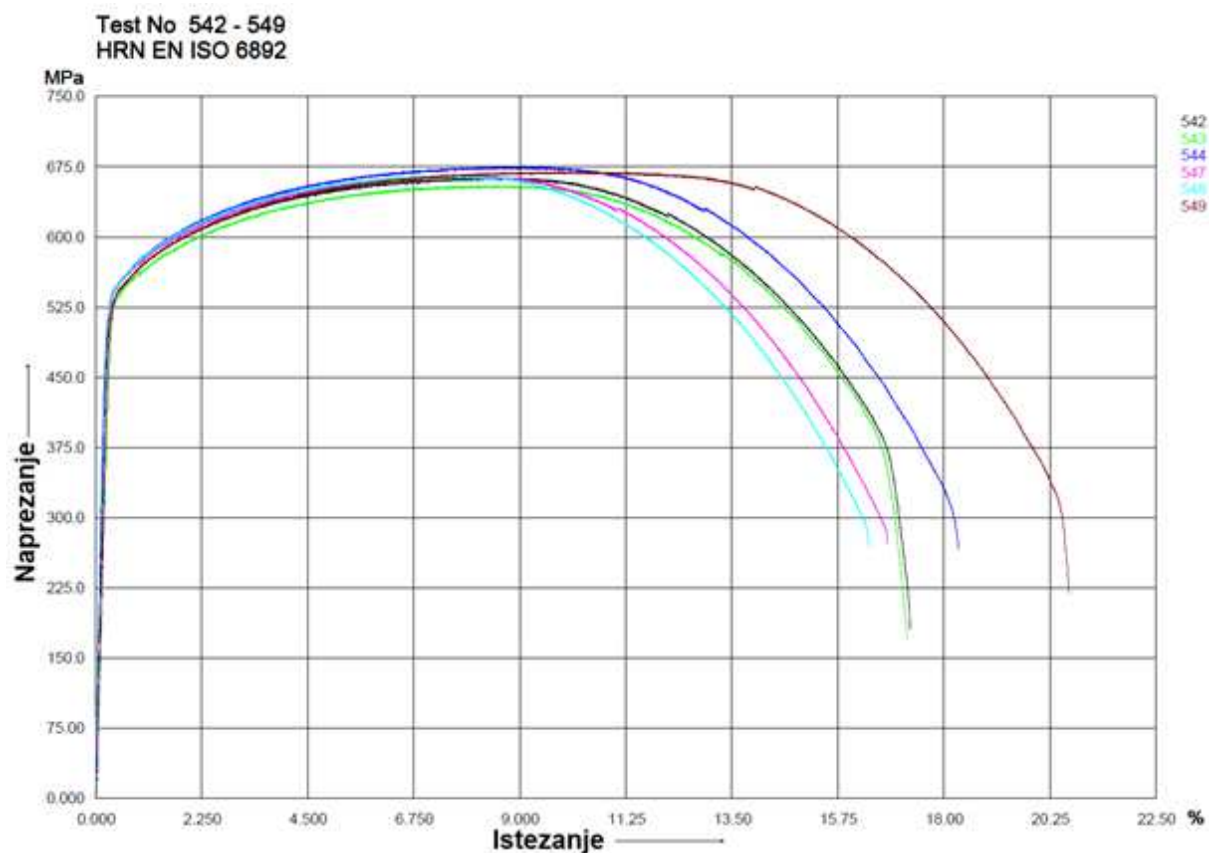
b) ispitni uzorak postavljen u čeljusti kladice

U tablici 5 dani su rezultati srednjih vrijednosti ispitivanja vlačnih svojstava osnovnog materijala. U ovome radu naglasak će biti na vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće. Sve utvrđene vrijednosti vlačnog ispitivanja osnovnog materijala dane su u prilogu I. Daljnja analiza rezultata bazirati će se na uzorke izrezane u smjeru valjanja, RD-L, iz razloga što su i uzorci zavarenoga spoja izrezani u smjeru zavarivanja.

Tablica 5. Srednje vrijednosti izmjerenih mehaničkih svojstava čelika API 5L X80

Orijentacija uzorka	Temperatura okoline ϑ , °C	d_0 , mm	L_0 , mm	$R_{p0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²	A, %
U smjeru valjanja (RD-L)	21	5,98	30,00	$540,45 \pm 5$	$665,76 \pm 6,16$	$17,77 \pm 0,26$
Okomito na smjer valjanja (TD-L)	21	5,86	30,00	$532,9 \pm 4,73$	$668,2 \pm 5,93$	$24,49 \pm 0,34$

Na slici 52 dan je dijagram naprezanje – istezanje više ispitnih uzoraka, RD-L.

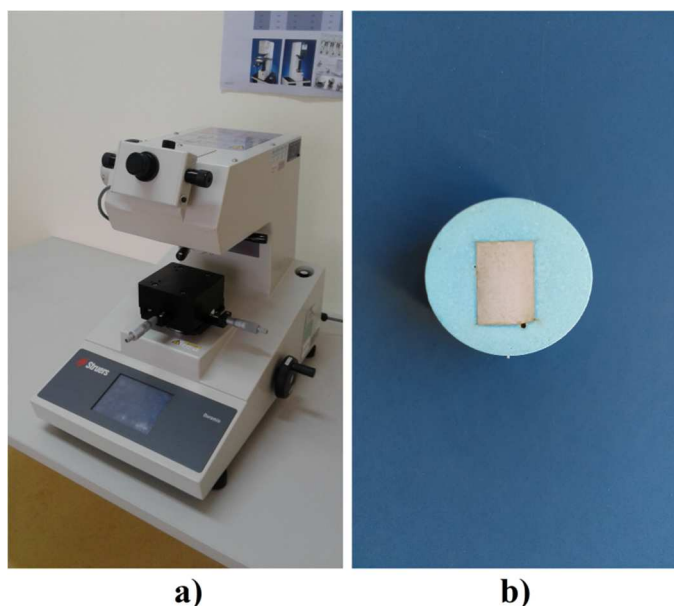


Slika 52. Dijagram naprezanje – istezanje

Rezultati ispitivanja pokazuju da su vrijednosti $R_{p0,2}$ više kod uzoraka uzetih u smjeru valjanja dok su vrijednosti R_m približno jednake, a vrijednosti istezanja A više su kod uzoraka okomitih na smjer valjanja. Rezultati ispitivanja odgovaraju vrijednostima danim u tablici 2 uz opasku da je u tablici 2 dana vrijednost za $R_{p0,5}$.

6.1.2. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće metodom Vickers prema normi HRN EN ISO 6507-1:2008 [82] provedeno je na tvrdomjeru proizvođača Struers ApS, slika 53 a. Na slici 53 b prikazan je osnovni materijal koji je izbrušen, a zatim poliran. Brušenje je provedeno pomoću SiC brusnih papira različitih gradacija uz korištenje vode, a poliranje pomoću tkanina uz korištenje dijamantnih suspenzija. Mjerenja tvrdoće su provedena po sredini poprečnog presjeka ploče. Rezultati ispitivanja tvrdoće dani su u tablici 6.



Slika 53. Ispitivanje tvrdoće:

- a) tvrdomjer model Duramin 2,**
- b) polirani osnovni materijal**

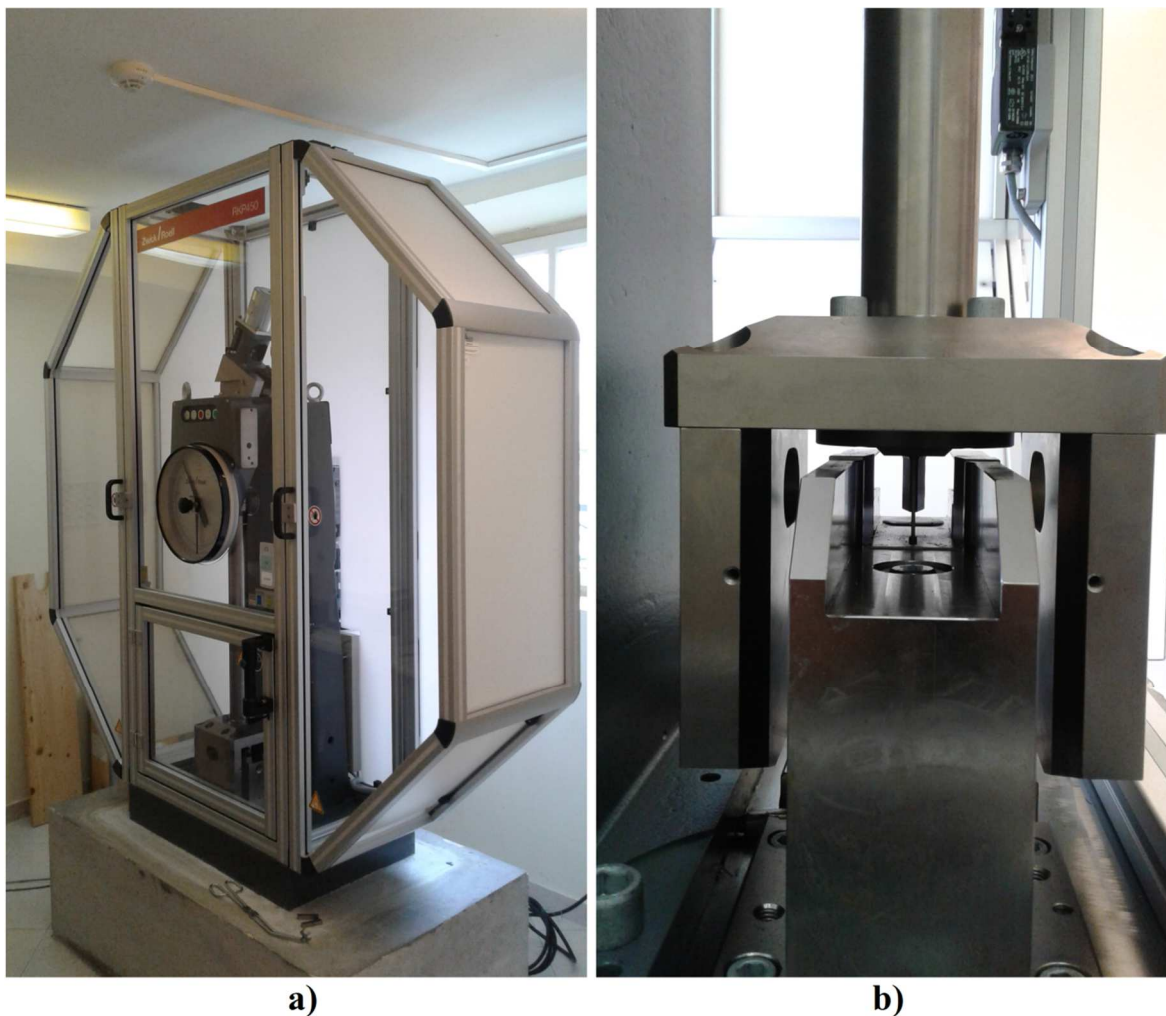
Tablica 6. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala

Broj otiska	Dijagonala otiska L_1 , μm	Dijagonala otiska L_2 , μm	HV1 (sredina poprečnog presjeka)
1	90,35	91,78	224
2	89,88	92,92	223
3	89,80	92,07	224
4	88,54	91,29	229
5	88,16	90,72	232
Srednja vrijednost $\bar{x}$	-	-	226,4
Standardna devijacija, s	-	-	3,91

U dostupnoj literaturi nisu nađeni rezultati ispitivanja tvrdoće na materijalu API 5L X80 zbog čega nije moguće usporediti izmjerene rezultate s referentnim vrijednostima. Međutim, vrijednosti izmjerenih tvrdoća odgovaraju feritno-bainitne mikrostrukturi i kemijskom sastavu čelika API 5L X80.

6.1.3. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na uređaju proizvođača Zwick/Roell GmbH prema HRN EN ISO 148-1:2016, odnosno HRN EN ISO 14556:2015, slika 54 a. Na slici 55 dan je shematski prikaz uzorkovanja ispitnih uzoraka. Uzorkovanje je provedeno u četiri različita smjera, za svaki smjer izrađena su po 3 ispitna uzorka. Rezultati ispitivanja dani su u tablici 7.

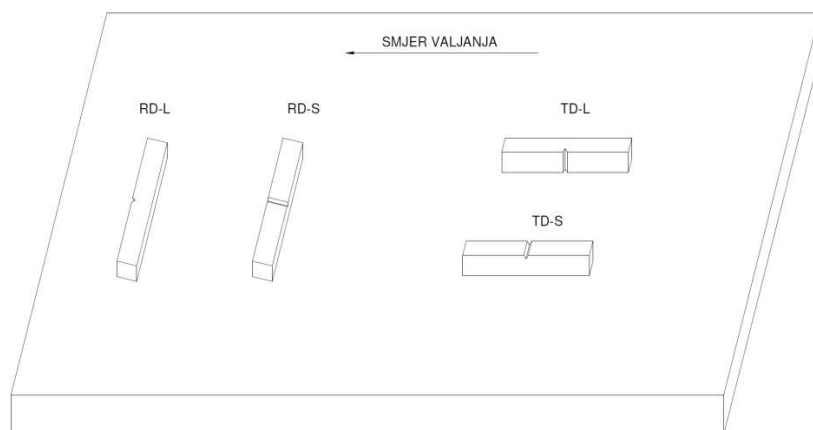


Slika 54. Ispitivanje udarnog rada loma:

a) Charpy uređaj, 450J,

b) U bat, nož, mjesto udara u ispitni uzorak

Brzina ispitivanja iznosila je 5,234 m/s. Prilikom ispitivanja korišten je instrumentirani nož polumjera 2 mm. Podatci mjerenja apsorbiranih energija očitavali su se putem softvera testXpert II.

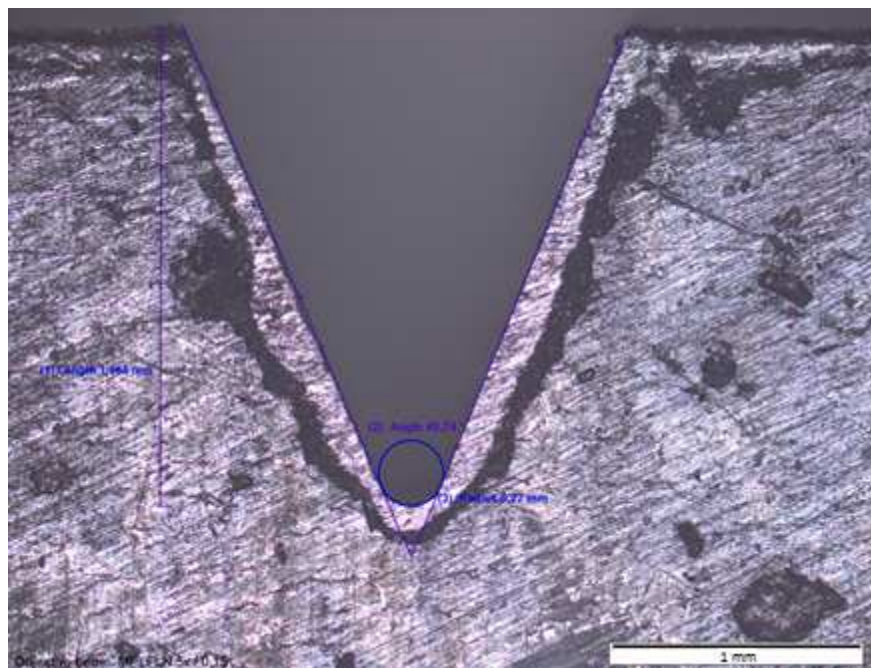


Slika 55. Shema uzorkovanja ispitnih uzoraka

Na slici 56 prikazani su uzorci za mjerenje udarne radnje loma izrađeni prema normi HRN EN ISO 148-1:2016. Uzorci sadrže V-zarez unutar dopuštenih vrijednosti prema tablici 1. te su dimenzija 10 x 10 x 55 mm, slika 57. U tablici 7 dani su rezultati ispitivanja udarnog rada loma.



Slika 56. Charpy uzorci

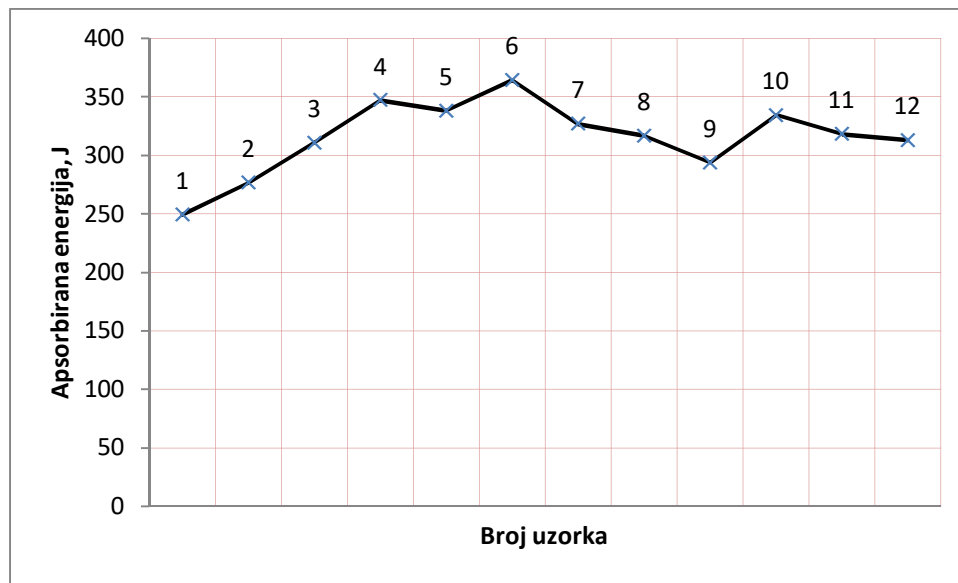


Slika 57. Zarez ispitnog uzorka

Tablica 7. Rezultati mjerenja udarnog rada loma osnovnog materijala

Broj uzorka	Orijentacija uzorka	Temperatura okoline $\vartheta, ^\circ\text{C}$	Udarni rad loma KV_2	Srednja vrijednost $\bar{x}$	Standardna devijacija, s	Tip krivulje prema HRN EN ISO 14556:2015
1	Okomito na smjer valjanja (TD-L)	21°C	249,27	278,75	30,71	F
2			276,43			F
3			310,56			F
4	Okomito na smjer valjanja (TD-S)		346,97	349,78	13,25	F
5			338,16			F
6			364,22			F
7	U smjeru valjanja (RD-L)		326,86	312,45	17,02	F
8			316,83			F
9			293,67			F
10	U smjeru valjanja (RD-S)		334,17	321,70	11,13	F
11			318,18			F
12			312,75			F

Na slici 58 dan je dijagram ispitivanja udarnog rada loma osnovnog materijala.



Slika 58. Dijagram ispitivanja udarnog rada loma

Rezultati ispitivanja pokazuju više vrijednosti žilavosti kod uzoraka čiji je zarez paralelan s površinom lima (TD-S i RD-S).

6.1.4. Kemijski sastav

Ispitivanja kemijskog sastava GDS metodom provedena su na uređaju proizvođača Leco Corporation, slika 59, te su rezultati dani u tablici 8. Ispitivanje je provedeno na pločama 1D, 2D, 3L i 4L po poprečnom presjeku lima, slika 60. Ispitivanje na ispitnim uzorcima je provedeno na površinama koje nisu naknadno brušene nakon rezanja.



Slika 59. Uređaj za ispitivanje kemijskih svojstava, model GDS 500A



Slika 60. Mjerna mjesta određivanja kemijskog sastava na API 5L X80

Tablica 8. Srednje vrijednosti izmjerenog kemijskog sastava čelika API 5L X80

	Kemijski element, maseni udio %									
Ploča	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Nb	Ti	Cr
1D	0,0502	0,334	1,90	0,0100	0,00047	0,0037	0,0085	0,0318	0,0116	0,151
2D	0,0522	0,331	1,91	0,0089	0,0007	0,0038	0,0093	0,0301	0,0111	0,151
3L	0,0528	0,329	1,92	0,0098	0,00075	0,0032	0,0085	0,0274	0,0112	0,151
4L	0,0543	0,325	1,91	0,011	0,00045	0,0038	0,01	0,0303	0,0117	0,150
$\bar{x}$	0,0523	0,329	1,91	0,0099	0,00059	0,0036	0,0090	0,0299	0,0114	0,150
s	0,0016	0,003	0,008	0,0008	0,00015	0,0002	0,0007	0,0018	0,0002	0,0005

Napomena: ostatak se odnosi na maseni udio željeza, Fe.

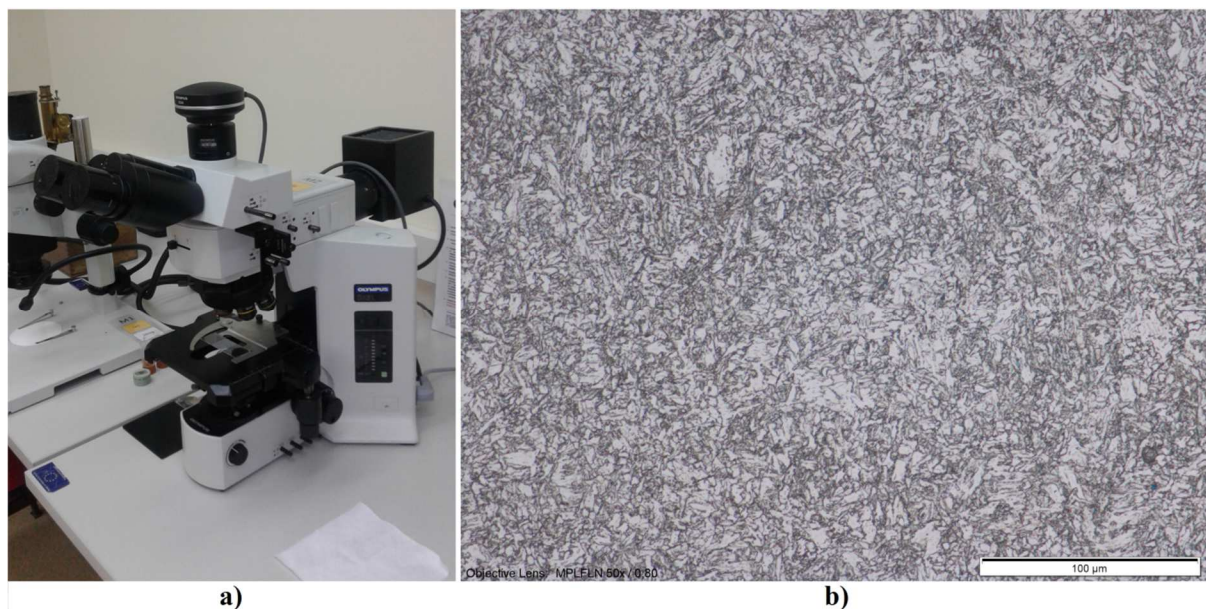
Rezultati ispitivanja kemijskog sastava odgovaraju vrijednostima danima u tablici 3.

6.1.5. Analiza mikrostrukture

U svrhu analize mikrostrukture uzorci su prethodno brušeni pomoću SiC brusnog papira s dodatkom vode, polirani pomoću tkanine s dodatkom dijamantne suspenzije i nagriženi u otopini 2 % Nitala. Uređaj za brušenje i poliranje proizvođača Struers ApS prikazan je na slici 61.

**Slika 61. Uređaj za brušenje i poliranje model LaboPol-5**

Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu proizvođača Olympus Ltd, slika 62 a. Slika 62 b prikazuje sitnozrnatu feritno-bainitnu mikrostrukturu osnovnog materijala.



Slika 62. Analiza mikrostrukture:

- a) Svjetlosni mikroskop, model BX 51,**
- b) Mikrostruktura API 5L X80 u smjeru valjanja, povećanje 500X**

6.1.6. Fraktografija osnovnog materijala

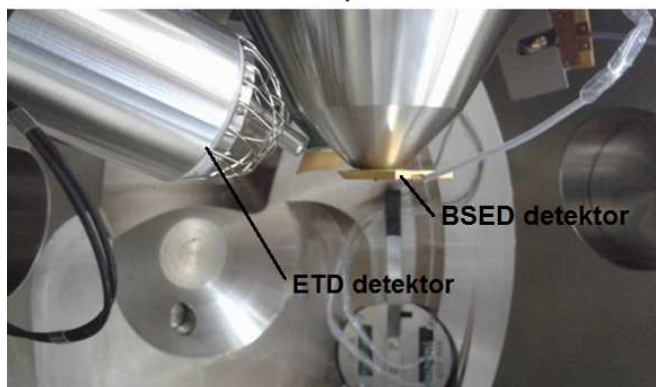
Fraktografija prijelomnih površina Charpy uzoraka osnovnog materijala je provedena pomoću optičkog stereomikroskopa, slika 63, i pretražnog elektronskog mikroskopa s emisijom polja proizvođača FEI Ltd, slika 64 a. Snimke prijelomnih površina snimljene su detektorom sekundarnih elektrona ETD (*eng. Everhart Thornley detector*), slika 64 b.



Slika 63. Optički stereomikroskop



a)



b)

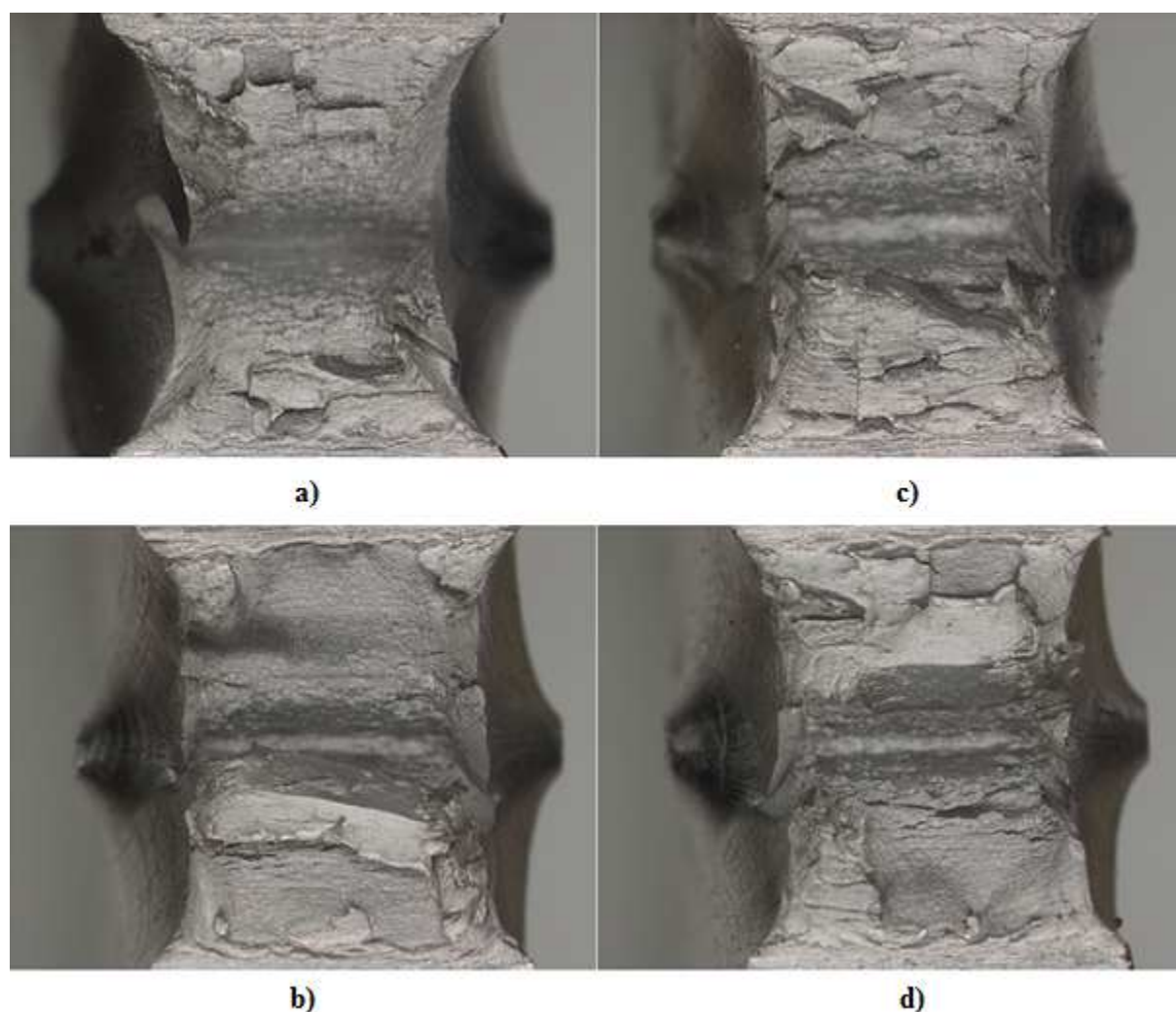
Slika 64. Pretražni elektronski mikroskop:

a) Quanta FEG 250,

b) Unutrašnjost komore, ETD i BSED detektor

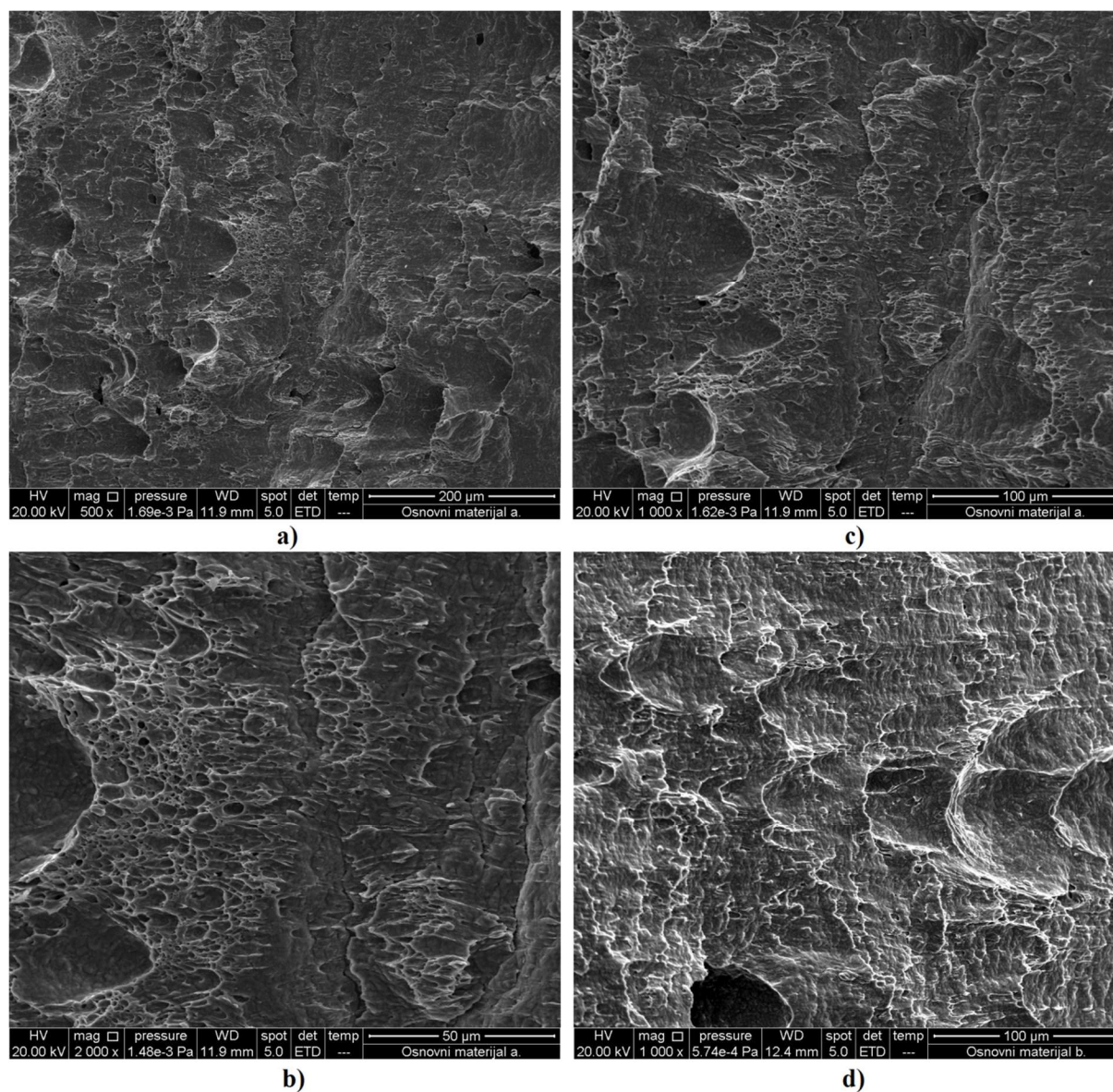
Na slici 64 b prikazan je i detektor povratnog raspršenja, BSED (*eng. Backscatter electron detector*) koji je korišten pri snimanju mikrostrukture. Razlika između snimanja ETD i BSED detektorom je ta da se ETD detektorom bolje analizira topografija površine ispitnog uzorka, dok BSED detektor služi za uočavanje promjena u kemijskom sastavu na površini ispitnog uzorka.

Na slici 65 prikazane su fotografije prijelomne površine Charpy uzoraka pri brzini od 5,234 m/s. Analizom površine vidljive su značajke brzog žilavog loma koji je grub i grebenast. Ti grebeni predstavljaju granice različitih ravnina. Fotografije su snimljene optičkim stereomikroskopom.



Slika 65. Fotografije prijelomnih površina Charpy uzorka, povećanje 10X

Na slici 66 prikazane su mikrosnimci prijelomnih površina Charpy uzoraka. Prijelomne površine snimljene su uzduž uzorka odnosno od dna zareza do suprotne površine. Površine su snimljene na raznim uvećanjima pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa.



Slika 66. Prijelomne površine Charpy uzorka

Analizom površine vidljive su jamice koje su značajke žilavog loma. Jamice su izdužene, velike i nisu kompletno u obroču što upućuje na višeosno stanje naprezanja. Između velikih jamica uočljive su male pravilne jamice koje su plitke. Kod kidanja, izdužene jamice su orijentirane u smjeru kidanja, a zatvoreni krajevi pokazuju početak loma.

6.2. Zavareni spoj

Nakon što je napravljena analiza osnovnog materijala API 5L X80, radi navedenih ciljeva i hipoteza rada izrađeni su ispitni uzorci iz zavarenog spoja čeličnih limova osnovnog materijala. Limovi su zavareni FCAW-G postupkom. Na zavarenom spoju su, kao i na osnovnom materijalu, napravljena i kemijska i mehanička ispitivanja te analiza mikrostrukture i prijelomnih površina.

