

Utjecaj brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost mikrolegiranih čelika

Dunđer, Marko

Doctoral thesis / Disertacija

2005

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:235:604414>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**UTJECAJ BRZINE HLAĐENJA NA TVRDOĆU I
ŽILAVOST MIKROLEGIRANIH ČELIKA**

DOKTORSKI RAD

Marko Dunder

ZAGREB, 2005

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**UTJECAJ BRZINE HLAĐENJA NA TVRDOĆU I ŽILAVOST
MIKROLEGIRANIH ČELIKA**

DOKTORSKI RAD

**Mentor
Prof.dr.sc.Slobodan Kralj**

**Pristupnik
Mr.sc. Marko Dunder**

ZAGREB, 2005

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 621.791:669.15

Ključne riječi: Mikrolegirani čelici povišene čvrstoće
Temperaturna polja
Vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$
Brzina hlađenja $w_{8/5}$
Tvrdća
Udarna radnja loma

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: STROJARSTVO

Institucija u kojoj je rad izrađen: FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
ZAGREB

Mentor rada: prof.dr.sc. SLOBODAN KRALJ

Broj stranica: 181

Broj slika: 140

Broj tablica: 23

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 96

Datum obrane:

Povjerenstvo: prof. dr. sc. SLOBODAN KRALJ, FSB, Zagreb
prof. dr. sc. VINKO IVUŠIĆ, FSB, Zagreb
doc. dr. sc. NIKŠA KRNIĆ, FESB, Split

Institucija u kojoj je rad pohranjen:
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE, ZAGREB
NACIONALNA I SVEUČILIŠNA KNJIŽNICA, ZAGREB

ZAHVALA

Zahvaljujem svima koji su nesebično pomogli pri provođenju ispitivanja tijekom izrade rada.

Posebno zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Slobodanu Kralju, koji je također bio i mentor pri izradi magistarskog rada. Profesor Kralj je svojim savjetima poticao i usmjeravao istraživanje i na taj način pridonio cjelovitoj koncepciji rada.

Profesor dr. Ivan Samardžić je pomogao pri organizaciji eksperimentalnih istraživanja te upućivao na metodologiju izrade doktorske disertacije.

Doc.dr.sc. Božidar Matijević i prof.dr.sc. Mladen Stupnišek su pomogli pri metalografskoj analizi uzoraka te pri ispitivanjima ne elektronskom scanning mikroskopu.

Doc.dr.sc. Vladimir Gliha i mr.sc. Tomaž Vuheher su pomogli pri eksperimentalnim istraživanjima simulacije uzoraka na simulatoru toplinskog ciklusa tipa TCS 1405 Smitweld.

Novak Šarić je pomogao pri računalnoj obradi teksta.

Zahvalan sam svima koji su materijalno pomogli pri izradi radnje a posebice poduzećima "FIS" d.o.o. iz Viteza i "2B - MULTIMEDIAPRINT" d.o.o. iz Nove Bile.

Ovu je doktorsku disertaciju lektorirala Vesna Štulić, prof., na čemu mu joj zahvaljujem.

Također zahvaljujem i svima koji su bili na pomoći i usluzi pri izradi ovog rada, a koji nisu ovdje spomenuti.

Neizmjerne razumijevanje za vrijeme izrade dokorskog rada pružala mi je moja obitelj.

SADRŽAJ

	str.
PREDGOVOR	1
SAŽETAK RADA	2
SAŽETAK RADA NA ENGLESKOM	3
KLJUČNE RIJEČI	4
POPIS OZNAKA	5
POPIS SLIKA	8
POPIS TABLICA	14
1. UVOD	15
2. HIPOTEZA RADA	20
3. MIKROLEGIRANI ČELICI	21
3.1. Teorijske osnove povećanja granice razvlačenja	24
3.2. Utjecaj legirajućih elemenata na strukturne pretvorbe	33
3.3. Problemi zavarljivosti i primjena zavarenih konstrukcija od mikrolegiranih čelika u eksploataciji	36
3.3.1. Veličine koje utječu na zavarljivost	36
3.3.2. Tople pukotine	37
3.3.3. Hladne pukotine	37
3.3.4. Osjetljivost zavara i zone utjecaja topline prema krhkom lomu	40
3.3.5. Slojevito odvajanje	42
3.3.6. Pukotine zbog naknadnog zagrijavanja	42
4. UTJECAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA MIKROLEGIRANIH ČELIKA	44
4.1. Opći pristup određivanju parametara zavarivanja	44
4.1.1. Svrha istraživanja parametara zavarivanja	44
4.1.2. Pristup određivanju parametara zavarivanja	45
4.2. Temperaturna polja pri zavarivanju	45
4.2.1. Kratak pregled proučavanja problema temperaturnih polja pri zavarivanju	45
4.2.2. Uvod u problem nestacionarnosti temperaturnih polja pri zavarivanju	46
4.2.3. Određivanje temperaturnih polja pri zavarivanju	46
4.2.4. Matematički modeli fizikalnih pojava provođenja topline kod zavarivanja	48
4.2.4.1. Pomični linijski izvor topline – tanka ravna ploča	49
4.2.4.2. Pomični točkasti izvor topline na ravnoj ploči	51
4.2.4.3. Faktor toplinskog zasićenja kod dvodimenzijskog vođenja topline	53
4.2.4.4. Faktor toplinskog zasićenja kod trodimenzijskog vođenja topline	54
4.2.4.5. Pomični točkasti izvor topline – polu beskonačno tijelo	54
4.3. TTT – dijagrami	59
5. TRANSFORMACIJA STRUKTURE PRI ZAVARIVANJU	61
5.1. Opća razmatranja	61
5.2. Utjecaj transformacije strukture na svojstva zavarenog spoja	64
6. ISTRAŽIVANJE UTJECAJA BRZINE HLAĐENJA NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA	72
6.1. Definiranje programa istraživanja	72
6.2. Izbor osnovnog materijala	74
6.3. Metode ispitivanja	75
6.3.1. Simuliranje toplinskog zavarivačkog ciklusa	75
6.3.2. Dilatometrijska metoda	77
6.3.3. Metoda čepa (in situ)	78
6.3.4. Metoda IMET-1	78
6.3.5. Računske metode	78
6.3.6. Ostale metode	79
6.4. Analiza svojstava zone utjecaja topline na simuliranim uzorcima	79
6.4.1. Rast austenitnog zrna	81

6.4.2.	Utjecaj broja prolaza	84
6.4.3.	Utjecaj mikrolegiranja	85
6.5.	Istraživanje na realno zavarenim spojevima	86
6.6.	Ispitivanje tvrdoće na simuliranim i realno zavarenim spojevima	87
6.7.	Ispitivanje udarne radnje loma na simuliranim i realno zavarenim spojevima	88
6.7.1.	Ispitivanje udarne radnje loma Charpy-V metodom	90
7.	EKSPERIMENTALNI RAD	95
7.1.	Simulirani zavarivački ciklus	95
7.1.1.	Simulatori toplinskog ciklusa	95
7.1.2.	Plan pokusa	100
7.1.3.	Rezultati prvog pokusa simuliranja	105
7.1.4.	Dobiveni rezultati mjerenja tvrdoće simuliranih uzoraka u drugom pokusu	109
7.1.5.	Dobiveni rezultati ispitivanja udarne radnje loma u drugom pokusu	112
7.1.6.	Metalografski pregled pojedinih zona simuliranog uzorka	118
7.1.7.	Dijagrami sila-vrijeme i energija-vrijeme kod simuliranih uzoraka	125
7.2.	Realno zavarivanje	130
7.2.1.	Plan pokusa	130
7.2.2.	Praćenje i registracija glavnih parametara elektrolučnog zavarivanja pomoću on-line monitoring sistema	132
7.2.3.	Izvedba realnog zavarivanja	137
7.2.4.	Dobiveni rezultati mjerenja tvrdoće realno zavarenih uzoraka	140
7.2.5.	Dobiveni rezultati ispitivanja udarne radnje loma realno zavarenih uzoraka	143
7.2.6.	Metalografski pregled pojedinih zona realno zavarenog uzorka	149
7.3.	Ispitivanje uzoraka na elektronskom scanning mikroskopu	153
7.3.1.	Scanning elektronska slika	153
7.3.2.	Rezultati ispitivanja na elektronskom mikroskopu	154
8.	ZAKLJUČAK I PRIJEDLOZI ZA NOVA ISTRAŽIVANJA	158
9.	LITERATURA	161
10.	PRILOZI	
	Prilog 1	168
	Prilog 2	175
11.	ŽIVOTOPIS	180

