

Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje

Bauer, Branko

Doctoral thesis / Disertacija

2006

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:235:313465>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**OPTIMIRANJE PARAMETARA LASERSKOG
ZAVARIVANJA ČELIKA ZA POBOLJŠAVANJE**

DOKTORSKI RAD

BRANKO BAUER

ZAGREB, 2006.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**OPTIMIRANJE PARAMETARA LASERSKOG
ZAVARIVANJA ČELIKA ZA POBOLJŠAVANJE**

DOKTORSKI RAD

Mentor
Prof.dr.sc. SLOBODAN KRALJ

Pristupnik
Mr.sc. BRANKO BAUER

ZAGREB, 2006.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK:	621.791.725
Ključne riječi:	Nd:YAG laser zavarivanje čelici za poboljšavanje zavareni spoj zaštitni plin zavarljivost kvaliteta mehanička svojstva
Znanstveno područje:	TEHNIČKE ZNANOSTI
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za zavarene konstrukcije
Mentor rada:	Prof. dr. sc. Slobodan Kralj
Broj stranica:	152
Broj slika:	84
Broj tablica:	48
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	149
Datum obrane:	
Povjerenstvo:	Dr. sc. Vinko Ivušić , red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu Dr. sc. Slobodan Kralj , red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu Dr. sc. Nikola Šakić , red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu Dr. sc. Janez Tušek , izv. prof. Fakultete za strojništvo u Ljubljani Dr. sc. Nikša Krnić , docent Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAHVALA

Ovom prilikom želim se zahvaliti:

- mentoru prof.dr.sc. Slobodanu Kralju na vođenju, podršci i savjetima prilikom izrade ovog rada,
- prof.dr.sc. Kaji Grubiću, prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu i Ivici Garašiću dipl.ing. na podršci i savjetima,
- prof.dr.sc. Nikoli Šakiću na pomoći prilikom planiranja pokusa i obrade rezultata,
- Damiru Švecu, Dušanu Gomircu i Zdenku Batiniću na podršci, te pripremi radnih komada i uzoraka za ispitivanje,
- Željku Šerbediji i Vladimiru Štefanoviću na pjeskarenju radnih komada,
- Miroslavu Omeliću dipl. ing. na radiografskom ispitivanju uzoraka,
- Nadi Vargi na pripremi uzoraka za metalografska ispitivanja i ispitivanje tvrdoće,
- dr.sc. Krešimiru Grilecu i Sanji Šolić dipl.ing. na ispitivanju tvrdoće,
- prof.dr.sc. Lutz Dornu i Aleksandru Trampenau za ustupanje uređaja za mikrosmično ispitivanje te dodatnu pripremu ispitnih uzoraka,
- mr.sc. Angeli Mustapić i mr.sc. Nikoli Mustapiću za ustupanje laboratorija i uređaja za dinamička ispitivanja, te pomoć pri izvođenju ispitivanja,
- prof.dr.sc. Nenadu Gubeljaku i Zdravku Tišmi za pomoć pri proračunu naprezanja
- Srđanu Kovačeviću dipl. ing. za pomoć pri obradi rezultata za dobivanje matematičkih modela,
- tvrtki Monting na pomoći prilikom dobave limova,
- tvrtki Messer Croatia Plin, na pripremi i donaciji plinskih mješavina,
- posebna zahvala tvrtki Elektrokontakt za doniranu uslugu izrade ispitnih uzoraka u trajanju od 200 radnih sati,
- roditeljima na podršci,
- te svojoj obitelji, supruzi Nataši i djeci Heleni i Bruni na podršci i strpljenju tijekom izrade ovog rada.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	I
SAŽETAK	II
SUMMARY	III
KLJUČNE RIJEČI	IV
KEY WORDS	IV
POPIS OZNAKA	V
POPIS SLIKA	VIII
POPIS TABLICA	XI
1. UVOD	1
2. LITERATURNI PREGLED	3
2.1. OSNOVE LASERSKOG ZAVARIVANJA	3
2.2. LASERSKO ZAVARIVANJE ČELIKA	6
2.2.1. ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE	10
2.2.2. PRIKLADNOST ČELIKA ZA POBOLJŠAVANJE ZA ZAVARIVANJE LASEROM	11
2.2.3. TOPLINSKA OBRADA LASEROM ZAVARENIH SPOJEVA	14
2.3. ISPITIVANJE SPOJEVA ZAVARENIH LASEROM	14
2.3.1. KONTROLA BEZ RAZARANJA	16
2.3.2. KONTROLA S RAZARANJEM	16
2.3.3. ZGAGINA METODA ZA ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA KRHKIH MATERIJALA	19
2.3.4. MIKROSMIČNO ISPITIVANJE	21
2.3.5. ISPITIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI	25
2.3.5.1. Dinamička izdržljivost spojeva zavarenih laserom	27
2.4. ULOGA ZAŠTITNOG PLINA PRI LASERSKOM ZAVARIVANJU	30
3. CILJ ISTRAŽIVANJA	35
3.1. HIPOTEZA RADA	36
4. EKSPERIMENTALNI RAD	37
4.1. SUSTAV ZA LASERSKO ZAVARIVANJE	37
4.2. MATERIJALI	40
4.3. PRIPREMA RADNIH KOMADA	40
4.4. PRIPREMA ISTRAŽIVANJA	41
4.4.1. PROMJENLJIVI PARAMETRI	41
4.4.2. KONSTANTNI PARAMETRI	44

4.5. PLAN POKUSA I PROVEDBA ZAVARIVANJA	48
4.6. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA	51
4.6.1. VIZUALNA KONTROLA	51
4.6.2. ISPITIVANJE RADIOGRAFSKOM METODOM	51
4.6.3. ODREĐIVANJE GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKA ZAVARENOG SPOJA	52
4.6.4. ISPITIVANJE TVRDOĆE	53
4.6.5. ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA CHARPYJEVOM METODOM	53
4.6.6. ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA ZGAGINOM METODOM	54
4.6.7. ISPITIVANJE MIKROSMIČNOM METODOM	55
4.6.8. ISPITIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI	57
4.6.8.1. Proračun naprezanja u zavarenom spoju	59
4.6.8.2. Locatijska metoda za određivanje dinamičke izdržljivosti	65
4.7. ODREĐIVANJE MATEMATIČKIH MODELA PROMJENA MJERENIH VRIJEDNOSTI	70
5. REZULTATI I RASPRAVA	72
5.1. VIZUALNA KONTROLA	72
5.2. ISPITIVANJE RADIOGRAFSKOM METODOM	79
5.3. GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE POPREČNOG PRESJEKA ZAVARENOG SPOJA	81
5.3.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKA	88
5.3.1.1. Širina zavara	88
5.3.1.2. Širina korijena	89
5.3.1.3. Širina ZUT-a	91
5.3.1.4. Širina obojenja	93
5.3.1.5. Površina poprečnog presjeka zavara	94
5.3.1.6. Nadvišenje lica i korijena zavara	95
5.3.2. SVEUKUPNA ANALIZA REZULTATA GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKA	95
5.4. MJERENJE TVRDOĆE	97
5.4.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA MAKSIMALNE TVRDOĆE	99
5.4.2. ANALIZA REZULTATA	100
5.4.2.1. Profili tvrdoća	100
5.5. ODREĐIVANJE UDARNE RADNJE LOMA CHARPYJEVOM METODOM	102
5.5.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA UDARNE RADNJE LOMA DOBIVENE CHARPYJEVOM METODOM	104
5.6. ODREĐIVANJE UDARNE RADNJE LOMA ZGAGINOM METODOM	105
5.6.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA UDARNE RADNJE LOMA DOBIVENE ZGAGINOM METODOM	107
5.7. ODREĐIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA MIKROSMIČNOM METODOM	108
5.7.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA MEHANIČKIH SVOJSTAVA	120

5.8. ODREĐIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI ZAVARENIH SPOJEVA	121
5.8.1. MATERIJAL 25 CrMo 4	121
5.8.2. MATERIJAL 42 CrMo 4	126
5.8.3. MATERIJAL Ck 60	130
5.8.4. MJESTO LOMA	134
5.8.5. ANALIZA REZULTATA	135
5.9. ANALIZA MATEMATIČKIH MODELA PROMJENA MJERENIH VRIJEDNOSTI	137
6. ZAKLJUČAK	139
7. LITERATURA	143

KRATKI ŽIVOTOPIS
SHORT BIOGRAPHY

PREDGOVOR

Laserska tehnika svakim danom proširuje svoje opsežne mogućnosti primjene kao ključna tehnologija u skoro svim granama industrije. U modernoj proizvodnji zavarivanjem postoji trend uvođenja postupaka koji su pogodni za mehanizaciju i automatizaciju, odnosno imaju visoku ekonomičnost. Takav postupak je i lasersko zavarivanje koje pred konvencionalnim postupcima ima niz prednosti. To su prvenstveno velika brzina zavarivanja i visoka gustoća snage s kojom je povezan mali unos topline u radni komad. Tehnološkim procesom laserskog zavarivanja danas je dobro ovladano. Istraživanje zavarljivosti materijala pri laserskom zavarivanju provodi se već dugi niz godina. Unatoč tome postoje na tom području "rupe u znanju".

Visoka gustoća snage kod laserskog zavarivanja omogućuje zavarivanje s malim unosom topline u materijal, zbog čega dolazi do vrlo visokih brzina ohlađivanja. Velike brzine ohlađivanja, kod zavarivanja čelika, dovode do velikog porasta tvrdoće u području zavarenog spoja. Pokazalo se da s time povezano jako očvršćenje i značajno smanjenje žilavosti područja zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal, ne djeluje bezuvjetno negativno na mehanička svojstva zavarenog spoja kao cjeline. Time se lasersko zavarivanje značajno razgraničuje od konvencionalnih postupaka zavarivanja. Postoji više efekata uvjetovanih specifičnim svojstvima laserskog zavarivanja koji, čini se, djeluju suprotno stvarnom smanjenju kvalitete zavarenog spoja. Zanimljivo je koliko je pozitivno djelovanje ekstremno uske zone otvrdnjavanja, sitnozrnate strukture zavara (posljedica velike brzine ohlađivanja) i male širine zavarenog spoja.

Upotreba plinskih mješavina pri Nd:YAG laserskom zavarivanju, baziranih na argonu s dodatkom ugljik-dioksida i/ili kisika, umjesto konvencionalnih zaštitnih plinova (argon, helij, dušik), može povećati unos energije u materijal, pa tako i penetraciju i brzinu zavarivanja, odnosno utjecati na geometrijska i mehanička svojstva zavarenog spoja.

Povećanje spoznaja o svojstvima laserski zavarenih spojeva predstavlja važan doprinos sveobuhvatnom kvalificiranju postupka laserskog zavarivanja za nove primjene u različitim područjima.

Ovaj doktorski rad posvećen je proučavanju utjecaja čimbenika procesa laserskog zavarivanja na zavarljivost, kako bi se proširila saznanja o još neobjašnjenim pojavama pri laserskom zavarivanju čelika za poboljšavanje.

SAŽETAK

Ispitivanjem spojeva zavarenih laserom na čeliku s povećanim sadržajem ugljika otkriveno je da upotreba aktivnih zaštitnih plinskih mješavina ne djeluje bezuvjetno negativno na mehanička svojstva zavarenog spoja. U ovom radu obrađeno je istraživanje utjecaja vrste aktivne plinske mješavine na bazi argona s dodatkom kisika i/ili CO₂ na geometriju i mehanička svojstva zavarenog spoja.

U uvodnom dijelu rada, na temelju literaturnih podataka obrađene su fizikalne osnove i tehnologija laserskog zavarivanja. Obradeni su utjecajni čimbenici na proces zavarivanja odnosno kvalitetu zavarenog spoja. Navedene su metode kontrole kvalitete kod laserskog zavarivanja. Obradena je prikladnost čelika za zavarivanje laserom.

U eksperimentalnom dijelu, zavarivani su limovi od čelika za poboljšavanje 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60 (DIN EN 10083-1). Debljina limova iznosila je 2 mm. Zavarivan je sučeljeni spoj. Zavarivanje je izvedeno pomoću cw Nd:YAG lasera srednje snage 2000 W, s vođenjem snopa pomoću optičkog vlakna promjera 600 μm i fokusne optike 120/120 mm koja omogućuje fokusiranje snopa na točku promjera 0,6 mm. Zaštitne plinske mješavine dovodene su kroz koaksijalnu sapnicu promjera 5 mm. Relativno gibanje izvođeno je pomoću robota "IGM limat RT 280-6". Namještena snaga iznosila je 1800 W, a gustoća snage $6,4 \cdot 10^5$ W/cm².

Pokusi su provedeni prema modelu pokusa s mješavinama. Zavari su ispitivani vizualnom i radiografskom metodom, izmjerene su geometrijske značajke zavarenog spoja, ispitivana je tvrdoća, čvrstoća, deformabilnost, žilavost, i dinamička izdržljivost. Provedena je statistička obrada rezultata mjerenja i matematičko modeliranje metodom odzivnih površina. Provedeno je ocjenjivanje kvalitete zavarenih spojeva prema HRN EN ISO 13919-1.

Dobiveni su zavari visoke kvalitete, bez pojave pukotina. Dobiven je značajan utjecaj zaštitnih plinskih mješavina na geometrijski oblik zavarenog spoja, dok utjecaj na brzinu zavarivanja nije značajan. Utjecaj aktivnih plinskih mješavina na promjenu mehaničkih svojstava zavarenog spoja također se nije pokazao značajnim. Izuzetak je dinamička izdržljivost, gdje je dobiveno značajno poboljšanje s mješavinama Ar/O₂ i Ar/CO₂/O₂ koje daju oblik korijenja zavara s manjim zareznom djelovanjem.

SUMMARY

Testing of laser welded joints made in steel grades containing increased content of carbon revealed that the use of active shielding gas mixtures does not necessarily have harmful effect on mechanical properties of the welded joint. This thesis studies the effects of the type of active shielding gas mixtures based on argon with additions of oxygen and/or carbon dioxide upon the geometry and mechanical properties of the welded joint.

In the introduction, based on literature data, the physical bases and the laser welding technology have been discussed. Factors affecting the welding process and the quality of the welded joint have been studied. The methods used in the quality control during laser welding have been mentioned. Also, the laser weldability of steels has been discussed.

In the experimental part, the heat-treatable steels of grade 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 and Ck 60 (DIN EN 10083-1) have been welded. The sheets of 2 mm thickness have been used. Joint configuration was of butt design, and welding was done by applying cw Nd:YAG laser unit rated at 2000 W of mean power, with laser beam guidance by means of optic fiber of 0.6 mm in diameter, applying focusing optics 120/120 mm that allows beam focusing to 0.6 mm spot. Shielding mixtures were supplied through 5 mm dia. coaxial nozzle. The relative movement of the welding head was performed by "IGM limat RT 280-6" robot. The rated power was set at 1800 W level, at power density of $6.4 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$.

Trial welding was carried out according to the experimental model with mixtures. The welded joints were inspected visually and tested by applying radiographic method. The geometric features of the joint were measured. Hardness, tensile strength, deformability, impact toughness and dynamic strength were tested as well. The obtained data were statistically processed, and mathematical modeling applying the method of response surfaces was carried out. The quality of the welded joints was assessed by applying the HRN EN ISO 13919-1 standard.

The produced welds were of high quality, without occurrence of cracks. The analysis revealed a significant impact of the shielding gas mixtures upon the geometric shape of the joint, whereas the effect on the welding speed was not significant. Neither was the effect of shielding mixtures upon mechanical properties of the joint significant. The exception was recorded for dynamic strength, where significant improvement was achieved when the mixtures Ar/O₂ and Ar/CO₂/O₂ enabling root shape with reduced notch effect were applied.

KLJUČNE RIJEČI

Nd:YAG laser, zavarivanje, čelici za poboljšavanje, zavareni spoj, zaštitni plin, zavarljivost, kvaliteta, mehanička svojstva

KEY WORDS

Nd:YAG laser, welding, heat-treatable steel, welded joint, shielding gas, weldability, quality, mechanical properties

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

A	površina poprečnog presjeka zavora	mm^2
A_F	površina poprečnog presjeka laserskog snopa u žarištu	mm^2
A_S	površina poprečnog presjeka laserskog snopa	mm^2
A_0	početna površina presjeka epruvete za mikrosmično ispitivanje	mm^2
A_l	amplituda puta epruvete	
B	širina epruvete kod mikrosmičnog ispitivanja	mm
B_l	amplituda puta epruvete	
b_{kor}	širina korijena zavora	mm
b_{ob}	širina obojenja	mm
b_{zav}	širina lica zavora	mm
b_{zut}	širina zone utjecaja topline	mm
C_{ekv}	ekvivalent ugljika	
D	promjer kugle kod Zgagine metode	mm
D_G	promjer grla epruvete	mm
D_p	vertikalni pomak vibracijske platforme	mm
d_B	promjer laserskog snopa na ulasku u leću	mm
d_F	promjer žarišne točke	mm
d_s	promjer otvora vrha sapnice	mm
d_v	udaljenost vrha sapnice od radnog komada	mm
d_0	promjer laserskog snopa na izlazu iz rezonatora	mm
E	modul elastičnosti	N/mm^2
e	udaljenost od neutralne osi epruvete	mm
e_l	razmak između limova u preklapnom spoju	mm
F	sila	N
F_m	najveća sila kod mikrosmičnog ispitivanja	N
F_{max}	najveća sila kod dinamičkog ispitivanja	N
$F_{0,2}$	sila kod koje pomak noža iznosi 0,2% debljine epruvete	N
F'	fokusni broj leće	
f	žarišna duljina leće	mm
f_p	frekvencija gibanja vibracijske platforme	Hz
f_v	vlastita frekvencija epruvete kod dinamičkog ispitivanja	Hz
f_l	žarišna duljina kolimatora	mm
g	akceleracija zemljine sile teže	m/s^2
$HV_{0,5}$	tvrdoća	
$HV_{0,5_{max}}$	maksimalna tvrdoća u zavarenom spoju	
H_1	startna visina kugle	mm
H_2	visina koju kugla dosegne nakon loma epruvete	mm
ΔH	razlika startne visine i visine koju kugla dosegne nakon loma epruvete	mm
h_l	nadvišenje lica zavora	mm
h_k	nadvišenje korijena zavora	mm
I	moment tromosti epruvete	mm^4
K	udarna radnja loma određena Zgaginom metodom	J
K_{max}	maksimalna udarna radnja loma koju je moguće ispitati s pojedinom kuglom pomoću Zgagine metode	J
KV	udarna radnja loma određena Charpyjevom metodom	J
K'	koeficijent kvalitete laserskog snopa	

k	koeficijent epruvete (konstanta opruge)	N/mm
k_W	nagib pravca kosog dijela Wöhlerove krivulje	
k_l	razmak između limova u sučeljenom spoju	mm
L	krak na kojem djeluje sila	mm
l	smaknuće limova	mm
M^2	kvaliteta laserskog snopa	
m	masa epruvete s utezima	kg
m_k	masa kugle kod Zgagine metode	kg
m_s	promjenljiva varijabla, vrsta zaštitnog plina	
N	broj ciklusa do loma	
N_D	broj ciklusa kod kojeg počinje vodoravni dio Wöhlerove krivulje	
N_i	broj ciklusa do loma epruvete pri konstantnom naprezanju σ_i	
n_i	broj ciklusa koje epruveta izdrži pri određenom stupnju naprezanja σ_i	
P	snaga lasera	W
P_{max}	maksimalna snaga lasera	W
P_p	vjerojatnost preživljavanja	%
p	penetracija	mm
Q	protok zaštitnog plina	l/min
q	gustoća snage	W/cm ²
q_{max}	maksimalna gustoća snage	W/cm ²
R	koeficijent asimetričnosti ciklusa	
R-kvadrat	koeficijent determinacije	
R	radijus zakrivljenosti vrha utora epruveta za ispitivanje udarne radnje loma	mm
R_d	dinamička izdržljivost	N/mm ²
R_G	radijus zakrivljenosti	mm
R_m	vlačna čvrstoća	N/mm ²
$R_{m(H)}$	vlačna čvrstoća preračunata iz tvrdoće	N/mm ²
$R_{m(MS)}$	vlačna čvrstoća preračunata iz mikrosmične čvrstoće	N/mm ²
$R_{p0,2}$	konvencionalna granica razvlačenja	N/mm ²
$R_{p0,2(MS)}$	konvencionalna granica razvlačenja preračunata iz mikrosmične konvencionalne granice razvlačenja	N/mm ²
r	radijus lica zavora	mm
S	pomak noža	mm
S_f	pomak noža do početka loma	mm
s	debljina lima	mm
T_σ	omjer rasipanja rezultata naprezanja	
T_N	omjer rasipanja rezultata broja ciklusa do loma	
t	vrijeme	s
$t_{8/5}$	vrijeme hlađenja od 800 do 500 °C	s
v	brzina zavarivanja	cm/min
W_s	mikrosmična žilavost	J/mm ²
x	progib	mm
x	odsječak pravca kosog dijela Wöhlerove krivulje	
x_c	ukupni progib epruvete	mm
x_i	udio pojedinačnog sastojka mješavine	%
x_i'	pseudoudio pojedinačnog sastojka mješavine	%
x_{part}	partikularno rješenje diferencijalne jednačbe gibanja epruvete	mm
x_{stat}	statički progib epruvete uslijed težine utega	mm

x_m	najveći pomak iz položaja ravnoteže uslijed vibracija platforme, odnosno amplituda vibracija epruvete	mm
x_0	općenito rješenje diferencijalne jednačbe gibanja epruvete	mm
Δx	stvarni progib epruvete uslijed vibracija	mm
$\ddot{x}$	druga derivacija puta epruvete	
Z	kontrakcija	%
Z_R	Rayleighjeva dužina	mm
z	položaj žarišta u odnosu na površinu materijala	mm

Grčki simboli

α	mikrosmična plastičnost	%
α_G	kut utora	°
β	koeficijent jednačbe odzivnog polinoma	
γ	koeficijent jednačbe odzivnog polinoma	
δ	trenutni položaj platforme	mm
δ_m	amplituda gibanja platforme	mm
η	odzivna funkcija	
θ_F	kut divergencije laserskog snopa na izlasku iz leće	rad
θ_Z	kut nadvišenja zavora	°
θ_0	kut divergencije laserskog snopa na izlazu iz rezonatora	mrad
λ	valna duljina zračenja	nm
ρ	gustoća materijala	kg/m ³
σ	naprezanje	N/mm ²
σ_a	amplituda promjenljivog naprezanja	N/mm ²
σ_i	stupanj naprezanja	N/mm ²
σ_{max}	maksimalno naprezanje kod dinamičkog ispitivanja	N/mm ²
σ_z	naprezanje na mjestu zavora	N/mm ²
τ_m	mikrosmična čvrstoća	N/mm ²
$\tau_{0,2}$	mikrosmično konvencionalno naprezanje tečenja	N/mm ²
ω_p	kružna frekvencija platforme	rad/s
ω_v	vlastita kružna frekvencija	rad/s
ϕ	promjer pore	mm

Popis kratica

cw	kontinuirani laserski izvor-način rada lasera
EC	uzorci za Charpyjevu metodu
ED	uzorci za dinamičko ispitivanje
EF	uzorci za Zgaginu metodu
EG	uzorak za makroizbrusak
EM	uzorci za mikrosmično ispitivanje
Izv.	izvođenje
n.i.	ispitivanje u stanju pokusa nije provedeno
n.o.	zavar nije ocjenjen
n.p.	epruveta nije pukla
n.r.	nema rezultata
o.m.	osnovni materijal
pw	impulsni laserski izvor-način rada lasera
ZUT	zona utjecaja topline

POPIS SLIKA

- Slika 1.** Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala - CO₂ laser [5].
- Slika 2.** Vođenje snopa optičkim vlaknom (kabelom) – Nd:YAG laser – f - žarišna duljina leće, f_l - žarišna duljina kolimatora, d_F - promjer žarišne točke [5,14].
- Slika 3.** Fokusiranje laserskog snopa [1, 19].
- Slika 4.** Prikaz interakcije laserskog snopa i osnovnog materijala [1].
- Slika 5.** Tehnike [26] i princip laserskog zavarivanja [3].
- Slika 6.** Oblici zavarenih spojeva na limovima [11].
- Slika 7.** Maksimalne dozvoljene tolerancije pripreme sučeljenog i preklopnog spoja [27].
- Slika 8.** Nepravilnosti u laserski zavarenom spoju [23].
- Slika 9.** Modificirane epruvete za ispitivanje udarne radnje loma [95].
- Slika 10.** Skica uređaja za ispitivanje udarne radnje loma Zgaginom metodom. K – udarna radnja loma, m_k – masa kugle, g – akceleracija zemljine sile teže, H_1 – startna visina kugle, H_2 – visina koju kugla dosegne nakon loma epruvete [102].
- Slika 11.** Oblik epruvete za ispitivanje udarne radnje loma [102].
- Slika 12.** Mikrosmično ispitivanje [105].
- Slika 13.** Profil mehaničkih svojstava u zavarenom spoju, X60-1 [105].
- Slika 14.** Profil tvrdoće i čvrstoće u zavarenom spoju, X60-1 [105].
- Slika 15.** Ovisnost opterećenja o vremenu [111].
- Slika 16.** Različiti tipovi sinusoidnog promjenljivog opterećenja [110].
- Slika 17.** Modernizirani Wöhlerov dijagram [112].
- Slika 18.** Geometrijske značajke zavarenog spoja mjerodavne za dinamičku izdržljivost, r - radijus lica zavora, θ_z - kut nadvišenja zavora [112].
- Slika 19.** Pojava plazme i penetracija kod CO₂ laserskog zavarivanja sa zaštitnim plinovima argonom i helijem [130].
- Slika 20.** Prikaz varijanata dovoda zaštitnog plina na mjesto zavarivanja [13].
- Slika 21.** Usporedba geometrije zavarenog spoja kod primjene različitih zaštitnih plinova, materijal X5CrNi1810 prema DIN 17440, debljina lima 2 mm, cw-mod, snaga 680 W, promjer snopa u žarištu 0,2 mm, brzina zavarivanja 1 m/min [13].
- Slika 22.** Sustav laser-robot, smješten u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u, Zagreb.
- Slika 23.** Prikaz radnog mjesta. 1-upravljačka jedinica lasera, 2-upravljačka jedinica robota, 3-obradna glava s optikom za fokusiranje i koaksijalnom sapnicom za dovod zaštitnog plina, 4-naprava za stezanje, 5-dovod zaštitnog plina, 6-optičko vlakno.
- Slika 24.** Stezni dio naprave za zavarivanje.
- Slika 25.** Raspored ispitnih uzoraka na radnom komadu, EG-makroizbrusak, ED-dinamičko ispitivanje, EM-mikrosmično ispitivanje, EF-Zgagina metoda, EC-Charpyjeva metoda.
- Slika 26.** Ograničeno područje simpleksa redefinirano kao pseudosimpleks, x - udio pojedinačnog sastojka, x' - pseudoudio pojedinačnog sastojka.
- Slika 27.** Koaksijalna sapnica za plin s vrhom sapnice i maticom, d_v -udaljenost vrha sapnice od radnog komada.
- Slika 28.** Određivanje položaja žarišta metodom kosine.
- Slika 29.** Optimalni položaj žarišta, 25 CrMo 4, He.
- Slika 30.** Koraci u planiranju pokusa.
- Slika 31.** Mjerene geometrijske značajke zavarenog spoja.
- Slika 32.** Modificirana epruveta za ispitivanje udarne radnje loma.
- Slika 33.** Epruvete za ispitivanje udarne radnje loma, materijal Ck 60.
- Slika 34.** Uređaj za ispitivanje udarne radnje loma Zgaginom metodom.
- Slika 35.** Zgagina metoda, položaj epruvete u napravi za stezanje.
- Slika 36.** Epruveta za mikrosmično ispitivanje.
- Slika 37.** Naprava za stezanje i pozicioniranje epruvete za mikrosmično ispitivanje.
- Slika 38.** Oprema za mikrosmično ispitivanje smještena na TU Berlin.

- Slika 39.** Vibracijska platforma smještena na Fakultetu strojarstva i računarstva u Mostaru.
- Slika 40.** Epruvete za dinamičko ispitivanje stegnute na platformu.
- Slika 41.** Način stezanja epruvete na platformu.
- Slika 42.** Raspored naprezanja u epruveti.
- Slika 43.** Raspored naprezanja po debljini zavora.
- Slika 44.** Wöhlerova krivulja za zavarene spojeve od konstrukcijskih čelika prema DVS katalogu; puna linija – vjerojatnost preživljavanja $P_p=90\%$, nagib $k=3,5$; linija točka crta – vjerojatnost preživljavanja $P_p=50\%$, nagib $k=3,75$; isprekidana linija – vjerojatnost preživljavanja $P_p=10\%$, nagib $k=4$ [143].
- Slika 45.** Ovisnost dinamičke izdržljivosti kod aksijalnog simetričnog opterećenja o vlačnoj čvrstoći kod neobrađenih, sučeljeno zavarenih spojeva visokočvrstih čelika [143].
- Slika 46.** Pretpostavljeni Wöhlerov dijagram za proračun dinamičke izdržljivosti.
- Slika 47.** Korekcija pretpostavljenog Wöhlerovog dijagrama, na temelju izmjerenih podataka u području vremenske izdržljivosti.
- Slika 48.** Locatijeva metoda.
- Slika 49.** Određivanje dinamičke izdržljivosti prema Minerovoj teoriji.
- Slika 50.** Apsorpcija dijela snage laserskog snopa na oblaku metalne pare iznad kratera [1].
- Slika 51.** Radiogram zavora, 25 CrMo 4, Ar, stanje pokusa 1.
- Slika 52.** Geometrijske značajke zavarenog spoja; $v=110$ cm/min, 25 CrMo 4.
- Slika 53.** Geometrijske značajke zavarenog spoja; $v=110$ cm/min, 42 CrMo 4.
- Slika 54.** Geometrijske značajke zavarenog spoja; $v=110$ cm/min, Ck 60.
- Slika 55.** Geometrijske značajke 25 CrMo 4, h_l – nadvišenje lica zavora, h_k – nadvišenje korijena zavora.
- Slika 56.** Geometrijske značajke 42 CrMo 4, h_l – nadvišenje lica zavora, h_k – nadvišenje korijena zavora.
- Slika 57.** Geometrijske značajke Ck 60, h_l – nadvišenje lica zavora, h_k – nadvišenje korijena zavora.
- Slika 58.** Maksimalne tvrdoće HV_{maks} .
- Slika 59.** Profili tvrdoća u stanjima pokusa 1-Ar (100), 4-Ar/CO₂ (91/9) i 5-Ar/CO₂ (82/18).
- Slika 60.** Udarne radnje loma dobivene Charpyjevom metodom.
- Slika 61.** Prolaz loma kroz metal zavora pri ispitivanju udarne radnje loma Charpyjevom metodom.
- Slika 62.** Srednja vrijednost udarne radnje loma pri ispitivanju Charpyjevom metodom.
- Slika 63.** Udarne radnje loma dobivene Zgaginom metodom.
- Slika 64.** Prolaz loma kroz metal zavora pri ispitivanju udarne radnje loma Zgaginom metodom.
- Slika 65.** Srednja vrijednost udarne radnje loma pri ispitivanju Zgaginom metodom.
- Slika 66.** Karakteristične krivulje sila-pomak noža, 1 Ar (100).
- Slika 67.** Krivulja sila-pomak noža iza sredine zavora.
- Slika 68.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 1 Ar (100).
- Slika 69.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 2 Ar/CO₂ (91/9).
- Slika 70.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 3 Ar/CO₂ (82/18).
- Slika 71.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 4 Ar/O₂ (91/9).
- Slika 72.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 5v Ar/O₂ (82/18).
- Slika 73.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 6 Ar/CO₂/O₂ (82/9/9).
- Slika 74.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).
- Slika 75.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 8 He (100).
- Slika 76.** Mikrosmična mehanička svojstva.
- Slika 77.** Wöhlerove krivulje, materijal 25 CrMo 4.
- Slika 78.** Dinamička izdržljivost zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, 25 CrMo 4.
- Slika 79.** Wöhlerove krivulje, materijal 42 CrMo 4.
- Slika 80.** Dinamička izdržljivost zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, 42 CrMo 4.

Slika 81. Wöhlerove krivulje, materijal Ck 60.

Slika 82. Dinamička izdržljivost zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, Ck 60.

Slika 83. Prolaz loma kod dinamičkog ispitivanja.

Slika 84. Prijelomne površine kod sva tri materijala, stanje pokusa 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).

POPIS TABLICA

- Tablica 1.** Prikaz metoda kontrole s razaranjem i bez razaranja, za ispitivanje spojeva zavarenih laserom i elektronskim mlazom [85, 88].
- Tablica 2.** Tehnički podaci uređaja sa startnom visinom kuglice $H_I=320$ mm [102].
- Tablica 3.** Usporedba vrijednosti vlačnih čvrstoća dobivenih mikrosmičnim ispitivanjem, statičkim vlačnim pokusom i mjerenjem tvrdoće [105].
- Tablica 4.** Kemijski sastav čelika 25 CrMo 4.
- Tablica 5.** Kemijski sastav čelika 42 CrMo 4.
- Tablica 6.** Kemijski sastav čelika Ck 60.
- Tablica 7.** Osnovni oblici polinoma za mješavine od tri sastojka i pripadajuće simpleks-rešetke. η - odzivna funkcija, β , γ - koeficijenti jednadžbe, x - udio pojedinačnog sastojka.
- Tablica 8.** Aktivne mješavine s udjelima komponenata.
- Tablica 9.** Točke pokusa i pretvorba stvarnih udjela komponenata u pseudoudjele.
- Tablica 10.** Prikaz geometrije zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, na zavarima od 25 CrMo 4, pri brzini zavarivanja 110 cm/min.
- Tablica 11.** Geometrijske značajke i dimenzije nepravilnosti zavora u ovisnosti o vrsti zaštitne mješavine – materijal 25 CrMo 4, $P=1800$ W, $v=110$ cm/min, $z=-0,7$ mm, $Q=18$ l/min.
- Tablica 12.** Prikaz geometrije zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, na zavarima od 42 CrMo 4, pri brzini zavarivanja 110 cm/min.
- Tablica 13.** Geometrijske značajke i dimenzije nepravilnosti zavora u ovisnosti o vrsti zaštitne mješavine – materijal 42 CrMo 4, $P=1800$ W, $v=110$ cm/min, $z=-0,7$ mm, $Q=18$ l/min.
- Tablica 14.** Prikaz geometrije zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, na zavarima od Ck 60, pri brzini zavarivanja 110 cm/min.
- Tablica 15.** Geometrijske značajke i dimenzije nepravilnosti zavora u ovisnosti o vrsti zaštitne mješavine – materijal Ck 60, $P=1800$ W, $v=110$ cm/min, $z=-0,7$ mm, $Q=18$ l/min.
- Tablica 16.** Matematički modeli širine zavora b_{zav} .
- Tablica 17.** Matematički modeli širine korijena b_{kor} .
- Tablica 18.** Matematički modeli širine ZUT-a b_{zut} .
- Tablica 19.** Matematički modeli širine obojenja b_{ob} .
- Tablica 20.** Matematički modeli površine poprečnog presjeka zavora A .
- Tablica 21.** Maksimalne izmjerene tvrdoće HV0,5_{maks}.
- Tablica 22.** Najmanje i najveće izmjerene maksimalne tvrdoće HV0,5, u stanjima pokusa od 1 do 7, (stanje pokusa).
- Tablica 23.** Usporedba izmjerenih maksimalnih tvrdoća HV0,5, kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.
- Tablica 24.** Matematički modeli maksimalne tvrdoće zavarenog spoja HV0,5.
- Tablica 25.** Udarne radnje loma metala zavora dobivena Charpyjevom metodom, J.
- Tablica 26.** Najmanje i najveće **izmjerene** udarne radnje loma J, dobivene Charpyjevom metodom u stanjima pokusa od 1 do 7, (stanje pokusa).
- Tablica 27.** Usporedba izmjerenih udarnih radnji loma J, dobivenih Charpyjevom metodom kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.
- Tablica 28.** Udarne radnje loma metala zavora dobivena Zgaginom metodom, J.
- Tablica 29.** Najmanje i najveće izmjerene udarne radnje loma J, dobivene Zgaginom metodom u stanjima pokusa od 1 do 7, (stanje pokusa).
- Tablica 30.** Usporedba izmjerenih udarnih radnji loma J, dobivenih Zgaginom metodom kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.
- Tablica 31.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 1 Ar (100).

- Tablica 32.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 2 Ar/CO₂ (91/9).
- Tablica 33.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 3 Ar/CO₂ (82/18).
- Tablica 34.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 4 Ar/O₂ (91/9).
- Tablica 35.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 5v Ar/O₂ (82/18).
- Tablica 36.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 6 Ar/CO₂/O₂ (82/9/9).
- Tablica 37.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).
- Tablica 38.** Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 8 He (100).
- Tablica 39.** Mikrosmična čvrstoća, plastičnost i žilavost metala zavara kod materijala 25 CrMo 4.
- Tablica 40.** Usporedba mehaničkih svojstava kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.
- Tablica 41.** Broj ciklusa do loma N, u području vremenske izdržljivosti 25 CrMo 4, n.i.-nije ispitano, n.p.- epruveta nije pukla, o.m.- lom u osnovnom materijalu, Izv. – izvođenje.
- Tablica 42.** Broj ciklusa do loma N pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, 25 CrMo 4, o.m.- lom u osnovnom materijalu.
- Tablica 43.** Broj ciklusa do loma N, u području vremenske izdržljivosti, 42 CrMo 4, n.i.-nije ispitano, n.p.- epruveta nije pukla, o.m.- lom u osnovnom materijalu, Izv. – izvođenje.
- Tablica 44.** Broj ciklusa do loma N pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, 42 CrMo 4, o.m.- lom u osnovnom materijalu.
- Tablica 45.** Broj ciklusa do loma N, u području vremenske izdržljivosti, Ck 60, n.i.-nije ispitano, n.p.- epruveta nije pukla, o.m.- lom u osnovnom materijalu, Izv. – izvođenje.
- Tablica 46.** Broj ciklusa do loma N pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, Ck 60, o.m.- lom u osnovnom materijalu.
- Tablica 47.** Dinamičke izdržljivosti R_d N/mm², n.r. – rezultat nije dobiven s dostupnim parametrima ispitivanja.
- Tablica 48.** Matematički modeli geometrijskih značajki i mehaničkih svojstava, n.i. – nije ispitivano; osjenčana polja – matematički model nije značajan.

1. UVOD

Lasersko zavarivanje u industrijskoj proizvodnji u stalnom je porastu. U gotovo svim granama industrije, od mikroelektronike do brodogradnje, a posebno u automobilskoj industriji mogu se iskoristiti glavne prednosti ove tehnologije:

- o visoka gustoća snage odnosno mali unos topline,
- o uska zona utjecaja topline,
- o male deformacije,
- o velika brzina zavarivanja,
- o visoka kvaliteta spoja,
- o pristup s jedne strane,
- o visoka fleksibilnost.

Glavni nedostaci poput visokih investicijski troškova i povećanih troškova pripreme spoja mogu se nadoknaditi velikom brzinom zavarivanja i nepotrebnom naknadnom obradom spoja koja je posljedica malih deformacija radnog komada nakon zavarivanja i visoke kvalitete spoja. Navedene prednosti omogućuju zavarivanje tankostijenih i laganih konstrukcija, te zavarivanje dijelova obrađenih na mjeru, koji nakon zavarivanja idu direktno u eksploataciju. Efekti porasta produktivnosti postižu se samo onda kada je konstrukcija prilagođena laserskom zavarivanju, kada ne postoje problemi pri uključivanju u proces proizvodnje i kada su ispunjeni zahtjevi za preciznom pripremom spoja i preciznim vođenjem laserskog snopa.

Visoka gustoća snage kod laserskog zavarivanja omogućuje zavarivanje s malim unosom topline u materijal, zbog čega dolazi do vrlo visokih brzina ohlađivanja. Velike brzine ohlađivanja, kod zavarivanja čelika, dovode do velikog porasta tvrdoće u području zavarenog spoja. Pokazalo se da s time povezano jako očvršnuće u odnosu na osnovni materijal, ne djeluje bezuvjetno negativno na mehanička svojstva zavarenog spoja. To je posljedica uske zone utjecaja topline, malih dimenzija zavara i sitnozrnate mikrostrukture. Time se lasersko zavarivanje značajno razgraničuje od konvencionalnih postupaka zavarivanja. Granica dobre zavarljivosti nelegiranih konstrukcijskih čelika konvencionalnim postupcima zavarivanja iznosi 0,22% ugljika u kemijskom sastavu, što približno odgovara tvrdoći 350 HV u zavarenom spoju. Ukoliko je stanje naprezanja u zavarenom spoju povoljno (nema ukrućenja konstrukcije), pri laserskom zavarivanju mogu se dobiti zavari bez pukotina i kod sadržaja ugljika u čeliku 0,6%, a tvrdoća može iznositi od 650 do 700 HV₂. Ali tada se ne može sa sigurnošću tvrditi da su postignuta dovoljna mehanička svojstva čvrstoće i žilavosti prema

DIN EN 10083-1, već ih je potrebno za pojedinu konstrukciju, oblik spoja, odnosno debljinu i vrstu materijala, eksperimentalno odrediti i optimiranjem parametara poboljšati, što predstavlja neistraženo područje.

Kvaliteta zavarenog spoja prvo se određuje radiografijom, metalografijom, ispitivanjem tvrdoće, statičkim vlačnim pokusom i ispitivanjem udarne radnje loma, međutim za dinamički opterećene konstrukcije rezultati navedenih ispitivanja nisu dovoljni, odnosno na temelju njih nije moguće predvidjeti ponašanje zavarenog spoja pri dinamičkom opterećenju. Danas su dostupni samo malobrojni podaci o dinamičkom ponašanju laserskih zavarenih spojeva od čelika s povećanim sadržajem ugljika.

Zaštitni plin ima značajnu ulogu pri laserskom zavarivanju i ispunjava slijedeće zadatke: štiti talinu i zonu utjecaja topline od utjecaja atmosfere, utječe na oblik zavara i štiti optiku od metalnih para i kapljica nastalih štrcanjem. Upotreba plinskih mješavina pri Nd:YAG laserskom zavarivanju, baziranih na argonu s dodatkom ugljik dioksida i/ili kisika, umjesto konvencionalnih zaštitnih plinova (argon, helij, dušik), može povećati unos energije u materijal, pa tako i penetraciju i brzinu zavarivanja, odnosno utjecati na geometrijska i mehanička svojstva zavarenog spoja. Lasersko zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika uz upotrebu navedenih plinskih mješavina nije dovoljno istraženo, a podaci o geometrijskim i mehaničkim svojstvima, a posebno dinamičkim u potpunosti nedostaju. Pokusi s mješavinama pokazali su se prikladnim za istraživanje odnosno matematičko modeliranje utjecaja mješavina zaštitnih plinova u zavarivanju.

Sveukupni cilj ovog rada je razjasniti koliko su prikladne plinske mješavine na bazi argona s dodatkom ugljik-dioksida i/ili kisika za zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika korištenjem Nd:YAG lasera.

2. LITERATURNI PREGLED

2.1. OSNOVE LASERSKOG ZAVARIVANJA

LASER je akronim od engleskih riječi Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation koji označava princip pojačanja svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja, a zapravo je svjetlosni oscilator odnosno generator monokromatske, koherentne i usmjerene svjetlosti. Glavno svojstvo ovakve svjetlosti je mogućnost fokusiranja na točku malog promjera (< 1 mm), što je nemoguće kod prirodne svjetlosti [1-6].

VRSTE LASERA

Laseri se razlikuju prema vrsti aktivnog laserskog materijala u kojem se događa pojačanje svjetlosti. Za zavarivanje i rezanje upotrebljavaju se CO₂ i Nd:YAG laseri, koji su dobili ime prema vrsti aktivnog materijala. Značajka svakog lasera je valna duljina emitirane svjetlosti (λ), koja je funkcija razlike energetske stanja atoma/molekula aktivnog medija. CO₂ – plinski laser (aktivni materijal je mješavina plinova N₂, He, CO₂), emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda=10600$ nm) i danas snage do 45 kW. CO₂ laser koristi se pretežno za rezanje, ali i za zavarivanje [7-11].

Nd:YAG laser ima kruti aktivni medij koji je prema sastavu kristal granat u ovom slučaju "Itrij-Aluminij-Granat", kod kojeg je približno 1% atoma itrija zamijenjeno atomima neodimija Nd. Neodimij je laserski aktivan element. Nd:YAG laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda=1064$ nm) i danas snage do 10 kW. Nd:YAG laser koristi se za označavanje, zavarivanje i rezanje elektroničkih komponenti, te u mikromehanici. Povećanjem snage lasera preko 1 kW sve je češća primjena ovih lasera za zavarivanje i rezanje limova do 6 mm debljine [7-11]. Valne duljine oba lasera nalaze se u infracrvenom području, pa tako nisu vidljive golim okom. Pozicioniranje laserskog snopa Nd:YAG lasera izvodi se pomoću helij-neon lasera, čiji se snop ($\lambda=632$ nm, vidljiva crvena svjetlost) provodi kroz isto optičko vlakno i optiku za fokusiranje. Aktivni medij sadrži 80% helija i 20% neona.

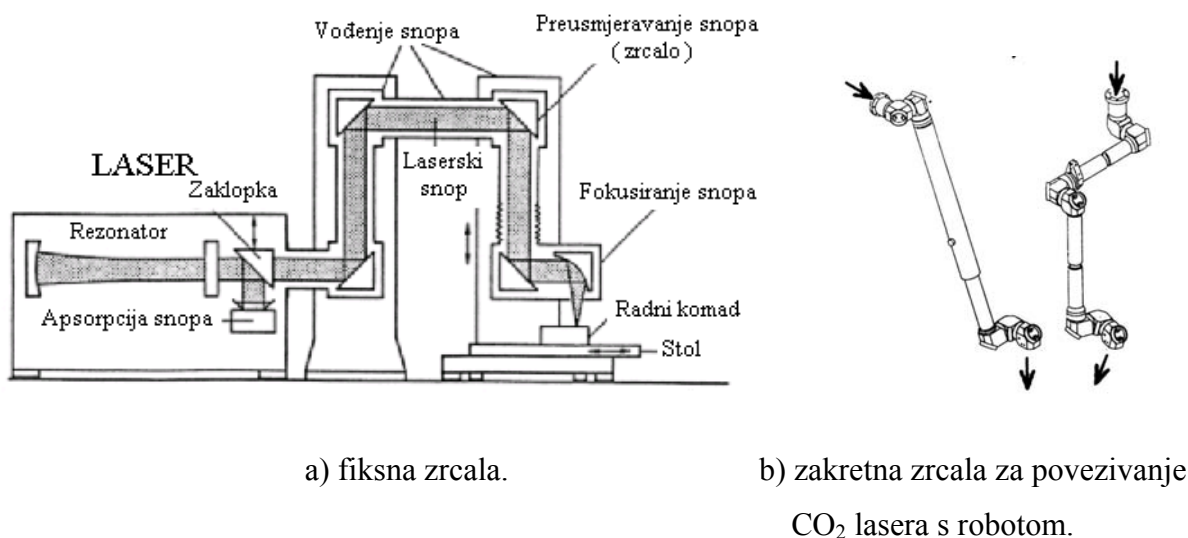
LASERSKI SUSTAVI

Laserski snop nastao u laseru (rezonatoru) može se voditi do radnog komada na dva načina: sustavom zrcala i leća (CO₂ i Nd:YAG), **slika 1.** i optičkim vlaknima (Nd:YAG), **slika 2.** Laserski snop iz Nd:YAG lasera provodi se kroz fleksibilni optički kabel sa staklenom jezgrom promjera 0,4 do 1mm. Na kraju optičkog kabela dužine i do 200m nalazi se obradna glava u koju je smještena optika za fokusiranje snopa na površinu radnog komada [5, 11-14].

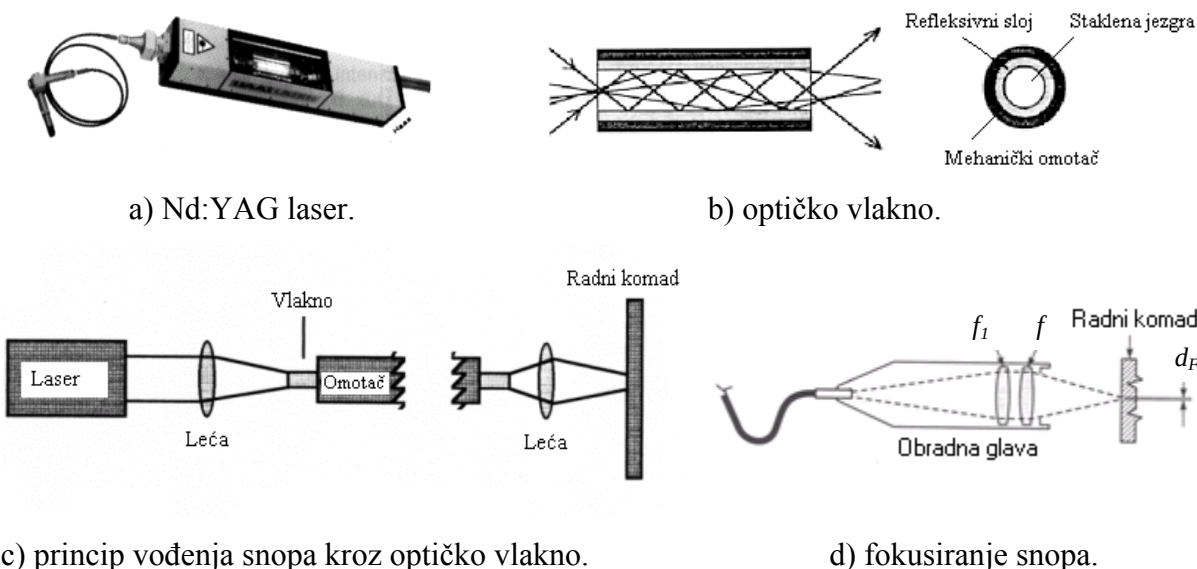
Obradna glava najčešće je pričvršćena na ruku robota ili CNC stol koji obavlja gibanje po zadanoj putanji.

Laserski snop kod CO₂ lasera mora se voditi sustavom zrcala, jer je staklena jezgra optičkog kabela nepropusna za svjetlost njegove valne duljine. Materijal jezgre optičkog vlakna koji bi bio propustan za snop CO₂ lasera još nije pronađen [5, 11, 15].

Relativno gibanje između snopa i radnog komada mora biti numerički upravljano, a pritom se može gibati snop, radni komad ili oba. Za 3-D obradu koriste se sustavi s pet stupnjeva slobode gibanja, te roboti [16-19]. Prednost vođenja snopa optičkim kabelom je jednostavnije povezivanje lasera s robotom.



Slika 1. Vođenje laserskog snopa pomoću zrcala - CO₂ laser [5].

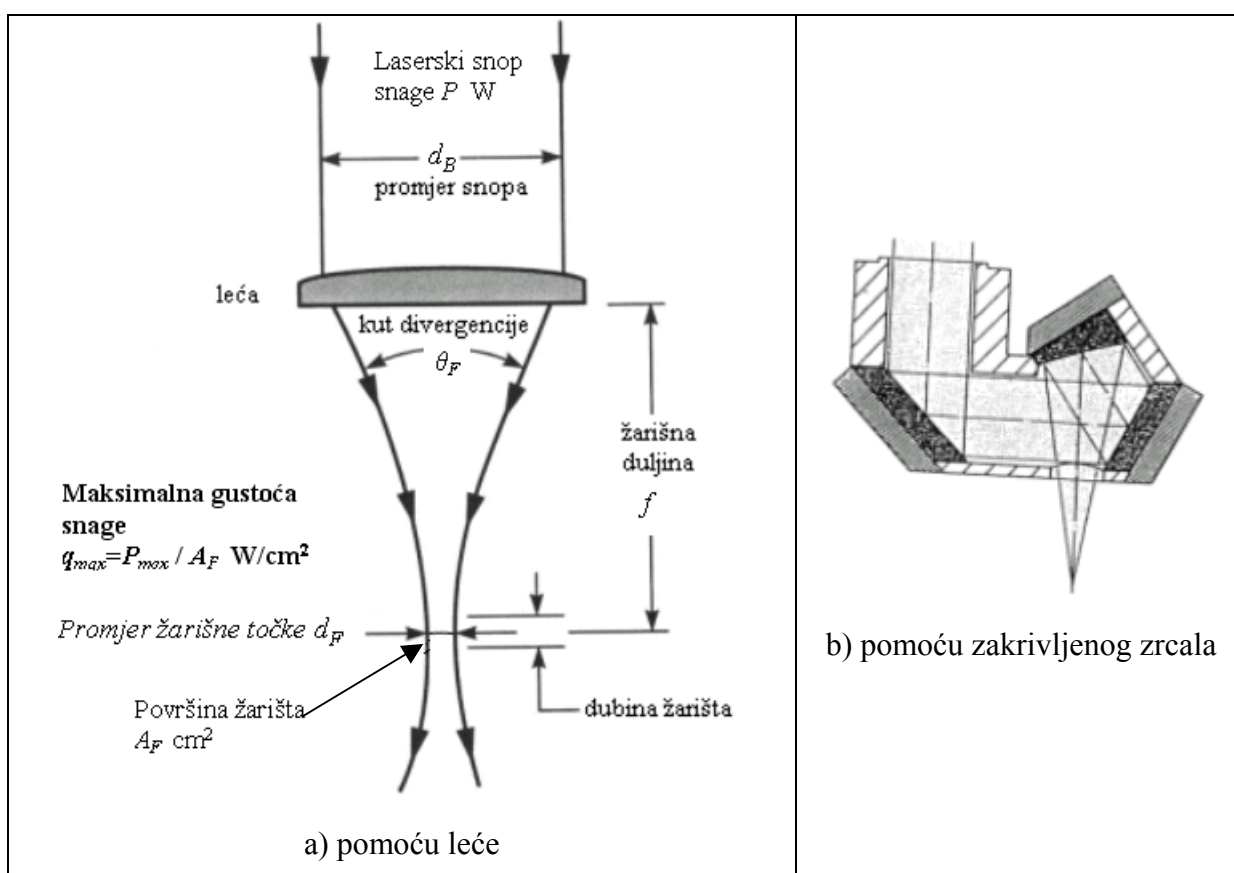


Slika 2. Vođenje laserskog snopa optičkim vlaknom (kabelom) – Nd:YAG laser – f - žarišna duljina leće, f_1 - žarišna duljina kolimatora, d_F - promjer žarišne točke [5,14].

FOKUSIRANJE LASERSKOG SNOPI

Za postizanje gustoće snage potrebne za obradu materijala, laserski snop koji dolazi iz rezonatora, mora se fokusirati pomoću leća, **slika 3.**, ili zrcala, na kružnu površinu žarišta, promjera od 0,2 do 1 mm. Sada laserski snop služi kao alat.

Žarišna duljina leće određuje promjer fokusirane zrake u žarištu, odnosno veličinu žarišne točke. Manja žarišna duljina daje manji promjer. Najčešće se upotrebljavaju leće žarišne duljine 125 mm. Gustoća snage na površini radnog komada q (W/cm^2) jednaka je omjeru snage lasera P i površine presjeka snopa A_s na površini materijala i predstavlja najvažniji čimbenik kod obrade materijala laserom. Najveća gustoća snage postiže se u žarištu, gdje je promjer laserskog snopa najmanji.

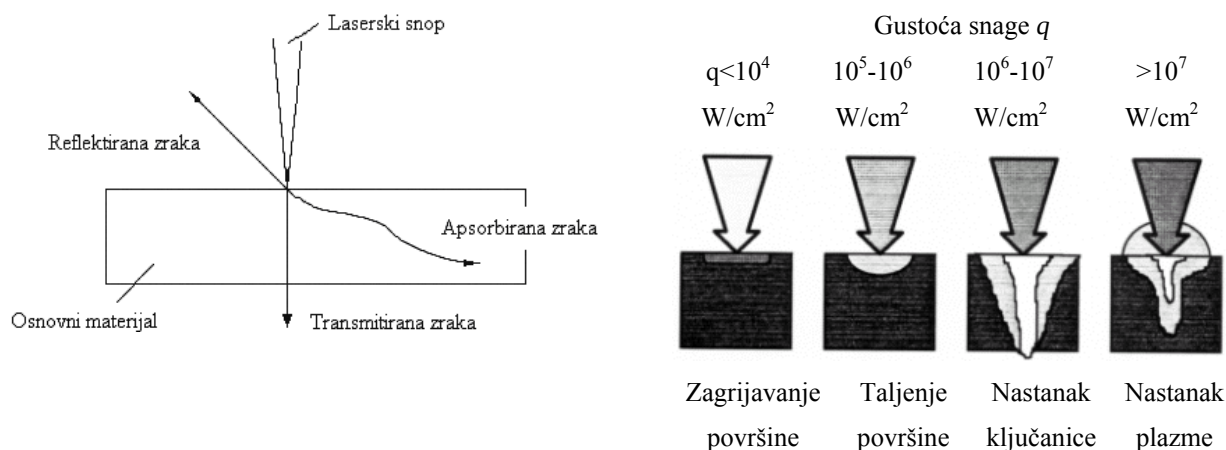


Slika 3. Fokusiranje laserskog snopa [1,19].

INTERAKCIJA LASERSKOG SNOPI I OSNOVNOG MATERIJALA

Pod pojmom interakcije laserskog snopa i osnovnog materijala, **slika 4.**, podrazumjeva se pojava kada se, prilikom udara laserskog snopa na površinu osnovnog materijala, ovisno o reflektivnosti tog materijala i gustoći snage snopa jedan dio zračenja reflektira, drugi dio ulazi u materijal i apsorbira se, a treći prolazi kroz materijal [20-22]. Toplina koja uzrokuje taljenje materijala je ona koja dolazi od apsorbiranog zračenja. Stoga se visoko reflektivni

materijali (aluminij, bakar...) otežano zavaruju laserom. Podešavanjem gustoće snage postiže se zagrijavanje, taljenje odnosno isparivanje materijala, **slika 4**.



Slika 4. Prikaz interakcije laserskog snopa i osnovnog materijala [1].

2.2. LASERSKO ZAVARIVANJE ČELIKA

Zavarivanje laserom izvodi se u atmosferi zaštitnog plina (Ar, He, N₂, CO₂ ili mješavina). Gustoća snage nalazi se u intervalu od 10^5 do 10^8 W/cm². Laser kao izvor topline djeluje koncentrirano i uzrokuje velike brzine zagrijavanja i hlađenja zavarenog spoja. Laserski snop može biti kontinuirani (cw) i impulsni (pw), ovisno o zahtjevima konstrukcije, materijalu, tipu i geometriji spoja. U kontinuiranom načinu rada emitira se laserska zraka kontinuirane snage tijekom zavarivanja. U impulsnom načinu rada moguće je ostvariti vrlo velike vršne snage u kratkim vremenskim intervalima. Zavarivanje se uglavnom izvodi bez dodatnog materijala. [23-27]

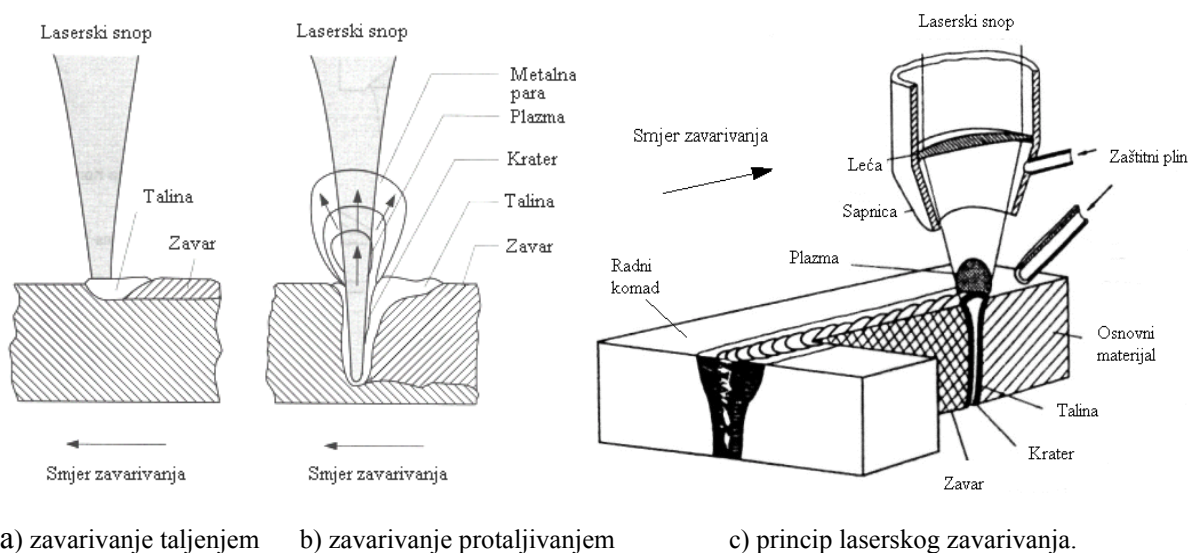
Kod laserskog zavarivanja razlikuje se, (**slika 5**):

- zavarivanje taljenjem,
- zavarivanje protaljivanjem – tehnika ključanice.

Kada je gustoća snage snopa na površini materijala mala, događa se zavarivanje taljenjem, **slika 5a**). Za svaki materijal postoji prag gustoće snage iznad kojeg počinje zavarivanje protaljivanjem. Prag gustoće snage je reda veličine 10^6 W/cm². Kod zavarivanja protaljivanjem, materijal se u području žarišta snopa zagrijava do vrlo visokih temperatura, koje dovode do isparavanja dijela materijala, te se na mjestu udara snopa gotovo trenutno stvara duboki krater (ključanica) oko kojeg dolazi do taljenja metala. Kako se toplinski izvor pomiče, krater se popunjava talinom, dolazi do njezinog skrućivanja iza snopa i nastajanja zavora, **slika 5b**). Potreba za točnom brzinom zavarivanja kao i mjerama sigurnosti zahtijeva

automatizaciju procesa. Refleksivnost materijala (omjer reflektirane i upadne energije) ovisi o materijalu, temperaturi, valnoj duljini i gustoći snage laserskog snopa. Početna refleksivnost metala na sobnoj temperaturi je velika i iznosi više od 90 %, odnosno apsorbira se maksimalno 10 % energije laserskog snopa. Pri zavarivanju protaljivanjem rastaljeni metal apsorbira znatno više energije, od 80 do 90 %. Nastanak kratera popraćen je nastankom plazme. Plazma je ionizirana mješavina isparenog metala i zaštitnog plina. Plazma ima veći koeficijent apsorpcije od rastaljenog materijala, te predaje toplinu radnom komadu reemitiranjem apsorbiranog laserskog zračenja. Iznad određenog praga gustoće snage stvara se oblak plazme iznad kratera koji zakriljuje radni komad od laserskog snopa koji se djelomično apsorbira na oblaku plazme. Ukoliko je apsorpcija snopa na plazmi velika može doći do nestajanja kratera.

Problem apsorpcije zračenja javlja se kod CO₂ lasera, kod kojeg se najčešće primjenjuje kontrola plazme plinom. Nd:YAG laser ima 10 puta kraću valnu duljinu. Svojstvo kraće valne duljine je viši prag gustoće snage iznad kojeg se javlja plazma i mala odnosno zanemariva apsorpcija na oblaku plazme. To znači da se kod Nd:YAG lasera, utjecaj apsorpcije snopa na oblaku plazme, pri gustoćama snage uobičajenim za obradu materijala, od približno 10^6 W/cm^2 , može zanemariti [13, 20].



Slika 5. Tehnike [26] i princip laserskog zavarivanja [3] .

Glavne razlike između zavarivanja taljenjem i zavarivanja protaljivanjem:

zavarivanje taljenjem

- gustoća snage $q < 10^6 \text{ W/cm}^2$,
- nema efekta protaljivanja,
- penetracija ovisi o dovođenju topline u radni komad,
- zavarivanje se provodi mehanizmom taljenja (kao i kod konvencionalnih postupaka zavarivanja),
- zavari su široki i plosnati, omjer penetracije i širine manji od jedan.

zavarivanje protaljivanjem

- gustoća snage prelazi kritični prag ($q > 10^6 \text{ W/cm}^2$),
- dolazi do toplinskog zastoja, povećanja količine taline i djelomičnog isparavanja materijala, potiskivanja taline u stranu uslijed tlaka metalnih para i nastanka kratera,
- povećanjem gustoće snage raste tlak metalne pare, javlja se štrcanje taline,
- krater omogućuje prodiranje laserskog snopa duboko u materijal – povećanje apsorpcije ($\sim 90 \%$) usljed višestruke refleksije zračenja u krateru,
- oblik i dinamika kratera slična je ključanici (“keyhole”),
- uski i duboki zavari,
- omjer penetracije i širine zavora iznosi 1 do 5.