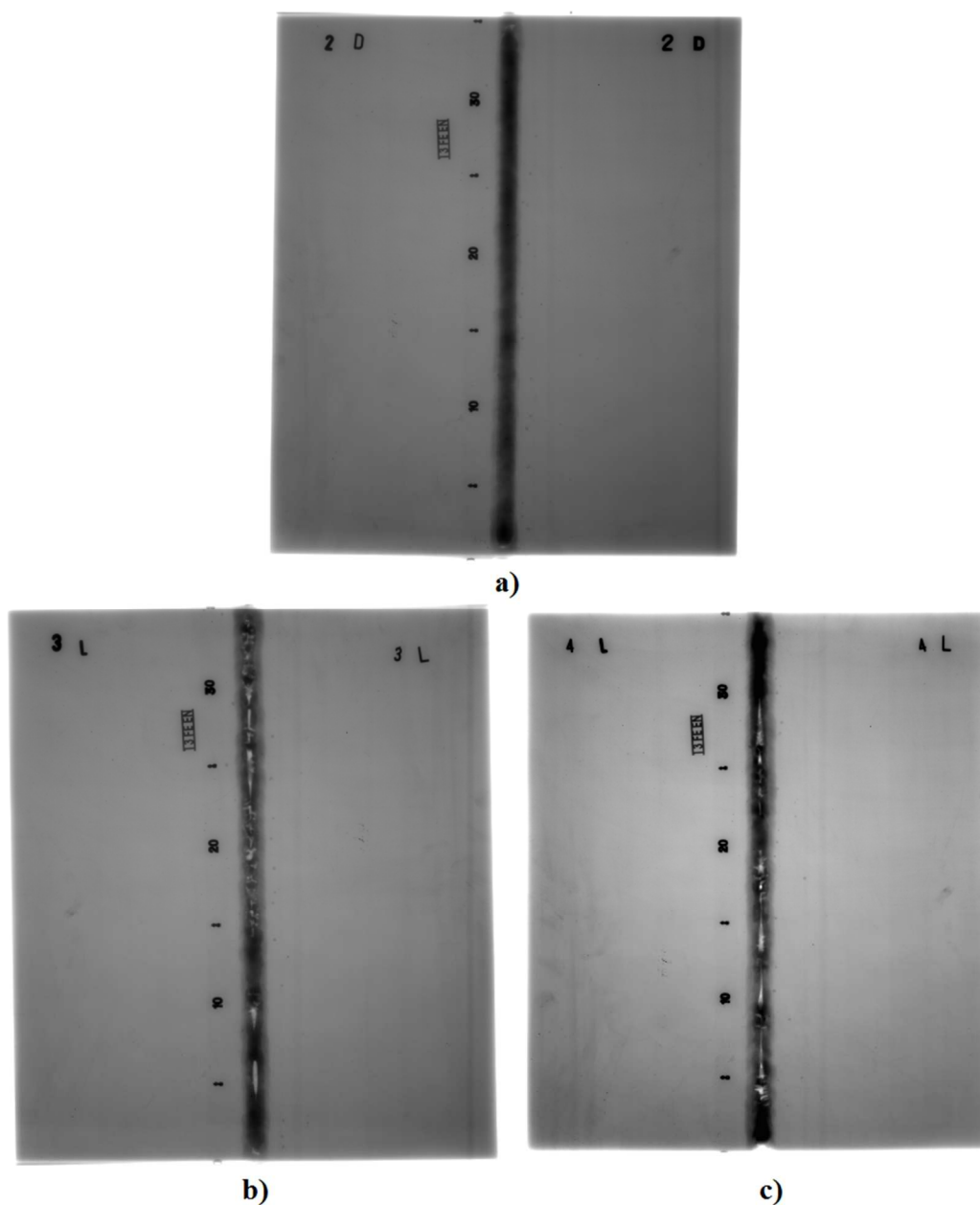
Ploče 1D i 2D, slika 48, zavarene su na ispravan način te ne sadrže nepravilnosti. Iz tih ploča izrađeni su uzorci za statičko vlačno ispitivanje i za ispitivanje udarnog rada loma. Uzorci su izrađeni iz zone utjecaja topline (ZUT) i metala zavara (MZ). Parametri zavarivanja koji su se koristili za ploče čiji zavareni spoj ne sadrži nepravilnosti dani su u tablici 9.

Tablica 9. Parametri zavarivanja

Dodatni materijal: Stein megafil 550R-praškom punjena žica (T 55 6 Mn 1 Ni P M 1 H5 prema ISO 17632)
Promjer dodatnog materijala: 1,2mm
Priprema : V- spoj 60°, razmak u korijenu 5mm, keramička podloška
Broj prolaza: tri (korijen, popuna, završni)
Struja zavarivanja: 220-230 A
Napon zavarivanja: 24-25 V
Brzina žice: 9 m/min
Zaštitni plin: 82%Ar/18%CO ₂ (M21 prema HRN EN ISO 14175)
Protok zaštitnog plina: 15 l/min
Brzina zavarivanja: 20-25 cm/min
Unos topline: 10,2-13,8 kJ/cm

Na pločama označenim oznakama 3L i 4L, slika 48, unutar zavarenog spoja namjerno su unesene nepravilnosti koje predstavljaju moguće pukotine unutar zavarenog spoja. Razlog namjernog unošenja nepravilnosti je analiza ponašanja takvih uzoraka, odnosno materijala, u uvjetima udarnog opterećenja. Iz ovih ploča izrađeni su samo uzorci za ispitivanje udarnog rada loma. Uzorci za statičko vlačno ispitivanje nisu izrađeni iz razloga što zbog postojećih nepravilnosti (šupljine) nije bila moguća strojna obrada.

Uzorci za ispitivanje udarnog rada loma uzeti su iz zone utjecaja topline i metala zavora. Na slici 67 prikazani su radiogrami ploča 2D, 3L i 4L. Ploča 2D ne sadrži nepravilnosti u zavarenom spoju dok ploče 3L i 4L sadrži nepravilnosti u zavarenom spoju (svijetla mjesta po sredini zavarenog spoja).

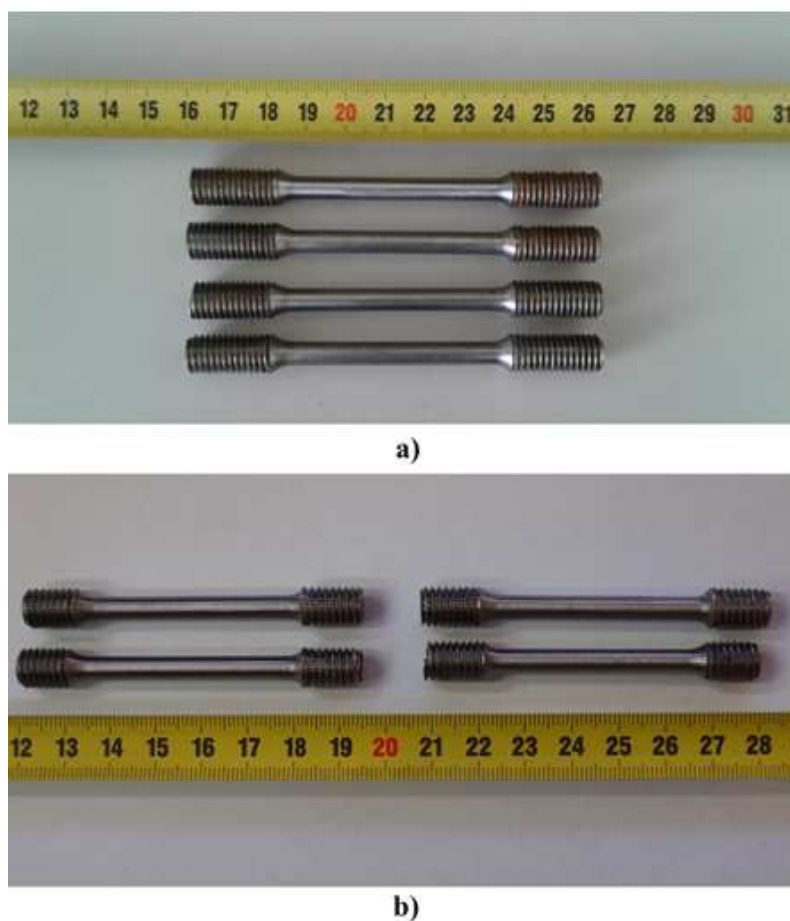


Slika 67. Radiogram ploča:

- a) 2D,
- b) 3L,
- c) 4L

6.2.1. Statičko vlačno ispitivanje

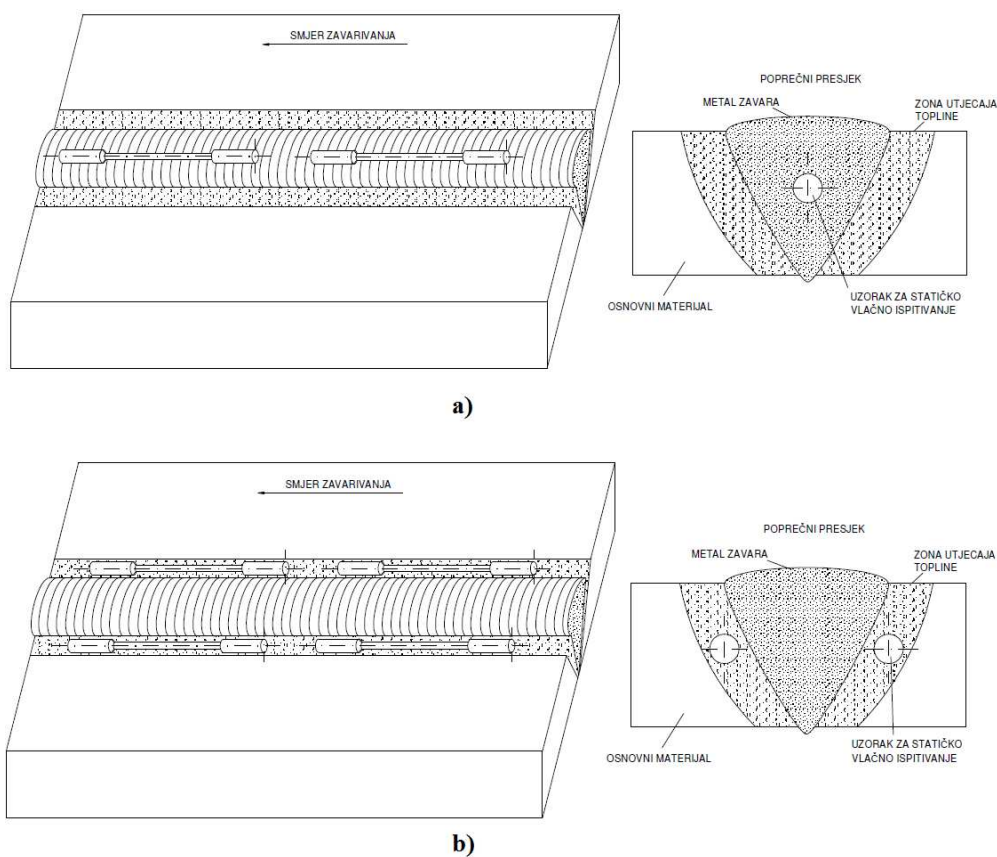
Uzorci za statičko vlačno ispitivanje zavarenog spoja izrađeni su iz ploče 1D. Uzorci su izrađeni iz zone utjecaja topline i metala zavara uzduž zavarenog spoja. Ispitivanje je provedeno na uređaju i prema normama opisanim u poglavlju 6.1.1. ovog rada. Brzina razvlačenja uzorka tijekom cijelog vremena ispitivanja je iznosila 0,91 mm/min. Na slici 68 prikazan je dio uzoraka izrađenih iz zavarenog spoja ploča 1D i 2D, ukupno je izrađeno po 6 uzoraka iz zone utjecaja topline i metala zavara. Prilikom izrezivanja ispitnih uzoraka iz zone utjecaja topline, udio zahvaćene površine iznosi oko $80 \% \pm 3 \%$ što je izmjereno pomoću softverskog paketa ImageJ.



Slika 68. Ispitni uzorci:

- a) Uzorci izrađeni iz ZUT,
- b) Uzorci izrađeni iz MZ

Na slici 69 dan je shematski prikaz uzorkovanja ispitnih uzoraka za statičko vlačno ispitivanje.

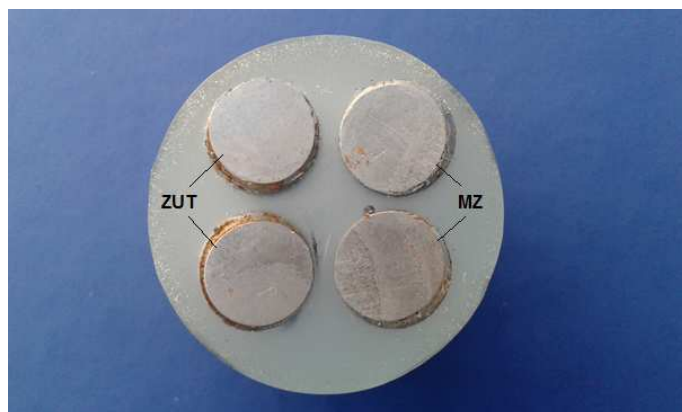


Slika 69. Shematski prikaz uzorkovanja:

a) Metal zavora,

b) Zona utjecaja topline

Na slici 70 prikazani su poprečni presjeci ispitnih uzoraka za vlačno ispitivanje prije ispitivanja, nagriženo u 2% Nitalu.



Slika 70. Poprečni presjeci ispitnih uzoraka

U tablicama 10 i 11 dani su rezultati ispitivanja vlačnih svojstava metala zavara i zone utjecaja topline.

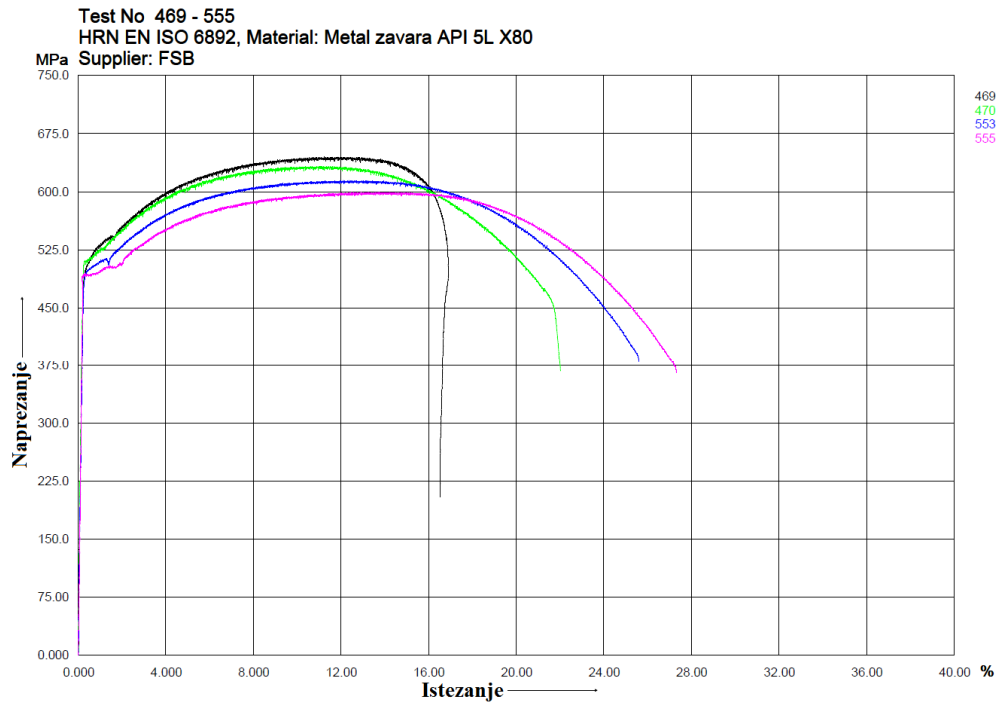
Tablica 10. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava MZ

Broj uzorka	Temperatura okoline ϑ , °C	d_0 , mm	L_0 , mm	$R_{p0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²	A, %
1	21	5,96	30,00	503,8	644,9	-
2	21	5,98	30,00	509,9	632,9	-
3	21	6,03	30,00	497,3	614,5	25,44
4	21	6,01	30,00	491,8	599,2	27,18
5	21	6,14	30,00	446,4	618,4	-
6	21	6,24	30,00	477,6	574,8	-
Srednja vrijednost $\bar{x}$	-	6,06	-	487,8 ± 4,63	614,11 ± 5,83	-
Standardna devijacija, s	-	0,11	-	23,10	24,84	-

Tablica 11. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava ZUT

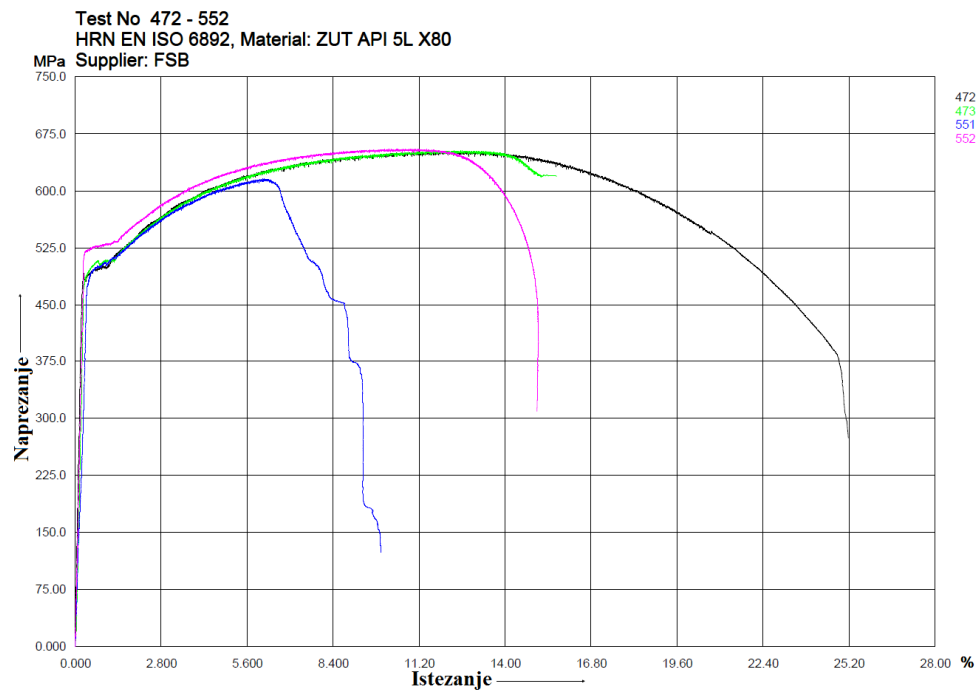
Broj uzorka	Temperatura okoline ϑ , °C	d_0 , mm	L_0 , mm	$R_{p0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²	A, %
1	21	5,88	30,00	488,9	651,6	25,04
2	21	5,96	30,00	493,4	652,9	-
3	21	5,89	30,00	493,0	-	-
4	21	5,99	30,00	522,3	654,9	-
5	21	6,12	30,00	493,0	612,9	-
6	21	6,25	30,0	523,8	616,7	-
Srednja vrijednost $\bar{x}$	-	6,01	-	502,4 ± 4,69	628,2 ± 5,87	-
Standardna devijacija, s	-	0,14	-	16,08	22,64	-

Na slici 71 dan je dijagram naprezanje – istezanje više uzoraka metala zavora.



Slika 71. Dijagram naprezanje – istezanje MZ

Na slici 72 dan je dijagram naprezanje – istezanje više uzoraka zone utjecaja topline.



Slika 72. Dijagram naprezanje – istezanje ZUT

Iz dijagrama, slike 71 i 72, je vidljivo da kod nekih uzoraka došlo do prekida rada videoekstenzometra te su zbog toga u tablicama 10 i 11 za potrebe statističke obrade izostavljeni pojedini rezultati.

Rezultati ispitivanja pokazuju da su vrijednosti $R_{p0,2}$ i R_m više u zoni utjecaja topline. Vrijednosti istezljivosti nije moguće kvalitetno usporediti zbog manjka rezultata. Usporedbom vrijednosti $R_{p0,2}$ i R_m zavarenog spoja, ZUT i MZ, s vrijednostima osnovnog materijala vidimo da su one niže kod zavarenog spoja.

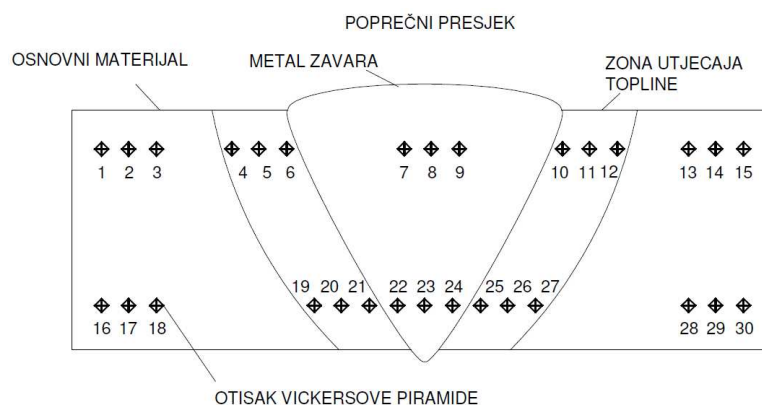
6.2.2. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je prema normi HRN EN ISO 6507-1:2016 odnosno HRN EN ISO 9015-1:2012 [83]. Tvrdoća je ispitana Vickersovom metodom HV10 Na slici 73 prikazan je uzorak zavarenog spoja koji je izbrušen, a zatim poliran i nagrižen u 2 % otopini Nitala.



Slika 73. Izbrusak zavarenog spoja pripremljen za mjerenje tvrdoće

Mjesta otisaka prikazana su na slici 74. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tvrdoće zavarenog spoja ploče 2D dani su u tablicama 12 i 13. Sve utvrđene vrijednosti tvrdoće zavarenoga spoja dane su u prilogu II. Otisci su napravljeni na udaljenosti od 1 mm od površine lima i pri mjerenju lica zavora i pri mjerenju korijena zavora.



Slika 74. Shematski prikaz ispitivanja tvrdoće

Tablica 12. Srednje vrijednosti tvrdoće, lice zavora

Položaj otisaka	Srednja vrijednost, $\overline{HV10}$	Standardna devijacija, s
Osnovni materijal	214,5	7,56
Zona utjecaja topline	206,5	11,57
Metal zavora	208,5	2,89
Zona utjecaja topline	201,1	12,31
Osnovni materijal	203,2	3,94

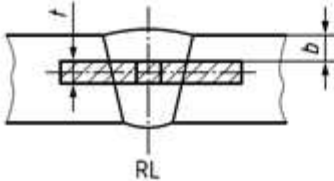
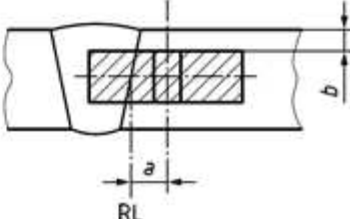
Tablica 13. Srednje vrijednosti tvrdoća, korijen zavora

Položaj otisaka	Srednja vrijednost, $\overline{HV10}$	Standardna devijacija, s
Osnovni materijal	191,1	1,67
Zona utjecaja topline	184,8	11,91
Metal zavora	189,4	1,8
Zona utjecaja topline	189,1	16,74
Osnovni materijal	195,4	0,43

Rezultati ispitivanja pokazuju da su vrijednosti tvrdoća u korijenu zavora niže u odnosu na lice zavora. Razlika vrijednosti tvrdoća između metala zavora i zone utjecaja topline je približno jednaka.

6.2.3. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na uređaju i prema normama opisanim u poglavlju 6.1.3. ovog rada. Na slici 75 dan je shematski prikaz uzorkovanja ispitnih uzoraka prema normi HRN EN ISO 9016:2013 [84]. Uzorci iz zavarenog spoja ploča 2D, 3L i 4L uzeti su iz sredine metala zavara i iz sredine zone utjecaja topline.

Oznaka	Metal zavara		Odmak od granice taljenja, ZUT
	Shematski prikaz		Shematski prikaz
VWT 0/0		VHT 1/0	

Slika 75. Shematski prikaz uzorkovanja zavarenog spoja [81]

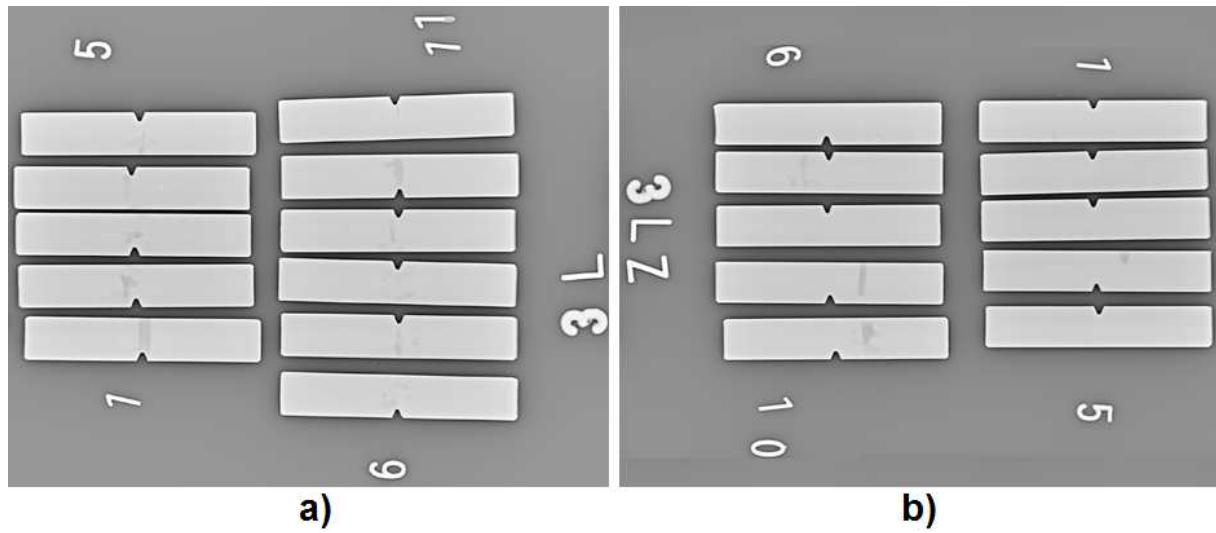
Opis oznaka iz slike 75: V- odnosi se na V-zarez; W-odnosi se na zarez u metalu zavara; H- odnosi se na zarez u zoni utjecaja topline; T-odnosi se na zarez koji je okomit na površinu lima; RL-referentna linija; 0/*b*- veličina *b* odnosi se na udaljenost ispitnog uzorka od površine, a 0 znači da se zarez nalazi u sredini referentne linije; *a/b*-veličina *a* odnosi se na odmak od referentne linije. Kod uzoraka iz zone utjecaja topline, zarez je napravljen po sredini zone.

U tablici 14 prikazani su uzorci metala zavara i zone utjecaja topline izrađeni iz ploča 2D, 3L i 4L.

Tablica 14. Slike uzoraka zavarenoga spoja

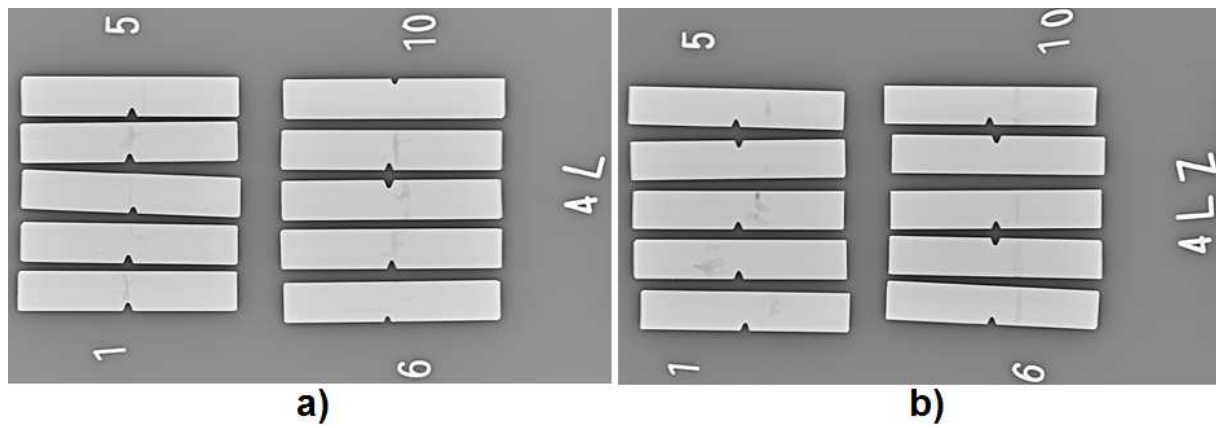
Ploča 2D	Metal zavara	
	Zona utjecaja topline	
Ploča 3L	Metal zavara	
	Zona utjecaja topline	
Ploča 4L	Metal zavara	
	Zona utjecaja topline	

Na slikama 76 i 77 prikazani su radiogrami ispitnih uzoraka izrađenih iz ploča 3L i 4L gdje su vidljive namjerno napravljene nepravilnosti u zavarenom spoju. Nepravilnosti su klasificirane prema normama HRN EN ISO 6520-1:2008 [85] i HRN EN ISO 5817:2014 [86]. Općenito su nađeni dijelovi velike linearne poroznosti (oznaka nepravilnosti: 2014) iznad 4 mm u promjeru i izduženih šupljina (oznaka nepravilnosti: 2015; 2016) duljih od 4 mm.



Slika 76. Radiogram uzoraka, ploča 3L:

- a) Metal zavora,
- b) Zona utjecaja topline



Slika 77. Radiogram uzoraka, ploča 4L:

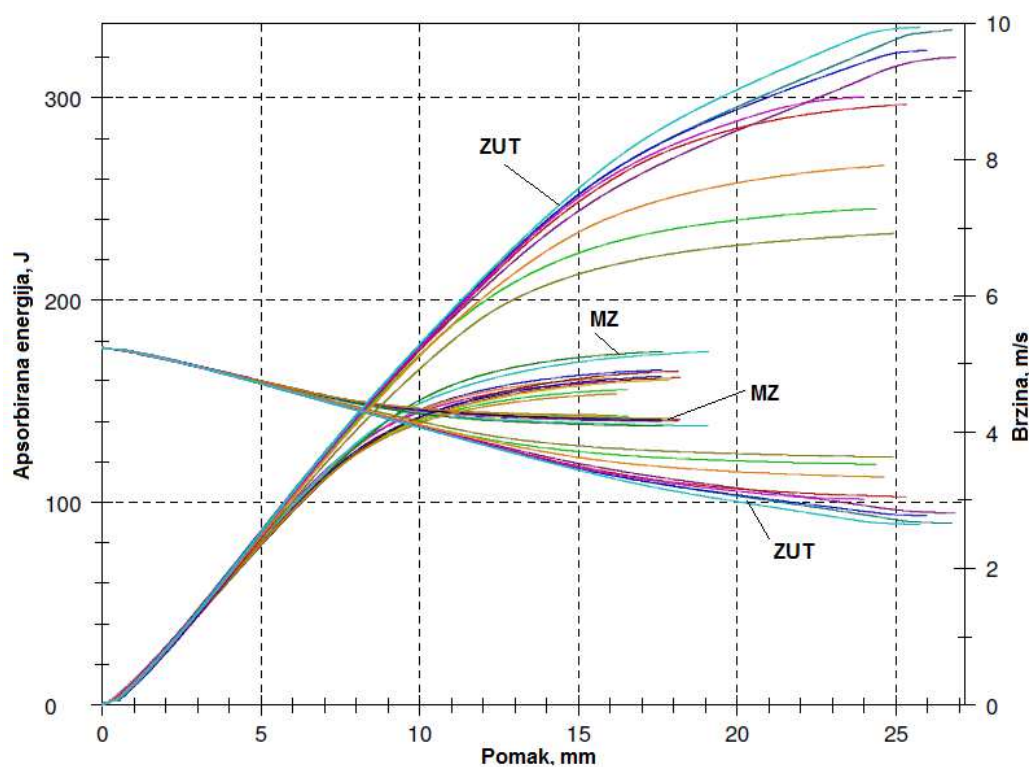
- a) Metal zavora,
- b) Zona utjecaja topline

Sve utvrđene vrijednosti udarnog rada loma ploča 2D, 3L i 4L, uz dijagramski prikaz, dane su u prilogu III dok su srednje vrijednosti za daljnju analizu dane su u tablici 15.

Tablica 15. Srednje vrijednosti udarne radnje loma

Ploča	Metal zavares KV_2 , J	Zona utjecaja topline KV_2 , J
2D	162,67	322,75
3L	82,10	297,84
4L	79,81	225,00

Kao dodatak analizi udarne radnje loma dani su dijagrami promjene apsorbirane energije i brzine ispitivanja obzirom na pomak, prilog IV. Primjer takvog dijagrama za ploču 2D prikazan je na slici 78.



Slika 78. Dijagram promjene apsorbirane energije i brzine ispitivanja obzirom na pomak, ploča 2D

6.2.4. Kemijski sastav

Kemijski sastav metala zavara ispitan je metodom GDS, slika 79, koja je opisana u poglavlju 6.1.4. ovog rada. U tablici 16 dan je kemijski sastav metala zavara ploča 1D, 2D, 3L i 4L.



Slika 79. Otvori mjerenja kemijskog sastava na MZ

Tablica 16. Srednje vrijednosti izmjerenog kemijskog sastava MZ

Ploča	Kemijski element, maseni udio %									
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Nb	Ti	Cr
1D	0,0225	0,466	1,48	0,0096	0,0054	0,0047	0,764	0,0037	0,059	0,042
2D	0,0233	0,458	1,49	0,0094	0,0055	0,0051	0,770	0,0028	0,057	0,042
3L	0,0202	0,472	1,49	0,0084	0,0045	0,0054	0,792	0,0021	0,058	0,041
4L	0,0226	0,458	1,49	0,0097	0,0052	0,0057	0,809	0,0034	0,058	0,046
$\bar{x}$	0,0221	0,463	1,48	0,0092	0,0051	0,0052	0,7837	0,003	0,058	0,0427

Napomena: ostatak se odnosi na maseni udio željeza, $\bar{F}_e = 97,11 \%$.

Rezultati ispitivanja kemijskog sastava metala zavara pokazuju ujednačene vrijednosti masenih udjela kemijskih elemenata kod svih ploča.

Radi usporedbe dvije metode ispitivanja, kemijski sastav metala zavara je izmjeren i putem EDS metode pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa. Rezultati mjerenja dani su u tablici 17. Mjerenje je provedeno na malim površinama čiji su spektri dani u prilogu V.

Tablica 17. Srednje vrijednosti kemijskog sastava MZ

	Kemijski element, maseni udio %		
Ploča	Fe	Si	Mn
1D	97,67	0,540	1,73
2D	97,67	0,527	1,59
3L	97,27	0,595	1,65
4L	97,71	0,567	1,68
$\bar{x}$	97,58	0,557	1,66

Rezultati mjerenja kemijskog sastava metala zavara različitim metodama pokazuju da su vrijednosti masenog udjela željeza približno jednake. Niži maseni udjeli silicija i mangana izmjereni su GDS metodom. Razlog tome može biti što EDS metoda zahvaća puno manju mjernu površinu za razliku od GDS metode.

Zbog male površine zone utjecaja topline nije bilo moguće provesti ispitivanje kemijskog sastava putem GDS metode te je ono provedeno putem površinske EDS metode pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa. Rezultati mjerenja dani su u tablici 18.