PREDGOVOR

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Zavodu za zavarene konstrukcije, već dulje se istražuje problem zavarljivosti mikrolegiranih čelika i određuju parametri zavarivanja koji daju zavare dobrih mehaničkih svojstava i bez pukotina. U okviru izrade pojedinih znanstvenih i stručnih radova bio sam uključen u navedena istraživanja. Ovaj rad je rezultat mojeg dugogodišnjeg proučavanja problema proizvodnje i eksploatiranja zavarenih proizvoda iz mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće. O problematici zavarenih spojeva, posebno mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće autor ovog rada je objavio samostalno ili kao koautor preko 15 radova u domaćim stručnim časopisima ili u zbornicima sa savjetovanja u zemlji i inozemstvu.

Provedena istraživanja na mikrolegiranim čelicima su potvrdila polaznu hipotezu ovog rada - primjenom simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja i odgovarajućim ispitivanjima na toplinski cikliranim uzorcima moguće je ubrzati i skratiti opseg trajanja aktivnosti kod izbora parametara zavarivanja.

Rad je rađen na FSB-u u Zagrebu, u Laboratoriju za zavarivanje, Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava i Laboratoriju za materijalografiju.

Ekperimentalna istraživanja simulacije uzoraka na simulatoru tipa TCS 1405 Smitweld su provedena na Fakulteti za strojništvo u Mariboru.

Ispitivanje udarne radnje loma pojedinih uzoraka provedeno je u Laboratoriju za mehanička ispitivanja Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu i na Fakulteti za strojništvo u Mariboru.

Ispitivanja uzoraka na elektronskom scanning mikroskopu su provedena na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, Geološkom odsjeku u Zagrebu.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
Doktorski rad

Utjecaj brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost mikrolegiranih čelika

Sažetak:

U radu se obrazlaže usporedba simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja s realnim ciklusom zavarivanja. U teorijskom dijelu istraživanja u okviru ovog rada istražen je utjecaj temperaturnih polja na transformaciju mikrostrukture i na mehanička svojstva zavarenog spoja. U eksperimentalnom dijelu ispitivana je tvrdoća i udarna radnja loma na različitim položajima u zoni utjecaja topline unutar cjelovitog zavara. Napravljena je fraktografska analiza karakterističnih prijeloma i ispitivanje na elektronskom scanning-mikroskopu koja se koristila za ocjenu karakterističnih prijeloma, odnosno ocjene da li se radi o interkristalnom, transkristalnom ili žilavom lomu. Pri ispitivanjima se koristio mikrolegirani čelik povišene čvrstoće TStE 420, a simulacija je provedena na simulatoru toplinskog ciklusa TCS 1405 SMITWELD. Provedena istraživanja su potvrdila polaznu hipotezu ovog rada - primjenom simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja i odgovarajućim ispitivanjima na cikliranim uzorcima moguće je ubrzati i skratiti opseg trajanja aktivnosti kod izbora parametara zavarivanja. Također je utvrđeno da svako višeprolazno zavarivanje koje se prakticira u realnim zavarima ima niže vrijednosti tvrdoće i više vrijednosti udarne radnje loma u odnosu na simulirane uzorke. Na kraju su predloženi optimalni parametri pri MAG-postupku zavarivanja ovog čelika.

University of Zagreb
Faculty of mechanical engineering
and naval architecture

Influence of cooling rate on hardness and toughness of micro alloyed steels

Summary:

This paper explains comparison between welding thermal cycle simulation and real welding cycle. In the theoretical part of the investigations provided in this paper, the influence of temperature fields' distribution on transformation of microstructure and weld joint mechanical properties was investigated. In experimental part of this paper the investigations of hardness and toughness in different locations of heat-affected zone of complete welded joint were performed. The fractographic analysis on scanning microscope of specific broken specimens was used for fracture type evaluation to determine intergranular, transgranular or ductile fracture. The micro alloyed steel TStE 420 was used for experimental investigations and welding thermal cycle simulation was performed on thermal cycle simulator TCS 1405 SMITWELD. The investigations performed in this work confirmed start hypothesis of this work, i.e. by the application of thermal simulation of welding cycle it is possible to accelerate and shorten duration of activities at welding parameters selection. Beside that, it was determined that multipass welding which is often used in real welding had lower hardness and higher toughness values in relationship to simulated specimens. Finally, the optimal welding parameters for MAG welding of this steel were proposed.

KLJUČNE RIJEČI

Ključne riječi: Mikrolegirani čelici povišene čvrstoće
Temperaturna polja
Vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$
Brzina hlađenja $w_{8/5}$
Tvrdoća
Udarna radnja loma

Key words: High strength micro alloyed steels
Temperature fields
Cooling time $\Delta t_{8/5}$
Cooling rate $w_{8/5}$
Hardness
Notch

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

a	koeficijent toplinske difuzije	m^2/s
A	površina	m^2
A_5	istežljivost	%
A_{c1}	temperatura eutektoidne pretvorbe pri zagrijavanju	$^{\circ}C, (K)$
A_{c3}	temperatura pretvorbe austenita pri zagrijavanju	$^{\circ}C, (K)$
A_{r1}	temperatura eutektoidne pretvorbe pri hlađenju	$^{\circ}C, (K)$
A_{r3}	temperatura pretvorbe austenita pri hlađenju	$^{\circ}C, (K)$
b_v	Burgersov vektor	
b	koeficijent koji uzima u obzir sniženje temperature zbog prijelaza temperature na okolinu	$1/s$
B	bezdimenzijska konstanta	
"B"	neravnotežni faktor	
c	specifični toplinski kapacitet	$J/(kgK)$
C_E	ekvivalent ugljika	
d	promjer čestica	nm
d_z	promjer zrna	μm
D	razmak među precipitatima	nm
E_{ef}	efektivni unos topline	J/mm
f	volumski udjel čestica u ukupnom volumenu	
F_2, F_3	faktori odvođenja topline u okolinu	
G	modul smičnosti čestica	N/mm^2
HV	vrijednost tvrdoće u Vickersima	
HV_M	tvrdoća martenzita	
$I_n(x)$	Besselove funkcije	
k_k	koeficijent krhkosti	
k	faktor koncentracije naprezanja u odnosu na zamišljeno naprezanje čistog savijanja	
K	konstanta koja ovisi od kemijskog sastava	
K_0	modificirana Besselova funkcija nultog reda, druge vrste	
K_I	faktor intenziteta naprezanja za slučaj otvaranja pukotine	$N/mm^{3/2}$
K_{IC}	lomna žilavost	$N/mm^{3/2}$
K_e	faktor koji ovisi o vrsti metala	
$K_n(x)$	MacDonaldova funkcija	
KV	udarna radnja loma	J
m	koeficijent za računanje provođenja topline u ravnom sloju	
M_s	početak martenzitne transformacije	
n	red Bessel-ove funkcije	
n_o	eksponent otvrdnjavanja	
q	toplinska moć izvora	W
Q	unesena toplina	J
r, r_1, r_2	radijus vektor u ravnini	mm
R	radijus vektor u prostoru	mm
R_0	nulto naprezanja	$N/mm^2, MPa$
R_e	granica razvlačenja	$N/mm^2, MPa$