Najvažniji parametri za upravljanje procesom zavarivanja su [28-31]:

- snaga lasera, $P \text{ W}$,
- brzina zavarivanja, $v \text{ cm/min}$,
- zaštitni plin, (vrsta, protok, dovod – koaksijalno ili sa strane),
- žarišna duljina leće, $f \text{ mm}$,
- promjer žarišne točke, $d_F \text{ mm}$,
- položaj žarišta u odnosu na površinu materijala, $z \text{ mm}$.

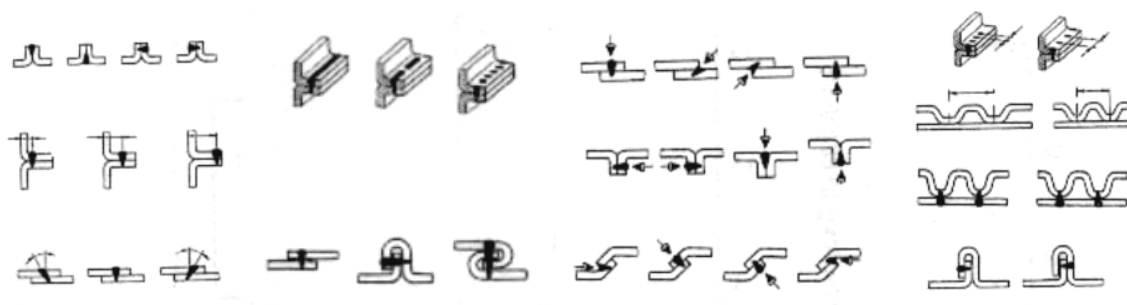
Kod laserskog zavarivanja koriste se različiti senzori, a najviše za kontrolu položaja žarišta i vođenje laserskog snopa, jer vrlo mali pomaci mogu bitno pogoršati kvalitetu obrade. Na volumen i kemijski sastav zavora može se utjecati dodatnim materijalom, koji se može dodavati u obliku žice ili praška.

PRIMJENA LASERSKOG ZAVARIVANJA

Lasersko zavarivanje koristi se kod tankostijenih i laganih konstrukcija, te kod zavarivanja dijelova obrađenih na mjeru, koji nakon zavarivanja idu direktno u eksploataciju bez naknadne obrade [32-37]. Koristi se za zavarivanje proizvoda koji su osjetljivi na unos topline, te proizvoda kod kojih nisu dozvoljene deformacije. Laserski snop sa svojim lokalnim i koncentriranim unosom energije predstavlja za navedene zahtjeve prikladan alat. Glavna područja uporabe laserskog zavarivanja nalaze se u području debljina, odnosno penetracija do 4 mm, koje se najčešće koriste u automobilskoj industriji [38-44]. Korištenjem lasera većih snaga mogu se zavarivati i deblji limovi, npr. u brodogradnji i proizvodnji spremnika [45-48].

PRILAGODBA KONSTRUKCIJE LASERSKOM ZAVARIVANJU

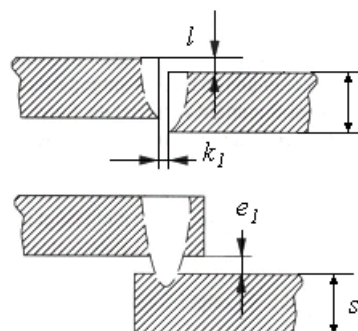
Uvođenje laserskog zavarivanja u industriju dovelo je do prilagodbe konstrukcije i oblikovanja spojeva laserskom zavarivanju, **slika 6**, [11, 49, 50]. Posebno važni zadaci pri laserskom zavarivanju su pripremanje spojeva i pozicioniranje komada koji će biti zavareni. Pri zavarivanju bez dodatnog materijala priprema spoja je odlučujuća za uspješnost, ima li se na umu promjer laserskog snopa. Laserski snop mora pogoditi rubove oba komada koje želi se zavariti. Što je lim tanji, mora biti veća preciznost i kontrola spojeva. Dozvoljeni razmaci između radnih komada ovise o promjeru žarišta, vrsti i obliku spoja, **slika 7**. U literaturi postoje različiti podaci za dozvoljena odstupanja. Za tanje limove (do 2 mm) razmaci veći od 2 do 10 % debljine lima mogu imati negativne posljedice. Za deblje limove maksimalan razmak može biti do 0,3 mm, odnosno do najviše 70 % promjera fokusirane laserske zrake. Posebno je osjetljivo sučeljeno zavarivanje tankih limova, pa valja posebno dobro izvršiti pripremu spojeva. Prije zavarivanja treba izvesti pripoje ili održavati razmak napravama za stezanje. Pripoji ne smiju biti predugi kako pri ponovnom prolazu laserske zrake ne bi došlo do stvaranja pora i grešaka vezivanja. Preklopi su također mjesta na kojima često dolazi do grešaka, te je radi sprečavanja njihove pojave važno parametrima zavarivanja (snaga, položaj žarišta, brzina zavarivanja) regulirati zavarivanje preklopa [19, 50].



Slika 6. Oblici zavarenih spojeva na limovima [11].

Na **slici 7**, prikazane su maksimalne dozvoljene tolerancije pripreme sučeljenog i preklopnog spoja kod laserskog zavarivanja.

Debljina lima s mm	Razmak k_l mm	Razmak e_l mm	Smaknuće l mm
0,5 do 3	$0,1 \cdot s$	$0,15 \cdot s$	$0,15 \cdot s$
3 do 10	$0,05 \cdot s$	$0,1 \cdot s$	$0,1 \cdot s$



Slika 7. Maksimalne dozvoljene tolerancije pripreme sučeljenog i preklopnog spoja [27].

2.2.1. ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE

Čelici za poboljšavanje su nelegirani i legirani konstrukcijski čelici koji postupkom poboljšavanja, kaljenjem i visokim popuštanjem ($>500\text{ }^{\circ}\text{C}$), ovisno o svom kemijskom sastavu, postižu traženu granicu razvlačenja i čvrstoće uz dobra svojstva žilavosti i dinamičke izdržljivosti. U situacijama kada vlačna čvrstoća i granica razvlačenja općih konstrukcijskih čelika više ne zadovoljavaju zahtjeve konstrukcije, javlja se potreba za čelicima za poboljšavanje [51].

Ova skupina čelika sadrži od 0,18 do 0,65 % C. Posebni čelici mogu sadržavati i do 1,3 %C. Prema svojem kemijskom sastavu pripadaju kvalitetnim i plemenitim čelicima. Glavni legirni elementi su mangan, krom, nikal i molibden. Dodatni legirni elementi mogu biti silicij i vanadij. Tolerancije kemijskog sastava su određene, a sadržaj nečistoća (P i S) je nizak (za plemenite $< 0,035\text{ }%$). Struktura se odlikuje homogenošću i nema metalnih uključaka. Uz kemijski sastav, garantiraju se minimalne vrijednosti mehaničkih svojstava u poboljšanom stanju ($R_{p0,2}$, R_m , Z , KV) [51, 52].

Primjena čelika za poboljšavanje

Zbog njihovih svojstava visoke vlačne čvrstoće uz visoku žilavost i dinamičku izdržljivost, ovi čelici primjenjuju se za mehanički, posebno visoko dinamički, opterećene dijelove strojeva i uređaja [51]:

- nelegirani se čelici primjenjuju kako u poboljšanom stanju (manje dimenzije) tako i u normaliziranom stanju (niže opterećeni strojni dijelovi većih dimenzija: klipnjače, manje opterećeni zupčanici /obično veći u paru/, osovine generatora i vodenih turbina,

svornjaci Gallovih lanaca, osovine šivaćih strojeva, sidreni vijci manjih dimenzija, strojna vretena itd).

- legirani se čelici primjenjuju za jednake namjene, u slučaju viših opterećenja, ili u slučaju većih dimenzija, kao npr. za: koljenaste osovine, bregaste osovine motora s unutrašnjim izgaranjem, poluosovine automobila, kamiona i autobusa, vagonске i tramvajske osovine, valjke, velike i visokoopterećene zupčanike, i to posebno one opterećene povremeno udarno, brodske osovine, lančaničke dizala, bicikla i motora, usisne ventile motora, osovine kormila, propelerske osovine zrakoplova, osovine parnih i plinskih turbina (općenito za rad pri temperaturama do 350 °C, a legirani s Mo, Cr i za rad do 550 °C), volanske osovine itd.

Povišena čvrstoća omogućuje izradu laganih konstrukcija, odnosno upotrebu tankih limova i konstrukcijskih elemenata manje debljine stijenke. Stoga se neki od čelika iz ove skupine također primjenjuju za izradu laganih nosivih konstrukcija od tankostijenih cijevi, kakve se susreću u izradi aviona, trkaćih automobila i motora, te bicikala.

2.2.2. PRIKLADNOST ČELIKA ZA POBOLJŠAVANJE ZA ZAVARIVANJE LASEROM

Prikladnost za zavarivanje je prije svega svojstvo materijala. Međutim ona sama još uvijek ne određuje zavarljivost nekog konstrukcijskog elementa. Zavarljivost je kompleksan pojam pod kojim se podrazumjeva međuovisnost materijala, konstrukcije i tehnologije. Zavarljivost nekog konstrukcijskog elementa prema normi DIN 8528 dio 1 [53], obuhvaća: prikladnost materijala za zavarivanje, mogućnost zavarivanja u proizvodnji i sigurnost konstrukcije.

Prikladnost materijala za zavarivanje općenito je određena njegovim kemijskim sastavom. Utjecaj kemijskog sastava definira se preko ekvivalenta ugljika, C_{ekv} . Na osnovi djelovanja ugljika i ostalih kemijskih elemenata iz sastava čelika može se očekivati mikrostruktura zavarenog spoja kao funkcija brzine hlađenja nakon zavarivanja [54-56]. Kod laserskog zavarivanja još su važna fizikalna svojstva poput sposobnosti apsorpcije zračenja površine materijala, toplinska vodljivost, te temperatura taljenja i isparavanja. Prema tome prikladnost za lasersko zavarivanje ne može se jednoznačno definirati, već se treba odrediti iz serije pokusa zavarivanja [52].

Brzina odnosno vrijeme ohlađivanja ovisi o unešenoj energiji prilikom zavarivanja, toplinskoj vodljivosti materijala i temperaturi radnog komada. Za nastanak strukture nakon zavarivanja najutjecajnije je vrijeme hlađenja u temperaturnom području od 800 °C do 500 °C, $t_{8/5}$.

Međutim, transformacija strukture nelegiranih i niskolegiranih čelika kod laserskog zavarivanja još je uvijek nepoznata. Ekstremno velike brzine zagrijavanja i vrlo kratka vremena ohlađivanja uzrokuju transformaciju strukture koja se razlikuje od one kod konvencionalnog elektrolučnog zavarivanja. Dostupni zavarivački TTT-dijagrami vrijede za brzine zagrijavanja od 700 °C/s do 1000 °C/s. Pretpostavlja se da brzine zagrijavanja kod laserskog zavarivanja od 6000 °C/s do 10000 °C/s dovode do promjene tijeka transformacije strukture. Ekstremno visoke brzine zagrijavanja nadalje dovode do podizanja točke Ac_3 i do drukčijeg odvijanja austenitizacije. U ovisnosti o početnoj strukturi materijala mogu nastupiti različiti mehanizmi transformacije prilikom austenitizacije. Tako će u mnogim slučajevima nastati nepotpuno rastvaranje perlita odnosno nastat će nehomogeni austenit. Te pojave povezane s kratkim zadržavanjem u austenitnom području imaju značajan utjecaj na raspad austenita prilikom ohlađivanja velikim brzinama [57-59].

Eksperimentalna istraživanja utjecaja brzina zagrijavanja 700 °C/s i 6000 °C/s, na izgled TTT-dijagrama kod visokočvrstog sitnozrnatog čelika S690Q (oznaka prema DIN), pokazala su kod brzine zagrijavanja 6000 °C/s, pojavu usporenog raspada austenita što znači pomak bainitnog područja u desno prema dužim vremenima ohlađivanja. Također je ustanovljen pad tvrdoće u martenzitnom području kod kraćih vremena ohlađivanja koji još nije objašnjen [58]. Stoga će se točnija procjena strukture i tvrdoće dobiti primjenom laserskog zavarivačkog TTT-dijagrama, ukoliko on bude dostupan za pojedini materijal.

Kratki toplinski ciklus kod laserskog zavarivanja definira mehanička svojstva u zavaru i ZUT-u i u većini slučajeva djeluje povoljno na zavarljivost. Čelici za poboljšavanje sadrže od 0,18 do 0,65 % ugljika, a legirani su manganom, kromom i molibdenom koji povećavaju prokaljivost. Kod čelika za poboljšavanje glavni problem je sklonost otvrdnjavanju uz smanjenje žilavosti, u ovisnosti o sadržaju ugljika. Sklonost otvrdnjavanju može uzrokovati nastanak hladnih pukotina. Što je sadržaj ugljika u čeliku veći, zavarljivost se smanjuje jer je povećana sklonost otvrdnjavanju, ali koja kod laserskog zavarivanja ima bitno manji negativni utjecaj na zavarljivost zbog ograničenog istezanja zone taljenja i zone utjecaja topline, nego kod konvencionalnog zavarivanja. Smatra se da je čelik s oko 0,22 % C odnosno maksimalnom tvrdoćom u zavarenom spoju od 350 HV, na granici dobre zavarljivosti, koja podrazumjeva zadovoljavajuće vrijednosti žilavosti i deformabilnosti. [57, 60-75].

Samo čelici s niskim sadržajem ugljika zavarljivi su bez posebnih mjera. Kod čelika s višim sadržajem ugljika mora se spriječiti otvrdnjavanje primjenom toplinske obrade prije ili nakon zavarivanja, kako bi se vrijednosti maksimalne tvrdoće spustile ispod 350 HV. [52, 70, 73].

Zavarljivost čelika s povećanim sadržajem ugljika određena je:

- sadržajem legirnih elemenata, prvenstveno sadržajem ugljika,
- brzinom zagrijavanja,
- brzinom hlađenja,
- geometrijom konstrukcije,
- stanjem naprezanja.

Lasersko zavarivanje metala i njihovih legura karakterizira [52]:

- brzo zagrijavanje (od 6000 °C/s do 10000 °C/s),
- mali unos topline,
- kratki temperaturni ciklus povezan s velikom brzinom ohlađivanja.

Velike brzine ohlađivanja, veći sadržaja ugljika i legirnih elemenata te višeosno stanje naprezanja uzrokuju porast maksimalne tvrdoće. Velike brzine zagrijavanja povezane s djelovanjem legirnog sustava na tromost pretvorbe ferit→austenit kod laserskog zavarivanja djeluju suprotno, jer nema dovoljno vremena potrebnog za potpuno rastvaranje ugljika u austenitu. Kod laserskog zavarivanja zavar i ZUT su vrlo uski, a i zbog velikih brzina hlađenja struktura zavara je sitnozrnata što u određenoj mjeri kompenzira negativno djelovanje visokog gradijenta tvrdoće u ZUT-u [57].

Dosadašnja istraživanja na čelicima s povećanim sadržajem ugljika, nelegiranim i CrMo legiranim, pokazala su da je granica tvrdoće kod laserskog zavarivanja zbog gore navedenih specifičnosti laserskog zavarenog spoja često veća od 350 HV, odnosno laserski zavareni spoj može podnijeti više maksimalne tvrdoće bez drastičnog smanjenja mehaničkih svojstava i bez nastajanja pukotina kod malih opterećenja, za vrijeme ili neposredno nakon zavarivanja. Ustanovili su graničnu tvrdoću od 650 do 700 HV₂, kod koje počinju nastajati pukotine neposredno nakon zavarivanja, međutim s tako visokim tvrdoćama povezana su i nepovoljna mehanička svojstva. Za graničnu tvrdoću kod koje su zadovoljena svojstva čvrstoće i žilavosti prema DIN EN 10083-1 [76] predložili su 500 HV, odnosno sadržaj ugljika do 0,3 %. Granične vrijednosti vrijede za maksimalnu tvrdoću koju zavareni spoj može podnijeti, odnosno maksimalni sadržaj ugljika u čeliku koji se zavaruje, da ne dođe do pojave pukotina, odnosno potrebe za toplinskom obradom [57].

2.2.3. TOPLINSKA OBRADA SPOJEVA ZAVARENIH LASEROM

Uključivanje toplinske obrade poznate iz konvencionalnih postupaka zavarivanja, npr. konvencionalno predgrijavanje, zavarivanje na konstantnoj temperaturi, zavarivanje s dogrijavanjem, u visokoproduktivni proces laserskog zavarivanja daje loše rezultate, odnosno poništava glavne prednosti laserskog zavarivanja [77].

Upotrebom dodatnog materijala s ciljem postizanja dobre deformabilnosti metala zavora, može se spriječiti nastanak pukotina. Međutim kod uskih i dubokih zavora na niskolegiranim čelicima za poboljšavanje ne dolazi uvijek do potpunog miješanja materijala, pa tada ne postoji direktan utjecaj na tvrdoću u zoni utjecaja topline. Stoga se u mnogo slučajeva zahtijeva dodatna toplinska obrada nakon zavarivanja. Drugi nedostatak je smanjenje brzine zavarivanja zbog korištenja dijela energije laserskog snopa za taljenje dodatnog materijala [70]. Prilikom upotrebe dodatnog materijala na bazi nikla postoji opasnost dodatnog smanjenja dinamičke izdržljivosti konstrukcije [75].

Toplinska obrada također se može provesti korištenjem dodatnog defokusiranog laserskog snopa, koja se može odvijati u istom procesu sa dvije obradne glave ili odvojeno, odnosno da se s istom obradnom glavom još jednom prođe preko zavora, ali sada s defokusiranim snopom manje gustoće snage koji samo zagrijava već napravljeni zavar. Odvojeni proces nije industrijski interesantan, jer su razlike u svojstvima spojeva, u usporedbi kad je drugi snop integriran u proces zavarivanja, marginalne. Ako se drugi snop dobiva dijeljenjem ukupne snage jednog laserskog izvora, za zavarivanje ostaje na raspolaganju manje snage što uzrokuje smanjenje brzine [78-80].

Najbolje rješenje je integracija induktora u proces laserskog zavarivanja, jer se na taj način ne poništavaju prednosti laserskog zavarivanja. Međutim induktor kao i dodatni laserski snop također predstavljaju dodatnu investiciju, te potrebu uključivanja u proces zavarivanja na način da se ne utječe na pristupačnost zavarenom spoju [77,81-83].

2.3. ISPITIVANJE SPOJEVA ZAVARENIH LASEROM

Funkcija laserom zavarenog konstrukcijskog elementa određuje opseg kontrole kvalitete nakon zavarivanja. Potrebno je uzeti u obzir specifična svojstva postupka laserskog zavarivanja u usporedbi s konvencionalnim postupcima zavarivanja, koja postavljaju posebne zahtjeve za ispitivanje. Laserski zavareni spojevi imaju malu zonu taljenja i vrlo usku zonu utjecaja topline, u kojima se kod zakaljivih čelika još pojavljuje martenzitna struktura visoke

tvrdioće. Stoga je potrebno, uobičajene metode kontrole s i bez razaranja, s obzirom na njihovu prikladnost za opisivanje kvalitete laserom zavarenih spojeva kritički ocijeniti [84-87].

Metode ispitivanja za određivanje kvalitete zavarenih spojeva u zavarivanju dijele se u dvije grupe:

- Metode za dokazivanje nepravilnosti kojima se mogu utvrditi geometrija i položaj vanjskih (npr. površinske pukotine, neprovar ili ugorine) i unutarnjih nepravilnosti (npr. pore ili pukotine). Ove metode uglavnom pripadaju metodama kontrole bez razaranja.
- Metode za određivanje mehaničkih svojstava, pripadaju u grupu metoda kontrole s razaranjem.

Metode kontrole bez i s razaranjem, koje se koriste za detekciju nepravilnosti odnosno određivanja mehaničkih svojstava, u laserom zavarenim spojevima opisane su u [85, 88] i navedene u **tablici 1**.

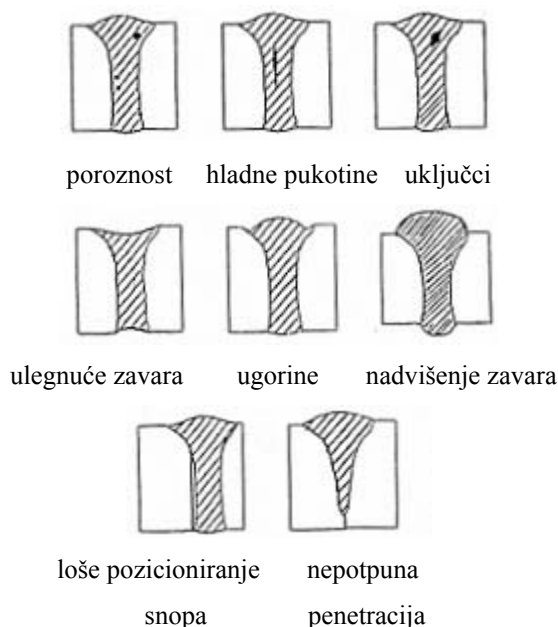
Tablica 1. Prikaz metoda kontrole s razaranjem i bez razaranja, za ispitivanje spojeva zavarenih laserom i elektronskim mlazom [85, 88].

KONTROLA BEZ RAZARANJA	KONTROLA S RAZARANJEM
Vizualna kontrola	Ispitivanje vlačne čvrstoće
Penetranti	Ispitivanje vrste loma
Magnetske čestice	Savijanje
Vrtložne struje	Ispitivanje udarne radnje loma
Ultrazvučna kontrola	Metalografija
Radiografska kontrola	Ispitivanje tvrdoće
	Ostala ispitivanja (korozijska postojanost, ispitivanje nepropusnosti, ispitivanje dinamičke izdržljivosti itd.)

Nepravilnosti su klasificirane u HRN EN 6520-1 [89] u šest grupa: pukotine, šupljine, kruti uključci, nepotpuno taljenje i penetracija, nepravilnosti oblika i druge razne nepravilnosti.

Slika 8, pokazuje neke tipične nepravilnosti zavarenog laserskog spoja.

U normi HRN EN ISO 13919-1 [90] nalaze se smjernice za ocjenjivanje nepravilnosti laserski zavarenih spojeva, za čelik, koje služe za klasifikaciju zavara u tri skupine kvalitete; skupina B visoka kvaliteta, skupina C srednja kvaliteta i skupina D niska kvaliteta.



Slika 8. Nepravilnosti u laserski zavarenom spoju [23].

2.3.1. KONTROLA BEZ RAZARANJA

Određivanje kvalitete zavarenog spoja najprije se određuje na temelju vanjskog izgleda zavora. Vizualnom metodom mogu se odrediti vanjske nepravilnosti kao što su: nadvišenje/ulegnuće lica i korjena zavora, smaknuće limova, ugorine, površinske pukotine, štrcanje, nepotpuna penetracija, greške vezivanja i obojenja površine zavora. Zbog male širine zavora i malih dimenzija nepravilnosti preporuča se korištenje povećala. Vizualna metoda je jednostavna metoda za osiguravanje kvalitete zavora, ali ne daje podatke o poprečnom presjeku zavora. Nakon toga radiografijom se utvđuju unutarnje nepravilnosti kao što su pore ili uključci, te nepotpuna penetracija. Radiografija s mikrofokusnom cijevi koristi se za snimanje spojeva malih dimenzija. Pukotine na površini dokazuju se penetrantima, magnetskim česticama i vrtložnim strujama. Unutarnje pukotine detektiraju se ultrazvukom.

2.3.2. KONTROLA S RAZARANJEM

Mehanička svojstva određuju se kontrolom s razaranjem, a metode su navedene u **tablici 1**. Najčešće se primjenjuju metalografska ispitivanja povezana s ispitivanjem tvrdoće. Zbog velikog povećanja tvrdoće i malih dimenzija laserom zavarenog spoja, za ispitivanje tvrdoće prema Vickersu, koriste se mala opterećenja. (HV 0,1 do HV 5). Metalografska istraživanja na izbruscima koriste se za određivanje geometrije poprečnog presjeka zavarenog spoja i za određivanje strukture zavora, ZUT-a i osnovnog materijala [88]. U kombinaciji s ispitivanjem tvrdoće na jednostavan način može se približno interpretirati čvrstoća zavarenog spoja,

odnosno mogu se kvalitativno odrediti mjesta na kojima je zavareni spoj otvrdnuo odnosno omekšao. Korelacija između tvrdoće i čvrstoće mora se u pojedinačnim slučajevima provjeriti. Za čelik postoji ovisnost između tvrdoće po Vickersu (HV10) i vlačne čvrstoće u normi EN ISO 18265 [91].

Statički vlačni pokus

Statički vlačni pokus HRN EN 895 [92] služi za određivanje čvrstoće i deformabilnosti metalnih materijala pri kvazistatičkom opterećenju. Kod ispitivanja vlačne čvrstoće nelegiranih i niskolegiranih čelika, poprečne epruvete u pravilu pucaju u osnovnom materijalu, pri vrijednostima čvrstoće približno jednakim čvrstoći osnovnog materijala [84]. Takav rezultat daje podatke o dovoljnoj čvrstoći, ali nedostaju podaci o deformabilnosti područja zavora.

Rješenje se traži promjenom geometrije normirane epruvete, lokalnim smanjenjem površine presjeka u području metala zavora, tako da se izrade oštri utori ili izbuše rupe [93,94]. Različiti oštri bočni utori koji smanjuju presjek epruvete čak 66% nisu dovoljni da se prisili lom kroz metal zavora, kod sitnozrnatih čelika S355N i S690Q [95]. Široki zavori puknu u metalu zavora dok kod uskih lom odluta od dna utora u osnovni materijal, što se može procijeniti kao prednost.

Epruvete s utorom daju dobre rezultate kod austenitnih čelika, a kod aluminijskih legura mogu se koristiti normirane epruvete, jer dolazi do loma u metalu zavora zbog njegove poroznosti, koja u ovom slučaju smanjuje površinu presjeka. Uzdužne epruvete za statički vlačni pokus, neovisno o materijalu, daju samo kvalitativne rezultate, a nema kvantitativnih jer se ovdje ispituje i osnovni materijal [85].

Vrijednosti statičkog vlačnog pokusa, mogu se dobiti preračunavanjem rezultata mikrosmičnog ispitivanja [95].

Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem HRN EN 910 [96] služi za određivanje deformabilnosti zavarenog spoja. Epruvete za savijanje nelegiranih i niskolegiranih čelika, ne deformiraju se u metalu zavora, već dolazi do iskliznuća trna u područje osnovnog materijala blizu metala zavora, stoga nisu prikladne za ispitivanje deformabilnosti laserskog zavora. Ovdje se također pokušavaju primijeniti epruvete sa zarezmom [93,94].

Normirane epruvete daju dobre rezultate kod austenitnih čelika i kod aluminijskih legura. Uzdužne epruvete za savijanje, neovisno o materijalu, daju samo kvalitativne rezultate, a nema kvantitativnih, jer se ovdje ispituje i osnovni materijal [85].

Ispitivanje sposobnosti za izvlačenje

Sposobnost materijala za izvlačenje ispituje se utiskivanjem čelične kuglice u limeni ispitni uzorak, ISO 20482 [97]. Za limove i trake debljine do 2 mm služi naprava po Erichsenu. Ovo ispitivanje prikladno je za opisivanje deformabilnosti laserom zavarenih spojeva, jednako kao savijanje uzdužnih epruveta. Razlika je u tome što se ovom metodom deformabilnost ispituje pod djelovanjem čistog dvoosnog vlačnog opterećenja, dok kod savijanja postoje vlačno i tlačno opterećene zone [85].

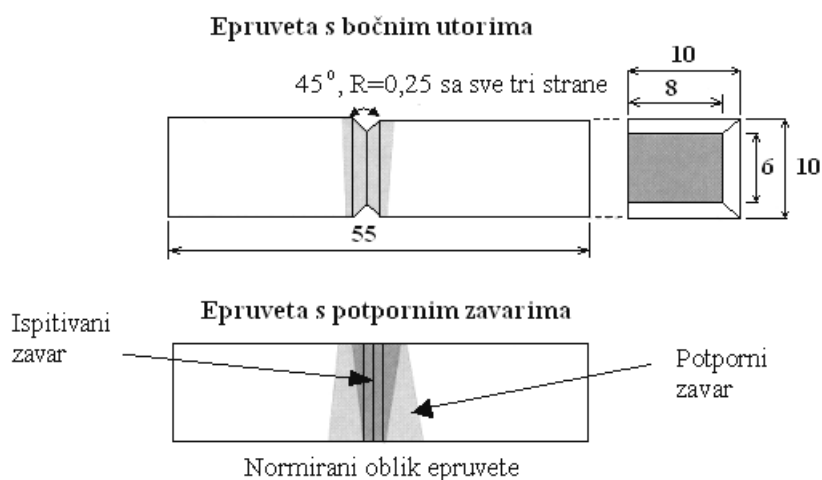
Ispitivanje udarne radnje loma

Ispitivanje udarne radnje loma HRN EN 10045-1 [98] služi za određivanje žilavosti odnosno sklonosti krhkom lomu metalnih materijala pri udarnom opterećenju. Kod ispitivanja udarne radnje loma nelegiranih i niskolegiranih čelika, očekuje se prolaz loma kroz centar metala zavara, međutim to se događa samo kod zavara s visokom tvrdoćom, a pritom su vrijednosti udarne radnje loma značajno niže nego kod osnovnog materijala. Mnogo češći slučaj, koji se događa i kod konvencionalnih postupaka zavarivanja, je kad lom iz dna utora odluta u ZUT i granično područje mekšeg osnovnog materijala, posebno često javlja se kod laserom zavarenih spojeva [84, 99]. Pritom dolazi do velikog rasipanja rezultata i problema njihove interpretacije, jer dobivene vrijednosti udarne radnje loma prije odgovaraju osnovnom materijalu, a ne metalu zavara, a ponekad su veće od žilavosti osnovnog materijala. Vrijednosti ovise o mjestu prolaza loma, pa je njihovo ocjenjivanje moguće samo uz uzimanje u obzir prolaza loma. Prolaz loma ovisi osim o vrsti materijala i strukturi i o stanju vlastitih naprezanja. Prolaz loma kroz osnovni materijal događa se češće kad je širina zavara manja, a tvrdoća mnogo veća od tvrdoće osnovnog materijala [100].

S ciljem dobivanja ponovljivih rezultata koje je moguće interpretirati, razvijaju se novi oblici epruveta odnosno modificirane metode ispitivanja. Jedna od modificiranih metoda je urezivanje bočnih utora na normiranu epruvetu **slika 9** [94,95,101]. Bočni utori su također ISO-V oblika i smanjuju presjek epruvete za približno 40%. Dobivene vrijednosti udarne radnje loma niže su nego kod normirane epruvete, a ne mogu se uspoređivati zbog različitog stanja naprezanja koje je nastalo urezivanjem bočnih utora. Za usporedbu rezultata moraju se napraviti jednake epruvete na osnovnom materijalu. Ova metoda ne preporuča se za epruvete manjih dimenzija od normirane, a također postoje podaci da lom odluta u osnovni materijal unatoč bočnim utorima [95,101].

U drugoj modificiranoj metodi izvode se potporni laserski zavari sa suprotne strane lijevo i desno od laserskog zavara u kojem je napravljen ISO-V utor, **slika 9**. Na taj način dobije se

umjetno proširenje zavora koji se ispituje, koje sprečava da lom odluta u osnovni materijal kod normiranih epruveta. Metoda je složena i mijenja metaluršku i mehaničku nehomogenost zavora, što opet utječe na rezultate udarne radnje loma [95].

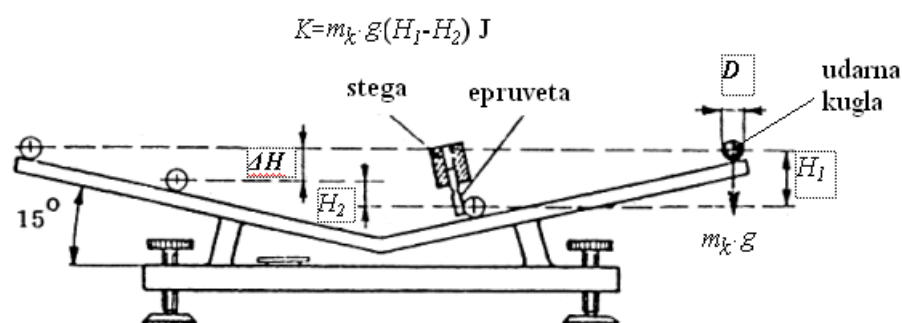


Slika 9. Modificirane epruvete za ispitivanje udarne radnje loma [95].

Rezultati udarne radnje loma dobiveni na epruvetama manjih dimenzija ne mogu se kvantitativno usporediti s rezultatima dobivenim na normiranim epruvetama.

2.3.3. ZGAGINA METODA ZA ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA KRHKIH MATERIJALA

Metoda [102,103] je razvijena za ispitivanje udarne radnje loma na krhkim materijalima kao što su sivi lijev, alatni čelici i brzorezni čelici, pojedine vrste plastike, sinterirani metali i drugi krhki materijali. Na **slici 10**, prikazana je skica naprave na kojoj se izvodi ispitivanje.



Slika 10. Skica uređaja za ispitivanje udarne radnje loma Zgaginom metodom. K – udarna radnja loma, m_k – masa kugle, g – akceleracija zemljine sile teže, H_1 – startna visina kugle, H_2 – visina koju kugla dosegne nakon loma epruvete [102].

Kao što je prikazano **slikom 10**, kugla se kotrlja po vodilici prema dolje sa startne visine H_1 . Ako joj ništa ne stoji na putu kugla će dosegnuti približno jednaku visinu s druge strane uređaja. Gubici usljed trenja mogu se zanemariti. Ako se ispitni uzorak postavi na putanju kugle, kugla će udariti u njega i slomiti ga. Kugla će pritom izgubiti određenu udarnu energiju i doseći manju visinu H_2 . Stoga razlika H_1-H_2 određuje količinu udarne radnje loma ili drugim riječima žilavost materijala.

Tehnički podaci uređaja dani su u **tablici 2**. Maksimalna startna visina kugle iznosi 320 mm, a kugle su promjera od 8 do 40 mm. Najmanja ukupna energija iznosi 0,007 J, a najveća približno 0,84 J. Na predstavljenom uređaju brzina prilikom udara iznosi 2,5 m/s. Na ovaj način dobivena je mogućnost mjerenja male udarne radnje loma u rasponu mikrožilavosti. Najmanji Charpyjev bat razvija energiju 0,490 J, što odgovara području energije kugle od 35 mm promjera, odnosno u tom području mogu se uspoređivati vrijednosti udarne radnje loma obje metode ispitivanja.

Tablica 2. Tehnički podaci uređaja sa startnom visinom kugle $H_1=320$ mm [102].

D mm	8	10	13	16	20	24	30	35	40
m_k kg	0,002	0,004	0,009	0,017	0,033	0,057	0,111	0,176	0,263
K_{max} J	0,007	0,013	0,028	0,053	0,103	0,178	0,348	0,553	0,84

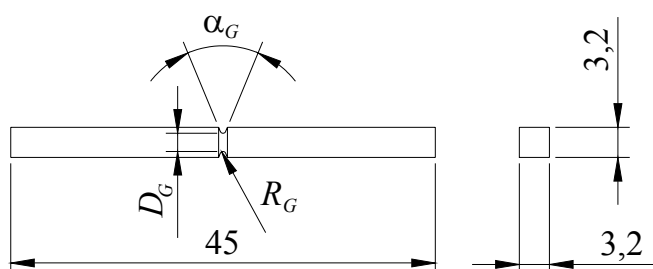
Postoje gubici uzrokovani trenjem kotrljanja između kugle i vodilica, koji ovise o veličini kugle. Kod kugle promjera 10 mm gubici iznose približno 3,5%, dok su kod kugle promjera 24 mm, 2% i manje. Drugi izvor gubitaka je prilikom udara kugle u ispitni uzorak. Događa se trenutno klizanje između kugle i uzorka te između kugle i vodilica. Ove gubitke vrlo je teško kvantitativno odrediti. Poznato je, što je trajanje kontakta kraće, gubici su manji. Vrijeme kontakta iznosi približno 0,002 sekunde.

Točnost očitavanja

Nakon što kugla slomi uzorak, nastavlja gibanje smanjenom brzinom prema gore, dok se ne zaustavi u najvišoj točki. Sada se sa skale na vodilici očita vrijednost visine do koje je došla kugla, H_2 ili razlika visina ΔH . Skala je u milimetrima, pa se visina može direktno očitati. Nagib kosine iznosi 15° , pa razmak 4 mm na kosini odgovara 1 mm visine. Ako se prilikom očitavanja napravi pogreška 2 mm, greška očitavanja visine iznosi 0,5 mm, jer je odnos 4:1. Ukupna visina kosine iznosi 320 mm, pa u tom slučaju pogreška iznosi 0,16%, što se može zanemariti prilikom određivanja udarne radnje loma.

Oblik uzorka

Poželjno je da uzorak, **slika 11**, bude najmanje moguće veličine, pričvršćen samo sa jedne strane. Uzorak ne smije biti kružnog presjeka na mjestu udara kugle. Uzorak mora imati utor određenog radijusa zakrivljenosti, da naprezanja na mjestu uklještenja uzorka ne utječu na proces loma. Oblik uzorka ima značajnu ulogu prilikom određivanja udarne radnje loma. Radijus zakrivljenosti i površina presjeka na mjestu loma značajno utječu na rezultate mjerenja. Kut utora može biti u rasponu od 10° do 60° i ne utječe značajno na rezultat. Rezultati se mogu uspoređivati samo onda kada su mjerenja provedena na uzorcima istog oblika. Rasipanje rezultata nalazi se u intervalu $\pm 15\%$.



Slika 11. Oblik epruvete za ispitivanje udarne radnje loma, $D_G=2,7\text{ mm}$, $R_G=1,75\text{ mm}$ [102].

U literaturi nema podataka o primjeni opisane metode za određivanje udarne radnje loma zavarenog spoja. U metalu laserskog zavara čelika s povećanim sadržajem ugljika dolazi do povećanja tvrdoće odnosno smanjenja žilavosti, što upućuje na opravdanost primjene opisane metode, za određivanje udarne radnje loma na krhkim materijalima.

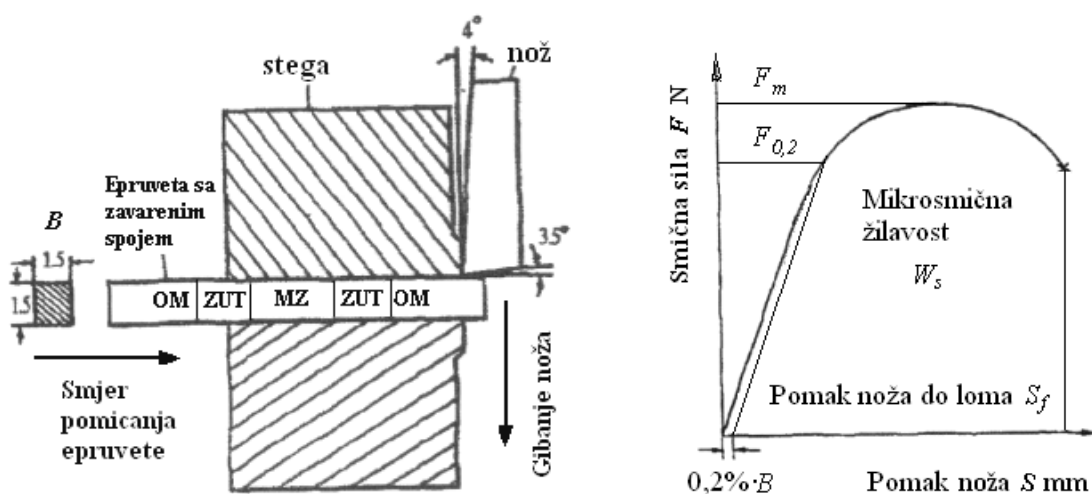
2.3.4. MIKROSMIČNO ISPITIVANJE

U zavarenom spoju postoji nehomogenost mikrostrukture i mehaničkih svojstava, a posebno je izražena u ZUT-u. U ZUT-u postoje uske zone s različitim mikrostrukturama, a zona s grubozrnatom strukturom predstavlja najslabiji dio.

Teško je odrediti lokalna svojstva zavarenog spoja u pojedinim zonama npr. žilavost i lomnu žilavost. Konvencionalne metode određivanja mehaničkih svojstava (statički vlačni pokus, ispitivanje udarne radnje loma,...) i testovi mehanike loma ne mogu se izvesti s dobrom preciznošću u pojedinoj zoni. Charpyjev pokus daje podatke o žilavosti, a ne o deformabilnosti. Probe u svim zonama zavarenog spoja predstavljaju visok trošak ispitivanja. Ispitivanjem tvrdoće brzo se dolazi do rezultata, može se odrediti otpornost deformiranju, ali nedostaje podatak o deformabilnosti.

Mikrosmična metoda koristi male ispitne uzorke. Rezanjem uzoraka dobiju se podaci o čvrstoći, deformabilnosti i žilavosti u uskim zonama zavarenog spoja, uz mali trošak. Mikrosmična metoda uspješno se može koristiti za točno određivanje konvencionalnih mehaničkih svojstava materijala, preračunavanjem vrijednosti iz mikrosmičnog ispitivanja. Tako se mogu odrediti: vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, kontrakcija i tvrdoća. U toku je razvoj mikrosmične metode za određivanje lomne žilavosti materijala [104-108]. Zbog malih epruveta, pogodna je za ispitivanje zavara na posudama pod tlakom i cjevovodima u nuklearnim postrojenjima. Može se koristiti za praćenje degradacije mehaničkih svojstava u zonama zavarenog spoja [107].

Na **slici 12.** prikazano je mikrosmično ispitivanje.



a) Shema mikrosmičnog ispitivanja.

b) Krivulja smična sila - pomak noža.

Slika 12. Mikrosmično ispitivanje [105].

Ispitivanje se provodi na malim uzorcima, promjera 1,5 mm ili kvadratnog presjeka 1,5x1,5 mm, duljine 40 do 50 mm. Ispitivanje se izvodi na sobnoj temperaturi. Brzina opterećenja iznosi 0,05 mm/s. Snima se krivulja sila-pomak noža, **slika 12b**). Minimalni razmak između rezova, zbog deformacije materijala, treba iznositi 0,6 mm. Ako je potrebna veća gustoća ispitivanja onda se koristi paralelna tehnika kod koje je potrebno napraviti 6 jednakih epruveta od istog zavara i ispitivanje svaki put započeti 0,1 mm dalje nego na prethodnoj epruveti. Tako se postiže gustoća ispitivanja od 0,1 mm. Paralelna tehnika se primjenjuje za ispitivanje laserom zavarenih spojeva gdje su zone zavarenog spoja uske, a gradijenti promjene svojstava veliki [109].

Mikrosmičnom metodom određuju se slijedeća mehanička svojstva:

1. Mikrosmična čvrstoća

$$\tau_m = F_m / A_o \quad (2.1)$$

gdje su: F_m -maksimalna sila, A_o -početna površina presjeka epruvete.

2. Mikrosmična konvencionalna granica razvlačenja (granično mikrosmično naprezanje)

$$\tau_{0,2} = F_{0,2} / A_o \quad (2.2)$$

gdje je: $F_{0,2}$ -sila kod koje pomak noža iznosi 0,2% debljine epruvete.

3. Mikrosmična plastičnost

$$\alpha = (S_f / B) \cdot 100 \quad (2.3)$$

gdje su: S_f -pomak noža do pojave loma, B -debljina epruvete.

4. Mikrosmična žilavost W_s , apsorbirana energija u uzorku za vrijeme smičnog procesa, odnosno sposobnost materijala da se odupre deformaciji i lomu. Dobiva se dijeljenjem površine ispod krivulje sila pomak noža

$$W = \int F(s) ds \quad (2.4)$$

sa početnom površinom presjeka epruvete.

$$W_s = W / A_o \quad (2.5)$$

Povezanost između značajki mikrosmičnog ispitivanja i statičkog vlačnog pokusa

Mikrosmičnom metodom izmjerena je mikrosmična čvrstoća, plastičnost i žilavost, **tablica 3**, na materijalima X60-1, X60-2, X60-3. Vrijednosti mikrosmične čvrstoće mogu se, na temelju tih ispitivanja, preračunati u vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja, pomoću slijedećih izraza koji vrijede za čelike s granicom razvlačenja u intervalu od 302 do 1064 N/mm² [105], **tablica 3.:**

$$R_{m(MS)} = 2,18 \tau_m - 308,4 \text{ N/mm}^2, \text{ koeficijent korelacije } 0,998 \quad (2.6)$$

$$R_{p0,2(MS)} = 1,83 \tau_{0,2} - 13,6 \text{ N/mm}^2, \text{ koeficijent korelacije } 0,984. \quad (2.7)$$

Tvrdoća je mjerena kod svakog čelika i preračunata je u čvrstoću $R_{m(H)}$, **tablica 3**.

Tablica 3. Usporedba vrijednosti vlačnih čvrstoća dobivenih mikrosmičnim ispitivanjem, statičkim vlačnim pokusom i mjerenjem tvrdoće [105].

Metoda	MIKROSMIK (izmjereno)			Statički vlačni pokus (izmjereno)	MIKROSMIK (preračunato)	HV (preračunato)
Materijal	τ_m N/mm ²	α %	W_s J/mm ²	R_m N/mm ²	$R_{m(MS)}$ N/mm ²	$R_{m(H)}$ N/mm ²
X60-1	407,4	64,2	0,4271	572,5	579,8	586,8
X60-2	400,4	66,9	0,4104	556,1	564,4	571,6
X60-3	393,0	69,5	0,4023	541,0	548,3	556,7

Vlačna čvrstoća određena mikrosmičnom metodom vrlo je blizu stvarne, odstupanje je manje od 2%. To znači da se vlačna čvrstoća može odrediti s dobrom preciznošću pomoću mikrosmične metode. Nadalje, vlačna čvrstoća preračunata iz tvrdoće samo je malo veća od stvarne.

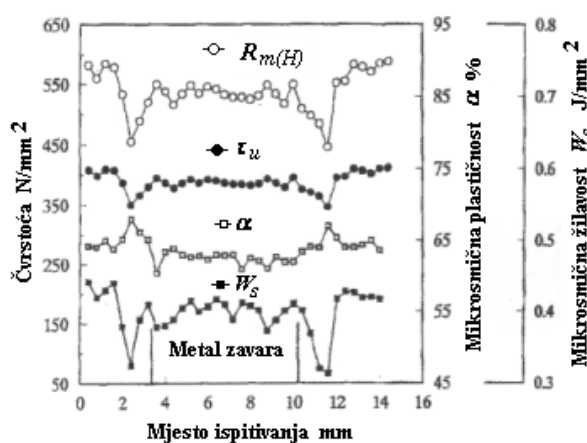
Preračunavanje mikrosmične plastičnosti α u kontrakciju Z , može se izvršiti uz koeficijent korelacije 0,95. Tako se dobije podatak o deformabilnosti pojedine zone zavarenog spoja. Također postoji uska linearna zavisnost između smične čvrstoće τ_m i tvrdoće, koja dozvoljava jednostavno preračunavanje ovih vrijednosti, jer se kod obje metode događa nehomogena deformacija pod višeosnim stanjem naprezanja. Navedene zavisnosti omogućuju za praksu zadovoljavajuće točno preračunavanje izmjerenih vrijednosti. [104]

Vrijednosti mjerenja smične čvrstoće τ_m imaju malo rasipanje, dok je rasipanje vrijednosti graničnog smičnog naprezanja $\tau_{0,2}$ te mikrosmične plastičnosti α i žilavosti W_s nešto veće zbog greške mjerenja prodiranja noža [104].

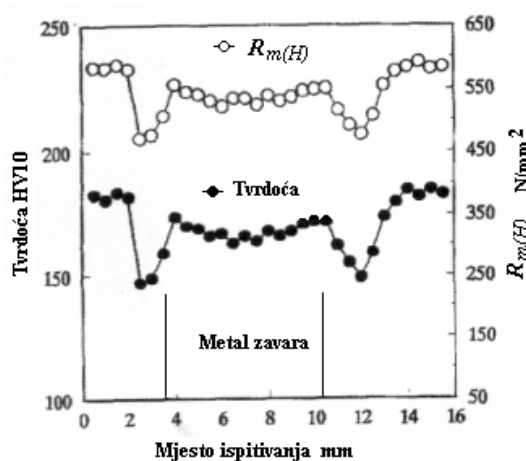
U literaturi [107], potvrđeno je da se mikrosmično ispitivanje može koristiti za određivanje konvencionalnih mehaničkih svojstava.

Mikrosmično ispitivanje zavarenih spojeva

Mikrosmično ispitivanje daje podatke o profilu mehaničkih svojstava τ_m , α , W_s , $R_{m(S)}$ po zonama zavarenog spoja, **slika 13**.



Slika 13. Profil mehaničkih svojstava u zavrenom spoju, X60-1 [105].



Slika 14. Profil tvrdoće i čvrstoće u zavrenom spoju, X60-1 [105].

Može se uočiti omekšana zona u ZUT-u, sa smanjenom čvrstoćom, širine 0,8 do 1 mm. Isti situacija može se uočiti i kod profila tvrdoće, **slika 14**. Nasuprot tome, na tom mjestu povećana je mikrosmična plastičnost α . Što se tiče mikrosmične žilavosti W_s , ona je na tom

mjestu smanjena, pa bi ta zona mogla biti najslabiji dio zavarenog spoja. Mikrosmična žilavost zavara uvijek je niža nego kod osnovnog materijala, što se poklapa s rezultatima ispitivanja udarne radnje loma. [105]

Na **slici 13** može se uočiti da je fluktuacija mikrosmične žilavosti i plastičnosti relativno velika. Glavni razlog tome je nehomogena struktura zavarenog spoja. Tako rezultati mikrosmičnog ispitivanja također pokazuju nehomogene značajke zavarenog spoja. Može se reći da mikrosmično ispitivanje daje više informacija o distribuciji odnosno profilu mehaničkih svojstava u zavarenom spoju.

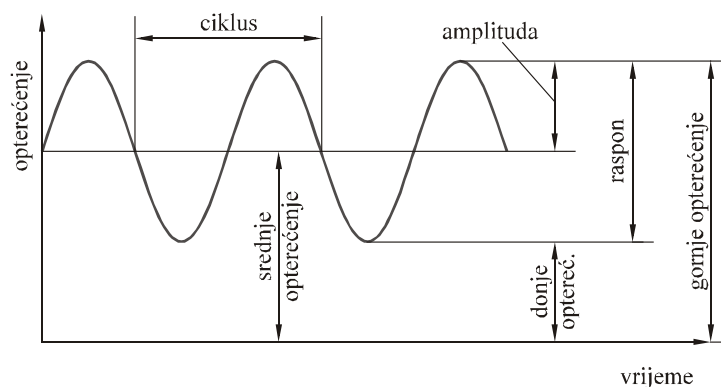
U prikupljenoj literaturi nije pronađeno mikrosmično ispitivanje spojeva zavarenih laserom, od čelika s povećanim sadržajem ugljika koje karakterizira visoka tvrdoća u zavarenom spoju. To će biti dio ovog doktorskog rada.

2.3.5. ISPITIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI

Za kontrolu zavarenih spojeva pored određivanja mehaničkih svojstava bitno je odrediti i njihova dinamička svojstva [110], odnosno ponašanje pri promjenljivim opterećenjima jer u praksi su češći lomovi nastali uslijed promjenljivih opterećenja u odnosu na statičke lomove. Do loma dolazi onda kada je materijal izložen opterećenjima koje ne može izdržati. Veličina tih opterećenja ovisi o vrsti naprezanja, te o tipu i stupnju promjenljivosti naprezanja. Opterećenja koja izazivaju dinamički lom znatno su manja od granice razvlačenja. Lom koji nastaje izazvan promjenljivim tj. dinamičkim opterećenjem posljedica je pojave koja se naziva umor materijala. [111]

Za lom nastao kao posljedica dinamičkih opterećenja karakteristične su tri zone: početak loma, područje trajnog loma i područje trenutnog loma. Udio pojedine zone ovisi o vrsti i intenzitetu dinamičkog naprezanja, te intenzitetu koncentracije naprezanja. Početak loma od umora javlja se na onim mjestima gdje već postoje neke nepravilnosti kao što su šupljine, zarezi i slično. U području trajnog loma, pod utjecajem promjenljivog opterećenja dolazi do napredovanja pukotine. Prijelomna površina sastoji se od zaglađenog svijetlog dijela s tragovima napredovanja pukotine. Kada se druga zona toliko proširi da se ostatak materijala ne može oduprijeti izloženim naprezanjima dolazi do trenutnog loma. Ova površina je hrapava, zagasita i zrnata.

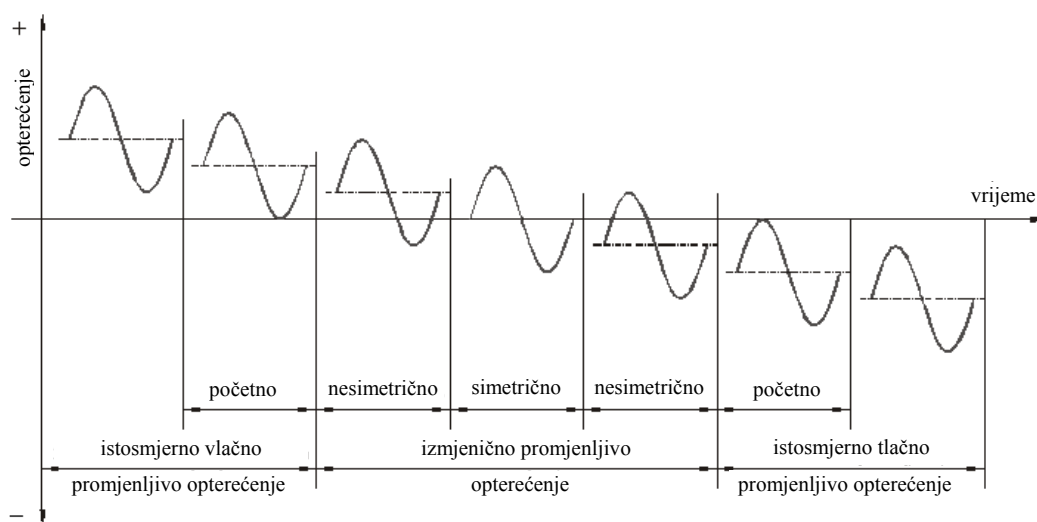
Različita promjenljiva opterećenja nisu prikladna za usporedbu rezultata. Zato se dinamička izdržljivost materijala određuje za sinusoidna opterećenja, **slika 15**.



Slika 15. Ovisnost opterećenja o vremenu [111].

Pod ciklusom se podrazumijeva najmanji dio sinusoide koji se periodično ponavlja, a broj ciklusa u jedinici vremena predstavlja frekvenciju.

Promjenjiva naprezanja odnosno opterećenja mogu biti istosmjerna i izmjenična, **slika 16.** :



Slika 16. Različiti tipovi sinusoidnog promjenljivog opterećenja [110].

Jednosmjerno promjenljivo naprezanje, je ono naprezanje čija se veličina mijenja u tijeku vremena bez promjene predznaka. Poseban primjer nastaje kada je gornje ili donje opterećenje jednako nuli i naziva se početno jednosmjerno promjenljivo naprezanje.

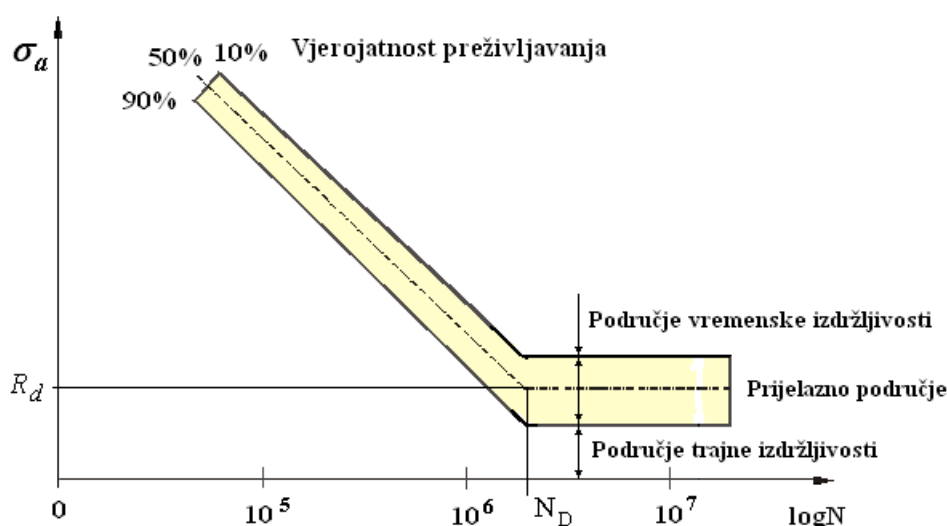
Izmjenično promjenljivo naprezanje, je ono naprezanje čija se veličina i predznak mijenjaju u tijeku vremena. Poseban slučaj ovog naprezanja nastaje kada je srednje naprezanje jednako nuli, odnosno kada su apsolutne vrijednosti gornjeg i donjeg naprezanja jednake – simetrično izmjenično promjenljivo naprezanje.

Trajnost materijala ovisi o broju ciklusa opterećenja. Smanjivanjem amplitude naprezanja σ_a , pri dinamičkom opterećenju, povećava se broj ciklusa N , koje materijal izdrži do loma. Ovisnost amplitude naprezanja o broju ciklusa do loma prikazuje Wöhlerova krivulja, **slika 17.** Područje vremenske izdržljivosti (strmi dio) može se opisati slijedećom formulom:

$$\log N = x - k_W \cdot \log \sigma_a \quad (2.8)$$

Wöhlerova se krivulja pri određenom broju ciklusa N_D (10^7 za čelik, 10^8 za lake kovine) približava stalnoj vrijednosti R_d , kojom se definira dinamička izdržljivost (ravni dio), **slika 17**. Dinamička izdržljivost R_d je najveće naprezanje pri kojem se materijal ni pri bilo kakvom povećanju broja ciklusa opterećenja, ne bi više slomio.

Rezultati dinamičkih ispitivanja materijala imaju znatno rasipanje, pa je danas uobičajeno uz rezultate dati i vjerojatnost preživljavanja dijela pri danom opterećenju i broju ciklusa, ucrtavanjem triju Wöhlerovih krivulja s vjerojatnostima preživljavanja 10%, 50% i 90%, **slika 17**. Tada se govori o Wöhlerovom polju, koje se može podijeliti u tri različita područja: područje vremenske izdržljivosti u kojem većina epruveta puca, područje trajne izdržljivosti u kojem nema pucanja epruveta i prijelazno područje u kojem neke epruvete pucaju, a neke ne.



Slika 17. Modernizirani Wöhlerov dijagram [112].

Ispitivanja dinamičke izdržljivosti su skupa i dugotrajna. Za konstruiranje samo jedne Wöhlerove krivulje potrebno je i do nekoliko stotina sati rada pulzatora. U vezi s tim pojavila se i potreba za ubrzanim metodama određivanja dinamičke izdržljivosti kojima se znatno smanjuju vrijeme i troškovi ispitivanja u odnosu na klasični način ispitivanja. Postoji nekoliko takvih metoda a neke od njih su: Lehrova metoda, Protova metoda, te Locatijeva metoda koja se zasniva na hipotezi o linearnom karakteru gomilanja oštećenja [142]. Lom uslijed umora materijala nastupa kada suma relativnih oštećenja na uzorku, dobivenih na raznim stupnjevima naprezanja dostigne jedinicu. Budući da se ova metoda koristi u svijetu i daje dobre rezultate koristit će se pri izvođenju pokusa u ovom radu i detaljnije je opisana u poglavlju 4.6.8.2.

2.3.5.1. Dinamička izdržljivost spojeva zavarenih laserom

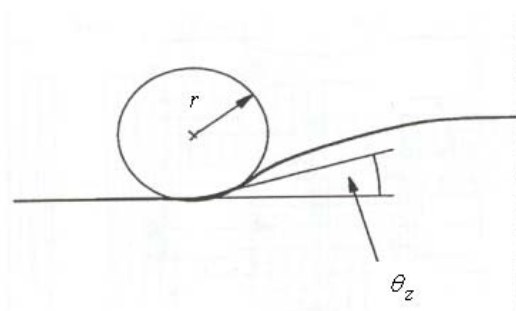
Glavno područje primjene čelika za poboljšavanje su dinamički visoko opterećeni dijelovi. Stoga je dinamička izdržljivost zavarenih spojeva od čelika za poboljšavanje, odlučujuća za praktičnu primjenu.

Kao posljedicu visokog otvrdnjavanja, laserom zavareni spojevi od čelika za poboljšavanje imaju slijedeće posebnosti koje utječu na dinamičku izdržljivost [113]:

- povišena opasnost od pukotina,
- visoka osjetljivost na ugorine lica i korijena (geometrijsko zarezno djelovanje),
- velika razlika u čvrstoći, sa strmim gradijentom promjene između metala zavara i osnovnog materijala (metalurško zarezno djelovanje na liniji staljivanja).

Na dinamičku izdržljivost jako utječe zarezno djelovanje (nejednolika razdioba naprezanja), što može dinamičku izdržljivost znatno sniziti ispod vrijednosti koju materijal ima bez zareza. Zato je dinamička izdržljivost zavarenih spojeva mnogo manja, jer zavareni spoj predstavlja i geometrijski i metalurški zarez. Pukotina nastaje tamo gdje je najveća koncentracija naprezanja.

Najvažniji čimbenik koji utječe na dinamičku izdržljivost, kod neprebrušenih zavara je njegova geometrija. Najvažnije geometrijske veličine kod konvencionalno zavarenih spojeva su radijus lica zavara i kut nadvišenja zavara, **slika 18**.



Slika 18. Geometrijske značajke zavarenog spoja mjerodavne za dinamičku izdržljivost, r - radijus lica zavara, θ_z - kut nadvišenja zavara [112].

Kod laserom zavarenih sučeljenih spojeva puno je značajniji utjecaj nadvišenja korijena i ulegnuća lica zavara, odakle pukotina uglavnom kreće. Također je mjerodavan radijus zakrivljenosti korijena zavara te kut nadvišenja korijena zavara.

Ukoliko je on malen pukotina kreće na prijelazu korijen/osnovni materijal i širi se kroz otvrdnutu zonu između zavara i ZUT-a. Pukotina također može krenuti iz otvrdnute zone lica ako je veće zarezno djelovanje ulegnuća lica zavara od radijusa korijena. U literaturi [114],

kod sitnozrnatog čelika S 690 Q postoje mikrozarezi u otvrdnutoj korijenjskoj zoni ZUT-a i oni predstavljaju najveće zarezno djelovanje. Iako je geometrijski oblik zavora jednak, dobivena je manja dinamička izdržljivost zavarenog spoja kod čelika S 690 Q nego kod čelika S 355 N. Uzrok tome su gore navedeni mikrozarezi [114].

Rasipanje broja ciklusa do loma je veliko, jer se radijusi na prijelazu korijena i lica razlikuju po dužini zavora, odnosno i oni imaju veliko rasipanje [115].

Kod čelika za poboljšavanje C45, u području dinamičke izdržljivosti, pukotina kreće od ugorina lica zavora i širi se točno kroz sredinu zavora, a u području vremenske izdržljivosti cijela površina loma je u sredini zavora [113]. Kad se koristi indukcijsko predgrijavanje čelika C45, pukotina kreće od ugorina korijena zavora [113].

Kod pobrušenih nadvišenja lica i korijena zavora najveće zarezno djelovanje imaju pore. Pobrušene epruvete imaju veću dinamičku izdržljivost od nepobrušenih. Svi lomovi kreću od pora, a broj ciklusa do loma raste sa smanjenjem poroznosti uz postojanje dobre korelacije s veličinom, položajem i brojem pora na površini loma [115]. Značajno poboljšanje dinamičke izdržljivosti prebrušivanjem nadvišenja lica i korijena dobije se samo ako je sadržaj pora drastično niži nego što to dozvoljava klasa B zavora prema HRN EN ISO 13919-1 [90]. To zahtijeva visoku stabilnost procesa i visoke troškove kontrole bez razaranja.

Kod aluminijskih legura [116, 117], zarezno djelovanje pora veće je i od zarnog djelovanja radijusa na prijelazu korijena zavora. Loše izvedeno lasersko zavarivanje (smaknuće limova, ugorine lica i korijena) može se zanemariti ukoliko je velika poroznost, jer ne povećava koncentraciju naprezanja. Brušenje nadvišenja jako poroznog zavora dodatno snizuje dinamičku izdržljivost jer se smanjuje površina presjeka odnosno debljina stijenke. Kod aluminijskih legura poroznost određuje dinamičku izdržljivost. Velika poroznost može smanjiti dinamičku izdržljivost na polovicu one od osnovnog materijala.