Tablica 18. Srednje vrijednosti kemijskog sastava ZUT

	Kemijski element, maseni udio %		
Ploča	Fe	Si	Mn
1D	97,69	0,345	1,95
2D	97,55	0,396	2,02
3L	97,45	0,437	2,08
4L	97,35	0,4	2,21
$\bar{x}$	97,51	0,394	2,06

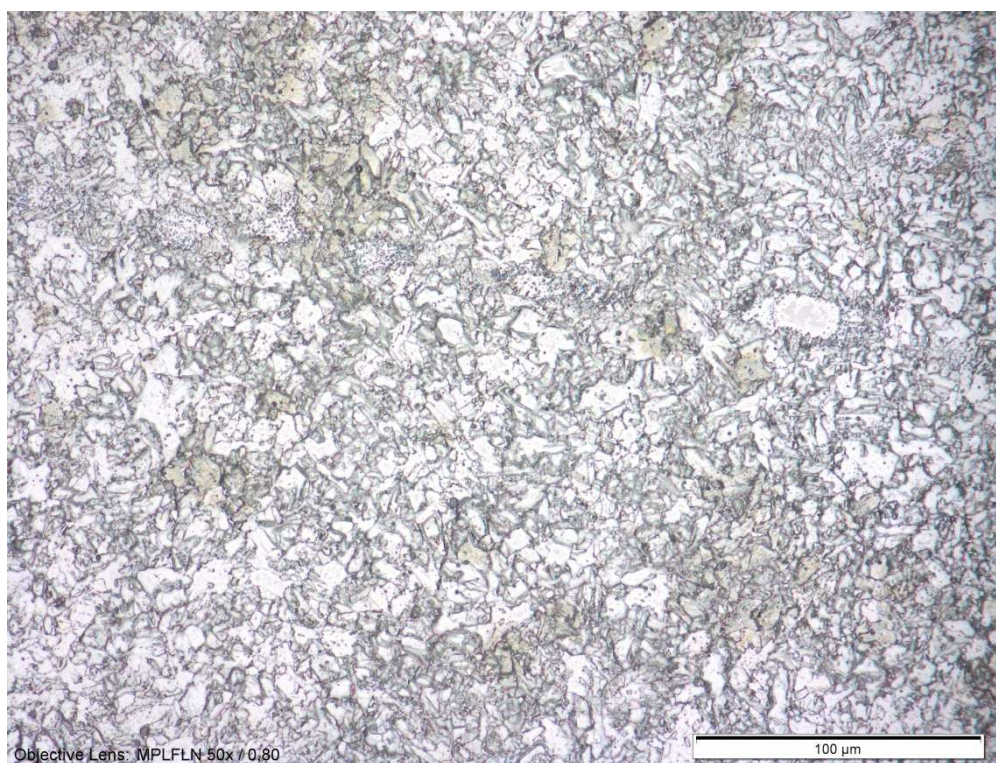
Spektri površinskog mjerenja kemijskog sastava zone utjecaja topline EDS metodom dani su u prilogu V.

Među rezultatima ispitivanja nije uvršten ugljik zbog velikog utjecaja okoline na rezultate mjerenja tj. vrijednosti mjerenja ugljika pomoću FESEM mikroskopa su prevelike te ne odgovaraju vrijednostima koja su specifična za čelične materijale. Na slikama u prilogu V prikazane su nasumično odabrane površine zone utjecaja topline i metala zavara. Spektri mjerenja ispod slika površina su srednje vrijednosti mjerenja za danu površinu. Na svakoj površini provedena su četiri mjerenja.

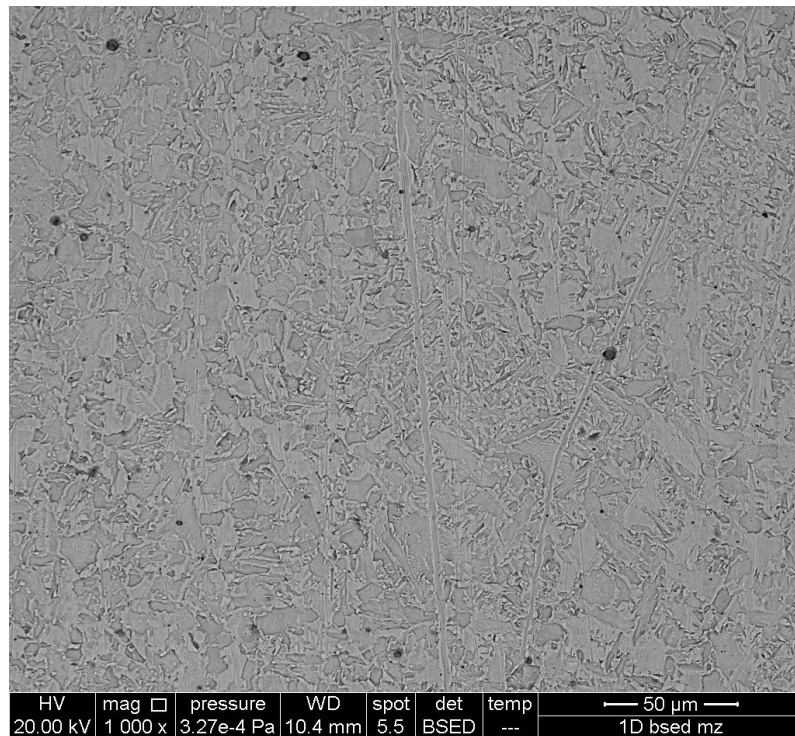
6.2.5. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture zavarenog spoja provedena je postupkom koji je opisan u poglavlju 6.1.5. ovog rada. Analizirana su područja metala zavara i zone utjecaja topline kod ploča 1D, 2D, 3L i 4L. Mikrostrukture su snimljene svjetlosnim mikroskopom i pretražnim elektronskim mikroskopom s emisijom polja korištenjem BSED detektorom (*eng. backscatter electron detector*).

Na slikama 80 i 81 prikazani su primjeri mikrostrukture metala zavara na uzorku iz ploče 1D.

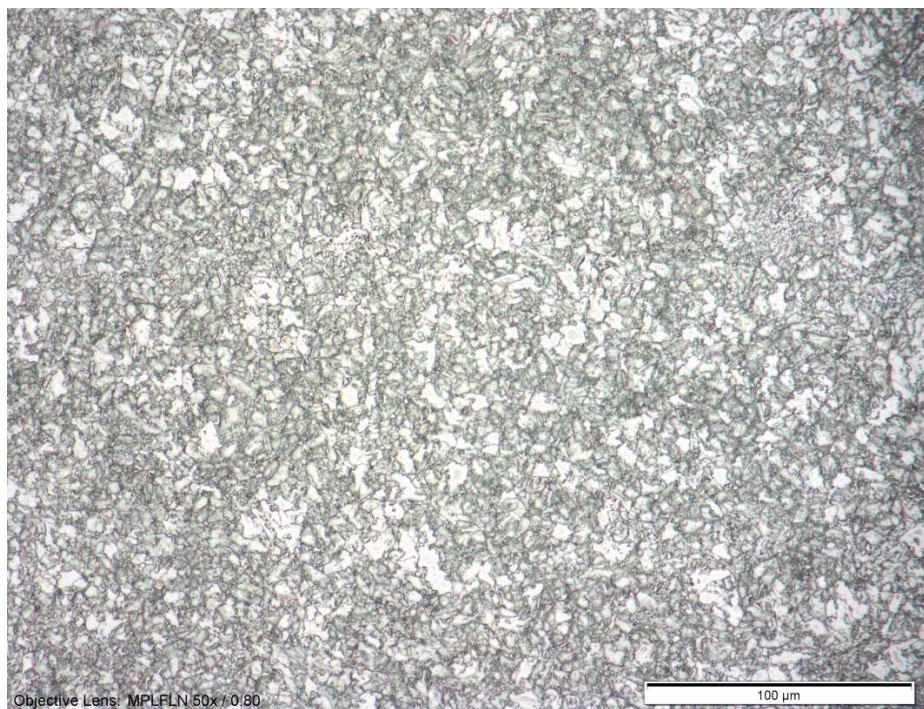


Slika 80. Mikrostruktura metala zavara, ploča 1D, povećanje 500 X

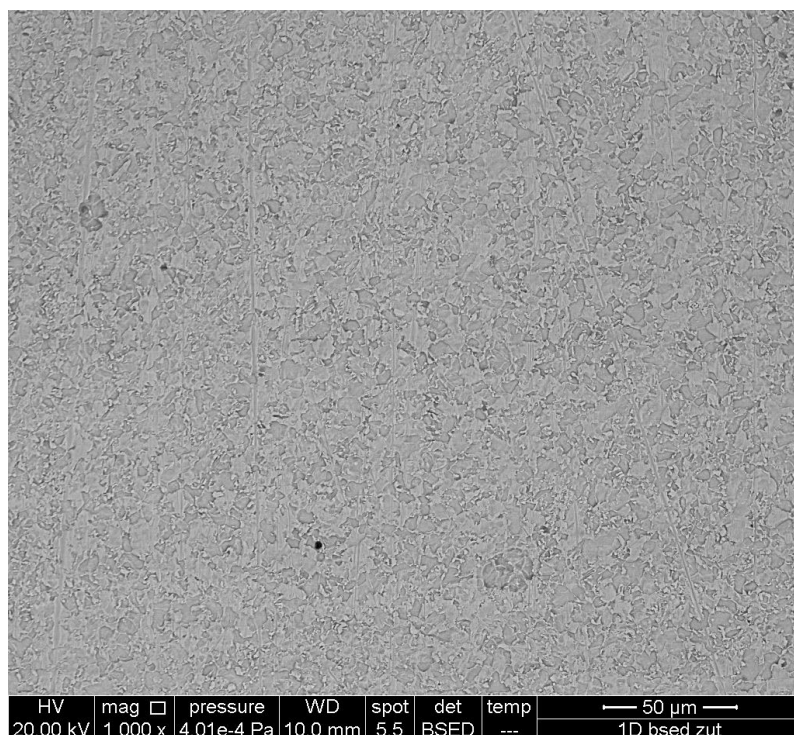


Slika 81. Mikrostruktura metala zavara. BSED detektor, ploča 1D

Na slikama 82 i 83 prikazane su mikrostrukture zone utjecaja topline na uzorku iz ploče 1D.



Slika 82. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 1D, povećanje 500 X



Slika 83. Mikrostruktura zone utjecaja topline. BSED detektor, ploča 1D

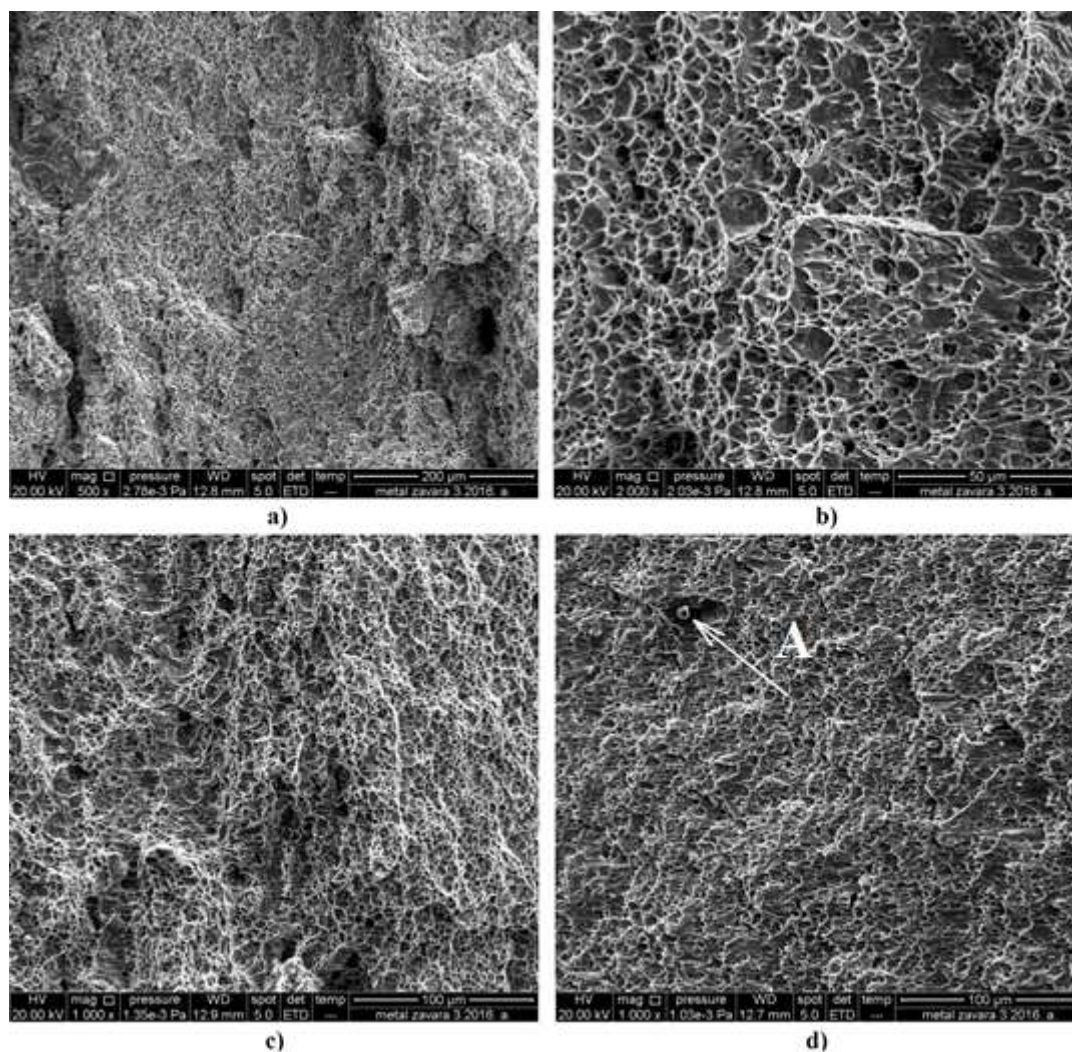
Mikrostrukture zavarenoga spoja ploča 2D, 3L i 4L dane su u prilogu VI.

Analiza mikrostrukture zone utjecaja topline ukazuje na mješovitu feritno-bainitnu mikrostrukturu. Također vidljiva su i mala područja austenitne i martenzitne mikrostrukture. Analiza mikrostrukture metala zavora sastoji se uglavnom od feritne mikrostrukture uz bainit, martenzit, acikularni ferit i austenit. U metalu zavora vidljiva je i prisutnost pora i uključaka.

6.2.6. Fraktografija zavarenog spoja

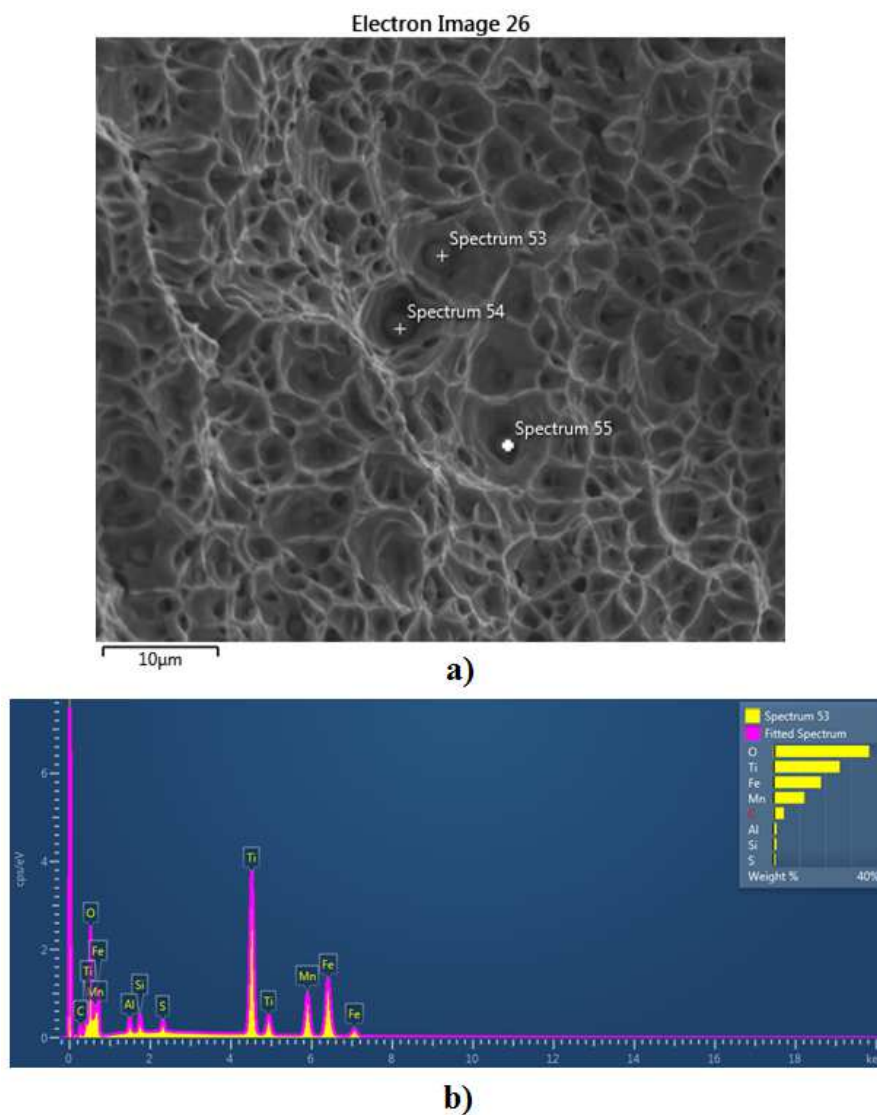
Analiza prijelomnih površina zavarenog spoja napravljena je u zoni metala zavara i zone utjecaja topline na uzorcima za ispitivanje udarnog rada loma. Analiza je napravljena pomoću pretražnog elektronskog mikroskopa uz korištenje ETD detektora.

Na slici 84 prikazane su odabrane prijelomne površine metala zavara na ploči 2D.



Slika 84. Prijelomne površine MZ, ploča 2D

Na slici 84 d) prikazan je veći uključak unutar jamice te je označen slovom "A". Kemijski sastav većeg broja takvih uključaka unutar jamica proveden je točkastom EDS metodom, slika 85. Rezultati mjerenja su dani u tablici 19.



Slika 85. EDS analiza kemijskog sastava uključaka MZ, ploča 2D, b) Primjer spektra jednog mjerenja

Tablica 19. Kemijski sastav uključaka

	Kemijski element, maseni udio %							
Mjerenje	C	O	Al	Si	S	Ti	Mn	Fe
53	4,11	36,78	1,27	1,24	0,89	25,49	11,93	18,30
54	1,81	29,01	0,54	0,8	-	36,11	10,67	21,07
55	3,45	31,73	0,82	1,18	-	30,65	9,72	22,20

Rezultati pokazuju značajan udio titana, oko 30 %. Mogući razlog pojave titana je njegova prisutnost unutar dodatnog materijala za zavarivanje. Uključci su nađeni i u metalu zavara ploča 3L i 4L.

Fotografije odabranih prijelomnih površina ploča 2D, 3L i 4L dane su u prilogu VII.

Analizom prijelomne površine metala zavara, ploča 2D, vidljive su jamice koje su značajke žilavog loma, slike 84 i 85. Jamice su male i stožaste, a također vidljive su i izdužene jamice. Unutar većih jamica nađeni su uključci čiji je kemijski sastav dan u tablici 19. Na prijelomnim površinama zone utjecaja topline, uz jamice, vidljive su i mikropukotine.

Prijelomna površina metala zavara, ploča 3L, sadrži male stožaste jamice. Također vidljive su velike šupljine i mikropukotine. Prijelomna površina zone utjecaja topline uglavnom se sastoji od velikih izduženih jamica i mikropukotina.

Prijelomna površina metala zavara, ploča 4L, slična je površinama ploče 3L, odnosno prevladavaju male stožaste duboke jamice uz prisustvo mikropukotina i namjerno izazvanih poroznosti. U zoni utjecaja topline prevladavaju izdužene jamice i mikropukotine uz prisustvo i malih stožastih jamica. Također mogu se vidjeti i granice između zrna.

Na slici 86 prikazane su makro fotografije nepravilnosti nađene na uzorcima izrađenim iz ploča 3L i 4L. Uzrok tih nepravilnosti su namjerno loše podešeni parametri zavarivanja kako bi se ispitala svojstva na ovaj način oslabljenog zavarenoga spoja. Na slikama 76 i 77 moguće je vidjeti rendgenske snimke uzoraka izrađenih iz lošeg zavarenog spoja. Šupljine se nalaze samo u području metala zavara. Nađene šupljine su različitih oblika i dimenzija.



Slika 86. Šupljine unutar metala zavara

6.3. Rezultati ispitivanja instrumentiranom Charpy metodom

U ovom poglavlju dani su rezultati ispitivanja osnovnog materijala i zavarenog spoja instrumentiranom Charpy metodom. Ispitivanje je provedeno na uređaju opisanom u poglavlju 6.1.3. ovog rada. Rezultati karakterističnih sila, čvrstoća pri udarnom opterećenju i dinamičke lomne žilavosti procijenjeni su metodama opisanim u poglavlju 2.6. ovog rada.

6.3.1. Instrumentirano ispitivanje osnovnog materijala

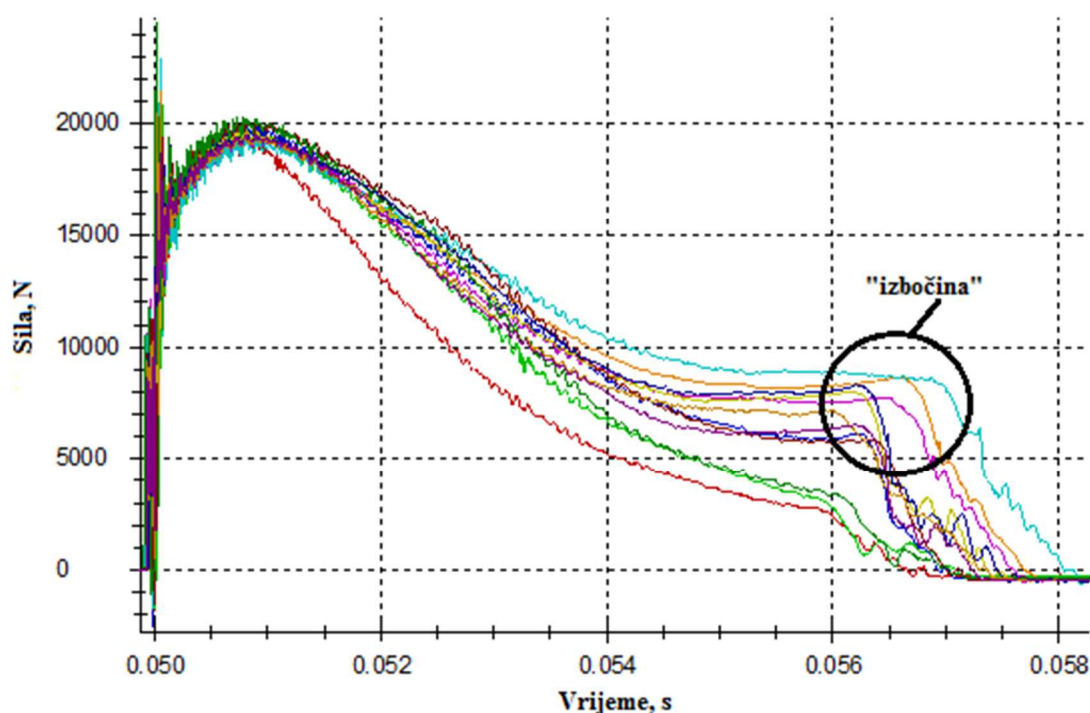
Sve utvrđene vrijednosti sile pri granici razvlačenja, F_{gyd} , maksimalne sile, F_{md} , sile pri nastanku pukotine, F_f , dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja, R_{gyd} , dinamičke vlačne čvrstoće, R_{md} , i dinamičke lomne žilavosti, J_{Id} , osnovnog materijala dane su u prilogu VIII dok su srednje vrijednosti za daljnju analizu dane su u tablici 20.

Tablica 20. Srednje vrijednosti sila i mehaničkih svojstava osnovnog materijala

	Karakteristične sile			Mehanička svojstva		
	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_f , kN	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{Id} , kJ/m ²
Osnovni materijal	13,35	19,78	19,73	565,83	643,03	1874,42

Srednje vrijednosti karakterističnih sila kod statičkog vlačnog ispitivanja (SVI) iznose $F_{p0,2} = 15,17$ kN i $F_m = 18,70$ kN. Rezultati mjerenja karakterističnih sila pokazuju da su vrijednosti F_{gyd} i F_{md} manje za oko 12 % od $F_{p0,2}$, odnosno više za oko 5,5 % od F_m . Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava pokazuju da su vrijednosti R_{gyd} i R_{md} više za oko 4,5 % od $R_{p0,2}$, odnosno manje za oko 3,4 % od R_m .

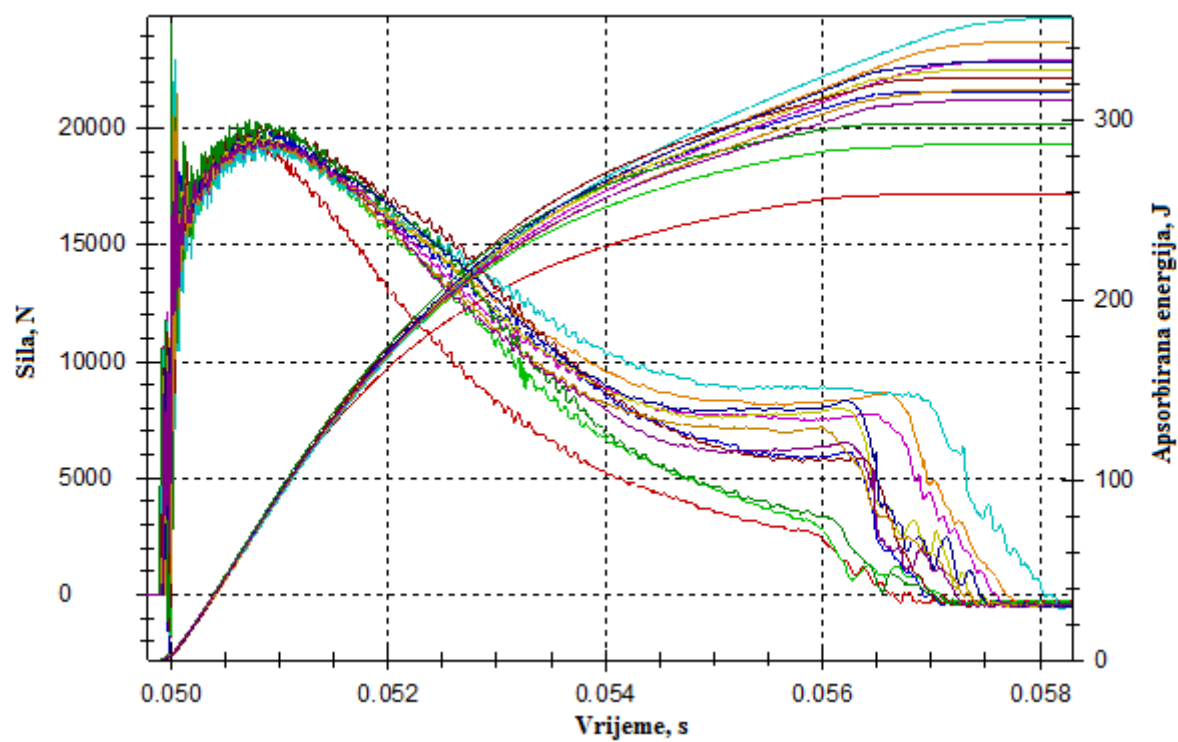
Na slici 87 prikazan je dijagram sila-vrijeme ispitanih uzoraka osnovnog materijala.



Slika 87. Dijagram sila-vrijeme, osnovni materijal

Na dijagramu, slika 87, vidljive su "izbočine" (eng. "bumps") koje su locirane na kraju ispitivanja i nakon kojih dolazi do nagloga pada sile. Lucon [45] navodi zapažanja drugih autora koji smatraju da su izbočine glavna razlika između polumjera noževa, 2 mm i 8 mm, pri visokim energijama, odnosno kod noža polumjera oštrice 2 mm ne dolazi do te pojave. Isto tako smatra se da do te pojave dolazi uslijed interakcije između jako deformiranih uzoraka i rubova oštrice noža netom prije "izlaska" ispitnog uzorka između vertikalnih oslonaca. Međutim ovdje su uočene izbočine na dijagramima i pri ispitivanju s noževima polumjera oštrice 2 mm. Uočeno je da su izbočine izraženije što su vrijednosti apsorbiranih energija bliže 300 J, odnosno kod ispitnih uzoraka apsorbiranih energija većih od 300 J one su jasno vidljive te dijagram sila-vrijeme izgleda poput "skijaške skakaonice".

Na slici 88 prikazan je dijagram promjene sile i apsorbirane energije obzirom na pomak kod uzoraka izrađenih iz osnovnog materijala.



Slika 88. Dijagram promjene sile i apsorbirane energije obzirom na pomak

6.3.2. Instrumentirano ispitivanje zavarenog spoja

Sve utvrđene vrijednosti sile razvlačenja pri dinamičkom opterećenju, F_{gyd} , maksimalne sile pri dinamičkom opterećenju, F_{md} , sile pri nastanku pukotine, F_f , dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja, R_{gyd} , dinamičke vlačne čvrstoće, R_{md} i dinamičke lomne žilavosti, J_{Id} , zavarenoga spoja ploče 2D dane su u prilogu VIII dok su srednje vrijednosti za daljnju analizu dane u tablici 21.

Tablica 21. Srednje vrijednosti sila i mehaničkih svojstava MZ i ZUT, ploča 2D

	Karakteristične sile			Mehanička svojstva		
	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_f , kN	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{Id} , kJ/m ²
Metal zavara	12,22	17,93	17,61	517,76	583,35	1439,07
Zona utjecaja topline	12,34	19,71	19,69	522,94	640,56	1893,44

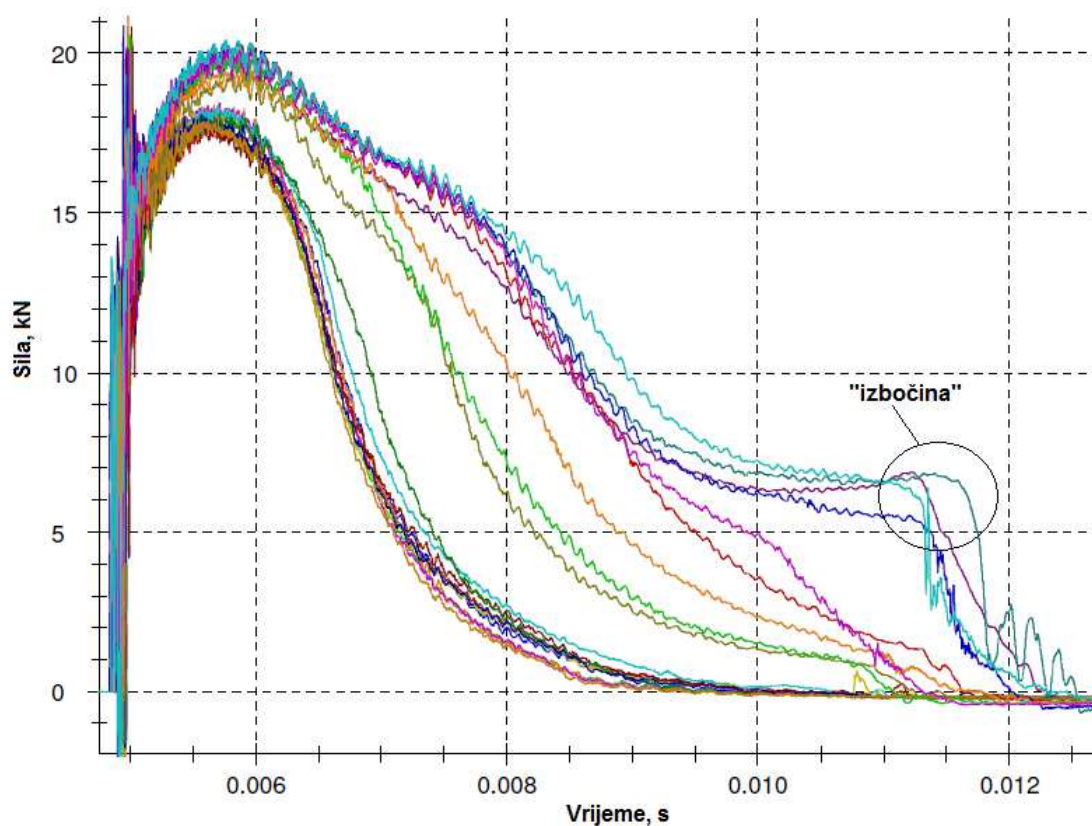
Srednje vrijednosti karakterističnih sila kod statičkog vlačnog ispitivanja metala zavara iznose $F_{p0,2} = 13,99$ kN i $F_m = 17,60$ kN. Rezultati mjerenja karakterističnih sila pokazuju da su vrijednosti F_{gyd} manje od $F_{p0,2}$ za oko 12,5 %, a vrijednosti F_{md} su više za oko 2 % od F_m .

Srednje vrijednosti karakterističnih sila kod statičkog vlačnog ispitivanja u zoni utjecaja topline iznose $F_{p0,2} = 14,52$ Kn i $F_m = 18,04$ Kn. Rezultati mjerenja karakterističnih sila pokazuju da su vrijednosti F_{gyd} manje od $F_{p0,2}$ za oko 15 %, a vrijednosti F_{md} su više za oko 8,5 % od F_m .

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava metala zavara pokazuju da su vrijednosti R_{gyd} i R_{md} više za oko 5,8 % od $R_{p0,2}$, odnosno manje za oko 5 % od R_{md} izmjerenih statičkim vlačnim ispitivanjem.

Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava zone utjecaja topline pokazuju da su vrijednosti R_{gyd} i R_{md} više za oko 3,9 % od $R_{p0,2}$, odnosno za oko 1,92 % od R_m izmjerenih statičkim vlačnim ispitivanjem.

Na slici 89 dan je dijagram sila-vrijeme uzoraka izrađenih iz metala zavara i zone utjecaja topline, ploča 2D.

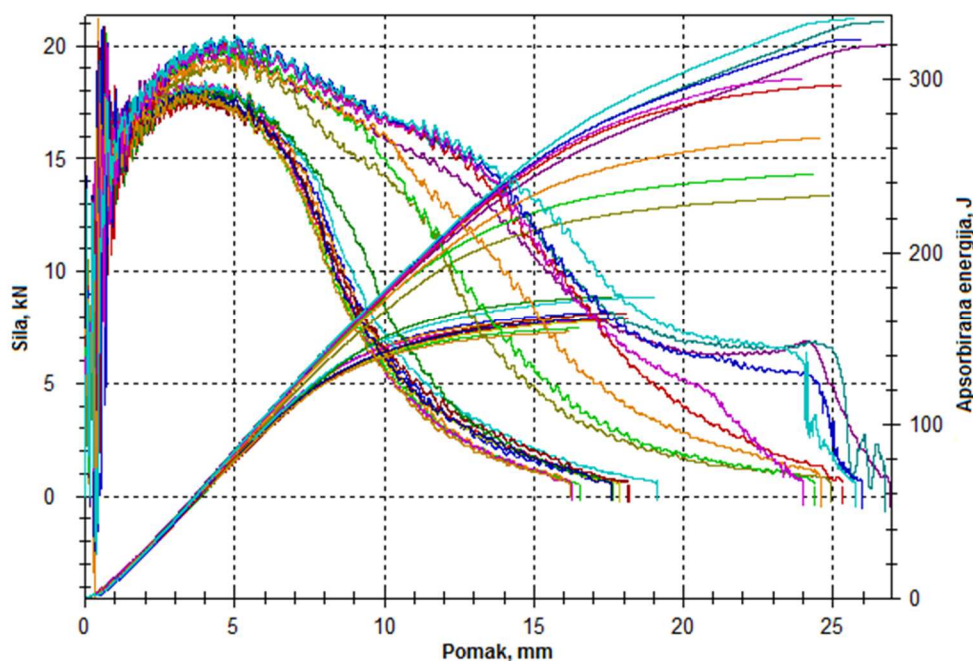


Slika 89. Dijagram sila-vrijeme zavarenog spoja

Na dijagramu, slika 89, možemo vidjeti pojavu "izbočina" koje su zabilježene i kod osnovnog materijala. Izbočine su zabilježene na grafovima uzoraka izrađenih iz zone utjecaja topline.