R_m	vlačna čvrstoća	N/mm ²
$R_{p0.2}$	konvencionalna granica razvlačenja	N/mm ²
t	vrijeme	s
t'	vrijeme zagrijavanja od A_{c3} do T_{max}	s
t''	vrijeme hlađenja od T_{max} do A_{r3}	s
ΔT	razlika temperature u nekoj točki tijekom ili nakon zavarivanja i početne temperature materijala (T_0)	°C,(K)
T_0	početna temperatura materijala, temperatura predgrijavanja	°C,(K)
T_A	temperatura austenitizacije	°C,(K)
T_{max}	maksimalna temperatura toplinskog ciklusa	°C,(K)
T_Z	izmjerena temperatura na kraju mjerenja ciklusa zavarivanja	°C,(K)
T_p	prijelazna temperatura	°C,(K)
$T_{\dot{z}}$	temperatura žarenja	°C,(K)
$\Delta t_{8/5}$	vrijeme hlađenja od 800 do 500 °C	s
v	brzina zavarivanja	m/s
v_{zg}	brzina zagrijavanja	°C/s
Z	kontrakcija	%
$w_{8/5}$	brzina hlađenja od 800 do 500 °C	°C/s
Y_5	konstanta koja ovisi od kemijskog sastava	

Grčki simboli

α	koeficijent prijelaza topline u okolinu	W/(m ² K)
δ	debljina lima	mm
$\delta_{gr.}$	granična debljina lima	mm
ε	brzina deformacije	%/h
Φ	tok energije u jedinici vremena	W
$\Phi(u)$	funkcija gustoće normalne razdiobe	
Γ	Gama funkcija	
λ	koeficijent toplinske vodljivosti	W/(mK)
ψ_2, ψ_3	faktori toplinskog zasićenja	
ω	bezdimenzijski faktor za izračunavanje toka zasićenja temperaturnog polja	
ρ	gustoća	kg/m ³
ρ_d	gustoća dislokacija	
ρ_2, ρ_3	bezdimenzijski faktor za izračunavanje toka zasićenja temperaturnog polja	
τ	tangencijalno naprezanje	N/mm ²

Popis kratica

A	austenit
B	bainit
EPP	elektrolučno zavarivanje pod praškom
F	ferit
HV	tvrdoća po Vickersu

M	martenzit
MZ	metal zavara
N	normalizirano stanje
OM	osnovni materijal
P	poboljšano stanje
R	realno zavareno
REL	ručno elektrolučno zavarivanje
S	simulirano
SCC	napetosni korozijski lom (Stress Corrosion Cracking)
TNP	tekući naftni plin
V.H.	vodeno hlađenje
Z	zavar
Z.H.	zračno hlađenje
ZS	zavareni spoj
ZT	zona taljenja zavarenog spoja
ZUT	zona utjecaja topline

POPIS SLIKA

Slika 3.1.	Povišenje naprezanja tečenja usljed mehanizma obilaska čestica različitog promjera i volumskog udjela [7]	26
Slika 3.2.	Shematski prikaz ovisnosti naprezanja tečenja i veličine zrna [7]	27
Slika 3.3.	Utjecaj veličine zrna i prijelazne temperature na udarnu radnju loma[7]	28
Slika 3.4.	Utjecaj brzine hlađenja nakon završenog valjanja na početak transformacije i veličinu feritnog zrna [7]	28
Slika 3.5.	Princip postupka prerade mikrolegiranih čelika [11]	29
Slika 3.6.	Utjecaj temperature završnog oblikovanja na mikrostrukturu čelika [10]	31
Slika 3.7.	Utjecaj načina dobivanja čelika na naprezanje razvlačenja i prijelaznu temperaturu [12]	32
Slika 3.8.	Shematski dijagram promjene mikrostrukture ovisno o postupku dobivanja čeličnih limova prema postupku Sumitomo [12]	32
Slika 3.9.	Slobodne entalpije stvaranja karbida i nitrida V, Nb, i Ti [7]	33
Slika 3.10.	Utjecaj temperature žarenja i sadržaja C i N na izlučivanje V odnosno Nb karbonitrida [7]	35
Slika 3.11.	Čimbenici koji uvjetuju nastanak hladnih pukotina [25]	38
Slika 3.12.	Utjecaj sadržaja ugljika u čeliku na udarnu radnju loma [31]	41
Slika 4.1.	Pojednostavljeni modeli tijela za vođenje topline pri zavarivanju [36], [37], [42]	47
Slika 4.2.	Kvazistacionarno temperaturno polje nastalo djelovanjem pomičnog linijskog izvora topline OO', po tankom limu debljine 10 mm u smjeru osi x [36]	50
Slika 4.3.	Kvazistacionarno temperaturno polje nastalo djelovanjem točkastog izvora topline brzinom v, na ravni sloj debljine 20 mm u smjeru osi x [36]	51
Slika 4.4.	Dijagram za određivanje faktora m [36], [37], [38], [42]	52
Slika 4.5.	Kvazistacionarno temperaturno polje nastalo djelovanjem točkastog izvora topline na polubeskonačno tijelo u smjeru osi x [36]	55
Slika 4.6.	Anizotermički TTT - dijagram kontinuiranog hlađenja mikrolegiranog čelika s 0.18 C, 0,50 Si, 1.46 Mn, 0.017 P, 0.005 S, 0.023 Al, 0.016 N i 0.13 V, nakon zagrijavanja na 900 °C [46]	60
Slika 5.1.	Shematski prikaz toplinskog ciklusa pojedinih točaka jednoprolaznog zavarenog spoja feritno-perlitnog čelika [46]	61
Slika 5.2.	Shematski prikaz zona zavarenog spoja izvedenog u jednom prolazu	63
Slika 5.3.	Toplinski ciklus u zoni utjecaja topline pri zavarivanju pod praškom 1 i ručnom elektrolučnom zavarivanju 2 [47]	64
Slika 5.4.	Anizotermički TTT-dijagram niskolegiranog čelika s 1.2 Mn, 0.67 Ni i 0.1 V nakon zagrijavanja na 900°C i 1300 °C [48]	65
Slika 5.5.	Promjene čvrstoće i istezljivosti ovisno o maksimalnoj temperaturi pojedinih zona niskolegiranog čelika u poboljšanom (P) i normaliziranom (N) stanju, nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja [4]	67

Slika 5.6.	Promjena prijelaznih temperatura ovisno o maksimalnoj temperaturi pojedinih zona niskolegiranog čelika u poboljšanom (P) i normaliziranom (N) stanju, nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja [4]	67
Slika 5.7.	Toplinski ciklus triju točaka tijekom višeslojnog zavarivanja dugačkim zavarima [49]	71
Slika 5.8.	Utjecaj broja prolaza na udarnu radnju loma pri višeslojnom zavarivanju [31]	71
Slika 5.9.	Utjecaj broja prolaza na tvrdoću nakon simulacije zavarivanja [31]	71
Slika 6.1.	Kvalitativni utjecaj vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ na tvrdoću i temperaturu prijelaza u krhko stanje [54]	73
Slika 6.2.	Prikaz jednostavnog dijagrama simulacije toplinskog ciklusa [68]	80
Slika 6.3.	Prikaz složenog dijagrama simulacije toplinskog ciklusa [68]	81
Slika 6.4.	Veličina austenitnog zrna u simuliranom ZUT-u, različitih vrsta čelika [70]	82
Slika 6.5.	Ovisnost veličine austenitnog zrna od vremena zagrijavanja od A_{c3} do T_{max} i vremena hlađenja od T_{max} do A_{r3} za čelik tipa Cr-Mo-Zr-Ti [69]	82
Slika 6.6.	Utjecaj vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ na veličinu austenitnog zrna u ZUT-u, pri trodimenzijskom odvođenju topline [69]	83
Slika 6.7.	Rast austenitnog zrna kod toplinskih ciklusa sa $T_{max}=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T_{max}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ za Cr-Mo-Zr-Ti čelike [71]	83
Slika 6.8.	Mjerenje tvrdoće po konturi a) i presjeku b) na simuliranim uzorcima	87
Slika 6.9.	Mjerenje tvrdoće po presjeku na realno zavarenim uzorcima	87
Slika 6.10.	Shematski prikaz ovisnosti tvrdoće od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ [4]	88
Slika 6.11.	Rezultati foto-elastometrijske studije rasporeda naprezanja u polju oko zarez (trodimenzijska analiza zamrzavanja naprezanja) savijane epruvete [78]	89
Slika 6.12.	Priprema žlijeba koja se preporuča za ispitivanje udarne radnje loma ZUT-a [82]	92
Slika 6.13.	Položaj vrha zarez u epruveti za ispitivanje udarne radnje loma koji se preporuča [82]	93
Slika 6.14.	Ekperimentalno određivanje vrha zarez s najnižom udarnom radnjom loma	93
Slika 7.1.	Shematski prikaz simulatora toplinskog ciklusa TCS 1405 Smitweld [84]	97
Slika 7.2.	Uređaj za simuliranje uzoraka	98
Slika 7.3.	Epruveta za ispitivanje simulacijom toplinskog ciklusa prije i nakon simuliranja toplinskog ciklusa zavarivanja	98
Slika 7.4.	Dimenzije epruvete za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje indirektno hlađenje [60]	99
Slika 7.5.	Dimenzije epruvete za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje indirektno i direktno hlađenje [60]	99
Slika 7.6.	Položaj dilatometra, termopara i jedinice plinske zaštite u odnosu na epruvetu za ispitivanje [83]	100
Slika 7.7.	Struktura čelika TStE 420 prije simulacije procesa zavarivanja	105