Dinamička izdržljivost sučeljenog spoja, osim o zarnom djelovanju korijena, ovisi i o osnovnom materijalu. Karoserijski lim debljine 0,8 i 2 mm, zbog visoke duktilnosti je slaba točka, bez obzira na geometriju laserskog zavora. Čak i epruvete s utorom u metalu zavora pucaju u osnovnom materijalu. Zavar ima visoku čvrstoću i tvrdoću. Ova pojava događa se zbog visoke kvalitete zavarenog spoja u odnosu na konvencionalne postupke. [118]

Dosadašnja istraživanja laserom zavarenih sitnozrnatih konstrukcijskih čelika u području debljina iznad 5 mm, pokazala su da je dinamička izdržljivost minimalno jednaka kao kod konvencionalo zavarenih spojeva, ili je čak značajno veća [112]. Na brodograđevnim čelicima [114] i općim konstrukcijskim čelicima [119] također je dinamička izdržljivost laserskog

zavarenog spoja minimalno jednaka dinamičkoj izdržljivosti konvencionalno zavarenog spoja. Dok je u [113] dokazano da je kod nelegiranih i normaliziranih sitnozrnatih čelika dinamička izdržljivost laserom zavarenih spojeva veća nego kod konvencionalno zavarenih, što je također slučaj kod konstrukcijskih čelika [120-122]. U [123] se navodi da je dinamička izdržljivost laserskog zavarenog spoja od nehrđajućih čelika približno jednaka dinamičkoj izdržljivosti osnovnog materijala.

U [122] je pronađeno da pored utjecaja geometrije i oblika zavara na dinamičku izdržljivost postoje još dva utjecaja. To su utjecaj unešene energije i sadržaja ugljika u osnovnom materijalu.

Statička i dinamička svojstva strukture mjerodavna su za zajamčiti funkciju konstrukcije. Nosivost spojenih elemenata pod dinamičkim opterećenjem određuje se na temelju karakterističnih vrijednosti dinamičkih ispitivanja. Mjesta spajanja često predstavljaju slaba mjesta konstrukcije. Vrijednosti dinamičkih svojstava predstavljaju osnovu za odlučivanje o postupku spajanja, mjestu spajanja kao i potrebnom broju spojeva. Prema današnjem stanju tehnike nije moguće s dovoljnom točnošću proračunati dinamička svojstva konstrukcija od tankih limova [124, 125]. Zbog toga je neophodno za svaki materijal, postupak spajanja i oblik konstrukcije odrediti dinamička svojstva konstrukcija od tankih limova eksperimentalnim putem.

2.4. ULOGA ZAŠTITNOG PLINA PRI LASERSKOM ZAVARIVANJU

Zaštitni plin potreban je zbog zaštite taline od atmosferskih plinova isto kao što je to slučaj kod elektrolučnih postupaka. Tipični zaštitni plinovi su Ar, He, N₂, CO₂ i njihove mješavine. Izbor zaštitnog plina ovisi o valnoj duljini lasera, vrsti materijala, unešenoj energiji i dovodu zaštitnog plina [12, 13, 20, 25, 30, 31, 126-129].

Zadaće koje plin može ispuniti obuhvaćaju, pored zaštite taline od utjecaja atmosfere, poboljšanje estetskog izgleda i mehaničkih svojstava zavara, otpuhivanje plazme te zaštitu optike za fokusiranje od para i štrcanja. Ove zadaće jednake su kod CO₂ i Nd:YAG laserskog zavarivanja, s izuzetkom otpuhivanja plazme [19, 126]. Zaštitni plin mora se dovoditi na lice zavara, a preporuča se i na korijensku stranu kod zavarivanja s potpunom penetracijom. Kod velikih brzina zavarivanja koristi se produžena zaštita iza laserskog snopa. Protok plina ima veliku ulogu. Ako je neodgovarajući može izazvati turbulencije, lošu kvalitetu zavara i oštećenje optike zbog štrcanja. Kod dobre plinske zaštite, dobiva se metalno svijetla površina zavara.

Zavarivanje u plinskoj zaštiti zahtijeva se kod svih zavara. Samo pojedinačni točkasti zavari nereaktivnih materijala, kod kojih je dozvoljena određena redukcija mehaničkih svojstava, mogu se zavarivati bez plinske zaštite [19, 20].

Utjecaj zaštitnog plina na proces zavarivanja definiraju:

- vrsta plina (čisti ili mješavina)
- protok plina
- način dovođenja plina na mjesto zavarivanja

Inertni plinovi

Helij i argon su inertni plinovi koji pružaju odličnu zaštitu od oksidacije. Helij ima visoku energiju ionizacije, malu atomsku masu i visoku toplinsku vodljivost, što ga čini najboljim plinom za kontrolu plazme [126]. Što je veća energija ionizacije plina to je bolji prijenos energije. Nedostatak helija je što je puno skuplji od argona. Zbog male atomske mase helija teže je postići laminarno strujanje, nego kod težih plinova. Zbog toga je veća vjerojatnost ulaza atmosferskog kisika u zaštitnu atmosferu [20,129]. Argon, helij i njihove mješavine upotrebljavaju se za zavarivanje ugljičnih čelika, visokolegiranih čelika, aluminija i njegovih legura, te titana i njegovih legura.

Aktivni plinovi i njihove mješavine s inertnim plinovima

Aktivni plinovi dušik, ugljik dioksid i kisik, također se koriste kao zaštitni plinovi, prije svega jer su jeftiniji od inertnih plinova. U oksidirajućoj atmosferi (CO_2 plin ili inertni plin s dodatkom kisika) nastaje oksidni sloj na površini taline, koji uzrokuje neravnu i obojenu površinu zavara. Aktivni plin ugljik-dioksid i njegove mješavine s argonom i kisikom upotrebljavaju se za ugljične čelike, kada se može tolerirati sloj oksida na površini. Mješavine dušika i helija koriste se kod zavarivanja aluminija i aluminijских legura. Kod austenitnih čelika mješavinom argona i vodika postižu se veće brzine zavarivanja i sjajnija površina u usporedbi s helijem i mješavinom argona i helija. Zaštitni plin dušik i mješavine dušika nadoknađuju gubitke dušika iz austenitnih čelika legiranih dušikom. Kod duplex čelika mješavine dušika stabiliziraju austenitnu fazu.

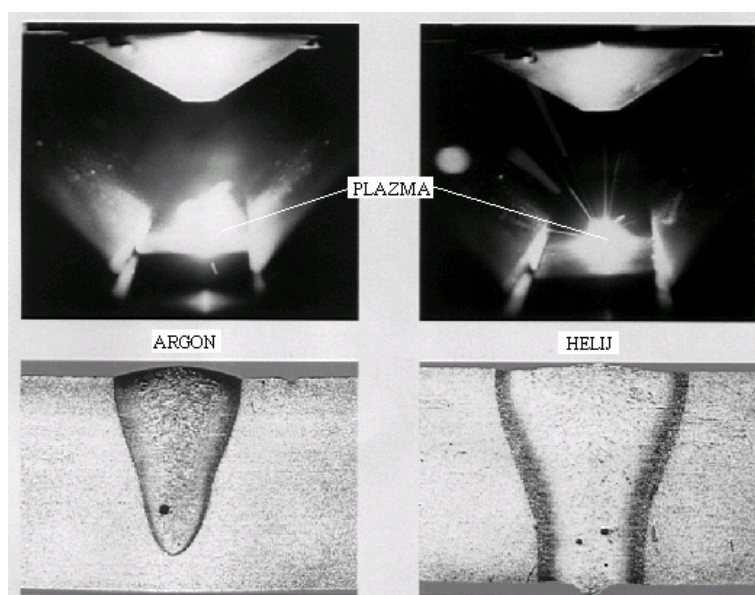
Utjecaj zaštitnog plina na otpuhivanje plazme

Kod CO_2 lasera postoje radni i zaštitni plin. Oni se mogu dovesti odvojeno, a u većini slučajeva to je isti plin koji ima dvije uloge [31]. Prva uloga plina je održavanje stabilnosti procesa zavarivanja (održavanje kratera) kontrolom plazme, te se zbog toga plin naziva radni. Taj isti plin ima i ulogu zaštitnog plina. Plazma je ionizirana mješavina isparenog metala i

radnog plina. Ona će lakše nastati što je niža energija ionizacije i što je viša atomska masa plina. Za lasersko zavarivanje to znači slijedeće: helij je najotporniji na nastajanje plazme, iza njega slijede dušik, pa argon. Pri primjeni ugljik-dioksida postoji najveća opasnost od nastanka plazme. Plinske mješavine ponašaju se ovisno o udjelu komponenti. Najčešće se upotrebljavaju helij i argon, a dušik i ugljik-dioksid kada to dozvoljava materijal koji se zavaruje [25, 126, 128].

Kod CO₂ lasera snaga manjih od 2 kW i brzina zavarivanja većih od 100 cm/min, nastajanje plazme nije veliko, pa se može kontrolirati čistim argonom ili mješavinom argona i helija. Što je veća pojava plazme mješavina mora biti bogatija helijem. Kod zavarivanja debljih limova visokim snagama i malim brzinama, nastajanje plazme je pojačano, pa se za kontrolu plazme može koristiti samo čisti helij. Utjecaj plinova argona i helija na oblik zavara, kod pojačanog nastajanja plazme, pri zavarivanju s CO₂ laserom, prikazan je na **slici 19**. S helijem se postiže veća penetracija i veći poprečni presjek zavara nego s argonom. To je posljedica bolje kontrole plazme kod primjene helija. U gornjem djelu **slike 19**, prikazan je proces zavarivanja i može se uočiti kako je oblak plazme iznad zavara kod argona veći, pa je i apsorpcija zračenja na oblaku plazme veća. To znači da je dio zračenja koji udara na površinu materijala manji pa je tako i penetracija kod argona manja, što smanjuje efikasnost procesa [126, 128].

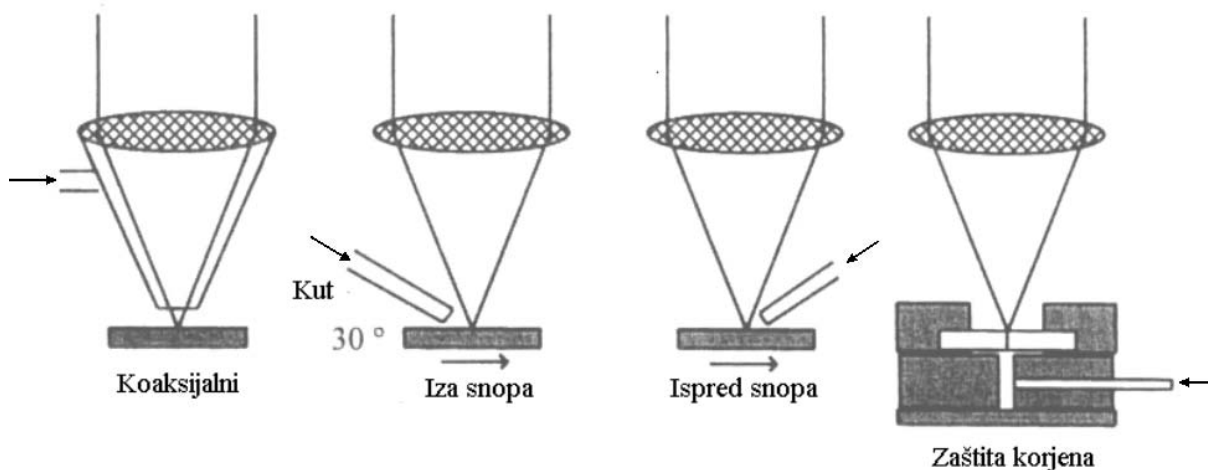
Kod Nd:YAG lasera, u pravilu, koristi se plin za zaštitu zavara od oksidacije, a ne za kontrolu plazme, jer se pojava plazme zbog različite valne duljine od CO₂ lasera, može zanemariti. Najčešće se koriste argon i dušik, a kod posebnih primjena još se upotrebljavaju helij, ugljik-dioksid te mješavine plinova.



Slika 19. Pojava plazme i penetracija pri zavarivanju s CO₂ laserom, sa zaštitnim plinovima argonom i helijem. [130]

Utjecaj dovodenja plina

Osim vrste plina, važnu ulogu ima i dovod plina na mjesto zavarivanja koji može biti koaksijalan i sa strane kroz jednu ili više sapnica, **slika 20**. Za svaku primjenu potrebno je optimirati vrstu, protok i dovod zaštitnog plina. Ako je protok plina premali na površini zavara pojavljuju se oksidi i obojenja. Optimalne rezultate daje velika sapnica s polaganim laminarnim strujanjem pozicionirana iza snopa, što bliže mjestu zavarivanja.



Slika 20. Prikaz varijanata dovoda zaštitnog plina na mjesto zavarivanja [13].

Najčešće je za sprječavanje oksidacije na površini dovoljan protok plina od 10 do 20 l/min kroz sapnicu promjera 6 do 10 mm. Veće brzine strujanja mogu dovesti do turbulencije odnosno ulaza atmosferskih plinova u struju zaštitnog plina i tako dovesti do nedovoljne zaštite i pojave pora. Kod određenih I-spojeva može se dovoditi dodatni plin sa strane lica kao i sa strane korjena zavara [131].

Utjecaj zaštitnog plina na brzinu zavarivanja

Prednost aktivnih plinova je povećanje brzine zavarivanja, posebno kod malog dodatka kisika od 1 do 2%. Uzrok tome je smanjena površinska napetost taline uslijed oksidacije, koja uzrokuje povećanje apsorpcije, te dodatna energija uslijed egzotermne reakcije [20].

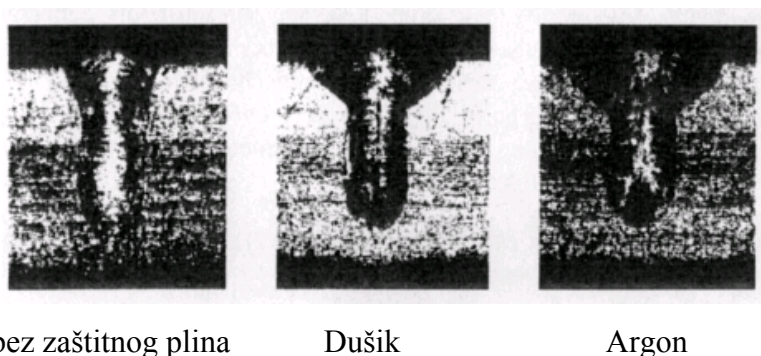
Upotrebom aktivnih mješavina plinova, ugljik-dioksida i kisika s argonom, postižu se 30 do 45% veće brzine zavarivanja u usporedbi s čistim helijem, argonom i dušikom. Brzine zavarivanja kod upotrebe čistih plinova helija, argona i dušika, neznatno se razlikuju [127].

Utjecaj zaštitnog plina na geometriju zavara

Zaštitni plinovi argon, helij i dušik utječu na proširenje zavara u gornjem dijelu, **slika 21**. Proširenje zavara uzrokuje povećana površinska napetost na neoksidiranoj površini taline, koja inducira povećanu dinamiku taline. Povećana dinamika taline dovodi do povećanog

unosu energije na površini lima, pa tako i do smanjenja penetracije približno 10%. Kod primjene argona, helija i dušika, dobije se približno jednaka geometrija i površina zavarenog spoja. Kod kontinuiranog laserskog snopa (cw) utjecaj zaštitnog plina veći je nego kod impulsnog (pw), jer se interakcija na površini ne prekida. Ovakva promjena geometrije zavora nastaje samo u slučaju kvalitetne plinske zaštite, koja ne dopušta ulaz kisika iz atmosfere. Kod visokih gustoća snage smanjuje se utjecaj zaštitnog plina na širinu zavora. Visoka gustoća snage dovodi do pojačanog utjecaja tlaka izlazećih metalnih para na dinamiku taline, koja se smanjuje. Tako se utjecaj zaštitnog plina na širinu zavora smanjuje [13].

Mješavine aktivnih plinova ugljik-dioksida i kisika s argonom uzrokuju povećanje dubine penetracije, jer je kao što je gore navedeno površina taline oksidirana, dok se dubina penetracije kod čistog helija, argona i dušika neznatno razlikuje [127, 129].



Slika 21. Usporedba geometrije zavarenog spoja kod primjene različitih zaštitnih plinova. Materijal X5CrNi1810 prema DIN 17440, debljina lima 2 mm, cw-način, snaga 680 W, promjer snopa u žarištu 0,2 mm, brzina zavarivanja 1 m/min [13].

Kod aluminija i aluminijskih legura, sastav mješavine dušika i helija ima utjecaj na oksidni sloj i dubinu penetracije [129]. Također postoji utjecaj mješavine argona i helija na penetraciju kod aluminija i aluminijskih legura [131].

Utjecaj plinova na metalurgiju i mehanička svojstva zavora

Argon i helij su inertni plinovi koji nemaju utjecaj na metalurške procese u zavaru. Dušik, ugljik-dioksid i kisik su reaktivni plinovi koji utječu na metalurške procese u zavaru [126]. Kod zavarivanja u zaštiti dušikom i ugljik-dioksidom dolazi do značajnog ulaska dušika i kisika u zavar. Ulazak dušika u zavareni spoj uzrokuje povećanje tvrdoće i poroznosti zavora, te smanjenje deformabilnosti [126]. Kod zavarivanja ugljičnih čelika sa zaštitnim plinom ugljik-dioksidom, također dolazi do laganog povišenja tvrdoće [129]. Zavari napravljeni s helijem i argonom imaju značajno veću deformabilnost, od zavora napravljenih s dušikom i ugljik-dioksidom [126].

3. CILJ ISTRAŽIVANJA

Danas je trend uvođenje automatiziranih postupaka zavarivanja u modernu zavarivačku proizvodnju. Važni ciljevi prilikom izbora postupka zavarivanja su visoka kvaliteta proizvoda, proizvodnost, fleksibilnost i povećanje ekonomičnosti. U porastu je značaj laserskog zavarivanja u industrijskoj primjeni, pogotovo u pogledu uvođenja tankostijenih pa tako i laganijih konstrukcija, te potrebe za zavarivanjem komada obrađenih na mjeru u posljednjoj proizvodnoj operaciji. To su djelovi koji moraju biti točno obrađeni, u koje nije dozvoljen velik unos topline i koji se ne smiju deformirati. Lasersko zavarivanje sa svojim usko ograničenim i koncentriranim unosom energije predstavlja prikladan alat za udovoljavanje navedenih zahtjeva. Istraživanje zavarljivosti materijala pri laserskom zavarivanju provodi se već dugi niz godina. Unatoč tome postoje još uvijek neistražena područja. Povećanje saznanja o svojstvima laserom zavarenih spojeva, predstavlja važan doprinos sveobuhvatnom kvalificiranju postupka laserskog zavarivanja za nove primjene u različitim područjima.

Lasersko zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika uz upotrebu aktivnih plinskih mješavina nije dovoljno istraženo, a podaci o geometrijskim i mehaničkim svojstvima, a posebno dinamičkim, u potpunosti nedostaju. Prema proučenoj literaturi, zaštitni plin argon je najbolji izbor za Nd:YAG lasersko zavarivanje, dok se prihvatljiv oblik zavara može postići sa svim zaštitnim plinovima i aktivnim mješavinama za lasersko zavarivanje ukoliko se može tolerirati određeni stupanj oksidacije na površini. Aktivne plinske mješavine bazirane na argonu s dodatkom kisika i/ili ugljik-dioksida, utječu na povećanje unosa energije u materijal, čime se povećava brzina zavarivanja i penetracija, a time i produktivnost. Također dolazi do promjene geometrijskog oblika zavara. Nedostatak je djelovanje na smanjenje mehaničkih svojstava, što podrazumijeva povećanje tvrdoće, te smanjenje deformabilnosti, žilavosti i dinamičke izdržljivosti.

Koliko je to smanjenje u odnosu na čisti argon i da li je značajno biti će istraženo u ovom radu, na primjeru čelika za poboljšavanje, koji imaju povećan sadržaj ugljika, pa se očekuje dobar uvid odnosno razlučivost razlike u mehaničkim svojstvima.

Sveukupni cilj ovog rada je razjasniti koliko su prikladne plinske mješavine na bazi argona s dodatkom ugljik-dioksida i/ili kisika za zavarivanje limova od čelika za poboljšavanje 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60, korištenjem Nd:YAG lasera.

Model pokusa s mješavinama pokazao se prikladnim za istraživanje odnosno matematičko modeliranje utjecaja mješavina zaštitnih plinova u zavarivanju. Stoga je slijedeći cilj, na temelju izmjerenih vrijednosti u stanjima planiranog pokusa za mješavinu od tri sastojka, matematičkim modelom kvantitativno opisati, utjecaj sastava mješavine na geometriju i mehanička svojstva zavarenih spojeva.

3.1. HIPOTEZA RADA

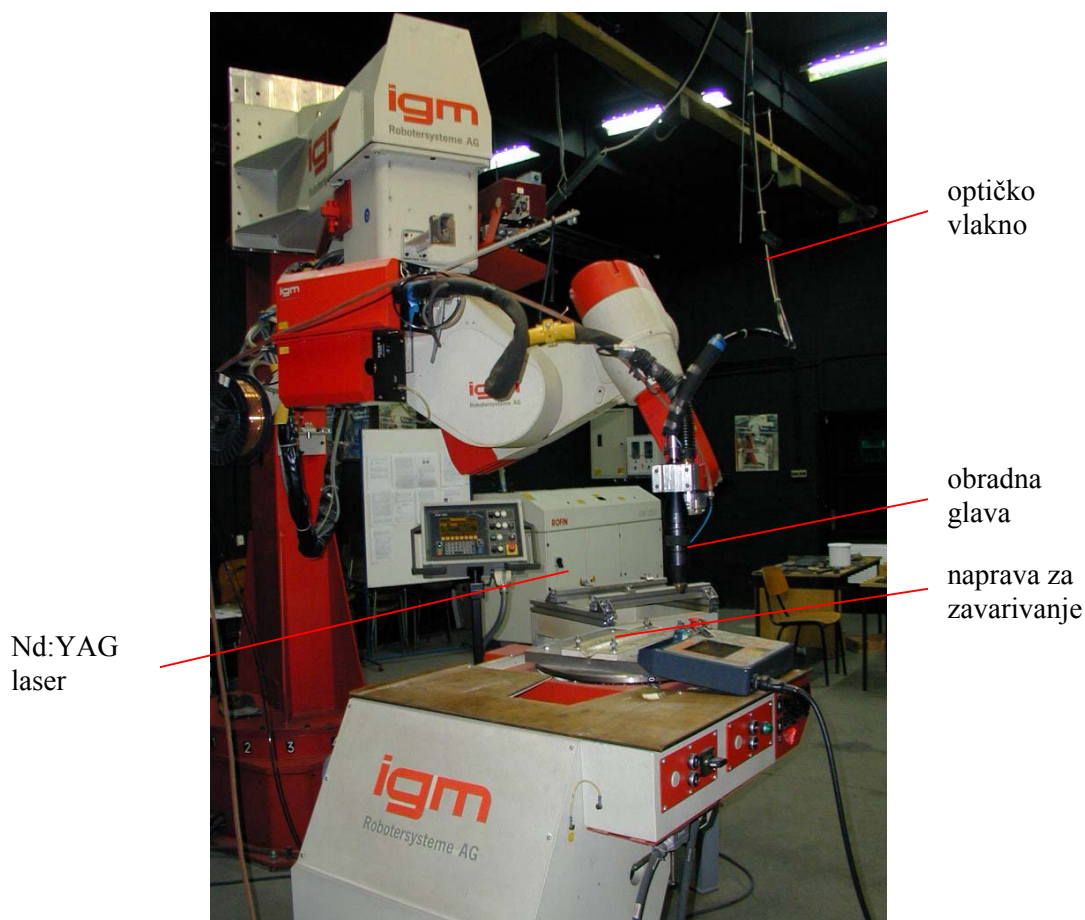
Hipoteza polazi od činjenice da se laserskim zavarivanjem mogu dobiti zavareni spojevi na čelicima za poboljšavanje bez pojave pukotina, a poželjnih mehaničkih svojstava. Upotreba zaštitnih plinskih mješavina s dodatkom aktivnih plinova utječe na unos energije u materijal i na mehanička svojstva zavarenog spoja. Promjena unešene energije utječe na brzinu ohlađivanja i strukturne transformacije. Pokusi s mješavinama pokazali su se prikladnim za istraživanje utjecaja zaštitnih plinskih mješavina u zavarivanju. Na temelju tih činjenica postavljene su slijedeće hipoteze predloženog doktorskog rada:

- 1. Sastav zaštitne plinske mješavine utječe na geometrijske značajke zavarenog spoja, a utjecaj se može opisati pomoću matematičkog modela.**
- 2. Sastav zaštitne plinske mješavine utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja i to posebno na tvrdoću, čvrstoću, deformabilnost, udarnu radnju loma i dinamičku izdržljivost, a utjecaj se može opisati pomoću matematičkog modela.**

4. EKSPERIMENTALNI RAD

4.1. SUSTAV ZA LASERSKO ZAVARIVANJE

Sustav za lasersko zavarivanje prikazan je na slici 22.



Slika 22. Sustav laser-robot, smješten u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u, Zagreb.

Za provođenje pokusa korišten je Nd:YAG laser "ROFIN CW020". Proizvođač lasera je tvrtka "ROFIN SINAR".

– Tehničke karakteristike lasera "ROFIN CW020"

- Valna duljina: 1064 nm
- Nominalna snaga: 2000W
- Način rada:
 - kontinuirani cw, prosječna snaga: 2000 W
 - impulsni pw s opcijom superpuls i opcijom oblikovanja impulsa, prosječna snaga: 2000 W, vršna snaga: 5000W, frekvencija: 10 - 500 Hz, najmanje vrijeme trajanje impulsa: 1ms

○ Kvaliteta snopa

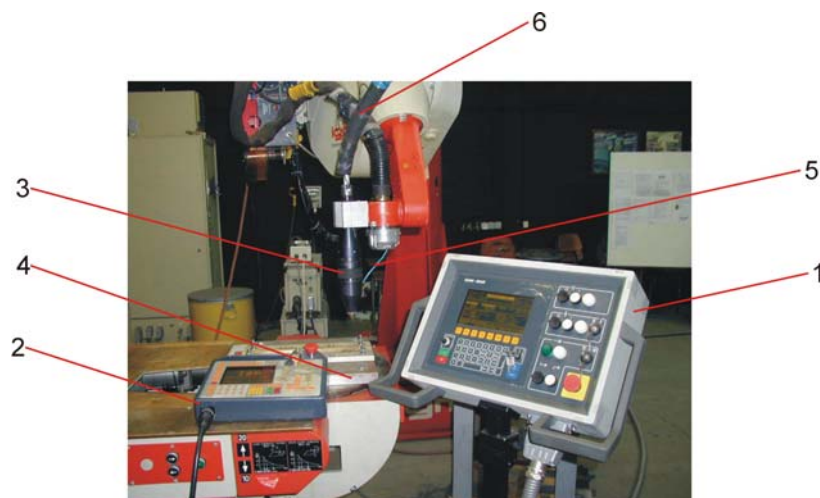
- promjer snopa na izlazu iz rezonatora, d_0 : 18 mm
- kut divergencije, θ_0 : ≤ 8 mrad
- mod: multimod
- polarizacija: snop nije polariziran
- produkt parametara laserskog snopa $\frac{d_0}{2} \cdot \frac{\theta_0}{2} = 36$ mm mrad
- kvaliteta snopa $M^2 = 106,3$, $K' = 0,0094$

Laserski snop iz Nd:YAG lasera vođen je kroz optičko vlakno promjera 0,6 mm.

Laserski snop fokusiran je na površinu radnog komada pomoću obradne glave s optikom za fokusiranje:

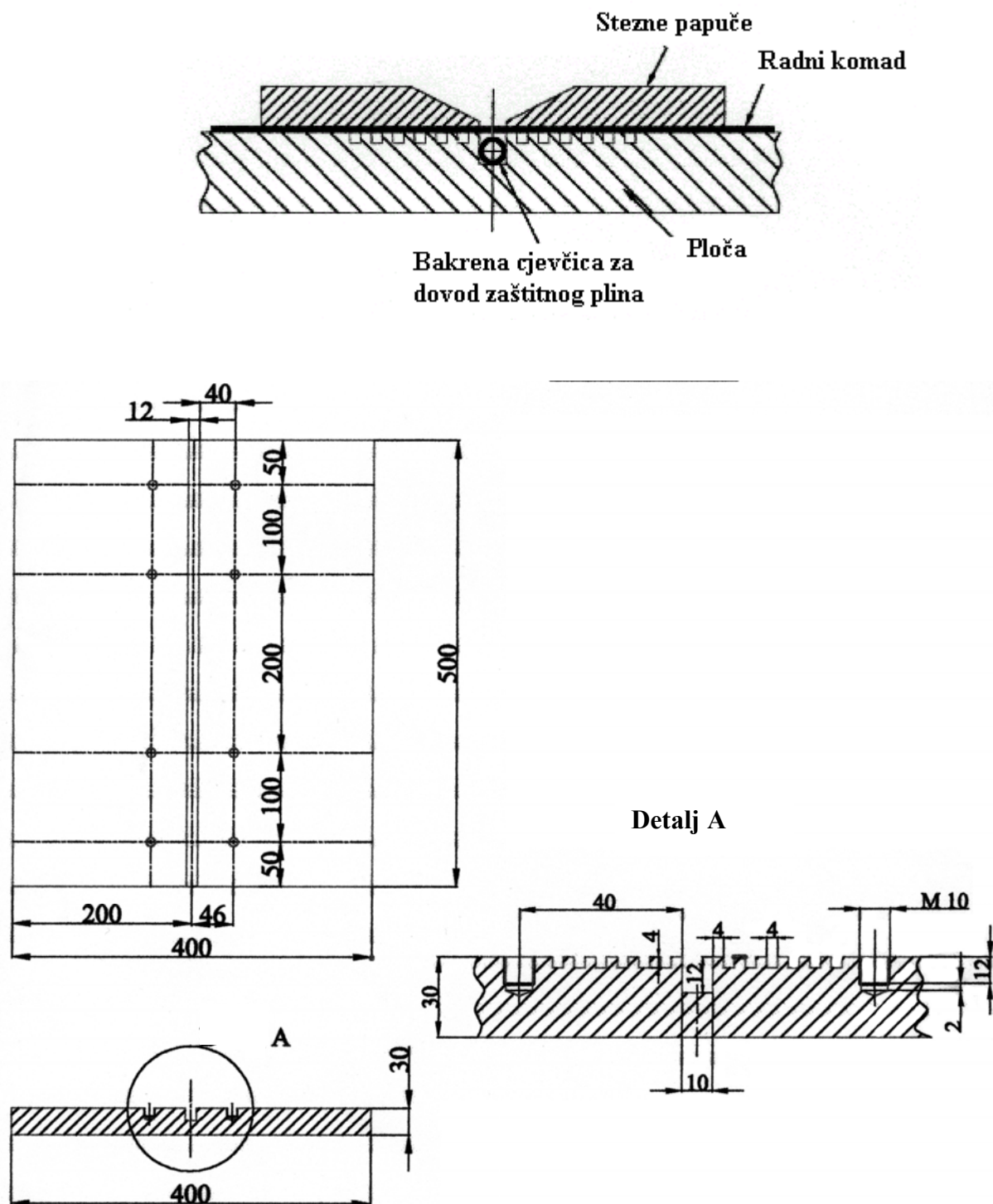
- žarišna duljina leće kolimatora $f_l = 120$ mm
- žarišna duljina leće za fokusiranje snopa na radni komad $f = 120$ mm
- promjer žarišne točke $d_F = 0,6$ mm
- kut divergencije $\theta_F = 0,24$ rad
- promjer snopa na ulazu u leću za fokusiranje $d_B = 28,8$ mm
- F' broj leće $F' = 4,17$
- dubina žarišta $2 \cdot Z_R = 5$ mm

Za izvođenje relativnog gibanja između laserskog snopa i radnog komada korišten je robot "IGM Limat RT 280", sa 6 stupnjeva slobode gibanja. Obradna glava pričvršćena je na ruku robota, **slika 23**. Pozicioniranje snopa izvodi se pomoću helij-neon lasera, čiji se laserski snop provodi kroz isto optičko vlakno i optiku za fokusiranje.



Slika 23. Prikaz radnog mjesta. 1-upravljačka jedinica lasera, 2-upravljačka jedinica robota, 3-obradna glava s optikom za fokusiranje i koaksijalnom sapnicom za dovod zaštitnog plina, 4-naprava za stezanje, 5-dovod zaštitnog plina, 6-optičko vlakno.

Za stezanje i pozicioniranje radnih komada konstruirana je naprava prikazana na slikama 23 i 24.



Slika 24. Stezni dio naprave za zavarivanje.

4.2. MATERIJALI

Pokusi su provedeni na čelicima za poboljšavanje 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60 (oznaka prema DIN EN 10083-1 [76]). Debljina limova iznosila je 2 mm. Svaki tip materijala bio je iz iste šarže, kako bi se isključio utjecaj promjenjenog kemijskog sastava kod usporedbe rezultata. U **tablicama 4, 5 i 6**, nalazi se kemijski sastav istraživanih materijala, dobiven kemijskom analizom napravljenom na FSB-u Zagreb, na Zavodu za materijale, u Laboratoriju za analizu metala. Korišten je optički emisijski spektrometar Leco GDS-750. Čelici su bili u meko žarenom nepoboljšanom stanju.

Tablica 4. Kemijski sastav čelika 25 CrMo 4.

Kem. sastav	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Kem. analiza %	0,29	0,20	0,78	0,008	0,003	1,05	0,18
DIN EN 10083-1 %	0,22-0,29	<0,40	0,60-0,90	<0,035	0,02-0,04	0,90-1,20	0,15-0,30

Tablica 5. Kemijski sastav čelika 42 CrMo 4.

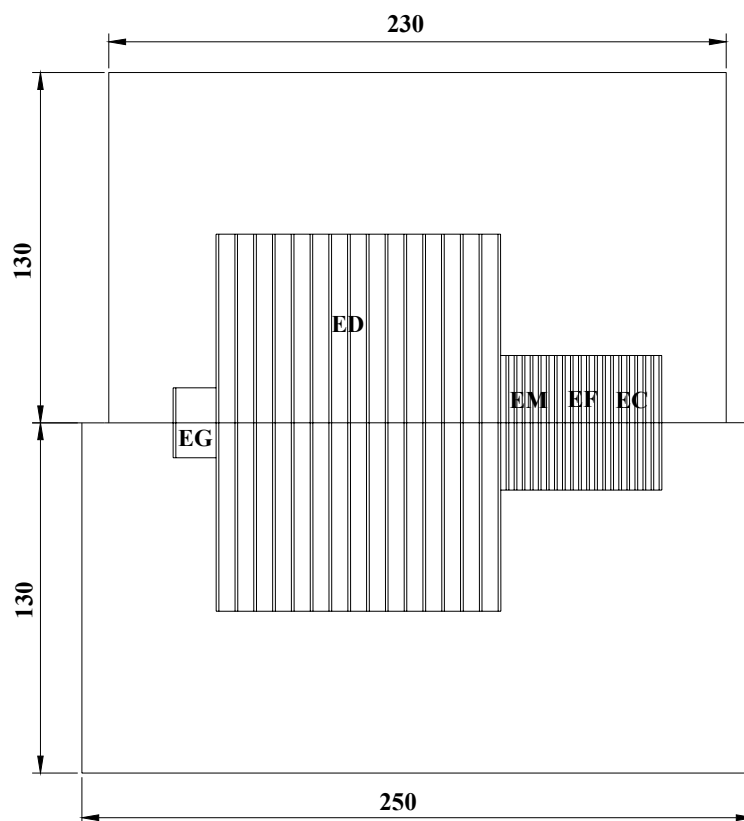
Kem. sastav	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Kem. analiza %	0,41	0,16	0,64	0,01	0,001	1,00	0,16
DIN EN 10083-1 %	0,38-0,45	<0,40	0,60-0,90	<0,035	0,02-0,04	0,90-1,20	0,15-0,30

Tablica 6. Kemijski sastav čelika Ck 60.

Kem. sastav	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Kem. analiza %	0,63	0,17	0,63	0,01	0,001	0,07	0,02
DIN EN 10083-1 %	0,57-0,65	0,15-0,35	0,50-0,80	<0,035	<0,035	<0,4	<0,1

4.3. PRIPREMA RADNIH KOMADA

Nabavljene su ploče lima dimenzija 2000 x 1000 mm. Ploče su zatim narezane na škarama na dimenzije 250 x 130 mm i 230 x 130 mm. Dulje stranice, po kojima je izvođeno zavarivanje, poblanjane su na blanjalici. Površine limova su ispjeskarene. Tako pripremljeni radni komadi stezani su u napravu za zavarivanje. Dimenzije radnih komada i raspored uzoraka za ispitivanje zavarenog spoja prikazani su na **slici 25**.



Slika 25. Raspored ispitnih uzoraka na radnom komadu. EG-makroizbrusak, ED-dinamičko ispitivanje, EM-mikrosmično ispitivanje, EF-Zgagina metoda, EC-Charpyjeva metoda.

4.4. PRIPREMA ISTRAŽIVANJA

4.4.1. PROMJENLJIVI PARAMETRI

Osnovni problem ovog istraživanja je sastav zaštitne plinske mješavine. Mješavina ili smjesa nastaje spajanjem dvaju ili više sastojaka. Različite smjese mogu se susresti u građevinskoj industriji (priprema betonske smjese od pijeska, vode i cementa), prehrambenoj industriji (različite vrste hrane i napitaka), farmaceutskoj (lijekovi), naftnoj i mnogim područjima znanosti.

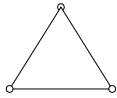
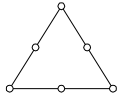
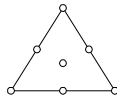
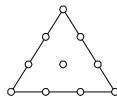
Kod planiranja pokusa potrebno je pretpostaviti da promatrani utjecaj mješavine na određeno svojstvo (npr. mehanička svojstva zavarenog spoja), ovisi o sastavu mješavine, točnije o udjelima pojedinih sastojaka u mješavini, a ne ovisi o ukupnoj količini mješavine. Cilj miješanja pojedinih sastojaka u smjesu je utvrditi da li smjesa ima bolji učinak na promatrana svojstva od pojedinačnih sastojaka. Očekuje se da će se promjenom udjela pojedinog sastojka mijenjati i vrijednost izabranog svojstva. Određivanjem funkcionalne ovisnosti mjerenog

svojstva o promjenljivim varijablama (udjeli sastojaka) nastoji se pronaći takvu kombinaciju udjela sastojaka pri kojoj će se postići najpovoljnija, maksimalna ili minimalna vrijednost promatranog svojstva.

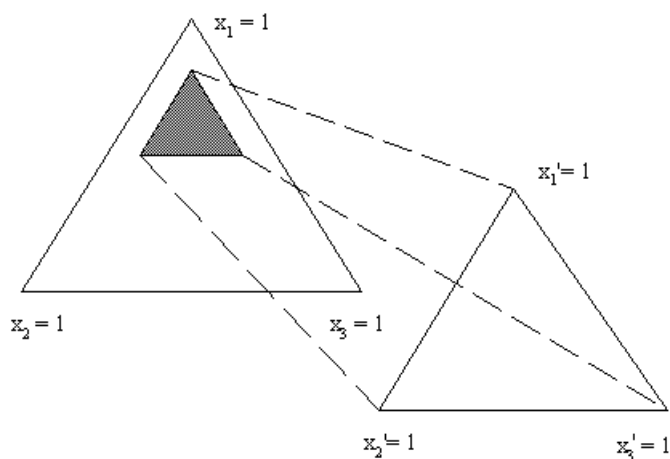
U planu pokusa sa simpleks-rešetkom, pod pojmom simpleks-rešetke podrazumijeva se pravilan geometrijski oblik (točka, duljina, trokut, trostrana piramida) unutar kojeg su ravnomjerno "rešetkasto" raspoređene točke pokusa, **tablica 7**. U slučaju "čiste mješavine" postoji samo jedan sastojak i simpleks je točka. Čine li mješavinu dva sastojka, simpleks je jednodimenzijski, a predstavlja ga duljina. Simpleks mješavine s tri sastojka dvodimenzijski je i predstavljen je trokutom, itd.

Cilj provođenja pokusa s mješavinama je dobivanje matematičkog modela i grafičkog prikaza utjecaja sastava mješavine na promjenu mjerenog svojstva. Izvođenjem pokusa u svim stanjima, odnosno svim mogućim kombinacijama udjela sastojaka određene mješavine, dobiva se kontinuirana ploha koja spaja visine izmjerenih svojstava u svim točkama unutar modela simplex rešetke i naziva se odzivnom plohom. Odzivna funkcija je funkcija koja opisuje odzivnu plohu. Svakoj funkciji moguće je pridružiti odgovarajući polinom i proračunati koeficijente jednadžbe. Sada se mogu prikazati krivulje koje unutar simpleks-rešetke povezuju točke jednake visine vrijednosti izmjerenog svojstva, a one se nazivaju izokvante. Takve krivulje grafički prikazuju u kojim područjima simpleksa, tj. pri kojim udjelima sastojaka svojstvo dostiže maksimum odnosno minimum vrijednosti. Da bi polinomna jednadžba zadovoljavajuće predstavljala odzivnu plohu potrebno je točke pokusa rasporediti ravnomjerno, u jednakim intervalima udjela svih sastojaka mješavine. Osnovni oblici polinoma, za mješavine od tri sastojka koje se koriste u ovom radu, prikazani su u **tablici 7**. [132]

Tablica 7. Osnovni oblici polinoma za mješavine od tri sastojka i pripadajuće simpleks-rešetke. η - odzivna funkcija, β , γ - koeficijenti jednadžbe, x - udio pojedinačnog sastojka.

Naziv polinoma	polinom	Simpleks rešetka
linearni	$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$ (4.1)	
kvadratni	$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3$ (4.2)	
posebni kubni	$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \beta_{123} x_1 x_2 x_3$ (4.3)	
puni kubni	$\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{123} x_1 x_2 x_3$ (4.4)	

Kada izučavanje cijelog simpleks područja nema ekonomsku ili tehnološku prihvatljivost uvode se ograničenja na omjere sastojaka mješavine. Moguće je ograničiti maksimalni i minimalni udio svakog sastojka u mješavini. Ako se, kao na primjeru simpleks-rešetke od tri sastojka na **slici 26.** ograniče minimalni udjeli svakog od tri sastojka unutar simpleksa, dobit će se manji trokut koji predstavlja područje interesa. Za taj trokut se može pretpostaviti da je puna simpleks rešetka i naziva se pseudosimpleks.



Slika 26. Ograničeno područje simpleksa redefinirano kao pseudosimpleks. x - udio pojedinačnog sastojka, x' - pseudoudio pojedinačnog sastojka.

Pri prijelazu iz izvornog modela u pseudosimpleks mijenjaju se vrijednosti udjela sastojaka pa je potrebno na osnovi stvarnih komponenata i zadanih ograničenja izračunati

pseudokomponente. Nakon što se provede kompletan proračun pseudosimpleksa, potrebno je dobivene rezultate vratiti u stvarne komponente. [132]

U literaturi [133,134] opisani su različiti modeli pokusa pogodni za istraživanje zavarivačkih procesa, te matematičko modeliranje i optimiranje procesa zavarivanja uz primjenu računala. Pokusi s plinskim mješavinama kod MIG-MAG postupka zavarivanja, provedeni su u istraživanju [135]. Utvrđeno je da su pogodni za proučavanje i opisivanje utjecaja sastava mješavine na geometrijska i mehanička svojstva zavarenih spojeva, stoga će ova metoda biti korištena pri laserskom zavarivanju u ovom radu.

Zaštitne mješavine

Za istraživanje su izabrane aktivne mješavine na bazi argona s dodatkom kisika i/ili ugljik-dioksida, u tehnološki prihvatljivom području. Komponente mješavine i udjeli pojedinih sastojaka prikazani su **tablicom 8**.

Tablica 8. Aktivne mješavine s udjelima komponenata.

R. br. mješavine	UDJELI KOMPONENATA %		
	Ar	CO ₂	O ₂
1	100	0	0
2	91	9	0
3	82	18	0
4	91	0	9
5	82	0	18
6	82	9	9
7	88	6	6

4.4.2. KONSTANTNI PARAMETRI

Pretpokusi su napravljeni s ciljem određivanja konstantnih parametara pokusa. Snaga lasera, žarišna duljina leće i dovod zaštitnog plina bili su definirani dostupnim laserskim sustavom. Položaj žarišta u odnosu na površinu materijala i brzina zavarivanja ovise o vrsti i debljini materijala, stoga je napravljena serija pretpokusa kako bi se pronašle stabilne vrijednosti, za promatrane materijale i debljinu lima. Zatim je određen protok zaštitnog plina na temelju kriterija sjajne površine lica zavora.

Snaga lasera

Najvećom snagom lasera postižu se najveće brzine zavarivanja što je u interesu industrije, pa je unaprijed namještena snaga 1800 W, koja iznosi 90% maksimalne snage lasera.

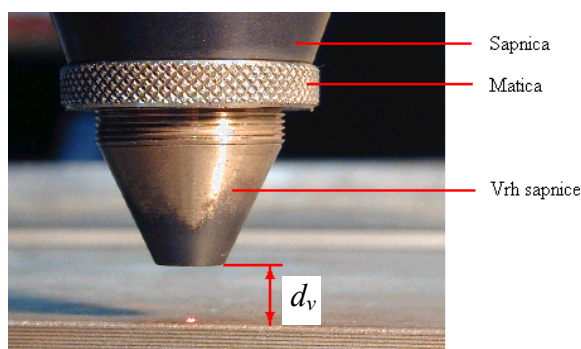
Žarišna duljina leće

Korištena je leća žarišne duljine 120 mm koja fokusira laserski snop na žarišnu točku promjera 0,6 mm, tako da je gustoća snage iznosila $6,4 \cdot 10^5 \text{ W/cm}^2$.

Dovod zaštitnog plina

Za dovodenje plina na mjesto zavarivanja korištena je koaksijalna sapnica, s promjerom otvora vrha sapnice d_s 5 mm. Vrh sapnice ima narezan vanjski navoj, a sapnica ima unutarnji navoj. Na taj način može se precizno namjestiti udaljenost sapnice od radnog komada d_v , **slika 27**. Vrh sapnice osigurava se od odvijanja pomoću matice.

Udaljenost vrha sapnice od radnog komada određena je iz tablica proizvođača lasera i u svim pokusima bila je konstantna. Kod argona udaljenost vrha sapnice od radnog komada d_v iznosila je 6 mm, dok je kod helija iznosila 8 mm.

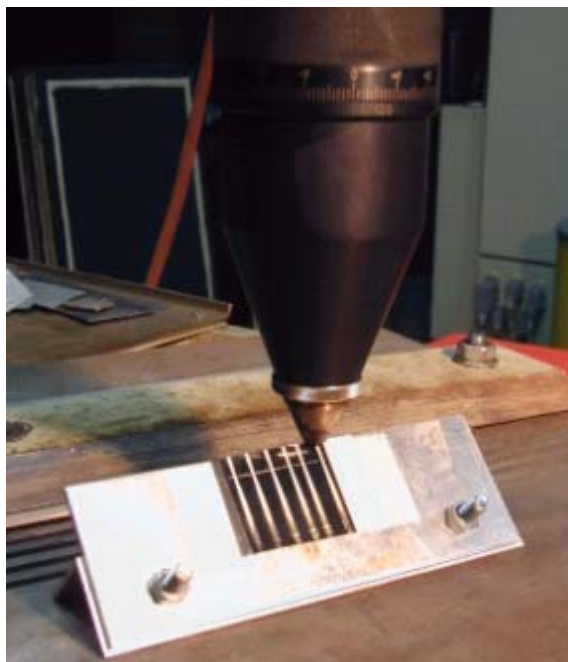


Slika 27. Koaksijalna sapnica za plin s vrhom sapnice i maticom.
 d_v -udaljenost vrha sapnice od radnog komada.

Položaj žarišta

Da bi se moglo pozicionirati žarište u odnosu na površinu materijala, potrebno je utvrditi gdje se nalazi žarište i podesiti udaljenost žarišta od vrha sapnice za dovod zaštitnog plina. Najtočnija, ali i najskuplja metoda je mjerenje najmanjeg promjera fokusiranog snopa pomoću mjernog uređaja, i izračunavanje njegove udaljenosti od referentne ravnine na obradnoj glavi. Kako takav mjerni uređaj nije bio na raspolaganju, korištena je metoda kosine (kose ravnine), koja je jedna od najpovoljnijih [136].

Obradna glava postavljena je okomito na radni stol. Vrh sapnice zavinut je do kraja navoja u sapnicu. Na radni stol, pod kutem od 45° postavljena je ravnina (kosina). Korišten je aluminijski kutni profil 30 x 30 mm, na koji je pričvršćena aluminijska pločica. Sapnica je pozicionira na udaljenost približno 0,1 mm od vrha kosine, **slika 28**. Na pločicu je priljepljen crni fotopapir. Laserskim snopom snage 180 W, pređeno je preko kosine brzinom 3 m/min. Pritom je kroz sapnicu puštan mali protok argona za zaštitu optike za fokusiranje od dima. Rezultat je otisak laserskog snopa na fotografskom papiru. Najuže mjesto predstavlja žarišnu ravninu odnosno žarište. Izmjerena je udaljenost žarišta od vrha kosine koja predstavlja hipotenuzu jednakokračnog pravokutnog trokuta. Pomoću sinusne funkcije izračunata je duljina katete koja je jednaka udaljenosti žarišta od referentne ravnine odnosno vrha sapnice.



Slika 28. Određivanje položaja žarišta metodom kosine.

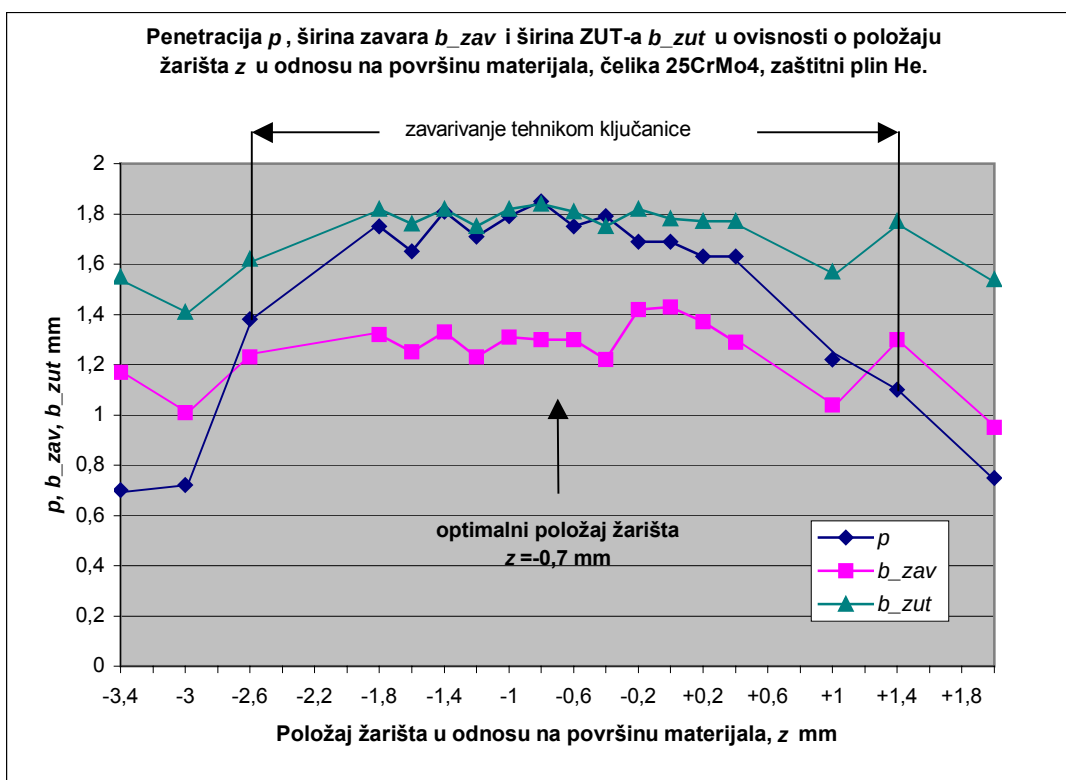
Napravljeno je pet ponavljanja i određena je srednja vrijednost udaljenosti žarišta od vrha sapnice, koja je iznosila 12 mm. Nakon toga, odvijanjem vrha sapnice, namještena je potrebna udaljenost vrha sapnice od radnog komada, koja za argon i aktivne mješavine iznosi 6 mm, a za helij 8 mm. Namještene udaljenosti još su jednom provjerene metodom kosine. Za kontrolu udaljenosti vrha sapnice od radnog komada napravljeni su etaloni.

Pokazalo se da se ovom metodom dobivaju ponovljivi rezultati. U literaturi [136] napravljena je usporedba položaja žarišta određenog pomoću mjernog uređaja i pomoću metode kosine, te je dobiven iznos odstupanja $d_o \pm 0,5$ mm u području točnosti očitavanja odnosno mjerenja.

Određivanje položaja žarišta u odnosu na površinu materijala

Položaj žarišta u odnosu na površinu materijala kod kojeg se postiže maksimalna penetracija, određen je predpokusom. Za svaki materijal, te plinove argon i helij, napravljena je serija navara ("bead on plate") kod konstantne snage 1800 W i brzine zavarivanja 200 cm/min, a položaj žarišta variran je pomicanjem leće na fokusnoj optici u razmacima 0,2 mm, dok je udaljenost vrha sapnice od radnog komada bila konstantna. Brzina zavarivanja, 200 cm/min uzeta je zato da se ne postigne potpuna penetracija, koja se kod ove metode mjeri. Protok argona iznosio je 10 l/min, a protok helija 20 l/min. Vrijednosti protoka uzete su prema literaturnim podacima [131].

Mjerenjem penetracije na izbruscima pomoću analizatora slike, utvrđen je interval od 0 mm do -1,4 mm ispod površine materijala, u kojem se postiže maksimalna penetracija, kod oba materijala i zaštitna plina. Optimalni položaj žarišta nalazi se na sredini intervala i iznosi 0,7 mm ispod površine materijala odnosno $z = -0,7$ mm, **slika 29**.



Slika 29. Optimalni položaj žarišta, 25CrMo4, He.

Određivanje brzine zavarivanja

Najveća brzina zavarivanja kod koje se postiže potpuna penetracija određuje se zavarivanjem s konstantnim parametrima, povećavajući samo brzinu zavarivanja. Napravljena je serija

navara različitim brzinama zavarivanja, te je promatrana korijenska strana zavora, da se ustanovi potpuna penetracija. Kod maksimalne brzine mora još uvijek postojati ujednačeni korijen zavora. Za svaki materijal i zaštitni plin napravljeni su pokusi s različitim brzinama zavarivanja. Rađeno je s optimalnim položajem žarišta koji iznosi 0,7 mm ispod površine materijala. Snaga je iznosila 1800 W. Protok argona i aktivnih mješavina iznosio je 10 l/min, a protok helija 20 l/min.

U zaštiti argona i aktivnih mješavina, dobivena je brzina zavarivanja 110 cm/min, što odgovara unešenoj energiji 98 J/mm. U zaštiti helija kod materijala 42 CrMo 4 dobivena je brzina zavarivanja 100 cm/min, što odgovara unešenoj energiji 108 J/mm, dok je kod materijala 25 CrMo 4 i Ck 60 iznosila 110 cm/min.

Određivanje protoka zaštitnog plina

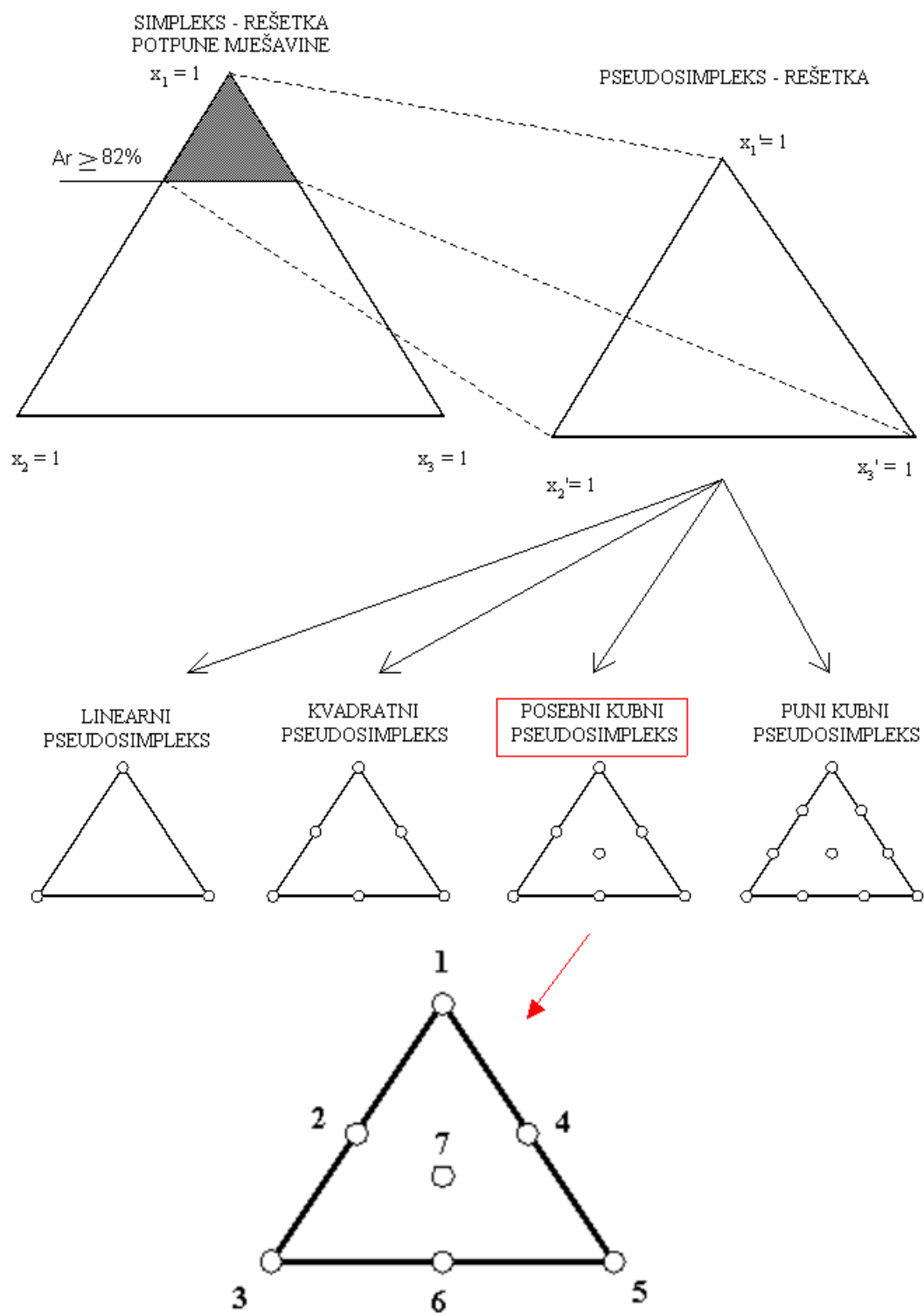
Kada su određeni optimalni položaj žarišta i brzina zavarivanja kod kojih se postiže potpuna penetracija može se provjeriti pretpostavljeni protok plina korišten pri njihovom određivanju. Prema literaturnim podacima, kod optimalnog protoka plina dobiva se metalno svjetla površina zavora. Kod premalog protoka plina zaštita je nedovoljna i na površini se pojavljuju oksidi i obojenja, međutim ukoliko se izvodi naknadna obrada ili zaštita zavora ti oksidi ne smetaju, a potrošnja plina je manja. Kod prevelikog protoka plina upuhivanog direktno u krater, postoji opasnost nastanka turbulencije u krateru i nastanka pora zbog zarobljavanja zaštitnog plina u metalu zavora.

Pretpokus je proveden pri brzini zavarivanja 110 cm/min i položaju žarišta 0,7 mm ispod površine materijala. Snaga lasera iznosila je 1800 W. Metalno svjetla površina zavora u zaštiti argona i aktivnih mješavina, dobivena je pri protoku 18 l/min, a u zaštiti helija 36 l/min.

4.5. PLAN POKUSA I PROVEDBA ZAVARIVANJA

Postoje različiti modeli pokusa pogodni za istraživanje zavarivačkih procesa. Primjena planiranog eksperimenta od presudne je važnosti u takvim pokusima, budući na racionalan način omogućava utvrđivanje odzivnih funkcija.

Promjenjiva varijabla u ovom istraživanju je vrsta odnosno sastav zaštitnog plina. Odabrano je sedam mješavina prema modelu simpleks rešetke $\{3, m_s\}$ za tri komponente mješavine. Odabran je pseudosimpleks s granicom udjela aktivnih komponenti u argonu 18%. Na **slici 30.** prikazan je redoslijed koraka kod planiranja pokusa, odabir broja i smještaja točaka pokusa.



Slika 30. Koraci u planiranju pokusa.

U **tablici 9.** nalaze se stvarni i pseudoudjeli komponenata za svih 7 točaka pokusa.

Tablica 9. Točke pokusa i pretvorba stvarnih udjela komponenata u pseudoudjele.

TOČKE POKUSA	PSEUDOKOMPONENTE			IZVORNI UDJELI KOMPONENATA %		
	x_1'	x_2'	x_3'	x_1 (Ar)	x_2 (CO ₂)	x_3 (O ₂)
1	1	0	0	100	0	0
2	1/2	1/2	0	91	9	0
3	0	1	0	82	18	0
4	1/2	0	1/2	91	0	9
5	0	0	1	82	0	18
6	0	1/2	1/2	82	9	9
7	1/3	1/3	1/3	88	6	6

Upotreba sedam različitih plinskih mješavina u tehnološki prihvatljivom području (aktivnih komponenti u argonu ima maksimalno 18%) nužno dovodi do opasnosti da udjeli pojedinih komponenti u susjednim točkama pokusa budu slični ili isti. Najčešći razlog tome može biti greška prilikom punjenja bilo da se radi o ljudskoj greški ili da oprema za mjerenje ili punjenje nije ispravna. Da bi se osiguralo od eventualnih odstupanja stvarnog sastava zaštitnih mješavina od nazivnog, svim mješavinama je ispitan kemijski sastav. Ispitivanja su pokazala da su kod svih mješavina stvarni udjeli aktivnih komponenti unutar $\pm 0,5\%$ od nazivnih vrijednosti.

Konstantni parametri kod svih stanja pokusa

- Snaga: $P = 1800$ W
- Žarišna duljina leće: $f = 120$ mm
- Položaj žarišta u odnosu na površinu materijala: $z = -0,7$ mm
- Brzina zavarivanja: $v = 110$ cm/min
- Protok plina: argon $Q = 18$ l/min
helij $Q = 36$ l/min
- Promjer vrha sapnice za plin: $d_s = 5$ mm
- Udaljenost vrha sapnice za plin od radnog komada
 - Argon i aktivne mješavine: $d_v = 6$ mm
 - Helij: $d_v = 8$ mm

4.6. ISPITIVANJE ZAVARENIH SPOJEVA

4.6.1. VIZUALNA KONTROLA

Na zavarenim radnim komadima, vizualnom metodom određivane su vanjske nepravilnosti kao što su: nadvišenje/ulegnuće lica i korijena zavora, smaknuće limova, ugorine, površinske pukotine, štrcanje, nepotpuna penetracija, greške vezivanja i obojenja površine zavora. Zbog male širine zavora i malih dimenzija nepravilnosti korišteno je povećalo. Pregledana su lica i korijeni zavora. Vizualna metoda je jednostavna metoda za osiguravanje kvalitete zavora, ali ne daje podatke o poprečnom presjeku zavora.

Vizualna metoda daje prvi dojam o kvaliteti zavora. Ukoliko se ustanove nedozvoljene nepravilnosti poput površinskih pukotina, greški vezivanja i nepotpune penetracije zavori se mogu odbaciti i daljnja ispitivanja nisu potrebna. Greške vezivanja nastaju kao posljedica netočnog pozicioniranja laserskog snopa.

4.6.2. ISPITIVANJE RADIOGRAFSKOM METODOM

Ispitivanje prozračivanjem prema HRN EN 1435 [137] je metoda za otkrivanje unutarnjih nepravilnosti. Metoda je prikladna za laserom zavarene spojeve. Princip metode zasniva se na oslabljenju rendgenskog zračenja pri prolasku kroz materijal. Na mjestu oslabljenog presjeka materijala, oslabljenje rendgenskog zračenja je manje, što se na filmu vidi kao jače zacrnjenje. Tako će nadvišenja lica i korijena zavora te štrcanje na filmu biti svjetliji, a pore, čvrsti uključci, ugorine, neprovar i greške vezivanja tamnije. Metoda daje informacije o veličini nepravilnosti, ali ne daje informacije o dubini na kojoj se nepravilnost nalazi. Plošne nepravilnosti kao što su pukotine i greške vezivanja registrirat će se na filmu u ovisnosti o njihovom odklonu na primarni snop zračenja. Ukoliko je odklon nepovoljan, bez primjene odgovarajuće tehnike i parametara nije ih moguće registrirati na filmu.