Na slici 90 prikazan je primjer dijagrama sila-pomak s dodanom ordinatnom osi apsorbirane energije zavarenoga spoja.

Dijagrami promjene sile i apsorbirane energije obzirom na pomak kod uzoraka izrađenih iz zavarenoga spoja dani su u prilogu IX.



Slika 90. Dijagram sila-pomak s dodanom osi ordinate

Sve utvrđene vrijednosti sile pri granici razvlačenja, F_{gyd} , maksimalne sile, F_m , i sile pri nastanku pukotine, F_f , kod uzoraka izrađenih iz zavarenoga spoja, ploča 3L i 4L dane su u prilogu VIII dok su srednje vrijednosti za daljnju analizu dane u tablici 22.

Tablica 22. Srednje vrijednosti sila MZ i ZUT ploča 3L i 4L

	Ploča 3L			Ploča 4L		
	Karakteristične sile					
	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_{f} , kN	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_{f} , kN
Metal zavara	10,22	15,52	15,50	10,51	15,55	15,50
Zona utjecaja topline	12,49	20,12	20,07	12,60	19,86	19,85

Srednje vrijednosti mehaničkih svojstava zone utjecaja topline ploča 3L i 4L dane su u tablici 23, dok su sve utvrđene vrijednosti dane u prilogu VIII. Način procjene mehaničkih svojstava opisan je u daljnjem tekstu.

Tablica 23. Srednje vrijednosti zone utjecaja topline ploča 3L i 4L

	Ploča 3L			Ploča 4L		
	Mehanička svojstva					
	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{ld} , kJ/m ²	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{ld} , kJ/m ²
Zona utjecaja topline	529,46	654,11	1839,90	534,12	644,35	1883,60

Procjena mehaničkih svojstava kod Charpy uzoraka koji sadrže nepravilnosti, šupljine raznih oblika i veličina, nije obrađena u dostupnoj literaturi, izuzev Charpy uzoraka koji u dnu zareza sadrže zamornu pukotinu. Rezultati procjene mehaničkih svojstava metala zavara dati su u tablicama 24 i 25 za ploče 3L i 4L. Način procjene sastoji se od korištenja jednadžbi (119) i (120) uz mjerenja „zdrave“ površine Charpy uzorka ispod zareza. Mjerenje udjela zdravog materijala provedeno je pomoću softvera ImageJ. U tablicama su uz rezultate mehaničkih svojstava slikovno prikazane i prijelomne površine ispitnih uzoraka koji sadrže nepravilnosti. Nepravilnosti, koje se nalaze u zoni ispod zareza, se uglavnom odnose na šupljine raznih oblika i dimenzija.

$$R_{gyd} = \frac{F_{gyd}}{S_0} \quad (119)$$

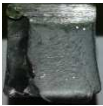
$$R_{md} = \frac{F_{md}}{S_0} \quad (120)$$

Jednadžbe su iste onima koje se koriste pri procjeni mehaničkih svojstava kod statičkog vlačnog ispitivanja.

Tablica 24. Rezultati mjerenja mehaničkih svojstava MZ, ploča 3L

	Površina zdravog materijala		Mehanička svojstva	
Broj mjerenja	Slika	S_0 , mm ²	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²
1		57,00	172,45	256,31
2		55,22	177,47	289,20
3		63,27	185,08	236,76
4		56,28	186,92	296,37
5		53,86	199,22	281,84
6		46,46	220,18	331,68
7		54,71	177,66	272,71
8		77,18	125,42	204,19
9		65,78	150,95	242,01
10		64,66	162,07	232,13
11		73,83	133,55	220,23
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	-	171,90	260,31
Standardna devijacija, s	-	-	27,76	37,81

Tablica 25. Rezultati mjerenja mehaničkih svojstava MZ, ploča 4L

	Površina zdravog materijala		Mehanička svojstva	
Broj mjerenja	Slika	S_0 , mm ²	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²
1		57,35	160,24	241,32
2		46,13	216,34	280,94
3		69,36	142,73	221,45
4		64,53	163,02	225,63
5		52,98	215,36	331,82
6		57,51	173,88	287,42
7		63,54	174,37	225,52
8		74,47	158,58	238,35
9		54,05	198,70	315,63
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	-	178,13	263,12
Standardna devijacija, s	-	-	26,18	41,87

Vrijednosti dinamičke lomne žilavosti, J_{Id} , nisu procijenjene iz razloga što zbog postojanja šupljina u metalu zavara nije nađena adekvatna jednadžba.

Vrijednosti ograničavajućeg faktora, f , pri dinamičkoj granici razvlačenja i vlačnoj čvrstoći izmjerene su za svaki uzorak zasebno pomoću Ewingovih jednadžbi. U tablici 26 dane su srednje vrijednosti ograničavajućeg faktora kod osnovnog materijala, metala zavara i zone utjecaja topline. U svrhu procjene faktora f metala zavara i zone utjecaja topline korišteni su uzorci izrađeni iz ploče 2D. Sve utvrđene vrijednosti faktora f dane su u prilogu X.

Tablica 26. Srednje vrijednosti ograničavajućeg faktora

	Kod sile F_{gyd}		Kod sile F_{md}	
	$\alpha_0, ^\circ$	f	$\alpha_0, ^\circ$	f
Osnovni materijal	46,19	1,278477	63,41	1,282201
Metal zavara	45,97	1,278329	60,47	1,281164
Zona utjecaja topline	46,28	1,278464	64,06	1,282352

7. DISKUSIJA

Instrumentirana metoda udarnog ispitivanja se od svojeg postojanja polako razvijala. Razlog tome su, uz skupocjenu opremu za ispitivanje, poteškoće kod primjene novih saznanja iz mehanike loma i teorija elastičnosti i plastičnosti. I danas se sa sigurnošću ne može reći što se točno događa s materijalom pri udarnom opterećenju (deformacija kristalnih zrna, način širenja pukotine, širenje plastične deformacije, razvijanje polja naprezanja i deformacije, toplinsko-mehanički procesi itd.) zbog nepostojanja, javno dostupne, tehnologije koja može mjeriti te procese. Uz način deformiranja materijala, nepoznanice se vežu i na sam današnji suvremeni uređaj za ispitivanje udarnog rada loma. Tu se misli na nepostojanje, u dostupnoj literaturi, postupka proračuna krutosti takvog uređaja.

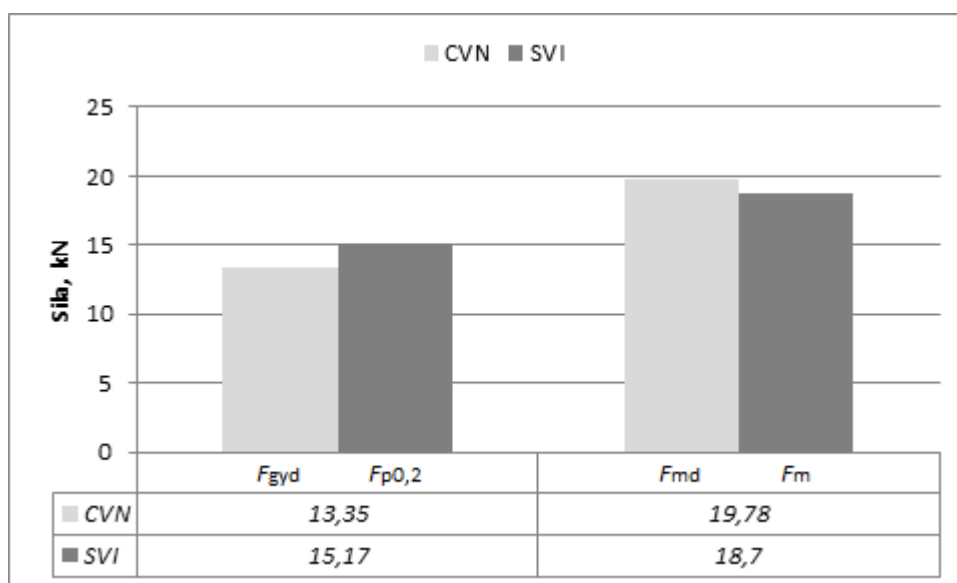
U svrhu procjene krutosti, odnosno podatljivosti uređaja u ovom radu je korištena nova metoda procjene. Ukupna podatljivost procijenjena je pri punoj brzini bata, koja kod Charpy uređaja korištenog u ovome radu iznosi 5,234 m/s. Iako ovakva procjena podatljivosti daje dobre rezultate, koji su komparabilni s rezultatima dobivenim drugim metodama, potrebna je dublja analiza problema. Naime, postavlja se pitanje da li je korektno koristiti vrijednost podatljivosti uređaja, koja je procijenjena s jednim materijalom, kako bi procijenili ukupnu podatljivost kada se koristi drugi materijal, a sve na istom uređaju? Razmjenom znanstvene diskusije s Irelandom D. R. i nakon razmatranja problema potrebno je uzeti u obzir sljedeće:

- Da li podatljivost uređaja možemo smatrati samo kao elastičnu varijablu? Ukupni prividni pomak je zbroj elastičnog pomaka uzorka, elastičnog pomaka uređaja i udubljenje uzorka na mjestu interakcije uzorka i noža. Neobjavljeni podaci ispitivanja, ustupio Ireland D. R., pokazuju da udubljenje koje napravi nož na uzorku obuhvaća veliki udio vrijednosti podatljivosti uređaja ako udubljenje iznosi između 0,1 mm do 0,2 mm. Stoga nije dobro koristiti vrijednosti podatljivosti uređaja za uzorke različitih materijala. Međutim ako je udubljenje manje od navedene vrijednosti tada se vrijednost podatljivosti može koristiti kod različitih materijala. Doprinos udubljenja je veći kod ISO noža nego kod ASTM noža zbog manjeg polumjera zakrivljenja. Daljnjim razmatranjem ovoga problema mogla bi se razviti metoda za korekciju procjene pomaka uzorka što bi dovelo i do korekcija u procjeni apsorbirane energije.

Kako bi procijenili vrijednosti čvrstoća pri instrumentiranom udarnom ispitivanju potrebno je procijeniti karakteristične sile. Iako ne postoji konačno definirani način procjene

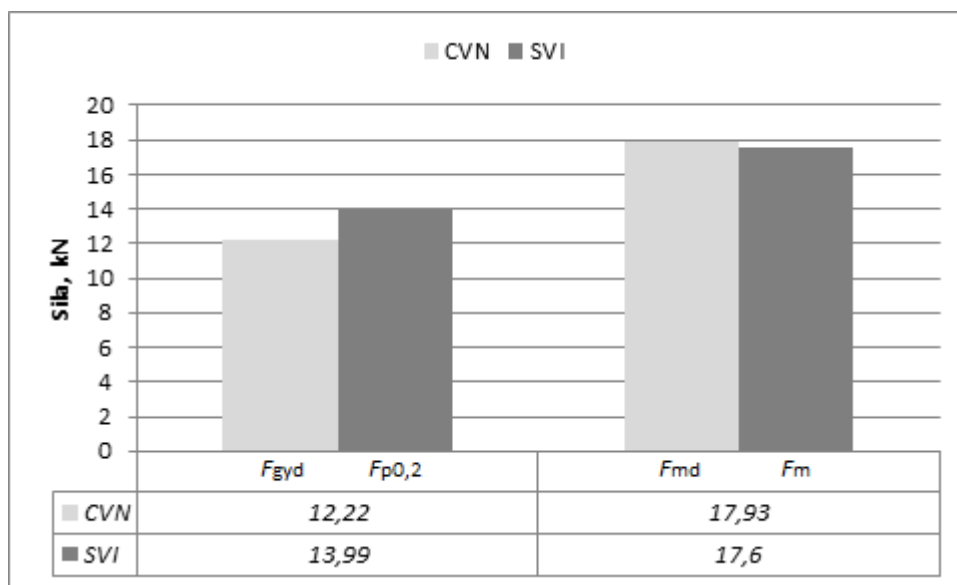
karakterističnih sila, u ovom radu je upravo ukupna podatljivost korištena za njihovu procjenu. Tu se prije svega misli na silu pri granici razvlačenja. Vrijednosti procijenjenih sila, F_{gyd} i F_{md} , približne su onima danim u radu Fanga [85], koji je koristio ASTM nož, što daje zaključiti da nova predložena metoda procjene ukupne podatljivosti daje dobru procjenu. Navodi o utjecaju polumjera noža na vrijednosti sila, koje je Lucon naveo u radu [45], podudaraju se s rezultatima danim u ovom radu i rezultatima objavljenima u [85]. Ti navodi se odnose na to da je sila F_{gyd} nešto veća kod ISO noža, dok je sila F_{md} manja kod ASTM noža.

Uspoređivati sile pri instrumentiranom udarnom i statičkom vlačnom ispitivanju je nepraktično. Naime, za statičko vlačno ispitivanje možemo, prema normi, koristiti ispitne uzorke različitih dimenzija pri čemu će za uzorke većih dimenzija biti potrebna i veća sila kako bi došlo do loma uzorka. Razlika vrijednosti sila pri granici razvlačenja kod osnovnog materijala između Charpy ispitnih uzoraka i ispitnog uzorka za statičko vlačno ispitivanje, čiji je promjer u zoni početne mjerne duljine 6 mm, iznosi oko 12 %, a za maksimalnu silu iznosi oko 5,5 %, slika 91.

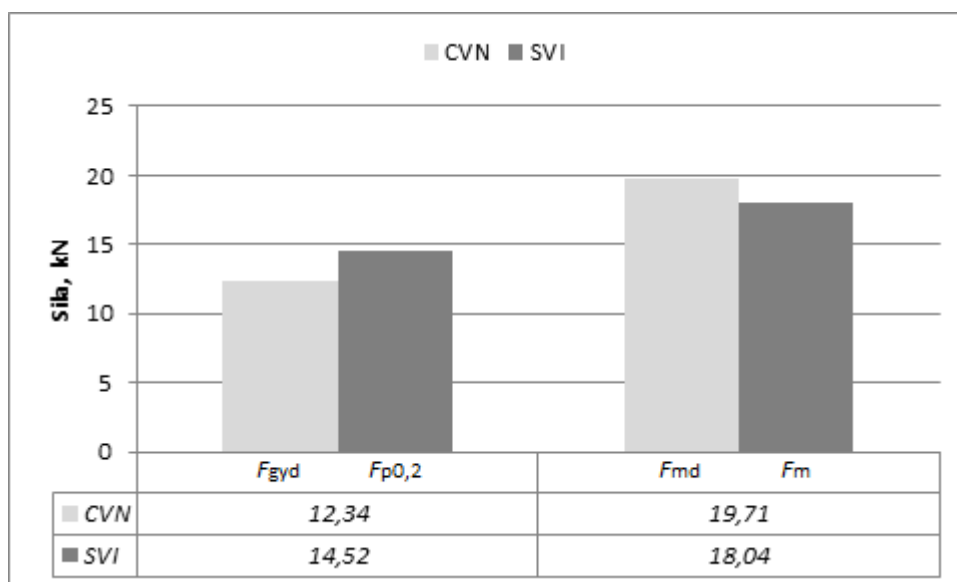


Slika 91. Usporedba sila kod osnovnog materijala

Ispitivanjem zavarenog spoja ploča 1D i 2D kod metala zavara razlika vrijednosti sile F_{gyd} između Charpy i vlačne metode iznosi oko 12,5 %, dok za silu F_{md} ta razlika iznosi oko 2 %. Pri ispitivanju zone utjecaja topline razlika sile F_{gyd} između Charpy i vlačne metode iznosi oko 15 %, dok za silu F_{md} ta razlika iznosi oko 8,5 %. Na slikama 92 i 93 dan je grafički prikaz odnosa sila kod metala zavara i zone utjecaja topline.

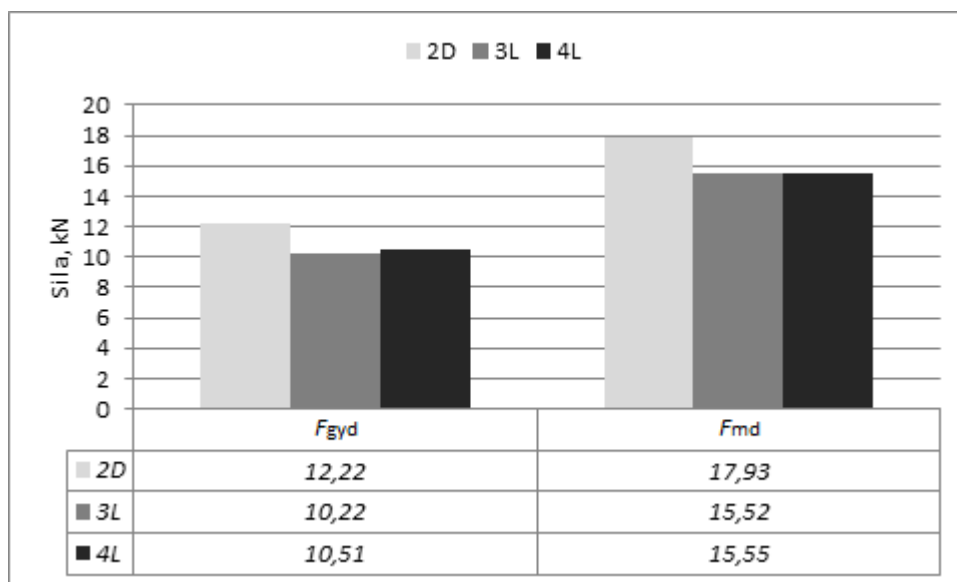


Slika 92. Usporedba sila kod metala zavara



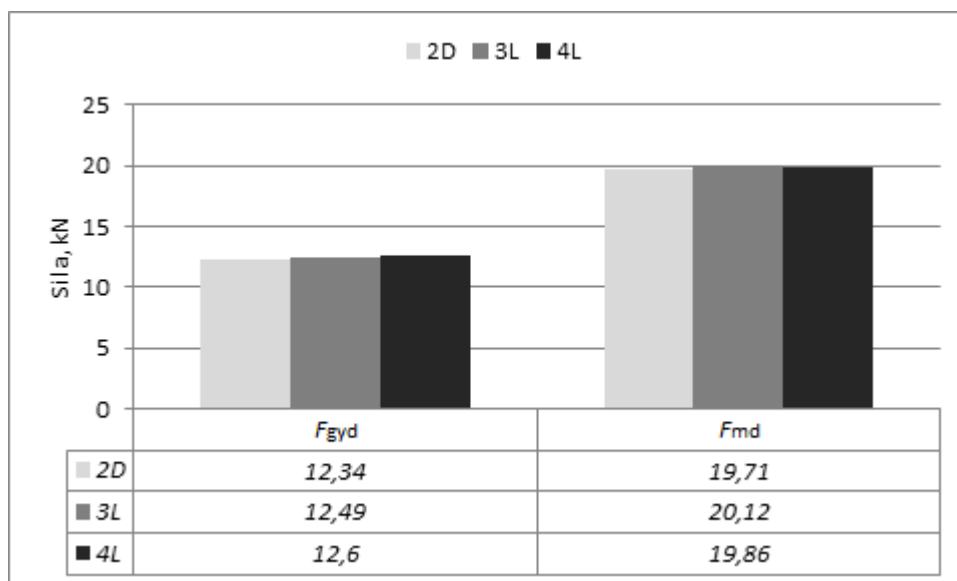
Slika 93. Usporedba sila kod zone utjecaja topline

Drugi segment istraživanja bio je usmjeren na usporedbu vrijednosti karakterističnih sila između dobrog zavarenog spoja i zavarenog spoja koji sadrži nepravilnosti, odnosno između zavarene ploče 2D i ploča 3L i 4L u svrhu procjene mehaničkih svojstava, odnosno analize utjecaja nepravilnosti na ponašanje zavarenog spoja pri udarnom opterećenju. Tu je usporedba napravljena samo između Charpy uzoraka zbog toga što nije bilo moguće napraviti ispitne uzorke za statičko vlačno ispitivanje. Razlika sile F_{gyd} kod metala zavara između ploče 2D i ploča 3L i 4L iznosi oko 15,2 %, dok za silu F_{md} ta razlika iznosi oko 13,3 %. Kod zone utjecaja topline razlika sile F_{gyd} iznosi oko 1,6 %, dok kod sile F_{md} ta razlika iznosi oko 1,4 %. Razlog zbog kojega su kod ZUT-a razlike u silama vrlo male je ta što u tom području nije bilo nepravilnosti. Na slici 94 dan je grafički prikaz odnosa sila metala zavara između ploče 2D te ploča 3L i 4L.



Slika 94. Usporedba sila kod metala zavara između ploča 2D, 3L i 4L

Na slici 95 dan je grafički prikaz odnosa sila zone utjecaja topline između ploče 2D te 3L i 4L.



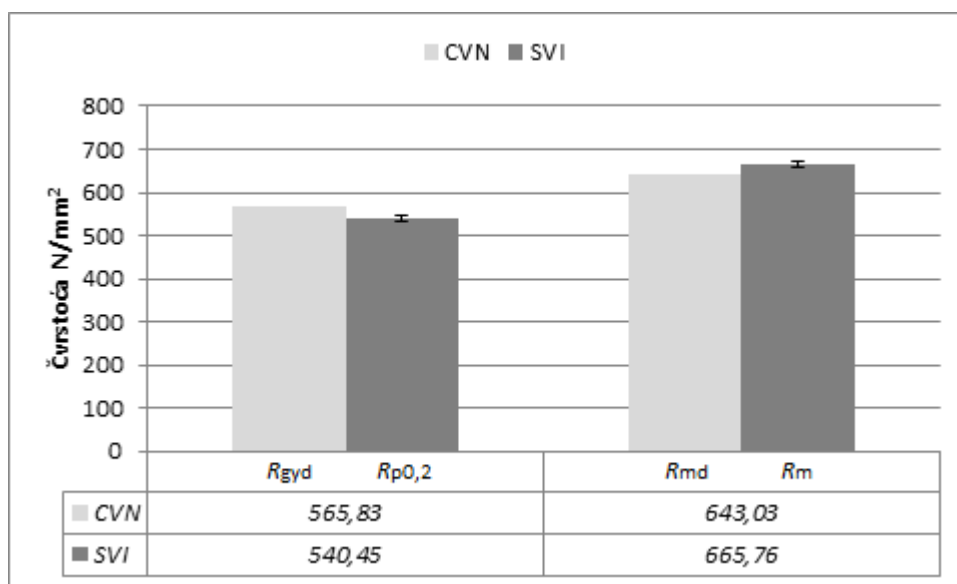
Slika 95. Usporedba sila u zoni utjecaja topline između ploča 2D, 3L i 4L

Kod metala zavara uočljivo je da su vrijednosti sila između ploča 3L i 4L vrlo blizu, gotovo jednake, bez obzira što su nepravilnosti za svaki ispitni uzorak bile različite (dimenzija, oblik), slike u tablicama 24 i 25.

Pri mjerenju dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja, R_{gyd} , u literaturi postoji metoda procjene te je ista korištena u ovom radu. Ova metoda zasniva se na vrijednosti ograničavajućeg faktora, f . Njegova vrijednost ovisi o kutu savijanja Charpy uzorka odnosno o plastičnoj deformaciji uzorka. Na njegovu vrijednost isto tako utječu širina noža te dimenzije i geometrija zareza. Potrebno je naglasiti da su vrijednosti f koje se koriste u današnjoj literaturi procijenjene pri kvazi-statičkom savojnom opterećenju. Prema Fangu [87] čvrstoća čelika API 5L X80 kod instrumentiranog Charpy ispitivanja ovisi o prirastu istezanja uslijed čega vrijednosti čvrstoće rastu za oko 100 N/mm^2 . Treba naglasiti da je Fang proveo i udarno ispitivanje na Charpy uređaju na uzorku za statičko vlačno ispitivanje te da je razlika vrijednosti R_{gyd} oko 0,5 % od instrumentiranog udarnog ispitivanja na Charpy uzorku.

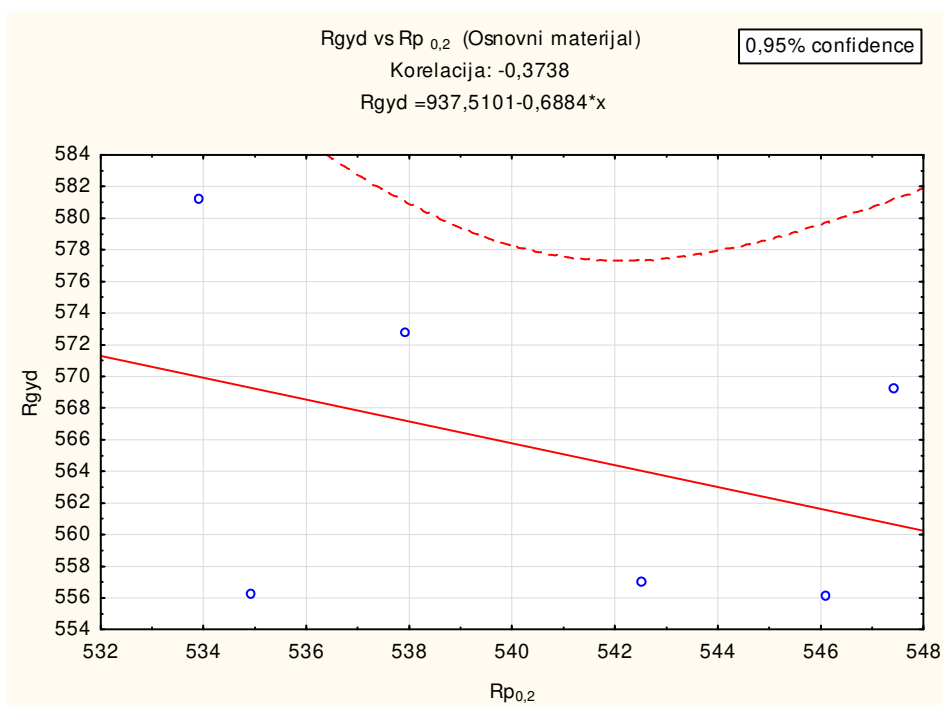
Kod procjene dinamičke vlačne čvrstoće, R_{md} , za sada je u dostupnoj literaturi predložena metoda od strane Lucona [23] koja se zasniva na vrijednosti prirasta istezanja. Jednadžba za proračun R_{md} je jednaka jednadžbi proračuna R_{gyd} , međutim Lucon ne daje vrijednost ograničavajućeg faktora. Isto tako Lucon se u radu pokušava približiti vrijednostima statičkog vlačnog ispitivanja putem prirasta istezanja što je opisano u poglavlju 2.6.4. ovog rada. U ovome radu pokušalo se je drugim pristupom procijeniti vrijednost R_{md} . Vrijednost R_{md} procijenjena je pomoću faktora f koji je proračunat pomoću Ewingovih jednadžbi uz korištenje aproksimirane vrijednosti omjera smične čvrstoće i vlačne čvrstoće. Vrijednosti faktora f procijenjene su obzirom na pomak odnosno kut savijanja Charpy uzorka pri maksimalnoj sili, geometriji zareza i širini noža.

Rezultati ispitivanja R_{gyd} između statičkog vlačnog ispitivanja i instrumentirane Charpy metode kod osnovnog materijala pokazuju razliku od oko 4,5 %. Usporedba rezultata procjene R_{md} pokazuju razliku od 3,4 % između dviju metoda, slika 96.



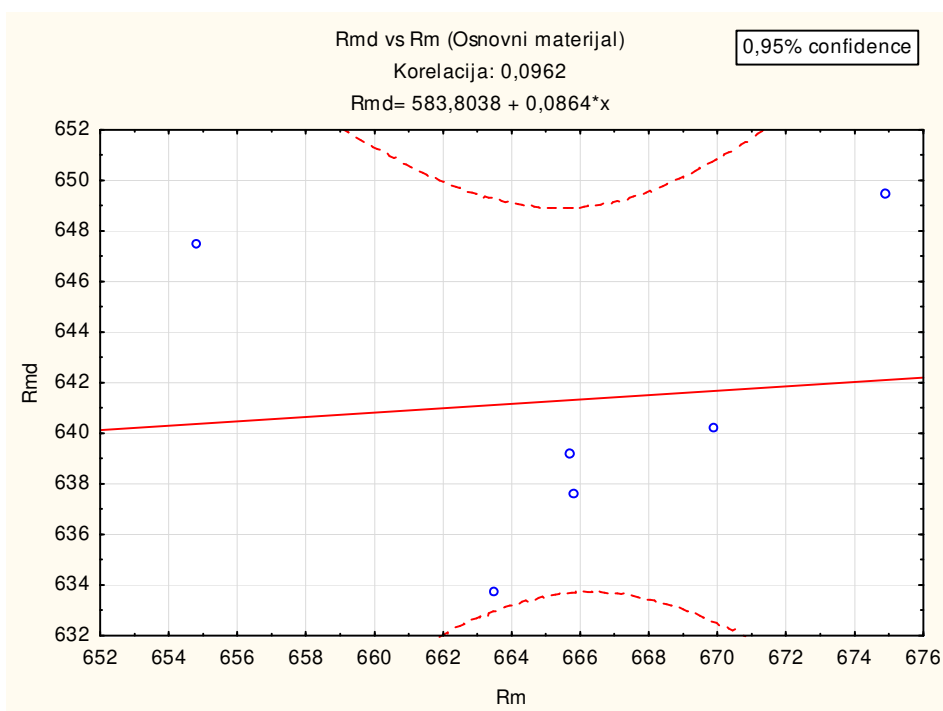
Slika 96. Usporedba mehaničkih svojstava osnovnog materijala

Na slici 97 prikazan je graf regresijskog pravca za vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$ kod osnovnog materijala. Vrijednost korelacijskog faktora iznosi -0,3738, a p vrijednost iznosi 0,4654.



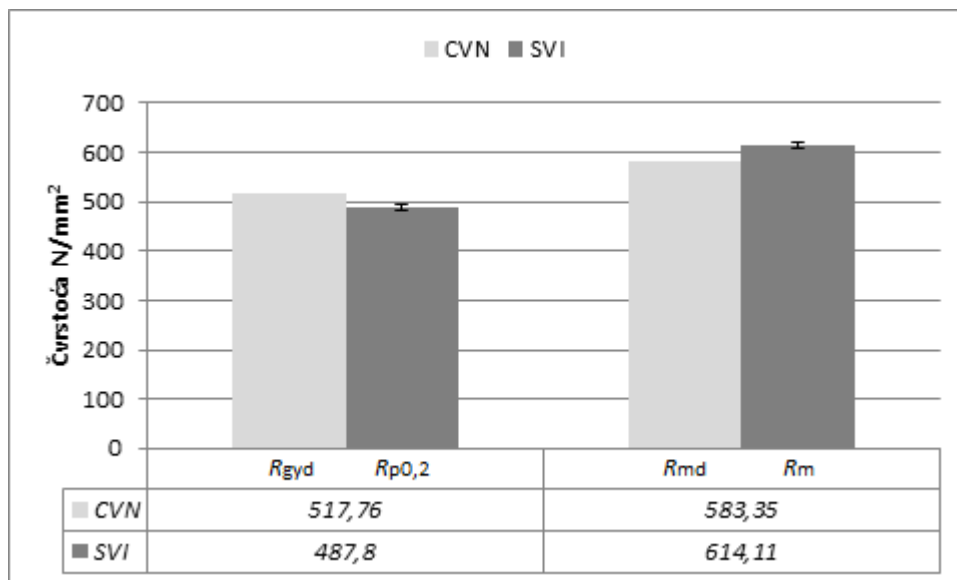
Slika 97. Korelacija između vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$, osnovni materijal

Na slici 98 prikazan je graf regresijskog pravca za vrijednosti R_{md} i R_m kod osnovnog materijala. Vrijednost korelacijskog faktora iznosi 0,0962, a p vrijednost iznosi 0,8561.



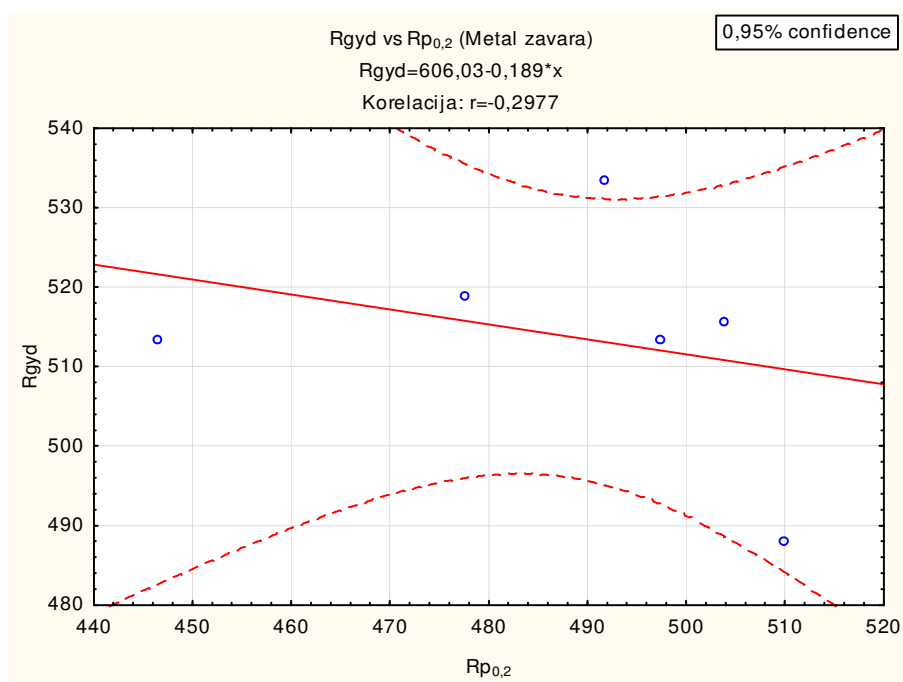
Slika 98. Korelacija između vrijednosti R_{md} i R_m , osnovni materijal

Usporedbom rezultata mehaničkih svojstava zavarenog spoja ploča 1D i 2D kod metala zavara razlika granice razvlačenja R_{gyd} između Charpy i vlačne metode iznosi oko 5,8 %, dok za vlačnu čvrstoću R_{md} ta razlika iznosi oko 5 %, slika 99.