Slika 7.8.	Struktura čelika TStE 420 nakon simulacije procesa zavarivanja (temperatura zagrijavanja 600, 700 i 780 °C)	105
Slika 7.9.	Struktura čelika TStE 420 nakon simulacije procesa zavarivanja (temperatura zagrijavanja 960, 1100 i 1350 °C)	106
Slika 7.10.	Dijagram ovisnosti udarne radnje loma od T_{max} drugog ciklusa simuliranja	108
Slika 7.11.	Dijagram simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja na simulatoru TCS 1405 Smitweld s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$	109
Slika 7.12.	Dijagram simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja na simulatoru TCS 1405 Smitweld s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$	109
Slika 7.13.	Ovisnost tvrdoće o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ - mjerenje tvrdoće konturnom metodom (tablica 7.6.)	111
Slika 7.14.	Ovisnost tvrdoće o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ - mjerenje tvrdoće po presjeku (tablica 7.7 - mjerenje br.5 i 6)	112
Slika 7.15.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature 20 °C	114
Slika 7.16.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature 0 °C	114
Slika 7.17.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature -20 °C	115
Slika 7.18.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature -40 °C	115
Slika 7.19.	Utjecaj temperature mjerenja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5}=5s$	116
Slika 7.20.	Utjecaj temperature mjerenja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5}=10s$	116
Slika 7.21.	Utjecaj temperature mjerenja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5}=25s$	117
Slika 7.22.	Utjecaj temperature mjerenja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5}=50s$	117
Slika 7.23.	Lokacija snimanja mikrostrukture na simuliranom uzorku	118
Slika 7.24.	Mikrostruktura osnovnog materijala TStE 420, normalizirano stanje, povećanje 200x	119
Slika 7.25.	Mikrostruktura osnovnog materijala TStE 420, normalizirano stanje povećanje 100x i 50x	119
Slika 7.26.	Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$	119
Slika 7.27.	Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$	120
Slika 7.28.	Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$	120
Slika 7.29.	Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$	120
Slika 7.30.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$	121
Slika 7.31.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$	121
Slika 7.32.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$	121

Slika 7.33.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$	122
Slika 7.34.	Dijagram kvantitativne analize mikrostrukture za mjerenje veličine zrna po programu Buehler® OMNIMENT Report - osnovni materijal	123
Slika 7.35.	Dijagram kvantitativne analize mikrostrukture za mjerenje veličine zrna po programu Buehler® OMNIMENT Report - ZUT kod $\Delta t_{8/5}=50s$	124
Slika 7.36.	Dijagram prijelazne temperature osnovnog materijala TStE 420 koji nije simuliran	125
Slika 7.37.	Dijagrami ovisnosti sila - vrijeme i energija - vrijeme kod uzoraka S 101, S 301 i S 401, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$	126
Slika 7.38.	Dijagrami ovisnosti sila - vrijeme i energija - vrijeme kod uzoraka S 111, S 311 i S 411, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$	127
Slika 7.39.	Dijagrami ovisnosti sila - vrijeme i energija - vrijeme kod uzoraka S 121, S 321 i S 421, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$	128
Slika 7.40.	Dijagrami ovisnosti sila - vrijeme i energija - vrijeme kod uzoraka S 131, S 331 i S 431, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$	129
Slika 7.41.	Skica pripreme za zavarivanje realno zavarenih uzoraka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$	130
Slika 7.42.	Skica pripreme za zavarivanje realno zavarenih uzoraka s vremenima hlađenja $\Delta t_{8/5}=10, 25$ i $50s$	130
Slika 7.43.	Shematski prikaz uređaja za registraciju parametara zavarivanja [87]	133
Slika 7.44.	Fotografija glavnih elektroničkih komponenti uređaja [87]	133
Slika 7.45.	Razdioba frekvencije napona pri MAG-postupku zavarivanja u sredini zavara	135
Slika 7.46.	Razdioba frekvencije jakosti struje pri MAG-postupku zavarivanja u sredini zavara	135
Slika 7.47.	Promjena napona u funkciji od vremena pri MAG postupku zavarivanja	135
Slika 7.48.	Promjena jakosti struje u funkciji od vremena pri MAG postupku zavarivanja	136
Slika 7.49.	Dijagram jakosti struje u funkciji od napona	136
Slika 7.50.	Način uranjanja termo-para Ni-Cr-Ni u talinu	138
Slika 7.51.	Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br. 1. Ostvareni $\Delta t_{8/5}= 5s$	139
Slika 7.52.	Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br. 2. Ostvareni $\Delta t_{8/5}= 10s$	139
Slika 7.53.	Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br. 3. Ostvareni $\Delta t_{8/5}= 25s$	140
Slika 7.54.	Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br. 4. Ostvareni $\Delta t_{8/5}= 50s$	140
Slika 7.55.	Mjerenje tvrdoće HV10 po presjeku zavarenog spoja	141
Slika 7.56.	Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće ZUT-a kod realno zavarenog spoja o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ (mjerenje br. 5. iz tablice 7.11.)	142

Slika 7.57.	Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće ZUT-a kod realno zavarenog spoja o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ (mjerjenje br. 8. iz tablice 7.11.)	142
Slika 7.58.	Usporedba dijagrama tvrdoće pri različitim vremenima hlađenja $\Delta t_{8/5}$ R101- $\Delta t_{8/5}=5s$; R111- $\Delta t_{8/5}=10s$; R121- $\Delta t_{8/5}=25s$ R131- $\Delta t_{8/5}=50s$ (podaci iz tablice 7.11. i mjerjenje tvrdoće prema slici 7.55.)	143
Slika 7.59.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature 20 °C	145
Slika 7.60.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature 0 °C	145
Slika 7.61.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature -20 °C	146
Slika 7.62.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature -40 °C	146
Slika 7.63.	Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature -60 °C	147
Slika 7.64.	Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}= 5s$	147
Slika 7.65.	Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}= 10s$	148
Slika 7.66.	Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}= 25s$	148
Slika 7.67.	Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}= 50s$	149
Slika 7.68.	Lokacija snimanja mikrostrukture na realno zavarenom uzorku	149
Slika 7.69.	Mikrostruktura osnovnog materijala TStE 420, normalizirano stanje, povećanje 50x i 100x	150
Slika 7.70.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$	150
Slika 7.71.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$	150
Slika 7.72.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$	151
Slika 7.73.	Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$	151
Slika 7.74.	Mikrostruktura zavara čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$	151
Slika 7.75.	Mikrostruktura zavara čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$	152
Slika 7.76.	Mikrostruktura zavara čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$	152
Slika 7.77.	Mikrostruktura zavara čelika TStE 420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$	152
Slika 7.78.	Prijelomne površine uzorka S101 i S301 ($\Delta t_{8/5}= 5s$)	155
Slika 7.79.	Prijelomne površine uzorka S111 i S311 ($\Delta t_{8/5}= 10s$)	155
Slika 7.80.	Prijelomne površine uzorka S121 i S321 ($\Delta t_{8/5}= 25s$)	156
Slika 7.81.	Prijelomne površine uzorka R101 i R301 ($\Delta t_{8/5}= 5s$)	156
Slika 7.82.	Prijelomne površine uzorka R111 i R311 ($\Delta t_{8/5}= 10s$)	156