Korišten je uređaj "Balteau 300/5", maksimalnog napona 300 kV i maksimalne struje 5 mA. Korišten je film "AGFA Structurics D4" dimenzija 10 x 24 cm i olovne folije debljine 0,02 mm.

Snimanje je izvršeno sa slijedećim parametrima:

- napon: 125 kV
- struja: 3 mA
- udaljenost izvora od filma: 700 mm
- vrijeme ekspozicije: 7 min

Korišten je indikator kvalitete radiograma prema, HRN EN 462-1 [138], 13 FE EN. U skladu sa zahtjevima norme HRN EN 1435 [137], za debljinu lima 2 mm, zahtijevani broj žice koja se mora vidjeti na radiogramu je W18. Time je omogućena registracija nepravilnosti većih od 0,063 mm.

4.6.3. ODREĐIVANJE GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKA ZAVARENOG SPOJA

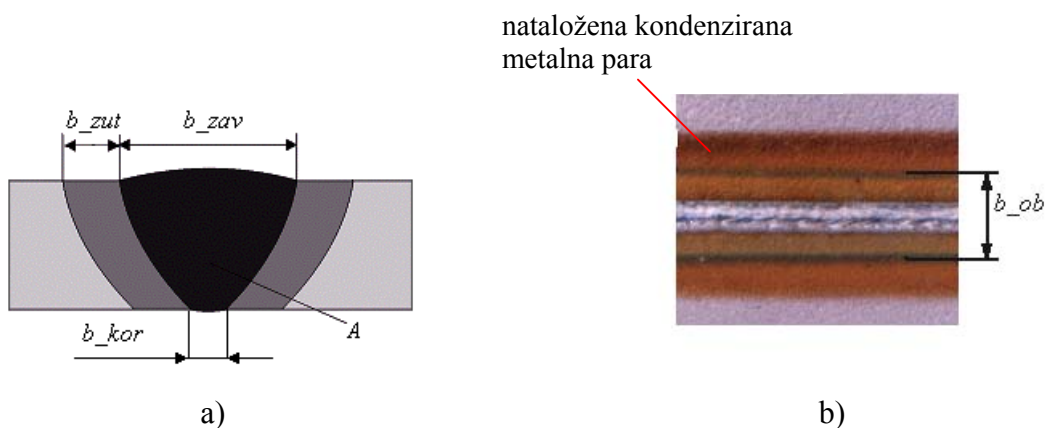
Za određivanje geometrije zavora pripremljeni su makroizbrusci poprečnog presjeka. Uzorci dimenzija 16 x 26 mm, izrezani su pomoću vodenog mlaza, prema planu **slika 26**. Zatim su uzorci zaliveni u kalupe. Za pripremu makroizbrusaka korišteni su brusni papiri sljedećih zrnatosti: 80, 150, 240, 360, 600 i 1000. Nagrizanje makroizbrusaka izvršeno je u 5%-tnoj otopini dušične kiseline (HNO_3) u alkoholu.

Mjerenje geometrije zavora izvršeno je na slikama makroizbrusaka pod povećanjem 40x, pomoću programskog paketa Image J.

S ciljem određivanja kvalitete zavarenog spoja prema HRN EN ISO 13 919-1 [90], izvršena su mjerenja nadvišenja/ulegnuća lica i korijena zavora, smaknuća limova i veličine ugorina.

S ciljem određivanja matematičkog modela geometrije zavarenog spoja izvršena su mjerenja širine lica zavora b_{zav} , širine ZUT-a b_{zut} , širine korijena zavora b_{kor} i površine poprečnog presjeka zavora A , **slika 31 a**).

Mjerenje širine obojenja b_{ob} izvršeno je sa strane lica zavora, na zavarenim radnim komadima prije izrezivanja uzoraka, **slika 31 b**). Smeđi trag na **slici 31 b**) predstavlja nataloženu kondenziranu metalnu paru, koja se lako očisti pomoću krpe.



Slika 31. Mjerene geometrijske značajke zavarenog spoja.

4.6.4. ISPITIVANJE TVRDOĆE

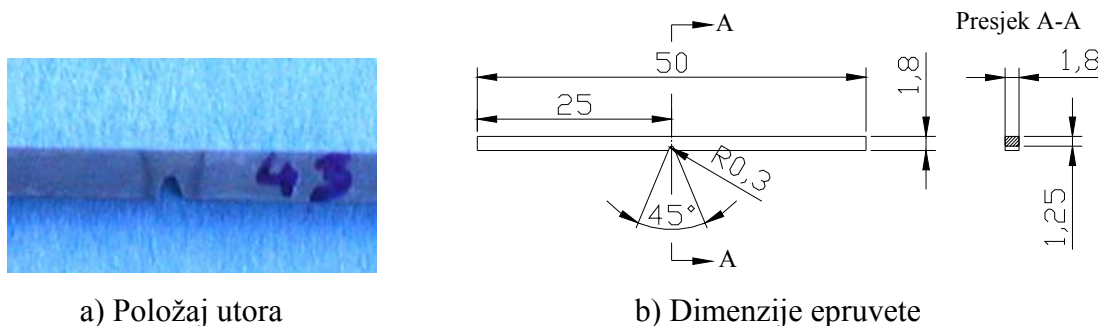
Ispitivanje tvrdoće izvršeno je Vickersovom metodom. Ispitivanje tvrdoće provedeno je na zalivenim uzorcima, na kojima je određivana i geometrija zavarenog spoja. Uzorci su prebrušeni na brusilici brusnim papirima jednake zrnatosti kao i za makroizbruske. Nakon brušenja izvršeno je poliranje uzoraka dijamantnom pastom ($6\text{ }\mu\text{m}$).

Na tako pripremljenim uzorcima napravljen je niz otisaka preko poprečnog presjeka zavarenog spoja, kako bi se dobio profil tvrdoće od osnovnog materijala preko ZUT-a i zavara do osnovnog materijala s druge strane. Profil (niz) tvrdoća ispitan je na sredini debljine lima. Zbog malih dimenzija zona zavarenog spoja, korišteno je opterećenje 5 N ($\text{HV}0,5$), kako bi otisci upali u svaku zonu spoja. Razmak između otisaka iznosio je $0,2\text{ mm}$ [139]. Kod ispitivanja malim opterećenjima može doći do velikog rasipanja rezultata i mjerenja tvrdoće pojedinih zrna.

Ispitivanja su provedena na tvrdomjeru "Zwick 3212001". Trajanje utiskivanja iznosilo je 10 s . Dijagonale otisaka izmjerene su pomoću mikroskopa. Na temelju veličina dijagonala iz tablica su očitane vrijednosti tvrdoća.

4.6.5. ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA CHARPYJEVOM METODOM

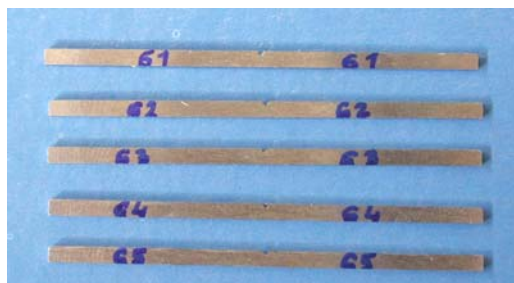
Zbog debljine lima od 2 mm , nije bilo moguće izvršiti ispitivanje na normiranim epruvetama. Dimenzije najmanje normirane epruvete za ispitivanje žilavosti iznose $3\times4\times27\text{ mm}$, a dimenzije V-utora iznose; kut 60° , radijus na vrhu $0,1\text{ mm}$ i dubina 1 mm [140]. Stoga je ispitivanje provedeno na modificiranim epruvetama, čiji se rezultati smiju samo međusobno uspoređivati. Pripremljeni su uzorci dimenzija $1,8\times1,8\times50\text{ mm}$. Nakon izrezivanja uzoraka za određivanje geometrije spoja, radni komadi su pobrušeni približno $0,1\text{ mm}$ sa strane lica i korijena zavara na dimenziju $1,8\text{ mm}$. Nakon toga napravljen je V-utor s korijenske strane zavara, tako da se vrh utora nalazi u samom metalu zavara, kako bi se prisilio prolaz loma kroz metal zavara, **slika 32 a**). Zatim su izrezani štapići širine $1,8\text{ mm}$ pomoću tanke brusne ploče. Modificirana epruveta prikazana je **slikom 32 b**).



Slika 32. Modificirana epruveta za ispitivanje udarne radnje loma.

V-utor se prema normi postavlja s bočne strane epruvete po sredini metala zavora, ali tada postoji mogućnost, posebno kod laserskih zavora, da lom odluta u ZUT. Stoga je odlučeno napraviti utor na sredini zavora ali s korijenske strane. Na taj način lakše je pozicionirati utor u sam metal zavora, jer se od korijena prema licu zavar proširuje.

Ispitivanje je provedeno na Charpyjevom batu, pri sobnoj temperaturi. Za ispitivanje malih žilavosti, na raspolaganju su bili batovi od 0,5, 1 i 4 J. Razmak između oslonaca iznosio je 22 mm. Epruvete od materijala 25 CrMo 4 i 42 CrMo 4 nisu pucale, pa je dubina V-utora povećana sa 0,55 mm na 0,9 mm. Ispitivano je 5 epruveta, te je izračunata srednja vrijednost udarne radnje loma, **slika 33**. Ukupno je ispitano 120 epruveta, 5 epruveta po stanju pokusa, kod 8 vrsta plinova i 3 različita materijala.



Slika 33. Epruvete za ispitivanje udarne radnje loma, materijal Ck 60.

4.6.6. ISPITIVANJE UDARNE RADNJE LOMA ZGAGINOM METODOM

Za ispitivanje udarne radnje loma Zgaginom metodom, korištene su epruvete jednakih dimenzija i jednako pripremljene kao za ispitivanje udarne radnje loma Charpyjevom metodom. Ispitivanje je provedeno pri sobnoj temperaturi, na uređaju prikazanom **slikom 34**.



Slika 34. Uređaj za ispitivanje udarne radnje loma Zgaginom metodom.

Korištena je kugla promjera 40 mm i mase 0,263 kg. Kugla je puštana s visine 320 mm. Navedena kugla razvija maksimalnu energiju 0,84 J u trenutku dodira s epruvetom. Na

slici 35. prikazana je epruveta stegnuta u napravu i kugla u trenutku dodira s epruvetom. Udaljenost vrha utora od vrha kugle iznosila je 2 mm.

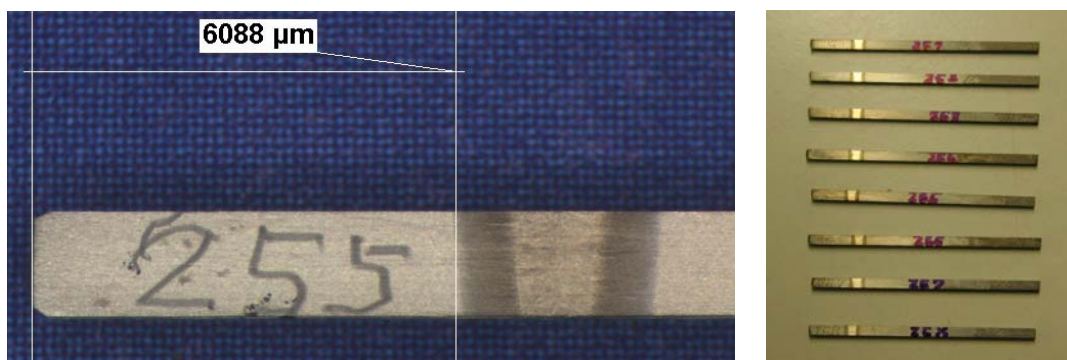


Slika 35. Zgagina metoda, položaj epruvete u napravi za stezanje.

Na skali uređaja očitana je razlika visine s koje je kuglica spuštana i visine na koju se popela. Očitana razlika visina pomnožena je s težinom kuglice i dobivena je vrijednost žilavosti J , **slika 10**. Ispitivano je 5 epruveta po stanju pokusa, te je izračunata srednja vrijednost udarne radnje loma. Ukupno je ispitano 120 epruveta, 5 epruveta po stanju pokusa, kod 8 vrsta plinova i 3 različita materijala.

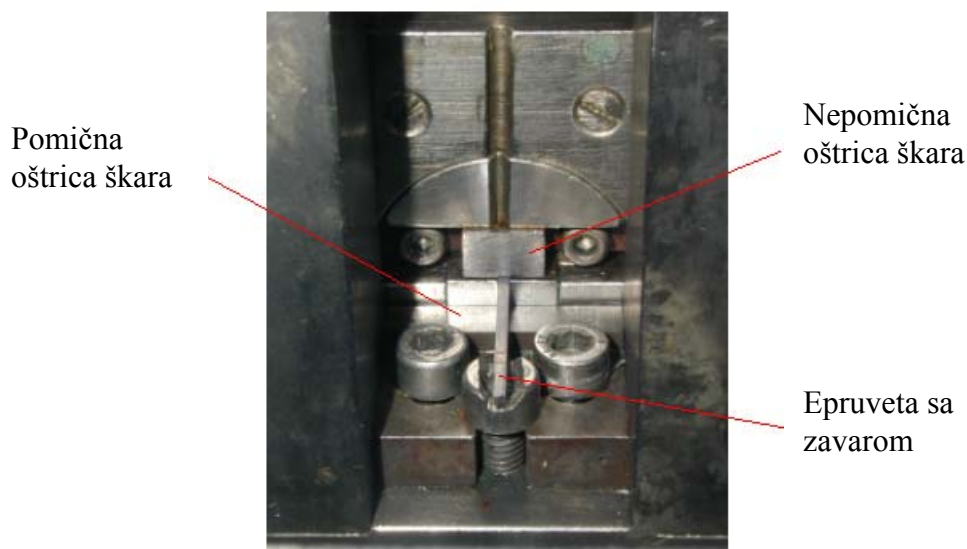
4.6.7. ISPITIVANJE MIKROSMIČNOM METODOM

Mikrosmično ispitivanje provedeno je na TU Berlin. Korištene su epruvete dimenzija 1,5 x 1,5 x 50 mm. Dio radnog komada predviđen za mikrosmično ispitivanje prvo je izrezan pomoću vodenog mlaza, zatim je pobrušen približno 0,25 mm sa strane lica i korijena zavora na dimenziju 1,5 mm. Zatim su izrezani štapčići širine 1,8 mm pomoću vodenog mlaza, koji su naknadno pobrušeni na mjeru. Za pripremu makroizbrusaka korišteni su brusni papiri slijedećih zrnatosti: 150, 360, 600 i 1000. Tako pripremljeni uzorci nagriženi su u 5%-tnoj otopini dušične kiseline (HNO_3) u alkoholu. Zatim je mjerena udaljenost od vrha štapića do početka ZUT-a, kako bi se uzorci mogli precizno pozicionirati u napravu uređaja za mikrosmično ispitivanje. Jedna strana epruvete odrezana je pomoću ručne pile na udaljenosti približno 6 mm od ZUT-a, kako bi svaki uzorak stao pod mikroskop, **slika 36**.



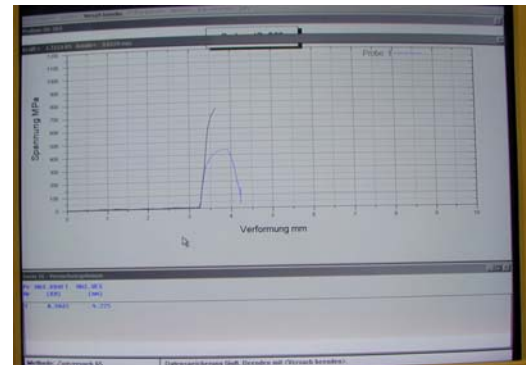
Slika 36. Epruvete za mikrosmično ispitivanje.

Ispitivanje započinje stavljanjem epruvete u napravu za stezanje i pozicioniranje, **slika 37**. Pozicioniranje na mjesto rezanja izvodi se pomoću mikrometarskog vijka, čijim okretanjem epruveta izlazi za određeni korak iz pneumatskih steznih čeljusti, čija jedna strana predstavlja gornju nepomičnu oštricu škara. Pomična strana škara dovede se na sredinu otvora za epruvetu, te se epruveta pomoću vijka gurne do oštrice. Sada je poznato da se početak ZUT-a nalazi na izmjerenoj udaljenosti pomoću mikroskopa, odnosno poznata je baza za precizno pozicioniranje epruvete.



Slika 37. Naprava za stezanje i pozicioniranje epruvete za mikrosmično ispitivanje.

Na **slici 38**. prikazana je oprema za mikrosmično ispitivanje koja se sastoji od kidalice, uređaja za mjerenje sile povezanog s računalom i naprave za stezanje uzoraka.



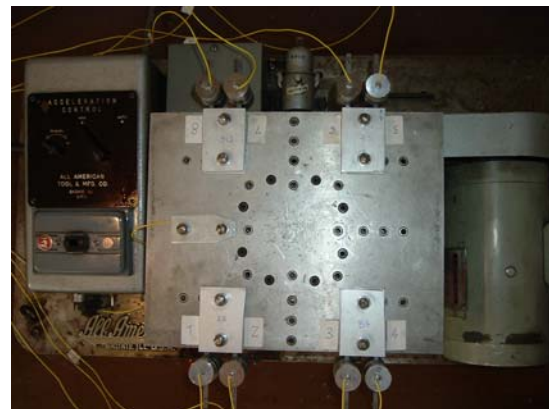
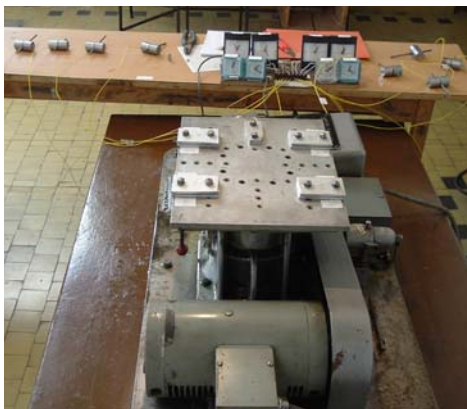
Slika 38. Oprema za mikrosmično ispitivanje smještena na TU Berlin.

Ispitivanje je započeto u osnovnom materijalu na udaljenosti 0,3 mm od početka ZUT-a, a završeno je 0,6 mm iza sredine zavora. Udaljenost između rezova na jednoj epruveti iznosila je 0,6 mm. Ispitivano je 6 epruveta. Na svakoj slijedećoj epruveti početni rez pomaknut je 0,1 mm prema sredini zavora. Na taj način dobivena je rezolucija ispitivanja 0,1 mm. Na prvoj epruveti napravljena su 3 reza, a na preostalih 5, napravljena su 4 reza, što ukupno iznosi 23 reza po stanju pokusa, odnosno ispitana su mehanička svojstva uzduž 2,3 mm zavarenog spoja od osnovnog materijala preko ZUT-a do sredine zavora, s razmakom od 0,1 mm.

4.6.8. ISPITIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI

Pokus je izveden na platformi za vibracijska ispitivanja američke tvrtke All American Tool – MFG Company model 25-VP-T koja je smještena na Fakultetu strojarstva i računarstva u Mostaru **slika 39**.

Uređaj se sastoji od pogonskog elektromotora promjenljivog broja okretaja i promjenljivog ekscentra pomoću kojeg se pokreće platforma u vertikalnoj ravnini [141].



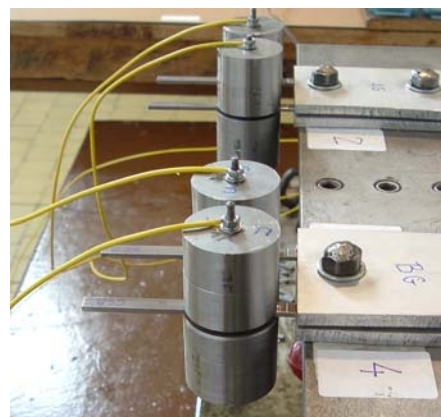
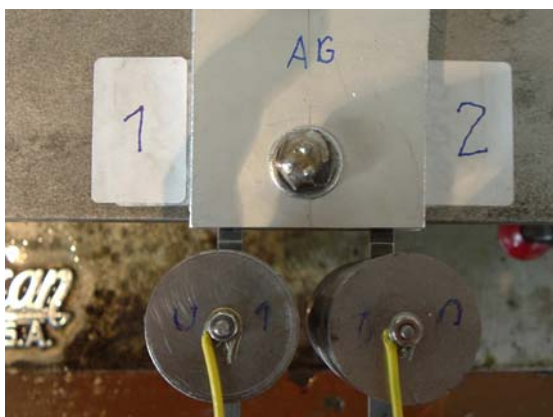
Slika 39. Vibracijska platforma smještena na Fakultetu strojarstva i računarstva u Mostaru.

Promjena vertikalnog pomaka platforme namješta se samo u stanju mirovanja stroja i to u području od 0 do 6,35 mm. Vertikalni pomak D iznosio je 3,175 mm. Frekvencija f_p gibanja platforme može se podešavati u granicama od 5 do 100 Hz, te mijenjati ručno ili automatski u tijeku rada. U ovom istraživanju frekvencija je varirana u intervalu od 32,8 do 44,7 Hz. Akceleracija platforme ovisi o veličini vertikalnog pomaka i frekvenciji, a može se izračunati prema formuli (4.5) u kojoj je izražena kroz akceleraciju zemljine sile teže g . g Vrijednost pokazuje koliko akceleracija zemljine sile teže iznosi akceleracija platforme.

$$g \text{ Vrijednost} = 2,012 \cdot 10^3 \cdot D_p \cdot f^2 \quad (4.5)$$

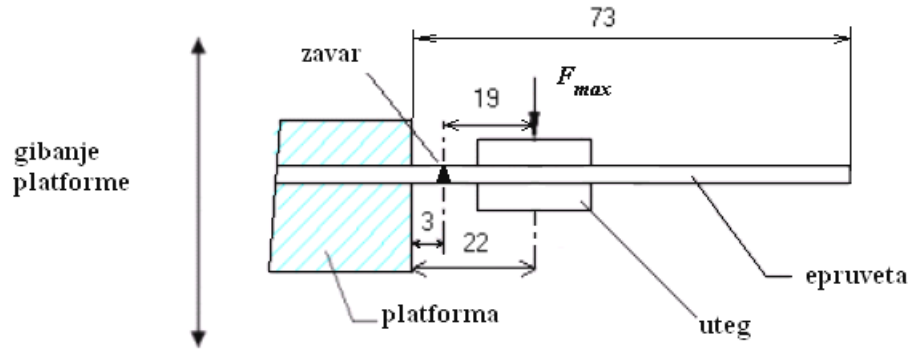
Veća frekvencija uzrokuje veću akceleraciju platforme, pa tako i veće naprezanje u epruveti, odnosno povećanje naprezanja dobivamo povećanjem frekvencije gibanja platforme.

Epruvete dimenzija 140 x 6 mm izrezane su pomoću vodenog mlaza na širinu 6,5 mm, te su naknadno pobrušene na širinu 6 mm. Nadvišenje lica i korijena nije pobrušeno, već je ostavljeno u stanju nakon zavarivanja. Radijus od približno 0,3 mm, na uzdužnim bridovima izrađivan je ručno, pomoću brusnog papira znatosti 150. Na udaljenosti 19 mm od sredine zavora probušen je provrt promjera 3,2 mm, kroz koji je provučena osovinica na koju se stavljaju utezi. Na krajevima osovine urezan je navoj. Učvršćenje utega izvedeno je pomoću matica. Ispod pločice na svaku epruvetu stegnuta je žica koja se spaja na pripadajući sat, koji je mjerio vrijeme do loma epruvete. Prilikom loma dolazi do prekida strujnog kruga i na satu oстане zabilježeno vrijeme koje je epruveta izdržala do loma. Epruvete su stezane u aluminijske stege s radijusom 0,3 mm na mjestu uklještenja, **slike 39 i 40**. Ispitivano je istovremeno osam epruveta. Za svako stanje pokusa ispitivane su po 3 epruvete.



Slika 40. Epruvete za dinamičko ispitivanje stegnute na platformu.

Način stezanja epruvete na platformu prikazan je **slikom 41**. Udaljenost sredine utega do uklještenja iznosila je 22 mm, a do sredine zavora 19 mm. Napravljen je etalon za pozicioniranje epruvete na platformu, duljine 6,25 mm, koja odgovara udaljenosti između stezaljki i ruba utega. Dimenzije utega iznosile su: promjer: 31,5 mm, ukupna masa (gornji+donji) 0,36 kg.



Slika 41. Način stezanja epruvete na platformu.

4.6.8.1. Proračun naprezanja u zavarenom spoju

Vlastita kružna frekvencija ω_v sustava prikazanog **slikom 41**. iznosi

$$\omega_v = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.6)$$

gdje je k koeficijent epruvete, odnosno konstanta opruge, a m masa epruvete i utega. Kako je masa epruvete u odnosu na masu utega mnogo manja, može se zanemariti. Isto tako može se zanemariti slobodan kraj epruvete koji ne utječe značajno na cjelokupan proračun.

Koeficijent k izračunat je pomoću jednadžbe,

$$x = \frac{F \cdot L^3}{3EI} = \frac{F}{k} \quad (4.7)$$

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (4.8)$$

gdje su: x -progib, F -sila, L -krak na kojem djeluje sila, E -modul elastičnosti čelika, I -moment tromosti presjeka epruvete.

Vlastita kružna frekvencija epruvete tako iznosi:

$$\omega_v = \sqrt{\frac{3EI}{L^3 m}} \quad (4.9)$$

Prisiljene vibracije

Uz pretpostavku, da platforma vibrira po zakonu:

$$\delta = \delta_m \sin \omega_p t \quad (4.10)$$

δ - trenutni položaj platforme,

δ_m - amplituda platforme,

ω_p - kružna frekvencija platforme,

t - vrijeme,

moguće je napisati jednadžbu gibanja epruvete:

$$m\ddot{x} + kx = k\delta_m \sin \omega_p t \quad (4.11)$$

To je nehomogena diferencijalna jednadžba II. reda, koja ima općenito i partikularno rješenje

$$x_o = A \sin \omega_v t + B \cos \omega_v t \quad (4.12)$$

$$x_{part} = x_m \sin \omega_p t \quad (4.13)$$

Općenito rješenje predstavlja vibracije koje će biti prigušene. Iz partikularnog rješenja dobiva se izraz za amplitudu vibracija x_m epruvete u točki gdje se nalazi težište utega.

$$x_m = \frac{\delta_m}{1 - (\omega_p / \omega_v)^2} \quad (4.14)$$

Ako se jednadžba (4.14) zapiše u obliku

$$\frac{x_m}{\delta_m} = \frac{1}{1 - (\omega_p / \omega_v)^2} \quad (4.15)$$

dobiva se izraz koji predstavlja faktor ojačanja.

Sila

Iz jednadžbi (4.7) i (4.8) može se izvesti izraz za silu koja djeluje na određenom mjestu epruvete:

$$F = \frac{3EIx_c}{L^3} \quad (4.16)$$

gdje se ukupni progib x_c izračuna iz formule

$$x_c = x_{stat} + x_m \quad (4.17)$$

x_{stat} - statički progib uslijed težine utega

x_m - maksimalni progib odnosno najveći pomak iz položaja ravnoteže uslijed vibracija platforme.

Naprezanja

Naprezanja su izračunata iz slijedeće jednadžbe

$$\sigma = \frac{F \cdot L}{I} \cdot e \quad (4.18)$$

e - udaljenost od neutralne osi.

Primjer proračuna naprezanja za frekvenciju 40 Hz

Ulazni podaci: $L = 22 \text{ mm}$ - krak sile
 $e = 1 \text{ mm}$ - udaljenost od neutralne osi
 $m = 0,36 \text{ kg}$ - masa utega
 $\delta_m = 1,5875 \text{ mm}$ - amplituda titranja platforme
 $f_p = 40 \text{ Hz}$ - frekvencija titranja platforme

Vlastita kružna frekvencija

$$\omega_v = \sqrt{\frac{3EI}{L^3 m}} \quad (4.19)$$

$$\omega_v = \sqrt{\frac{3 \cdot 210000 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-12}}{0,022^3 \cdot 0,36}} \quad (4.20)$$

$$\omega_v = 810,8 \text{ rad/s} \quad (f_v = 129,04 \text{ Hz})$$

Kružna frekvencija prisilnih vibracija

$$\omega_p = 2\pi f \quad (4.21)$$

$$\omega_p = 2\pi \cdot 40 \quad (4.22)$$

$$\omega_p = 80\pi \text{ rd/s}$$

Najveći pomak od položaja ravnoteže (amplituda težišta utega)

$$x_m = \frac{\delta_m}{1 - (\omega_p / \omega_v)^2} \quad (4.23)$$

$$x_m = \frac{1,5875}{1 - (80\pi / 810,8)^2} \quad (4.24)$$

$$x_m = 1,7562 \text{ mm}$$

Stvarni progib epruvete uslijed vibracija Δx jednak je razlici amplitude težišta utega x_m i amplitude platforme δ_m , jer epruveta sljedi platformu.

$$\Delta x = x_m - \delta_m \quad (4.25)$$

$$\Delta x = 1,7562 - 1,5875 \quad (4.26)$$

$$\Delta x = 0,1687 \text{ mm}$$

Maksimalni progib epruvete

$$x_c = x_{stat} + \Delta x \quad (4.27)$$

$$x_{stat} = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{0,36 \cdot 9,80665 \cdot 22^3}{3 \cdot 210000 \cdot 4} = 0,0149 \text{ mm} \quad (4.28)$$

$$x_c = 0,0149 + 0,1687 \quad (4.29)$$

$$x_c = 0,1836 \text{ mm}$$

Maksimalna sila

$$F_{\max} = \frac{3EIx_c}{L^3} \quad (4.30)$$

$$F_{\max} = \frac{3 \cdot 210000 \cdot 4 \cdot 0,1836}{22^3} \quad (4.31)$$

$$F_{\max} = 43,45 \text{ N}$$

Maksimalno naprežanje

$$\sigma_{\max} = \frac{F \cdot L}{I} \cdot e \quad (4.32)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{43,45 \cdot 22}{4} \cdot 1 \quad (4.33)$$

$$\sigma_{\max} = 238,98 \text{ N/mm}^2$$

Naprežanje na mjestu zavora

Da bi se dobilo naprežanje u sredini zavora potrebno je u jednadžbu (4.32) uvrstiti krak sile $L = 19 \text{ mm}$.

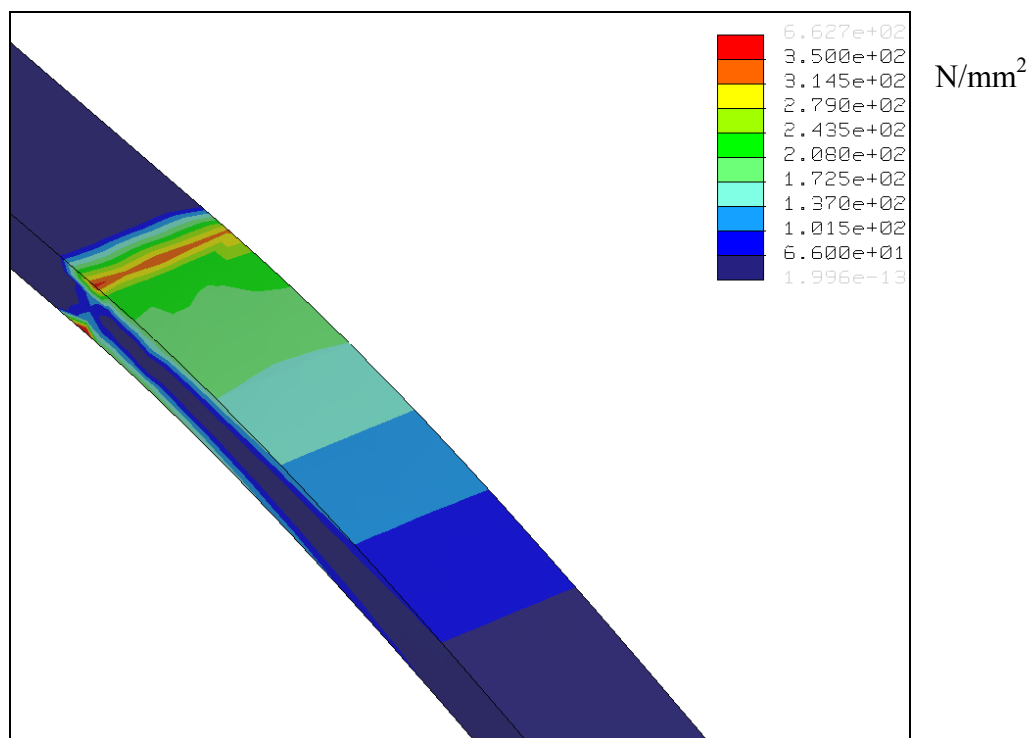
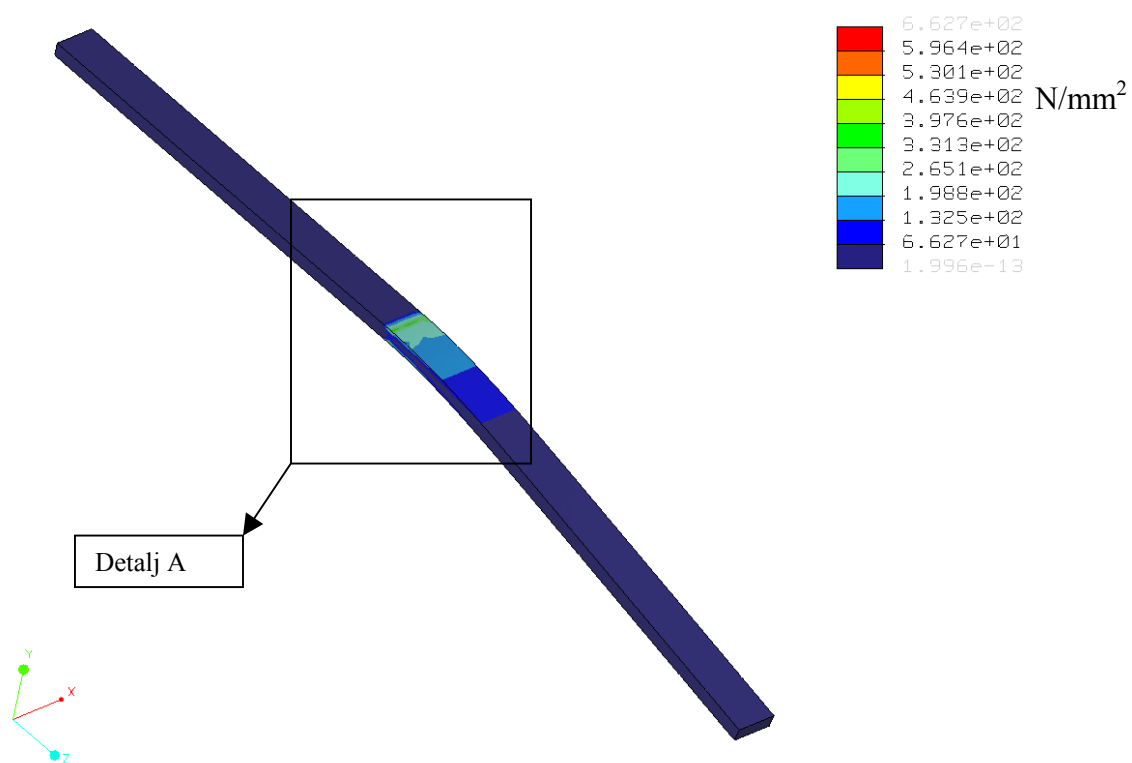
$$\sigma_z = \frac{F \cdot L}{I} \cdot e \quad (4.34)$$

$$\sigma_z = \frac{43,45 \cdot 19}{4} \cdot 1 \quad (4.35)$$

$$\sigma_z = 206,39 \text{ N/mm}^2$$

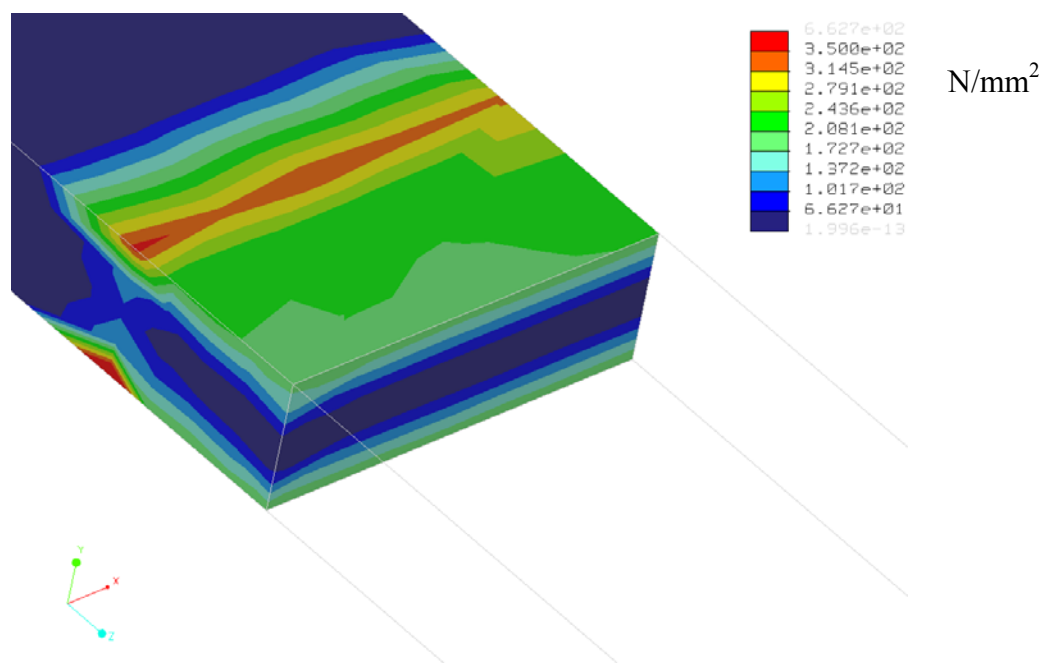
Analitički rezultati izračunatih naprežanja provjereni su metodom konačnih elemenata. Proračun je napravljen na Fakultetu za strojništvo u Mariboru u Laboratoriju za strojne elemente in konstrukcije.

Korišten je Software ANSYS. Rezultati metode konačnih elemenata slažu se s analitičkim rezultatima u potpunosti. Na **slici 42.** prikazani su rezultati naprežanja, a na **slici 43.** naprežanja po debljini zavara.



Detalj A

Slika 42. Raspored naprezanja u epruveti.



Slika 43. Raspored naprezanja po debljini zavara.

4.6.8.2. Locatijeva metoda za određivanje dinamičke izdržljivosti

Klasična Wöhlerova metoda je vrlo skupa i zahtijeva mnogo vremena. Primjena Locatijeve metode određivanja dinamičke izdržljivosti omogućava da se s daleko manjim brojem epruveta može odrediti dinamička izdržljivost zavarenog spoja.

Određivanje dinamičke izdržljivosti provedeno je prema Locatijevoj metodi, koja polazeći od izmjerenih vrijednosti broja ciklusa do loma u području vremenske izdržljivosti (padajući dio Wöhlerove krivulje) i pretpostavljene vrijednosti dinamičke izdržljivosti (dio Wöhlerove krivulje paralelan s apscisom), omogućuje primjenom Minerove teorije, određivanje stvarne dinamičke izdržljivosti zavarenog spoja skraćenim postupkom. Stvarna vrijednost dinamičke izdržljivosti dobiva se, prema Minerovoj teoriji, iz sume parcijalnih oštećenja tj. iz odnosa broja promjena probne epruvete n i ukupnog broja ciklusa epruvete N . Pri tome mora zbroj kumuliranih oštećenja biti jednak jedinici [142],

$$\sum n_i / N_i = 1 \quad (4.36)$$

gdje je:

n_i - broj ciklusa koji je epruveta izdržala pri određenom stupnju naprezanja σ_i

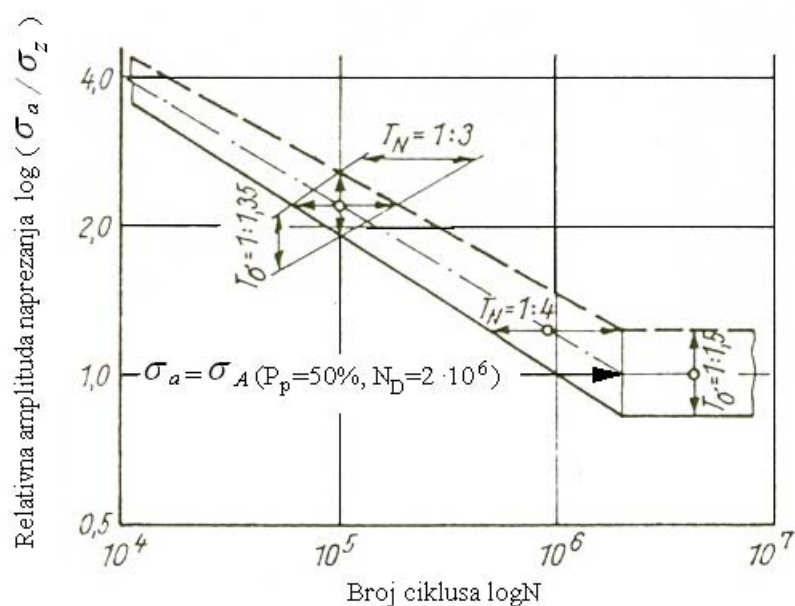
N_i - broj ciklusa neophodan za lom epruvete pri konstantnom naprezanju σ_i

Zbog velikog rasipanja rezultata dinamičkih ispitivanja, uobičajeno je raditi 3 do 7 izvođenja pokusa za jedno stanje [112, 123]. Veći broj izvođenja daje veću pouzdanost rezultata. Locatiјеva metoda temelji se na pretpostavljenoj dinamičkoj izdržljivosti odnosno ravnom dijelu Wöhlerove krivulje. Pouzdanost rezultata ove metode manja je u odnosu na ostale metode, ali su zato troškovi najmanji, a trajanje ispitivanja najkraće. U ovom istraživanju rađena su tri izvođenja u svakom stanju pokusa.

Najprije su određivane vrijednosti za dio Wöhlerove krivulje u području vremenske izdržljivosti. Prvo ispitivanje kod sva tri materijala, provedeno je pri naprezanju 198 N/mm^2 . Drugo ispitivanje provedeno je pri naprezanju 175 N/mm^2 ili pri 224 N/mm^2 , ovisno o tome koliki su broj ciklusa izdržale epruvete pri prvom ispitivanju na 198 N/mm^2 . Broj ciklusa na temelju kojeg je odlučivano uzet je iz literature [113], iz Wöhlerove krivulje za laserom zavareni spoj od čelika za poboljšavanje C 45. Ako su vremenske izdržljivosti bile u intervalu od 30 000 do 150 000 ciklusa, drugo ispitivanje provedeno je pri nižem opterećenju 175 N/mm^2 , a ako su vremenske izdržljivosti bile u intervalu od 50 000 do 350 000 ciklusa, drugo ispitivanje provedeno je pri višem opterećenju 224 N/mm^2 .

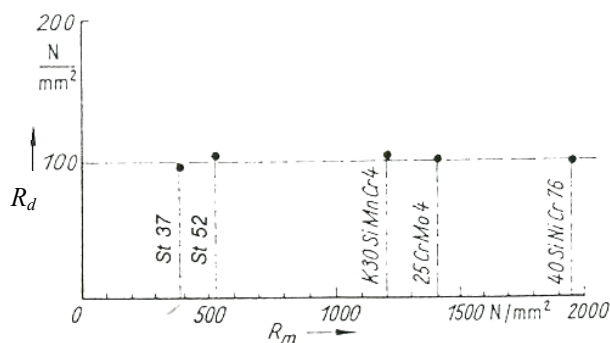
Nakon toga su daljnji rezultati za područje dinamičke izdržljivosti određivani korištenjem Minerove teorije. Krenulo se s naprezanjem 140 N/mm^2 , koje približno odgovara očekivanoj dinamičkoj izdržljivosti [143]. Naprezanje je nakon 250 000 ciklusa povećano za 24 N/mm^2 na 164 N/mm^2 . Nakon što je s povećanim naprezanjem učinjeno 250 000 ciklusa kao ranije, naprezanje je ponovno povećano za 24 N/mm^2 na 188 N/mm^2 . Ovako se s povećanjem naprezanja za 24 N/mm^2 uz 250 000 ciklusa, išlo dok nije nastupio lom epruvete.

Rezultati vremenske izdržljivosti unešeni su u dijagram $\sigma - \log N$. Zbog poznate činjenice da je rasipanje rezultata dinamičkih ispitivanja veliko, a rađena su samo tri izvođenja u jednom stanju pokusa, za određivanje kosog dijela Wöhlerove krivulje, korišteni su nagibi i vjerojatnosti preživljavanja iz Wöhlerove krivulje za zavarene spojeve prema DVS-u, koja je dobivena mnogobrojnim ispitivanjima dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva, **slika 44**.



Slika 44. Wöhlerova krivulja za zavarene spojeve od konstrukcijskih čelika prema DVS katalogu; puna linija – vjerojatnost preživljavanja $P_p=90\%$, nagib $k_w=3,5$; linija točka crta – vjerojatnost preživljavanja $P_p=50\%$, nagib $k_w=3,75$; isprekidana linija - vjerojatnost preživljavanja $P_p=10\%$, nagib $k_w=4$ [143].

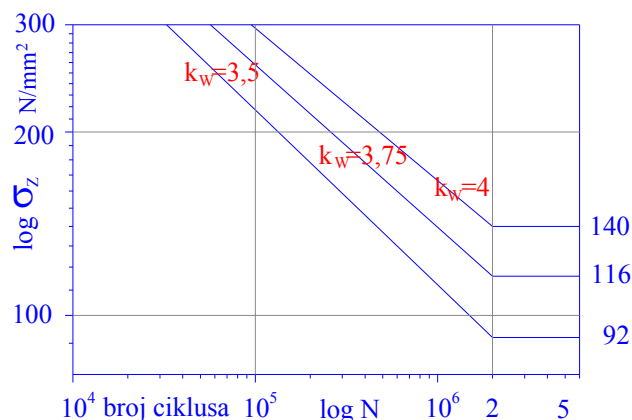
Kod dinamički opterećenih, sučeonih, neobrađenih zavarenih spojeva od visokočvrstih čelika ne dolazi do porasta dinamičke izdržljivosti s porastom vlačne čvrstoće, **slika 45**, [143]. To je posljedica zareznog djelovanja zavarenog spoja, koje poništi bolja statička svojstva materijala s većom vlačnom čvrstoćom.



Slika 45. Ovisnost dinamičke izdržljivosti kod aksijalnog simetričnog opterećenja o vlačnoj čvrstoći kod neobrađenih, sučeono zavarenih spojeva visokočvrstih čelika [143].

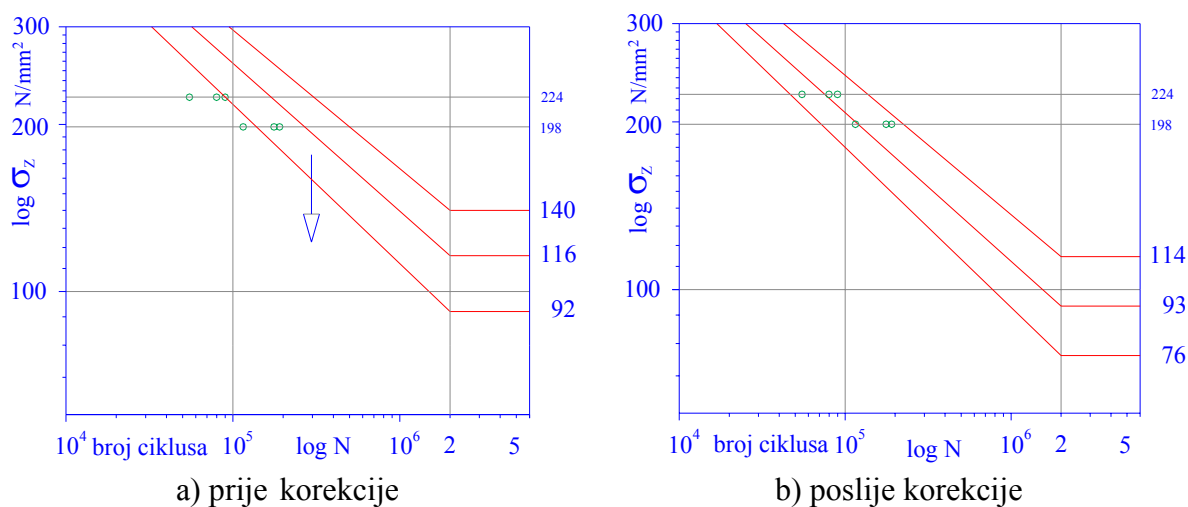
Prema DVS-ovom katalogu Wöhlerovih linija, dinamička izdržljivost, sučeljeno zavarenih spojeva pri aksijalnom simetričnom opterećenju, $R=-1$ (vlak-tlak), uz vjerojatnost preživljavanja 50% iznosi 110 N/mm^2 [143]. Točan podatak za simetrično savojno opterećenje nije pronađen, ali je pronađeno da je dinamička izdržljivost pri savojnom

opterećenju veća nego pri aksijalnom. Stoga je pretpostavljena Wöhlerova krivulja s dinamičkom izdržljivošću od 116 N/mm^2 , uz vjerojatnost preživljavanja 50%. Ovaj podatak je pretpostavljen, međutim za potrebe usporedbe dinamičkih svojstava laserom zavarenih spojeva s različitim zaštitnim plinovima, omogućit će utvrđivanje razlika ukoliko one postoje u ovom istraživanju. Krivulje s vjerojatnošću preživljavanja 10% i 90% nacrtane su prema uputama sa **slike 44** i dobiven je Wöhlerov dijagram prikazan **slikom 46**.



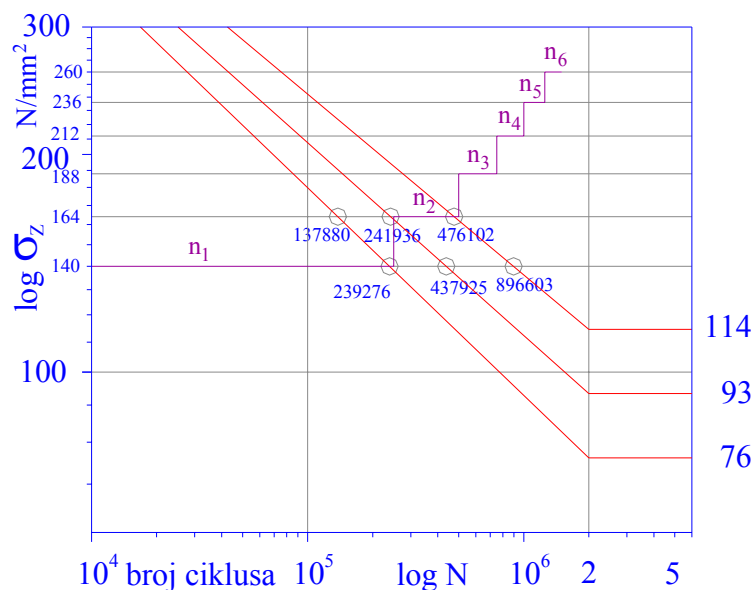
Slika 46. Pretpostavljeni Wöhlerov dijagram za proračun dinamičke izdržljivosti.

U pretpostavljeni dijagram unesene su izmjerene vrijednosti brojeva ciklusa do loma u području vremenske izdržljivosti. Zatim je izvršena korekcija dijagrama. Ukoliko bi se izmjerene vrijednosti našle izvan područja dijagrama, sve tri krivulje pomicanje su po vertikali, dok brojevi ciklusa do loma nisu ušli u područje dijagrama, **slika 47**.



Slika 47. Korekcija pretpostavljenog Wöhlerovog dijagrama, na temelju izmjerenih podataka u području vremenske izdržljivosti.

Sada je dobiven Wöhlerov dijagram, **slika 47 b**), u koji su ucrtani stupnjevi opterećenja, što je prikazano **slikom 48**. Zatim je izračunata suma odnosa n_i/N_i za svaku od tri pretpostavljene krivulje.



Slika 48. Locatijeva metoda.

PRIMJER:

Epruveta 231 – 1. ponavljanje

Materijal 25 CrMo 4, zaštitna mješavina 3, Ar/CO₂ - 82/18.

Epruveta 231 izdržala je 250 000 ciklusa pri prvom naprezanju 140 N/mm² i 155 714 ciklusa pri drugom naprezanju od 164 N/mm², nakon čega je nastupio lom.

Ako se promatra krivulja 1, **slika 48** – pri najnižem naprezanju od 140 N/mm² teoretski bi epruveta izdržala 239 276 ciklusa do loma, a pri naprezanju 164 N/mm² izdržala bi 137 880 ciklusa do loma.

Izračunata je suma omjera stvarnih ciklusa koje je epruveta izdržala i teoretskih koje bi eventualno mogla izdržati da je stalno bila izložena istom opterećenju:

$$\text{Krivulja 1: } \Sigma n_i/N_i = 250\,000/239\,276 + 155\,714/137\,880 = 2,174 \quad (4.33)$$

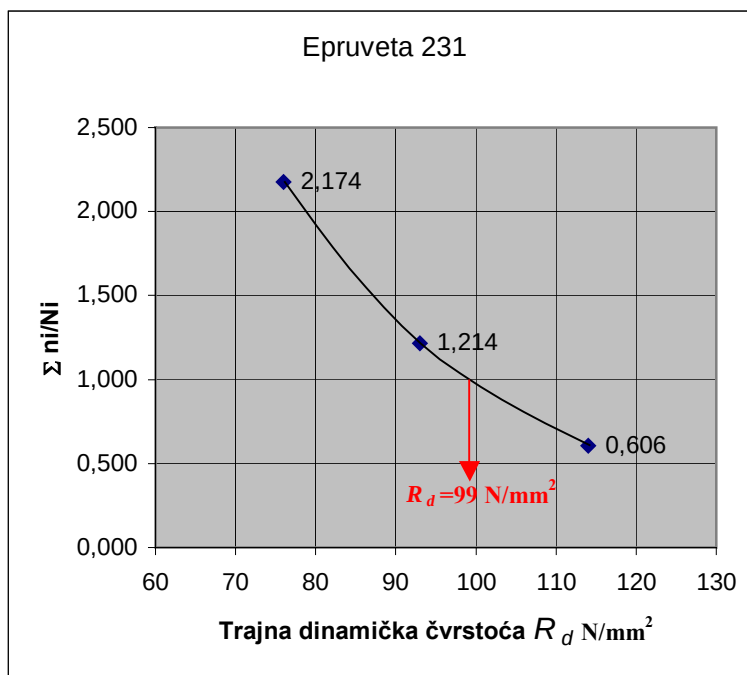
Na isti način izračunato je za krivulje 2 i 3.

$$\text{Krivulja 2: } \Sigma n_i/N_i = 250\,000/437\,925 + 155\,714/241\,936 = 1,214 \quad (4.34)$$

$$\text{Krivulja 3: } \Sigma n_i/N_i = 250\,000/896\,603 + 155\,714/476\,102 = 0,606 \quad (4.35)$$

Ovako dobivene vrijednosti unesene su u dijagram $R_d - \sum n_i/N_i$, te je kroz te tri točke povučena krivulja, **slika 49**. Na mjestu gdje je $\sum n_i/N_i = 1$, prema Minerovoj teoriji nalazi se dinamička izdržljivost, a to je u ovom slučaju 99 N/mm^2 . U drugom ponavljanju dobivena je dinamička izdržljivost 90 N/mm^2 , a u trećem 80 N/mm^2 . Zatim je izračunata srednja vrijednost koja je za stanje pokusa 23 iznosila 90 N/mm^2 .

Na isti način su dobivene vrijednosti dinamičkih izdržljivosti za sva tri materijala i sva stanja pokusa.



Slika 49. Određivanje dinamičke izdržljivosti prema Minerovoj teoriji.

4.7. ODREĐIVANJE MATEMATIČKIH MODELA PROMJENA MJERENIH VRIJEDNOSTI

Rezultati mjerenja geometrijskih karakteristika i mehaničkih svojstava zavarenog spoja statistički su obrađeni pomoću programskog paketa DESIGN EXPERT 6.0.6. Iz statističke analize izmjerenih podataka u svih 7 točaka pokusa dobiven je odgovarajući model. Model može biti linearan, kvadratni ili srednja vrijednost ukoliko nema značajnog utjecaja istraživanih čimbenika.

Najpovoljniji model određen je na temelju F-testa te na temelju maksimalne vrijednosti koeficijenta determinacije, R-kvadrata ("Adjusted R-Squared" i "Predicted R-Squared"). Zatim je određena značajnost modela i članova odzivnog polinoma analizom varijance "ANOVA for Mixture Model". Kada su vrijednosti "Prob>F" za određene članove odzivnog

polinoma manje od 0,05 onda su ti članovi značajni. To znači da je vjerojatnost dobivanja tako velike F vrijednosti uslijed šuma, manja od 5%. Kod linearnog modela pojavljuju se samo članovi Ar , CO_2 i O_2 . Kod kvadratnog modela još se pojavljuju članovi drugog reda $Ar*CO_2$, $Ar*O_2$ i CO_2*O_2 .

R-kvadrat je koeficijent determinacije koji predstavlja procjenu ukupne varijacije podataka objašnjenih pomoću modela. Prilagođeni R-kvadrat "Adjusted R-Squared" je R-kvadrat prilagođen broju članova modela u odnosu na broj stanja pokusa. Predviđeni R-kvadrat "Predicted R-Squared" je mjera iznosa varijacija u novim podacima objašnjenim pomoću modela. Oba R-kvadrata trebala bi biti blizu jedinice, a ako su jednaki jedinici onda je 100% varijacije promatranih vrijednosti objašnjeno modelom. Ukoliko je prilagođeni R-kvadrat veći od 75% model se može smatrati značajnim.

Zatim je u dijelu programa koji se naziva dijagnostika, provjereno da li postoji "grubo" odskakanje neke od točaka modela od stvarne izmjerene vrijednosti promatranog svojstva. Ako postoji, onda se takva točka označava kao "Outlier". Potrebno je istražiti postoji li neki specijalni uzrok njegovog nastanka. Ako se utvrdi uzrok, mogu se analizirati podaci bez te točke. Ako se ne utvrdi uzrok, točka može ostati. Ukoliko ne postoji "Outlier" može se zaključiti da je slaganje rezultata pokusa i dobivenih matematičkih modela usvim stanjima pokusa dobro. Dodavanje i oduzimanje članova modela i transformacija podataka mogu dovesti do poboljšanja modela. Cook-ova udaljenost je mjera koja pokazuje koliko se regresija mijenja ako se ta točka izbriše. Velike vrijednosti Cook-ove udaljenosti povezane su s visokim "Leverage" vrijednostima i velikim Studentiziranim ostacima, a mogu biti uzrokovane greškom pri mjerenju, krivim modelom ili stanjem pokusa daleko od ostalih stanja pokusa. Ako model prolazi kroz pojedinu točku pokusa, tada je vrijednost ostatka u toj točki jednaka nuli i ta točka kontrolira model. Ta pojava naziva se "Leverage" i u navedenom slučaju jednaka je jedinici. Visoki iznos vrijednosti "Leverage" je nepovoljan, jer ukoliko postoji neočekivana greška mjerenja u takvoj točki, ta greška snažno utječe na model.

Ovako utvrđen matematički model omogućava vrlo zornu grafičku interpretaciju, kao i optimiranje razmatranih parametara. Za grafičko prikazivanje odabran je način interpretacije konturnom plohom i 3D površinom.

5. REZULTATI I RASPRAVA

5.1. VIZUALNA KONTROLA

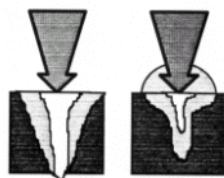
Dobiveni su dobri rezultati zavarivanja. U **tablicama 10 do 15**, prikazani su poprečni presjeci i detalji lica i korijena zavora i geometrijske značajke zavorenih spojeva. Većina zavora ima lagano nadvišenje lica i korijena. Kod nekih zavora pojavilo se ulegnuće lica, najvjerojatnije kao posljedica prevelikog razmaka između limova. Kod nekih zavora pojavilo se smaknuće limova kao posljedica netočnog stezanja ili neravnih radnih komada. Površinske pukotine i otvorene pore nisu utvrđene.

Djelomični neprovar i neujednačeni oblik korijena pojavio se kod zaštitne mješavine koja sadrži 18 % kisika u argonu (stanje pokusa 5), kod sva tri materijala.

U ostalim stanjima pokusa postignuta je potpuna penetracija i ujednačeni korijen po cijeloj dužini zavora. U stanjima pokusa s mješavinama koje sadrže kisik (Ar/O_2 i $\text{Ar/CO}_2/\text{O}_2$) širina korijena zavora je veća nego kod čistog argona i mješavina koje sadrže samo CO_2 (Ar/CO_2), dok je širina lica zavora neznatno manja.

Kako su parametri zavarivanja bili konstantni kod svih mješavina, smanjenje unosa energije u radni komad mogla je uzrokovati samo apsorpcija i raspršenje dijela laserskog snopa na oblaku metalne pare "plume" na ulasku u krater odnosno ključanicu, **slika 50** [144]. Kod Nd:YAG lasera, smatra se da je metalna para zapravo samo "vrući plin", toplinski uzbuđen, koji se sastoji od neutralnih atoma [145]. Temperatura pare pri laserskom zavarivanju konstrukcijskih čelika nalazi se između 1700 i 2700 °C [146]. U istraživanju [144], uspoređivan je utjecaj Ar, He i N_2 na geometrijske značajke zavora i dobiveno je da ionizacijski potencijal zaštitnog plina ne igra važnu ulogu pri Nd:YAG laserskom zavarivanju, dok je utjecaj brzine zavarivanja značajan. Pri brzinama manjim od 1 m/min, laserski snop ima više vremena za interakciju s oblakom metalne pare, pa je i njegovo oslabljenje veće. Pored apsorpcije, snop se također rasprši i defokusira, odnosno smanji se gustoća snage na površini radnog komada [144-146]. Prema [146] upotreba različitih zaštitnih plinova ne utječe na temperaturu metalne pare, ali utječe na količinu i veličinu oblaka metalne pare. Veličina oblaka metalne pare je vrlo važna jer određuje gustoću čestica unutar nje, a tako i koeficijent oslabljenja snopa uslijed apsorpcije i raspršenja.

Ovo istraživanje pokazalo je da količina apsorbirane energije ovisi o vrsti zaštitnog plina odnosno veličini oblaka metalne pare, jer je kod mješavine Ar/O_2 , 82/18 dobivena smanjena penetracija pri konstantnoj brzini zavarivanja.



Slika 50. Apsorpcija dijela snage laserskog snopa na oblaku metalne pare iznad kratera [1].

Istraživanje događanja u metalnoj pari koja se nalazi iznad ulaza u krater, je složeno [146].

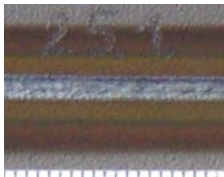
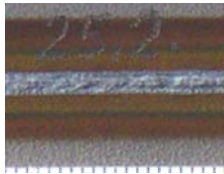
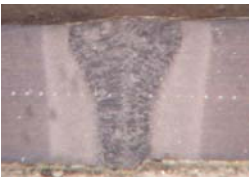
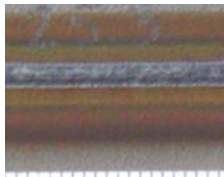
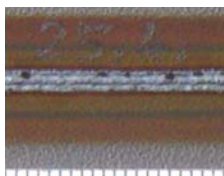
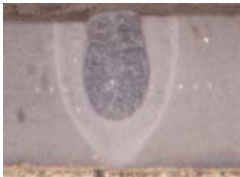
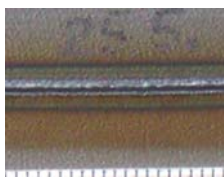
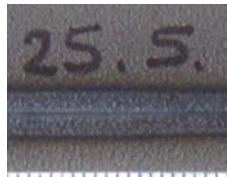
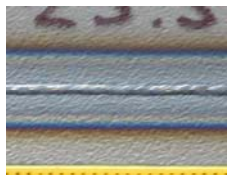
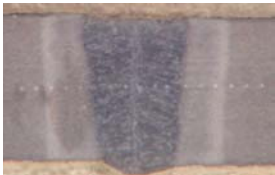
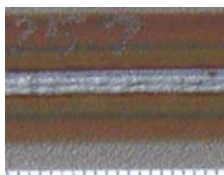
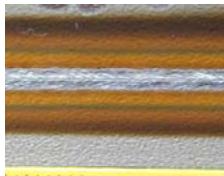
Općenito, koeficijent oslabljenja laserskog snopa na oblaku metalne pare, vrlo je teško točno odrediti, zbog nesigurnosti u izmjerene vrijednosti gustoće i radijusa čestica. Čestice u metalnoj pari dolaze u interakciju s laserskim snopom oslabljujući ga. Poznavanje veličine i volumnog udjela, odnosno gustoće čestica u metalnoj pari je ključno za procjenu oslabljenja laserskog snopa. Analiza metalne pare konstrukcijskog čelika je pokazala da su čestice prosječnog promjera manjeg od 50 nm, a sastoje se od čistog željeza i oksida [146, 147]. Vrlo mala količina kisika dovoljna je za oksidaciju čestica. Prema tome veći udio kisika u argonu dovodi do povećane oksidacije čestica u metalnoj pari, što bi mogao biti uzrok povećanog oslabljenja laserskog snopa kod mješavine s 18% O₂.