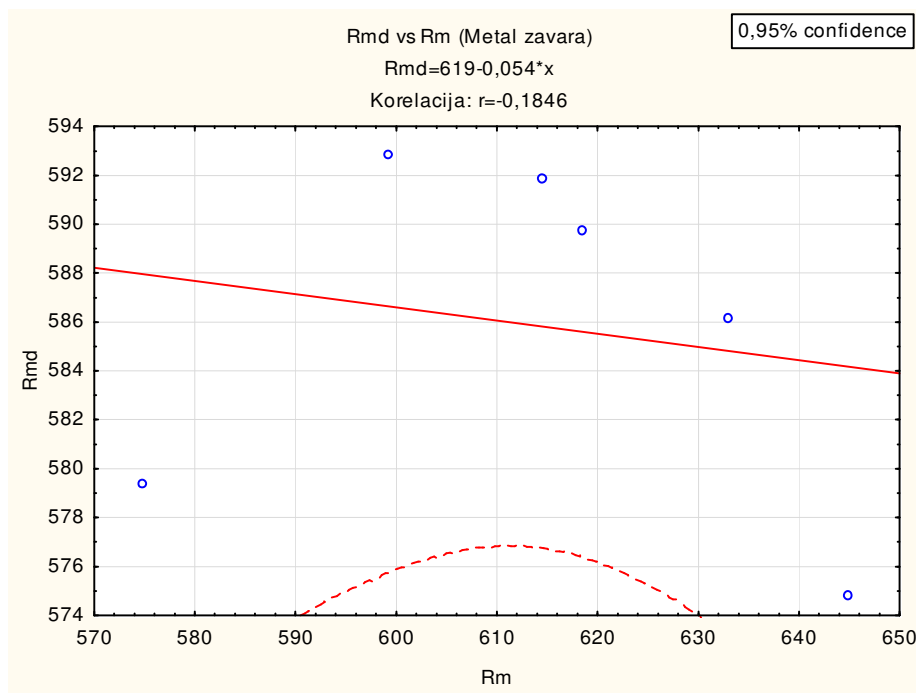
Slika 99. Usporedba mehaničkih svojstava metala zavara

Na slici 100 prikazan je graf regresijskog pravca za vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$ kod metala zavara. Vrijednost korelacijskog faktora iznosi -0,2977, a p vrijednost iznosi 0,5667.



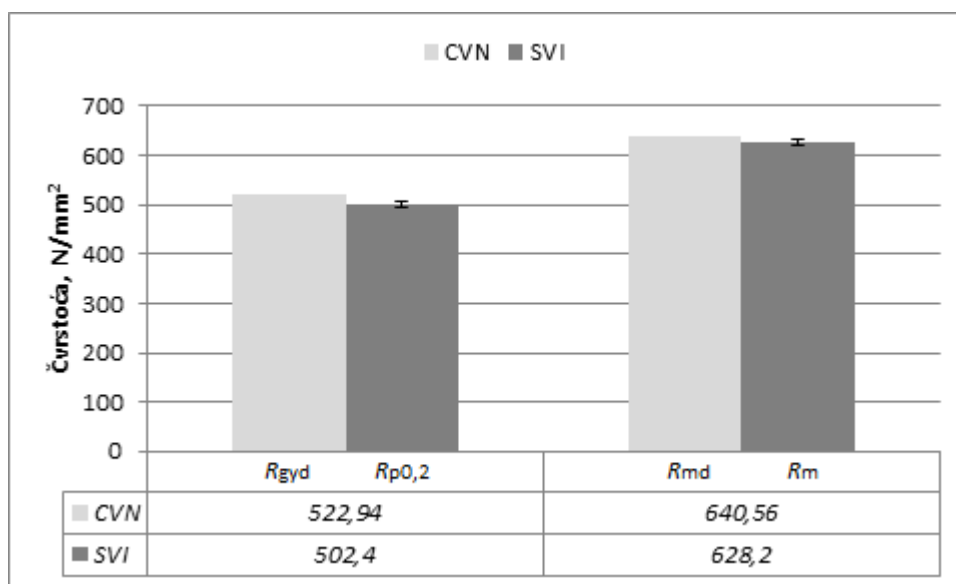
Slika 100. Korelacija između vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$, metal zavara

Na slici 101 prikazan je graf regresijskog pravca za vrijednosti R_{md} i R_m kod metala zavara. Vrijednost korelacijskog faktora iznosi -0,7113, a p vrijednost iznosi 0,7263.



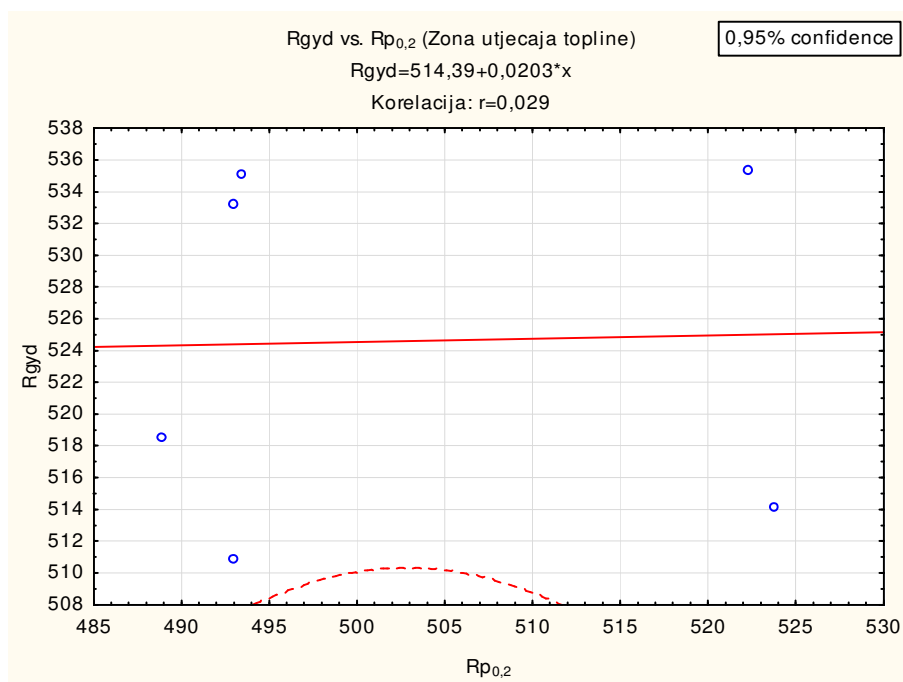
Slika 101. Korelacija između vrijednosti R_{md} i R_m , metal zavara

Usporedbom rezultata mehaničkih svojstava zavarenog spoja ploča 1D i 2D kod zone utjecaja topline razlika granice razvlačenja R_{gyd} između Charpy i vlačne metode iznosi oko 3,9 %, dok za vlačnu čvrstoću R_{md} ta razlika iznosi oko 1,9 %, slika 102.



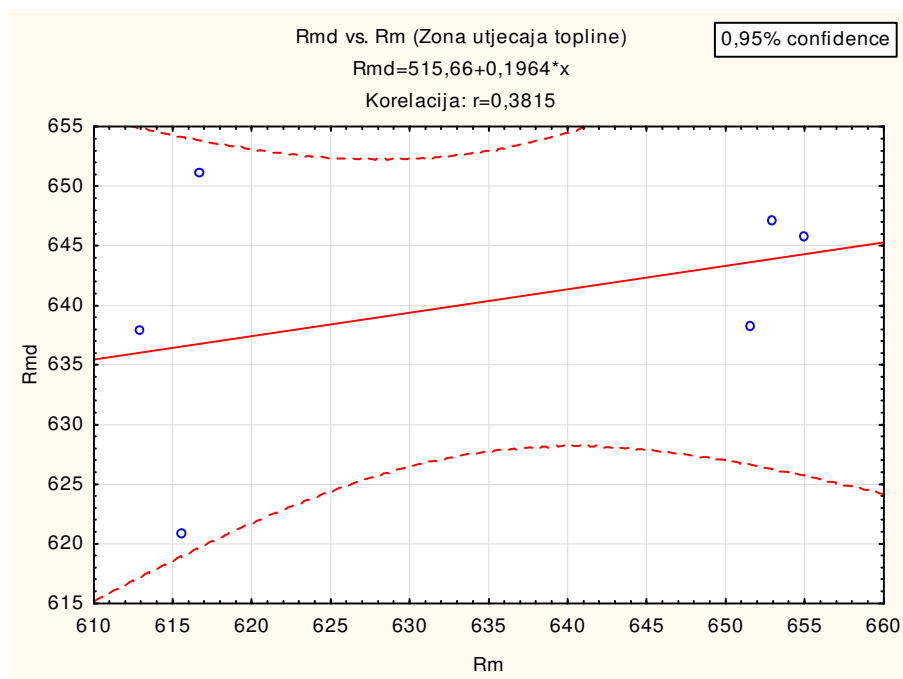
Slika 102. Usporedba mehaničkih svojstava zone utjecaja topline

Na slici 103 prikazan je graf regresijskog pravca za vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$ kod zone utjecaja topline. Vrijednost korelacijskog faktora iznosi +0,029, a p vrijednost iznosi 0,9565.



Slika 103. Korelacija između vrijednosti R_{gyd} i $R_{p0,2}$, zona utjecaja topline

Na slici 104 prikazan je graf regresijskog pravca za vrijednosti R_{md} i R_m kod zone utjecaja topline. Vrijednost korelacijskog faktora iznosi +0,3815, a p vrijednost iznosi 0,4555.

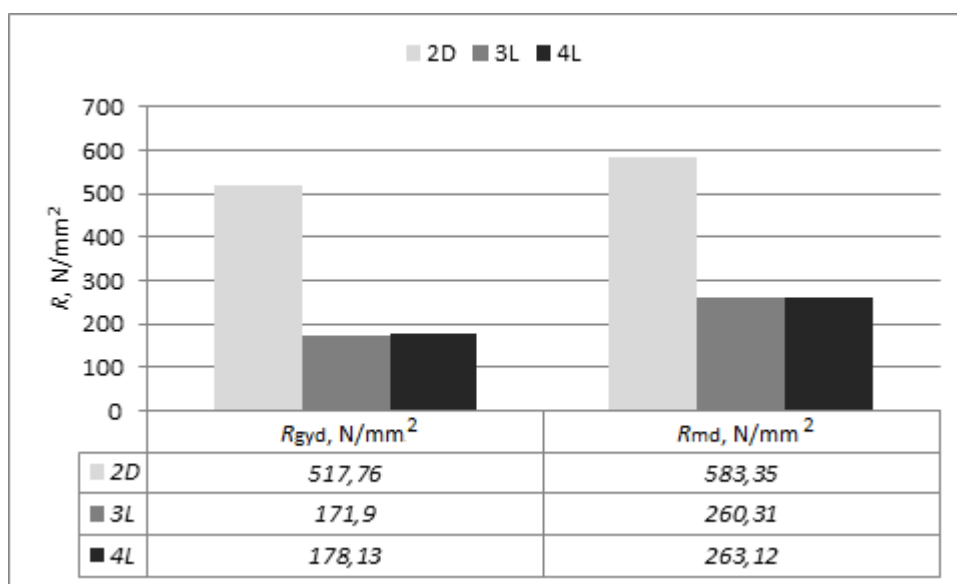


Slika 104. Korelacija između vrijednosti R_{md} i R_m , zona utjecaja topline

Pojedine povišene vrijednosti R_{gyd} i R_{md} možemo povezati s visokim prirastom istezanja za razliku od statičkog vlačnog ispitivanja. Za rezultate ispitivanja dinamičkih čvrstoća zone utjecaja topline treba uzeti u obzir da je ispitni uzorak za vlačno ispitivanje na svojim rubovima sadržavao materijal metala zavara s jedne strane i materijal osnovnog materijala s druge strane, slika 70. Zona utjecaja topline zauzimala je oko 80 % poprečnog presjeka ispitnog uzorka za vlačno ispitivanje, stoga ne možemo reći da se te vrijednosti u potpunosti odnose na materijal zone utjecaja topline.

Vrijednost čvrstoća kod zavarenih ploča 3L i 4L procijenjene su pomoću jednadžbi koje se koriste kod analize rezultata nakon statičkog vlačnog ispitivanja. Uslijed prisutnosti nepravilnosti unutar materijala ispitnih uzoraka korištena je softverska metoda u svrhu mjerenja udjela zdrave površine materijala. Rezultati procjene mehaničkih svojstava Charpy uzoraka ovim načinom nisu međusobno usporedivi iako su srednje vrijednosti blizu jedna drugoj, tablica 24 i 25. Razlog tome su nepravilnosti različitih oblika i dimenzija. Usporedba sa statičkim vlačnim ispitivanjem nije provedeno iz razloga što nije bilo moguće izraditi uzorke za vlačno ispitivanje.

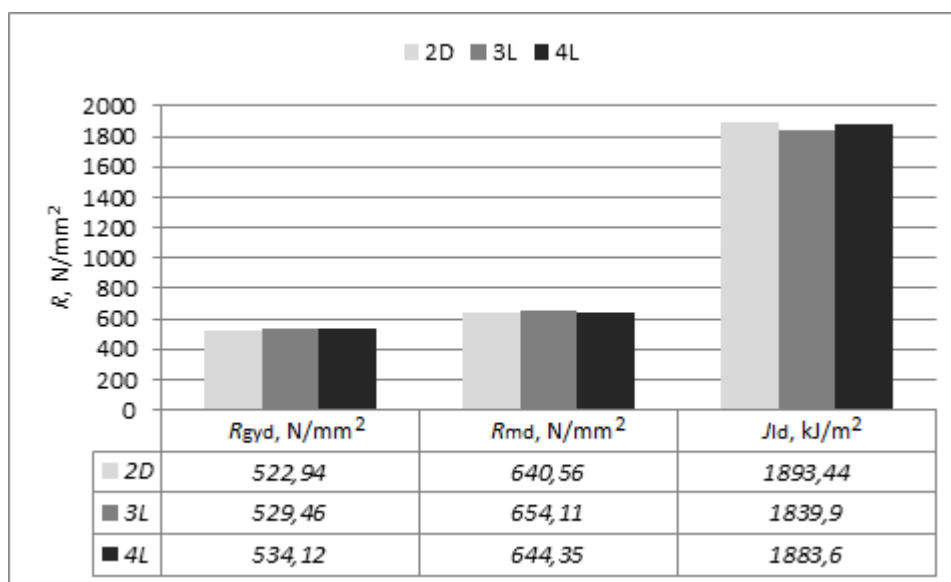
Na slici 105 dan je grafički prikaz odnosa mehaničkih svojstava metala zavara između ploče 2D, 3L i 4L.



Slika 105. Usporedba mehaničkih svojstava metala zavara

Vrijednosti mehaničkih svojstava u zoni metala zava su prema očekivanjima puno bolja kod ploče 2D čiji zavareni spoj nije sadržavao nepravilnosti za razliku od ploča 3L i 4L.

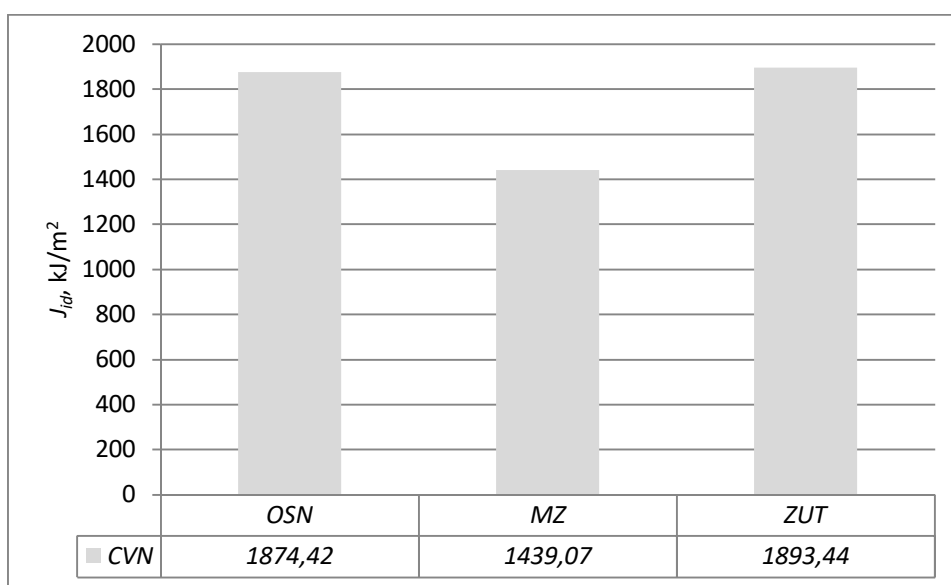
Na slici 106 dan je grafički prikaz odnosa mehaničkih svojstava zone utjecaja topline između ploče 2D, 3L i 4L.



Slika 106. Usporedba mehaničkih svojstava zone utjecaja topline

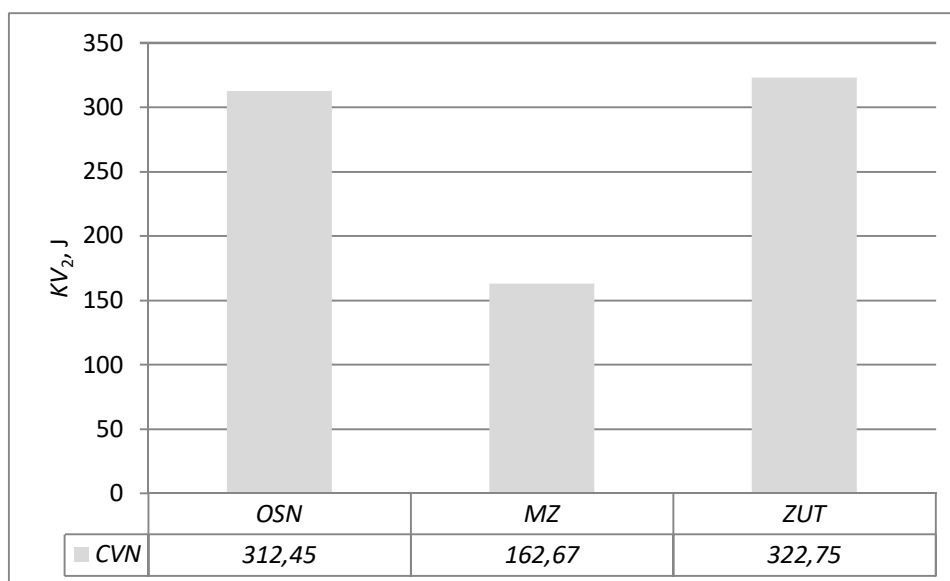
Usporedbom vrijednosti mehaničkih svojstava u zoni utjecaja topline pokazalo se da su ona približno jednaka.

Rezultati ispitivanja dinamičke lomne žilavosti pokazuju približno jednake vrijednosti kod osnovnog materijala i zone utjecaja topline što je posljedica približno istih vrijednosti apsorbirane energije pri maksimalnoj sili. Vrijednosti MZ i ZUT uzete su od ispitnih uzoraka izrađenih iz ploče 2D. Vrijednosti dinamičke lomne žilavosti metala zavara niže su od osnovnog materijala i zone utjecaja topline za oko 25 %, slika 107.



Slika 107. Usporedba vrijednosti dinamičke lomne žilavosti

Vrijednosti apsorbirane energije, ploča 2D, metala zavara niže su u odnosu na zonu utjecaja topline za oko 50 %. Uočeno je da razlika apsorbirane energije između osnovnog materijala i zone utjecaja topline iznosi oko 3 % što je vrlo blizu, uz naglasak da uzorak iz zone utjecaja topline sadrži i dio osnovnog materijala, slika 108.



Slika 108. Usporedba vrijednosti apsorbirane energije

Vrijednosti apsorbiranih energija zavarenog spoja kod ploča 3L i 4L općenito su niže u odnosu na ploču 2D.

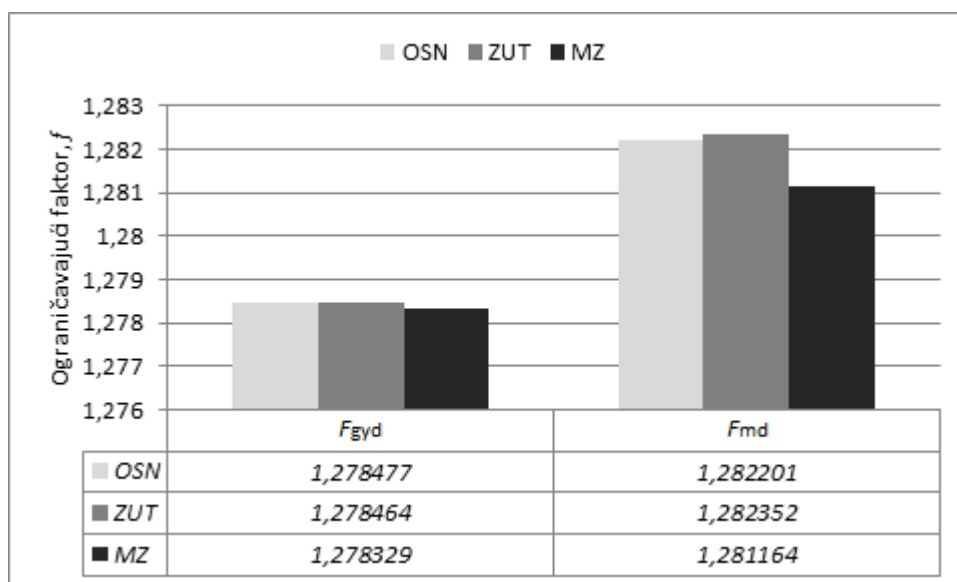
Makroanaliza prijelomnih površina potvrđuje oblik dijagrama sila-vrijeme dobivenog instrumentiranom Charpy metodom, odnosno radi se o žilavom lomu. Mikroanaliza prijelomnih površina otkriva značajke transkristalnog žilavog loma u vidu jamica i izduženih jamica.

Prijelomna površina osnovnog materijala sastoji se od većih i izduženih jamica između kojih se nalaze manje izdužene jamice. Na pojedinim dijelovima uočene su praznine i mikropukotine.

Prijelomna površina zone utjecaja topline sastoji se od većeg udjela malih jamica i manjeg udjela izduženih većih jamica. Također, za razliku od osnovnog materijala veći je udio praznina i mikropukotina.

Prijelomna površina metala zavara sastoji se u najvećem dijelu od malih stožastih jamica. Također, uz praznine, unutar većih jamica vidljivi su uključci titan i mangan oksida.

Na slici 109 dan je grafički prikaz odnosa ograničavajućeg faktora između osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara kod ploče 2D.



Slika 109. Usporedba vrijednosti ograničavajućeg faktora

Iz dijagrama je vidljivo da su vrijednosti faktora f kod sile pri dinamičkoj granici razvlačenja gotovo jednake dok je kod maksimalne sile vrijednost faktora f manja kod metala zavara za razliku od osnovnog materijala i zone utjecaja topline gdje su te vrijednosti gotovo jednake. Razlog što su vrijednosti faktora f kod metala zavara općenito nešto manje leži u činjenici da su i vrijednosti postignutih sila F_{gyd} i F_{md} niže nego kod osnovnog materijala i zone utjecaja topline, odnosno i kut savijanja CVN uzorka pri tim silama je manji.

8. ZAKLJUČAK

Ponašanje materijala u eksploatacijskim uvjetima uslijed udarnog opterećenja, pogotovo pri velikim brzinama, nije dovoljno istraženo i vrlo je specifično s obzirom na različite vrste materijala te razne utjecaje pri eksploatacijskim uvjetima. Instrumentirana Charpy metoda je vrlo značajna jer se uz udarni rad loma mogu dobiti i druga saznanja o ponašanju materijala u uvjetima udarnog dinamičkog opterećenja. Uz razmatranje sveobuhvatnije ocjene zavarenog spoja pomoću instrumentirane Charpy metode kao okosnice ovoga rada, proizašla su i druga saznanja o ponašanju materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Nakon opsežnog pregleda literaturnih izvora i provedenih istraživanja doneseni su sljedeći zaključci:

- Na rezultate ispitivanja dobivenih pomoću instrumentirane Charpy metode utječe čitav niz izvora nesigurnosti koji proizlaze iz samog uređaja (podatljivost, brzina ispitivanja, oblik i dimenzije noža i oslonaca, način prikupljanja podataka...), oblika i dimenzija ispitnih uzoraka te materijala (deformacija kristalnih zrna, širenje pukotine, razvijanje polja deformacije i naprezanja). Kvantificiranje ovih utjecaja je kompleksno te zahtjeva opsežna i dugoročna istraživanja. Iz rezultata ovoga rada utvrđeno je da se pojedina mehanička svojstva kao što su vlačna čvrstoća i granica razvlačenja mogu uz veći broj ponavljanja usporediti s rezultatima statičkog vlačnog ispitivanja za iste veličine. Osim navedenih mehaničkih svojstava uz dinamičku lomnu žilavost, procjena svojstava poput modula elastičnosti, konačnog naprezanja i dinamičke izdržljivosti u ovom trenutku još nije moguća.
- U pogledu valorizacije parametra podatljivosti Charpyjevog bata uveden je novi način njegove procjene. On se sastoji od utvrđivanja podatljivosti metodom procjene pri punoj brzini, što do sada nije učinjeno, a za obradu dobivenih podataka korištena je metoda separacije varijabli. Procjenom podatljivosti Charpyjevog bata ovom metodom dobiveni su usporedivi rezultati s metodama drugih istraživača, ali je za ovu metodu potreban znatno manji broj ulaznih parametara što snizuje troškove ispitivanja.
- Procijenjene srednje vrijednosti dinamičke čvrstoće pri granici razvlačenja i dinamičke vlačne čvrstoće za osnovni materijal su u granicama odstupanja do 4 % ne uzimajući u obzir mjernu nesigurnost mjerenja. Ako uzimamo u obzir i mjerne nesigurnosti samog mjerenja došlo bi do preklapanja vrijednosti rasipanja rezultata. Iz ovoga se može zaključiti da se instrumentiranom Charpy metodom mogu dobiti usporedivi rezultati sa

statičkim vlačnim ispitivanjem. Značajan utjecaj imaju velika brzina prirasta istezanja i trenje između ispitnog uzorka i vertikalnih oslonaca. Kvantificiranjem njihovog utjecaja mogao bi se dobiti korekcijski faktor čijom primjenom bi dobili još bolje podudaranje rezultata. Ovim zaključkom i predhodnim zaključkom potvrđena je hipoteza da je s novim valoriziranim parametrima podatljivosti Charpyjevog bata moguće procijeniti mehanička svojstva materijala, kao što su vlačna čvrstoća i granica razvlačenja, unutar prihvatljivih granica odstupanja pri mjerenju tih svojstava klasičnim statičkim vlačnim ispitivanjem.

- Rezultati ispitivanja instrumentiranom Charpy metodom na zavarenom spoju, zona utjecaja topline i metal zavara, pokazali su slično ponašanje kao i kod osnovnog materijala. Razlika u vlačnoj čvrstoći za zonu utjecaja topline je u granicama oko 2 %. S obzirom na problematiku izrade ispitnih uzoraka iz zone utjecaja topline i metala zavara podudaranje ovih rezultata je jako dobro. Na temelju ovoga možemo reći da je pretpostavljena hipoteza o sveobuhvatnijoj ocjeni mehaničkih svojstava zavarenoga spoja primjenom instrumentirane Charpy metode potvrđena. U prilog potvrde ove hipoteze idu i provedena istraživanja na uzorcima s namjerno izazvanim nepravilnostima unutar zavarenog spoja. Procijenjene sile, čvrstoće i apsorbirane energije kod metala zavara, koji sadrži namjerno izazvane nepravilnosti, su znatno niže ovisno o udjelu tih nepravilnosti.
- Tijekom istraživanja uočeni su problemi utvrđivanja ograničavajućeg faktora te pojava anomalije pri kraju dijagrama sila - vrijeme (izbočina). U radu je predložena i opisana nova metoda procjene dinamičke vlačne čvrstoće pri čemu su dane vrijednosti ograničavajućeg faktora što je važno iz razloga jer u trenutno dostupnoj literaturi vrijednost faktora nije pronađena što onemogućava kvalitetnu valorizaciju metode. Analizom dijagrama sila - vrijeme uočeno je da se "izbočina" na kraju dijagrama sila - vrijeme, za koju drugi istraživači smatraju da je jedna od glavnih razlika između ISO i ASTM noža, pojavljuje i pri korištenju ISO noža, ali samo kod uzoraka koji su ostvarili visoke vrijednosti apsorbiranih energija, ≥ 300 J i to u području približavanjem nazivnim vrijednostima uređaja. Iz dobivenih rezultata uočeno je da kod ispitivanja koja se približavaju nazivnim vrijednostima uređaja pojava "izbočine" biva sve izraženija.

Cilj rada je bio dokazati da je instrumentiranom Charpy metodom na zavarenim spojevima moguće dobiti mehanička svojstva koja su usporediva sa svojstvima dobivenim statičkim vlačnim ispitivanjem te na temelju tih rezultata dati prosudbu o prihvatljivosti kvalitete zavarenog spoja. Kroz provedena istraživanja te analizom dobivenih rezultata potvrđene su postavljene hipoteze. Daljnjim razvojem metode ispitivanja i načina analize i obrade podataka instrumentirana Charpy metoda bi mogla donijeti određene uštede u odnosu na kombinaciju statičkog vlačnog ispitivanja i klasične Charpy metode pri mjerenju mehaničkih svojstava zavarenih spojeva. Ove uštede bi mogle biti vrlo značajne za pojedine proizvodne pogone, kao što su brodogradilišta gdje se na dnevnoj bazi provodi veliki broj ispitivanja mehaničkih svojstava zavarenih spojeva. Instrumentirana metoda bi u početku mogla imati primjenu kod manje opterećenih dijelova konstrukcija.

Znanstveni doprinos ovoga rada je proširenje mogućnosti instrumentirane Charpy metode i postavljanje novih smjernica za njen daljnji razvoj. Zatim, razvijen je i novi način valorizacije parametra ukupne podatljivosti instrumentiranog Charpy uređaja te procjene dinamičke čvrstoće pri maksimalnoj sili. Uz doprinos razvoju instrumentirane Charpy metode, dan je i novi pristup prosudbi o ocjeni kvalitete zavarenog spoja.

Buduća istraživanja uključuju daljnji razvoj metode procjene podatljivosti ispitnog uređaja gdje je vrlo važno uzeti u obzir i pojavu udubljenja stražnje strane ispitnog uzorka uslijed djelovanja noža, što je djelomično diskutirano i u ovom radu. Pronalaženje ispravnog načina određivanja mehaničkih svojstava pri udarnom opterećenju uključivati će i daljnja istraživanja u smjeru boljeg razumijevanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja, odnosno biti će potreban snažniji razvoj dinamičke teorije plastičnosti. Treba uzeti u obzir da su ispitivanja provedena samo za jedan materijal, čelik oznake API 5L X80, a da bi se dobio neki širi uvid iskoristivosti instrumentirane Charpy metode trebala bi se provesti istraživanja i na drugim skupinama čelika te drugim metalnim materijalima. Iz navedenih zaključaka vidljivo je da instrumentirana Charpy metoda pruža široki spektar mogućnosti za daljnje istraživanje i razvoj.

9. LITERATURA

- [1] Manahan M. P., Siewert P. A.: The History of Instrumented Impact Testing, Pendulum Impact Machines: Procedures and Specimens, ASTM STP 1476., Siewert P. A., Manahan M. P., McCowan N. C., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, p. 3-12, 2006.
- [2] HRN EN ISO 14556:2015, Metalni materijali – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom (V-zarez) – Instrumentirana metoda ispitivanja (ISO 14556:2015; EN ISO 14556:2015), Hrvatski zavod za norme, drugo izdanje, 2015.
- [3] Kobayashi T., Yamamoto I., Niinomi M.: Evaluation of Dynamic Fracture Toughness Parameters by Instrumented Charpy Impact Test. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 24, No. 5, pp. 773-782, (1986).
- [4] Jian F., Fulian D., Chengzhong W.: Experimental study on the material dynamic fracture properties by Instrumented Charpy Impact test with single specimen method. Journal de Physique IV France, Volume 110, Issue 1, pp. 551-557, (2003).
- [5] Tseng M. K., Marcus H. L.: A Single Specimen Determination of J_{Ic} for Aluminum Alloys, Engineering Fracture Mechanics, vol. 16, No. 6, p. 895-903, 1982.
- [6] Lucon E.: Determination of the compliance of NIST Charpy Impact Machines. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 8043, 2015.
- [7] Lucon E., Santoyo R.: A Comparative Analysis of NIST Charpy Machines and Internal Reference Materials. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 8145, 2016.
- [8] Lucon E., McCowan C. N., Santoyo R.: Impact Characterization of 4340 and T200 Steels by Means of Standard, Sub-Size and Miniaturized Charpy Specimens. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note 1858, 2015.

- [9] Lucon E.: Measurement of Dynamic Impact Toughness on Impact-Tested Precracked Charpy Specimens. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 8065, 2015.
- [10] Lucon E.: The Influence of Instrumented Striker Configuration on the Results of Dynamic Toughness Testing. Open report SCK•CEN-BLG-1060, 2008.
- [11] Lucon E., McCowan C. N., Santoyo L. R.: Instrumented Impact Tests: Effects of Machine Variables and Specimen Position. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 37, No. 1, pp. 59-68, (2009).
- [12] Lucon E., Lefrançois S., McCowan C. N., Santoyo R.: Establishment of an International Scale for Instrumented Charpy Testing: comparison between NIST and LNE. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note 1875, 2015.
- [13] McCowan C. M., Splett J. D., Lucon E.: Dynamic Force Measurement: Instrumented Charpy Impact Testing. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6652, 2008.
- [14] Lucon E.: Experimental Assessment of the Equivalent Strain Rate for an Instrumented Charpy Test. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 121, pp. 165-179, (2016).
- [15] Server W. L.: General Yielding of Charpy V-Notch and Precracked Charpy Specimens, Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 100, No. 2, p. 183-188, (1978).
- [16] Green A. P.: The Plastic Yielding of Notched Bars due to Bending, The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, vol.6, p.223-229, 1953.
- [17] Green A. P. and Hundy B. B.: Initial Plastic Yielding in Notch Bend Tests, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 4, p. 128-144, 1956.
- [18] Lianis G. and Ford H.: Plastic Yielding of Single Notched Bars due to Bending, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 7, pp. 1-21, (1958).

- [19] Alexander J. M. and Komoly T. J.: On the Yielding of a Rigid/Plastic Bar with an Izod Notch, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 10, pp. 265-275, 1962.
- [20] Ewing D.J.F.: Calculations on the Bending of Rigid/Plastic Notched Bars. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp. 205-213, (1968).
- [21] Fang J.: Strength and toughness properties of steels under dynamic loading. *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures. Proceedings of the 16th European Conference of Fracture*, Alexandroupolis, Greece, pp. 503-504, July 3–7, 2006.
- [22] Khan I. A., Bhasin V., Chattopadhyay J., Ghosh A. K.: On the equivalence of slip-line fields and work principles for rigid-plastic body in plane strain. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 45, pp. 6416-6435, 2008.
- [23] Lucon E.: Estimating dynamic ultimate tensile strength from instrumented Charpy data, *Materials & Design*, vol. 97, p. 437-443, 2016.
- [24] Kobayashi T.: Niinomi M., Yamamoto I.: What does it tell us? – Computer Aided Instrumented Charpy Impact System, *Recent Advances in Instrumented Charpy Impact Test, Related Papers*, Toyohashi University of Technology, p. 203-2014, 1990.
- [25] Ghoneim M. M., Hammad F. H.: Instrumented impact testing of an irradiated 20MnMoNi55 PVS weld material, *Journal of Nuclear Materials*, vol. 186, p. 196-202, 1992.
- [26] Sreenivasan P. R., Ray S. K., Mannan S. L., Rodriguez P.: Dynamic fracture toughness and Charpy impact properties of an AISI 403 martensitic stainless steel. *Journal of Nuclear Materials*, Volume 228, pp. 338-345, (1996).
- [27] Server W. L., Tetelman A. S.: The use of Pre-cracked Charpy Specimens to Determine Dynamic Fracture Toughness, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 4, No. 4, p. 367-375, 1972.
- [28] Xinping Z., Yaowu S.: Comparative studies of several methods to determine the dynamic fracture toughness of a nuclear pressure vessel steel A508 CL3 with Charpy-size specimen. *International Journal of Fracture*, Vol. 81, pp. 195-204, (1996).