Slika P.1.1.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Oba prolaza su bila s maksimalnom temperaturom od 1350 °C.	170
Slika P.1.2.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 1100 °C.	170
Slika P.1.3.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 960 °C.	171
Slika P.1.4.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 780 °C.	171
Slika P.1.5.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 700 °C.	172
Slika P.1.6.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 600 °C.	172
Slika P.1.7.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 1350 °C.	173
Slika P.1.8.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 1100 °C.	173
Slika P.1.9.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 960 °C.	174
Slika P.1.10.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 780 °C.	174
Slika P.1.11.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 1350 °C.	175
Slika P.1.12.	Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 1350 °C.	175
Slika P.2.1.	Usporedba tvrdoće HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5$ s	178
Slika P.2.2.	Usporedba tvrdoće HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10$ s	179
Slika P.2.3.	Usporedba tvrdoće HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 25$ s	179
Slika P.2.4.	Usporedba tvrdoće HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s	180
Slika P.2.5.	Usporedba vrijednosti tvrdoće HV5, HV10 i HV30 simuliranih uzoraka kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5, 10, 25$ i 50s	180

POPIS TABLICA

Tablica 3.1.	Sitnozrnati normalizirani čelici povišene granice razvlačenja [6]	23
Tablica 4.1.	Utjecaj oblika zavara na odvođenje topline pri zavarivanju [44]	58
Tablica 5.1.	Sadržaj kemijskih elemenata u čelicima na kojima su provedena ispitivanja iz kojih su proizašle formule za izračunavanje maksimalno očekivane tvrdoće [50], [51]	69
Tablica 6.1.	Kemijski sastav ispitivanog čelika [56]	74
Tablica 6.2.	Pregled mehaničkih svojstava [56]	74
Tablica 6.3.	Minimalna udarna radnja loma KV (J) [56]	75
Tablica 7.1.	Parametri simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u jednom prolazu	101
Tablica 7.2.	Parametri simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza	102
Tablica 7.3.	Parametri simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa bez držanja uzoraka na temperaturi austenitizacije	104
Tablica 7.4.	Izmjerene tvrdoće uzoraka - Vickers metoda	107
Tablica 7.5.	Vrijednosti udarne radnje loma kod dvostrukog simuliranja	108
Tablica 7.6.	Izmjerene tvrdoće uzoraka u trećem pokusu (jednostruko simuliranje $T_{\max} \approx 1350$ °C - prema slici 7.13) - konturna metoda	110
Tablica 7.7.	Izmjerene tvrdoće uzoraka u trećem pokusu (jednostruko simuliranje $T_{\max} \approx 1350$ °C - prema slici 6.8b) - tvrdoće mjerene po presjeku	111
Tablica 7.8.	Vrijednosti udarne radnje loma dobivene pri ispitivanju simuliranih uzoraka na različitim temperaturama	113
Tablica 7.9.	Podaci o dodatnom materijalu za zavarivanje [86]	131
Tablica 7.10.	Parametri MAG-zavarivanja karakterističnih uzoraka	138
Tablica 7.11.	Vrijednosti tvrdoće HV10 kod realno zavarenih uzoraka - tvrdoće mjerene po presjeku zavarenog spoja	141
Tablica 7.12.	Vrijednosti udarne radnje loma dobivene pri ispitivanju realno zavarenih uzoraka na različitim temperaturama	144
Tablica 7.13.	Prikaz karakteristika skeniranih simuliranih uzoraka na elektronskom mikroskopu	154
Tablica 7.14.	Prikaz karakteristika skeniranih realno zavarenih uzoraka na elektronskom mikroskopu	155
Tablica P.2.1.	Vrijednosti tvrdoće HV5 u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$	177
Tablica P.2.2.	Vrijednosti tvrdoće HV10 u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$	177
Tablica P.2.3.	Vrijednosti tvrdoće HV30 u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$	178

1. UVOD

Oduvijek je u tehnički razvijenom svijetu prisutna težnja prema izgradnji što lakših nosivih konstrukcija, kojima se ostvaruju različite pogodnosti kao što su različite uštede u proizvodnji, smanjenje utroška energije u eksploataciji kod lakših pokretnih konstrukcija (komponente željezničkih i cestovnih vozila, dizalica, brodova,...), bolja antikorozivna svojstva, manje zagađivanje okoliša, bolja kvaliteta, sigurnost i pouzdanost proizvoda i dr.

Razvoj i proizvodnja čelika povišene čvrstoće i visoko čvrstih čelika, te dostignuća u pogledu njihovih svojstava, otvorili su putove njihove primjene u gradnji mostova, građevinskih strojeva, dizalica, tračničkih i cestovnih vozila, raznih konstrukcija proizvodnih hala u građevinarstvu, cjevovoda za hidrocentrale, potporna platformi za eksploataciju nafte i plina itd.

Potrebe naftne industrije i globalno povećanje potrošnje nafte uvjetovalo je i razvoj posuda pod tlakom, kao i vagonskih i auto-cisterni. Sve veći volumeni uvjetovali su i sve veću debljinu stjenke, što je zbog goleme mase postalo ograničavajući faktor u izgradnji i transportu. Zbog toga je počela široka primjena mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće i kod izrade tih objekata.

Ubrzo nakon široke primjene tih čelika pojavile su se i prve veće poteškoće u eksploataciji posuda pod tlakom izgrađenih od mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće. Jedna od najznačajnijih je pojava oštećenja usljed korozije uz naprezanje.

S ovim problemima, tj. oštećenjima zavarenih konstrukcija susrele su se brojne industrijske i razvijene zemlje, a i Hrvatska.

Zbog nedostatka iskustva, kod nas su u početku zavarivanja i eksploataciji, spremnici od mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće tretirani kao i mnoge druge posude za skladištenje u naftnoj i kemijskoj industriji izgrađene od nelegiranih konstrukcijskih i niskolegiranih čelika. Ozbiljniji problemi počinju se javljati od 1982. godine, zbog otkrivanja pukotina u eksploataciji na kuglastim spremnicima, spremnicima vagon i auto-cisterni za tekući naftni plin (TNP) i na vagon-cisternama za amonijak. Zabilježeno je i propuštanje plina na jednom kuglastom spremniku za TNP zbog prisutnih poprečnih pukotina na zavarenim spojevima kao i na dvije vagon-cisterne za tekući amonijak. Srećom, ozbiljnijih posljedica za okoliš nije bilo [1].

Procjenjuje se da je kod nas ispitano 35 kuglastih spremnika i 40 vagon-cisterni od visoko čvrstih čelika na kojima su otkrivene pukotine u većem ili manjem opsegu [2]. Pukotine su nađene na objektima koji su bili u eksploataciji, a čak i na jednom spremniku koji nije bio u eksploataciji (ispitivanje provedeno nekoliko godina nakon izrade), a i na objektima na kojima su obavljani popravci. Najveći broj pukotina otkriven je na unutarnjoj strani objekta, uglavnom na mjestima najvećih naprezanja, a najčešće su bile locirane u zoni utjecaja topline zavarenih spojeva. Popravci su se izvodili izbrusivanjem, ukoliko dubina pukotine nije prelazila debljinu dodatka za koroziju. Ukoliko je pukotina bila dublja, popravak je obavljen vađenjem pukotine i navarivanjem. Bilo je i objekata koji su trajno isključeni iz uporabe zbog ozbiljnih oštećenja, od kojih su neka išla kroz cijelu debljinu materijala.