Ukoliko se pretpostavi da je stvaranje metalne pare jednako kod svih mješavina, mješavina Ar/O₂ (82/18) nije u stanju otpuhati, odnosno skrenuti metalnu paru s putanje laserskog snopa, pri ovako postavljenim parametrima dovođenja zaštitnog plina. U ovom istraživanju je korištena koaksijalna sapnica za dovod zaštitnog plina koji ujedno služi i za potiskivanje metalne pare s ulaza u krater. Parametri koji utječu na kontrolu metalne pare, a time i na uspješno zavarivanje su: promjer sapnice, udaljenost sapnice od radnog komada, vrsta plina, protok plina, vrsta i debljina materijala, snaga lasera i brzina zavarivanja. Većina navedenih parametara uzajamno utječu jedni na druge. Veća penetracija mogla bi se postići s manjim promjerom sapnice i manjom udaljenošću od radnog komada, ali tada opada kvaliteta površine zavara ili smanjenjem brzine zavarivanja [145,148].

Potpuna penetracija s mješavinom Ar/O₂ (82/18) dobivena je; kod materijala 25 CrMo 4 pri brzini zavarivanja 70 cm/min, kod materijala 42 CrMo 4 pri brzini 85 cm/min i kod materijala Ck 60 pri brzini 90 cm/min. To pokazuje da oslabljenje snopa u oblaku metalne pare ovisi i o vrsti materijala, a ne samo o vrsti zaštitnog plina.

Izgled lica zavara, **tablice 10, 12 i 14**, zadovoljava u stanjima pokusa 1, 2, 3, 5, 7 i 8, dok se u stanjima pokusa 4 i 6 pojavila pojačana oksidacija površine, što je rezultiralo neravnom i oksidiranom površinom zavara. U stanju pokusa 4 pojavilo se pojačano štrcanje. U stanju 5 uopće nema štrcanja, ali je za postizanje potpune penetracije pri istoj snazi potrebno smanjiti brzinu, a tada dolazi do štrcanja.

Tablica 10. Prikaz geometrije zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, na zavarima od 25 CrMo 4, pri brzini zavarivanja 110 cm/min.

Epr.	Mješavina	Poprečni presjek zavarenog spoja	Detalj lica	Detalj korijena
21	Ar 100			
22	Ar/CO ₂ 91/9			
23	Ar/CO ₂ 82/18			
24	Ar/ O ₂ 91/9			
25	Ar/ O ₂ 82/18			
251	Ar/ O ₂ 82/18 v=70 cm/min			
26	Ar/CO ₂ /O ₂ 82/9/9			
27	Ar/CO ₂ /O ₂ 88/6/6			
28	He 100			

Tablica 11. Geometrijske značajke i dimenzije nepravilnosti zavora u ovisnosti o vrsti zaštitne mješavine – materijal 25CrMo4, $P=1800$ W, $v=110$ cm/min, $z=-0,7$ mm, $Q=18$ l/min.

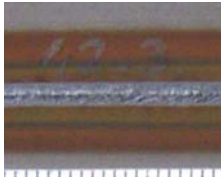
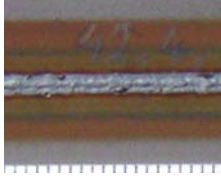
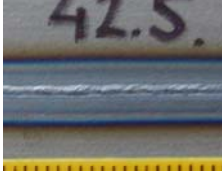
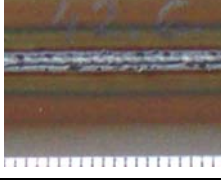
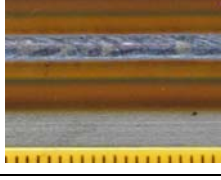
(* - negativna vrijednost znači, ulegnuće lica zavora,

n.o. – zavar nije ocjenjiv,

n.p. – nepotpuna penetracija).

Epruveta	Komponente mješavine %	Širina zavora b_{zav} mm	Širina korijena b_{kor} mm	Širina ZUT-a b_{zut} mm	Širina obojenja b_{ob} mm	Površina zavora A mm ²	Nadvišenje lica *	Nadvišenje korijena mm	Smaknuće limova mm	Ugorine lica/korijena mm	Pore		Ocjena klase zavora	Opaska
											ϕ maksimalni mm	Proj. površina maks. mm ²		
21	Ar 100	1,86	0,79	0,38	6,03	2,35	0	0,09	0,03	lice 0,03	0	0	B	
22	Ar/CO ₂ 91/9	1,66	0,72	0,38	5,59	2,32	0	0,09	0,06	lice 0,03	0,4	0,16	B	
23	Ar/CO ₂ 82/18	1,64	0,62	0,40	5,68	2,31	0,07	0,13	0,09	-	0,2	0,16	B	
24	Ar/ O ₂ 91/9	1,39	1,05	0,49	6,09	2,44	-0,02	0,14	0,00	lice 0,07	0,2	0,13	B	
25	Ar/ O ₂ 82/18	0,83	n.o.	0,47	3,88	1,23	0,12	0,00	0,10	-	-	-	n.o.	n.p.
251	Ar/ O ₂ 82/18	1,41	1,09	0,72	6,90	2,83	0,06	0,06	0,15	lice 0,04/ korijen 0,04	0,2	0,06	B	$v=70$ cm/min
26	Ar/CO ₂ /O ₂ 82/9/9	1,47	0,90	0,37	5,69	2,33	0,08	0,1	0,05	-	0,2	0,23	B	
27	Ar/CO ₂ /O ₂ 88/6/6	1,56	0,96	0,41	6,00	2,40	0	0,16	0,03	lice 0,04	0,3	0,1	B	
28	He 100	1,80	0,71	0,32	5,38	2,35	-0,03	0,09	0,09	-	0,3	0,15	B	

Tablica 12. Prikaz geometrije zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, na zavarima od 42 CrMo 4, pri brzini zavarivanja 110 cm/min.

Epr.	Mješavina	Poprečni presjek zavarenog spoja	Detalj lica	Detalj korijena
41	Ar 100			
42	Ar/CO ₂ 91/9			
43	Ar/CO ₂ 82/18			
44	Ar/ O ₂ 91/9			
45	Ar/ O ₂ 82/18			
451	Ar/ O ₂ 82/18 v=85 cm/min			
46	Ar/CO ₂ /O ₂ 82/9/9			
47	Ar/CO ₂ /O ₂ 88/6/6			
48	He 100 v=100 cm/min			

Tablica 13. Geometrijske značajke i dimenzije nepravilnosti zavora u ovisnosti o vrsti zaštitne mješavine – materijal 42CrMo4, $P=1800$ W, $v=110$ cm/min, $z=-0,7$ mm, $Q=18$ l/min.

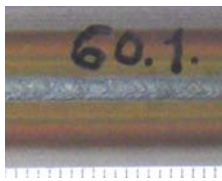
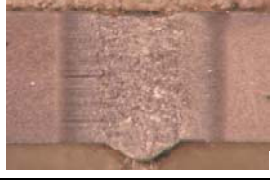
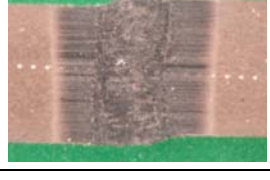
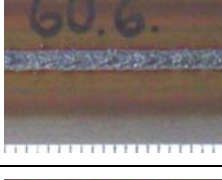
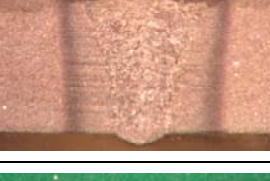
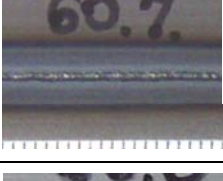
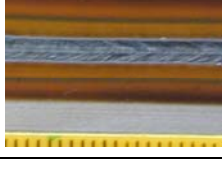
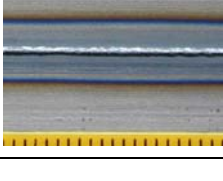
(* - negativna vrijednost znači, ulegnuće lica zavora,

n.o. – zavar nije ocjenjiv,

n.p. – nepotpuna penetracija).

Epruveta	Komponente mješavine %	Širina zavora b_{zav} mm	Širina korijena b_{kor} mm	Širina ZUT-a b_{zut} mm	Širina obojenja b_{ob} mm	Površina zavora A mm ²	Nadvišenje lica * mm	Nadvišenje korijena mm	Smaknuće limova mm	Ugorine lica mm	Pore		Ocjena kvalitete zavora	Opaska
											ϕ maksimalni mm	Proj. površina maks. mm ²		
41	Ar 100	1,98	0,74	0,36	5,90	2,62	0	0,20	0,05	0,02	0,2	0,05	B	
42	Ar/CO ₂ 91/9	1,95	0,57	0,33	5,88	2,57	0,07	0,18	0,03	0,01	0,4	0,21	B	
43	Ar/CO ₂ 82/18	1,95	0,43	0,37	5,70	2,56	0,03	0,18	0,05	0,02	0,3	0,1	B	
44	Ar/ O ₂ 91/9	1,31	0,99	0,58	6,13	2,71	0,03	0,21	0,04	0,06	0,2	0,06	B	
45	Ar/ O ₂ 82/18	0,92	0,90	0,56	5,02	1,97	0,05	0,08	0,00	-	-	-	n.o.	n.p.
451	Ar/ O ₂ 82/18	1,33	1,01	0,56	6,10	2,62	-0,03	0,06	0,04	-	0,2	0,03	B	$v=85$ cm/min
46	Ar/CO ₂ /O ₂ 82/9/9	1,33	0,95	0,43	5,93	2,54	0,06	0,15	0,08	0,05	0,2	0,03	B	
47	Ar/CO ₂ /O ₂ 88/6/6	1,43	0,97	0,53	6,04	2,55	-0,06	0,15	0,06	-	0,2	0,04	B	
48	He 100	2,01	0,73	0,42	6,14	2,81	0,05	0	0,22	-	0,3	0,17	C	$v=100$ cm/min

Tablica 14. Prikaz geometrije zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, na zavarima od Ck 60, pri brzini zavarivanja 110 cm/min.

Epr.	Mješavina	Poprečni presjek zavarenog spoja	Detalj lica	Detalj korijena
61	Ar 100			
62	Ar/CO ₂ 91/9			
63	Ar/CO ₂ 82/18			
64	Ar/ O ₂ 91/9			
65	Ar/ O ₂ 82/18			
651	Ar/ O ₂ 82/18 v=90 cm/min			
66	Ar/CO ₂ /O ₂ 82/9/9			
67	Ar/CO ₂ /O ₂ 88/6/6			
68	He 100			

Tablica 15. Geometrijske značajke i dimenzije nepravilnosti zavora u ovisnosti o vrsti zaštitne mješavine – materijal Ck60, $P=1800$ W, $v=110$ cm/min, $z=-0,7$ mm, $Q=18$ l/min.

(* - negativna vrijednost znači, ulegnuće lica zavora,

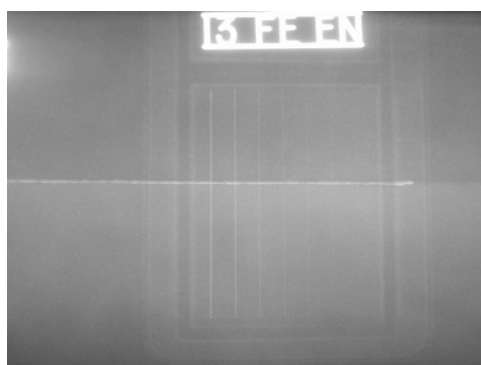
n.o. – zavar nije ocjenjiv,

n.p. – nepotpuna penetracija)

Epruveta	Komponente mješavine %	Širina zavora b_{zav} mm	Širina korijena b_{kor} mm	Širina ZUT-a b_{zut} mm	Širina obojenja b_{ob} mm	Površina zavora A mm ²	Nadvišenje lica * mm	Nadvišenje korijena mm	Smaknuće limova mm	Ugorine lica mm	Pore		Ocjena klase zavora	Opaska
											ϕ maksimalni mm	Proj. površina maks. mm ²		
61	Ar 100	2,11	0,63	0,35	5,95	2,61	0,02	0,17	0,05	-	0,2	0,06	B	
62	Ar/CO ₂ 91/9	2,04	0,67	0,42	5,85	2,67	0,04	0,22	0,04	-	0,4	0,43	B	
63	Ar/CO ₂ 82/18	2,01	0,66	0,38	5,95	2,70	0,01	0,15	0,03	0,01	0,3	0,06	B	
64	Ar/ O ₂ 91/9	1,45	1,16	0,56	6,20	2,79	- 0,06	0,25	0,03	-	0,2	0,04	B	
65	Ar/ O ₂ 82/18	1,26	1,21	0,61	4,38	2,36	0,16	0,01	0,05	-	-	-	n.o.	n.p.
651	Ar/ O ₂ 82/18	1,30	1,28	0,58	5,51	2,49	0,11	0,07	0,08	-	0,2	0,06	B	$v=90$ cm/min
66	Ar/CO ₂ /O ₂ 82/9/9	1,62	0,98	0,44	6,00	2,53	0,01	0,17	0,00	-	0,4	0,29	B	
67	Ar/CO ₂ /O ₂ 88/6/6	1,84	0,79	0,35	6,05	2,58	0,00	0,17	0,00	-	0,2	0,04	B	
68	He 100	2,06	0,74	0,39	5,53	2,53	0,02	0,15	0,05	-	0,2	0,13	B	

5.2. ISPITIVANJE RADIOGRAFSKOM METODOM

Na **slici 51.** prikazan je radiogram s indikatorom kvalitete i može se uočiti zahtijevana vidljivost osamnaeste žice prema HRN EN 462-1 [138], koja je postignuta na svim radiogramima.



Slika 51. Radiogram zavora, 25 CrMo 4, Ar, stanje pokusa 1.

• Čelik 25 CrMo 4

Uglavnom su dobiveni zavari bez mnogo pora. Kod nekih zavara, **tablica 11.**, pojavile su se pojedinačne pore najvećeg promjera 0,4 mm. Prema normi HRN EN ISO 13919-1 [90], za lim debljine 2 mm, dozvoljena veličina pore za visoku kvalitetu zavara (B) iznosi 0,6 mm. Najveća suma površina pora iznosi 0,23 mm², **tablica 11.** Dozvoljena suma površina projekcije pora u smjeru paralelno s površinom lima i okomito na os zavara, na površinu 200 mm² (100 mm duljine zavara puta debljina lima), kod visoke kvalitete mora biti manja od 0,7 % odnosno manja od 1,4 mm². Ukoliko se pojedinačne pore nalaze na udaljenosti manjoj od 1 mm (visoka kvaliteta) radi se o nakupini ili gnjezdu pora. Gnjezda pora dozvoljena su kod visoke kvalitete, kada je udaljenost vanjskih rubova pojedinačnih pora manja od 2 mm. Gnjezda pora pojavila su se u stanjima pokusa 6 i 8. S obzirom na poroznost svi zavari imaju najvišu kvalitetu, odnosno nalaze se u grupi B.

• Čelik 42 CrMo 4

Uglavnom su dobiveni zavari bez mnogo pora. Kod nekih zavara, **tablica 13.**, pojavile su se pojedinačne pore najvećeg promjera 0,4 mm. Najveća suma površina projekcije pora iznosi 0,21 mm², **tablica 13.** Gnjezdo pora pojavilo se u stanju pokusa 2. S obzirom na poroznost svi zavari imaju najvišu kvalitetu odnosno nalaze se u grupi B.

• Čelik Ck 60

Uglavnom su dobiveni zavari bez mnogo pora. Kod nekih zavara, **tablica 15.**, pojavile su se pojedinačne pore najvećeg promjera 0,4 mm. Najveća suma površina projekcije pora iznosi 0,43 mm², **tablica 15.** Gnjezda pora pojavila su se u stanjima pokusa 1, 2, 6 i 8. S obzirom na poroznost svi zavari imaju najvišu kvalitetu odnosno nalaze se u grupi B.

Najmanja poroznost, odnosno zavar bez pora dobiven je kod materijala 25 CrMo 4 u stanju pokusa 1 sa zaštitnim plinom argonom. Najveći broj pora, njih 15 dobiven je kod materijala Ck 60 u stanju pokusa 2 sa mješavinom Ar/CO₂, 91/9.

Ovisnost između vrste zaštitnog plina, vrste materijala i poroznosti pri korištenim parametarima zavarivanja ne može se utvrditi.

5.3. GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE POPREČNOG PRESJEKA ZAVARENOG SPOJA

Rezultati mjerenja i ocjena geometrijskih značajki zavarenog spoja nalaze se u **tablicama 11, 13 i 15**, a u **tablicama 10, 12 i 14** prikazane su slike poprečnog presjeka zavora.

Određivanje kvalitete zavarenih spojeva

Prema normi HRN EN ISO 13919-1 [90] za limove debljine 2 mm, za visoku kvalitetu B nadvišenje korijena i lica zavora mora biti manje od 0,5 mm, ulegnuće lica zavora, smaknuće limova i ulegnuće korijena mora biti manje od 0,2 mm, a ugorine lica zavora manje od 0,1 mm. Kod čelika 42 CrMo 4 i zaštitnog plina helija, **tablica 13**, stanje pokusa 8, smaknuće limova iznosi 0,22 mm, što je više od dozvoljenog za kvalitetu B. Navedeni zavar ima kvalitetu C kod koje je dozvoljeno smaknuće manje od 0,3 mm.

Svi ostali zavari imaju kvalitetu B. Većina zavora ima malo nadvišenje lica ili jednako nuli.

Utjecaj vrste mješavine na geometrijske značajke

Pri zavarivanju u zaštiti argonom i helijem dobivene su približno jednake geometrijske značajke zavarenog spoja, odnosno upotreba znatno skupljeg plina helija nije opravdana za Nd:YAG lasersko zavarivanje čelika za poboljšavanje. Prema [144, 147, 149] ionizacijski potencijal plina ne utječe na kontrolu oblaka metalne pare, već je važnija težina plina. Teži plin kao što je u ovom slučaju argon bolje otklanja metalnu paru s ulaza u krater, ali je ne uklanja u potpunosti, pa je zbog toga zavar proširen u gornjem dijelu. Takav oblik zavora karakterističan je za argon, helij i dušik [144]. Pri zavarivanju s lakšim plinom helijem može se očekivati i manja penetracija [147], što je i dobiveno, ali samo kod materijala 42 CrMo 4. Za potpunu penetraciju brzina je smanjena sa 110 cm/min na 100 cm/min, **tablica 12**.

Vrsta aktivne mješavine značajno utječe na oblik zavora, tj. na odnos širine lica zavora i širine korijena kod sva tri materijala, **tablice 10 do 15**. Aktivna komponenta od 9 i 18% CO₂ u argonu, (stanja pokusa 2 i 3) ne utječe na promjenu geometrijskog oblika zavora u odnosu na čisti argon i helij. Zavar je i dalje proširen u gornjem dijelu i približno jednake površine poprečnog presjeka, **slike 52, 53 i 54**.

Aktivna komponenta 9% O₂, značajno utječe na promjenu geometrijskog oblika zavora, odnosno uzrokuje smanjenje širine lica zavora i povećanje širine korijena zavora. Uzrok tome je smanjena površinska napetost taline uslijed oksidacije, koja uzrokuje povećanje apsorpcije, te dodatna energija uslijed egzotermne reakcije [20]. Najveća površina poprečnog presjeka zavora dobivena je pomoću mješavine 4 (Ar/O₂, 91/9), kod sva tri materijala.

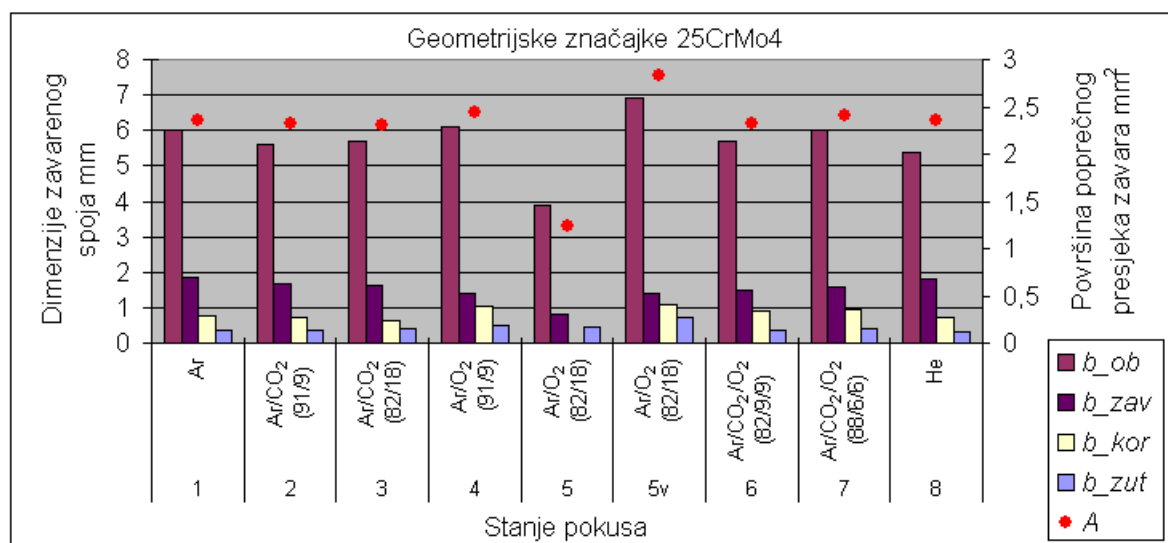
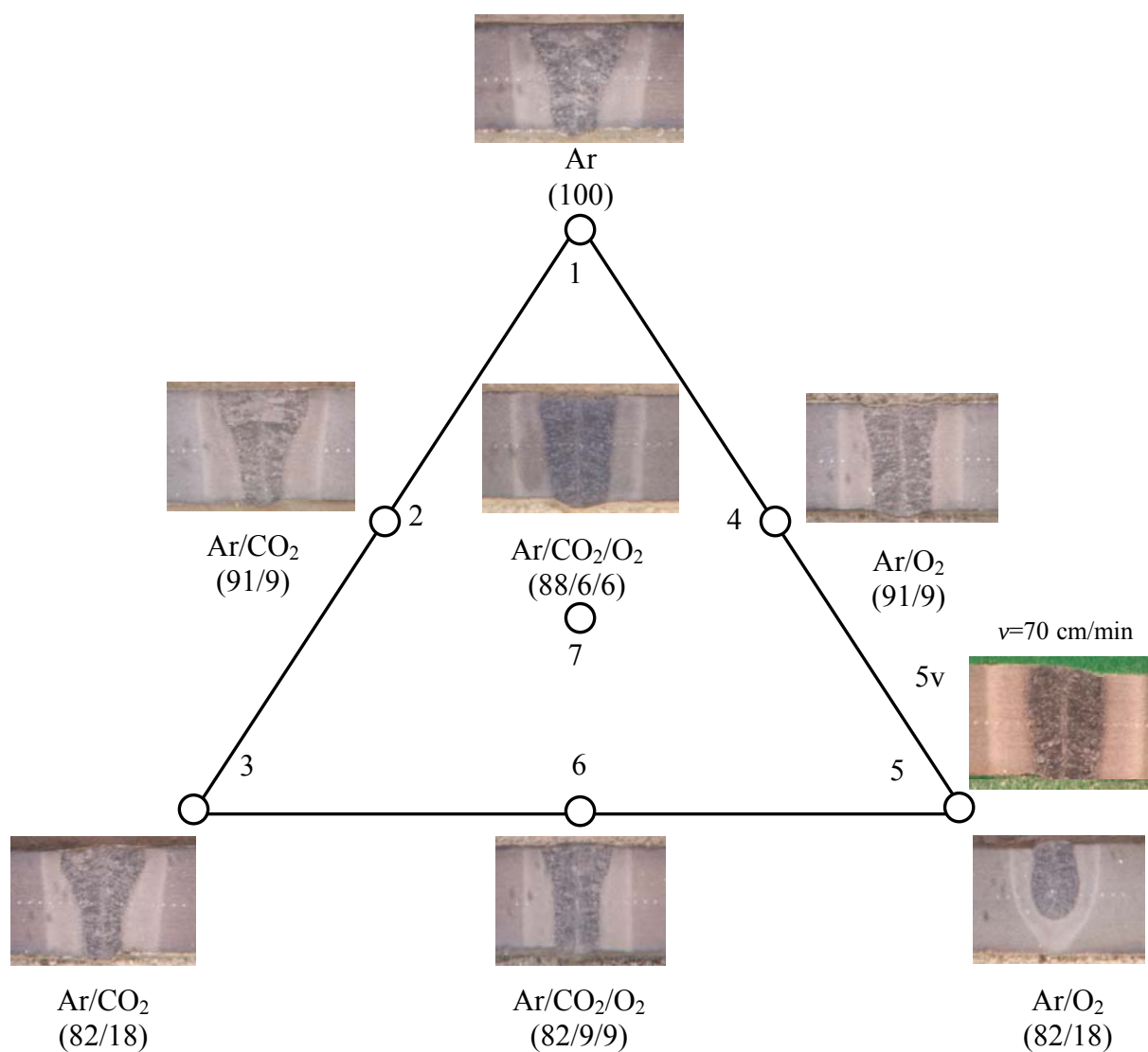
Istovremeni dodatak CO₂ i O₂ argonu (ternarne mješavine Ar/CO₂/O₂, 82/9/9 i 88/6/6, stanja pokusa 6 i 7), također djeluje kao dodatak samo kisika, odnosno uzrokuje smanjenje širine lica zavara i povećanje širine korijena zavara. Pri tom se površina poprečnog presjeka ne mijenja značajno u odnosu na čisti argon i mješavine Ar/CO₂. Čisti argon i mješavine Ar/CO₂, daju oblik zavara proširen u gornjem djelu s uskim korijenom, dok mješavine Ar/O₂ i Ar/CO₂/O₂ daju gotovo jednoliku širinu zavara po cijelom presjeku.

Mješavina 7 (Ar/CO₂/O₂, 88/6/6) daje dobru kvalitetu površine lica zavara. Površina poprečnog presjeka zavara jednaka je kao kod argona, ali je zato korijen znatno širi. To ima prednost u slučaju netočnog vođenja laserskog snopa jer može spriječiti nastanak greški vezivanja. Analiza kvalitete površine i geometrijskih značajki zavara upućuje na izbor mješavine 7 kao optimalne.

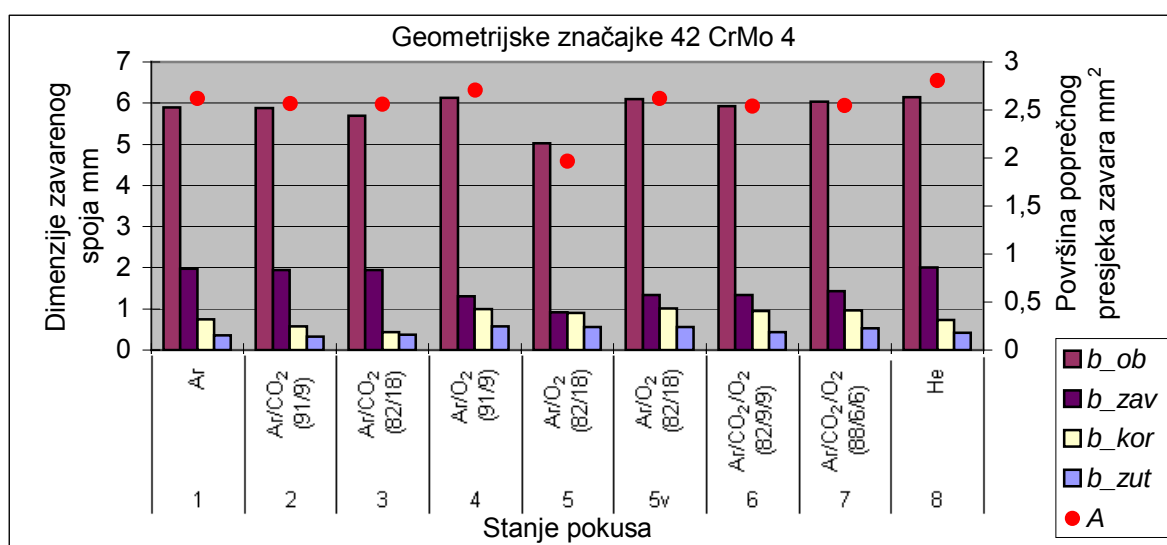
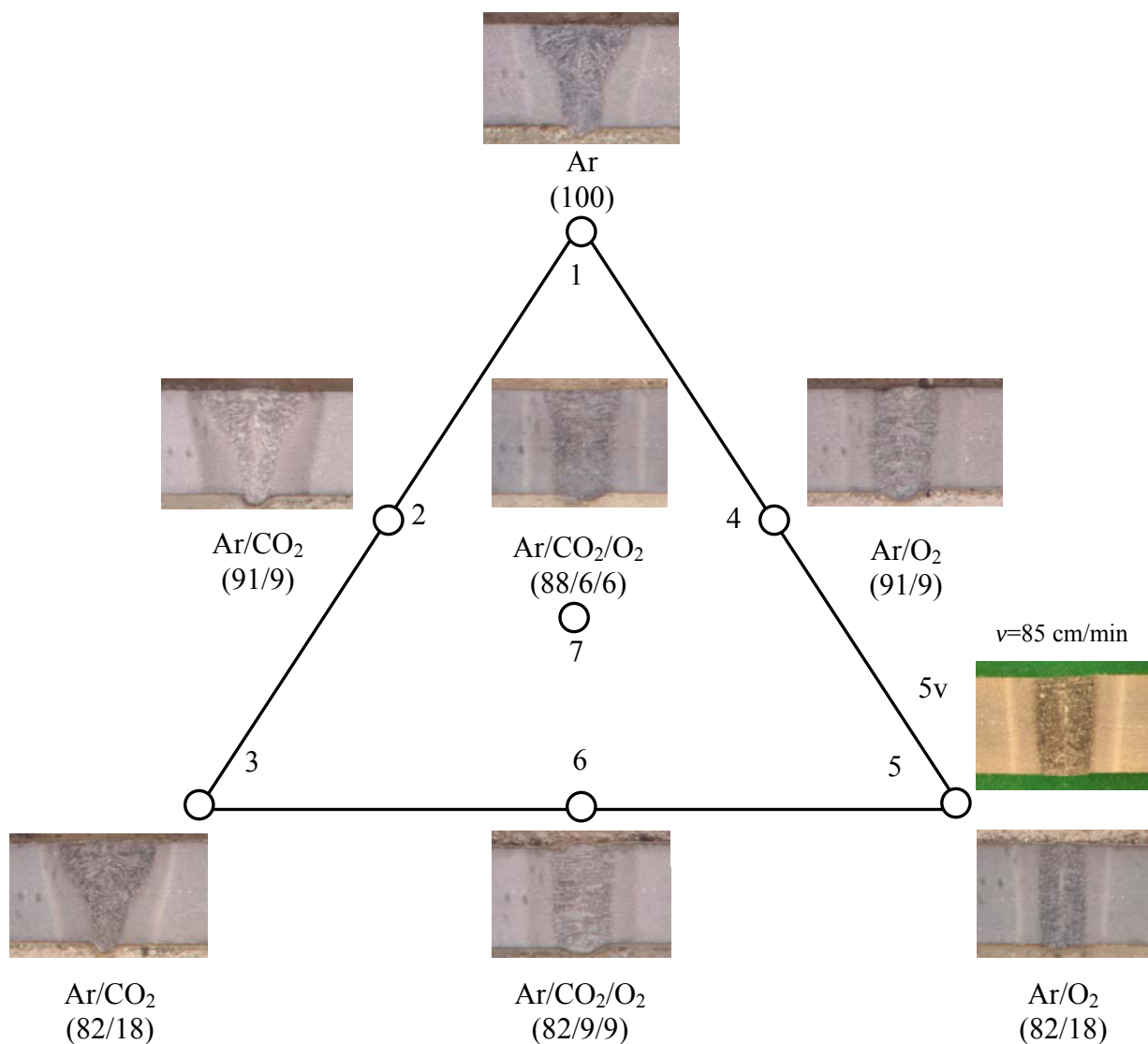
Povezanost vrste mješavine i brzine zavarivanja

U ovom istraživanju, utjecaj vrste mješavine na brzinu zavarivanja, nije dobiven, odnosno nije dobiveno povećanje brzine zavarivanja ni s jednom aktivnom mješavinom. Uzrok tome mogao bi biti preveliki udio kisika u mješavini, koji je djelovao na oslabljenje laserskog snopa na oblaku metalne pare i tako poništio efekt povećanja penetracije i brzine zavarivanja koji se dobije kod malog postotka kisika od 1 do 2% [20]. U istraživanju [127] korištene su mješavine Ar/O₂ (92/8), Ar/CO₂ (82/18) i Ar/CO₂/O₂ (84/13/3). Pomoću mješavine Ar/CO₂/O₂ (84/13/3), dobivene su 30 do 45% veće brzine zavarivanja ovisno o vrsti osnovnog materijala. Uzrok tome bila je bolja kontrola metalne pare, dovodenjem plina kroz cijevčicu sa strane, a ne kroz koaksijalnu sapnicu kao što je to slučaj u ovom istraživanju [144-149].

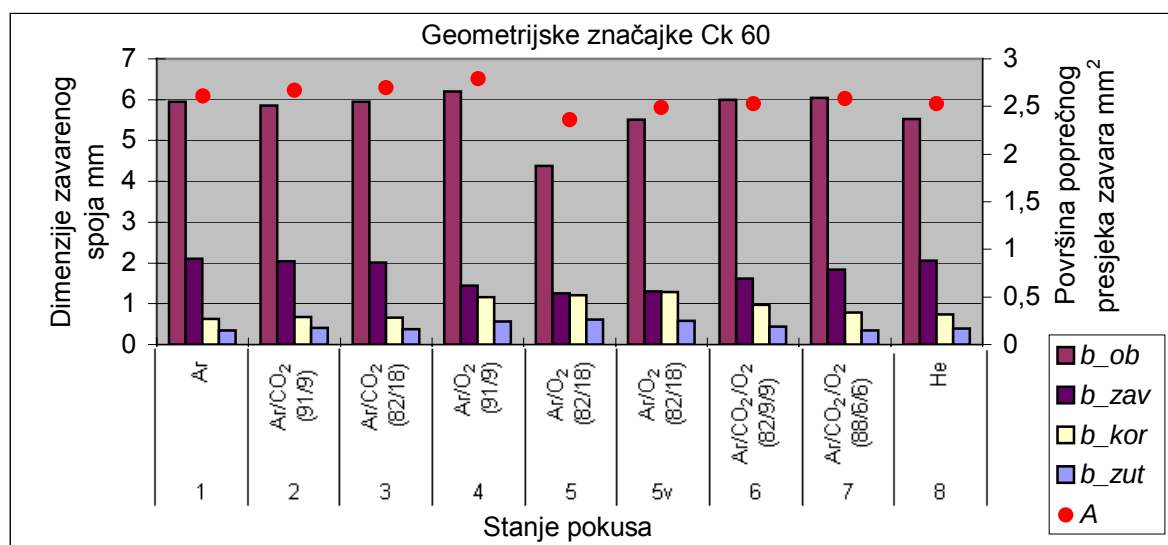
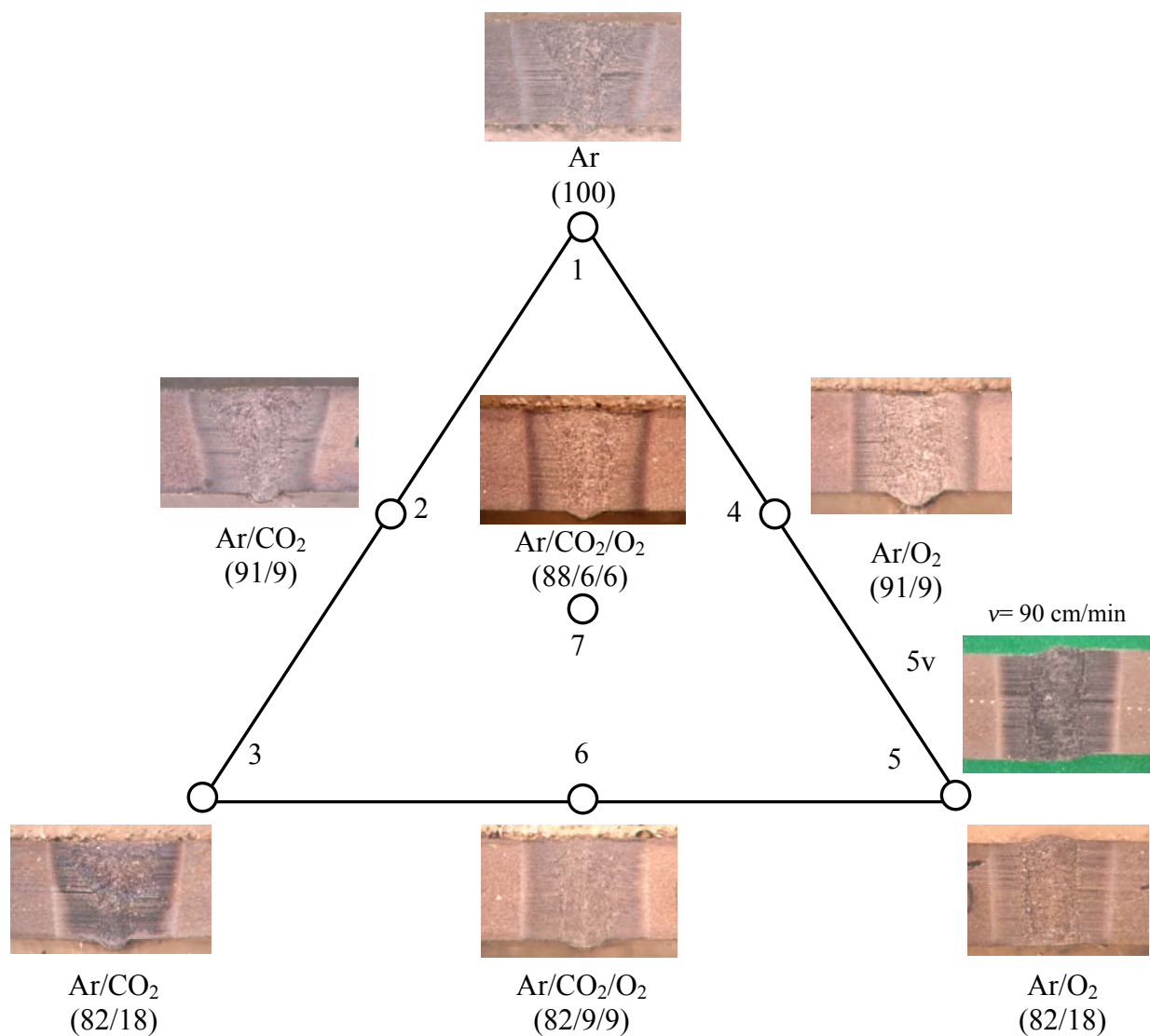
Stoga se može zaključiti, da aktivne mješavine ne utječu na brzinu laserskog zavarivanja, kada se dovode na mjesto zavarivanja kroz koaksijalnu sapnicu, odnosno da utječu na povećanje brzine zavarivanja samo kada se dovode kroz cijevčicu sa strane, što je dobiveno u [127].



Slika 52. Geometrijske značajke zavarenog spoja; v=110 cm/min, 25 CrMo 4.



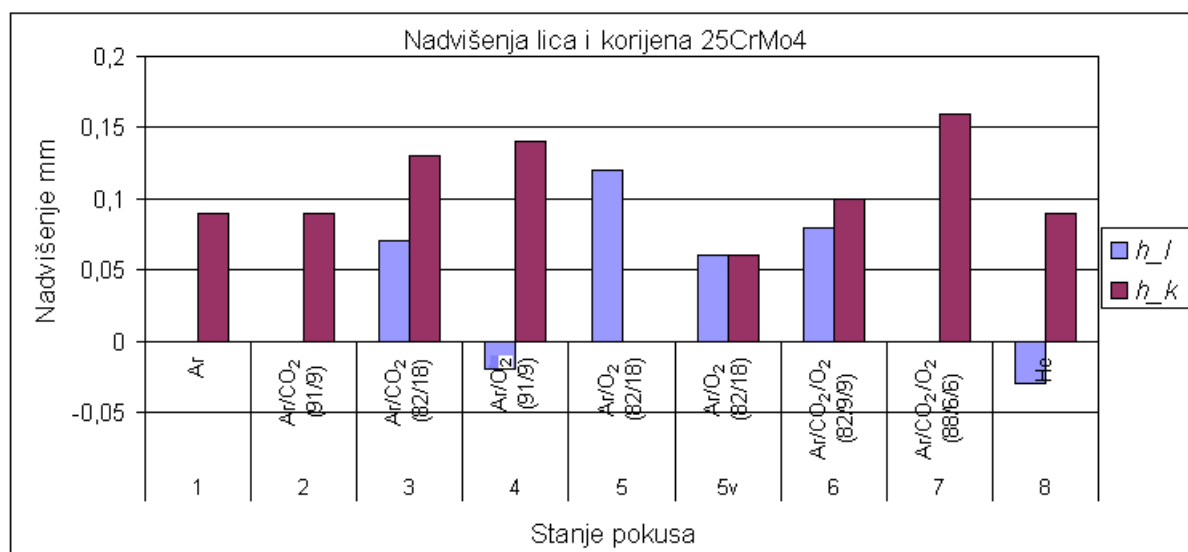
Slika 53. Geometrijske značajke zavarenog spoja; $v=110 \text{ cm/min}$, 42 CrMo 4.



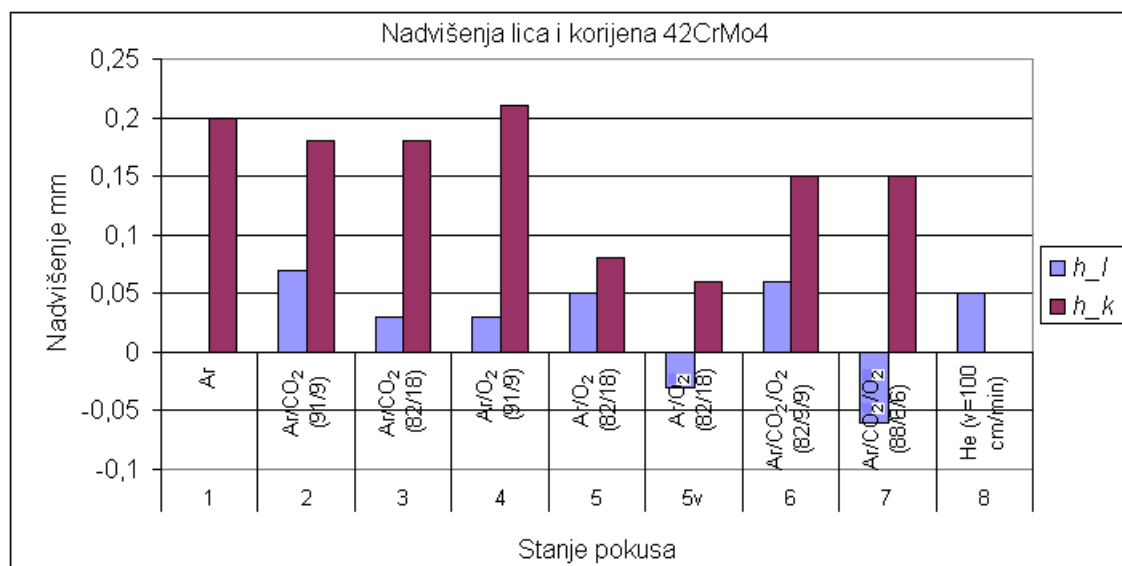
Slika 54. Geometrijske značajke zavarenog spoja; v=110 cm/min, Ck 60.

Utjecaj vrste mješavine na nadvišenje korijena i lica zavora

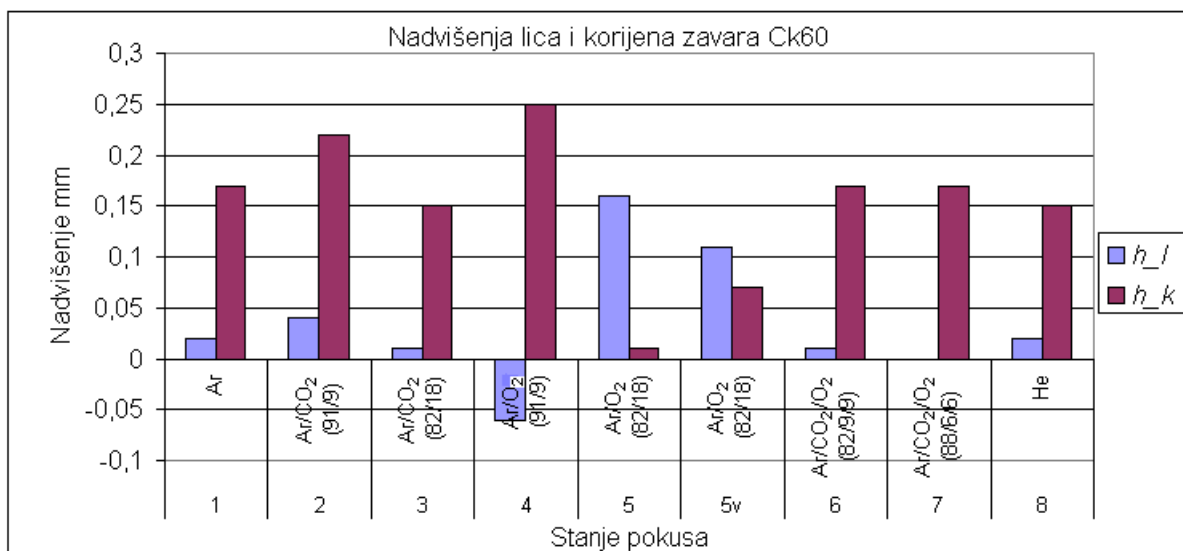
Na slikama 55, 56 i 57, prikazana je usporedba nadvišenja lica i korijena zavora u ovisnosti o vrsti mješavine.



Slika 55. Geometrijske značajke 25CrMo4, h_l – nadvišenje lica zavora, h_k – nadvišenje korijena zavora.



Slika 56. Geometrijske značajke 42CrMo4, h_l – nadvišenje lica zavora, h_k – nadvišenje korijena zavora.



Slika 57. Geometrijske značajke Ck60, h_l – nadvišenje lica zavara, h_k – nadvišenje korijena zavara.

Povećano nadvišenje lica zavara, kod sva tri materijala, dobiveno je samo u stanju pokusa 5, s mješavinom Ar/O₂ (82/18), kada nije došlo do potpune penetracije.

Nadvišenje korijena i ulegnuće lica zavara značajno utječu na dinamička svojstva laserom zavarenih spojeva, jer su to mjesta koncentracije naprezanja odakle pukotina uglavnom kreće [112]. Pritom su mjerodavni radijus zakrivljenosti korijena i kut nadvišenja korijena, **slika 18**. Kod materijala 25 CrMo 4 dobivena su nadvišenja korijena zavara u intervalu od 0,06 mm do 0,16 mm, **slika 55, tablica 11**, kod materijala 42 CrMo 4 u intervalu od 0,06 mm do 0,21 mm **slika 56, tablica 13** i kod materijala Ck 60 u intervalu od 0,07 mm do 0,25 mm **slika 57, tablica 15**. Kod sva tri materijala najmanje nadvišenje korijena dobiveno je u stanju pokusa 5v, sa mješavinom Ar/O₂ (82/18), a najveće u stanju pokusa 4 sa mješavinom Ar/O₂ (91/9).

U stanjima pokusa 1, 2, 3 i 8 dobiveni su najuži korijeni s relativno velikim nadvišenjem, posebno kod materijala 42 CrMo 4 i Ck 60, **tablice 10, 12 i 14**. U stanjima pokusa 4, 6 i 7 također je dobiveno relativno veliko nadvišenje, ali je širina korijena zbog djelovanja kisika veća. Manja širina korijena u stanjima 1, 2, 3 i 8 uzrokovala je oštiri radijus zakrivljenosti i veći kut nadvišenja korijena nego u stanjima 4, 6 i 7. Stoga je u stanjima 1, 2, 3 i 8 dobiveno veće zarezno djelovanje. U stanju 5v sa mješavinom Ar/O₂ (82/18), dobiven je najpovoljniji oblik korijena, koji ima najmanje zarezno djelovanje.

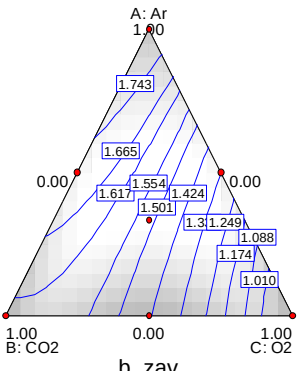
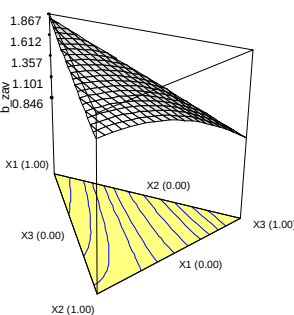
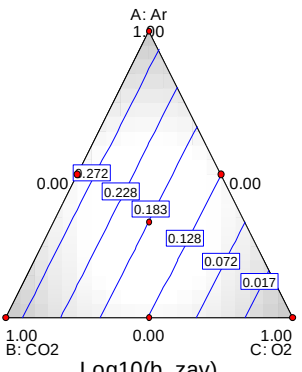
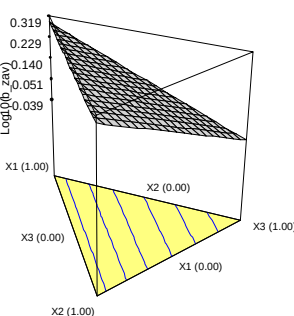
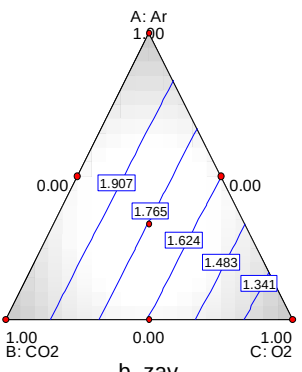
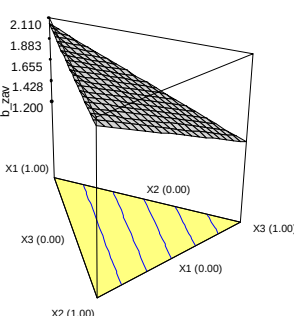
Osim vrste mješavine, na nadvišenje korijena utječe i priprema spoja. Ukoliko je razmak između limova stegnutih u napravu veći, dobije se veće nadvišenje korijena uz pojavu ulegnuća lica zavara.

5.3.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKA

5.3.1.1. Širina zavora

U **tablici 16.** prikazani su dobiveni matematički modeli širine zavora kod materijala 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60 (NAPOMENA: Programski paket DESIGN EXPERT ne dopušta korištenje indeksa u 2D i 3D grafičkom prikazu, $X1 \rightarrow x_1$, $X2 \rightarrow x_2$, $X3 \rightarrow x_3$, $CO_2 \rightarrow CO_2$, $O_2 \rightarrow O_2$). U **tablicama od 16 do 20** u stupcu koji prikazuje matematički model, deblje su otisnuti značajni članovi odzivne funkcije.

Tablica 16. Matematički modeli širine zavora b_{zav} .

R. br.	Mate-rijal	Model	2D prikaz	3D prikaz $X1=A=Ar$; $X2=B=CO_2$; $X3=C=O_2$
1	25 CrMo 4	Reducirani kvadratni "Prob>F" $=0,0078$ Prilagođeni R-kvadrat $=0,9442$ $b_{zav}=$ $+1.829 * Ar$ $+1.602 * CO_2$ $+0.846 * O_2$ $+0.826*CO_2*O_2$		
2	42 CrMo 4	Linearan "Prob>F" $=0,0001$ Prilagođeni R-kvadrat $=0,9958$ $Log10(b_{zav})=$ $+0.294*Ar$ $+0.291*CO_2$ $-0.039*O_2$		
3	Ck 60	Linearan "Prob>F" $=0,0049$ Prilagođeni R-kvadrat $=0,8947$ $b_{zav}=$ $+2.048* Ar$ $+2.036*CO_2$ $+1.200*O_2$		

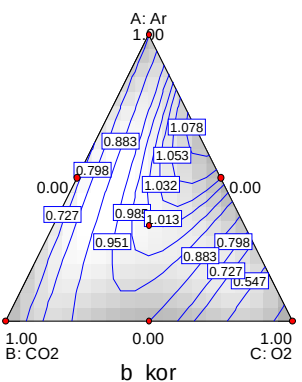
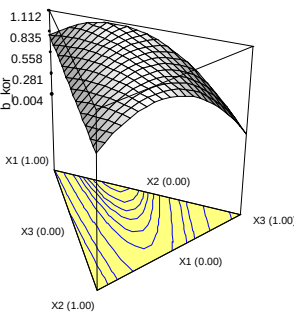
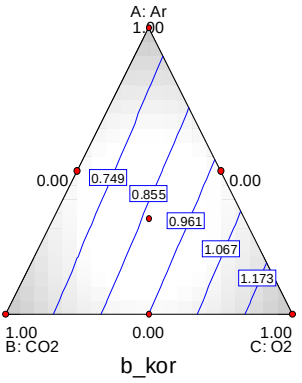
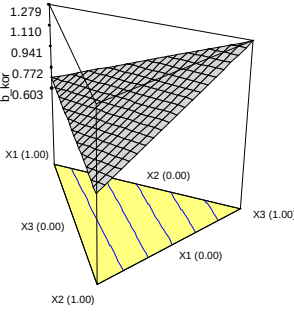
Kod materijala 42 CrMo 4 "Box-Cox" prikaz preporučio je logaritamsku transformaciju ulaznih podataka. Prilagođeni R-kvadrat blizu jedinice i analiza varijance modela, pokazuju da su modeli i linearni članovi modela Ar, CO₂ i O₂ značajani kod sva tri materijala. Kvadratni član CO₂*O₂ dodan kod materijala 25 CrMo 4 nije značajan, ali je njegovo dodavanje doprinjelo eliminaciji "Outliera" koji se pojavio u stanju pokusa 6 u slučaju linearnog modela.

Iz grafičkih prikaza može se zaključiti da je tendencija djelovanja mješavina na širinu zavora jednaka kod sva tri materijala. Modeli dobro opisuju utjecaj vrste mješavine na širinu zavarenog spoja. Iz grafičkih prikaza može se zaključiti da dodatak kisika argonu ima puno veći efekt na suženje zavora od dodatka CO₂.

5.3.1.2. Širina korijena

U **tablici 17.** prikazani su dobiveni matematički modeli širine korijena kod materijala 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60.

Tablica 17. Matematički modeli širine korijena *b_kor*.

R. br.	Mate-rijal	Model	2D prikaz	3D prikaz X1=A=Ar; X2=B=CO ₂ ; X3=C=O ₂
1	25 CrMo 4	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0060 Prilagođeni R-kvadrat=0,9909 $b_{kor} =$ $+0.792 \cdot Ar$ $+0.622 \cdot CO_2$ $+4.249E-003 \cdot O_2$ $+2.539 \cdot Ar \cdot O_2$ $+2.279 \cdot CO_2 \cdot O_2$		
2	42 CrMo 4	Linearan "Prob>F"=0,1264 Prilagođeni R-kvadrat=0,4667	-	-
3	Ck 60	Linearan "Prob>F"=0,0166 Prilagođeni R-kvadrat=0,8069 $b_{kor} =$ $+0.691 \cdot Ar$ $+0.643 \cdot CO_2$ $+1.279 \cdot O_2$		

Prilagođeni R-kvadrat blizu jedinice i analiza varijance modela, pokazuju da su linearan model i linearni članovi Ar, CO₂ i O₂ značajani kod materijala 25 CrMo 4.

Kod materijala 25 CrMo 4 pojavili su se "Outlieri" u stanjima pokusa 4, 5, 6 i 7. U stanju pokusa 5 dobivena je povećana Cook-ova udaljenost i vrijednost "Leverage" blizu jedinice, što znači da točka 5 jako utječe na model. Uzrok nastanka "Outliera" mogao bi biti utjecaj nejednakog razmaka između limova stegnutih u napravu ili smaknuće limova, čiji se nepredviđeni utjecaj pribraja utjecaju mješavina.

To je posebno vidljivo kod materijala 42 CrMo 4 kod kojeg niti model nije značajan, a prilagođeni R-kvadrat manji je od 0,75, što znači da se izmjerene vrijednosti ne mogu opisati pomoću modela.

Kod materijala Ck 60 dobiven je značajan reducirani kvadratni model, kod kojeg su osim linearnih značajni i kvadratni članovi Ar*O₂ i CO₂*O₂. "Outlier" se pojavio smo u stanju pokusa 4.

Kod svakog materijala dobiven je drukčiji model koji predviđa odziv širine korijena, što se također može objasniti postojanjem drugih utjecajnih faktora uz vrstu mješavine, jer nema drugog objašnjenja zašto bi kod svakog materijala bio drukčiji model.

Osim navedenog problematična je i točka 5, odnosno mješavina Ar/O₂ (82/18). U točki 5 kod materijala 25 CrMo 4 nije dobivena potpuna penetracija po cijeloj dužini zavora što znači da je širina korijena jednaka nuli. Kod materijala 42 CrMo 4 i Ck 60 na mjestima je dobivena potpuna penetracija. Kako je zavarivanje s mješavinom Ar/O₂ (82/18) nestabilno, niti širina dobivenog korijena nije jednolika. Tako kod materijala 25 CrMo 4, točka 5, gdje je širina korijena jednaka nuli, ima "Leverage" blizu 1 i jako utječe na model. Potpuno suprotno dogodilo se kod materijala Ck 60 gdje je u točki 5, na dijelu zavora s potpunom penetracijom dobiven najveći korijen.

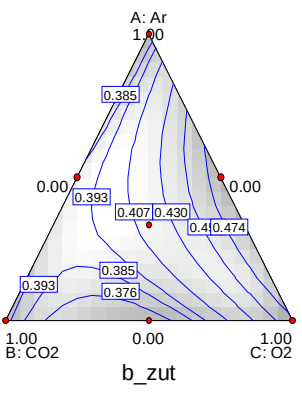
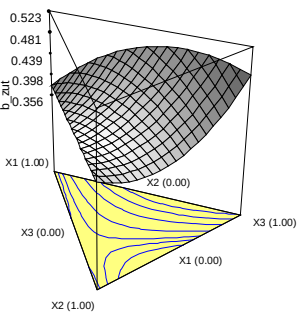
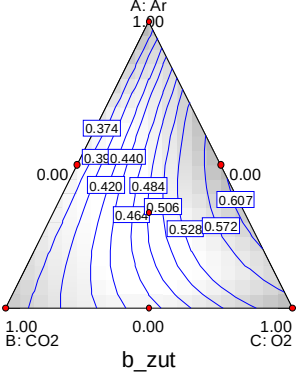
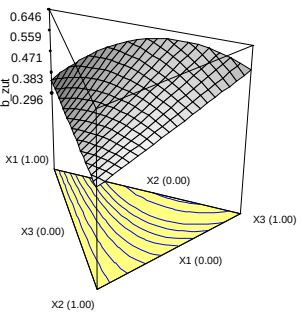
Iz grafičkih prikaza može se zaključiti da dodatak kisika argonu ima puno veći efekt na širinu korijena od dodatka CO₂. Kod materijala 25 CrMo 4, **tablici 17**, R.br. 1, kisik do određenog postotka utječe na povećanje širine korijena, a nakon toga povećana apsorpcija laserskog snopa na oblaku metalne pare uzrokuje smanjenje penetracije i širine korijena sve do vrijednosti jednake nuli. Kod materijala Ck 60, **tablica 17**, R.br. 3, mjestimice nije došlo do interakcije laserskog snopa i oblaka metalne pare, što je rezultiralo potpunom penetracijom i daljnjim povećanjem širine korijena s porastom kisika do maksimalne vrijednosti od 1,21 mm koja je dobivena s 18% kisika, odnosno u točki 5.

Točnijim stezanjem limova, mogli bi se izbjeći "Outlieri". Tada bi na mjestima sa širinom korijena jednakom nuli vrijedio reducirani kvadratni model dobiven kod materijala 25 CrMo 4, a na mjestima s potpunom penetracijom linearni model dobiven kod materijala Ck 60.

5.3.1.3. Širina ZUT-a

U **tablici 18.** prikazani su dobiveni matematički modeli širine ZUT-a kod materijala 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60.

Tablica 18. Matematički modeli širine ZUT-a b_{zut} .

R. br.	Mate-rijal	Model	2D prikaz	3D prikaz $X1=A=Ar$; $X2=B=CO_2$; $X3=C=O_2$
1	25 CrMo 4	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0136 Prilagođeni R-kvadrat=0,9795 $b_{zut} =$ $+0.376 \cdot Ar$ $+0.396 \cdot CO_2$ $+0.470 \cdot O_2$ $+0.259 \cdot Ar \cdot O_2$ $-0.261 \cdot CO_2 \cdot O_2$		
2	42 CrMo 4	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0239 Prilagođeni R-kvadrat=0,8820 $b_{zut} =$ $+0.352 \cdot Ar$ $+0.359 \cdot CO_2$ $+0.552 \cdot O_2$ $+0.589 \cdot Ar \cdot O_2$		
3	Ck 60	Linearan "Prob>F"=0,0966 Prilagođeni R-kvadrat=0,5339	-	-

Prilagođeni R-kvadrat blizu jedinice i analiza varijance modela, pokazuju da su reducirani kvadratni model, linearni članovi Ar, CO₂, O₂ i kvadratni članovi Ar*O₂ i CO₂*O₂ značajani kod materijala 25 CrMo 4. "Outlieri" se nisu pojavili. U stanju pokusa 5 dobivena je povećana Cook-ova udaljenost i vrijednost "Leverage" blizu jedinice.

Kod materijala 42 CrMo 4 dobiven je značajan reducirani kvadratni model, kod kojeg je osim linearnih značajan i kvadratni član Ar*O₂. U stanju 4 pojavila se povećana Cook-ova udaljenost.

Kod materijala Ck 60 model nije značajan, a prilagođeni R-kvadrat manji je od 0,75.

Iz grafičkih prikaza može se zaključiti da je tendencija djelovanja mješavina na širinu ZUT-a približno jednaka kod materijala 25 CrMo 4 i 42 CrMo 4, te da dodatak kisika argonu ima puno veći efekt na povećanje ZUT-a od dodatka CO₂. Razlika je samo u kvadratnom članu CO₂*O₂ koji se kod materijala 42 CrMo 4 nije pokazao značajnim.

5.3.1.4. Širina obojenja

U tablici 19. prikazani su dobiveni matematički modeli širine obojenja kod materijala 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60.

Tablica 19. Matematički modeli širine obojenja b_{ob} .

R. br.	Mate-rijal	Model	2D prikaz	3D prikaz $X1=A=Ar$; $X2=B=CO_2$; $X3=C=O_2$
1	25 CrMo 4	Kvadratni "Prob>F"=0,0037 Prilagođeni R-kvadrat=1,0000 $Log_{10}(b_{ob})=$ $+0.780*Ar$ $+0.754*CO_2$ $+0.589*O_2$ $-0.0790*Ar*CO_2$ $+0.401*Ar*O_2$ $+0.335*CO_2*O_2$		
2	42 CrMo 4	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0270 Prilagođeni R-kvadrat=0,9592 $b_{ob}=$ $+5.922*Ar$ $+5.722*CO_2$ $+5.028*O_2$ $+2.500*Ar*O_2$ $+2.100*CO_2*O_2$		
3	Ck 60	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0298 Prilagođeni R-kvadrat=0,9549 $b_{ob}=$ $+5.906*Ar$ $+5.906*CO_2$ $+4.396*O_2$ $+3.946*Ar*O_2$ $+3.146*CO_2*O_2$		

Kod materijala 25 CrMo 4 dobiven je značajan model sa svim linearnim i kvadratnim članovima. U stanjima pokusa 1, 3 i 5 pojavila velika Cook-ova udaljenost i "Leverage" vrijednost blizu jedinice.