- [29] Kharchenko V. et al.: Experimental investigation of the crack-initiation moment of Charpy specimens under impact loading. *Materiali in Tehnologije*, Vol. 49 (3), pp. 403-408, (2015).
- [30] Chen B. Y., Shi Y. W.: A Comparison of Various Dynamic Elastoplastic Fracture Toughness Evaluating Procedure by Instrumented Impact Test, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 36, No. 1, p. 17-26, 1990.
- [31] Carvalho J.D. et.al.: Evaluation of Dynamic Fracture Mechanics in the AISI 316 Stainless Steel using Instrumented Charpy Impact Testing. *International Nuclear Atlantic Conference-INAC 2007*, September 30 to October 5, 2007., Associacao Brasileira de Energia Nuclear, Santos, Brazil, (2007).
- [32] Tronskar J. P., Mannan M. A., Lai M. O.: Measurement of fracture initiation toughness and crack resistance in instrumented Charpy impact test. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 321-338, (2002).
- [33] Alar Ž., Mandić D., Dugorepec A., Sakoman M.: Application of Instrumented Charpy Method in Characterisation of Materials. *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, Vol 13, No. 3, pp. 479-487. 2015.
- [34] Mandić D., Alar Ž.: Analysis of Compliance for Evaluation of Instrumented Impact Test Data, *International conference on Materials MTECH 2017*. P. 9-15, Zadar, 4.-7. October 2017.
- [35] Siewert T. A., Manahan M. P., McCowan N. C., Holt J. M., Marsh F. J., Ruth E. A.: The History and Importance of Impact Testing, *Pendulum Impact Testing A Century of Progress*, ASTM STP 1380., Siewert T. A., Manahan M. P., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, p. 3-17, 2000.
- [36] Russell Bent S.: Experiments with a New Machine for Testing Materials by Impact, *Pendulum Impact Testing A Century of Progress*, ASTM STP 1380., Siewert T. A., Manahan M. P., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, p. 17-46, 2000.

- [37] Charpy G.: Essay on the Metals Impact Bend Test of Notched Bars, Pendulum Impact Testing A Century of Progress, ASTM STP 1380., Siewert T. A., Manahan M. P., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, p. 46-73, 2000.
- [38] Tóth L., Rossmanith H. P., Siewert T. A.: Historical Background and Development of the Charpy Test, From Charpy to Present Impact Testing, François D., Pineau A., Elsevier Science Ltd. And ESIS Publication 30, Kindlington, Oxford, p. 3-21, 2002.
- [39] Fahey N. H.: The Charpy Impact Test – Its Accuracy and Factors Affecting Test Results, Impact Testing of Metals, ASTM STP 466., Driscoll D. E., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, p. 76-93, 1970.
- [40] Ebert Marko, privatne fotografije. Ebert d.o.o., 2017.
- [41] HRN EN ISO 148-1:2016, Metalni materijali – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – 1. Dio: Metoda ispitivanja (ISO 148-1:2016; EN ISO 148-1:2016), Hrvatski zavod za norme, treće izdanje, 2016.
- [42] Porro F., Trippodo R., Bertozzi R., Garagnani G.: Impact Tester Compliance: Significance, Sensitivity and Evaluation, Charpy Impact Test: Factors and Variables, ASTM STP 1072., Holt J. M., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, p. 7-20, 1990.
- [43] Lucon E., McCowan N. C., Santoyo R. A.: Instrumented Impact Testing: Influence of Machine Variables and Specimen Position, Open report SCK•CEN-BLG-1058, 2008.
- [44] Siewert T. A., Schmieder A. K.: Pendulum Impact Machines: Procedures and Specimens for Verifications, ASTM STP 1248., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1995.
- [45] Lucon E.: Influence of striking edge radius (2 vs. 8 mm) on instrumented Charpy data and absorbed energies, International Journal of Fracture, vol. 153, p. 1-14, 2008.
- [46] Ruth E. A., Vigliotti D. P., Siewert T. A.: Effect of Surface Finish of Charpy Anvils and Striking Bits on Absorbed Energy, Pendulum Impact Machines: Procedures and Specimens for Verifications, ASTM STP 1248., Siewert T. A., Schmieder A. K., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, p. 91-101, 1995.

- [47] Böhme W.: Results of a DVM Round Robin on Instrumented Charpy Testing, From Charpy to Present Impact Testing, François D., Pineau A., Elsevier Science Ltd. And ESIS Publication 30, Kindilington, Oxford, p. 189-196, 2002.
- [48] Vitez I.: Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2006.
- [49] Ireland D. R.: Procedures and Problems Associated with Reliable Control of the Instrumented Impact Test, Instrumented Impact Testing, ASTM STP 563., T.S. DeSisto, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, p. 3-29, 1974.
- [50] Kobayashi T.: Analysis of Impact Properties of A533 Steel for Nuclear Reactor Pressure Vessel by Instrumented Charpy Test, Engineering Fracture Mechanics, vol. 19, No. 1, p. 49-65, 1984.
- [51] Ireland D. R.: Critical Review of Instrumented Impact Testing. Dynamic Fracture Toughness, An International Conference (Cambridge, England: The Welding Institute), p. 47-62, (1977).
- [52] Kalthoff F. J.: Gregor M.: Instrumented Impact Testing of Subsize Charpy V-notch Specimens, Small Specimen Test Technique, ASTM STP 1329, Corwin R. W., Rosinski T. S., van Walle E., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, p. 98-109, 1998.
- [53] Server W. L.: Impact Three-Point Bend Testing for Notched and Precracked Specimens, Journal of Testing and Evaluation, vol. 6, No. 1, p. 29-34, 1978.
- [54] Deutchman A. D., Michels W. A., Wilson C. E.: Machine Design Theory and Practice. Macmillan, New York, 1975.
- [55] Kobayashi T.: On the information about Fracture characteristics obtained from Instrumented Impact Test of A533 Steel for Reactor Pressure Vessel, Engineering Fracture Mechanics, vol. 19, No. 1, p. 67-79, 1984.
- [56] Broek D.: Correlation between stretched zone size and fracture toughness. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 6, p. 173-181, 1974.

- [57] Rice J. R.: A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, pp. 379-386, 1968.
- [58] Begley J. A., Landes J. D.: The J integral as a Fracture Criterion, Fracture Toughness: Part II, ASTM STP 514, Corten H. T., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, p. 1-21, 1972.
- [59] Zhang X., Shi Y.: Comparative studies of several methods to determine the dynamic fracture toughness of a nuclear pressure vessel steel A508 CL3 with Charpy-size specimen. *International Journal of fracture*, vol. 81, p. 195-204, 1996.
- [60] Sreenivasan P. R.: Instrumented impact testing- Accuracy, reliability and predictability of data. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 49, No. 5, p. 677-696, 1996.
- [61] Yu M. H., Ma G. W., Qiang H. F., Zhang Y. Q.: Generalized Plasticity. Springer-Verlag, Heidelberg, 2006.
- [62] Kachanov L. M.: Fundamentals of the Theory of Plasticity. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1971.
- [63] Alfiredić I.: Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma. Sveučilišni udžbenik, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [64] Prandtl L.: Über die Härte plastischer Körper. *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-phys.Kl.* S. 74-85, 1920.
- [65] Hill R.: The mathematical theory of plasticity. Oxford University Press Inc., New York, 1950.
- [66] Neuber H.: Kerbspannungslehre-Theorie der Spannungskonzentration Genaue Berechnung der Festigkeit. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heildeberg GmbH, 2001.
- [67] Tetelman A. S., McEvily A. J.: Fracture of Structural Materials. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967.

- [68] Wilshaw T. R., Pratt P. L.: On the Plastic Deformation of Charpy Specimens Prior to General Yield, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 14, pp. 7-19, 1966.
- [69] Wilshaw T. R.: The Effect of Temperature and Strain-Rate on the Deformation and Fracture of Mild Steel Charpy Specimens, Department of Physical Metallurgy, Imperial College, University of London, 1964.
- [70] Wu S. X., Mai Y. W., Cotterell B.: Slip-line field solutions of three-point bend specimens with deep notches, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 29, No. 8, p. 557-564, 1987.
- [71] Kobayashi T., Takai K., Maniwa H.: Transition Behaviour and Evaluation of Fracture Toughness. *Transaction ISIJ*, Vol 7, 1967.
- [72] ASM Handbook: Volume 12 Fractography. ASM International, USA, 2009.
- [73] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala. Sveučilišni udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [74] O'Brien A., Guzman C.: *Welding handbook: Materials and Applications*, Part 1, American Welding Society, Ninth edition, vol. 4, 2011.
- [75] http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=694
- [76] O'Brien A.: *Welding handbook: Welding Processes*, Part 1, American Welding Society, Ninth edition, vol. 2, 2004.
- [77] HRN EN ISO 15607:2004, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Opća pravila (ISO 15607:2003; EN ISO 15607:2003), Hrvatski zavod za norme.
- [78] HRN EN ISO 15609-1:2008, Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Specifikacija postupka zavarivanja – 1. Dio: Elektrolučno zavarivanje (ISO 15609-1:2004; EN ISO 15609-1:2004), Hrvatski zavod za norme.

- [79] HRN EN ISO 15614-1:2017, Provjera osposobljenosti zavarivača – Zavarivanje taljenjem – 1. Dio: Čelici (ISO 9606-1:2012, uključujući Cor 1:2012; EN ISO 9606-1:2013), Hrvatski zavod za norme.
- [80] HRN EN ISO 9606-1:2017, Specifikacija I kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale – Ispitivanje postupka zavarivanja – 1. Dio: Elektrolučno I plinsko zavarivanje čelika I elektrolučno zavarivanje nikla I legura nikla (ISO 15614-1:2017; EN ISO 15614-1:2017), Hrvatski zavod za norme.
- [81] HRN EN ISO 6892-1:2016, Metalni materijali – Vlačno ispitivanje – 1. Dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi (ISO 6892-1:2016; EN ISO 6892-1:2016), Hrvatski zavod za norme.
- [82] HRN EN ISO 6507-1:2008, Metalni materijali – Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu – 1. Dio: Ispitna metoda (ISO 6507-1:2005; EN ISO 6507-1:2005), Hrvatski zavod za norme.
- [83] HRN EN ISO 9015-1:2012, Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje tvrdoće – 1. Dio: Mjerenje tvrdoće elektrolučno zavarenih spojeva (ISO 9015-1:2001; EN ISO 9015-1:2011), Hrvatski zavod za norme.
- [84] HRN EN ISO 9016:2013, Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Ispitivanje udarnoga rada loma – Položaj ispitnog uzorka, položaj zareza i ispitivanje (ISO 9016:2012; EN ISO 9016:2012), Hrvatski zavod za norme.
- [85] HRN EN ISO 6520-1:2008, Zavarivanje i srodni procesi – Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – 1. Dio: Zavarivanje taljenjem (ISO 6520-1:2007; EN ISO 6520-1:2007), Hrvatski zavod za norme.
- [86] HRN EN ISO 5817:2014, Zavarivanje – Zavareni spojevi nastali taljenjem u čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (osim zavarivanja elektronskim snopom i laserom) – Razine kvalitete s obzirom na nepravilnosti (ISO 5817:2003+Cor 1:2006; EN ISO 5817:2007), Hrvatski zavod za norme.
- [87] Fang J.: Strength and Toughness Properties of Steels under Dynamic Loading. Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures, pp. 503-510. Proceedings of the 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, Greece, July 3–7, 2006.

ŽIVOTOPIS

Davor Mandić rođen je 1983. godine u Virovitici. U Puli pohađa osnovnu i srednju tehničku školu koju završava sa stečenim zvanjem strojarškog tehničara. Godine 2001. upisuje studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu gdje je i diplomirao 2009. Godine na Studiju Inženjerstva materijala te stječe akademski naziv magistar inženjer strojarstva.

U listopadu 2009. godine zapošljava se u Centru za istraživanje materijala Metris u Puli kao voditelj laboratorija za mehanička ispitivanja. Za vrijeme rada u Centru Metris pohađa niz tečajeva za rad na ispitnoj opremi te vođenju laboratorija. Isto tako sudjeluje u realizaciji više EU projekata, od kojih je najznačajniji projekt Metris Plus, IPA II – prekogranična suradnja. Godine 2011. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu upisuje poslijediplomski doktorski studij smjera Materijali. U razdoblju od 2011. do 2014. godine sudjeluje u izvođenju nastave kolegija Karakterizacija materijala na Visoko-tehničkoj poslovnoj školi, Politehnika Pula. Godine 2016. zapošljava se u Uljanik Poslovno informacijski sustavi d.o.o. kao voditelj projekta na poslovima projektiranja strojarskih instalacija.

Član je Hrvatskog društva za materijale i tribologiju i Društva za tehniku zavarivanja – Istra. Služi se engleskim jezikom u govoru i pismu te pasivno njemačkim jezikom.

BIOGRAPHY

Davor Mandić was born in Virovitica in 1983. He finished elementary and high school in Pula as a mechanical technician. In 2001 he enrolled in a study at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb where he graduated in 2009 from the Study of Material Engineering and obtained his master's degree in Mechanical Engineering.

In October 2009 he started working at the Metris Research Centre in Pula as the head of a laboratory for mechanical testing. During his work at Metris Centre, he attends a series of courses for testing equipment and conducting the laboratories. He also participates in the realization of several EU projects, most notably the Metris Plus project, IPA II – cross-border cooperation. In 2011 at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb he enrolled in postgraduate doctoral studies of Materials Science. In the period from 2011 to 2014 he participates in the teaching of the course Characterization of materials at the College of applied sciences, Polytechnic Pula. In 2016 he is employed in Uljanik Business Information Systems Ltd. As the project manager for design of mechanical systems.

He is a member of Croatian materials and tribology society and Welding society – Istra.

He is fluent in English and has a comprehensive knowledge of German.

PRILOG I – Mehanička svojstva osnovnog materijala

Tablica P.I-1. Mehanička svojstva osnovnog materijala, RD-L

	Mehanička svojstva	
Broj mjerenja	$R_{P0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²
1	534,9	663,5
2	533,9	654,8
3	546,1	674,9
4	542,5	665,8
5	547,4	665,7
6	537,9	669,9
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	$540,45 \pm 5$	$665,76 \pm 6,16$
Standardna devijacija, s	5,73	6,72

Tablica P.I-2. Mehanička svojstva osnovnog materijala, TD-L

	Mehanička svojstva	
Broj mjerenja	$R_{P0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²
1	526,8	665,1
2	534,2	673,8
3	526,8	660,6
4	541,7	662,4
5	536,6	670,4
6	531,3	676,9
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	$532,9 \pm 4,73$	$668,2 \pm 5,93$
Standardna devijacija, s	5,82	6,52

PRILOG II – Tvrdća zavarenoga spoja

Tablica P.II-1. Tvrdća u području lica zavara

Položaj otiska	Broj otiska	Dijagonala otiska d_{sr} , mm	HV10	Srednja vrijednost, $\overline{HV10}$	Standardna devijacija, s
Osnovni materijal	1	0,299	206	214,5	7,56
	2	0,290	218		
	3	0,289	220		
Zona utjecaja topline	4	0,304	198	206,5	11,57
	5	0,302	201		
	6	0,289	220		
Metal zavara	7	0,295	211	208,5	2,89
	8	0,298	207		
	9	0,298	206		
Zona utjecaja topline	10	0,294	212	201,1	12,31
	11	0,300	204		
	12	0,313	188		
Osnovni materijal	13	0,303	199	203,2	3,94
	14	0,301	202		
	15	0,298	207		

Tablica P.II-2. Tvrdoća u području korijena zavora

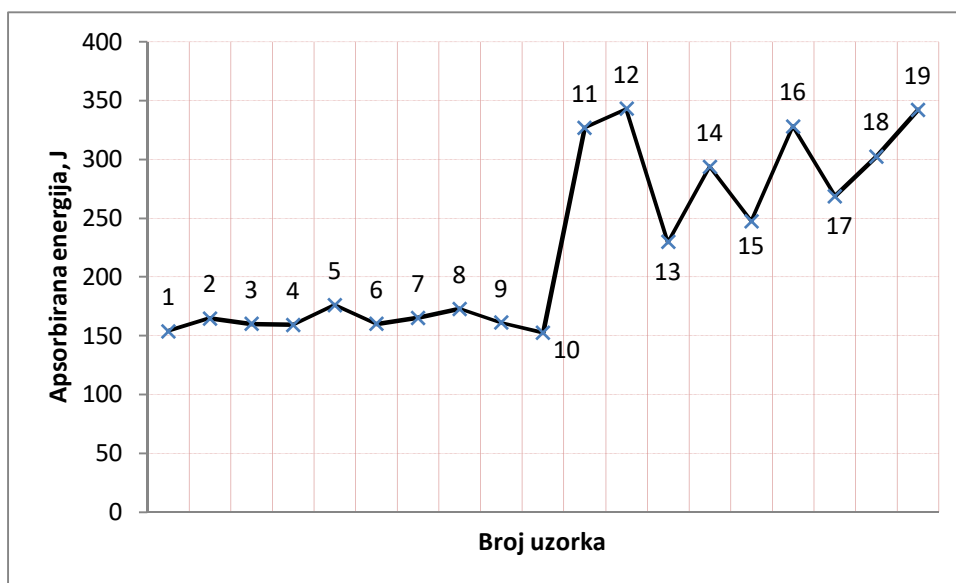
Položaj otiska	Broj otiska	Dijagonala otiska d_{sf} , mm	HV10	Srednja vrijednost, $\bar{x}$	Standardna devijacija, s
Osnovni materijal	16	0,309	192	191,1	1,67
	17	0,312	189		
	18	0,310	191		
Zona utjecaja topline	19	0,306	196	184,8	11,91
	20	0,326	172		
	21	0,314	186		
Metal zavora	22	0,313	187	189,4	1,80
	23	0,312	188		
	24	0,310	191		
Zona utjecaja topline	25	0,301	202	189,1	16,74
	26	0,328	170		
	27	0,306	196		
Osnovni materijal	28	0,306	196	195,4	0,43
	29	0,307	195		
	30	0,307	195		

PRILOG III – Udarni rad loma zavarenoga spoja

Tablica P.III-1. Udarni rad loma, ploča 2D

Broj uzorka	Orijentacija uzorka	Temperatura okoline $\vartheta,^{\circ}\text{C}$	Udarni rad loma KV_2	Srednja vrijednost $\bar{x}$	Standardna devijacija, s	Tip krivulje prema HRN EN ISO 14556:2015
1	Metal zavara	21°C	153,92	162,67	7,48	F
2			164,76			F
3			160,15			F
4			159,40			F
5			176,15			F
6			160,19			F
7			165,36			F
8			173,00			F
9			161,19			F
10			152,59			F
11	Zona utjecaja topline		327,12	322,75	20,49	F
12			342,97			F
13			229,73			F
14			293,67			F
15			247,63			F
16			328,04			F
17			268,83			F
18			302,39			F
19			342,34			F

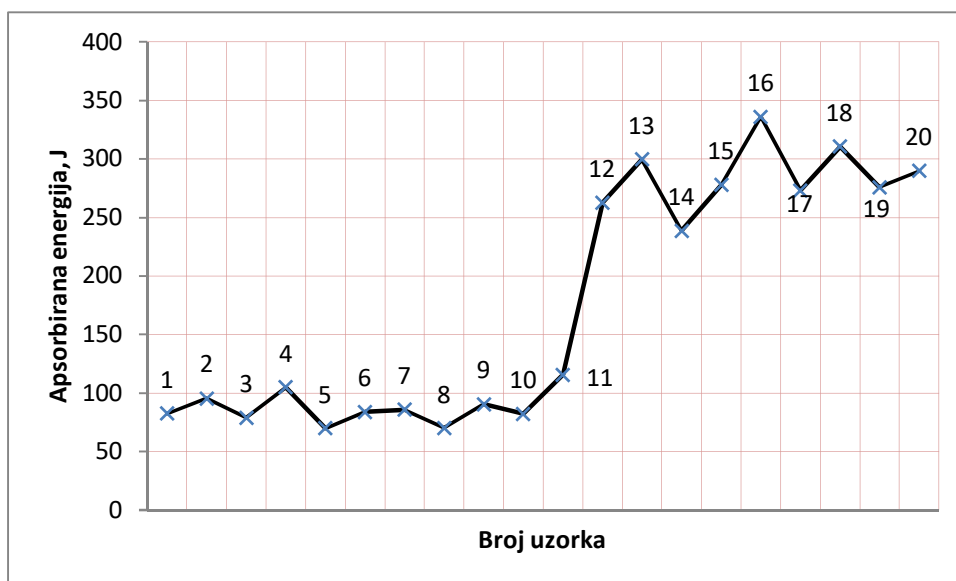
Slika P.III-1. Dijagram ispitivanja udarnog rada loma, ploča 2D



Tablica P.III-2. Udarni rad loma, ploča 3L

Broj uzorka	Orijentacija uzorka	Temperatura okoline ϑ , °C	Udarni rad loma KV_2	Srednja vrijednost $\bar{x}$	Standardna devijacija, s	Tip krivulje prema HRN EN ISO 14556:2015
1	Metal zavara	21°C	82,39	82,10	8,42	F
2			95,46			F
3			79,04			F
4			104,83			F
5			69,81			F
6			83,82			F
7			85,65			F
8			70,06			F
9			90,39			F
10			82,36			F
11			115,66			F
12	Zona utjecaja topline		262,65	297,84	23,21	F
13			299,73			F
14			238,77			F
15			277,88			F
16			335,97			F
17			273,08			F
18			310,56			F
19			275,85			F
20			289,83			F

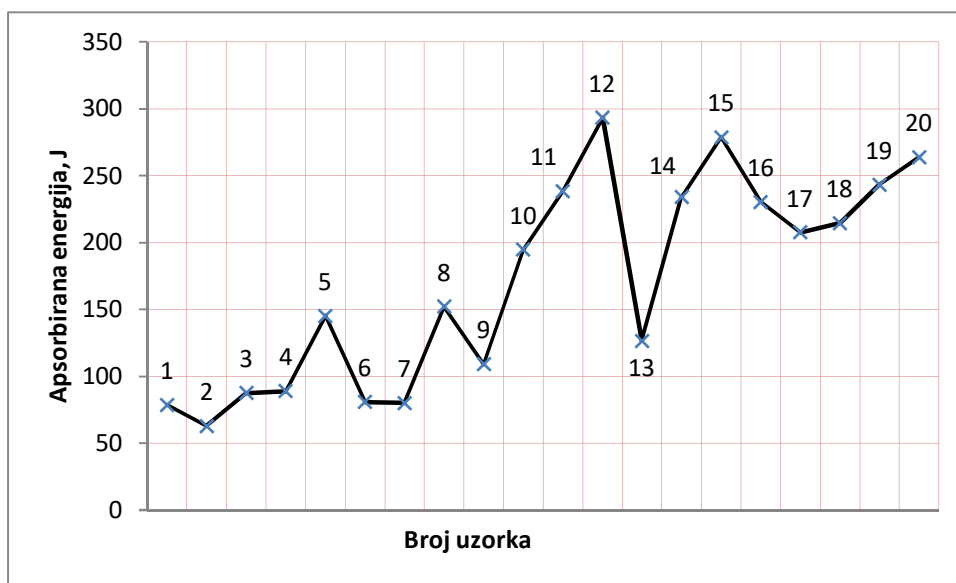
Slika P.III-2. Dijagram ispitivanja udarnog rada loma, ploča 3L



Tablica P.III-3. Udarni rad loma, ploča 4L

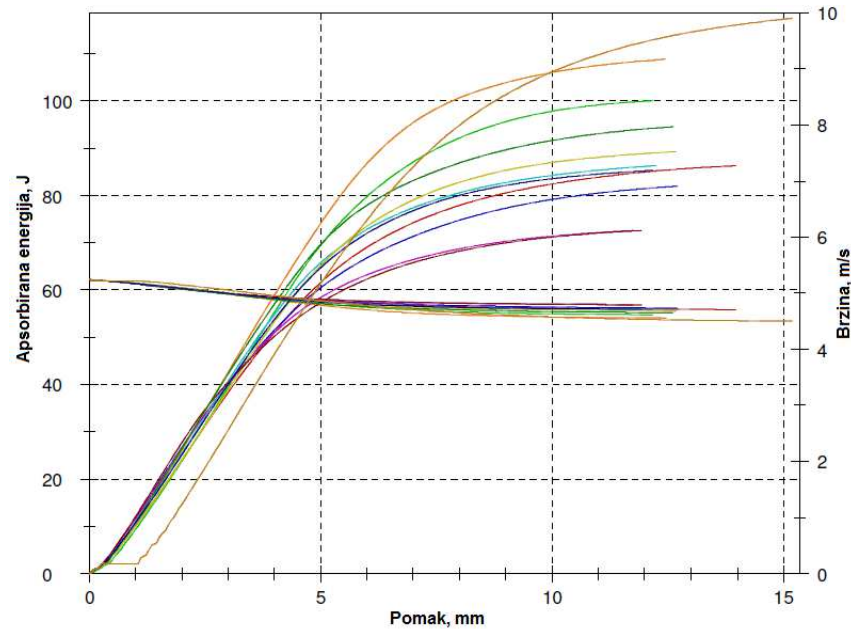
Broj uzorka	Orijentacija uzorka	Temperatura okoline ϑ , °C	Udarni rad loma KV_2	Srednja vrijednost $\bar{x}$	Standardna devijacija, s	Tip krivulje prema HRN EN ISO 14556:2015
1	Metal zavara	21°C	78,65	79,81	9,29	F
2			62,92			F
3			87,62			F
4			88,94			F
5			145,23			F
6			80,71			F
7			80,07			F
8			152,14			F
9			108,97			F
10			194,73			F
11	Zona utjecaja topline		238,47	225,00	13,23	F
12			293,38			F
13			126,41			F
14			233,95			F
15			278,75			F
16			230,33			F
17			207,61			F
18			214,59			F
19			243,28			F
20			263,83			F

Slika P.III-3. Dijagram ispitivanja udarnog rada loma, ploča 4L

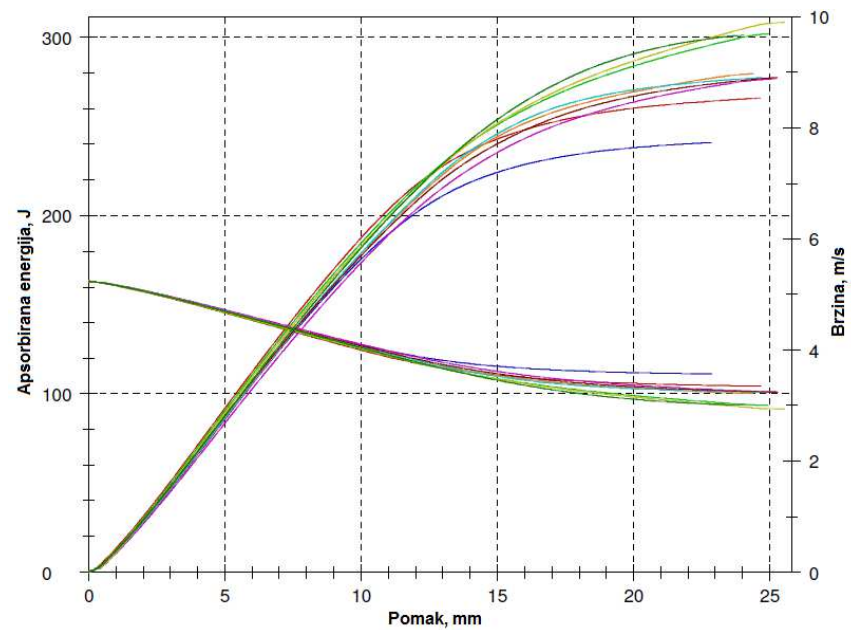


PRILOG IV – Dijagrami apsorbirana energija – pomak - brzina

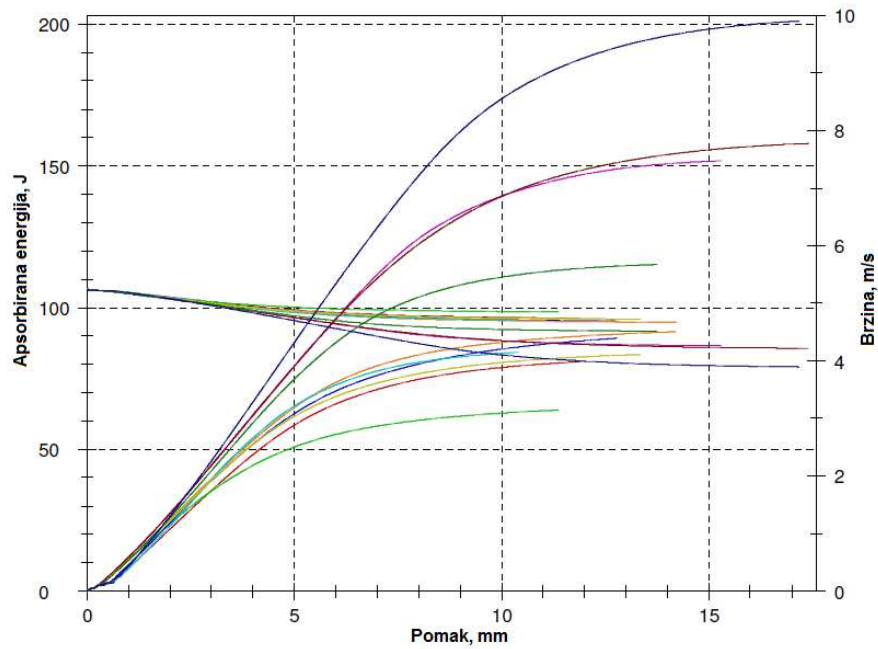
Slika P.IV-1. Dijagram promjene apsorbirane energije i brzine ispitivanja obzirom na pomak kod metala zavora, ploča 3L



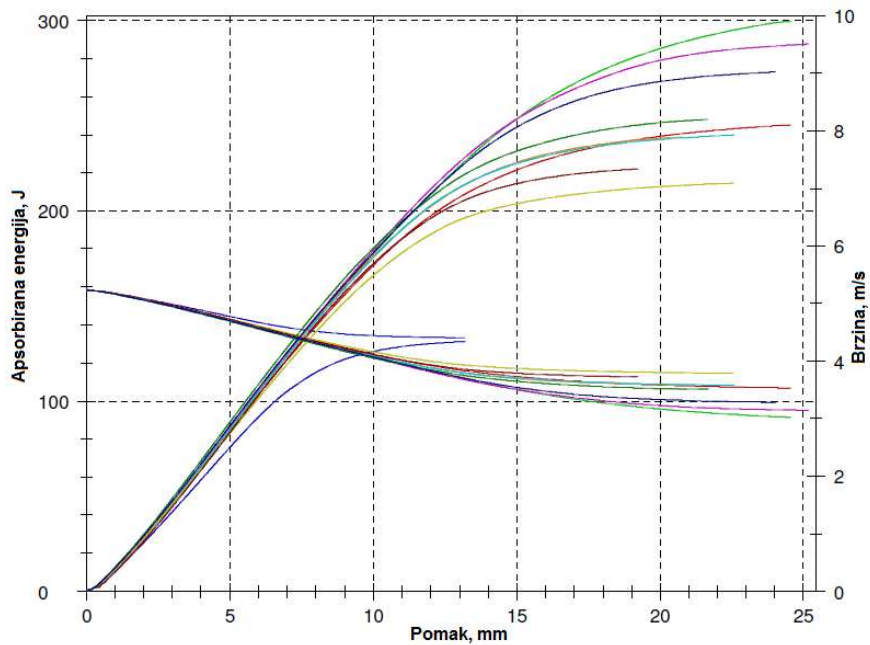
Slika P.IV-2. Dijagram promjene apsorbirane energije i brzine ispitivanja obzirom na pomak kod zone utjecaja topline, ploča 3L



Slika P.IV-3. Dijagram promjene apsorbirane energije i brzine ispitivanja obzirom na pomak kod metala zavora, ploča 4L

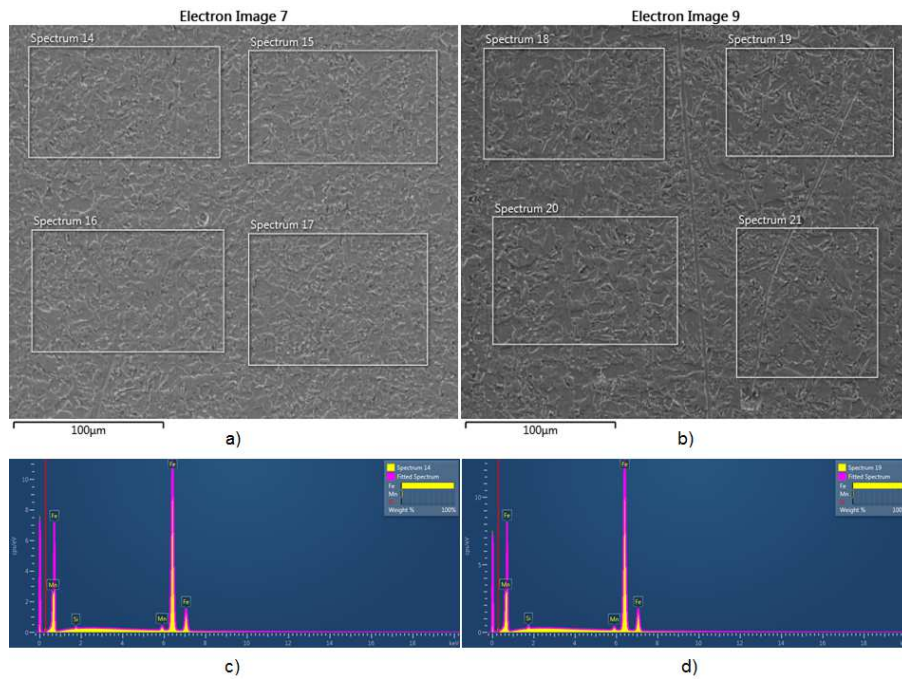


Slika P.IV-4. Dijagram promjene apsorbirane energije i brzine ispitivanja obzirom na pomak kod zone utjecaja topline, ploča 4L