Isti problemi javljali su se i u drugim zemljama. Prvi podaci o pojavi pukotina na unutarnjoj strani kuglastih spremnika objavljeni su 1969. godine, a odnose se na spremnike izrađene od visokočvrstih čelika u dvije rafinerije u Japanu. Kao uzrok navode se pogreške izrade i uvjeti eksploatacije. Deset godina nakon toga, u Japanu su ponovo utvrđena oštećenja kuglastih spremnika u obliku pukotina, a kao uzrok navodi se djelovanje H₂S i vlage iz medija. U Mexico Cityju, 1984. godine veliko skladište tekućeg naftnog plina usljed eksplozije potpuno je uništeno, a bilo je 500 poginulih i 7.000 povrijeđenih u naseljenoj okolini [3]. Iste godine su se dogodili i katastrofalni otkazi u Union Oil Lemont rafineriji u Chicagu, gdje je usljed eksplozije amin-apsorbera poginulo 17 ljudi, a 22 su teško povrijeđena [4]. Također, 1984. godine u Bhopal, Indija dolazi do ispuštanja opasnih kemikalija iz posuda pod tlakom imajući za posljedicu nekoliko tisuća poginulih.

Prema nekim procjenama eksplozija samo jednog kuglastog spremnika kapaciteta 3.000 m³ za TNP ima razornu moć dvije atomske bombe bačene na Hirošimu [3].

Obzirom na moguće teške posljedice u slučaju katastrofalnog otkaza nekih proizvoda, za ljude, imovinu i biološki okoliš, morala su se tražiti znanstvena i stručna rješenja koja će povećati pouzdanost proizvoda od mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće. U tu svrhu je EEZ 1984. godine izdala propis o skladištenju opasnih tvari i ispitivanju spremnika. Taj propis obvezuje korisnike na redovitu kontrolu i ispitivanje prema predloženim uputama.

Analiza rezultata istraživanja oštećenja kuglastih spremnika u velikim svjetskim naftnim kompanijama a i kod nas, ukazuje, da je jednoznačno definiranje uzroka oštećenja teško ostvarivo. Dosadašnja praksa u utvrđivanju stanja spremnika označila je globalna područja i pojave unutar njih, kao potencijalne uzročnike oštećenja, s tim da ni jedno od tih područja odnosno pojava unutar njih, nije isključivi uzročnik oštećenja već se međusobno zbrajaju.

Ta područja i pojave su [1]:

a)Projekti i konstrukcije

Projekt predstavlja osnovno područje mogućih uzročnika oštećenja, pri čemu je potrebno istaknuti sljedeće pojave:

- djelomične ili potpune nedostatnosti metoda proračuna i analiza naprezanja kojima je objekt izložen u eksploataciji, što ima za posljedicu projektiranje i izradu konstrukcije koja u pogledu čvrstoće ne zadovoljava eksploatacijske uvjete,
- loša usklađenost parametara objekta s parametrima objekata uz koje je u procesu eksploatacije neposredno vezan (brzina punjenja i pražnjenja spremnika i za to vezane promjene temperature i naprezanja).

b) Tehnologija i način izrade

Zavarivanje predstavlja osnovni tehnološki postupak za izradu spremnika, a zavareni spojevi su glavna lokacija pojave oštećenja. Mogući uzročnici oštećenja mogu biti:

- neadekvatna tehnologija izrade bi imala za posljedicu da zavareni spojevi u startu nisu zadovoljavali u pogledu eksploatacijskih uvjeta, kako sa stajališta osnovnih mehaničkih svojstava, tako posebice sa stajališta svojstava naknadno definiranih kao presudnih za eksploatacijske uvjete (npr. tvrdoća).
- tehnološka nedisciplina je u slučaju mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće imala negativan učinak u pogledu kvalitete zavarenih spojeva, odnosno njihove sposobnosti podnošenja eksploatacijskih uvjeta. Nedostatak znanja u to vrijeme o problematici zavarivanja mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće i mogućim posljedicama usljed tehnološke nediscipline, doveo je do bitno lošijeg stanja objekta nego li je to trebalo biti,
- tehnologija montaže dodatni je negativni čimbenik, ukoliko se njoj klasično pristupa kao isključivo proizvodnoj operaciji, bez sagledavanja aspekta zaostalih naprezanja kod zavarivanja i njihovog utjecaja na javljanje defekata u tijeku eksploatacije.

c) Kontrola pri izgradnji

Kontrola pri izgradnji posuda pod tlakom primjenom ispitivanja bez razaranja ima dva osnovna aspekta negativnog učinka na pojavu oštećenja:

- nepridržavanje propisanih zahtjeva kontrole (opseg, sadržaj, metode, kriteriji prihvatljivosti), što predstavlja pojavu moguću kod izgradnje bilo kojeg objekta, ali ovdje dobiva važnost zbog specifičnosti objekta, odnosno, materijala,
- pogrešan izbor metoda ispitivanja i neadekvatne procedure ispitivanja (najčešće kao posljedica nepoznavanja problematike zavarivanja mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće).

Sve to može imati za posljedicu da su na objektu prisutni defekti iz faze izgradnje, čije širenje slijedi u fazi eksploatacije.

d) Uvjeti i način eksploatacije

Uvjeti i način eksploatacije posuda pod tlakom kao mogući uzročnik defekata izrazito se manifestiraju kroz:

- neusklađenost realnih uvjeta eksploatacije i projektom predviđenih i obuhvaćenih čimbenika, što ima za posljedicu izgradnju objekta neadekvatnih performansi s obzirom na namjenu,
- nepoštivanje propisanih parametara eksploatacije od strane korisnika.

Ovo sve skupa rezultira podvrgavanjem objekta naprezanjima bitno različitim od projektom predviđenih. Tipični primjeri su prekoračenje dopuštenog radnog tlaka i nagle promjene tlaka i temperature pri punjenju i pražnjenju, prisustvo agresivnih medija kao što su kisik, vlažni H₂S i cijanidi. Kao posljedica navedenog, javlja se bitno izmijenjeni utjecaj medija na materijal spremnika, odnosno na izvedene zavarene spojeve.

e) Tlačna proba

Tlačna se proba provodi kao završna proba integriteta i funkcionalnosti na kraju izrade spremnika, a kasnije se ponavlja periodično u eksploataciji. Tlačna proba uzrokuje izlaganje spremnika naprezanjima bitno većim negoli je to slučaj pri radnim parametrima. To može uzrokovati pojavu novih i širenje postojećih pukotina, te spajanje mikropukotina u makropukotine.

Probni se tlak propisuje uvećan faktorima 1,25; 1,3 ili 1,5 u odnosu na radni tlak, ovisno o primijenjenim propisima. Prema Hrivnjaku [4] taj faktor bi mogao biti i nešto veći od 1,5 da bi se postiglo jače popuštanje zaostalih naprezanja i da bi se zamijenila toplinska obrada za popuštanje zaostalih naprezanja mehaničkom. Takva mehanička obrada bi se provodila u dva ili tri ciklusa tlačenja i snižavanja tlaka.

Vodu za tlačnu probu bi trebalo kontrolirati na sadržaj klorida i fluorida koji mogu uzrokovati pukotine zbog korozije uz naprezanje. Zbog toga se preporuča odgovarajuće inhibiranje vode. Trebalo bi kontrolirati i temperaturu vode radi izbjegavanja krhkog loma. Nakon tlačne probe vodu treba odstraniti i osušiti unutrašnjost spremnika.

Zaostajanje vode ili vlage uzrokuje koroziju unutarnje stjenke, a korozijski procesi razvijaju atomarni vodik, koji difundira u čelik, uzrokuje lokalnu krhkost i može pridonijeti inicijaciji i širenju pukotina.

Kontrolu bez razaranja je neophodno izvršiti prije tlačne probe, kako bi se smanjio opseg popravaka zbog proširenja postojećih pukotina i smanjenja mogućnosti otvaranja novih za koje će biti potreban popravak, a u krajnjem slučaju da se izbjegne, eventualno, i katastrofalni lom zbog neotkrivene kritične dimenzije neke greške. Kontrola bez razaranja nakon tlačne probe je isto tako neophodna, jer se nakon tlačne probe vrlo često otkrivaju nove pukotine, ponekad u velikom broju [2]. Završna kontrola mora sadržavati cjelokupnu sliku prisutnih dopuštenih grešaka kao snimak početnog stanja, na temelju kojeg se kasnijom usporedbom rezultata od ispitivanja u eksploataciji može utvrditi da li je došlo do inicijacija novih i širenja prvobitnih grešaka.