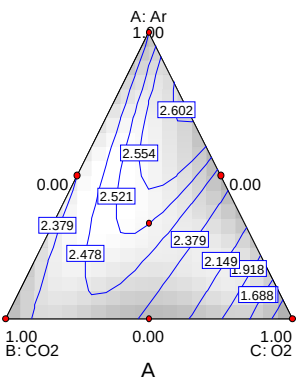
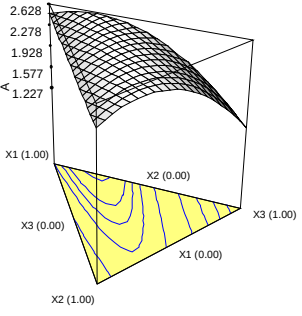
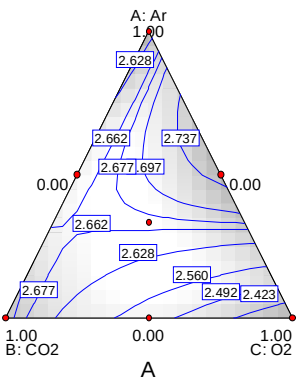
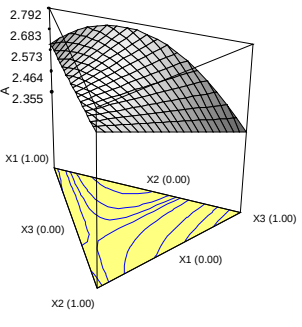
Kod materijala 42 CrMo 4 i Ck 60 također su dobiveni značajni modeli sa svim linearnim, ali sa dva kvadratna člana $Ar \cdot CO_2$ i $Ar \cdot O_2$. U stanju pokusa 5 pojavila velika Cook-ova udaljenost i "Leverage" vrijednost blizu jedinice.

Iz grafičkih prikaza može se zaključiti da je tendencija djelovanja mješavina na širinu obojenja jednaka kod sva tri materijala, a dodatak kisika argonu ima puno veći efekt na širinu obojenja od dodatka CO_2 . Kod sva tri materijala, **tablica 19**, kisik do određenog postotka utječe na povećanje širine obojenja, a nakon toga povećana apsorpcija laserskog snopa na oblaku metalne pare uzrokuje smanjenje penetracije pa tako i širine obojenja.

5.3.1.5. Površina poprečnog presjeka zavora

U **tablici 20**. prikazani su dobiveni matematički modeli površine poprečnog presjeka zavora kod materijala 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60.

Tablica 20. Matematički modeli površine poprečnog presjeka zavora A.

R. br.	Mate-rijal	Model	2D prikaz	3D prikaz $X1=A=Ar$; $X2=B=CO_2$; $X3=C=O_2$
1	25 CrMo 4	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0094 Prilagođeni R-kvadrat=0,9859 $A =$ $+2.474 \cdot Ar$ $+2.284 \cdot CO_2$ $+1.227 \cdot O_2$ $+2.407 \cdot Ar \cdot O_2$ $+2.347 \cdot CO_2 \cdot O_2$		
2	42 CrMo 4	Linearan "Prob>F"=0,1939 Prilagođeni R-kvadrat=0,3396	-	-
3	Ck 60	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0453 Prilagođeni R-kvadrat=0,8180 $A =$ $+2.611 \cdot Ar$ $+2.686 \cdot CO_2$ $+2.355 \cdot O_2$ $+1.070 \cdot Ar \cdot O_2$		

Kod materijala 25 CrMo 4 i Ck 60 dobiveni su značajni reducirani kvadratni modeli, sa značajnim linearnim članovima kod 25 CrMo 4. Razlikuju se po broju kvadratnih članova. Model kod 25 CrMo 4 ima dva značajna kvadratna člana $Ar \cdot O_2$ i $CO_2 \cdot O_2$, a model kod Ck 60 samo jedan značajan kvadratni član $Ar \cdot O_2$.

Velika Cook-ova udaljenost i "Leverage" vrijednost blizu jedinice, pojavila se u stanju pokusa 5 kod materijala 25 CrMo 4. Veliko odskakanje Cook-ove udaljenosti u stanju pokusa 4, pojavilo se kod materijala Ck 60. Kod materijala 42 CrMo 4 predloženi model nije značajan.

Iz grafičkih prikaza, **tablica 20**, može se zaključiti da je tendencija djelovanja mješavina na površinu poprečnog presjeka zavara približno jednaka kod materijala 25 CrMo 4 i Ck 60, a da dodatak kisika argonu ima puno veći efekt na površinu poprečnog presjeka zavara od dodatka CO_2 . Kisik do određenog postotka utječe na povećanje površine poprečnog presjeka zavara, a nakon toga povećana apsorpcija laserskog snopa na oblaku metalne pare uzrokuje smanjenje penetracije pa tako i površine poprečnog presjeka zavara.

5.3.1.6. Nadvišenje lica i korijena zavara

Analiza varijance pokazala je da modeli nadvišenja korijena zavara i nadvišenja lica zavara nisu značajni kod sva tri materijala. To znači da mješavina ne utječe na nadvišenje lica i korijena, odnosno da je za to značajnija priprema spoja i stezanje limova u napravu.

5.3.2. SVEUKUPNA ANALIZA REZULTATA GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKA

Može se zaključiti da mješavine imaju značajan utjecaj na geometrijske značajke zavarenog spoja. Uglavnom su dobiveni linearni modeli i reducirani kvadratni modeli s kvadratnim članovima $Ar \cdot O_2$ i $CO_2 \cdot O_2$. Komponenta CO_2 u linearnom modelu ima zanemariv utjecaj u odnosu na kisik, koji djeluje na smanjenje svih geometrijskih značajki, osim širine korijena gdje utječe na povećanje. U kvadratnom i reduciranom kvadratnom modelu, kisik do određenog postotka utječe na povećanje geometrijskih značajki, a nakon toga oslabljenje laserskog snopa na oblaku metalne pare uzrokuje smanjenje geometrijskih značajki.

Značajni linearni modeli s dobrom dijagnostikom dobiveni su samo kod širine zavarenog spoja, kod sva tri materijala. Kod ostalih geometrijskih značajki dijagnostika je najčešće upozorila na problem u stanjima pokusa 4 i 5. U stanju pokusa 5, mješavina Ar/O_2 (82/18) jako utječe na model kod svih geometrijskih značajki osim širine zavara. Stanje pokusa 5 zapravo je daleko od ostalih stanja pokusa jer je u njemu mjestimice dobivena nepotpuna penetracija i zavar puno manjih dimenzija, ali i tamo gdje je dobivena potpuna penetracija

zavar je puno manjih dimenzija od ostalih zavara u planu pokusa. U stanju pokusa 4, mješavina Ar/O₂ (91/9), jako utječe na model kod širine korijena, širine ZUT-a i površine poprečnog presjeka zavara, gdje je došlo do povećanja dimenzija u odnosu na ostala stanja pokusa i udaljavanja točke 4. U ostalim stanjima pokusa kod kojih se pojavila povećana Cook-ova udaljenost ili "Outlier", najvjerojatnije je došlo do greške pri mjerenju.

Tendencija djelovanja mješavina na pojedinu geometrijsku značajku približno je jednaka kod sva tri materijala. Jedina razlika pojavila se kod širine korijena gdje je kod svakog materijala dobiven drukčiji model. To se može objasniti postojanjem dodatnih utjecajnih faktora uz vrstu mješavine. U ovom slučaju to je najvjerojatnije vrlo mala razlika u razmaku između limova, nastala prilikom stezanja limova u napravu.

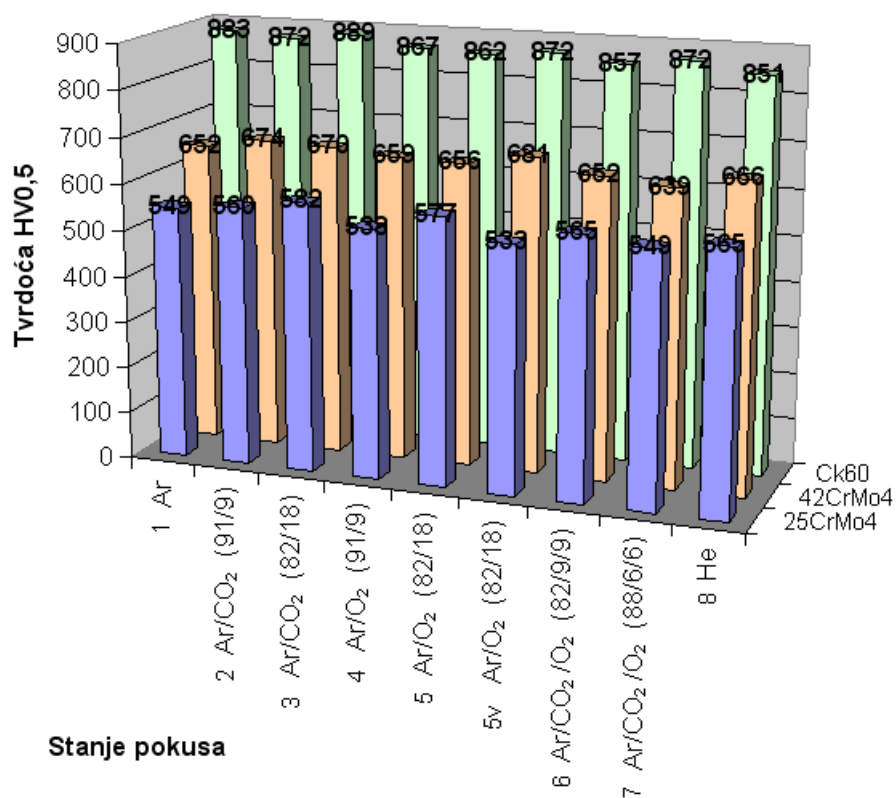
5.4. MJERENJE TVRDOĆE

Maksimalne izmjerene tvrdoće HV_{0,5} prikazane su u **tablici 21**.

Tablica 21. Maksimalne izmjerene tvrdoće HV_{0,5maks}.

Stanje pokusa	Mješavina	Materijal		
		25 CrMo 4	42 CrMo 4	Ck 60
1	Ar	549	652	883
2	Ar/CO ₂ (91/9)	560	674	872
3	Ar/CO ₂ (82/18)	582	670	889
4	Ar/O ₂ (91/9)	538	659	867
5	Ar/O ₂ (82/18)	577	656	862
5v	Ar/O ₂ (82/18)	533	681	872
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	565	652	857
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	549	639	872
8	He	565	666	851

Na **slici 58**, prikazane su maksimalne izmjerene tvrdoće kod sva tri materijala.



Slika 58. Maksimalne tvrdoće HV_{maks}.

Prosječna tvrdoća osnovnih materijala kod 25 CrMo 4 iznosi, 201 HV_{0,5}, kod 42 CrMo 4, 215 HV_{0,5} i kod Ck 60, 182 HV_{0,5}. Najmanje i najveće izmjerene maksimalne tvrdoće u stanjima pokusa od 1 do 7 kod sva tri materijala prikazane su u **tablici 22**. Razlika između najveće i najmanje maksimalne tvrdoće iznosi: 44 HV_{0,5} kod materijala 25 CrMo 4, 35 HV_{0,5} kod materijala 42 CrMo 4 i 32 HV_{0,5} kod materijala Ck 60. Za malo opterećenje kao što je HV_{0,5} te razlike nisu značajne.

Tablica 22. Najmanje i najveće izmjerene maksimalne tvrdoće HV_{0,5}, u stanjima pokusa od 1 do 7, (stanje pokusa).

	25 CrMo 4	Materijal 42 CrMo 4	Ck 60
Najmanja tvrdoća HV _{maks}	538 (4)	639 (7)	857 (6)
Najveća tvrdoća HV _{maks}	582 (3)	674 (2)	889 (3)

U stanju 5v zavarivano je uz veći unos energije, pa je brzina ohlađivanja zavara bila manja. Kod materijala 25 CrMo 4, **slika 58 a)** dobivena je maksimalna tvrdoća 533 HV_{0,5}, koja je samo za 5 HV_{0,5} manja od najmanje maksimalne tvrdoće izmjerene u stanju pokusa 4. Kod materijala 42 CrMo4, **slika 58 b)** dobivena je maksimalna tvrdoća 681 HV_{0,5}, koja je samo za 7 HV_{0,5} veća od najveće maksimalne tvrdoće izmjerene u stanju pokusa 2. Prema tome, u stanju pokusa 5v dobiveni su suprotni rezultati, koji zanemarivo izlaze iz intervala maksimalnih tvrdoća izmjerenih u stanjima pokusa od 1 do 7. Smanjenje brzine ohlađivanja očito nije bilo značajno, odnosno nije imalo utjecaja na maksimalnu tvrdoću u zavarenom spoju.

Usporedba izmjerenih maksimalnih tvrdoća kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem za sva tri materijala prikazana je u **tablici 23**.

Tablica 23. Usporedba izmjerenih maksimalnih tvrdoća HV_{0,5}, kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.

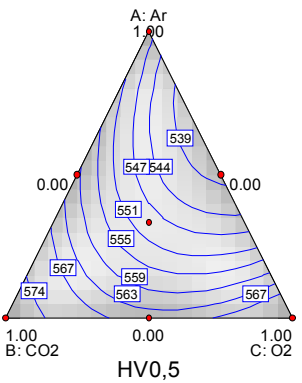
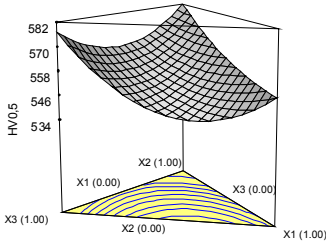
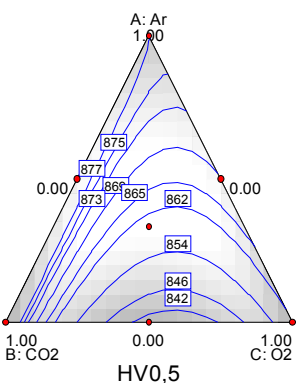
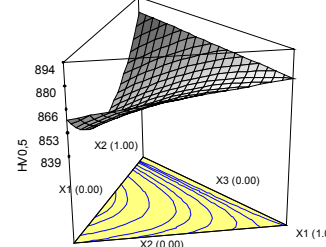
Zaštitni plin	25 CrMo 4	Materijal 42 CrMo 4	Ck 60
Argon	549	652	883
Helij	565	666	851

Kod materijala 25 CrMo 4, u zaštiti argonom, dobivena je veća tvrdoća za 16 HV_{0,5}, a kod materijala 42 CrMo4 za 14 HV_{0,5}. Kod materijala Ck 60, u zaštiti helijem, dobivena je manja tvrdoća za 32 HV_{0,5}. Razlika između tvrdoće u zaštiti argonom i helijem, je premala za donošenje zaključaka pri tako malom opterećenju kao što je HV_{0,5}.

5.4.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA MAKSIMALNE TVRDOĆE

U **tablici 24.** prikazani su dobiveni matematički modeli maksimalne tvrdoće kod materijala 25 CrMo 4 i Ck 60.

Tablica 24. Matematički modeli maksimalne tvrdoće zavarenog spoja HV0,5.

R. br.	Mate-rijal	Model	2D prikaz	3D prikaz X1=A=Ar; X2=B=CO ₂ ; X3=C=O ₂
1	25 CrMo 4	Kvadratni "Prob>F"=0,0114 Prilagođeni R-kvadrat=0,9997 HV0,5= +549*Ar +582*CO ₂ +577*O ₂ -22*Ar*CO ₂ -100*Ar*O ₂ -58*CO ₂ *O ₂		
2	42 CrMo 4	Linearan "Prob>F"=0,5926 Prilagođeni R-kvadrat=0,2302	-	-
3	Ck 60	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0467 Prilagođeni R-kvadrat=0,8141 HV0,5= +877*Ar +884*CO ₂ +861*O ₂ -131*CO ₂ *O ₂		

Kod materijala 25 CrMo 4 dobiven je značajan kvadratni model sa svim linearnim i kvadratnim članovima, ali se u stanjima pokusa 1, 3 i 5 pojavila velika Cook-ova udaljenost i "Leverage" vrijednost blizu jedinice. Kod materijala 42 CrMo 4 predloženi model nije značajan. Kod materijala Ck 60 dobiven je značajan reducirani kvadratni model, međutim linearni članovi modela nisu značajni, dok je značajan samo kvadratni član CO₂*O₂. Također je dobiveno vrlo veliko odskakanje Cook-ove udaljenosti u stanju pokusa 3.

Iz grafičkih prikaza, **tablica 24**, može se zaključiti da je tendencija djelovanja mješavina na maksimalnu tvrdoću u zavarenom spoju različita kod materijala 25 CrMo 4 i Ck 60, a dodatak kisika argonu ima veći efekt na maksimalnu tvrdoću od dodatka CO₂. Također je značajno djelovanje kvadratnog člana CO₂*O₂, kod oba materijala.

5.4.2. ANALIZA REZULTATA

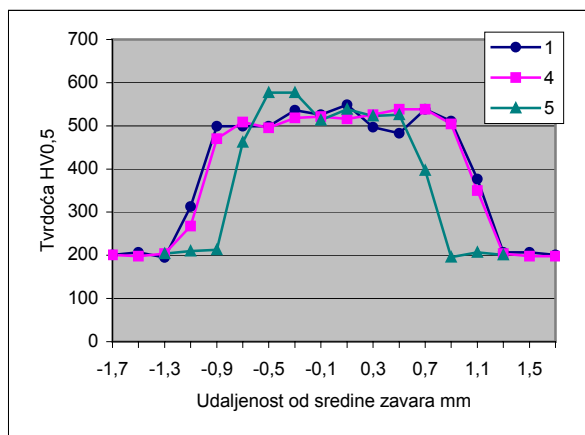
Kod materijala 25 CrMo 4 dodatak aktivnih komponenti prvo djeluje na smanjenje, a kasnije s povećanjem udjela aktivnih komponenti dolazi do porasta maksimalne tvrdoće, u odnosu na čisti argon. Zajedničko djelovanje kisika i CO₂ u kvadratnom članu, snižava maksimalnu tvrdoću u odnosu na dodatak samo kisika ili samo CO₂.

Kod materijala Ck 60 došlo je do pada maksimalne tvrdoće s dodatkom kisika. Dodatak samog CO₂ ne utječe na promjenu maksimalne tvrdoće. Zajedničko djelovanje kisika i CO₂ u kvadratnom članu, dodatno je snizilo maksimalnu tvrdoću u odnosu na dodatak samo kisika.

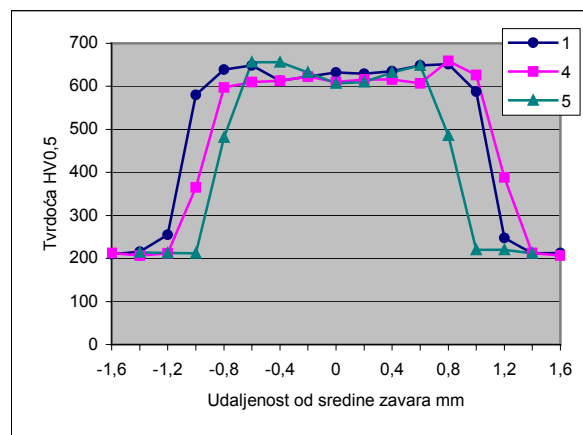
Razlike između najmanje i najveće izmjerene maksimalne tvrdoće kod sva tri materijala su male, **tablica 22.**, a matematički modeli kod svakog materijala pokazuju suprotnu tendenciju djelovanja mješavina na maksimalnu tvrdoću. Stoga se može zaključiti da srednja vrijednost najbolje predviđa odziv kod sva tri materijala. Srednja vrijednost tvrdoće dobivena kod 25 CrMo 4 iznosi 560 HV_{0,5}, kod 42 CrMo 4 iznosi 657 HV_{0,5} i kod Ck 60 iznosi 867 HV_{0,5}. Vrsta mješavine ne utječe značajno na maksimalnu tvrdoću zavarenog spoja.

5.4.2.1. Profili tvrdoća

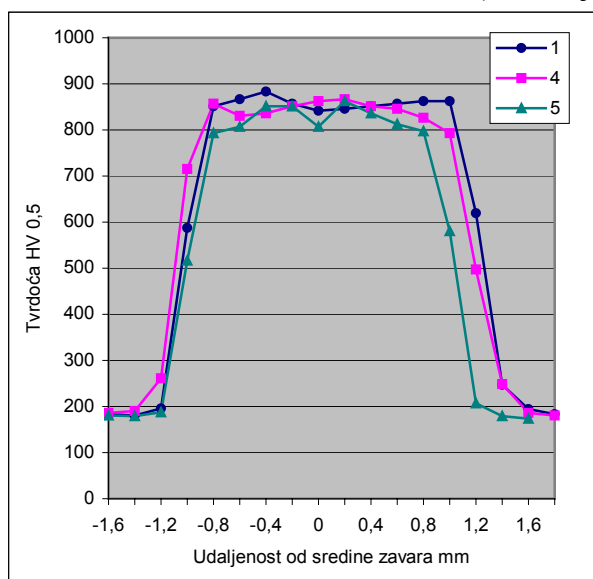
Za prikaz profila tvrdoća izabrana su stanja pokusa 1, 4 i 5, **slika 59**. U stanju pokusa 1 koristi se referentni plin argon. U stanju 4 koristi se mješavina Ar/CO₂ (91/9), kod koje su dobivene najveće geometrijske karakteristike zavarenog spoja, što znači da je u stanju 4 postojao najveći unos energije. U stanju 5 koristi se mješavina Ar/CO₂ (82/18), kod koje su dobivene najmanje geometrijske karakteristike zavarenog spoja, što znači da je u stanju 5 postojao najmanji unos energije, odnosno stanja pokusa 4 i 5 su stanja s najvećim i najmanjim unosom energije.



a) materijal 25 CrMo 4



b) materijal 42 CrMo 4



c) materijal Ck 60

Slika 59. Profili tvrdoća u stanjima pokusa 1-Ar (100), 4-Ar/CO₂ (91/9) i 5-Ar/CO₂ (82/18).

Iz profila tvrdoća prikazanih **slikom 59**, vidi se da je maksimalna tvrdoća izmjerena kod nekih uzoraka u metalu zavora, a kod nekih u ZUT-u u blizini linije staljivanja. To ovisi o pojavi udjela zaostalog austenita u strukturi [57]. Smanjenjem unešene energije smanjuju se geometrijske karakteristike zavarenog spoja, pa tako i širina profila tvrdoća.

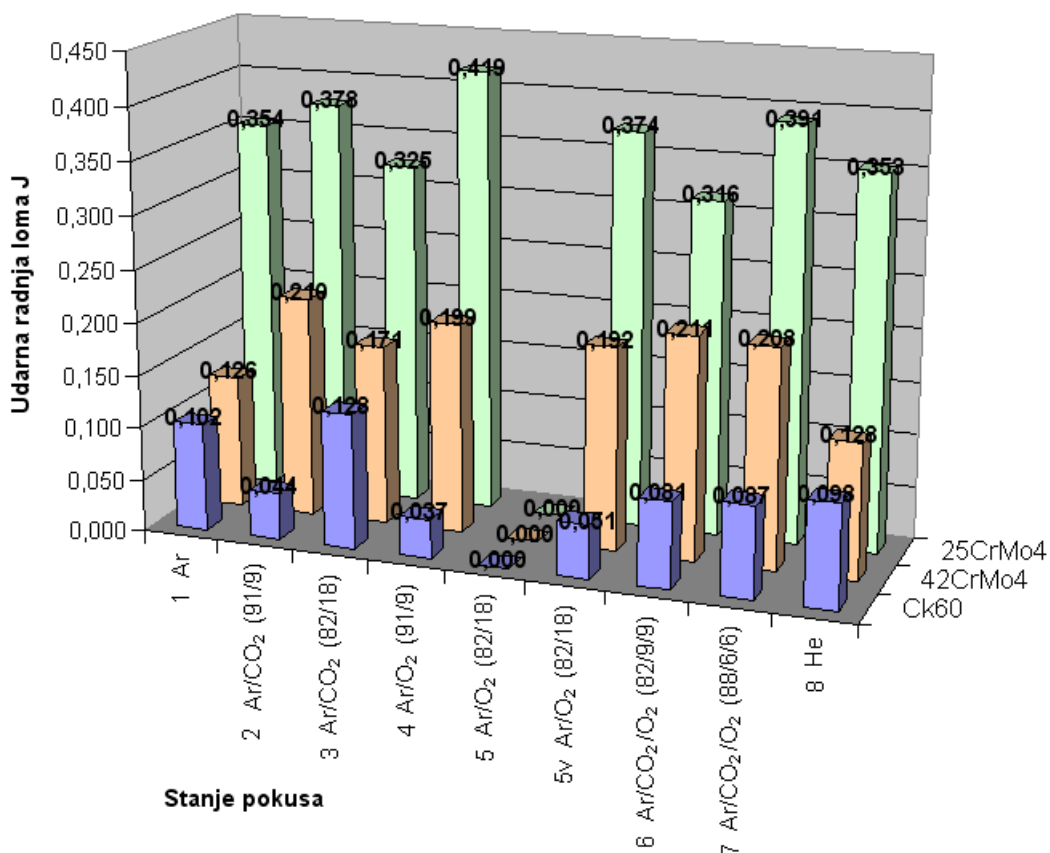
5.5. ODREĐIVANJE UDARNE RADNJE LOMA CHARPYJEVOM METODOM

Izmjerene vrijednosti udarne radnje loma na Charpyjevom batu prikazane su u **tablici 25**. Rezultati su prikazani kao srednja vrijednost od pet izvođenja ispitivanja.

Tablica 25. Udarne radnje loma metala zavara dobivena Charpyjevom metodom, J.

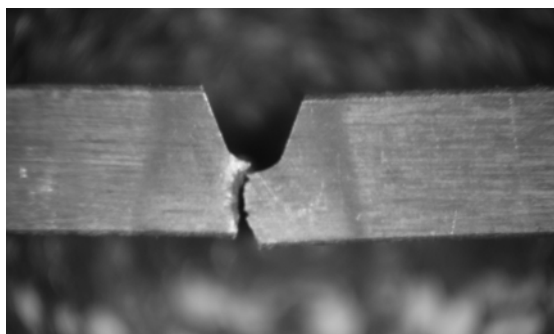
Stanje pokusa	Mješavina	Materijal		
		25 Cr Mo 4	42 CrMo 4	Ck 60
1	Ar	0,354	0,126	0,102
2	Ar/CO ₂ (91/9)	0,378	0,210	0,044
3	Ar/CO ₂ (82/18)	0,325	0,171	0,128
4	Ar/O ₂ (91/9)	0,419	0,199	0,037
5	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-
5v	Ar/O ₂ (82/18)	0,374	0,192	0,051
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	0,316	0,211	0,081
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	0,391	0,208	0,087
8	He	0,353	0,128	0,098

Na **slici 60**, prikazane su udarne radnje loma kod sva tri materijala.

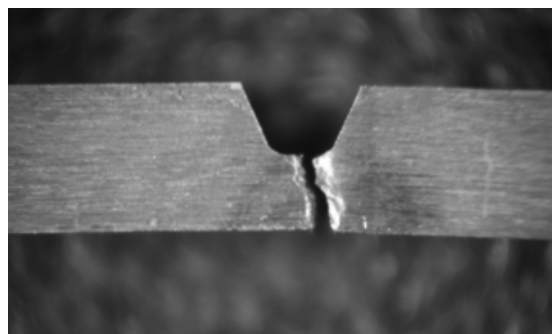


Slika 60. Udarne radnje loma dobivene Charpyjevom metodom.

Lom je uglavnom prošao kroz sredinu zavora, **slika 61 a)**. Na pojedinim uzorcima utor nije bio pozicioniran točno u sredinu zavora, **slika 61 b)**, jer je to dosta teško postići. Na tim uzorcima lom je također prošao kroz metal zavora i to putem od vrha utora prema sredini zavora. Rezultati u drugom slučaju neznatno se razlikuju pa su i oni uzeti za proračun srednje vrijednosti udarne radnje loma.



a) prolaz loma kroz sredinu metala zavora.



b) prolaz loma kroz metal zavora – od ruba prema sredini.

Slika 61. Prolaz loma kroz metal zavora pri ispitivanju udarne radnje loma Charpyjevom metodom.

U osnovnom materijalu izmjerene su slijedeće udarne radnje loma: 25 CrMo 4, 0,633 J; 42 CrMo 4, 0,588 J; Ck 60, 1,357 J. Kod materijala Ck 60 dobivena je veća vrijednost zbog manje dubine utora na epruveti, poglavlje 4.6.5.

Najmanje i najveće izmjerene udarne radnje loma metala zavora u stanjima pokusa od 1 do 7 kod sva tri materijala prikazane su u **tablici 26**. Razlika između najveće i najmanje udarne radnje loma iznosi: 0,103 J kod materijala 25 CrMo 4, 0,085 J kod materijala 42 CrMo 4 i 0,091 J kod materijala Ck 60.

Tablica 26. Najmanje i najveće izmjerene udarne radnje loma J, dobivene Charpyjevom metodom u stanjima pokusa od 1 do 7, (stanje pokusa).

	Materijal		
	25 CrMo 4	42 CrMo 4	Ck 60
Najmanja udarna radnja loma J	0,316 (6)	0,126 (1)	0,037 (4)
Najveća udarna radnja loma J	0,419 (4)	0,211 (6)	0,128 (3)

Iz dobivenih rezultata, **tablica 26.**, ne može se utvrditi povezanost najmanje i najveće udarne radnje loma sa stanjem pokusa odnosno plinskom mješavinom. U stanju pokusa 5 nije postignuta potpuna penetracija po cijeloj dužini zavora, pa je ispitivanje provedeno na uzorcima zavarenim u stanju pokusa 5v s manjom brzinom zavarivanja odnosno većom unesenom energijom. Veći unos energije općenito utječe na promjenu strukture i mehaničkih

svojstava. U ovom istraživanju promatra se utjecaj vrste mješavine na mehanička svojstva zavarenog spoja, a prethodno se pokazalo da kod laserskog zavarivanja promjena brzine zavarivanja u intervalu u kojem se postiže potpuna penetracija, ne utječe značajno na promjenu mikrostrukture i tvrdoće zavarenog spoja [64]. Kod svih ispitivanja u ovom istraživanju, mehanička svojstva osim tvrdoće, promatrana su u stanju 5v.

Usporedba izmjerenih udarnih radnji loma kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem za sva tri materijala prikazana je u **tablici 27**. Rezultati pokazuju da razlika između udarne radnje loma u zaštiti argonom i helijem praktički ne postoji.

Tablica 27. Usporedba izmjerenih udarnih radnji loma J, dobivenih Charpyjevom metodom kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.

Zaštitni plin	Materijal		
	25 CrMo 4	42 CrMo 4	Ck 60
Argon	0,354	0,126	0,102
Helij	0,353	0,128	0,098

5.5.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA UDARNE RADNJE LOMA DOBIVENE CHARPYJEVOM METODOM

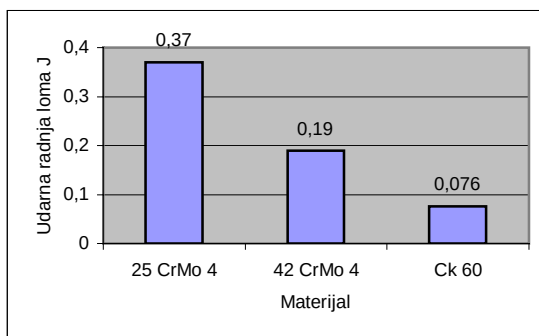
Kod materijala 25 CrMo 4 vrijednost "Prob>F" iznosi 0,3809, a prilagođeni R-kvadrat 0,0742. Srednja vrijednost udarne radnje loma iznosi 0,37 J.

Kod materijala 42 CrMo 4 vrijednost "Prob>F" iznosi 0,4345, a prilagođeni R-kvadrat 0,0113. Srednja vrijednost udarne radnje loma iznosi 0,19 J.

Kod materijala Ck 60 vrijednost "Prob>F" iznosi 0,3698, a prilagođeni R-kvadrat 0,0879. Srednja vrijednost udarne radnje loma od 0,076 J.

Analiza varijance pokazala je da linearni modeli udarne radnje loma nisu značajni kod sva tri materijala, odnosno da srednja vrijednost bolje predviđa odziv od linearnog modela.

Na **slici 62**, prikazane su srednje vrijednosti udarne radnje loma dobivene kod sva tri materijala. S porastom sadržaja ugljika u čeliku vrijednost udarne radnje loma metala zavara opada.



Slika 62. Srednja vrijednost udarne radnje loma pri ispitivanju metala zavara Charpyjevom metodom.

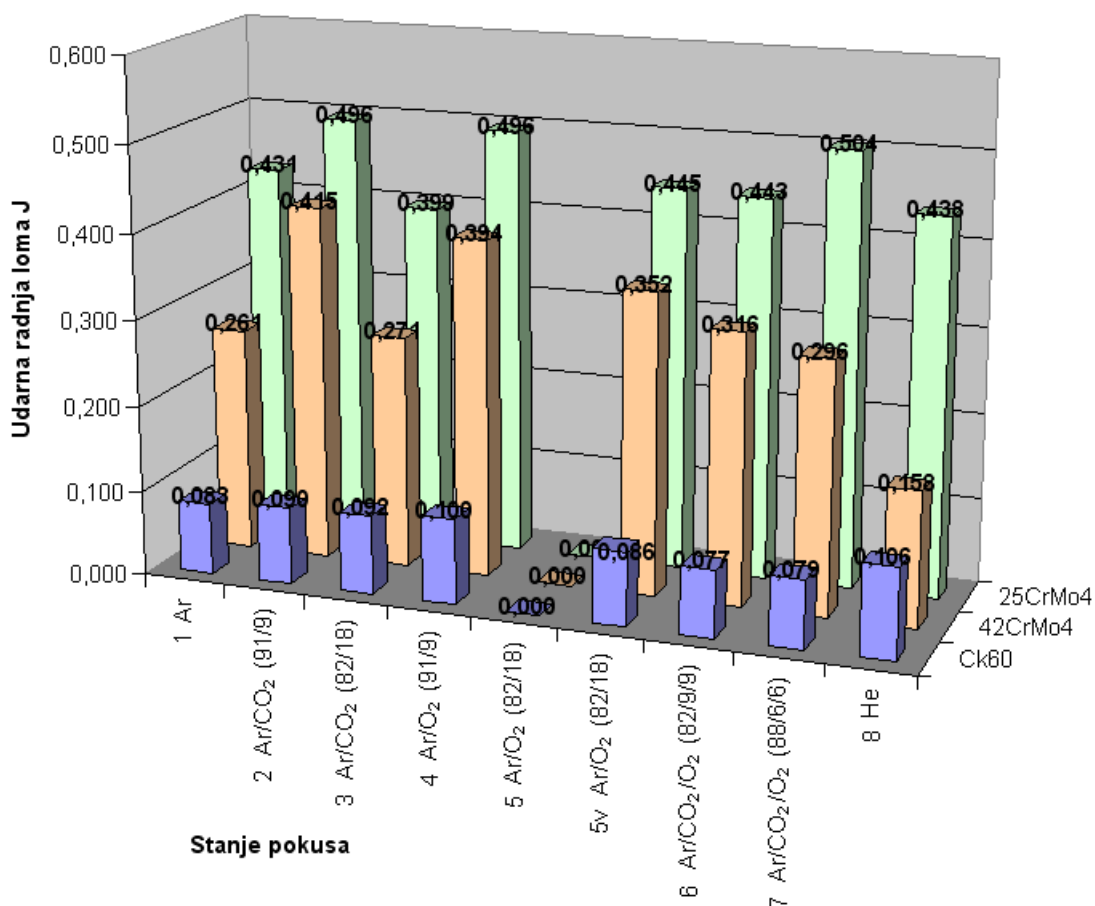
5.6. ODREĐIVANJE UDARNE RADNJE LOMA ZGAGINOM METODOM

Izmjerene vrijednosti žilavosti Zgaginom metodom, prikazane su u **tablici 28**. Rezultati su prikazani kao srednja vrijednost od pet izvođenja ispitivanja.

Tablica 28. Udarne radnje loma metala zavara dobivena Zgaginom metodom, J.

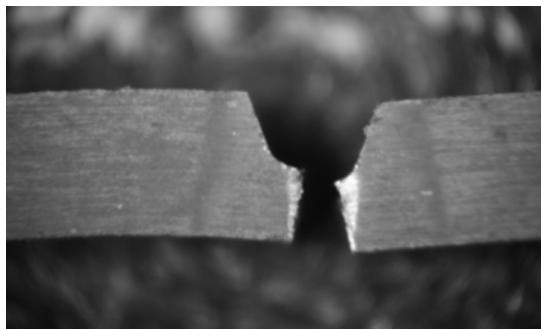
Stanje pokusa	Mješavina	Materijal		
		25 Cr Mo 4	42 CrMo 4	Ck 60
1	Ar	0,431	0,261	0,083
2	Ar/CO ₂ (91/9)	0,496	0,415	0,090
3	Ar/CO ₂ (82/18)	0,399	0,271	0,092
4	Ar/O ₂ (91/9)	0,496	0,394	0,100
5	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-
5v	Ar/O ₂ (82/18)	0,445	0,352	0,086
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	0,443	0,316	0,077
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	0,504	0,296	0,079
8	He	0,438	0,158	0,106

Na **slici 63**, prikazane su udarne radnje loma metala zavara kod sva tri materijala.

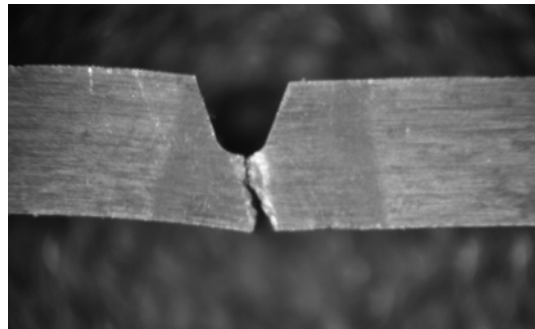


Slika 63. Udarne radnje loma dobivene Zgaginom metodom.

Lom je uglavnom prošao kroz sredinu zavora, **slika 64 a)**. Na pojedinim uzorcima utor nije bio pozicioniran točno u sredinu zavora, **slika 64 b)**, jer je to dosta teško postići. Na tim uzorcima lom je također prošao kroz metal zavora i to putem od vrha utora prema sredini zavora. Rezultati u drugom slučaju neznatno se razlikuju pa su i oni uzeti za proračun srednje vrijednosti udarne radnje loma.



a) prolaz loma kroz sredinu metala zavora.



b) prolaz loma kroz metal zavora – od ruba prema sredini.

Slika 64. Prolaz loma kroz metal zavora pri ispitivanju udarne radnje loma Zgaginom metodom.

Žilavost osnovnih materijala nije bilo moguće ispitati pomoću Zgagine metode, jer je veća od maksimalne koju se može ispitati. Prilikom ispitivanja s kuglom promjera 40 mm nije došlo do loma epruveta od osnovnog materijala.

Najmanje i najveće izmjerene udarne radnje loma u stanjima pokusa od 1 do 7 kod sva tri materijala prikazane su u **tablici 29**. Razlika između najveće i najmanje udarne radnje loma iznosi: 0,105 J kod materijala 25 CrMo 4, 0,154 J kod materijala 42 CrMo 4 i 0,023 J kod materijala Ck 60.

Tablica 29. Najmanje i najveće izmjerene udarne radnje loma J, dobivene Zgaginom metodom u stanjima pokusa od 1 do 7, (stanje pokusa).

	Materijal		
	25 CrMo 4	42 CrMo 4	Ck 60
Najmanja udarna radnja loma J	0,399 (3)	0,261 (1)	0,077 (6)
Najveća udarna radnja loma J	0,504 (7)	0,415 (2)	0,010 (4)

Iz dobivenih rezultata, **tablica 29.**, ne može se utvrditi povezanost najmanje i najveće udarne radnje loma sa stanjem pokusa odnosno plinskom mješavinom. U stanju pokusa 5 nije postignuta potpuna penetracija po cijeloj dužini zavora, pa je ispitivanje provedeno na uzorcima zavarenim u stanju pokusa 5v.

Usporedba izmjerenih udarnih radnji loma kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem za sva tri materijala prikazana je u **tablici 30**. Rezultati pokazuju da razlika između udarne radnje loma u zaštiti argonom i helijem postoji kod materijala 42 CrMo 4 i Ck 60.

Tablica 30. Usporedba izmjerenih udarnih radnji loma J, dobivenih Zgaginom metodom kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.

Zaštitni plin	Materijal		
	25 CrMo 4	42 CrMo 4	Ck 60
Argon	0,431	0,261	0,083
Helij	0,438	0,158	0,106

5.6.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA UDARNE RADNJE LOMA DOBIVENE ZGAGINOM METODOM

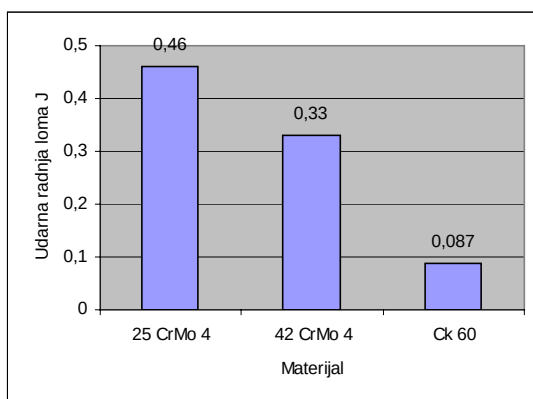
Kod materijala 25 CrMo 4 vrijednost "Prob>F" iznosi 0,7086, a R-kvadrat 0,1582. Srednja vrijednost udarne radnje loma iznosi 0,46 J.

Kod materijala 42 CrMo 4 vrijednost "Prob>F" iznosi 0,8210, a R-kvadrat 0,0939. Srednja vrijednost udarne radnje loma iznosi 0,33 J.

Kod materijala Ck 60 vrijednost "Prob>F" iznosi 0,9731, a R-kvadrat 0,0136. Srednja vrijednost udarne radnje loma od 0,087 J.

Analiza varijance pokazala je da linearni modeli udarne radnje loma nisu značajni kod sva tri materijala, odnosno da srednja vrijednost bolje predviđa odziv od linearnog modela.

Na **slici 65**, prikazane su srednje vrijednosti udarne radnje loma dobivene kod sva tri materijala. S porastom sadržaja ugljika u čeliku vrijednost udarne radnje loma metala zavara opada.



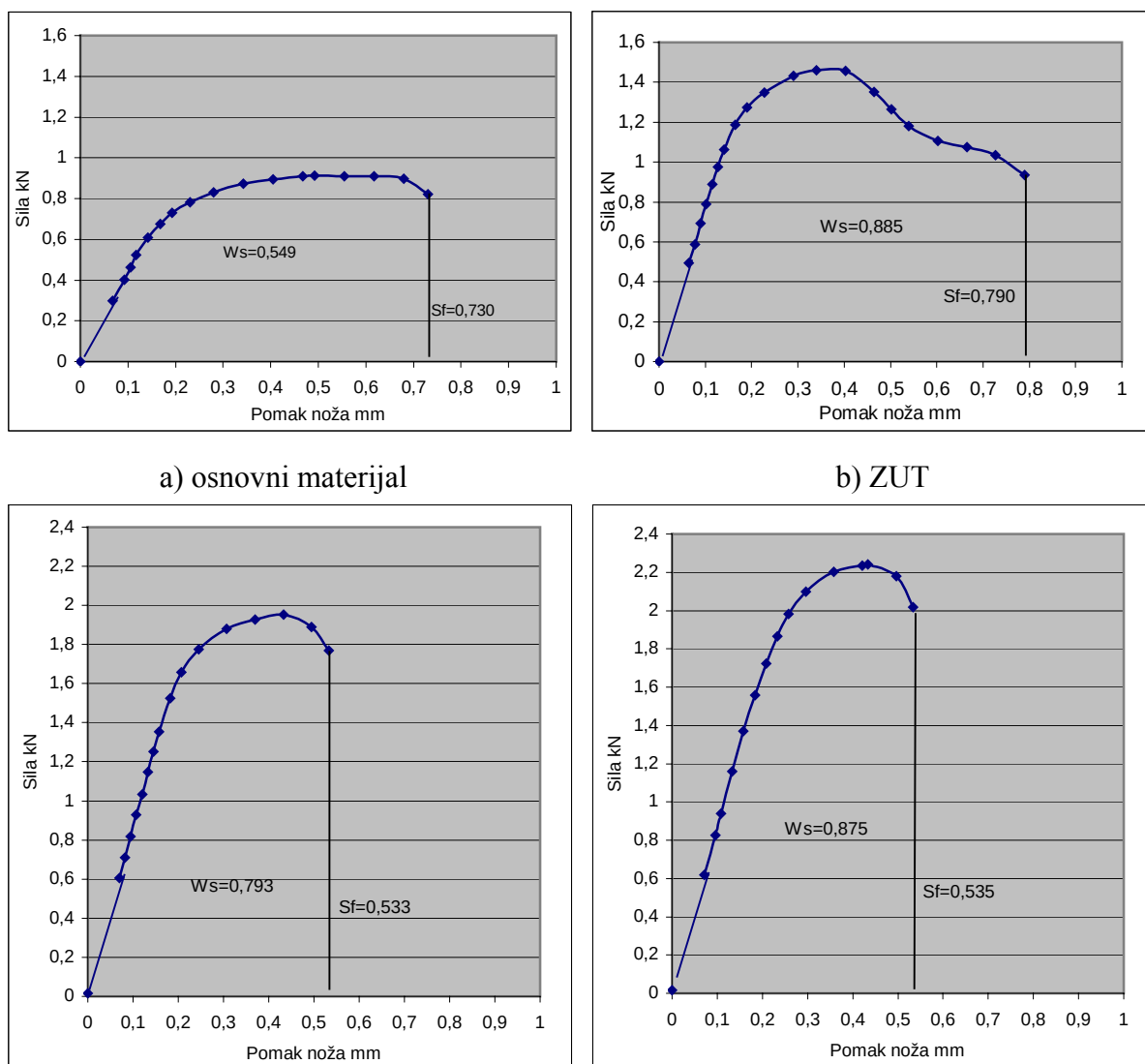
Slika 65. Srednja vrijednost udarne radnje loma pri ispitivanju metala zavara Zgaginom metodom.

Usporedba **slike 62**, Charpyjeva metoda, i **slike 65**, Zgagina metoda, pokazuje istu tendenciju opadanja udarne radnje loma s povećanjem sadržaja ugljika. Oblik epruvete bio je jednak kod obje metode. Vrijednosti dobivene jednom i drugom metodom približno su jednake samo kod materijala Ck 60.

5.7. ODREĐIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTAVA MIKROSMIČNOM METODOM

Istraživanje mikrosmične čvrstoće provedeno je na TU Berlin. Uređaj za ispitivanje bio je opremljen noževima od čelika 42 CrMo 4, koji su pri istraživanju istog materijala puknuli. Kako tvrđi noževi nisu bili dostupni, ispitivanja su provedena samo na mekšem materijalu odnosno na čeliku 25 CrMo 4.

Na **slici 66**, prikazani su rezultati mikrosmičnog ispitivanja po zonama zavarenog spoja u obliku dijagrama sila-put noža. Oni predstavljaju ishodište za određivanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Zbog malih dimenzija i specifičnog oblika zavarenog spoja koji je proširen u gornjem dijelu, zavareni spoj se sastoji od četiri zone. To su: osnovni materijal, čisti ZUT, prijelazna zona kod koje je u gornjem dijelu metal zavara ispod kojeg se nalazi ZUT, te čisti metal zavara, **slike 36 i 66**.

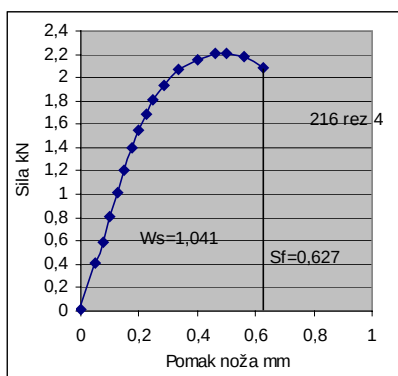


c) prijelaz – iznad metal zavara, ispod ZUT

d) metal zavara

Slika 66. Karakteristične krivulje sila-pomak noža, 1 Ar (100).

Kako su svojstva zavarenog spoja simetrična s obzirom na sredinu zavora, dovoljno je provesti ispitivanje samo s jedne strane pa do sredine zavora. Zbog sigurnosti ispitivanje je provođeno preko sredine zavora do kraja metala zavora s nekoliko rezova u prijelaznoj zoni metal zavora - ZUT s druge strane sredine. Iza sredine zavora pouzdanost rezultata je upitna, jer su još u području metala zavora dobivene visoke vrijednosti plastičnosti i žilavosti. To je posljedica velike razlike u čvrstoći između metala zavora i osnovnog materijala. Iza sredine zavora proces rezanja nije stabilan, **slika 12 a**), jer dolazi do čupanja metala zavora iz osnovnog materijala što daje veće vrijednosti plastičnosti i žilavosti, dok su izmjerene vrijednosti čvrstoće u redu **slika 67**.



Slika 67. Krivulja sila-pomak noža iza sredine zavora.

Maksimalnu mikrosmičnu čvrstoću τ_m N/mm² odredio je programski paket povezan sa kidalicom, a nalazi se tamo gdje je najveća vrijednost sile, **slika 66**. Vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm² izračunata je pomoću formule (2.1). Prema literaturi [104, 105] odstupanje od stvarne vlačne čvrstoće trebalo bi iznositi samo 2%.

Mikrosmična plastičnost α % je ekvivalent kontrakciji kod statičkog vlačnog pokusa odnosno definira deformabilnost zavarenog spoja. Izračunata je iz puta S_f koji nož prewali do početka loma, **slika 66**. Put S_f podijeljen je sa širinom epruvete B i pomnožen sa 100.

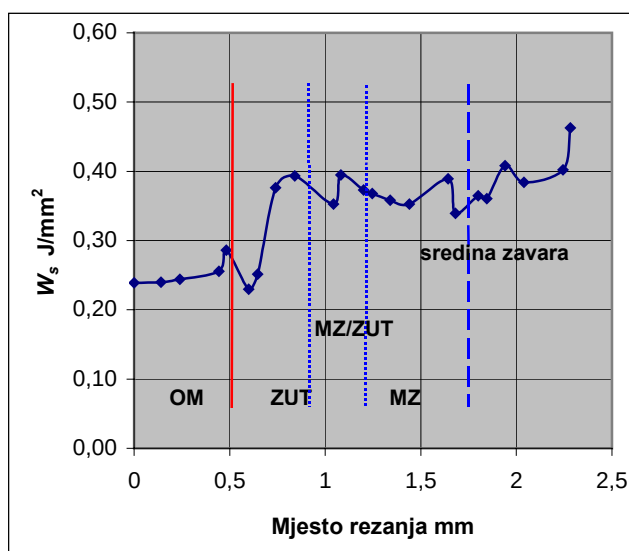
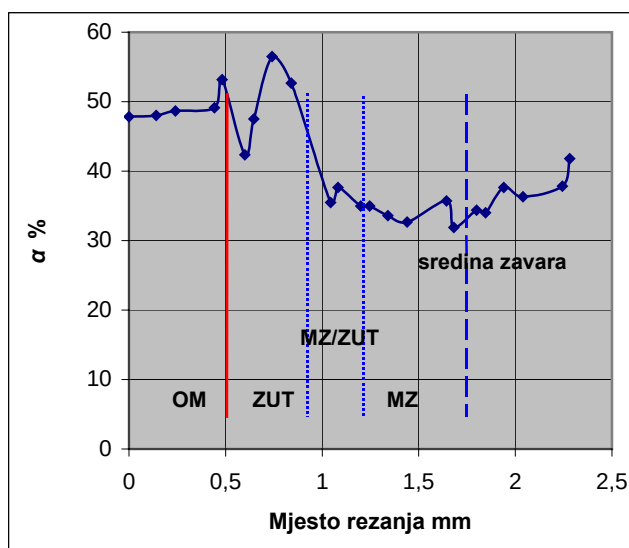
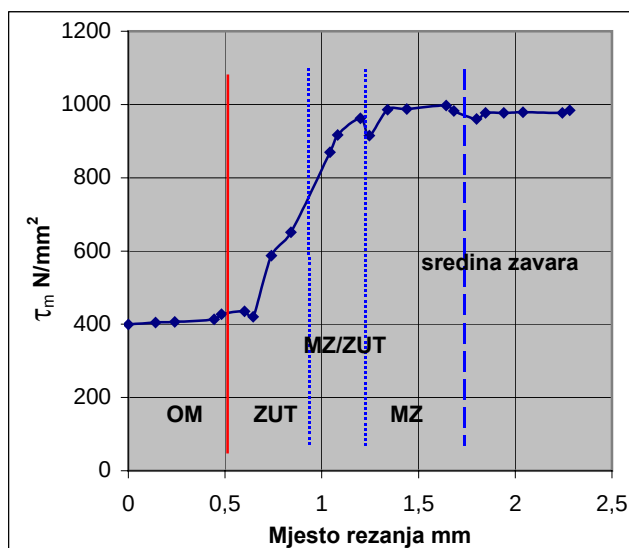
Mikrosmična žilavost W_s J/mm², predstavlja površinu ispod krivulje sila – put noža do početka loma, **slika 66**. Dobivena je mjerenjem površine nastale prilikom svakog reza i podijeljena je s površinom poprečnog presjeka epruvete 2,25 mm².

Put noža do početka loma S_f određen je grafički. Početak loma definira jedan segment nakon pada sile, **slika 66**. To nije jako precizan način određivanja, ali za usporedbu djelovanja plinskih mješavina na mehanička svojstva zavora i ovaj način zadovoljava. Za preciznije određivanje početka loma može se mjeriti površina loma na mikroskopu ili koristiti još preciznija akustička metoda [109], ali one nisu bile dostupne.

Sveukupni rezultati mikrosmičnog ispitivanja prikazani su **tablicama 31 do 38** i **slikama 68 do 75**.

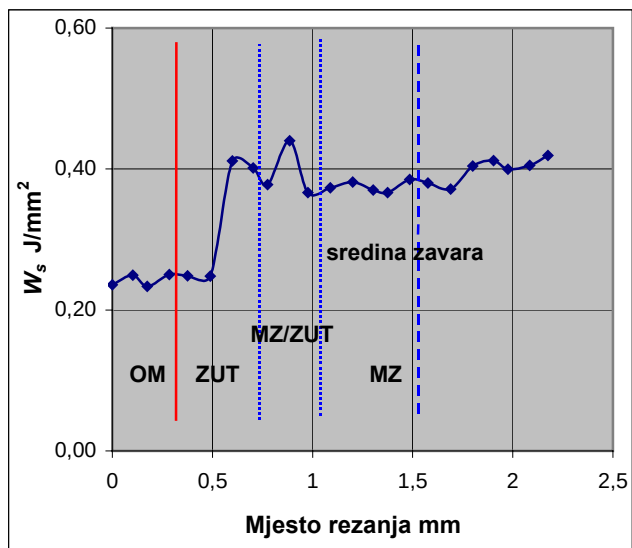
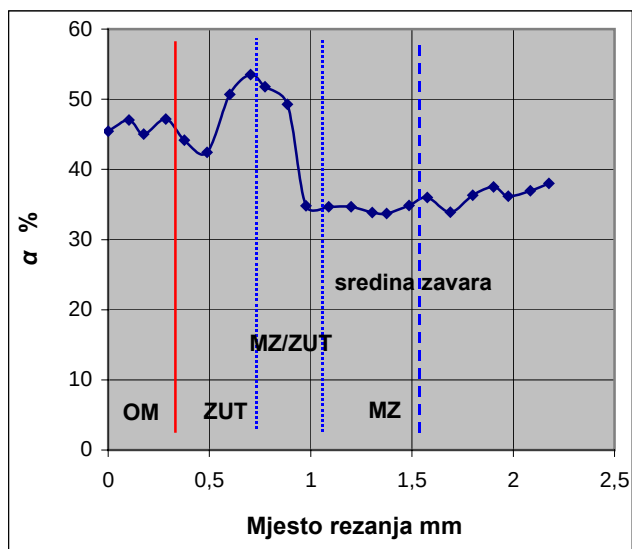
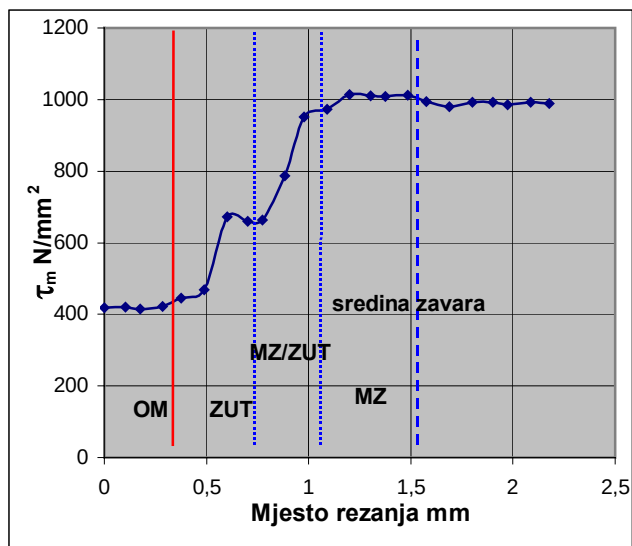
Tablica 31. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 1 Ar (100).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	399	48	0,24	562
2	0,14	404	48	0,24	573
3	0,24	406	49	0,24	577
4	0,443	413	49	0,26	593
5	0,482	428	53	0,29	624
6	0,6	435	42	0,23	640
7	0,646	421	48	0,25	608
8	0,74	587	57	0,38	972
9	0,84	652	53	0,39	1112
10	1,043	870	36	0,35	1588
11	1,082	916	38	0,39	1689
12	1,2	963	35	0,37	1790
13	1,246	915	35	0,37	1686
14	1,34	986	34	0,36	1842
15	1,44	988	33	0,35	1845
16	1,643	997	36	0,39	1865
17	1,682	983	32	0,34	1834
18	1,8	961	34	0,36	1786
19	1,846	977	34	0,36	1822
20	1,94	977	38	0,41	1822
21	2,04	979	36	0,38	1826
22	2,243	977	38	0,40	1822
23	2,282	984	42	0,46	1838

**Slika 68.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja - 1 Ar (100).

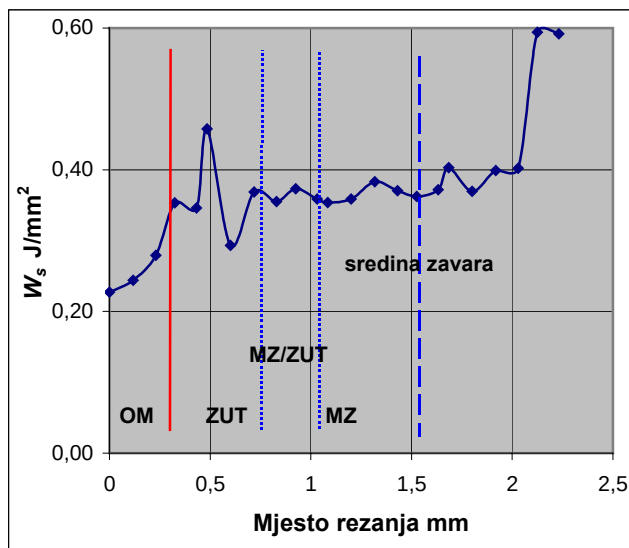
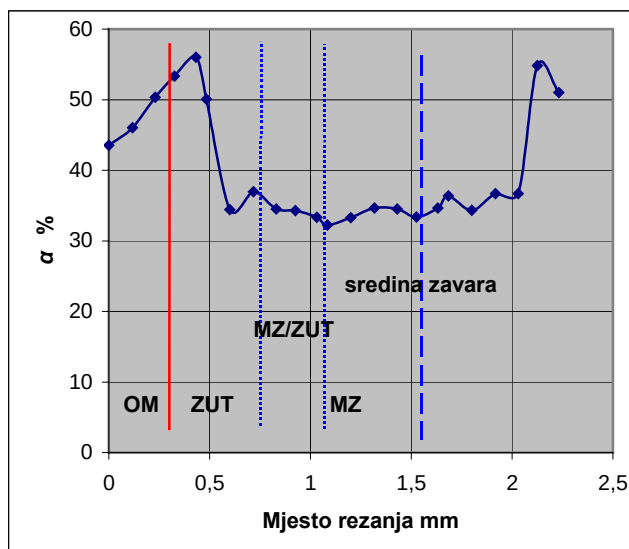
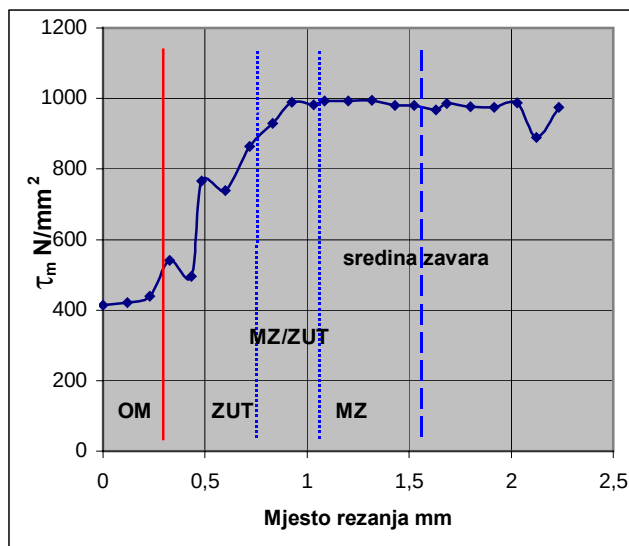
Tablica 32. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 2 Ar/CO₂ (91/9).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	419	45	0,24	605
2	0,1	421	47	0,25	608
3	0,18	415	45	0,23	597
4	0,29	422	47	0,25	612
5	0,38	446	44	0,25	663
6	0,49	469	42	0,25	714
7	0,6	673	51	0,41	1158
8	0,7	660	54	0,40	1131
9	0,78	664	52	0,38	1139
10	0,89	788	49	0,44	1408
11	0,98	952	35	0,37	1767
12	1,09	972	35	0,37	1811
13	1,2	1015	35	0,38	1904
14	1,3	1011	34	0,37	1896
15	1,38	1009	34	0,37	1892
16	1,49	1013	35	0,39	1900
17	1,58	995	36	0,38	1861
18	1,69	981	34	0,37	1830
19	1,8	993	36	0,40	1857
20	1,9	993	38	0,41	1857
21	1,98	986	36	0,40	1842
22	2,09	993	37	0,41	1857
23	2,18	990	38	0,42	1849

**Slika 69.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 2 Ar/CO₂ (91/9).

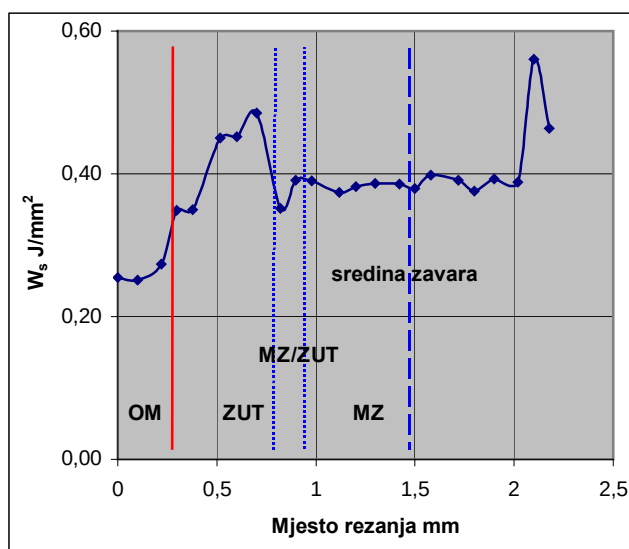
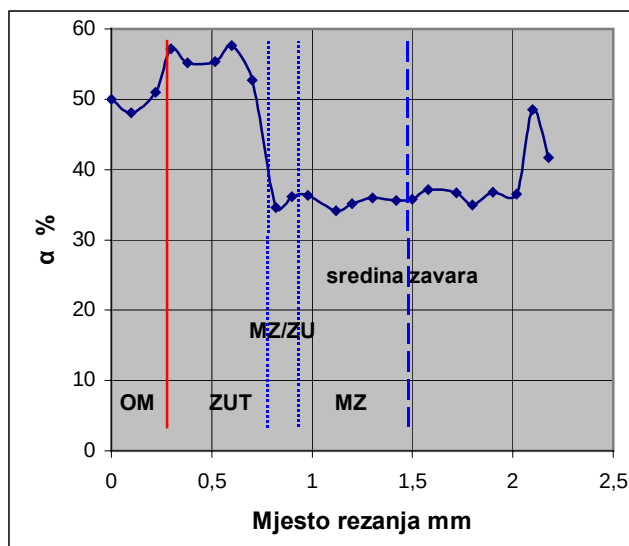
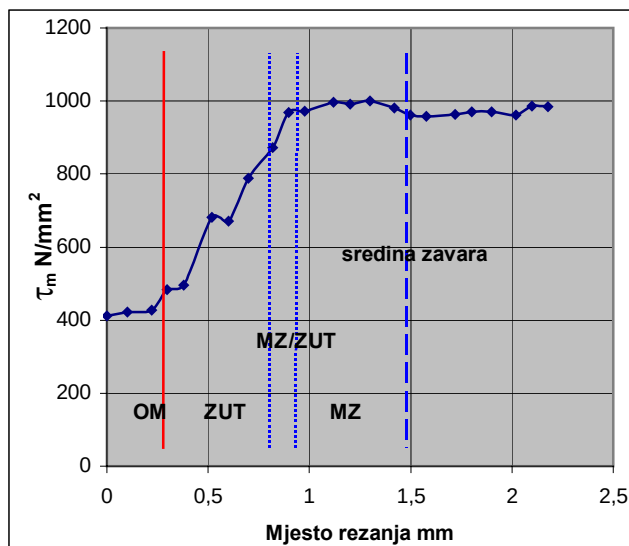
Tablica 33. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 3 Ar/CO₂ (82/18).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	413	44	0,23	593
2	0,118	421	46	0,24	608
3	0,23	438	50	0,28	647
4	0,325	540	53	0,35	870
5	0,432	496	56	0,35	772
6	0,484	766	50	0,46	1361
7	0,6	739	34	0,29	1303
8	0,718	864	37	0,37	1576
9	0,83	929	35	0,36	1717
10	0,925	990	34	0,37	1849
11	1,032	983	33	0,36	1834
12	1,084	993	32	0,35	1857
13	1,2	993	33	0,36	1857
14	1,318	995	35	0,38	1861
15	1,43	981	35	0,37	1830
16	1,525	981	33	0,36	1830
17	1,632	968	35	0,37	1802
18	1,684	986	36	0,40	1842
19	1,8	977	34	0,37	1822
20	1,918	976	37	0,40	1818
21	2,03	988	37	0,40	1845
22	2,125	889	55	0,59	1630
23	2,232	976	51	0,59	1818