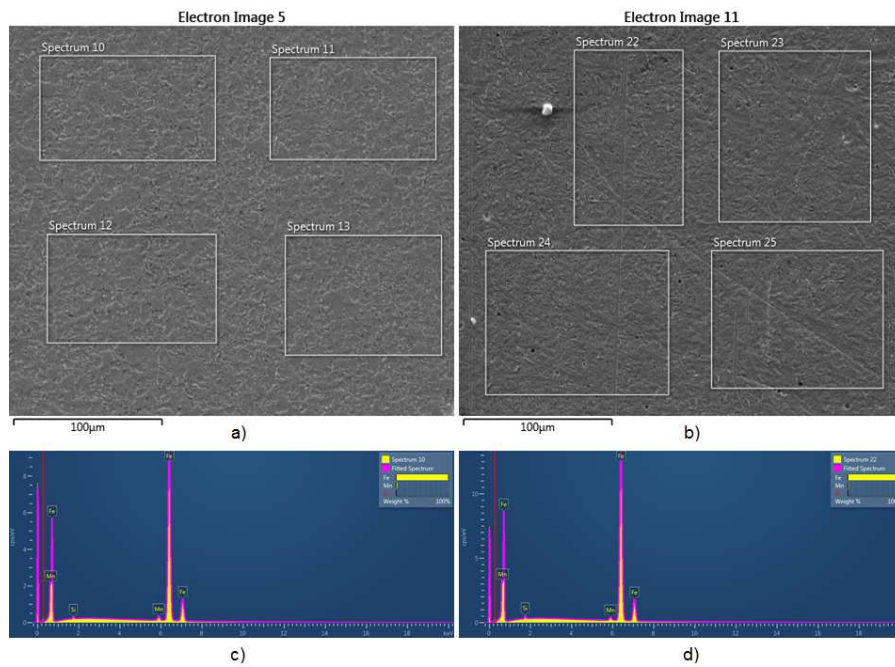


PRILOG V – EDS površinska analiza zavarenoga spoja

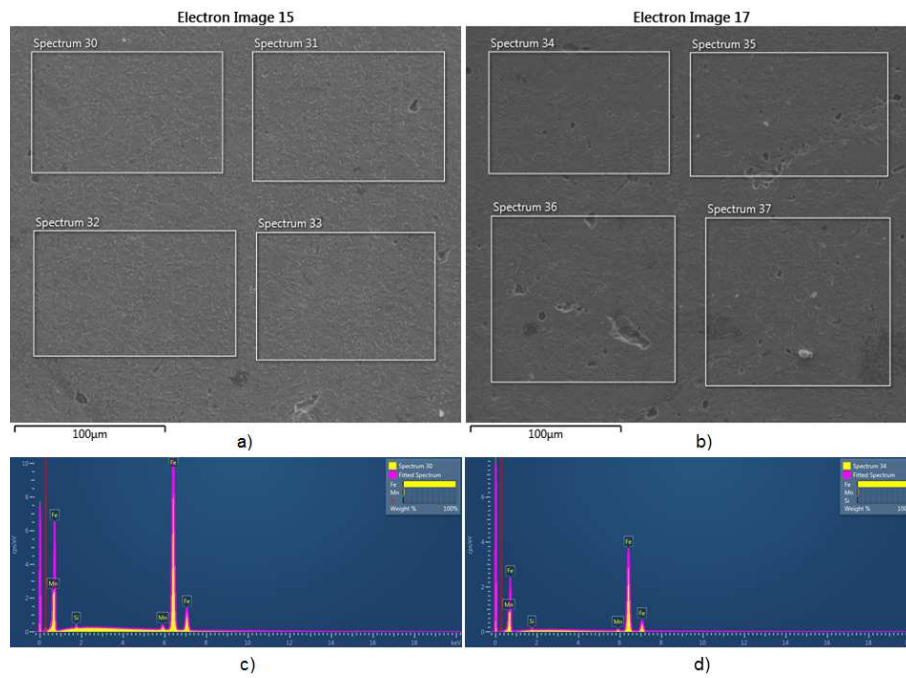
Slika P.V-1. Ploča 1D. Zona utjecaja topline a) i c). Metal zavara b) i d)



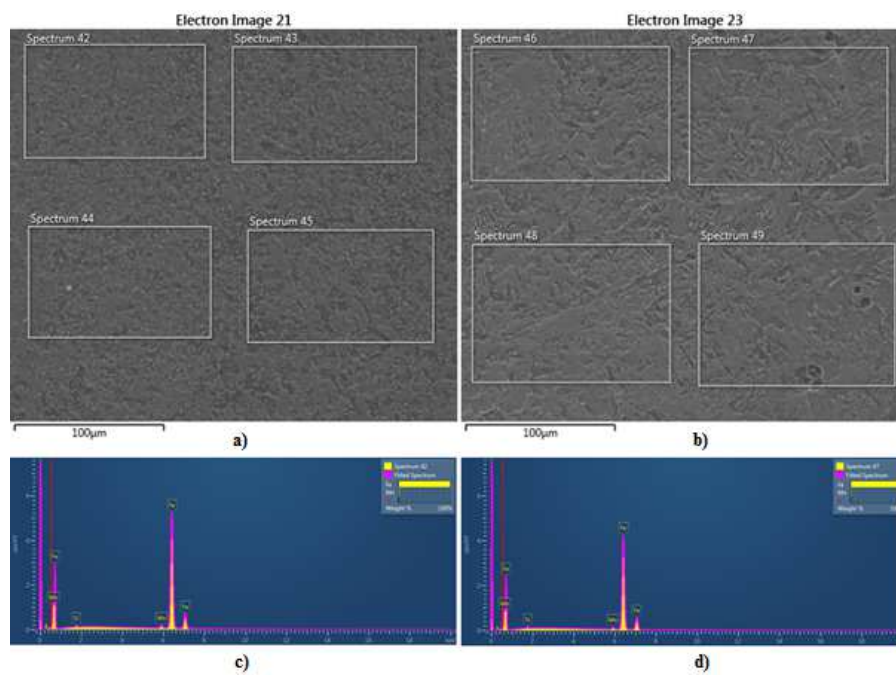
Slika P.V-2. Ploča 2D. Zona utjecaja topline a) i c). Metal zavara b) i d)



Slika P.V-3. Ploča 3L. Zona utjecaja topline a) i c). Metal zavara b) i d)



Slika P.V-4. Ploča 4L. Zona utjecaja topline a) i c). Metal zavara b) i d)

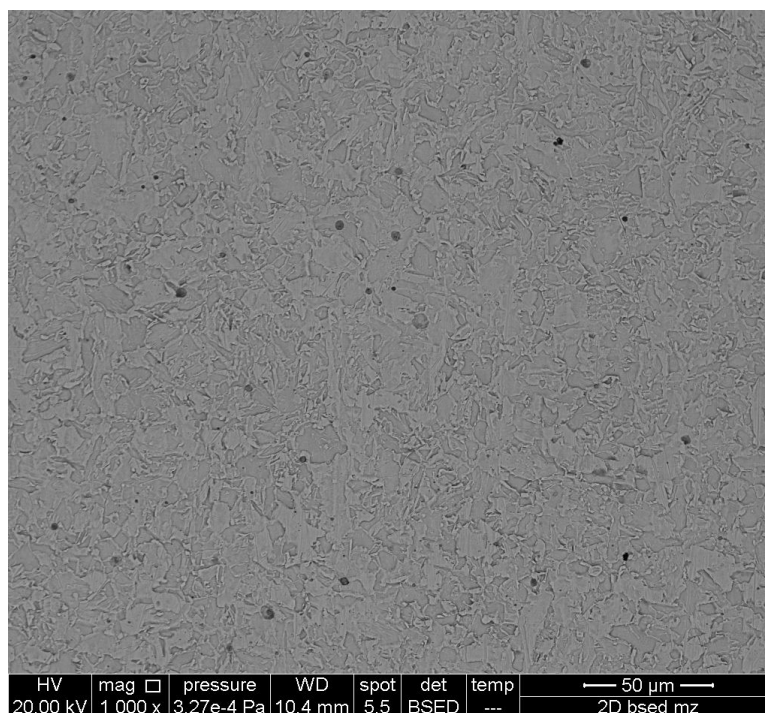


PRILOG VI – Mikrostruktura zavarenoga spoja

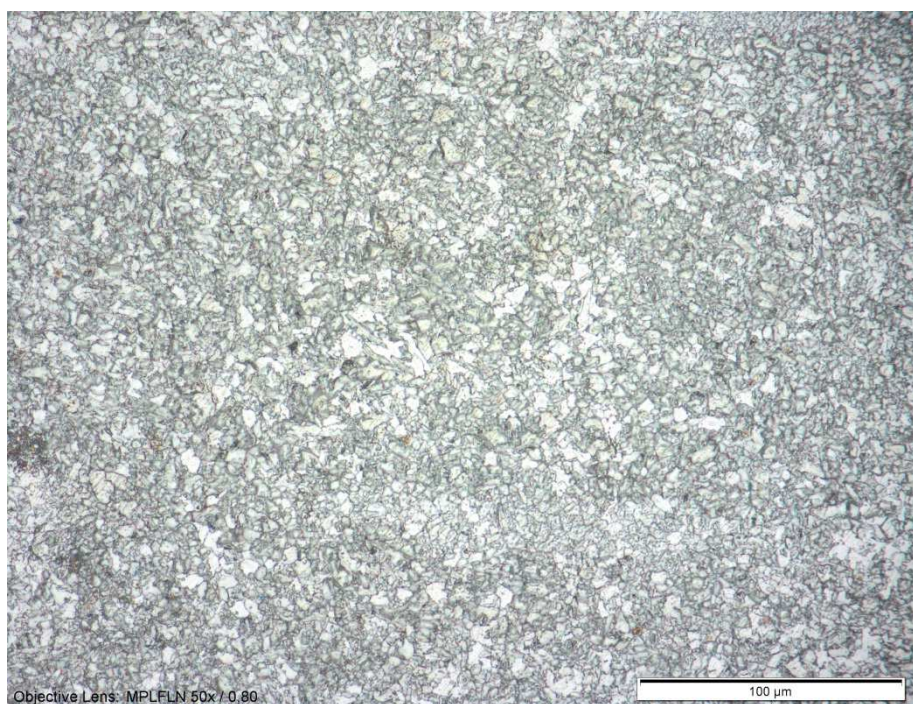
Slika P.VI-1. Mikrostruktura metala zavara, ploča 2D. Svjetlosni mikroskop



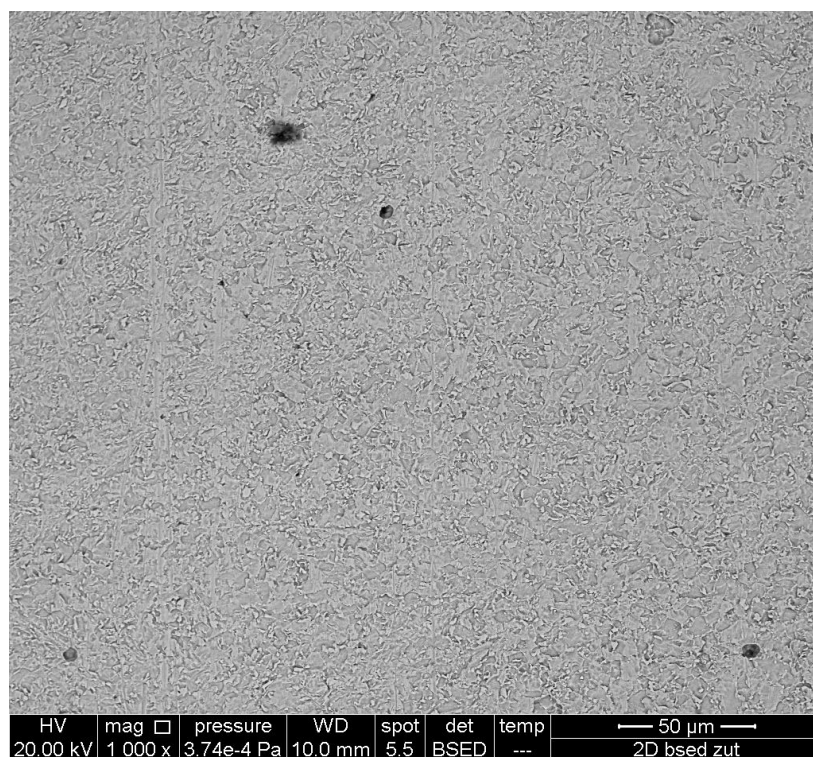
Slika P.VI-2. Mikrostruktura metala zavara, ploča 2D. FESEM



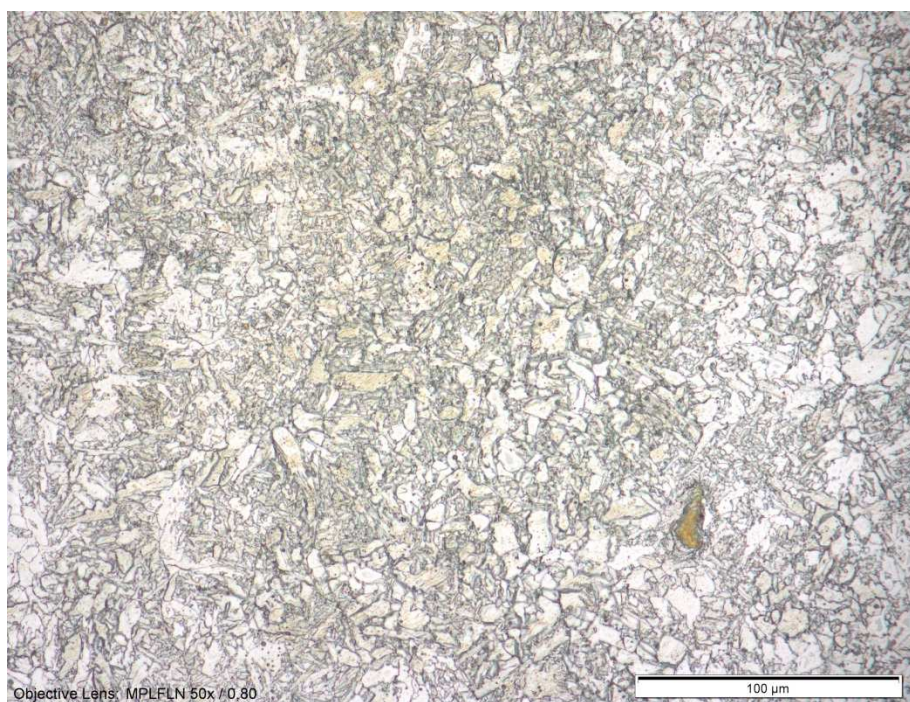
Slika P.VI-3. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 2D. Svjetlosni mikroskop



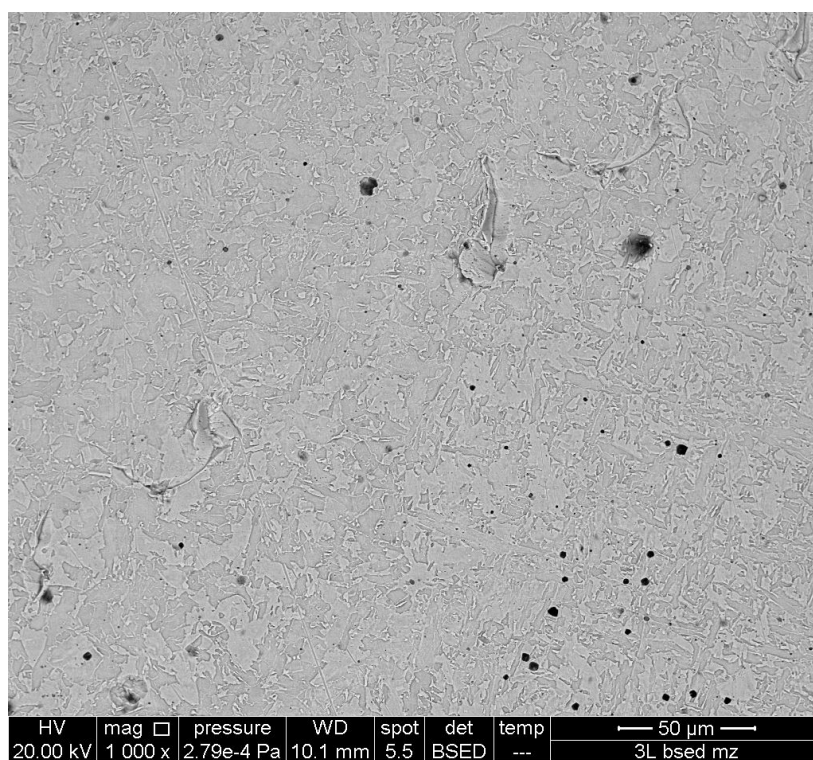
Slika P.VI-4. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 2D. FESEM



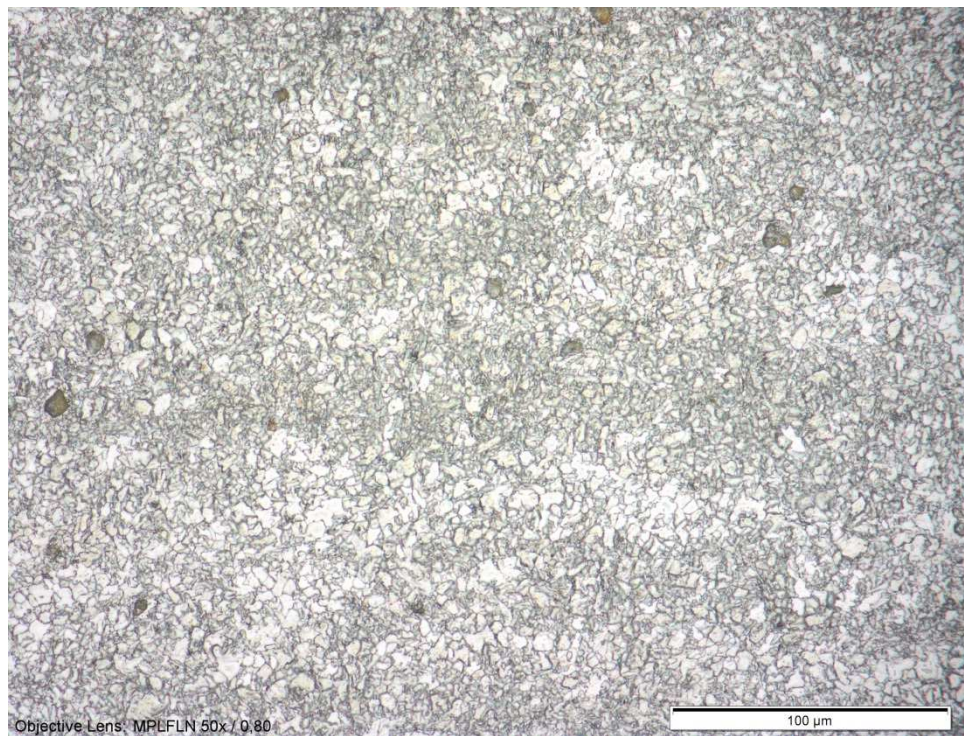
Slika P.VI-5. Mikrostruktura metala zavara, ploča 3L. Svjetlosni mikroskop



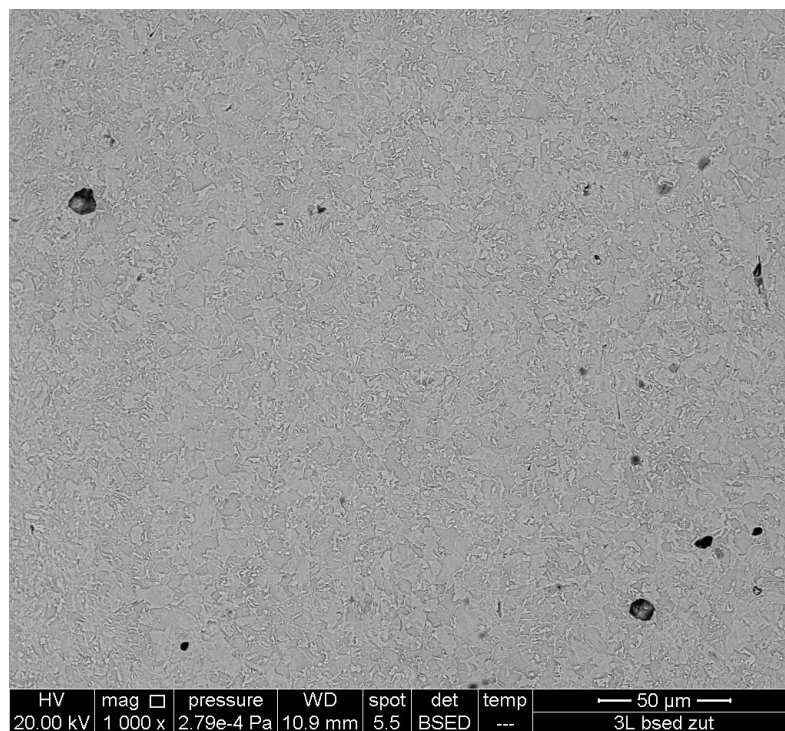
Slika P.VI-6. Mikrostruktura metala zavara, ploča 3L. FESEM



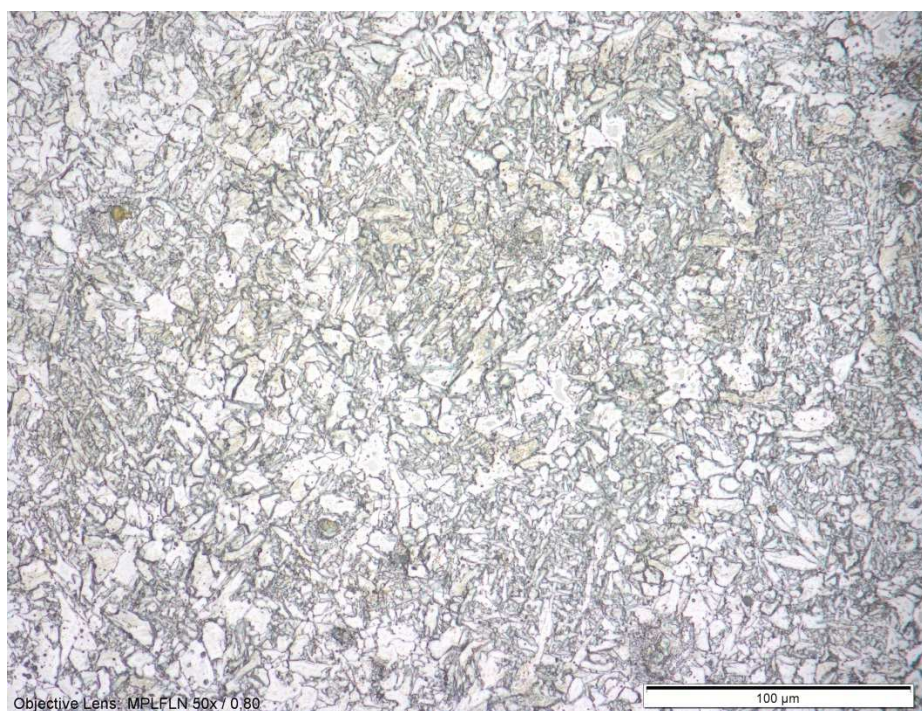
Slika P.VI-6. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 3L. Svjetlosni mikroskop



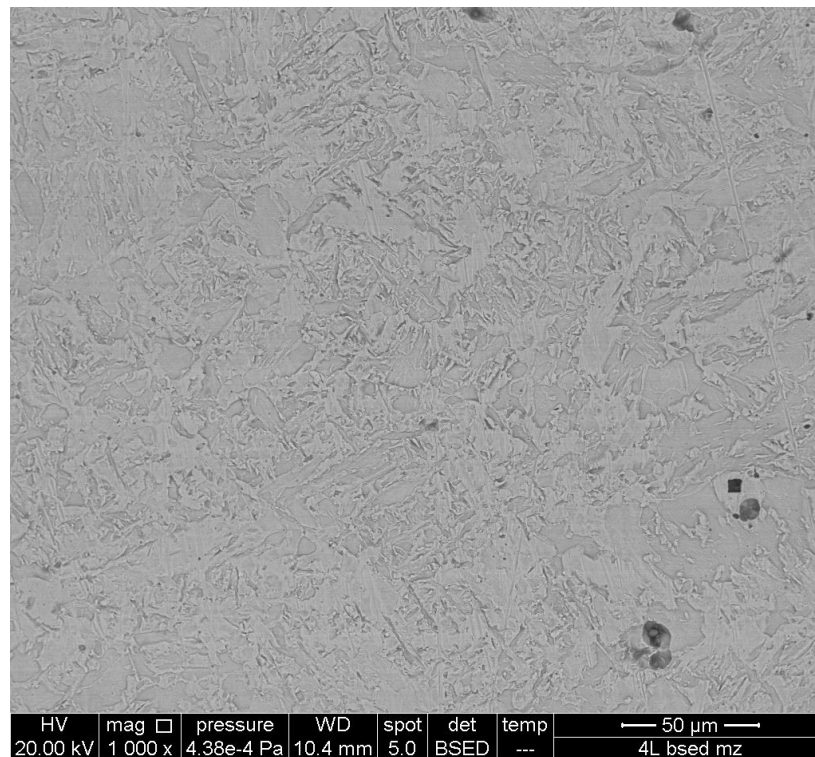
Slika P.VI-7. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 3L. FESEM



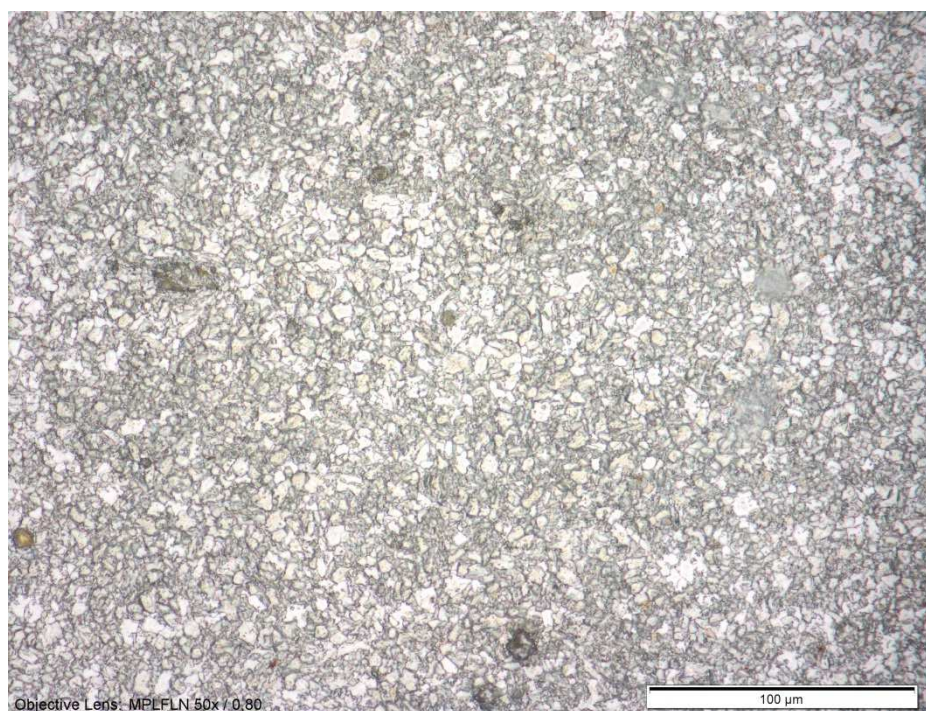
Slika P.VI-8. Mikrostruktura metala zavara, ploča 4L. Svjetlosni mikroskop



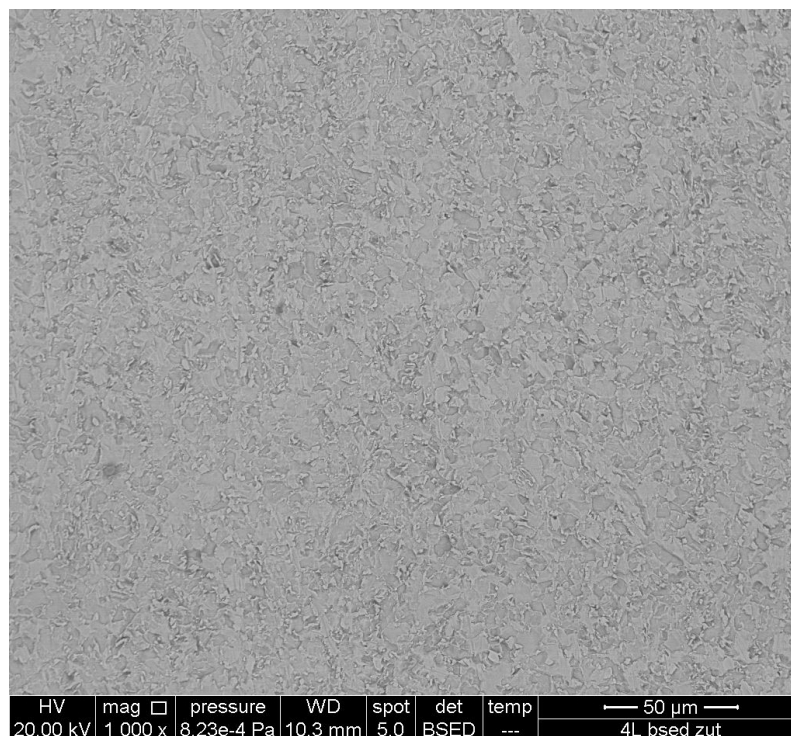
Slika P.VI-9. Mikrostruktura metala zavara, ploča 4L. FESEM



Slika P.VI-10. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 4L. Svjetlosni mikroskop

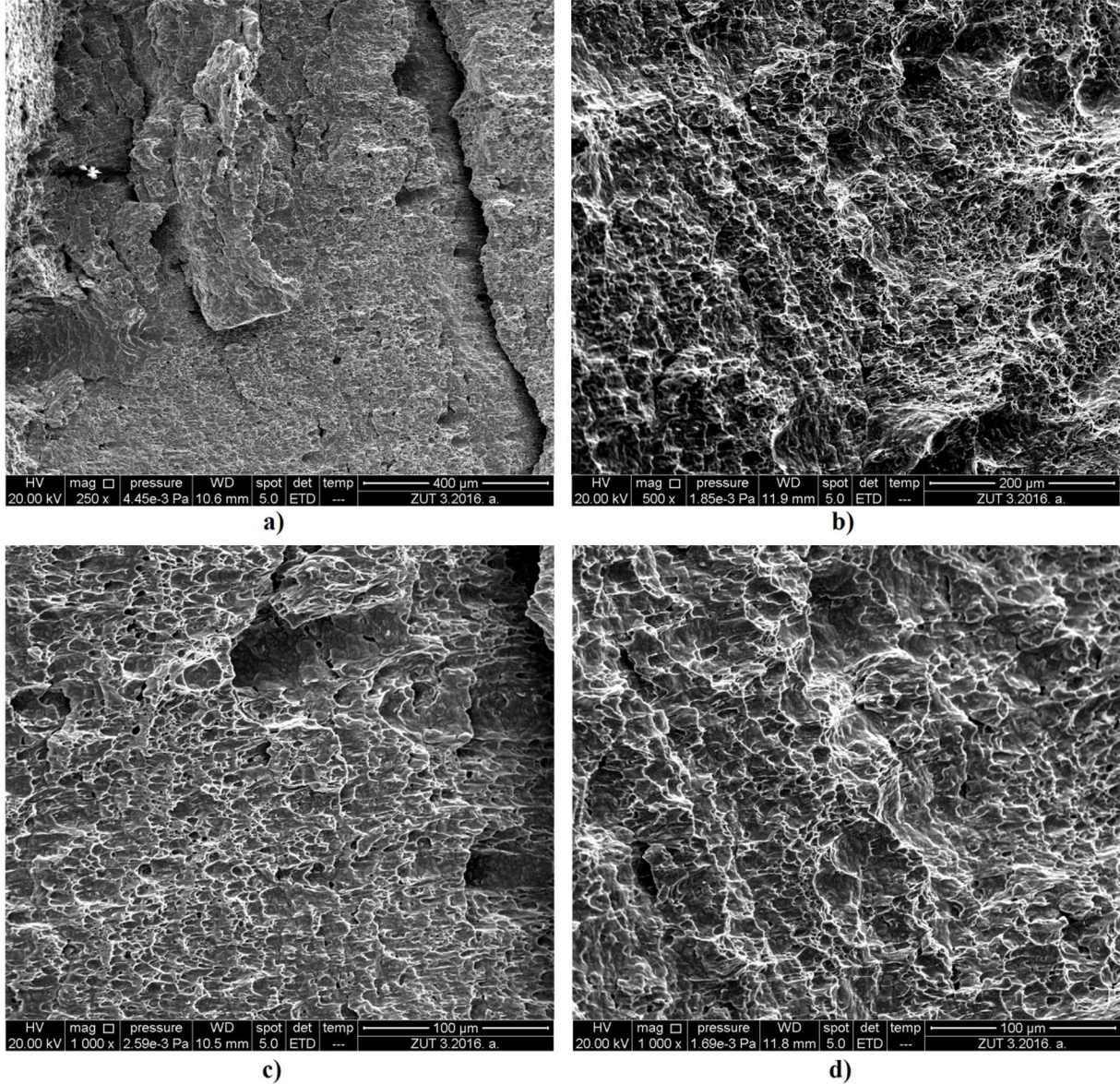


Slika P.VI-11. Mikrostruktura zone utjecaja topline, ploča 4L. FESEM

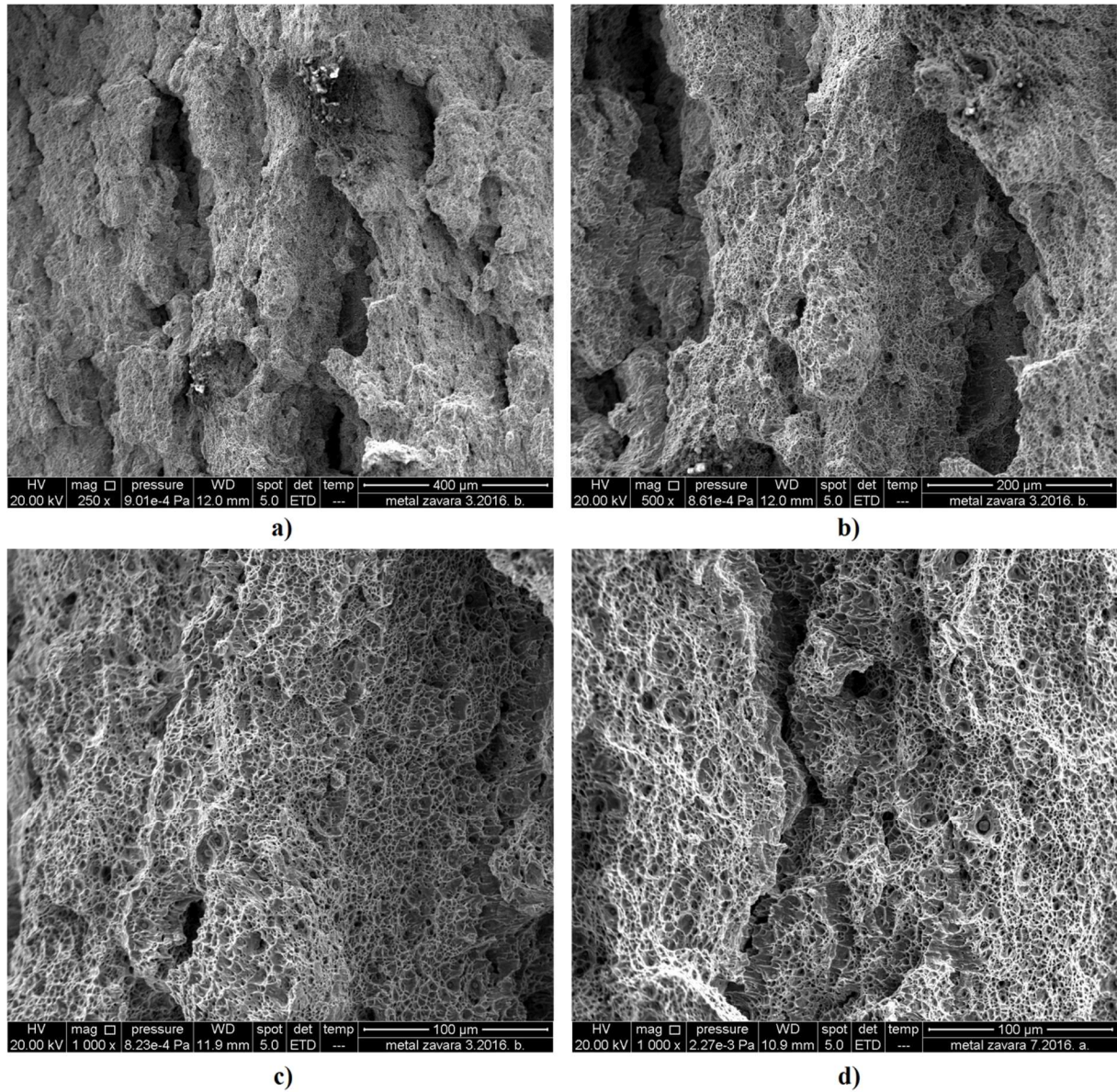


PRILOG VII – Prijelomne površine zavarenoga spoja

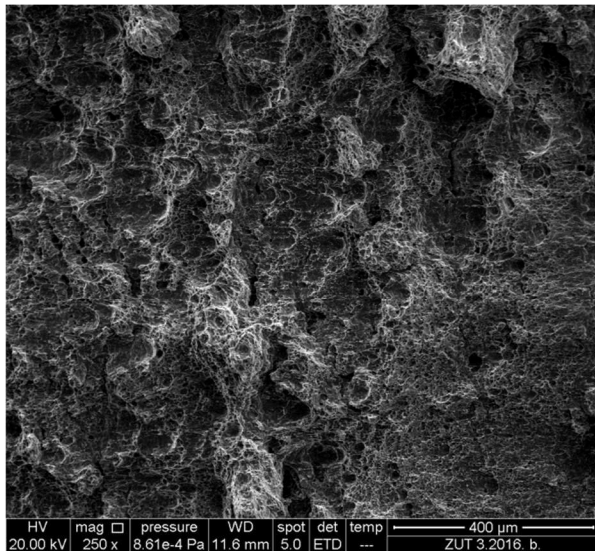
Slika P.VII-1. Prijelomna površina zone utjecaja topline, ploča 2D