Danas u svijetu mnogi korisnici i stručnjaci zaključuju, bar za sada, da treba odustati od primjene visoko čvrstih mikrolegiranih čelika i za izradu spremnika koristiti čelike s naprezanjem tečenja 355 MPa i nižim, jer ti čelici nisu toliko osjetljivi na procese zavarivanja. Osim toga, u svijetu se umjesto kuglastih spremnika prelazi na gradnju cilindričnih spremnika daleko veće zapremine, iz više razloga:

- budući da se spremnici nakon bojanja i izolacije pokrivaju zemljom debljine i preko 1 m, osjetno su smanjene ekstremne temperature, pa je na taj način smanjen i projektni tlak,
- sigurnost je znatno veća radi vanjskog požara, sabotaze, pada zrakoplova, potresa, oluje itd.,
- izgradnja jeftinija, brža i kvalitetnija jer se velikim dijelom mogu izraditi i zavariti u radionicama automatiziranim postupcima zavarivanja,
- manji troškovi održavanja,

Pitanje korištenja objekata koji se sada nalaze u eksploataciji je isključivo u nadležnosti Državnog inspektorata - Inspekcije posuda pod tlakom. Da bi spomenuta Inspekcija, uz punu odgovornost i stručnost, ne zaboravlja sigurnost pogona, ali vodeći računa o ekonomskim faktorima, mogla donijeti optimalnu odluku, nužna su znanstvena istraživanja o:

- osnovnim dokazima za uzrok nastajanja pukotina,
- razvoju pukotina u točno određenim uvjetima s obzirom na vrijeme nastajanja i
- detaljna razrada svih čimbenika u eksploatacijskim uvjetima, čija je primjena u konkretnim situacijama moguća, a imala bi za cilj veću sigurnost pogona i usporenu pojavu pukotina.

Za razumijevanje brojnih problema vezano uz izradu posuda pod tlakom od mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće, značajna su istraživanja utjecaja temperaturnih polja na transformaciju mikro strukture pri zavarivanju, što ima utjecaja na mehanička svojstva zavarenog spoja. Taj se utjecaj može iskazati preko brzine hlađenja, odnosno trajanja hlađenja pri transformaciji strukture.

Iz postojeće literature koja obrađuje utjecaj temperaturnih polja na mehanička svojstva zavarenog spoja od mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće [4], [34], [41], proizlazi da je nedovoljno poznat utjecaj brzine hlađenja tj. vremena hlađenja 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) na tvrdoću i žilavost ovih čelika. Posebice je važno istaknuti utjecaj brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost jednoprolaznog zavara kod mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće.

U teorijskom dijelu istraživanja ove radnje istražiti će se utjecaj temperaturnih polja na transformaciju mikrostrukture i na mehanička svojstva zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada predviđaju se ispitivanja tvrdoće i udarne radnje loma na različitim položajima u zoni utjecaja topline unutar cjelovitog područja zavara.

Pri ispitivanjima će se koristiti mikrolegirani čelik povišene čvrstoće TStE 420, a simulacija će biti provedena na simulatoru toplinskog ciklusa TCS 1405 SMITWELD.

Napravit će se fraktografska analiza karakterističnih prijelomnih uzoraka i ispitivanje na elektronskom scanning-mikroskopu pri čemu će se za svaki karakteristični prijelom (temperature ispitivanja: 20°C, 0°C, -20°C, -40°C i -60°C) utvrditi, da li se radi o interkristalnom, transkristalnom ili žilavom lomu.

Također, će se za karakteristične uzorke s različitim vremenima hlađenja 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) odrediti prijelazna temperatura žilavog u krhki lom, kao i udio pojedine vrste loma na prijelomnim površinama.

Ispitat će se sljedeća svojstva:

- udarna radnja loma unutar zone utjecaja topline,
- tvrdoća unutar cjelovitog područja zavara te mikrostruktura u istom
- mikrostruktura pojedinih zona zavarenog spoja.

Temeljem rezultata dobivenih na simulatoru toplinskog ciklusa i pri stvarnom zavarivanju, utvrdit će se korelacija između te dvije vrste podataka.

U tu svrhu su na FSB-u u Zagrebu i Fakulteti za strojništvo u Mariboru, provedena opsežna istraživanja, od kojih će u ovom radu biti prikazana ispitivanja utjecaja brzine hlađenja, za koja se smatra da su pokazala signifikantan utjecaj na tvrdoću i žilavost mikrolegiranog čelika TStE 420.

2. HIPOTEZA RADA

Osnovna hipoteza ovog istraživanja je:

Primjenom metode simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja, te ispitivanjem mehaničkih svojstava cikliranih uzoraka (prije svega udarne radnje loma i tvrdoće) i različitim metalografskim ispitivanjima, moguće je skratiti opseg trajanja aktivnosti kod izbora parametara realnog elektrolučnog zavarivanja taljenjem i ispitivanja u svrhu optimiranja glavnih parametara zavarivanja mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće TStE 420.

3. MIKROLEGIRANI ČELICI

U literaturi se mikrolegirani čelici još nazivaju čelici povišene čvrstoće ili sitnozrnati čelici. To su slitine Fe-C sa: Al, Nb, V, Zr, Ti, Mo, Cr i drugim elementima, u malim količinama. Zbog zavarivanja ugljik je rijetko zastupljen s više od 0,26% [5], s tim da se teži izradi čelika s manje od 0,1% [6].

Nova modernija tehnologija izrade čelika uključuje u proces izrade posebnu metalurgiju i kontinuirano lijevanje plosnatih i okruglih profila što manje debljine. Elektrolučna peć je u principu samo agregat za taljenje, a sve dodatne operacije (korektura kemijskog sastava, dezoksidacija, odsumporavanje, modifikacija uključaka, smanjivanje udjela plinova u čeliku), koje bitno utječu na kvalitetu čelika izvode se u loncu u vakumskoj komori uz propuhivanje čelika s argonom. Na taj način moguće je smanjiti koncentraciju vodika i kisika za više od 50%, a sumpora i ispod 0,003% [5]. Osim toga dodavanjem modifikatora uključaka dolazi do promjene oblika i rasporeda sulfida, silikata i oksida u okrugli oblik. Takvi uključci se toplim valjanjem ne deformiraju u pravcu valjanja, pa se time odstranjuje utjecaj nemetalnih uključaka na izotropiju mehaničkih svojstava kod limova. Sve to dovodi do poboljšanja zavarljivosti i žilavosti pri niskim temperaturama.

Na osnovi postignutih granica razvlačenja, razlikuju se tri grupe ovih čelika [6]:

1. Čelici povišene čvrstoće $360 < R_e \leq 500$ MPa
2. Čelici visoke čvrstoće $R_e = 500 \dots 1000$ MPa
3. Ultračvrsti čelici $R_e > 1000$ MPa

Za izradu većine zavarenih konstrukcija najčešće se koriste čelici s granicom razvlačenja od 300 do 700 MPa.