**Slika 70.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 3 Ar/CO₂ (82/18).

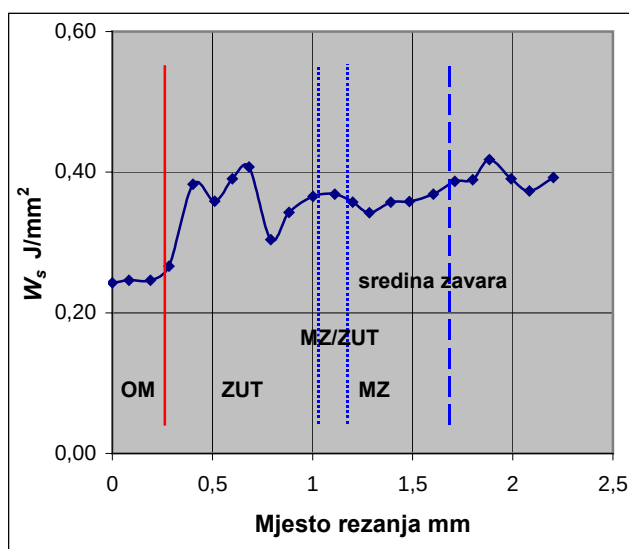
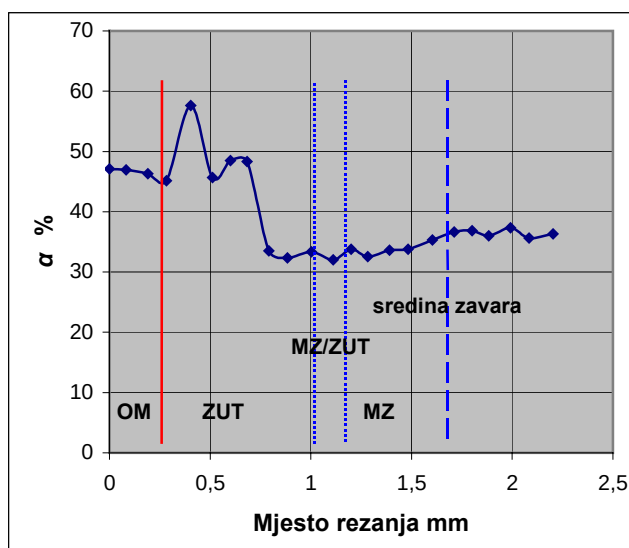
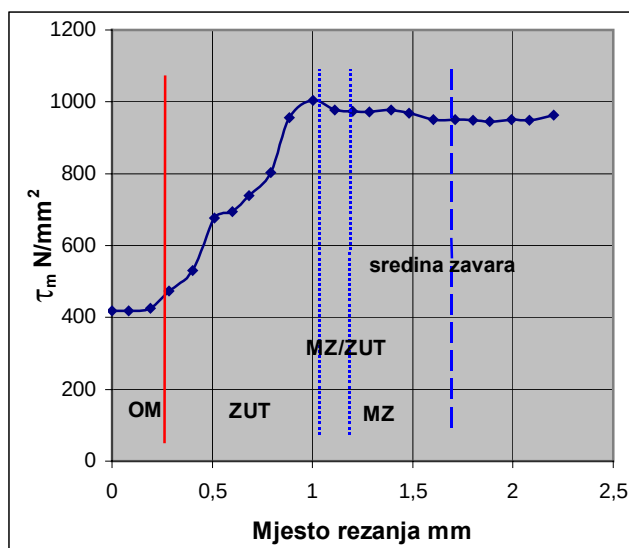
Tablica 34. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 4 Ar/O₂ (91/9).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	412	50	0,25	589
2	0,1	422	48	0,25	612
3	0,22	428	51	0,27	624
4	0,298	483	57	0,35	745
5	0,378	496	55	0,35	772
6	0,518	682	55	0,45	1178
7	0,6	671	58	0,45	1155
8	0,7	788	53	0,48	1408
9	0,82	872	35	0,35	1592
10	0,898	968	36	0,39	1802
11	0,978	972	36	0,39	1811
12	1,118	997	34	0,37	1865
13	1,2	992	35	0,38	1853
14	1,3	1000	36	0,39	1873
15	1,42	981	36	0,39	1830
16	1,498	961	36	0,38	1786
17	1,578	959	37	0,40	1782
18	1,718	963	37	0,39	1790
19	1,8	970	35	0,38	1806
20	1,9	970	37	0,39	1806
21	2,02	961	37	0,39	1786
22	2,098	986	49	0,56	1842
23	2,178	984	42	0,46	1838

**Slika 71.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 4 Ar/O₂ (91/9).

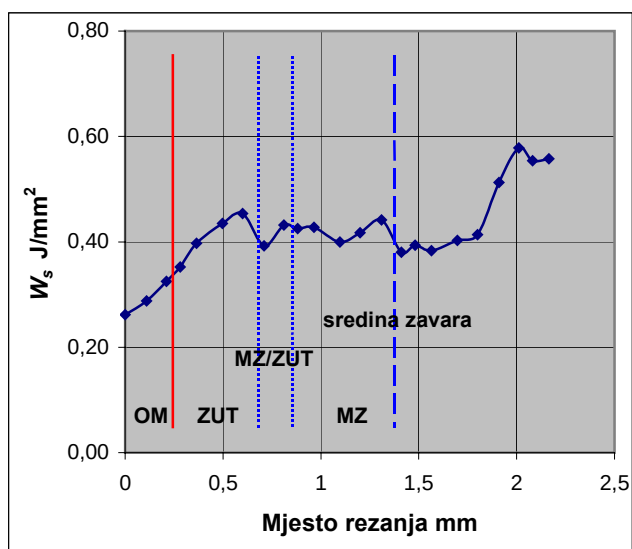
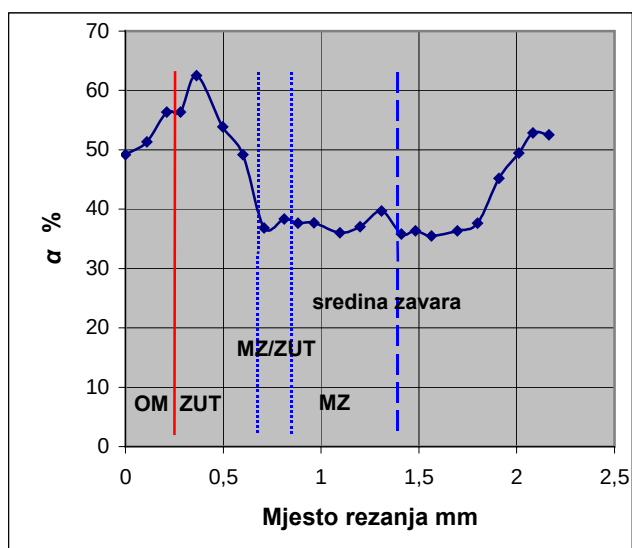
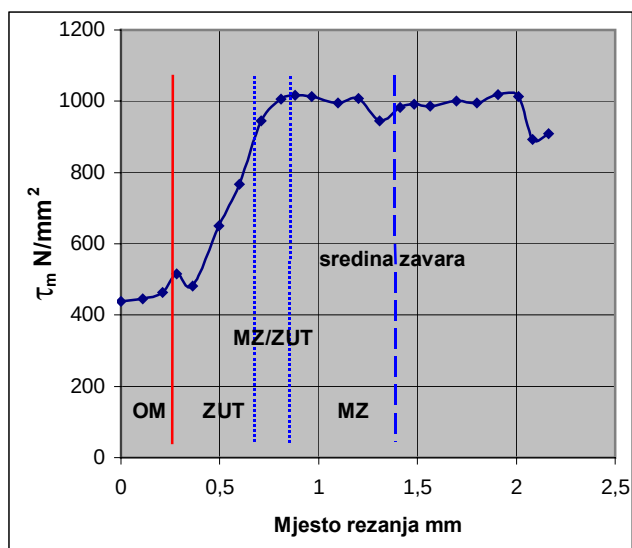
Tablica 35. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 5v Ar/O₂ (82/18).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	419	47	0,24	605
2	0,083	419	47	0,25	605
3	0,191	426	46	0,25	620
4	0,283	474	45	0,27	725
5	0,403	530	58	0,38	847
6	0,511	676	46	0,36	1166
7	0,6	694	49	0,39	1205
8	0,683	739	48	0,41	1303
9	0,791	804	34	0,30	1443
10	0,883	956	32	0,34	1775
11	1,003	1004	33	0,37	1880
12	1,111	977	32	0,37	1822
13	1,2	974	34	0,36	1814
14	1,283	972	33	0,34	1811
15	1,391	977	34	0,36	1822
16	1,483	968	34	0,36	1802
17	1,603	950	35	0,37	1763
18	1,711	950	37	0,39	1763
19	1,8	948	37	0,39	1759
20	1,883	945	36	0,42	1751
21	1,991	950	37	0,39	1763
22	2,083	948	36	0,37	1759
23	2,203	963	36	0,39	1790

**Slika 72.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 5v Ar/O₂ (82/18).

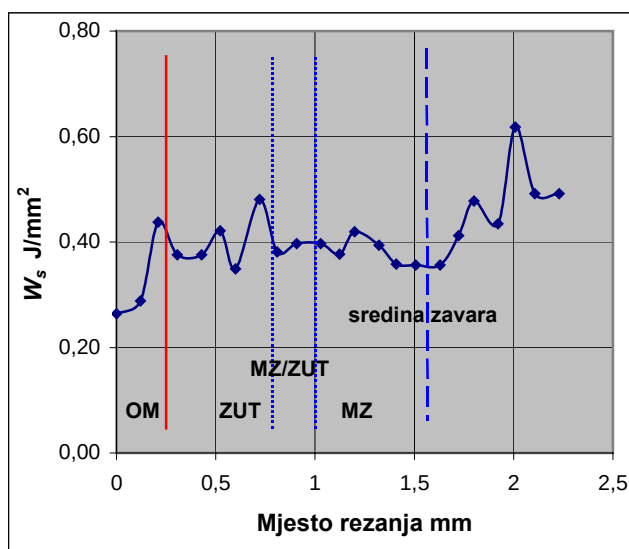
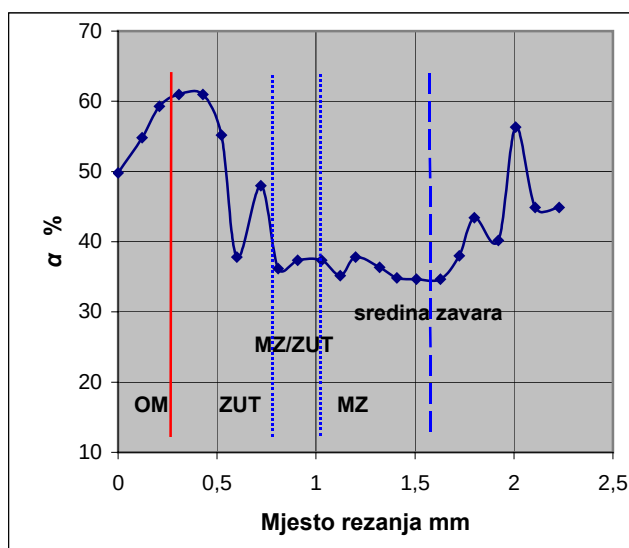
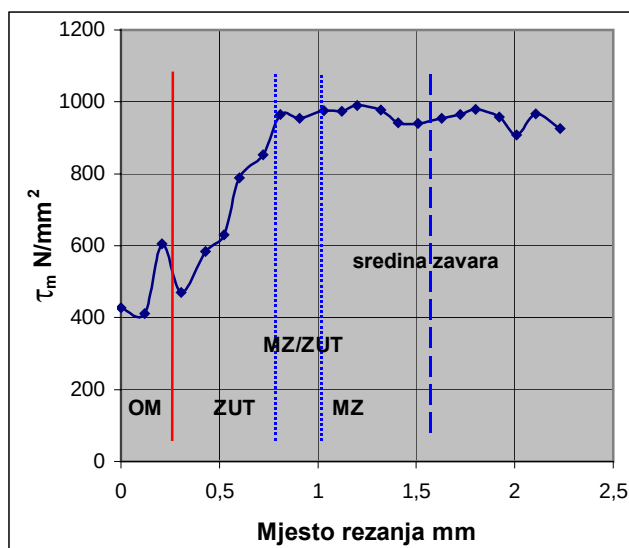
Tablica 36. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 6 Ar/CO₂/O₂ (82/9/9).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	438	49	0,26	647
2	0,109	446	51	0,29	663
3	0,211	464	56	0,32	702
4	0,282	516	56	0,35	816
5	0,364	481	63	0,40	741
6	0,497	650	54	0,43	1108
7	0,6	768	49	0,45	1365
8	0,709	945	37	0,39	1751
9	0,811	1006	38	0,43	1884
10	0,882	1016	38	0,43	1907
11	0,964	1013	38	0,43	1900
12	1,097	995	36	0,40	1861
13	1,2	1008	37	0,42	1888
14	1,309	945	40	0,44	1751
15	1,411	983	36	0,38	1834
16	1,482	992	36	0,39	1853
17	1,564	986	36	0,38	1842
18	1,697	1000	36	0,40	1873
19	1,8	995	38	0,41	1861
20	1,909	1018	45	0,51	1911
21	2,011	1013	49	0,58	1900
22	2,082	893	53	0,55	1638
23	2,164	909	53	0,56	1674

**Slika 73.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja – 6 Ar/CO₂/O₂ (82/9/9).

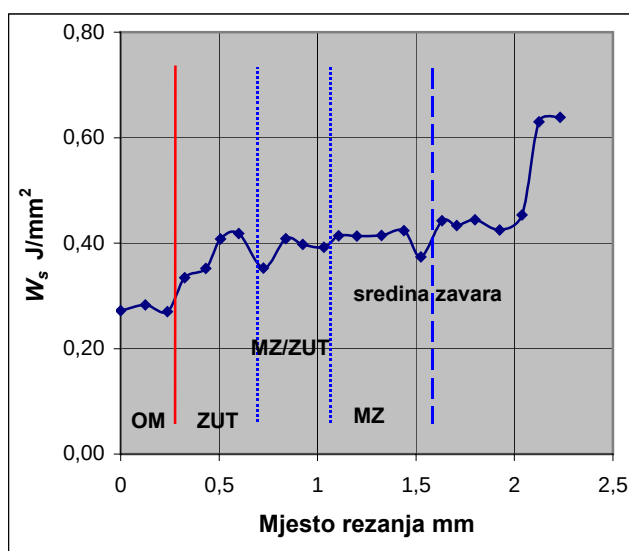
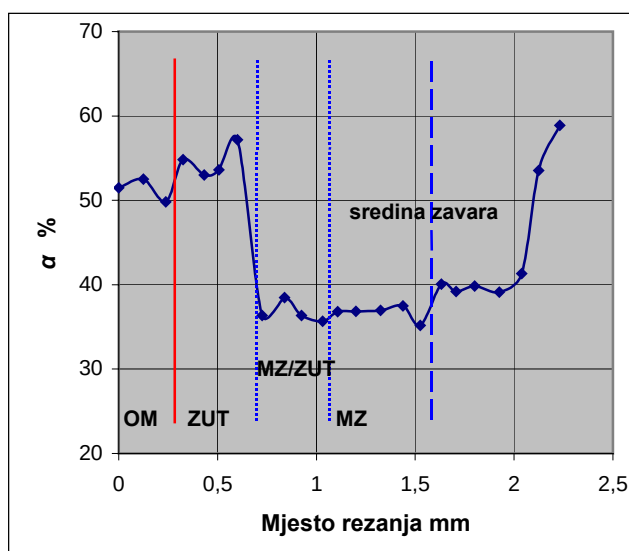
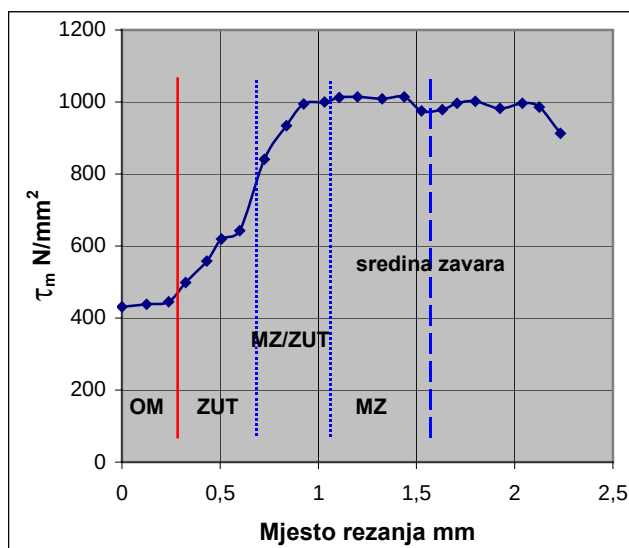
Tablica 37. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	428	50	0,26	624
2	0,121	412	55	0,29	589
3	0,209	605	59	0,44	1010
4	0,307	471	61	0,38	718
5	0,429	584	61	0,38	964
6	0,523	630	55	0,42	1065
7	0,6	789	38	0,35	1412
8	0,721	852	48	0,48	1549
9	0,809	964	36	0,38	1794
10	0,907	954	37	0,40	1771
11	1,029	976	37	0,40	1818
12	1,123	974	35	0,38	1814
13	1,2	990	38	0,42	1849
14	1,321	977	36	0,39	1822
15	1,409	941	35	0,36	1744
16	1,507	940	35	0,36	1740
17	1,629	954	35	0,36	1771
18	1,723	964	38	0,41	1794
19	1,8	979	43	0,48	1826
20	1,921	957	40	0,43	1779
21	2,009	908	56	0,62	1670
22	2,107	966	45	0,49	1798
23	2,229	925	45	0,49	1709

**Slika 74.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja - 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).

Tablica 38. Rezultati mikrosmičnog ispitivanja – 8 He (100).

Redni broj	Mjesto rezanja mm	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Preračunata vlačna čvrstoća $R_{m(MS)}$ N/mm ²
1	0	431	52	0,27	632
2	0,125	438	53	0,28	647
3	0,238	446	50	0,27	663
4	0,325	499	55	0,33	780
5	0,432	558	53	0,35	909
6	0,507	619	54	0,41	1041
7	0,6	643	57	0,42	1093
8	0,725	841	36	0,35	1526
9	0,838	934	38	0,41	1728
10	0,925	995	36	0,40	1861
11	1,032	1000	36	0,39	1873
12	1,107	1013	37	0,41	1900
13	1,2	1015	37	0,41	1904
14	1,325	1009	37	0,41	1892
15	1,438	1015	38	0,42	1904
16	1,525	976	35	0,37	1818
17	1,632	979	40	0,44	1826
18	1,707	997	39	0,43	1865
19	1,8	1002	40	0,44	1876
20	1,925	983	39	0,43	1834
21	2,038	997	41	0,45	1865
22	2,125	986	54	0,63	1842
23	2,232	913	59	0,64	1682

**Slika 75.** Profili mehaničkih svojstava zavarenog spoja - 8 He (100).

Najveća čvrstoća dobivena je u metalu zavara. U čistom ZUT-u i prijelaznoj zoni ZUT/metal zavara dolazi do porasta čvrstoće u smjeru sredine zavara.

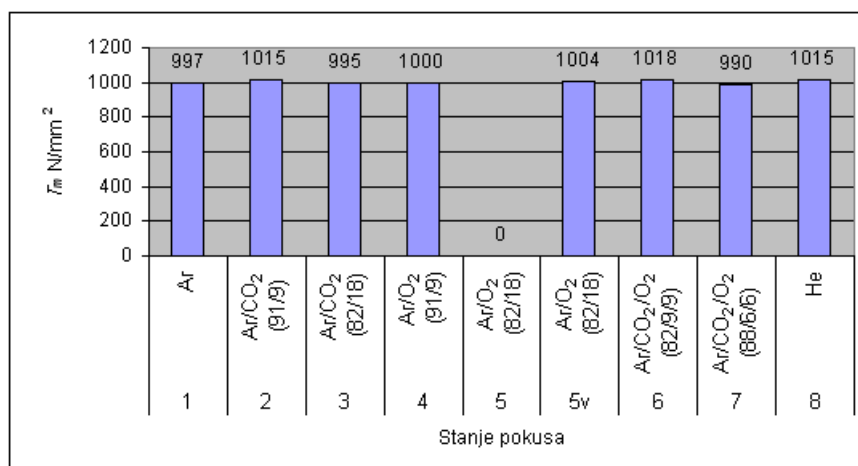
Najveća plastičnost zavarenog spoja dobivena je u ZUT-u kod svih plinskih mješavina i to u intervalu od 54 do 63%. Minimalna plastičnost dobivena je u metalu zavara, koji prema tome predstavlja kritično mjesto. Stoga je za plastičnost metala zavara određen matematički model, kako bi se utvrdilo koja mješavina daje najveću deformabilnost metala zavara. Srednja vrijednost u **tablici 39** izračunata je na temelju šest podataka izmjerenih od početka do sredine metala zavara. Dobivene su vrijednosti u intervalu od 34 do 37%.

Najveća žilavost zavarenog spoja dobivena je u ZUT-u, u intervalu od 0,39 do 0,48 J/mm² a u stanjima pokusa 1, 6 i 8 ne razlikuje se značajno od žilavosti metala zavara. Minimalna žilavost dobivena je u metalu zavara, koji prema tome predstavlja kritično mjesto. Stoga je za žilavost metala zavara određen matematički model, kako bi se utvrdilo koja mješavina daje najveću žilavost metala zavara. Srednja vrijednost u **tablici 39** izračunata je na temelju šest podataka izmjerenih od početka do sredine metala zavara. Dobivene su vrijednosti u intervalu od 0,36 do 0,42 J/mm².

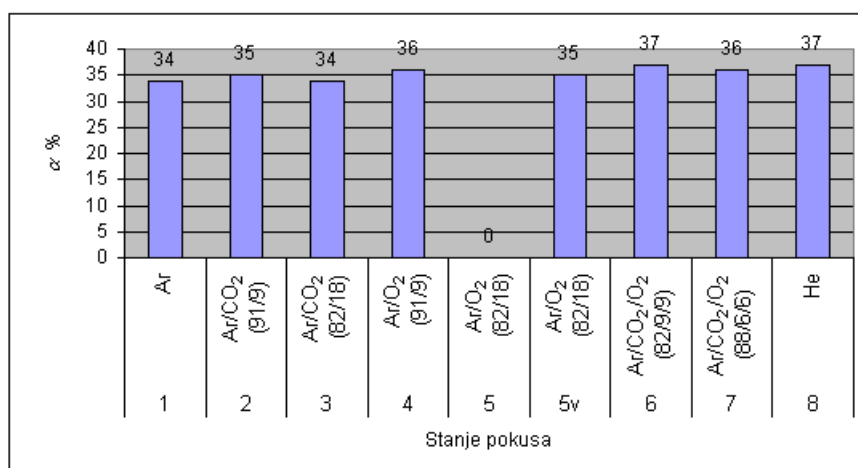
Tablica 39. Mikrosmična čvrstoća, plastičnost i žilavost metala zavara kod materijala 25 CrMo 4.

Stanje pokusa	Mješavina	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²
1	Ar	997	34	0,36
2	Ar/CO ₂ (91/9)	1015	35	0,38
3	Ar/CO ₂ (82/18)	995	34	0,37
4	Ar/O ₂ (91/9)	1000	36	0,38
5	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-
5v	Ar/O ₂ (82/18)	1004	35	0,36
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	1018	37	0,42
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	990	36	0,38
8	He	1015	37	0,41

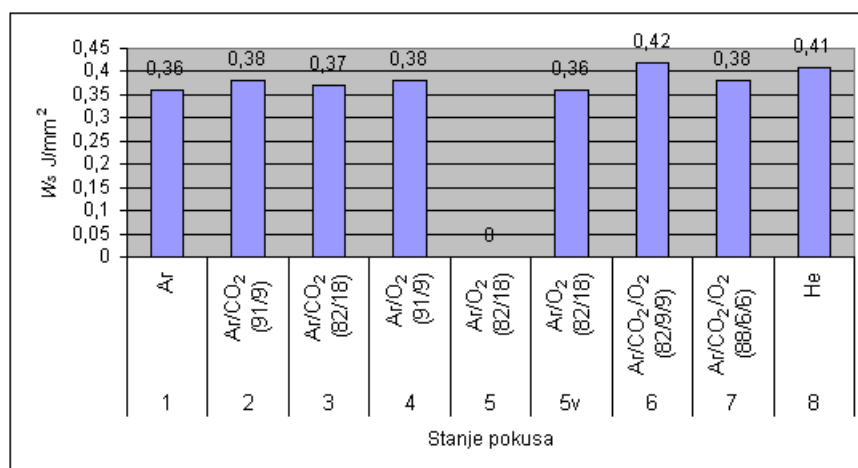
Na **slici 76**, prikazane su mikrosmična čvrstoća, plastičnost i žilavost metala zavora kod materijala 25 CrMo 4, na temelju kojih su određivani matematički modeli.



a) Mikrosmična čvrstoća



b) Mikrosmična plastičnost



c) Mikrosmična žilavost

Slika 76. Mikrosmična mehanička svojstva.

5.7.1. MATEMATIČKI MODELI PROMJENA MEHANIČKIH SVOJTAVA

Kod mikrosmične čvrstoće vrijednost "Prob>F" iznosi 0,9009, a R-kvadrat 0,0509. Srednja vrijednost mikrosmične čvrstoće iznosi 1003 N/mm².

Kod mikrosmične plastičnosti vrijednost "Prob>F" iznosi 0,5878, a R-kvadrat 0,2333. Srednja vrijednost mikrosmične plastičnosti iznosi 35 %.

Kod mikrosmične žilavosti vrijednost "Prob>F" iznosi 0,7222, a R-kvadrat 0,1502. Srednja vrijednost mikrosmične žilavosti iznosi 0,38 J/mm².

Analiza varijance pokazala je da linearni modeli mikrosmičnih mehaničkih svojstava nisu značajni, odnosno da srednja vrijednost bolje predviđa odziv od linearnog modela. Stoga se može zaključiti da vrsta mješavine ne utječe značajno na mikrosmičnu čvrstoću, plastičnost i žilavost metala zavora.

USPOREDBA ARGON - HELIJ

Usporedba izmjerenih mehaničkih svojstava kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem prikazana je u **tablici 40**.

Tablica 40. Usporedba mehaničkih svojstava kod zavarivanja u zaštiti argonom i helijem.

Zaštitni plin	Mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Mikrosmična plastičnost α %	Mikrosmična žilavost W_s J/mm ²
Argon	997	34	0,36
Helij	1015	37	0,41

Rezultati pokazuju da su sa helijem postignute nešto veće vrijednosti ispitivanih mehaničkih svojstava. Ali dobiveni rezultati ne izlaze iz granica dobivenih s aktivnim mješavinama, čiji su podaci na temelju statističke analize pokazali da mješavine ne utječu značajno. Stoga se može zaključiti da razlika između mehaničkih svojstava dobivenih s argonom i helijem nije značajna.

5.8. ODREĐIVANJE DINAMIČKE IZDRŽLJIVOSTI ZAVARENIH SPOJEVA

5.8.1. MATERIJAL 25 CrMo 4

Područje vremenske izdržljivosti

Brojevi ciklusa N do pojave loma pri konstantnom opterećenju, u području vremenske izdržljivosti prikazani su u **tablici 41**.

Tablica 41. Broj ciklusa do loma N, u području vremenske izdržljivosti 25 CrMo 4, n.i.-nije ispitano, n.p.- epruveta nije pukla, o.m.- lom u osnovnom materijalu, Izv. - izvođenje.

Stanje pokusa	Mješavina	Naprezanje σ_z N/mm ²								
		175			198			224		
		1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.	1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.	1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.
1	Ar	178848	189888	717600 n.p.	129360	105840	110544	n.i.	n.i.	n.i.
2	Ar/CO ₂ (91/9)	n.i.	n.i.	n.i.	265776 o.m.	192864	301056	134784 o.m.	147264 o.m.	64896
3	Ar/CO ₂ (82/18)	n.i.	n.i.	n.i.	115248	190512	176400	79872	54912	89856
4	Ar/O ₂ (91/9)	n.i.	n.i.	n.i.	291648	218736	216384	157248	112320	82368
5	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5v	Ar/O ₂ (82/18)	n.i.	n.i.	n.i.	329000 n.p.	329000 n.p.	329000 n.p.	-	-	-
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	n.i.	n.i.	n.i.	202272	157584	157584	104832	79872	69888
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	141312	128064	225216	115248	94080	134064	n.i.	n.i.	n.i.
8	He	n.i.	n.i.	n.i.	282240	286944	178752	94848	67392	82368

Prvo ispitivanje provedeno je pri naprezanju u sredini zavara od 198 N/mm². U stanjima pokusa 1 i 7 vremenske izdržljivosti dobivene su u intervalu od 30 000 do 150 000 ciklusa, pa je drugo ispitivanje provedeno pri nižem opterećenju 175 N/mm². U ostalim stanjima pokusa vremenske izdržljivosti dobivene su u intervalu od 50 000 do 350 000 ciklusa, pa je drugo ispitivanje provedeno pri višem opterećenju 224 N/mm². Iz dobivenih rezultata vidljivo je da zavareni spojevi u stanjima pokusa 1 i 7 imaju manju vremensku izdržljivost.

U stanju pokusa 5v, **tablica 41**, nije došlo do loma epruvete. Epruvete su kod sva tri ponavljanja najdulje izdržale. Kod 329 000 ciklusa ispitivanje je prekinuto, jer je prethodno kod ispitivanja sa stupnjevitim opterećenjem, **tablica 42**, dva puta došlo do pojave loma u

osnovnom materijalu. Kako nije prikupljeno dovoljno podataka za određivanje dinamičke izdržljivosti ispitivanje pri višem opterećenju nije provedeno.

Dinamička izdržljivost

Brojevi ciklusa N do pojave loma pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, na temelju kojih se određuje dinamička izdržljivost prikazani su u **tablici 42**.

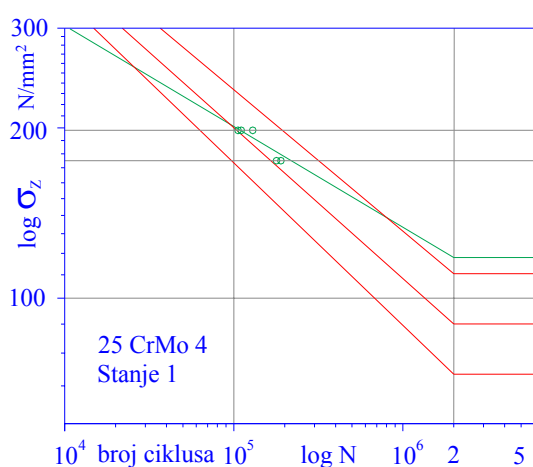
Tablica 42. Broj ciklusa do loma N pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, 25 CrMo 4, o.m.-lom u osnovnom materijalu.

	Stanje pokusa	Epruveta	Mješavina	Naprezanje σ_z N/mm ²				
				140	164	188	212	236
1. Izvođenje	1	211	Ar	250000	250000	24295	-	-
	2	221	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	166399 o.m.	-	-
	3	231	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	155714	-	-	-
	4	241	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	250000	111537	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-
	5v	251	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	232638	-	-
	6	261	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	250000	111391	-	-
	7	271	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	224280	-	-	-
2. Izvođenje	8	281	He	250000	250000	173390	-	-
	1	212	Ar	250000	250000	87096	0	-
	2	222	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	250000	82620	-
	3	232	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	79032	-	-	-
	4	242	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	249828	-	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-
	5v	252	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	250000	216270 o.m.	-
	6	262	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	250000	48132	-	-
3. Izvođenje	7	272	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	228552	41256	-	-
	8	282	He	250000	215736	-	-	-
	1	213	Ar	250000	250000	198258	-	-
	2	223	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	58675	-	-
	3	233	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	10680	-	-	-
	4	243	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	182443	-	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-
	5v	253	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	250000	250000	169092 o.m.
	6	263	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	113208	-	-	-
	7	273	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	102528	-	-	-
	8	283	He	250000	173016	-	-	-

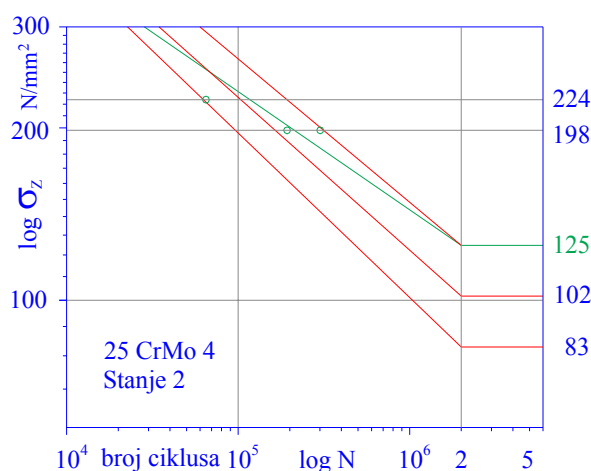
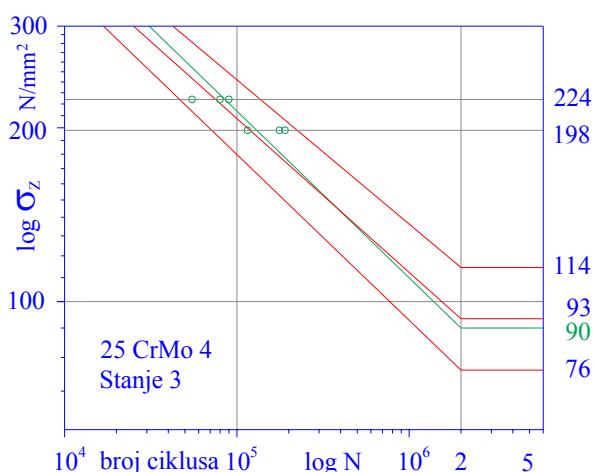
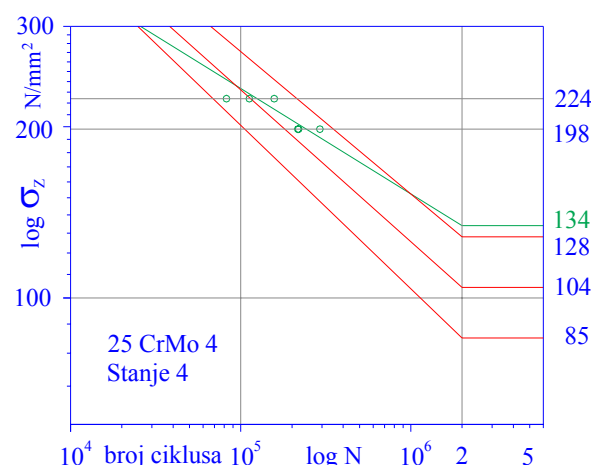
Na temelju dobivenih rezultata, prema Locatijevoj metodi opisanoj u poglavlju 4.6.8.2. određene su Wöhlerove krivulje prikazane **slikom 77**. U stanju pokusa 5v, **tablica 42**, epruvete su najdulje izdržale, ali na kraju su u 2. i 3. ponavljanju pukle u osnovnom

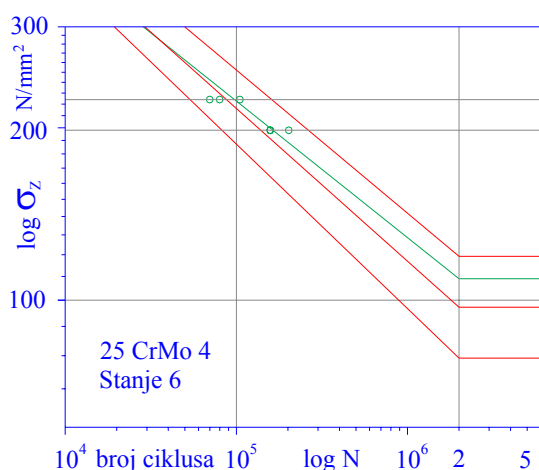
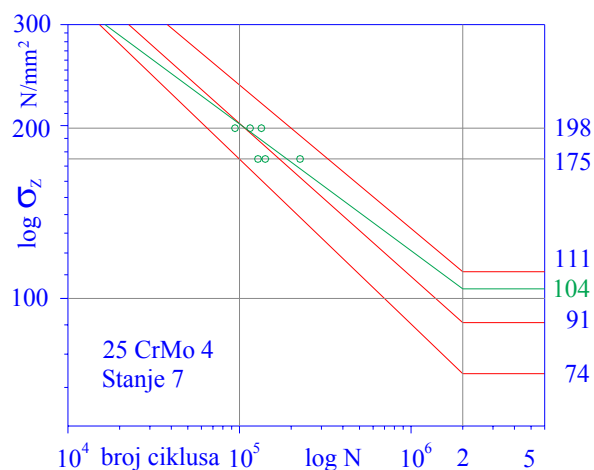
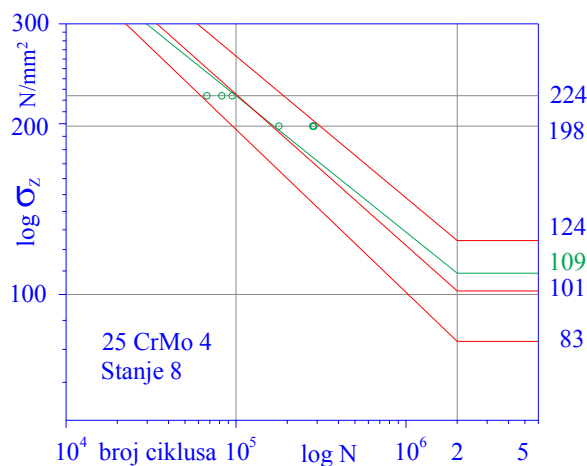
materijalu, na mjestu uklještenja. Ispitivanjem epruvete zavarene u stanju pokusa 5v nije dobiveno dovoljno podataka za određivanje Wöhlerove krivulje.

U ispitnom sustavu postoje dva zarezna djelovanja na epruvetu, **slika 41**. Prvo i za ovo istraživanje najbitnije je zarezno djelovanje zavarenog spoja, a drugo je zarezno djelovanje uklještenja na stezaljkama. U stanju pokusa 5v zarezno djelovanje zavora je manje od zareznog djelovanja uklještenja. Stoga je u 2. i 3. ponavljanju došlo do loma u osnovnom materijalu, tek pri petom odnosno šestom stupnju opterećenja, dok su ostale epruvete uglavnom pucale pri četvrtom stupnju opterećenja i to u metalu zavora.



a) Stanje pokusa 1 - Ar (100).

b) Stanje pokusa 2 - Ar/CO₂ (91/9).c) Stanje pokusa 3 - Ar/CO₂ (82/18).d) Stanje pokusa 4 - Ar/O₂ (91/9).

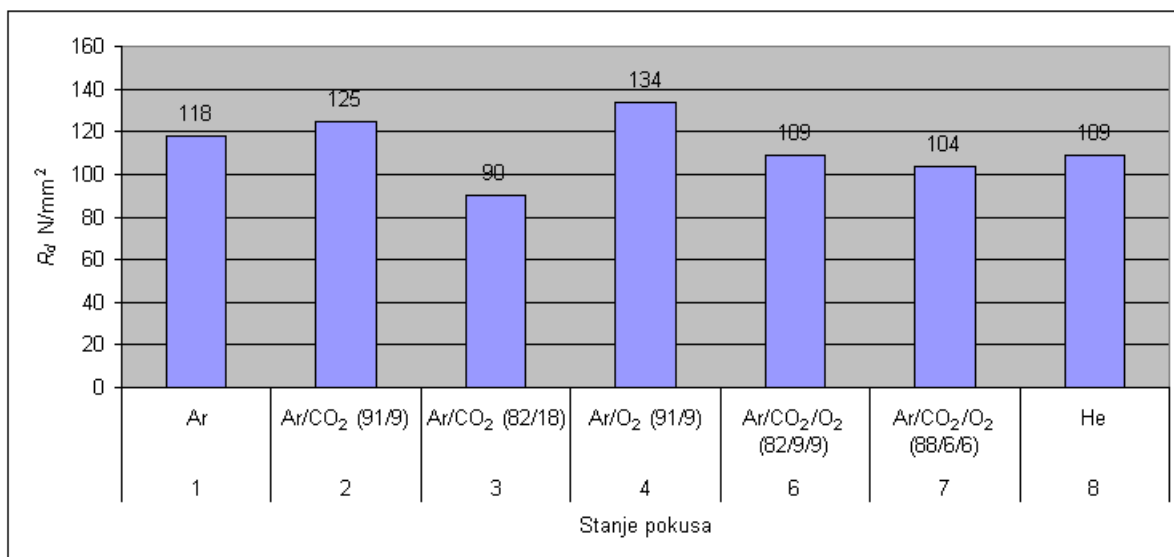
e) Stanje pokusa 6 - Ar/CO₂/O₂ (82/9/9).f) Stanje pokusa 7 - Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).

g) Stanje pokusa 8 – He (100).

Slika 77. Wöhlerove krivulje, materijal 25 CrMo 4.

Rezultati ispitivanja u području vremenske izdržljivosti, doveli su do vertikalnog pomicanja pretpostavljenih Wöhlerovih krivulja prema nižim vrijednostima dinamičke izdržljivosti od teoretski pretpostavljene **slikom 46**. Stvarne dinamičke izdržljivosti, **slika 77**, u stanjima pokusa 2, 3, 6, 7 i 8, nalaze se unutar pretpostavljenih krivulja s vjerojatnošću preživljavanja 10 i 90%, što znači da su krivulje dobro pretpostavljene na temelju podataka vremenske izdržljivosti. Nagib pravca također se nalazi u predviđenom području. U stanjima pokusa 1 i 4, **slika 77**, dobivene su značajno veće vrijednosti dinamičke izdržljivosti od pretpostavljenih, koje izlaze iz očekivanog intervala. To znači, da ova stanja pokusa, nisu dobro pretpostavljena nagibima pravaca prema DVS-ovom katalogu [143], već je stvarni nagib pravca u vremenskom području u ovim stanjima pokusa manji.

Na **slici 78.**, prikazane su dinamičke izdržljivosti u ovisnosti o vrsti mješavine.



Slika 78. Dinamička izdržljivost zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, 25 CrMo 4.

Ispitivanje u vremenskom području, **tablica 41**, pokazalo je da zavareni spojevi u stanjima pokusa 1 i 7 imaju manju vremensku izdržljivost. Međutim taj podatak ne mora značiti da je u tim stanjima pokusa ujedno i dinamička izdržljivost najmanja [110]. To je dobiveno i u ovom istraživanju, **slika 78**.

Najviše ciklusa do loma pri stupnjevitom opterećenju, kod dva ponavljanja **tablica 42**, izdržala je epruveta u stanju pokusa 4, a najmanji kod sva tri izvođenja epruveta u stanju pokusa 3. Tako je u stanju pokusa 4 dobivena najveća dinamička izdržljivost od 134 N/mm², a u stanju pokusa 3 najmanja dinamička izdržljivost od 90 N/mm², **slika 77**.

Ako se analiziraju poprečni presjeci zavarenih spojeva, **tablica 10**, u stanju pokusa 3 može se uočiti smaknuće limova i oštri prijelaz korijen/osnovni materijal, odnosno mali radijus korijena zavora. Takav korijen ima veliko zarezno djelovanje, koje je uzrokovalo najmanju dinamičku izdržljivost. U stanju pokusa 4 dobiven je korijen s velikim radijusom korijena zavora i malim kutom nadvišenja korijena. Takav oblik korijena, s malim zareznim djelovanjem, uzrokovao je najvišu dinamičku izdržljivost. U stanju pokusa 4 pojavile su se ugorine lica zavora od 0,07 mm, stoga je moguće da su one uzrokovale nastanak pukotine kao manji odnosno sekundarni koncentrador naprezanja. U stanjima pokusa 1 i 2, dobiveno je manje zarezno djelovanje zavora nego u stanjima pokusa 6, 7 i 8, što je vidljivo iz dobivenih rezultata dinamičke izdržljivosti, **slika 78**.

5.8.2. MATERIJAL 42 CrMo 4

Područje vremenske izdržljivosti

Brojevi ciklusa N do pojave loma pri konstantnom opterećenju, u području vremenske izdržljivosti prikazani su u **tablici 43**.

Tablica 43. Broj ciklusa do loma N, u području vremenske izdržljivosti, 42 CrMo 4, n.i.-nije ispitano, n.p.- epruveta nije pukla, o.m.- lom u osnovnom materijalu, Izv.- izvođenje.

Stanje pokusa	Mješavina	Naprezanje σ_z N/mm ²								
		175			198			224		
		1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.	1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.	1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.
1	Ar	242880	n.i.	n.i.	82320	110544	131712	n.i.	n.i.	n.i.
2	Ar/CO ₂ (91/9)	n.i.	n.i.	n.i.	576240 n.p.	159936	432768	189696	109824	79872
3	Ar/CO ₂ (82/18)	264960	147936	143520	84672	87024	105840	n.i.	n.i.	n.i.
4	Ar/O ₂ (91/9)	n.i.	n.i.	n.i.	576240 n.p.	1335936 n.p.	722064 n.p.	n.i.	n.i.	n.i.
5	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5v	Ar/O ₂ (82/18)	n.i.	n.i.	n.i.	348096 o.m.	863184 o.m.	722064 n.p.	n.i.	n.i.	n.i.
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	n.i.	n.i.	n.i.	576240 n.p.	1335936 n.p.	343392	n.i.	n.i.	n.i.
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	n.i.	n.i.	n.i.	453936	1335936 n.p.	272832 o.m.	n.i.	n.i.	n.i.
8	He	n.i.	n.i.	n.i.	228144	164640	216384	132288	107328	87360

Prvo ispitivanje provedeno je pri naprezanju u sredini zavaru od 198 N/mm². U stanjima pokusa 1 i 3 vremenske izdržljivosti dobivene su u intervalu od 30 000 do 150 000 ciklusa, pa je drugo ispitivanje provedeno pri nižem opterećenju 175 N/mm². U stanjima pokusa 2 i 8 vremenske čvrstoće dobivene su u intervalu od 50 000 do 433 000 ciklusa, pa je drugo ispitivanje provedeno pri višem opterećenju 224 N/mm². Iz dobivenih rezultata vidljivo je da zavareni spojevi u stanjima pokusa 1 i 3 imaju manju vremensku izdržljivost.

U stanjima pokusa 4, 5v, 6 i 7 nije došlo do loma epruveta ili je lom nastupio u osnovnom materijalu na mjestu uklještenja. U drugom pokusu, **tablica 43**, epruvete 4, 6 i 7 izdržale su 1 335 936 ciklusa bez pojave loma. U trećem pokusu epruveta 5v izdržala je 722 064 ciklusa bez pojave loma. Ispitivanja su pri navedenim brojevima ciklusa prekinuta, jer su prekoračila pretpostavljenu vrijednost od 500 000 promjena za vjerojatnost preživljavanja od 90%, **slika 46**. Kod ispitivanja sa stepenastom promjenom opterećenja, **tablica 44**, lom epruveta 4, 5v, 6, 7 i 8 nastupio je u osnovnom materijalu. Stoga ispitivanje u području vremenske čvrstoće pri višem opterećenju 224 N/mm², nije provedeno, jer ukoliko bi i došlo do loma on bi se pojavio u osnovnom materijalu. U Wöhlerovom dijagramu za laserski zavareni spoj kod

čelika C 45 [113], ravni dio krivulje počinje pri 700 000 ciklusa. Stoga se može reći da se naprezanje od 198 N/mm^2 nalazi u području dinamičke izdržljivosti materijala u navedenim stanjima pokusa.

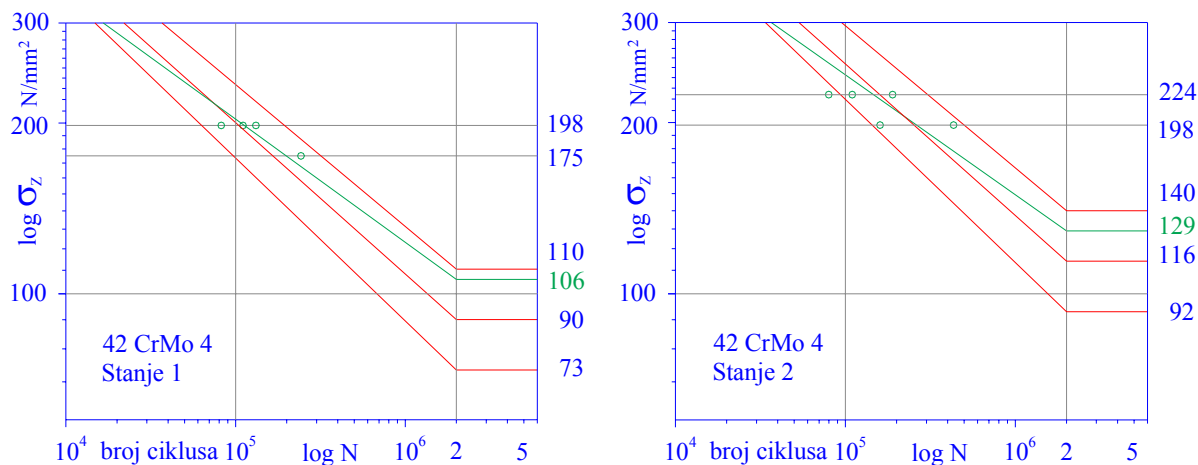
Dinamička izdržljivost

Brojevi ciklusa N do pojave loma pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, na temelju kojih se određuje dinamička izdržljivost prikazani su u **tablici 44**.

Tablica 44. Broj ciklusa do loma N pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, 42 CrMo 4, o.m.-lom u osnovnom materijalu.

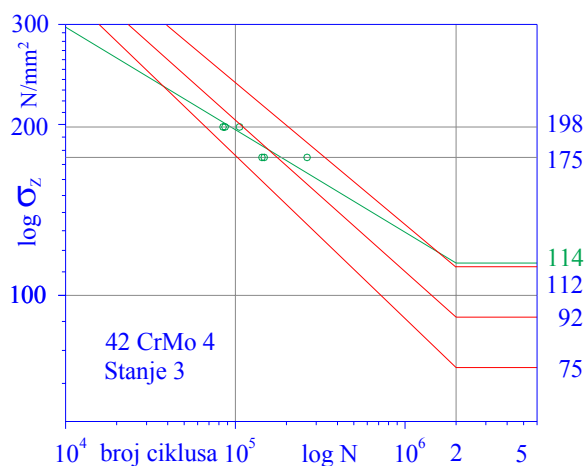
	Stanje pok.	Epr.	Mješavina	Opterećenje N/mm^2					
				140	164	188	212	236	260
1. Izvođenje	1	411	Ar	250000	250000	58368	-	-	-
	2	421	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	149568	-	-	-
	3	431	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	250000	92568	-	-	-
	4	441	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	250000	250000	142960 o.m.	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-	-
	5v	451	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	250000	250000	58926 o.m.	-
	6	461	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	250000	250000	250000	130150 o.m.	-
	7	471	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	250000	250000	239734 o.m.	-	-
	8	481	He	250000	250000	240768 o.m.	-	-	-
2. Izvođenje	1	412	Ar	250000	155490	-	-	-	-
	2	422	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	202122	-	-	-
	3	432	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	80940	-	-	-	-
	4	442	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	165642 o.m.	-	-	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-	-
	5v	452	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	250000	250000	250000	13440 o.m.
	6	462	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	250000	250000	250000	109679 o.m.	-
	7	472	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	250000	250000	250000	250000	53760 o.m.
	8	482	He	250000	250000	250000	200950 o.m.	-	-
3. Izvođenje	1	413	Ar	250000	178835	-	-	-	-
	2	423	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	250000	19392	-	-
	3	433	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	250000	250000	33936	-	-
	4	443	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	250000	250000	58926 o.m.	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-	-
	5v	453	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	17328 o.m.	-	-	-
	6	463	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	250000	250000	250000	84546 o.m.	-
	7	473	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	250000	183768 o.m.	-	-	-
	8	483	He	250000	250000	250000	250000	30744 o.m.	-

Na temelju dobivenih rezultata, prema Locatijevoj metodi opisanoj u poglavlju 4.6.8.2. određene su Wöhlerove krivulje za stanja pokusa 1, 2 i 3, **slika 79**.



a) Stanje pokusa 1 - Ar (100).

b) Stanje pokusa 2 - Ar/CO₂ (91/9).



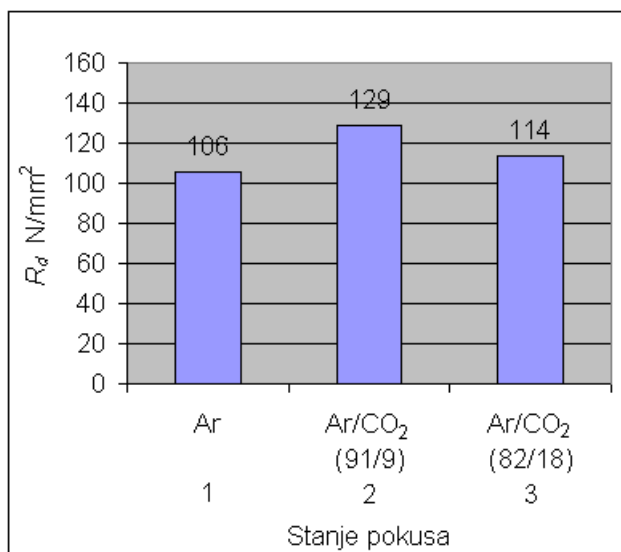
c) Stanje pokusa 3 - Ar/CO₂ (82/18).

Slika 79. Wöhlerove krivulje, materijal 42 CrMo 4.

Rezultati ispitivanja u stanjima 1 i 3, u području vremenske izdržljivosti, **slika 79**, doveli su do vertikalnog pomicanja pretpostavljenih Wöhlerovih krivulja prema nižim vrijednostima dinamičke izdržljivosti od teoretski pretpostavljene **slikom 46**. U stanju 2, Wöhlerova krivulja jednaka je pretpostavljenoj. Stvarne dinamičke izdržljivosti, **slika 79**, u stanjima pokusa 1 i 2, nalaze se unutar pretpostavljenih krivulja s vjerojatnošću preživljavanja 10 i 90%, što znači da su krivulje dobro pretpostavljene na temelju podataka vremenske izdržljivosti. Nagib pravca također se nalazi u predviđenom području. U stanju pokusa 3, **slika 79**, dobivena je značajno veća vrijednosti dinamičke izdržljivosti od pretpostavljene, koja izlazi iz očekivanog intervala. To znači, da stanje pokusa 3, nije dobro pretpostavljeno nagibima pravaca prema

DVS-ovom katalogu [143], već je stvarni nagib pravca u vremenskom području u stanju pokusa 3, manji.

Na **slici 80.** prikazane su dinamičke izdržljivosti u ovisnosti o vrsti mješavine.



Slika 80. Dinamička izdržljivost zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, 42 CrMo 4.

Ispitivanje u vremenskom području, **tablica 43**, pokazalo je da zavareni spojevi u stanjima pokusa 1 i 3 imaju manju vremensku izdržljivost. Međutim taj podatak ne mora značiti da je u tim stanjima pokusa ujedno i dinamička izdržljivost najmanja [110].

Najviše ciklusa do loma pri stupnjevitom opterećenju, kod dva izvođenja **tablica 44**, izdržala je epruveta u stanju pokusa 2, a najmanji epruveta u stanju pokusa 1. Tako je u stanju pokusa 2 dobivena najveća dinamička izdržljivost od 129 N/mm², a u stanju pokusa 1 najmanja dinamička izdržljivost od 106 N/mm², **slika 80**.

Ako se analiziraju poprečni presjeci zavarenih spojeva, **tablica 12**, u stanju pokusa 1, 2 i 3 dobiven je oštri prijelaz korijen-osnovni materijal, odnosno mali radijus korijena zavora. Takav korijen ima veliko zarezno djelovanje, koje je uzrokovalo najmanju dinamičku izdržljivost. U stanjima pokusa 4, 5v, 6 i 7 dobiveni su korijeni s velikim radijusom i malim kutem nadvišenja korijena. Takav oblik korijena ima manje zarezno djelovanje od uklještenja epruvete, stoga su se lomovi događali tek pri četvrtom, petom i šestom stupnju opterećenja, na mjestu uklještenja, **tablica 44**. U stanjima pokusa 4 i 6 pojavile su se ugorine lica zavora od 0,06 i 0,05 mm. Kako u stanjima pokusa 4 i 6 nije došlo do loma u metalu zavora, može se zaključiti da ugorine lica zavora uzrokuju manju koncentraciju naprezanja od korijena u stanjima 1, 2 i 3.

5.8.3. MATERIJAL Ck 60

Područje vremenske izdržljivosti

Brojevi ciklusa N do pojave loma pri konstantnom opterećenju, u području vremenske izdržljivosti prikazani su u **tablici 45**.

Tablica 45. Broj ciklusa do loma N, u području vremenske izdržljivosti, Ck 60, n.i.-nije ispitano, n.p.- epruveta nije pukla, o.m.- lom u osnovnom materijalu, Izv.- izvođenje.

Stanje pokusa	Mješavina	Naprezanje σ_z N/mm ²					
		175			198		
		1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.	1.Izv.	2.Izv.	3.Izv.
1	Ar	139104	269376	289248	65856	32928 o.m.	145824
2	Ar/CO ₂ (91/9)	n.i.	n.i.	n.i.	70560 o.m.	84672 o.m.	79968 o.m.
3	Ar/CO ₂ (82/18)	123648	121440	117024	54096	115248	105840
4	Ar/O ₂ (91/9)	61824	61824	165600	39984	49392	54096
5	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-	-	-
5v	Ar/O ₂ (82/18)	n.i.	n.i.	n.i.	119952	127008 o.m.	105840 o.m.
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	134688	165600	83904	58800	35280 o.m.	61152
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	282624	437184 n.p.	99360	79968	77616	89376
8	He	72293	79763	110892	44688	51744	58800

Prvo ispitivanje provedeno je pri naprezanju u sredini zavara od 198 N/mm². U stanju pokusa 2 i 5v lom je nastupio u osnovnom materijalu na mjestu uklještenja. U ostalim stanjima pokusa vremenske izdržljivosti dobivene su u intervalu od 30 000 do 150 000 ciklusa, pa je drugo ispitivanje provedeno pri nižem opterećenju 175 N/mm².

U stanjima pokusa 2 i 5v, lom u osnovnom materijalu dogodio se pri brojevima ciklusa, pri kojima nastupa lom i u zavarenom spoju, **tablica 45**. Zbog nepoznatog uzroka loma i nedovoljno podataka ta stanja pokusa nisu ispitivana pri drugom vremenskom opterećenju.

Kod ispitivanja sa stupnjevitom promjenom opterećenja, **tablica 46**, lom epruvete 5v, nastupio je dva puta u osnovnom materijalu i jednom u metalu zavara pri četvrtom stupnju opterećenja, dok su ostale epruvete uglavnom pucale pri trećem stupnju opterećenja i to uglavnom u metalu zavara. Iz toga se može zaključiti da zavareni spoj ima veću dinamičku izdržljivost u stanju pokusa 5v, nego u ostalim stanjima pokusa, jer je zarezno djelovanje zavara manje od zareznog djelovanja uklještenja, pa lom nastupa u osnovnom materijalu.

Rezultati ispitivanja u vremenskom području i sa stupnjevitom promjenom opterećenja se ne podudaraju. Na temelju rezultata stupnjevite promjene opterećenja, bilo je za očekivati da će epruvete izdržati veći broj ciklusa u vremenskom području. Najvjerojatnije se pojavilo neko neočekivano zarezno djelovanje u osnovnom materijalu i to u području uklještenja, koje je uzrokovalo raniji lom epruveta, **tablica 45**.

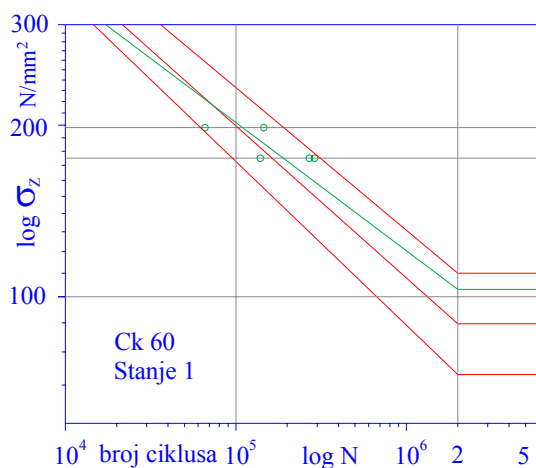
Dinamička izdržljivost

Brojevi ciklusa N do pojave loma pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, na temelju kojih se određuje dinamička izdržljivost prikazani su u **tablici 46**.

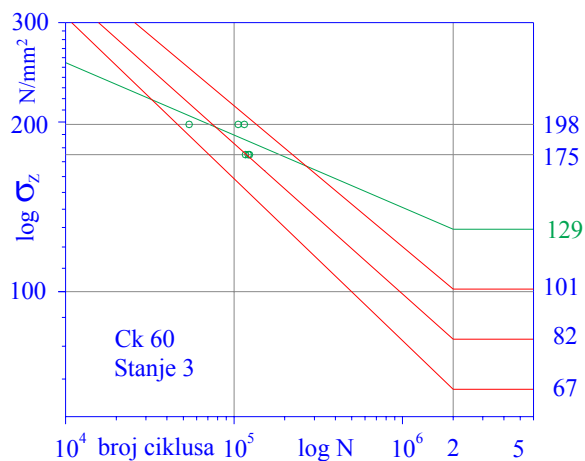
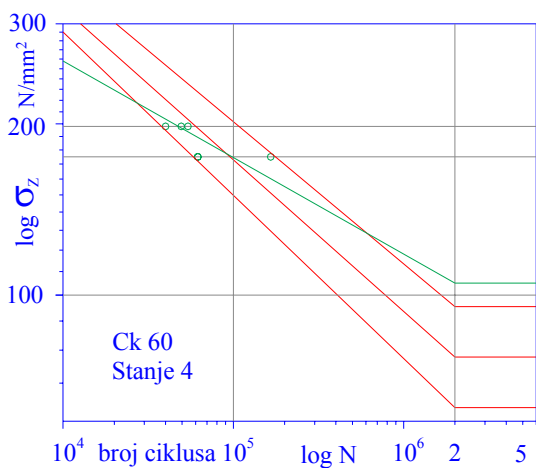
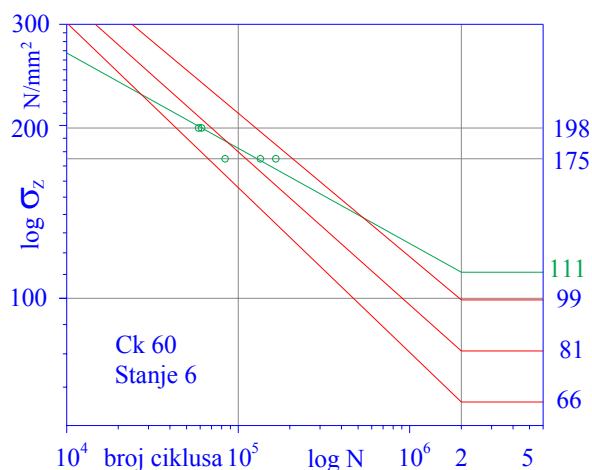
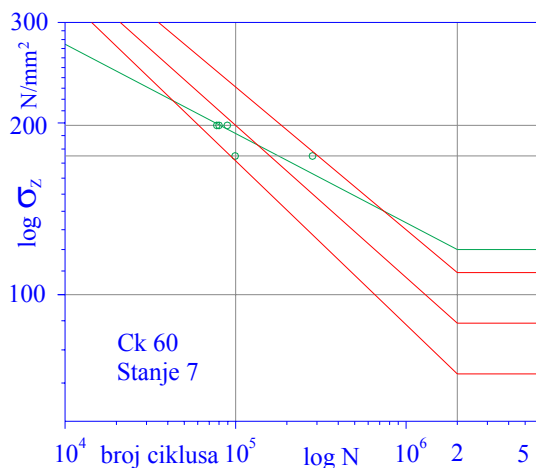
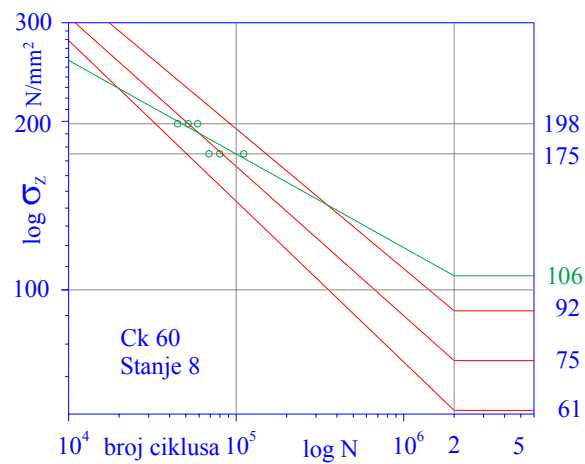
Tablica 46. Broj ciklusa do loma N pri stupnjevitoj promjeni opterećenja, Ck 60, o.m.- lom u osnovnom materijalu.