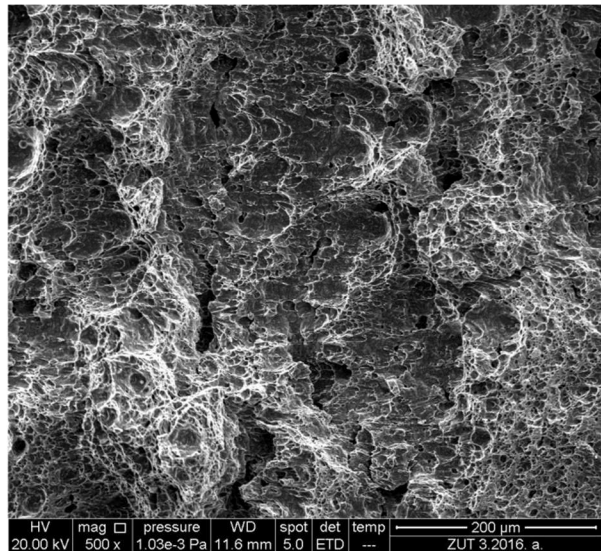
Slika P.VII-2. Prijelomna površina metala zavara, ploča 3L



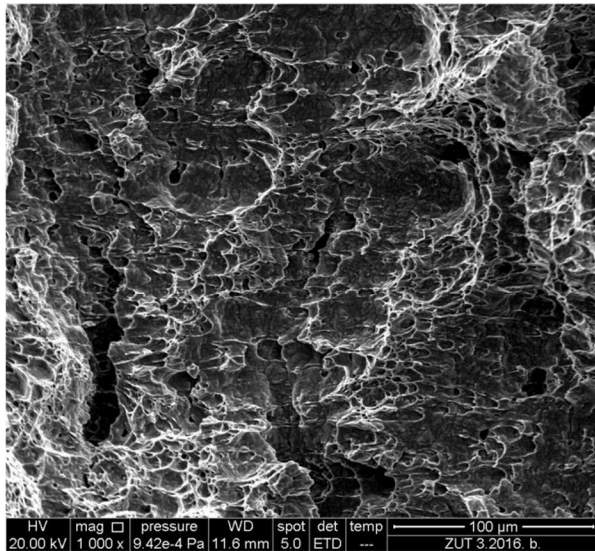
Slika P.VII-3. Prijelomna površina zone utjecaja topline, ploča 3L



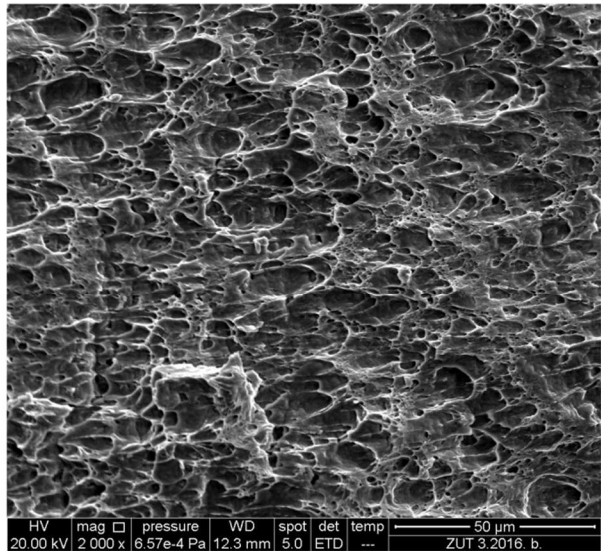
a)



b)

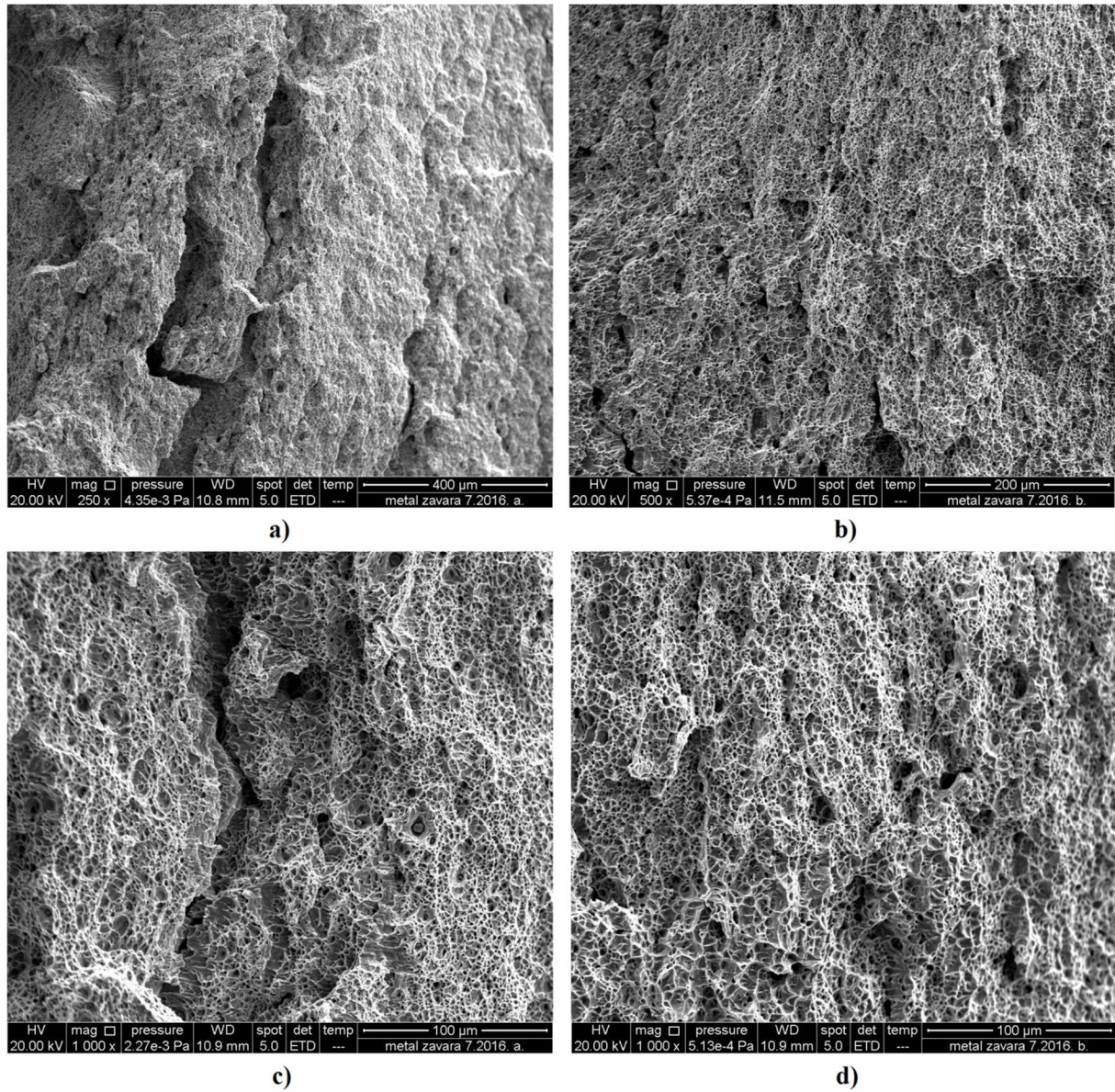


c)

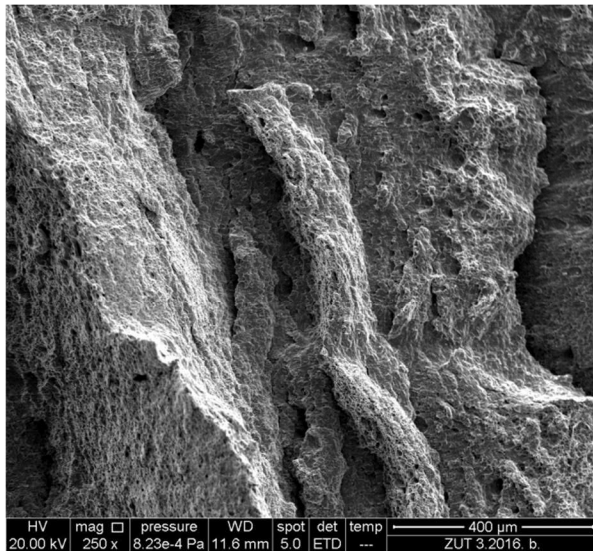


d)

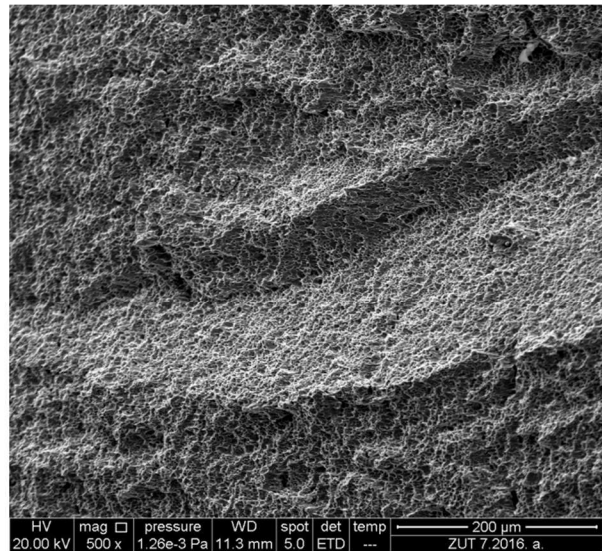
Slika P.VII-4. Prijelomna površina metala zavara, ploča 4L



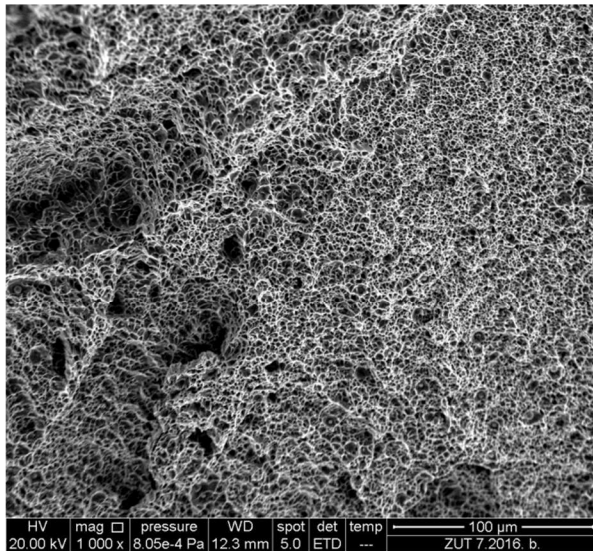
Slika P.VII-5. Prijelomna površina zone utjecaja topline, ploča 4L



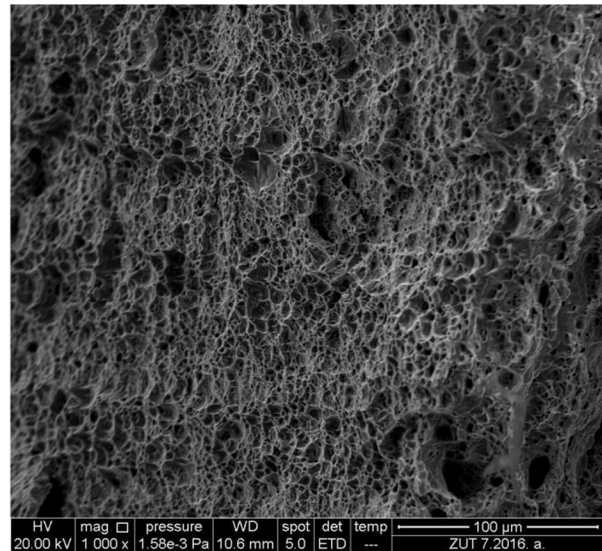
a)



b)



c)



d)

PRILOG VIII – Izmjerene vrijednosti instrumentiranom metodom

Tablica P.VIII-1. Karakteristične sile osnovnog materijala

		Karakteristične sile		
Broj mjerenja	Temperatura okoline $\vartheta, ^\circ\text{C}$	$F_{\text{gyd}}, \text{kN}$	F_{md}, kN	F_{f}, kN
1	21	13,13	19,50	19,50
2		13,72	19,93	19,49
3		13,13	19,99	19,99
4		13,15	19,62	19,61
5		13,44	19,67	19,64
6		13,52	19,70	19,70
7		13,22	19,89	19,85
8		13,44	19,97	19,94
9		13,22	19,80	19,80
10		13,60	19,81	19,79
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	13,35	19,78	19,73
Standardna devijacija, s	-	0,21	0,16	0,17

Tablica P.VIII-2. Mehanička svojstva osnovnog materijala

	Mehanička svojstva		
Broj mjerenja	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{Id} , kJ/m ²
1	556,22	633,75	1829,18
2	581,23	647,52	1953,17
3	556,19	649,50	1940,67
4	557,09	637,61	1734,13
5	569,32	639,20	1931,90
6	572,76	640,26	1867,15
7	560,00	646,35	1850,62
8	569,37	648,86	1971,88
9	559,97	643,41	1936,39
10	576,15	643,83	1729,14
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	565,83	643,03	1874,42
Standardna devijacija, s	9,10	5,22	88,62

Tablica P.VIII-3. Karakteristične sile metala zavara, ploča 2D

		Karakteristične sile		
Broj mjerenja	Temperatura okoline $\vartheta, ^\circ\text{C}$	$F_{\text{gyd}}, \text{kN}$	F_{md}, kN	F_{i}, kN
1	21	12,17	17,67	17,64
2		11,52	18,03	15,25
3		12,12	18,20	18,19
4		12,59	18,23	18,22
5		12,12	18,14	18,13
6		12,25	17,81	17,78
7		12,81	17,83	17,61
8		12,05	17,91	17,82
9		12,48	17,83	17,77
10		12,10	17,72	17,715
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	12,22	17,93	17,61
Standardna devijacija, s	-	0,35	0,20	0,86

Tablica P.VIII-4. Mehanička svojstva metala zavara, ploča 2D

	Mehanička svojstva		
Broj mjerenja	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{Id} , KJ/m ²
1	515,59	574,80	1363,12
2	488,08	586,20	1545,19
3	513,51	591,88	1452,24
4	533,39	592,87	1487,68
5	513,49	589,77	1570,66
6	519,00	579,43	1315,20
7	542,73	580,10	1278,38
8	510,51	582,28	1541,21
9	528,74	579,87	1437,72
10	512,63	576,34	1399,32
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	517,76	583,35	1439,07
Standardna devijacija, s	14,87	6,44	100,03

Tablica P.VIII-5. Karakteristične sile zone utjecaja topline, ploča 2D

		Karakteristične sile		
Broj mjerenja	Temperatura okoline ϑ , °C	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_i , kN
1	21	12,24	19,64	19,63
2		12,63	19,92	19,89
3		12,06	19,11	19,09
4		12,64	19,88	19,87
5		12,59	19,63	19,62
6		12,14	20,04	20,02
7		12,29	19,26	19,24
8		12,07	19,84	19,79
9		12,44	20,11	20,10
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	12,34	19,71	19,69
Standardna devijacija, s	-	0,23	0,34	0,34

Tablica P.VIII-6. Mehanička svojstva zone utjecaja topline, ploča 2D

	Mehanička svojstva		
Broj mjerenja	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{Id} , KJ/m ²
1	518,58	638,29	1796,08
2	535,12	647,16	1948,88
3	510,94	620,91	1804,12
4	535,43	645,79	1974,23
5	533,29	637,91	1884,31
6	514,20	651,10	1932,40
7	520,52	625,87	1840,80
8	511,34	644,63	1929,39
9	527,04	653,42	1930,82
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	522,94	640,56	1893,44
Standardna devijacija, s	10,05	11,05	65,30

Tablica P.VIII-7. Karakteristične sile metala zavara, ploča 3L

		Karakteristične sile		
Broj mjerenja	Temperatura okoline $\vartheta, ^\circ\text{C}$	$F_{\text{gyd}}, \text{kN}$	F_{md}, kN	F_{i}, kN
1	21	9,83	14,61	14,56
2		9,80	15,97	15,96
3		11,71	14,99	14,99
4		10,52	16,68	16,64
5		10,73	15,18	15,14
6		10,23	15,42	15,42
7		9,72	14,92	14,91
8		9,68	15,79	15,79
9		9,93	15,92	15,90
10		10,48	15,01	14,99
11		9,86	16,26	16,25
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	10,22	15,52	15,50
Standardna devijacija, s	-	0,610021	0,646778	0,648496

Tablica P.VIII-8. Karakteristične sile zone utjecaja topline, ploča 3L

		Karakteristične sile		
Broj mjerenja	Temperatura okoline ϑ , °C	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_i , kN
1	21	12,61	20,71	20,70
2		12,65	20,59	20,58
3		12,34	19,92	19,92
4		11,98	19,88	19,86
5		12,05	19,60	19,59
6		12,90	19,94	19,92
7		12,84	20,53	20,15
8		12,27	19,86	19,85
9		12,83	20,11	20,10
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	12,49	20,12	20,07
Standardna devijacija, s	-	0,348281	0,388072	0,361

Tablica P.VIII-9. Mehanička svojstva zone utjecaja topline, ploča 3L

	Mehanička svojstva		
Broj mjerenja	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{Id} , KJ/m ²
1	534,27	672,77	1948,59
2	535,97	669,27	1857,62
3	522,83	647,41	1815,14
4	507,57	646,10	1838,12
5	510,54	637,00	1777,14
6	546,55	648,14	1779,89
7	544,00	667,33	1817,11
8	519,86	645,60	1755,63
9	543,58	653,45	1969,88
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	529,46	654,11	1839,90
Standardna devijacija, s	14,75	12,56	74,83

Tablica P.VIII-10. Karakteristične sile metala zavara, ploča 4L

		Karakteristične sile		
Broj mjerenja	Temperatura okoline ϑ , °C	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_{i} , kN
1	21	9,19	13,84	13,80
2		9,98	12,96	12,78
3		9,90	15,36	15,27
4		10,52	14,56	14,56
5		11,41	17,58	17,58
6		10,00	16,59	16,53
7		11,08	14,33	14,31
8		11,81	17,75	17,67
9		10,74	17,06	16,98
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	10,51	15,55	15,50
Standardna devijacija, s	-	0,831657	1,748524	1,769

Tablica P.VIII-11. Karakteristične sile zone utjecaja topline, ploča 4L

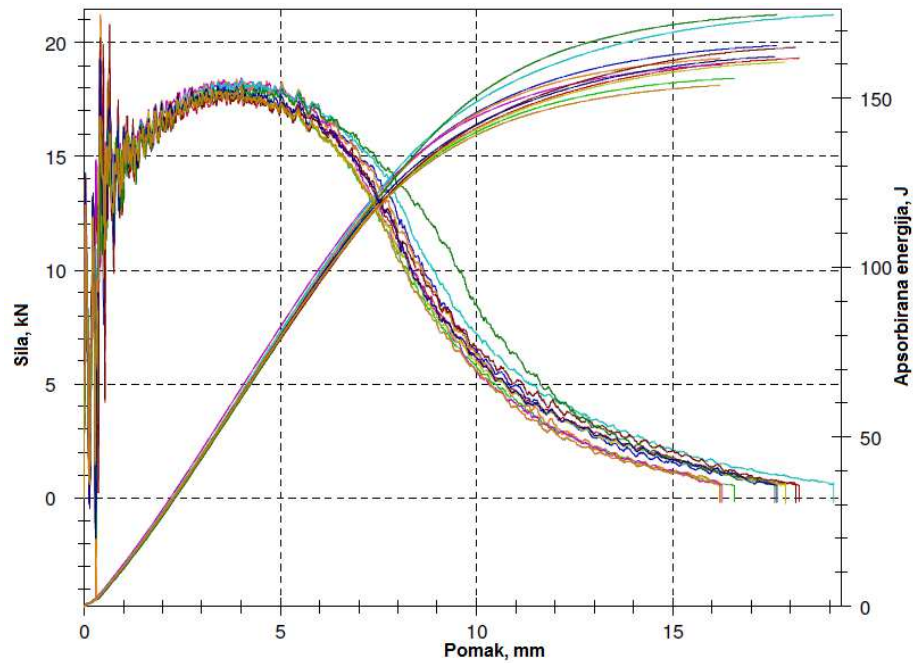
		Karakteristične sile		
Broj mjerenja	Temperatura okoline ϑ , °C	F_{gyd} , kN	F_{md} , kN	F_i , kN
1	21	11,92	19,35	19,34
2		12,78	19,67	19,67
3		12,67	21,04	21,06
4		12,89	20,09	20,09
5		12,92	20,12	20,10
6		13,07	19,80	19,77
7		11,82	18,87	18,85
8		12,37	19,70	19,70
9		13,03	20,16	20,14
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	-	12,60	19,86	19,85
Standardna devijacija, s	-	0,468075	0,60291	0,611265

Tablica P.VIII-12. Mehanička svojstva zone utjecaja topline, ploča 4L

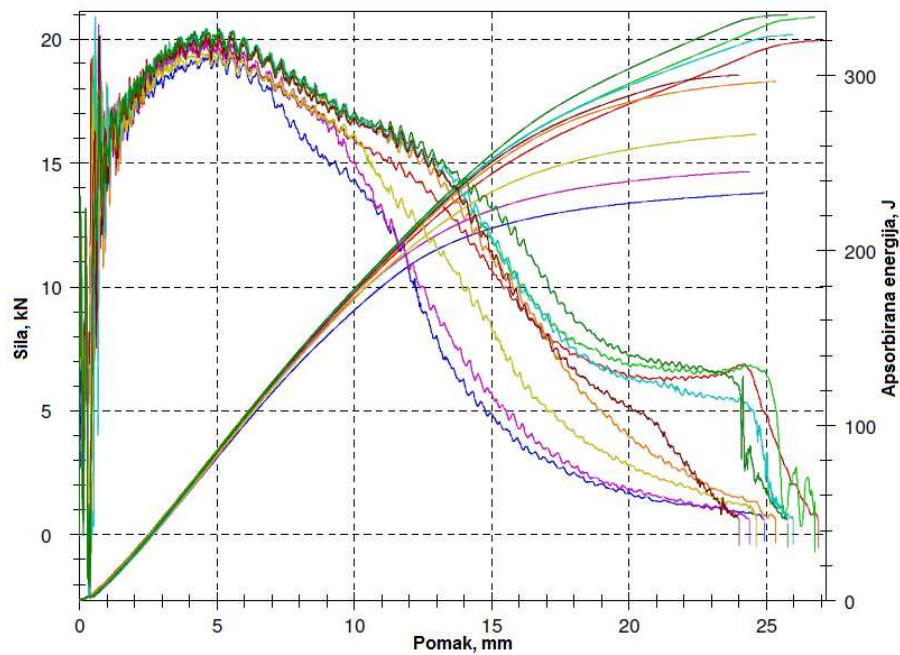
	Mehanička svojstva		
Broj mjerenja	R_{gyd} , N/mm ²	R_{md} , N/mm ²	J_{Id} , KJ/m ²
1	505,10	628,97	1734,14
2	541,46	639,15	1931,90
3	536,61	683,78	1859,33
4	546,03	652,89	1850,62
5	547,26	653,73	1971,88
6	553,75	643,35	1936,39
7	500,86	613,33	1729,17
8	523,98	639,97	2010,13
9	552,05	643,99	1928,88
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	534,12	644,35	1883,60
Standardna devijacija, s	19,78	19,24	99,27

PRILOG IX – Dijagrami sila – pomak – apsorbirana energija

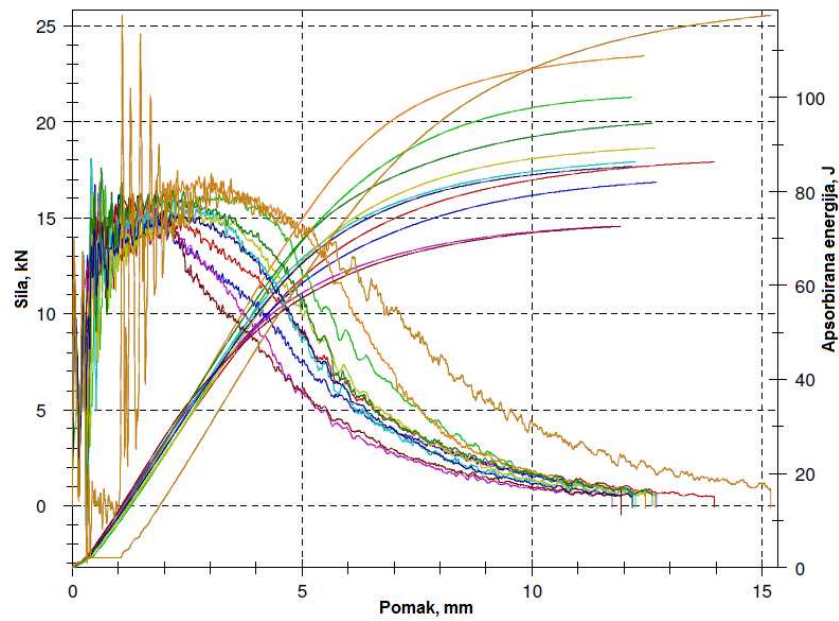
Slika P.IX-1. Promjena sile i apsorbirane energije obzirom na pomak, metal zavara, ploča 2D



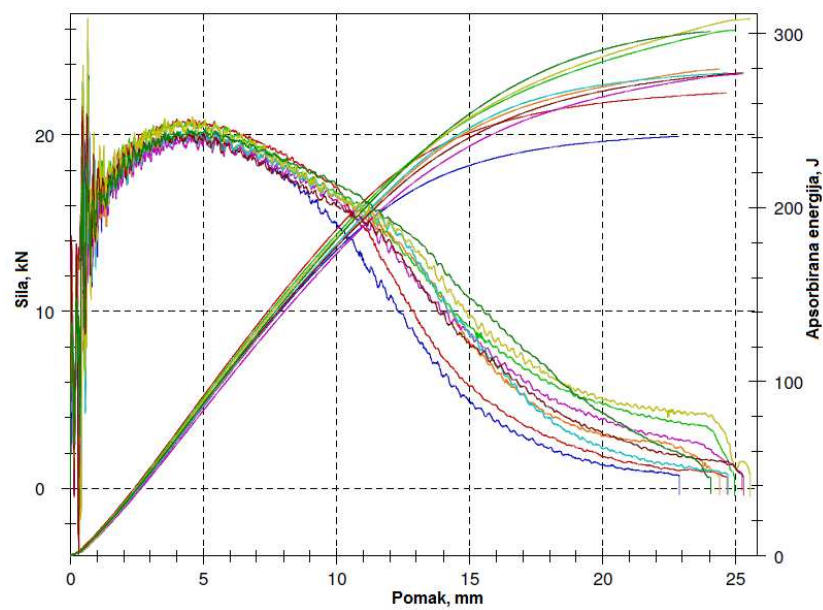
Slika P.IX-2. Promjena sile i apsorbirane energije obzirom na pomak, zona utjecaja topline, ploča 2D



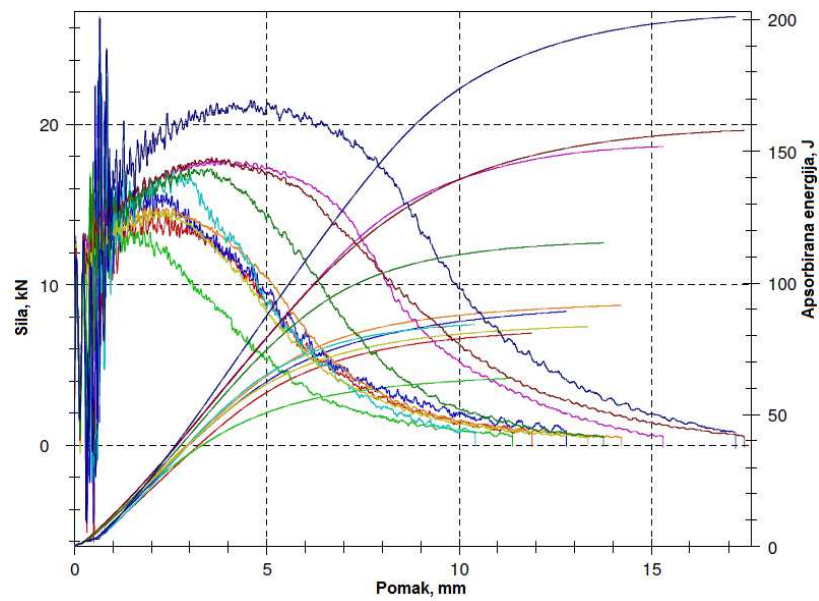
Slika P.IX-3. Promjena sile i apsorbirane energije obzirom na pomak, metal zavara, ploča 3L



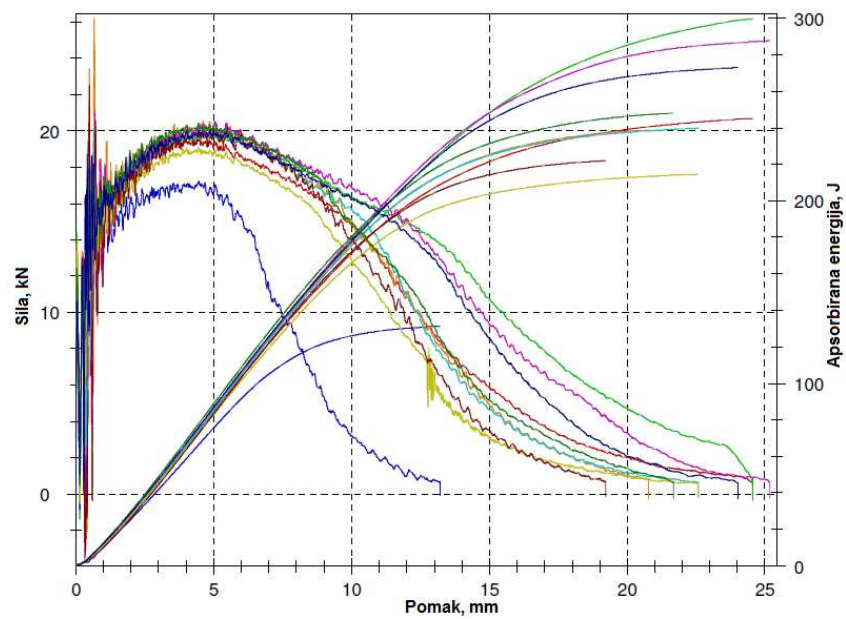
Slika P.IX-4. Promjena sile i apsorbirane energije obzirom na pomak, zona utjecaja topline, ploča 3L



Slika P.IX-5. Promjena sile i apsorbirane energije obzirom na pomak, metal zavara, ploča 4L



Slika P.IX-6. Promjena sile i apsorbirane energije obzirom na pomak, zona utjecaja topline, ploča 4L



PRILOG X – Vrijednosti ograničavajućeg faktora

Tablica P.X-1. Vrijednosti ograničavajućeg faktora za osnovni materijal

	F_{gyd}		F_{md}	
Broj mjerenja	$\alpha_0, ^\circ$	f	$\alpha_0, ^\circ$	f
1	46,17	1,278465	62,97	1,282034
2	46,19	1,278421	64,38	1,282447
3	46,20	1,278527	64,16	1,282382
4	46,15	1,278422	63,23	1,282124
5	46,20	1,278529	63,44	1,282203
6	46,18	1,278415	62,02	1,282012
7	46,21	1,278535	63,33	1,828195
8	46,19	1,278422	64,12	1,282370
9	46,25	1,278601	63,56	1,282219
10	46,16	1,278431	62,88	1,282028
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	46,19	1,278477	63,41	1,282201
Standardna devijacija, s	0,028284	6,6E-05	0,705241	0,000157

Tablica P.X-2. Vrijednosti ograničavajućeg faktora za metal zavara

	F_{gyd}		F_{md}	
Broj mjerenja	$\alpha_0, ^\circ$	f	$\alpha_0, ^\circ$	f
1	46,08	1,278378	59,69	1,280873
2	45,89	1,278291	61,49	1,281543
3	45,87	1,27828	60,58	1,281214
4	46,05	1,278365	60,47	1,281176
5	45,98	1,278327	61,52	1,281555
6	45,95	1,278318	59,24	1,280694
7	45,94	1,278314	59,17	1,280664
8	46,04	1,278359	61,62	1,28159
9	45,97	1,278325	60,46	1,281167
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	45,97	1,278329	60,47	1,281164
Standardna devijacija, s	0,071609	3,32E-05	0,954521	0,00036

Tablica P.X-3. Vrijednosti ograničavajućeg faktora za zonu utjecaja topline

	F_{gyd}		F_{md}	
Broj mjerenja	$\alpha_0, ^\circ$	f	$\alpha_0, ^\circ$	f
1	45,95	1,278318	63,07	1,28206
2	45,86	1,278278	64,66	1,282525
3	45,99	1,278335	64,13	1,282378
4	46,46	1,278544	65,16	1,282655
5	46,55	1,278586	63,40	1,282163
6	46,72	1,278658	64,36	1,282443
7	46,91	1,278739	63,57	1,282214
8	46,12	1,27839	64,15	1,282382
9	45,99	1,278332	64,05	1,282352
Srednja vrijednost, $\bar{x}$	46,28	1,278464	64,06	1,282352
Standardna devijacija, s	0,38321	0,00017	0,645067	0,000184