	Stanje pokusa	Epruveta	Mješavina	Opterećenje N/mm ²			
				140	164	188	212
1. Ponavljanje	1	611	Ar	250000	250000	92568 o.m.	-
	2	621	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	250000	58176 o.m.
	3	631	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	250000	250000	87264
	4	641	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	81168	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-
	5v	651	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	250000	179231 o.m.
	6	661	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	250000	202008	-
	7	671	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	250000	179208 o.m.	-
2. Ponavljanje	8	681	He	250000	250000	5928	-
	1	612	Ar	250000	178835	-	-
	2	622	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	211105	-
	3	632	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	250000	250000	101681
	4	642	Ar/O ₂ (91/9)	250000	42600	-	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-
	5v	652	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	250000	60600
	6	662	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	134190	-	-
3. Ponavljanje	7	672	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	250000	74328	-
	8	682	He	250000	250000	42408	-
	1	613	Ar	250000	55380	-	-
	2	623	Ar/CO ₂ (91/9)	250000	250000	183768 o.m.	-
	3	633	Ar/CO ₂ (82/18)	250000	250000	58368	-
	4	643	Ar/O ₂ (91/9)	250000	250000	46968	-
	5	-	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-	-
	5v	653	Ar/O ₂ (82/18)	250000	250000	250000	14544 o.m.
	6	663	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	250000	250000	40128	-
	7	673	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	250000	250000	122208	-
	8	683	He	250000	76680	-	-

Na temelju dobivenih rezultata, prema Locatijevoj metodi opisanoj u poglavlju 4.6.8.2. određene su Wöhlerove krivulje, **slika 81**.



a) Stanje pokusa 1 - Ar (100).

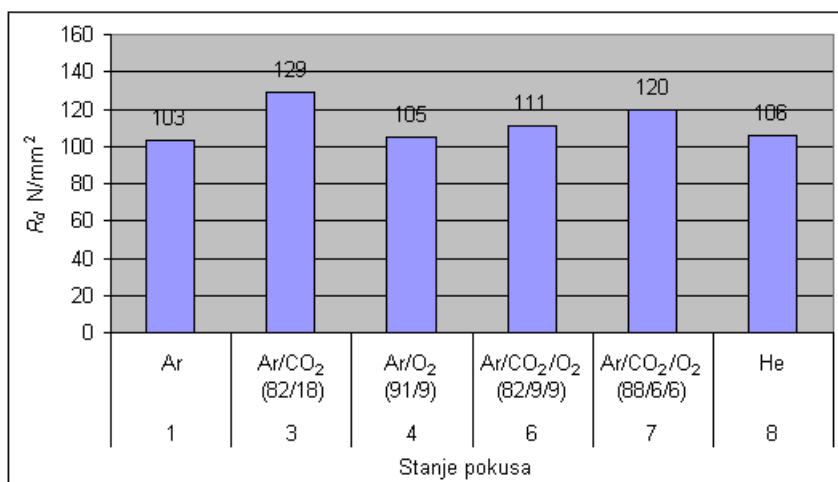
b) Stanje pokusa 3 - Ar/CO₂ (82/18).c) Stanje pokusa 4 - Ar/O₂ (91/9).d) Stanje pokusa 6 - Ar/CO₂/O₂ (82/9/9).e) Stanje pokusa 7 - Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).

f) Stanje pokusa 8 - He (100).

Slika 81. Wöhlerove krivulje, materijal Ck 60.

Rezultati ispitivanja u području vremenske izdržljivosti, doveli su do vertikalnog pomicanja pretpostavljenih Wöhlerovih krivulja prema nižim vrijednostima dinamičke izdržljivosti od teoretski pretpostavljene **slikom 46**. Stvarna dinamička izdržljivosti, **slika 81**, u stanju pokusa 1, nalazi se unutar pretpostavljenih krivulja s vjerojatnošću preživljavanja 10 i 90%, što znači da su krivulje dobro pretpostavljene na temelju podataka vremenske izdržljivosti. Nagib pravca također se nalazi u predviđenom području. U stanjima pokusa 3, 4, 6, 7 i 8 **slika 77**, dobivene su značajno veće vrijednosti dinamičke izdržljivosti od pretpostavljenih, koje izlaze iz očekivanog intervala. To znači da ova stanja pokusa nisu dobro pretpostavljena nagibima pravaca prema DVS-ovom katalogu [143], već je stvarni nagib pravca u vremenskom području u ovim stanjima pokusa manji.

Na **slici 82.**, prikazane su dinamičke izdržljivosti u ovisnosti o vrsti mješavine.



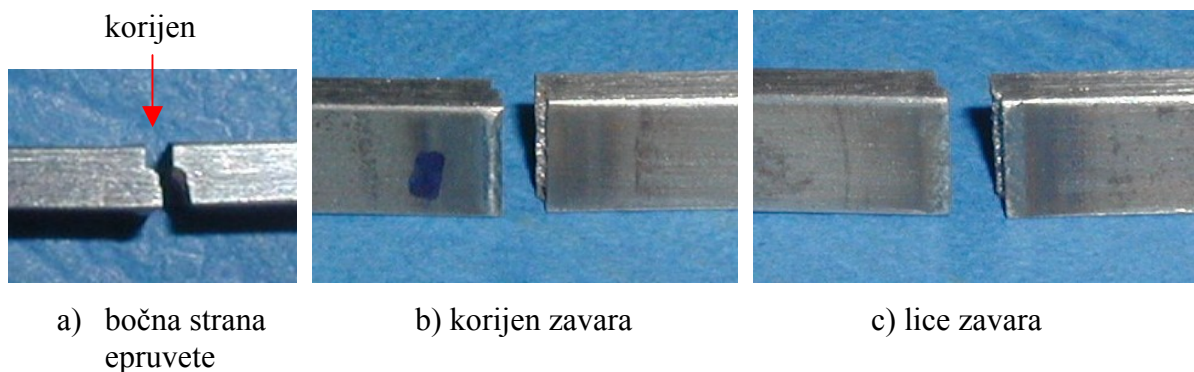
Slika 82. Dinamička izdržljivost zavarenog spoja u ovisnosti o vrsti mješavine, Ck 60.

Najviše ciklusa do loma pri stupnjevitom opterećenju, kod dva izvođenja, **tablica 46**, izdržala je epruveta u stanju pokusa 3, a najmanji epruveta u stanju pokusa 1. Tako je u stanju pokusa 3 dobivena najveća dinamička izdržljivost od 129 N/mm², a u stanju pokusa 1 najmanja dinamička izdržljivost od 103 N/mm², **slika 82**.

Stanja 1, 4, 6 i 8, **slika 82**, mogu se svrstati u grupu s najmanjom dinamičkom izdržljivošću. Ako se analiziraju poprečni presjeci zavarenih spojeva, **tablica 14**, u stanjima pokusa 1 i 8 može se uočiti oštri prijelaz korijen-osnovni materijal, odnosno mali radijus korijena zavara. Takav korijen ima veliko zarezno djelovanje, koje je uzrokovalo najmanju dinamičku izdržljivost. U stanjima pokusa 4 i 6 dobiveno je veliko nadvišenje korijena, također s oštrim prijelazom korijen/osnovni materijal. U stanjima pokusa 3 i 7, **tablica 14**, dobiveni su korijeni sa velikim radijusom korijena. Takav oblik korijena, sa malim zreznim djelovanjem, uzrokovao je najvišu dinamičku čvrstoću, **slika 82**.

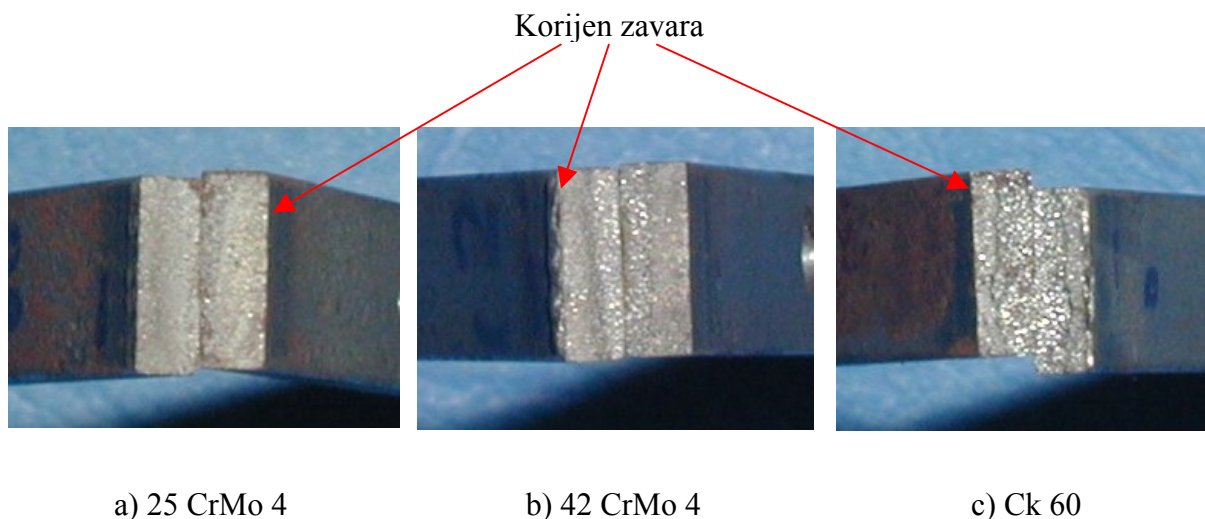
5.8.4. MJESTO LOMA

Na **slici 83.**, prikazana su karakteristična mjesta loma epruveta kod dinamičkog ispitivanja. Kod svih materijala i stanja pokusa lom je krenuo od korijena zavora i to okomito do polovice debljine epruvete, a onda skrenuo prema sredini zavora, gdje je i završio trenutnim lomom **slika 83.**



Slika 83. Prolaz loma kod dinamičkog ispitivanja.

Prijelomne površine zavora ne razlikuju se bitno s obzirom na vrstu zaštitne mješavine, dok razlika postoji s obzirom na vrstu materijala. Na **slici 84.** prikazane su prijelomne površine kod sva tri materijala, u stanju pokusa 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6). Može se uočiti područje trajnog loma i područje trenutnog loma u metalu zavora (sredina), te pogrubljenje površine loma s povećanjem sadržaja ugljika u čeliku.



Slika 84. Prijelomne površine kod sva tri materijala, stanje pokusa 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6).

5.8.5 ANALIZA REZULTATA

U **tablici 47.** prikazane su dinamičke izdržljivosti dobivene kod sva tri materijala.

Tablica 47. Dinamičke izdržljivosti R_d N/mm², n.r. – rezultat nije dobiven s dostupnim parametrima ispitivanja.

Stanje pokusa	Mješavina	Materijal		
		25 Cr Mo 4	42 CrMo 4	Ck 60
1	Ar	118	106	103
2	Ar/CO ₂ (91/9)	125	129	n.r.
3	Ar/CO ₂ (82/18)	90	114	129
4	Ar/O ₂ (91/9)	134	n.r.	105
5	Ar/O ₂ (82/18)	-	-	-
5v	Ar/O ₂ (82/18)	n.r.	n.r.	n.r.
6	Ar/CO ₂ /O ₂ (82/9/9)	109	n.r.	111
7	Ar/CO ₂ /O ₂ (88/6/6)	104	n.r.	120
8	He	109	n.r.	106

Dostupni parametri ispitivanja nisu dali rezultat kod svih mješavina, **tablica 47.** U stanju pokusa 5v gdje je oblik korijena najpovoljniji s gledišta zareznog djelovanja, nije bilo moguće ispitati dinamičku izdržljivost zavarenih spojeva, kod sva tri materijala. Povećanjem naprezanja, uglavnom je došlo do loma u osnovnom materijalu na mjestu uklještenja.

Kod materijala Ck 60 u stanju pokusa 2, **tablica 47**, najvjerojatnije se pojavilo neko neočekivano zarezno djelovanje u osnovnom materijalu i to u području uklještenja. Ono je uzrokovalo raniji lom epruveta u vremenskom području, kod sva tri ponavljanja, **tablica 45**. Lom u zavarenom spoju nije se pojavio niti kod stupnjevite promjene opterećenja, **tablica 46**, što je bilo za očekivati zbog zareznog djelovanja korijena. Za razliku od vremenskog područja, ovdje se lom u osnovnom materijalu dogodio pri relativno velikom broju ciklusa, što se događa kad je zarezno djelovanje korijena malo. Stoga se može zaključiti da je dinamička izdržljivost u stanju pokusa 2 veća nego u ostalim stanjima pokusa, osim eventualno stanja 5v.

Kod materijala 25 CrMo 4 i Ck 60, **tablica 47**, dobiveno je podjednako zarezno djelovanje u stanjima pokusa 1, 2 i 3 koji imaju sličan geometrijski oblik zavora s jedne strane i u stanjima pokusa 4, 6, 7 i 8, koji također međusobno imaju sličan geometrijski oblik, **tablice 10 i 14**. Iznimka je samo stanje 2 kod materijala Ck 60.

Kod materijala 42 CrMo4, **tablica 47**, zarezno djelovanje u stanjima pokusa 1, 2 i 3, veće je nego u stanjima pokusa 4, 6, 7 i 8, gdje je korijen povoljnijeg oblika pa je dinamička izdržljivost znatno veća, jer je lom nastupio u osnovnom materijalu pri daleko većem broju

ciklusa, **tablica 44**. Jedno objašnjenje je da materijal 42 CrMo 4 ima veću dinamičku izdržljivost od 25 CrMo 4 i Ck 60, što se ne slaže s literaturom [145] i **slikom 45**. Drugo objašnjenje je da su dobiveni korijeni povoljnijeg oblika, s manjim zareznom djelovanjem nego kod 25 CrMo 4 i Ck 60, što je vizualno dosta teško utvrditi iz **tablica 10, 12 i 14**. Ako se promotre dinamičke izdržljivosti, **tablica 47**, dobivene u stanjima pokusa 1, 2 i 3 kod sva tri materijala, može se utvrditi da se one značajno ne razlikuju, stoga se viša dinamička izdržljivost u stanjima pokusa 4, 6, 7 i 8 kod materijala 42 CrMo 4 može objasniti boljim oblikom korijena zavaru koji uzrokuje manju koncentraciju naprezanja.

S ovako postavljenim parametrima dinamičkog ispitivanja nije moguće točno odrediti dinamičku izdržljivost epruvete 5v kod sva tri materijala, te epruveta 4, 6, 7 i 8 kod 42 CrMo 4, jer je zarezno djelovanje uklještenja pri većim naprezanjima veće od zareznog djelovanja korijena zavaru i lomovi redovito nastupaju u osnovnom materijalu.

Matematičke modele nije bilo moguće odrediti, jer nisu dobiveni rezultati u svih 7 potrebnih stanja odnosno točki pokusa.

Na temelju dinamičkog ispitivanja epruveta, može se zaključiti da vrsta mješavine utječe preko oblika korijena zavaru na dinamička svojstva zavarenog spoja. Najbolji oblik korijena dobiven je u stanju pokusa 5v s mješavinom Ar/O₂ (82/18). Ali ta se mješavina pokazala nestabilnom prilikom laserskog zavarivanja. Maksimalna dinamička izdržljivost kod svakog materijala dobivena je s drukčijom mješavinom. To je uvijek bila mješavina s najpovoljnijim oblikom korijena kod pojedinog materijala: 25 CrMo 4 mješavina Ar/O₂ (91/9), 42 CrMo 4 mješavina Ar/CO₂ (91/9) i Ck 60 Ar/CO₂ (82/18).

Na temelju vizualnog izgleda korijena zavaru, veće zarezno djelovanje i oštriji prijelaz korijen/osnovni materijal dobiveno je u zaštiti argonom, helijem te mješavinama Ar/CO₂. Mješavine Ar/O₂ i Ar/CO₂/O₂ uzrokuju šire korijene i blaži prijelaz zavar/osnovni materijal. Stoga se optimalna mješavina Ar/CO₂/O₂ (88/6/6) iz stanja pokusa 7, također predložena na temelju analize geometrijskih karakteristika i kod dinamičkog ispitivanja, može proglasiti optimalnom.

5.9. ANALIZA MATEMATIČKIH MODELA PROMJENA MJERENIH VRIJEDNOSTI

U **tablici 48**, prikazani su dobiveni matematički modeli i pokazatelji prikladnosti pojedinog modela, za sve mjerene vrijednosti u ovom doktorskom radu.

Tablica 48. Matematički modeli geometrijskih značajki i mehaničkih svojstava, n.i. – nije ispitivano; osjenčana polja – matematički model nije značajan.

R. br.	Mjerena vrijednost	Matematički model i pokazatelji prikladnosti		
		25 CrMo 4	42 CrMo 4	Ck 60
1.	širina zavora b_{zav} mm	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0078 Prilagođeni R-kvadrat=0,9442	Linearan "Prob>F"=0,0001 Prilagođeni R-kvadrat=0,9958	Linearan "Prob>F"=0,0049 Prilagođeni R-kvadrat=0,8947
2.	širina korijena b_{kor} mm	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0060 Prilagođeni R-kvadrat=0,9909	Linearan "Prob>F"=0,1264 Prilagođeni R-kvadrat=0,4667	Linearan "Prob>F"=0,0166 Prilagođeni R-kvadrat=0,8069
3.	širina ZUT-a b_{zut} mm	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0136 Prilagođeni R-kvadrat=0,9795	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0239 Prilagođeni R-kvadrat=0,8820	Linearan "Prob>F"=0,0966 Prilagođeni R-kvadrat=0,5339
4.	širina obojenja b_{ob} mm	Kvadratni "Prob>F"=0,0037 Prilagođeni R-kvadrat=1,0000	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0270 Prilagođeni R-kvadrat=0,9592	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0298 Prilagođeni R-kvadrat=0,9549
5.	nadvišenje lica h_l mm	Linearan "Prob>F"=0,3003 R-kvadrat=0,4520	Linearan "Prob>F"=0,5833 R-kvadrat=0,2363	Linearan "Prob>F"=0,5454 R-kvadrat=0,2615
6.	nadvišenje korijena h_k mm	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0837 Prilagođeni R-kvadrat=0,7232	Linearan "Prob>F"=0,0634 Prilagođeni R-kvadrat=0,6222	Linearan "Prob>F"=0,3450 Prilagođeni R-kvadrat=0,1189
7.	površina poprečnog presjeka zavora A mm ²	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0094 Prilagođeni R-kvadrat=0,9859	Linearan "Prob>F"=0,1939 Prilagođeni R-kvadrat=0,3396	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0453 Prilagođeni R-kvadrat=0,8180
8.	maksimalna tvrdoća $HV_{0,5maks}$	Kvadratni "Prob>F"=0,0114 Prilagođeni R-kvadrat=0,9997	Linearan "Prob>F"=0,5926 Prilagođeni R-kvadrat=0,2302	Reducirani kvadratni "Prob>F"=0,0467 Prilagođeni R-kvadrat=0,8141
9.	udarna radnja loma Charpyjeva metoda KV J	Linearan "Prob>F"=0,3809 Prilagođeni R-kvadrat=0,0742	Linearan "Prob>F"=0,4345 Prilagođeni R-kvadrat=0,0113	Linearan "Prob>F"=0,3698 Prilagođeni R-kvadrat=0,0879
10.	udarna radnja loma - Zgagina metoda KJ	Linearan "Prob>F"=0,7086 R-kvadrat=0,1582	Linearan "Prob>F"=0,8210 R-kvadrat=0,0939	Linearan "Prob>F"=0,9731 R-kvadrat=0,0136
11.	mikrosmična čvrstoća τ_m N/mm ²	Linearan "Prob>F"=0,9009 R-kvadrat=0,0509	n.i.	n.i.
12.	mikrosmična plastičnost α %	Linearan "Prob>F"=0,5878 R-kvadrat=0,2333		
13.	mikrosmična žilavost W_s J/mm ²	Linearan "Prob>F"=0,7222 R-kvadrat=0,1502		

U ovom istraživanju dobiveni su kvadratni, reducirani kvadratni i linearni modeli mjerenih vrijednosti. Geometrijske značajke zavarenog spoja, osim nadvišenja lica i korijena zavara, mogu se dobro opisati pomoću matematičkih modela. Ispitivana mehanička svojstva ne mogu se opisati pomoću matematičkih modela, osim maksimalne tvrdoće u zavarenom spoju.

6. ZAKLJUČAK

Zavarivani su limovi od tri čelika za poboljšavanje: 25 CrMo 4, 42 CrMo 4 i Ck 60 (DIN EN 10083-1). Debljina limova iznosila je 2 mm. Zavarivan je sučeoni spoj. Zaštitne plinske mješavine dovođene su kroz koaksijalnu sapnicu. Pokusi su provedeni prema modelu pokusa s mješavinama [132].

• Kvaliteta zavarenog spoja

Prilikom zavarivanja sa svim zaštitnim mješavinama dobiveni su zavari visoke kvalitete (B) prema HRN EN ISO 13919-1. Kvaliteta (C) pojavila se jednom, ali kao posljedica smaknuća limova, što je povezano s tehnikom stezanja limova u napravu. U stanjima pokusa 4 Ar/O₂ (91/9) i 6 Ar/CO₂/O₂ (82/9/9) pojavila se pojačana oksidacija površine. Djelomični neprovar i neujednačeni oblik korijena pojavio se kod zaštitne mješavine koja sadrži 18% kisika u argonu, (stanje pokusa 5), kod sva tri materijala.

• Geometrijske značajke spojeva zavarenih laserom

Aktivna komponenta od 9 i 18% CO₂ u argonu, (stanja pokusa 2 i 3), ne utječe na promjenu geometrijskog oblika zavara u odnosu na čisti argon i helij. Aktivna komponenta 9% O₂, značajno utječe na promjenu geometrijskog oblika zavara, odnosno uzrokuje smanjenje širine lica zavara i povećanje širine korijena zavara. Istovremeni dodatak CO₂ i O₂ argonu kod ternarnih mješavina Ar/CO₂/O₂, 82/9/9 i 88/6/6, (stanja pokusa 6 i 7), također djeluje kao dodatak samog kisika, odnosno uzrokuje smanjenje širine lica zavara i povećanje širine korijena zavara.

Statističkom obradom rezultata, uglavnom su dobiveni linearni matematički modeli i reducirani kvadratni modeli s kvadratnim članovima Ar*O₂ i CO₂*O₂. Dodatak kisika argonu u linearnom modelu ima puno veći efekt na smanjenje svih geometrijskih značajka zavarenog spoja od dodatka CO₂, osim širine korijena gdje utječe na povećanje. U kvadratnom modelu, kisik do određenog postotka utječe na povećanje geometrijskih značajka, a nakon toga oslabljenje laserskog snopa na oblaku metalne pare uzrokuje smanjenje geometrijskih značajka.

• Mehanička svojstva spojeva zavarenih laserom

Statistička obrada rezultata pokazuje da, s ispitivanim parametrima, srednja vrijednost najbolje predviđa odziv maksimalne tvrdoće, udarne radnje loma, mikrosmične čvrstoće, mikrosmične plastičnost i mikrosmične žilavost zavarenog spoja kod sva tri materijala.

Srednja vrijednost tvrdoće dobivena kod 25 CrMo 4 iznosi 560 HV_{0,5}, kod 42 CrMo 4 iznosi 657 HV_{0,5} i kod Ck 60 iznosi 867 HV_{0,5}.

Srednja vrijednost udarne radnje loma dobivena Charpyjevom metodom kod 25 CrMo 4 iznosi 0,37 J, kod 42 CrMo 4 iznosi 0,19 J i kod Ck 60 iznosi 0,076 J. Srednja vrijednost udarne radnje loma dobivena Zgaginom metodom kod 25 CrMo 4 iznosi 0,46 J, kod 42 CrMo 4 iznosi 0,33 J i kod Ck 60 iznosi 0,087 J. Udarne radnje loma metala zavara opada s porastom sadržaja ugljika u čeliku.

Kod materijala 25 CrMo 4 dobivena je mikrosmična čvrstoća u iznosu od 1003 N/mm², mikrosmična plastičnost od 35% i mikrosmična žilavost od 0,38 J/mm². Materijali 42 CrMo 4 i Ck 60 nisu ispitivani, zbog nedostupnosti opreme, odnosno noža veće tvrdoće od ispitivanih materijala.

• Dinamička izdržljivost

Matematičke modele nije bilo moguće odrediti, jer nisu dobiveni rezultati u svih 7 potrebnih stanja odnosno točki pokusa. S ovako postavljenim parametrima dinamičkog ispitivanja nije moguće točno odrediti dinamičku izdržljivost epruvete 5v kod sva tri materijala, te epruveta 4, 6, 7 i 8 kod 42 CrMo 4, jer je zarezno djelovanje uklještenja pri većim naprezanjima veće od zareznog djelovanja korijena zavara i lomovi redovito nastupaju u osnovnom materijalu.

Vrsta mješavine utječe preko oblika korijena zavara na dinamička svojstva zavarenog spoja. Najbolji oblik korijena dobiven je u stanju pokusa 5v s mješavinom Ar/O₂ (82/18). Ali ta se mješavina pokazala nestabilnom prilikom laserskog zavarivanja. Maksimalna dinamička izdržljivost kod svakog materijala dobivena je s drukčijom mješavinom. To je uvijek bila mješavina s najpovoljnijim oblikom korijena.

Na temelju vizualnog izgleda korijena zavara, veće zarezno djelovanje i oštriji prijelaz korijen/osnovni materijal, dobiveno je u zaštiti argonom, helijem te mješavinama Ar/CO₂. Mješavine Ar/O₂ i Ar/CO₂/O₂ uzrokuju šire korijene i blaži prijelaz zavar/osnovni materijal. Stoga se optimalna mješavina Ar/CO₂/O₂ (88/6/6) (stanje pokusa 7), također predložena na temelju analize geometrijskih značajka i kod dinamičkog ispitivanja može proglasiti optimalnom.

• Usporedba argon - helij

Utjecaj vrste zaštitnog plina argona i helija na kvalitetu, geometrijske značajke i mehanička svojstva zavarenog spoja u ovom istraživanju nije se pokazao značajnim. Kako helij kod zavarivanja čelika za poboljšavanje pomoću Nd:YAG lasera, s istraživanim parametarima ne nudi nikakve prednosti u odnosu na argon, može se zaključiti da upotreba znatno skupljeg plina helija u ovom slučaju nije opravdana.

Provedenim istraživanjima u sklopu ovog doktorata došlo se do slijedećih spoznaja:

- zaštitne plinske mješavine na bazi argona s dodatkom ugljik-dioksida i/ili kisika prikladne su za zavarivanje čelika za poboljšavanje Nd:YAG laserom,
- korištenjem aktivnih plinskih mješavina u ovom istraživanju nije dobiveno povećanje unosa energije u odnosu na čisti argon i helij, odnosno nije došlo do povećanja brzine zavarivanja,
- optimalna zaštitna plinska mješavina za lasersko zavarivanje čelika Nd:YAG laserom sadrži 88% argona, 6% ugljik-dioksida i 6% kisika (stanje 7). Geometrijski oblik spoja zavarenog s navedenom mješavinom povoljniji je nego kod argona jer ima veću širinu korijena, koja može kompenzirati netočnost pozicioniranja limova odnosno netočnost vođenja laserskog snopa, kako ne bi nastale greške vezivanja. Na taj način mogu se sniziti troškovi opreme za stezanje i pozicioniranje u industrijskoj proizvodnji konstrukcija koje se spajaju laserskim zavarivanjem,
- sastav aktivne zaštitne plinske mješavine utječe na promjenu geometrijskih značajka zavarenog spoja i može se dobro opisati pomoću dobivenih matematičkih modela, čime je potvrđena prva hipoteza rada,
- pomoću dobivenih matematičkih modela moguće je optimiranje sastava aktivne zaštitne plinske mješavine s obzirom na geometrijske značajke spojeva zavarenih laserom,
- sastav aktivne zaštitne plinske mješavine ne utječe značajno na promjenu mehaničkih svojstava (tvrdoća, udarna radnja loma, čvrstoća i deformabilnost) u odnosu na upotrebu čistog argona i helija. Ispitivana mehanička svojstva ne mogu se opisati pomoću matematičkih modela,

- značajno poboljšanje dinamičke izdržljivosti dobiveno je s mješavinama Ar/O₂ i Ar/CO₂/O₂ koje daju oblik korijena zavora s malim radijusom i kutom nadvišenja korijena. Predložena optimalna mješavina 7 Ar/CO₂/O₂ (88/6/6) za primjenu kod dinamički opterećenih konstrukcija, može i treba zamijeniti čisti argon, jer daje oblik zavora s manjom koncentracijom naprezanja u korijenu,
- količina apsorbirane energije u osnovnom materijalu ovisi o vrsti zaštitnog plina odnosno veličini oblaka metalne pare, jer je kod mješavine Ar/O₂, (82/18) dobivena smanjena penetracija pri konstantnoj brzini zavarivanja. Oslabljenje snopa u oblaku metalne pare ovisi i o vrsti materijala, a ne samo o vrsti zaštitnog plina, jer je potpuna penetracija dobivena pri smanjenoj, ali kod svakog materijala različitoj brzini zavarivanja.

S mješavinom 5v, Ar/O₂ (82/18) dobiven je oblik zavora s najmanjom koncentracijom naprezanja kod sva tri materijala, ali je proces zavarivanja s tom mješavinom nestabilan. Navedena mješavina sadrži previše kisika koji počinje izazivati oslabljenje laserskog snopa na oblaku metalne pare iznad kratera. Stoga bi predmet daljnjih istraživanja mogao biti pronalaženje omjera komponenti mješavine, koja će dati oblik korijena zavora s malom koncentracijom naprezanja, zadržavajući pritom glatko lice zavora bez ugorina, te proces zavarivanja sa stabilnom penetracijom i dobrim oblikom korijena po cijeloj dužini zavora. Pokus odnosno simplex rešetku treba postaviti tako da sadrži točke 4, 5, 6 i 7, uz dodatak novih točaka u tom području, kako bi se dobili što pouzdaniji rezultati.

7. LITERATURA

- [1] P. Oakley, R. C. Crafter, Laser technology in materials processing, Euro Laser Academy, Liverpool, 1994.
- [2] S. Lugomer, M. Stipančić, Laser-fizikalne osnove, konstrukcija i primjene, IGKRO Svjetlost, Sarajevo, 1997.
- [3] H. Weber, Grundlagen, U: Materialbearbeitung durch Laserstrahl, ed: P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, str. od 2.1.1.1 do 12, DVS, Düsseldorf, 1993.
- [4] P. Kulina, H. Ringelhan, Laserprinzip, U: Materialbearbeitung durch Laserstrahl, ed: P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, str. od 2.1.2.1 do 22, DVS, Düsseldorf, 1993.
- [5] H. Richter, Laser – Das besondere Licht für die Materialbearbeitung, BUGH/VDI, Wuppertal, 1997.
- [6] F.R. Aussenegg, The Laser Principle – How Laser Radiation is Generated, Zbornik radova: Obradba materijala laserom, str. od 1 do 8, Opatija, lipanj, 1995.
- [7] J.K. Kristensen, Trends and Developments within Welding and Allied Processes, Zbornik radova: IIW International Conference, str od 1 do 22 , Kopenhagen, lipanj, 2002.
- [8] J.K. Larsson, Overview of Joining Technologies in the Automotive Industry, Zbornik radova: IIW International Conference, str. od D-I 1 do D-I 17, Kopenhagen, lipanj, 2002.
- [9] D. Farson, R.F. Duhamel, Taking advantage of laser welding, The Fabricator, 5, str. od 35 do 41, svibanj, 2001.
- [10] H. Kaufmann, Laser welding – will it have any significant impact on welding ?, Svetsaren, Vol. 56, 2-3, str. od 73 do 75, ožujak, 2001.
- [11] ..., Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung, Rofin Sinar, Hamburg, 1998.
- [12] ..., Qualitätssicherung von Nd:YAG-Laserstrahlschweißarbeiten metallischer Werkstoffe – Verfahren und Laserstrahlschweißanlagen, Merkblatt DVS 3207, Dio 1, 1996.
- [13] ..., Schweißen mit Festkörperlaser, Handbuchreihe: Laser in der Materialbearbeitung, Band 2, VDI Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [14] H. Weber, High Power Solid State Lasers and Fibre Transmission, U: Fundamentals and Sources, str. od 1 do 56, Euro Laser Academy, Aachen, 1993.
- [15] G. Herziger, R. Wester, Gas Lasers, U: Fundamentals and Sources, str. od 1 do 112, Euro Laser Academy, Aachen, 1993.
- [16] S. Kralj, Z. Kožuh, B. Bauer, Flexible manufacturing system robot-laser, Zbornik radova, 2. Međunarodna konferencija Business Systems Management - UPS 2001, str. od 133 do 137, Mostar, svibanj, 2001.
- [17] R. Peters, Roboter-Laserstrahlschweißen (Nd:YAG) von Edelstahlrohren, Zbornik radova, Roboter '99, Neue Wege zum wirtschaftlichen Schweißen mit Robotern und Automaten, str. od 33 do 36, Fellbach, lipanj, 1999.
- [18] F.K. Guedel, P. Gyax, Optimierte CO₂-Laser-Materialbearbeitung durch on-line Prozessüberwachung und –steuerung, Techpress, 1, str. od 20 do 24, siječanj, 1998.
- [19] ..., Recommended Practices for Laser Beam Welding, Cutting, and Drilling, ANSI/AWS C7.2:1998, AWS, Miami, 1998.
- [20] L. Dorn, H. Grutzeck, S. Jafari, Schweißen und Löten mit Festkörperlaser, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [21] E.W. Kreutz, Wechselwirkung Laserstrahlen – Werkstoff, U: Materialbearbeitung durch Laserstrahl, P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, pp.2.3.1.1-30, DVS, Düsseldorf, 1993.

- [22] H. Hügel, F. Dausinger, Interaction Phenomena and Energy Coupling in Laser Treatment Processes, U: Fundamentals and Sources, str. od 1 do 49, Euro Laser Academy, Aachen, 1993.
- [23] M. Cantello, M. Penasa, Laser Welding, U: Applications 1, str. od 1 do 64, Euro Laser Academy, Aachen, 1993.
- [24] K. Grubić, T. Misir, Zavarivanje laserom, Zavarivanje, 37, ½, str. od 13 do 24, veljača, 1994.
- [25] ..., Laserstrahltechnologien in der Schweißtechnik, Bd. 86, DVS Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [26] W.D. Scharfe, Laserstrahlschweißen mit dem CO₂-Laser-Möglichkeiten und Grenzen, U: Materialbearbeitung durch Laserstrahl, ed: P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, str. od 3.3.1.1 do 24, DVS, Düsseldorf, 1993.
- [27] H. Schobbert, J. Gebur, M. Römer, Prinzip des Laserstrahlschweißens und Verfahrenstechnische Grundlagen, U: Materialbearbeitung durch Laserstrahl, ed: P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, str. od 3.3.3.1 do 15, DVS, Düsseldorf, 1993.
- [28] S. Kralj, Z. Kožuh, B. Bauer, K. Prlić, Utjecajni čimbenici pri laserskom zavarivanju, Zbornik radova Matrib, str. od 165 do 173, Vela Luka, lipanj, 2000.
- [29] L. Dorn, S. Jafari, Bearbeitungsprozesse, U: Materialbearbeitung durch Laserstrahl, ed: P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, str. od 2.3.2.1 do 30, DVS, Düsseldorf, 1993.
- [30] P. Limley, Parameter beim Laserstrahlschweißen, U: Laserstrahlschweißen, Prüfen, Bewerten, SLV München, München, svibanj, 2000.
- [31] ..., Qualitätssicherung von CO₂-Laserstrahlschweißarbeiten, Prüfen von Schweißparametern, Merkblatt, DVS 3203 Dio 2, 1998.
- [32] M. Ono, A. Yoshitake, M. Ohmura, Laser weldability of high strength steel sheets in fabrication of tailor welded blanks, NKK Technical Review, 86, str. od 13 do 18, srpanj, 2002.
- [33] M. Naeem, YAG laser welding of thin sheet, Welding & Metal Fabrication, Vol. 68, 6, str. od 6 do 10, lipanj, 2000.
- [34] J.K. Larsson, Laser welding: A mature process technology with various application fields, Svetsaren, Vol. 54, 1-2, str. od 43 do 50, siječanj, 1999.
- [35] J. Xie, A. Kar, Laser Welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation, Welding Journal, Vol. 78, 10, str. od 343 do 348, rujan, 1999.
- [36] J.L. Frost, K.R. Ayres, S.T. Riches, Comparison of Joining Processes for Tailored Blank Technology, Zbornik radova CISFFEL 6, str. od 407 do 416, Tulon, Lipanj, 1998.
- [37] Z. Li, S.L. Gobbi, Laser welding for lightweight structures, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 70, 1-3, str. od 137 do 144, listopad, 1997.
- [38] W. Klinker, Laserschweißen revolutioniert den Karosseriebau, Europäischer Lasersmarkt, Posebno izdanje, str. od 16 do 24, studeni, 2001.
- [39] A. Englhard, P. Rippl, Anwendungsbeispiele von Hochleistungslasern in der Automobilfertigung-CO₂, Nd:YAG und Diodenlaser, Zbornik radova Roboter '99, Neue Wege zum wirtschaftlichen Schweißen mit Robotern und Automaten, str. od 121 do 129, Fellbach, lipanj, 1999.
- [40] R. Rodrigues, L. Bordalo, N. Sobrai, L. Quintino, Laser Welding in Automotive Industry. An Application: Joining Hinges to Car Doors Reinforcement Structure, Doc. IIW – IV/737/99.
- [41] C. Emmelmann, Stand der Lasertechnik am Beispiel schweißtechnischer Anwendungen im Automobilbau, Rofin Sinar, Hamburg, travanj, 1997.

- [42] F.K. Guedel, Technologie und Wissenstransfer: Modernste Fertigungstechnologie auf dem Prüfstand für die Automobilindustrie, Techpress, 1, str. od 21 do 26, siječanj, 1997.
- [43] J. Hornig, Laserstrahlschweißen an der BMW 5er Baureihe, Zbornik radova Dünnblech -Verarbeitung, str. od 205 do 230, Erding, travanj, 1997.
- [44] A. Rief, Schweißen und Schneiden mit dem Laserstrahl bei Mercedes-Benz, U: Laserschweißgerechtes Konstruieren, ed: D. Radaj, R. Koller, U. Diltthey & O. Buxbaum, str. od 161 do 166, DVS, Düsseldorf, 1994.
- [45] L. Manzon, Power shift in the shipyards, Welding+Joining Europe, str. od 21 do 22, 2, veljača, 1999.
- [46] S. Kralj, Z. Kožuh, B. Bauer, Mogućnosti primjene lasera u brodogradnji, Zbornik radova Zavarivanje u pomorstvu, str. od 547 do 558, Haludovo, listopad, 1998.
- [47] J.K. Kristensen, What does Laser Welding offer to Structural Steels?, Zbornik radova 3rd European Conference on Joining Technology, Eurojoin 3, str. od 529 do 538, Bern, ožujak, 1998.
- [48] D. Schuöcker, Heavy Section Laser Welding, Zbornik radova Obradba materijala laserom, str. od 103 do 113, Opatija, lipanj, 1995.
- [49] R. Poprawe, K. Behler, Funktionsangepaßte Konstruktionen für das Laserstrahlschweißen im Karosseriebau, Zbornik radova Dünnblech-Verarbeitung, str. od 189 do 204, Erding, travanj, 1997.
- [50] F.Welsch, Richtlinien zum laserschweißgerechten Gestalten, U: Laserschweißgerechtes Konstruieren, ed: D. Radaj, R. Koller, U. Diltthey & O. Buxbaum, str. od 43 do 101, DVS, Düsseldorf, 1994.
- [51] M. Novosel, D. Krumes, Željezni materijali, 2. dio, Konstrukcijski čelici, Strojarški fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1995.
- [52] ..., Qualitätssicherung von CO₂-Laserstrahlschweißarbeiten, Laserstrahl-Schweißbeignung von metallischen Werkstoffen, Merkblatt, DVS 3203 Dio 3, 1990.
- [53] ..., DIN 8528-1, Schweißbarkeit; metallische Werkstoffe, Begriffe, 1973.
- [54] M. Beckert, A. Neumann, Grundlagen der Schweißtechnik, Schweißbarkeit der Metalle, VEB Verlag Technik, Berlin, 1980.
- [55] Z. Lukačević, Zavarivanje, Strojarški fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- [56] I. Hrivnjak, Zavarljivost čelika, IRO "Građevinska knjiga", Beograd, 1982.
- [57] A.W.E. Nentwig, Untersuchungen zur Schweißbeignung von Stählen zum Laserstrahlschweißen mit CO₂-Hochleistungslasern, AiF-Bericht Nr. 9803, SLV-München, 1997.
- [58] P. Seyffarth, J. Hoffmann, Umwandlungsverhalten un- und niedriglegierter Stähle unter besonderer Berücksichtigung der für das Laserstrahlschweißen typischen Temperatur-Zeit-Zyklen, U: Qualifizierung von Laserverfahren, DVS 205, Düsseldorf, 1999.
- [59] M. Kutsuna, A. Kikuchi, Thermal Cycles and Microstructures in Laser Welding of Carbon Steel, IIW DOC IV-597-93.
- [60] S. Kralj, B. Bauer, A. Mustapić, Influence of the Welding Process on the Mechanical Properties of the Welded Joint, Zbornik radova 3rd International Conference «UPS 2004», str. od 105 do 110, Mostar, rujan, 2004.
- [61] S. Kralj, B. Bauer, A. Mustapić, Influence of the Welding Process on The Hardness of the Welded Joint, Zbornik radova 15^{as} Jornadas Tecnicas de Soldadura, str. od 100 do 113 Madrid, ožujak, 2004.
- [62] S. Kralj, B. Bauer, Z. Kožuh, Laser welding of thin sheet heat-treatable steel, Zbornik radova 14th International DAAAM Symposium, str. od 245 do 246, Sarajevo, listopad, 2003.

- [63] H. Cramer, P. Limley, H. Blinzler, Influence of the component geometry and the alloying elements on the fabrication weldability of steels for laser-beam welding, *Schweissen und Schneiden/Welding and Cutting*, Vol. 55, 5, str. od 290 do 294, svibanj, 2003.
- [64] B. Bauer, Lasersko zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2002.
- [65] S. Kralj, B. Bauer, Z. Kožuh, Laser welding of steels with higher carbon content, *Zbornik radova 4th European Conference on Joining Technology, EUROJOIN 4*, str. od 595 do 602, Dubrovnik - Cavtat, svibanj, 2001.
- [66] E.S. Ng, I.A. Watson, Investigation of Nd:YAG laser welding with elliptical and focused beams, *Lasers in Engineering*, Vol 10., 5, str. od 1 do 18, svibanj, 2000.
- [67] G. Weinhhammer, Schweißbeignung von legierten und unlegierten Stählen, U: *Laserstrahlschweißen, Prüfen, Bewerten*, str. od 1 do 8, SLV München, München, svibanj, 2000.
- [68] B. Brenner, S. Nägler, A. Wetzig, Laser beam welding of heat-treatable steels, *The Fabricator*, 6, str. od 28 do 31, lipanj, 1999.
- [69] U. Dilthey, S. Bohm, G. Trager, A. Ghandehari, Laser-beam and electron-beam welding of material combinations consisting of cast iron and case-hardening or heat-treatable steels, *Schweissen und Schneiden/Welding & Cutting*, Vol. 50, 11, str. od 214 do 216, studeni, 1998.
- [70] U. Dilthey, F. Lüder: Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen höherkohlenstoffhaltiger Stähle unter Einsatz von Zusatzwerkstoff, *Abschlußbericht DFG Di 434/18-4*, ISF Aachen, Aachen, 1997.
- [71] E.S. Ng, I.A. Watson, Characteristics of CO₂ laser welded high carbon steel gauge plate, *Journal of Laser Applications*, 9, str. od 15 do 21, rujan, 1997.
- [72] M. Kutsuna, Metallurgical Aspects in Laser Welding of Steels and Aluminium Alloys, *Zbornik radova ICALEO*, str. od 122 do 131, Detroit, listopad, 1996.
- [73] T. Webber, High power CW Nd:YAG laser welding of high carbon steel with pre- and post-weld heat treatment, *Zbornik radova CISFFEL 5*, str. od 227 do 234, La Baule, lipanj, 1993.
- [74] H. J. Krause, Schweißbeignung der Werkstoffe und Konstruktive Gestaltung, U: *Materialbearbeitung durch Laserstrahl*, ed: P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, str. od 3.3.2.1 do 16, DVS, Düsseldorf, 1993.
- [75] J.W. Yoon, Y.H. Han, S.H. Hwang: Laser beam welding of medium and high carbon steels, U: *Beam Technology*, str. od 181 do 184, DVS, Düsseldorf, 1991.
- [76] ..., DIN EN 10083-1, Vergütungsstähle - Dio 1: Technische Lieferbedingungen für Edelstähle (enthält Änderung A1:1996), 1996.
- [77] B. Brenner, J. Standfuß, B. Winderlich, Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen zum rissfreien Fügen von härtbaren Stählen, U: *Schweißen und Schneiden 2001*, str. od 289 do 297, DVS, Düsseldorf, 2001.
- [78] J. Xie, Dual Beam Laser Welding, *Welding Journal*, Vol. 81, 10, str. od 223 do 230, listopad, 2002.
- [79] E.S. Ng, I.A. Watson, A multi – factorial approach to investigate the Nd:YAG laser welding with single and multiple laser beams, *Lasers in Engineering*, 10, str. od 161 do 175, listopad, 2000.
- [80] Y.N. Liu, E. Kannatey-Asibu, Jr., Experimental Study of Dual-Beam Laser Welding of AISI 4140 Steel, *Welding Journal*, Vol. 76, 9, rujan, 1997.
- [81] ..., Verbindungsschweißen hochfester Stahlbleche für den Karosseriebau mit Wärmenachbehandlung zur Erhöhung der Nahtduktilität, *Abschlussbericht P526, LZH Hannover*, Hannover, 2004.

- [82] B. Brenner, J. Standfuß, U. Stamm, B. Winderlich, Laser Induction Welding - A New Technology for Welding of Powertrain Components, Zbornik radova, European Automotive Laser Application, str. od 367 do 398, Bad Nauheim/Frankfurt, siječanj, 2002.
- [83] B. Brenner, R. A. Gnann, Th. Lynen, C. Duschek, D. Grüneberg, Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen von Antriebswellen für Automobile, Laser - Praxis, 1, str. od 1 do 4, siječanj, 1998.
- [84] M. Hendricks, Qualitätsuntersuchungen an Laserstrahlschweißverbindungen un-, niedrig- und hochlegierter Stähle, Disertacija RWTH Aachen, DVS-Berichte Band 206, DVS, Düsseldorf, 1991.
- [85] K. H. Katerbau, D. Willer, Prüfung von Laserstrahl-Schweißverbindungen, U: Fügen mit CO₂-Hochleistungslasern, VDI-TZ, Düsseldorf, 1992.
- [86] S. Kralj, B. Bauer, Ocjenjivanje kvalitete laserom zavarenih spojeva, Zbornik radova Matest 03, str. od 205 do 216, Brijuni, rujan, 2003.
- [87] F. Weber, M. Harzenmoser, The characterization of welded joints at EMPA, Zbornik radova Eurojoin 3, str. od 839 do 845, Bern, ožujak, 1998.
- [88] ..., Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Elektronen- und Laserstrahl-Schweißnähten, Merkblatt, DVS 3210, 1995.
- [89] ..., HRN EN ISO 6520-1, Zavarivanje i srodni procesi - Razredba geometrijskih grešaka u metalnim materijalima - 1. dio: Zavarivanje taljenjem, 1999.
- [90] ..., HRN EN ISO 13919-1, Zavarivanje - Elektronskim snopom i laserom izvedeni zavari - Upute za razine kakvoće s obzirom na greške - 1. dio: Čelik, 1999.
- [91] ..., EN ISO 18265, Metallic materials, Conversion of hardness values, 2003.
- [92] ..., HRN EN 895, Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala - Poprečno vlačno ispitivanje, 1999.
- [93] H. Haferkamp, F. von Alvensleben, C. Schmid, A. Bormann, Werkstoffanalytische Untersuchungen zur Rißeinleitung und -verlauf an gekerbten Laserstrahlschweißnähten, U: Qualifizierung von Laserverfahren, str. od 77 do 80, DVS, Düsseldorf, 1999.
- [94] G. Kuschner, A. Rösner, Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen durch die Anerkennung des Laserschweißprozesses nach europäischen Normen, insbesondere für den gesetzlichen Bereich, U: Qualifizierung von Laserverfahren, str. od 91 do 94, DVS, Düsseldorf, 1999.
- [95] H. Knissel, Entwicklung eines Prüf- und Bewertungskonzeptes für laserstrahlgeschweißte Verbindungen, Disertacija Univ. Karlsruhe, DVS, Düsseldorf, 1999.
- [96] ..., HRN EN 910, Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala - Ispitivanje savijanjem, 1999.
- [97] ..., ISO 20482, Metallic materials - Sheet and strip - Erichsen cupping test, 2003.
- [98] ..., HRN EN 10045-1, Metalni materijali - Ispitivanje žilavosti prema Charpyju - 1. dio: Ispitna metoda, 2003.
- [99] G. Kalla, M. Funk, E. Beyer, B. Müsken, H.J. Kaiser, K.H. Piehl, Material properties of CO₂-laser beam welded steels StE 355 and StE 460, U: Beam Technology, str. od 152 do 157, DVS, Düsseldorf, 1991.
- [100] L. Devillers, D. Kaplan, The metallurgical aspects of laser welding of structural steels, Welding in the World, Vol. 29, 11/12, str. od 334 do 337, prosinac, 1991.
- [101] P. Langenberg, M. Nagel, F. Lüder, W. Bleck, U. Dilthey, Analytische Untersuchung der Prüfproblematik an laserstrahlgeschweißten Verbindungen unter Berücksichtigung der zu tolerierenden Härtespitzen, U: Qualifizierung von Laserverfahren, str. od 45 do 48, DVS, Düsseldorf, 1999.

- [102] R. Zgaga, A new method of determining the toughness of brittle materials, Zbornik radova, Anual foundry congress, Leoben, rujan, 1969.
- [103] R. Zgaga, Razrada nove metode određivanja udarne žilavosti krhkih metalnih i nemetalnih materijala, Zagreb, 1966.
- [104] L. Dorn, G. Niebuhr, I. Villain, Ermittlung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften kleiner Gefügebereiche mittels Mikroscherprüfung, HTM, Vol. 34, 5, str. od 227 do 232, svibanj, 1979.
- [105] X.P. Zhang, L. Dorn, Estimation of the local mechanical properties of pipeline steels and welded joints by use of the microshear test method, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, str. od 37 do 42, siječanj, 1998.
- [106] X.P. Zhang, L. Dorn, Y.W. Shi, Correlation of the microshear toughness and fracture toughness for pressure vessel steels and structural steels, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 79, str. od 445 do 450, ožujak, 2002.
- [107] X.P. Zhang, L. Dorn, Investigation on the possibility of using the microshear test as a surveillance method to estimate the mechanical properties and fracture toughness of nuclear pressure vessel steel, A508CL3, and its joints welded by narrow-gap submerged-arc welding, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 76, str. od 35 do 41, rujan, 1999.
- [108] L. Dorn, G. Niebuhr, G. Wawer, Aussagen des Mikrozug- und Mikroscherversuchs zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von Stählen, insbesondere von einzelnen Bereichen einer Schweißverbindung, Schweißen und Schneiden, Vol. 29, 7, str. od 246 do 249, srpanj, 1977.
- [109] B. Lei, L. Dorn, Weiterentwicklung der Mikroscherprüfung zur Prüfdichte- und Genauigkeitssteigerung, Schweißen und Schneiden, Vol. 46, 7, str. od 336 do 338, srpanj, 1994.
- [110] ..., DIN 50100, Werkstoffprüfung; Dauerschwingversuch, Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung, 1978.
- [111] M. Franz, Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [112] M. Ring, Schwingfestigkeit von Laserstrahlschweißverbindungen hochfester Baustähle, Disertacija RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 1995.
- [113] B. Winderlich, B. Brenner, J. Standfuß, V. Fux, E. Beyer, Steigerung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen, U: DVM-Bericht br. 128, str. od 295 do 305, DVM, Berlin, 2001.
- [114] B. Winderlich, B. Brenner, E. Beyer, Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Feinkornbaustähle, U: DVM-Bericht br. 232, str. od 315 do 324, DVM, Berlin, 2000.
- [115] B. Winderlich, B. Brenner, E. Beyer, Erarbeitung von Bewertungskriterien für die Schwingfestigkeit von Laserstrahlschweißverbindungen, U: Qualifizierung von Laserverfahren, str. od 62 do 65, DVS, Düsseldorf, 1999.
- [116] M. Eibl, C.M. Sonsino, H. Kaufmann, G. Zhang, Fatigue assessment of laser welded thin sheet aluminium, International Journal of Fatigue, Vol 25, str. od 719 do 731, rujan, 2003.
- [117] C.M. Sonsino, H. Kaufmann, D. Petring, M. Kasimir, Einfluß von Fertigungsparametern auf die Schwingfestigkeit von laserstrahlgeschweißten Stumpfstoßen aus Aluminium, U: Qualifizierung von Laserverfahren, str. od 66 do 71, DVS, Düsseldorf, 1999.
- [118] C.M. Sonsino, F. Müller, Schwingfestigkeit lasergeschweißter Verbindungen, U: Laserschweißgerechtes Konstruieren, ed: D. Radaj, R. Koller, U. Diltthey & O. Buxbaum, str. od 161 do 166, DVS, Düsseldorf, 1994.

- [119] A. Hobbacher, V. Belenki, Schwingfestigkeit laserstrahlgeschweißter Verbindungen aus Stahl, Schweißen und Schneiden, Vol 53, 2, str. od 80 do 86, veljača, 2001.
- [120] H. Remes, Fatigue strength of laser and hybrid welded joints, Zbornik radova, The annual symposium of the Maritime Institute of Finland, Sjäkulla, lipanj, 2002
- [121] J.K. Kristensen, What does Laser Welding offer to Structural Steels ?, Zbornik radova Eurojoin 3, str. od 529 do 538, Bern, ožujak, 1998.
- [122] F. Weichel, H. Petershagen, Fatigue strength of laser welded structural steels with thicknesses between 8 and 20 mm, IIW-Doc. XIII-1590-95, 1995.
- [123] ..., Untersuchung des Dauerfestigkeitsverhaltens von Laserschweißverbindungen unterschiedlicher Material- und Blechdickenkombinationen sowie Stoßgeometrien, Abschlußbericht, SLV Halle, Halle, 1995.
- [124] M. Eibl, C.M. Sonsino, G. Zhang, Assessment of the fatigue strength of laser beam welded steel joints for chassis by different local concepts, IIW-Doc. XIII-1877-01, Ljubljana, 2001.
- [125] M. Eibl, C.M. Sonsino, Stand der Technik zur Schwingfestigkeitsberechnung von laserstrahlgeschweißten Dünnscheiben aus Stahl, U: DVM-Bericht br. 668, str. od 155 do 171, Berlin, 2001.
- [126] M. Faerber, Process Gases for Laser Welding, Zbornik radova CISFFEL 6, str. od 837 do 841, Tulon, lipanj, 1998.
- [127] H. Schmalenstroth, M. Pelster, J. Gröninger, K. Ilcker, K. Dickmann, Investigations into laser beam welding with 1-kW-Nd:YAG lasers using various shielding gas mixtures, Welding & Cutting, 7, str. od 114 do 115, srpanj, 1997.
- [128] K. Niederberger, J. Scholz, Technische Gase, U: Materialbearbeitung durch Laserstrahl, ed: P. Kulina, K. Richter, H. Ringelhan & H. Weber, str. od 3.1.2.1 do 19, DVS, Düsseldorf, 1993.
- [129] ..., Laser Welding, Technical information, TRUMPF, Stuttgart, 1994.
- [130] ..., Schweißschutzgase, Linde, Höllriegelskreuth, 2001.
- [131] H. Orlick, T. Schlechte, M. Gramsch, Hochleistungs-Festkörperlaser zum Schweißen, Schneiden und Hartlöten, U: DVS Bericht 170, str. od 121 do 125, DVS, Düsseldorf, 1995.
- [132] J. A. Cornell, Experiments with mixtures, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [133] N. Šakić, Optimiranje parametara zavarivačkih procesa, Zavarivanje, Vol. 27, 2, str. od 149 do 153, veljača, 1984.
- [134] N. Šakić, Matematičko modeliranje i optimiranje procesa zavarivanja uz primjenu računala, Zavarivanje, Vol. 33, 4-5, str. od 205 do 210, svibanj, 1990.
- [135] V. Panić, Utjecaj plinova pri zavarivanju na svojstva zavara, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [136] ..., Erprobung und Vergleich der Arbeitstechniken beim Laserstrahlschneiden und -schweißen mit einem CO₂ – Laser, Bericht Nr. 0703 / 685, SLV-München, München, 1993.
- [137] ..., HRN EN 1435, Nerazorno ispitivanje zavara - Radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva, 2000.
- [138] ..., HRN EN 462-1, Nerazorno ispitivanje - Kvaliteta radiograma - 1. dio: Indikatori kvalitete radiograma (žični) - Određivanje stupnja kvalitete radiograma, 1997.
- [139] ..., HRN EN 1043-2, Razorna ispitivanja zavara metalnih materijala - Ispitivanje tvrdoće - 2. dio: Mjerenje mikrotvrdoće zavarenih spojeva, 2001.
- [140] ..., DIN 50 115, Kerbschlagbiegeversuch, Besondere Probenform und Auswertverfahren, 1991.
- [141] ..., Operating instructions 25-VP-T, All American Tool and MFG Company, Skokie, 1963.

- [142] E. Oberšmit, Određivanje dinamičke izdržljivosti u korijenu zuba zupčanika opterećenog na savijanje, skraćenim Locatijevim postupkom, Strojstvo, Vol. 15, 3-4, str. od 107 do 113, travanj, 1973.
- [143] A. Neumann, Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure, Dio 1.: Grundlagen, Tragfähigkeit, Gestaltung, DVS Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [144] J. Greses, C. Y. Barlow, P. A. Hilton, W. M. Steen, Effects of Different Gas Environments on CO₂ and Nd:YAG Laser Welding Process Efficiencies, Zbornik radova Laser Advanced Materials Processing, Osaka, May, 2002.
- [145] C. H. J. Gerritsen, C. A. Olivier, Optimisation of plasma/plume control for high power Nd:YAG laser welding of 15mm thickness C-Mn steels, Proc. of 6th International Conference on Trends in Welding Research, Georgia, April, 2002.
- [146] J. Greses, P. A. Hilton, C. Y. Barlow, , W. M. Steen, Laser-Vapour Interaction in High-Power cw Nd:YAG Laser Welding, Proc. of ICALEO, Jacksonville, October, 2003.
- [147] J. Greses, P. A. Hilton, C. Y. Barlow, W. M. Steen, Plume attenuation under high power Nd:YAG laser welding, Proc. of ICALEO, Scottsdale, October, 2002.
- [148] C. A. Olivier, P. A. Hilton, J. D. Russel, Materials processing with a 10 kW Nd:YAG laser facility, Proc. of ICALEO, San Diego, November, 1999.
- [149] J. Greses, P. A. Hilton, C. Y. Barlow, W. M. Steen, Spectroscopic studies on plume/plasma in different gas environments, Proc. of ICALEO, Jacksonville, October 2001.

ŽIVOTOPIS

Branko Bauer rođen je 21. ožujka 1973. godine u Varaždinu. Osnovnu školu i srednju matematičko-informatičku školu završio je u Varaždinu. Godine 1991/1992 upisao je studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Tijekom studija dodjeljena mu je Rektorova nagrada za najbolji studentski rad "Analiza priključaka valovitih cijevi", izrađen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu u akademskoj godini 1996./1997. Diplomirao je u svibnju 1997. godine na Katedri za zavarene konstrukcije radom "Spajanje priključaka na valovite cijevi".

Od rujna 1997. godine zaposlen je kao znanstveni novak na Katedri za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U okviru znanstveno-istraživačkog rada bavi se laserskim zavarivanjem i rezanjem. Ima dvadeset objavljenih radova. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje sudjeluje i u održavanju nastave.

Završio je tečaj za europskog inženjera zavarivanja prema programu EWF-a, 1999. godine. U sklopu studijskog boravka na institutu SLV München (od 02. do 24. svibnja 2000.) sudjelovao je na seminaru o laserskom zavarivanju, "Laserstrahlschweißen, Prüfen und Bewerten von Laserstrahlschweißungen".

Završio je poslijediplomski studij, smjer Strojarske tehnologije, te je u ožujku 2002. godine obranio magistarski rad pod naslovom "Lasersko zavarivanje čelika s povećanim sadržajem ugljika".

U prosincu 2004. godine bio je na dvotjednom stručnom usavršavanju iz područja mikrosmičnog ispitivanja zavarenih spojeva, na Tehničkom sveučilištu u Berlinu - TU Berlin, na zavodu - Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Füge- und Beschichtungstechnik.

U ožujku 2005. godine bio je na trotjednom stručnom usavršavanju iz područja ispitivanja dinamičke izdržljivosti zavarenih spojeva, na Fakultetu strojarstva i računarstva u Mostaru.

Član je Hrvatskog društva za tehniku zavarivanja i tehničkog odbora HZN/ TO E76 – Sigurnost optičkog zračenja i laserska oprema.

Aktivno govori njemački i engleski jezik.

Oženjen je i ima dvoje djece.

BIOGRAPHY

Branko Bauer was born on 21 March 1973 in Varaždin. He completed primary education and the secondary school of mathematics and informatics in Varaždin. In 1991/92, he enrolled at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, in the course of mechanical engineering. In 1997 he received the Rector's Award for the best student work "Analysis of Joining of Flanges to the Bilow Tubes". He graduated in May 1997 at the Department of Welded Structures with the Diploma paper "Joining of Flanges to the Bilow Tubes".

Since September 1997 he has been employed at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture at the Department of Welded Structures as junior researcher. As part of the scientific and research work, Mr. Bauer is involved in the activities regarding laser beam welding and cutting. He has published about twenty papers and articles. At the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, he is actively participating in lecturing activities.

He has been awarded the certificate of the European Welding Engineer after having completed the course according to the EWF programme in 1999. As part of his study visit to the SLV-Institute, Munich (2 – 24 May 2000), he attended the course on Laser beam welding "Laserstrahlschweißen, Prüfen und Bewerten von Laserstrahlschlweißungen".

In 2002 he completed the postgraduate study of "Mechanical Engineering Technologies" and acquired on 21 March 2002 the Master's degree defending the Master thesis "Laser Welding of Steels with Higher Carbon Content".

In December 2004 he spent two weeks on a study visit at the Technical University of Berlin, TU Berlin, at the Department: Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fachgebiet Füge- und Beschichtungstechnik.

In March 2005 he spent three weeks on a study visit at the Faculty of Mechanical Engineering and Computing of Mostar.

He is a member of the Croatian Welding Society, and of the Technical Committee CSI/TO E76 – Safety of Optical Radiation and Laser Equipment.

He is fluent in German and English.

He is married and a father of two children.