Normni propisi za sitnozrnate mikrolegirane normalizirane čelike sadržani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Sitnozrnati normalizirani čelici povišene granice razvlačenja [6]

OZNAKA ČELIKA	SASTAV %										R _m , N/mm ² , 20 °C			R _{eL} , N/mm ² , 20 °C			A ₅ %	tehnol. proba valjak φ mm uzduž.				
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Nb	Ti	V	Nb+Ti+V	mm	mm	mm	mm	mm			mm			
EN 10028-3	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<		
SIE 255	0,18	<	0,50..	<	0,035	<	0,030	<	0,035	0,030	<	0,030	<	0,030	<	0,030	<	0,030	<	0,030	25	1 s
WSIE255	0,18	0,40	0,50..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,03	0,05	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	25	1 s
TSIE255	0,16	<	..1,30	0,025	0,015	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	25	1 s
ESIE255	0,18	<	0,60..	0,035	0,030	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	25	1 s
SIE 285	0,18	0,40	0,60..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,03	0,05	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	24	1,5 s
WSIE285	0,16	0,40	0,60..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,03	0,05	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	24	1,5 s
TSIE285	0,16	<	..1,40	0,025	0,015	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	24	1,5 s
ESIE285	0,18	<	0,70..	0,035	0,030	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	24	1,5 s
SIE 315	0,18	0,45	0,70..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,03	0,05	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	23	2 s
WSIE315	0,16	0,45	0,70..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,03	0,05	0,20	0,30	0,03	0,035	0,025	23	2 s
TSIE315	0,16	<	..1,50	0,025	0,015	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	23	2 s
ESIE315	0,18	<	..1,50	0,025	0,015	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	23	2 s
SIE 355	0,20	0,10..	0,90..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,05	0,12	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	22	2 s
WSIE355	0,18	0,10..	0,90..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,05	0,12	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	22	2 s
TSIE355	0,18	0,10..	0,90..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,05	0,12	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	22	2 s
ESIE355	0,18	0,10..	0,90..	0,035	0,030	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	0,30	0,05	0,12	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	22	2 s
SIE 380	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	20	2,5 s
WSIE380	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	20	2,5 s
TSIE380	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	20	2,5 s
ESIE380	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	20	2,5 s
SIE 420	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	19	2,5 s
WSIE420	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	19	2,5 s
TSIE420	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	19	2,5 s
ESIE420	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	19	2,5 s
SIE 460	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	17	3 s
WSIE460	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	17	3 s
TSIE460	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	17	3 s
ESIE460	0,20	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	17	3 s
SIE 500	0,21	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	16	3 s
WSIE500	0,21	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	16	3 s
TSIE500	0,21	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	16	3 s
ESIE500	0,21	0,10..	1,00..	0,035	0,030	0,20	1,00	0,05	0,035	0,025	0,030	0,20	1,00	0,05	0,22	0,20	0,30	0,05	0,035	0,025	16	3 s

gdje je:
s - debljina probe, mm

Iz tablice 3.1 se vidi, da se ova skupina čelika proizvodi:

- u općoj kvaliteti (niz StE ...),
- za rad pri povišenim temperaturama (niz WStE...),
- za rad pri sniženim temperaturama (niz TStE...) i
- za rad pri ekstra-niskim temperaturama (niz EStE...).

Vidi se nadalje da se radi o legiranim čelicima, kojima je legirajući element mangan propisan sadržajem od najviše 1,7 % (ostali legirajući elementi nisu propisani, no i ako postoje ne smiju jače utjecati na ugljikov ekvivalent).

3.1. Teorijske osnove povećanja granice razvlačenja

Plastična deformacija čelika temelji se na procesima koji se odvijaju preko kretanja dislokacija kao diskontinuirani djelomični koraci klizanja po kristalografski povoljnim ravnima. Prema tome, presudni utjecaj na mehaničku otpornost metala imaju dislokacije.

Postoje dva principijelna načina za povećanje granice razvlačenja metala:

a) Dobivanje materijala s gotovo idealnom strukturom

Ovakve materijale je tehnološki nemoguće proizvesti ako se žele veće dimenzije.

Do sada su se uspjela dobiti vlakna promjera do 5 μm . Vlakno željeza npr. tako dobiveno promjera 1.6 μm ima čvrstoću 13.400 N/mm² [6].

b) Ometanje kretanja dislokacija

Ovaj način povećanja naprežanja tečenja, daje manje povećanje nego prvi, ali ipak predstavlja osnovu razvoja visokočvrstih čelika. Kemijski sastav i strukturu čelika treba tako podesiti, da se dovoljno oteža gibanje dislokacija, ali da ipak bude moguće gibanje mnogih dislokacija, pri čemu bi se održala dovoljna istezljivost.

Postoji više različitih mehanizama koji mogu biti uključeni u ometanju kretanja dislokacija, odnosno pri postizavanju visoke čvrstoće u ovim čelicima [5, 7].

Očvršćenje legiranjem ferita

Atomi legirajućih elemenata otopljeni u feritu deformiraju kristalnu rešetku željeza i na taj način djeluju kao zapreka kretanju dislokacija, a da pri tome ne dolazi do promjene rasporeda atoma u rešetci.

Očvršnuće ovim putem je relativno slabo, a veće je što je niža granica rastvorljivosti u feritu. Uz supstitucijske legirne elemente veliku ulogu ima ugljik, jer on u kombinaciji s dušikom ima najvišu vrijednost koeficijenta očvršnuća.

Kod konstrukcijskih čelika (do 0.2% C) ugljik utječe tako da povisuje prosječno:

R_m za 70 MPa za svakih 0.1% C

R_e za 28 MPa za svakih 0.1% C

Cementit utječe na mehanička svojstva čelika svojim udjelom, oblikom i rasporedom. Struktura sa zrnatim cementitom je mekša nego ona s lamelarnim, dok je struktura s manjim lamelarnim razmakom više čvrstoće.

Formiranje Cotellovog dislokacionog oblaka

Zbog vrlo dobre sposobnosti difuzije ugljikovih i dušikovih atoma u čeliku, ti atomi se mogu češće nakupiti oko dislokacija tvoreći Cotellove oblake. Cotellovi oblaci blokiraju pokretne dislokacije i daljnja je plastična obrada moguća samo ako oblak "otkine" blokiranu dislokaciju, a za ovo je potrebno povišenje naprezanja. Usidrenje dislokacija može biti tako jako, da povišenje nije dovoljno da "otkine" dislokaciju, pa se početak daljnje plastične deformacije provodi novim stvaranjem i umnožavanjem pokretnih dislokacija na aktivnim izvorima dislokacija (površine granice zrna, uključci, šuplji prostori). Dakle, granica razvlačenja ovisi o sili potrebnoj da se dislokacija otkine iz Cotellovog oblaka i o sposobnosti klizanja u kristalu koje je ovisno i o veličini zrna.

Očvrnuće usljed deformacije hladnim gnječenjem

Hladna plastična deformacija uzrokuje, uz gibanje dislokacija, uvijek i stvaranje novih. Kristali u nedeformiranom obliku imaju gustoću dislokacija 10^6 do 10^8 cm^{-2} . Budući da pri plastičnoj deformaciji gustoća dislokacija može narasti i do 10^{12} cm^{-2} , to utječe na porast naprezanja tečenja prema relaciji [7]:

$$\Delta R_e = B \cdot b_v \cdot G \cdot \rho_d^{1/2} \quad \dots(3.1)$$

gdje je :

B - bezdimenzijska konstanta reda veličine 1 u koju ulazi i poredak dislokacija,

b_v - Burgersov vektor,

G - modul smičnosti čestica,

ρ_d - gustoća dislokacija.

Hladnom deformacijom dolazi i do usitnjavanja zrna a time i do povećavanja broja granica zrna koje predstavljaju zapreku kretanja dislokacija.

Očvrnuće kaljenjem i naknadnim popuštanjem

Vrlo jako povišenje granice razvlačenja nastupa, ako se putem stranih atoma izazove u matičnoj rešetki jaka anizotropna distorzija. To se postiže kaljenjem i naknadnim popuštanjem.

Precipitacijsko povećanje naprezanja tečenja

Metalno fizikalne zavisnosti interakcije između dislokacija i precipitata mogu se opisati putem dva mehanizma. To su: proces obilaženja (Orowanov mehanizam) i odsječni proces.

Pri tome je bitna veličina, količina i tvrdoća čestica precipitata. Ako su čestice tvrde, dislokacija ne može prodrijeti u njih (odrez), nego se dislokacija savija između čestica i obilazi ih.

Za naprezanje potrebno za obilazak čestica vrijedi Orowanova relacija:

$$\Delta R_e = 3 \cdot \tau = \frac{3 \cdot G \cdot b_v}{D} = \frac{3 \cdot G \cdot b_v}{2 \cdot r} \quad \dots(3.2)$$

gdje je:

τ - tangencijalno naprezanje,

D - razmak među precipitatima i

r - radijus zakrivljenosti dislokacije između dvije čestice.

Ako je:

$$\frac{d}{D} = f^{1/3} \cdot c \quad \dots(3.3)$$

gdje je:

d - promjer čestica,

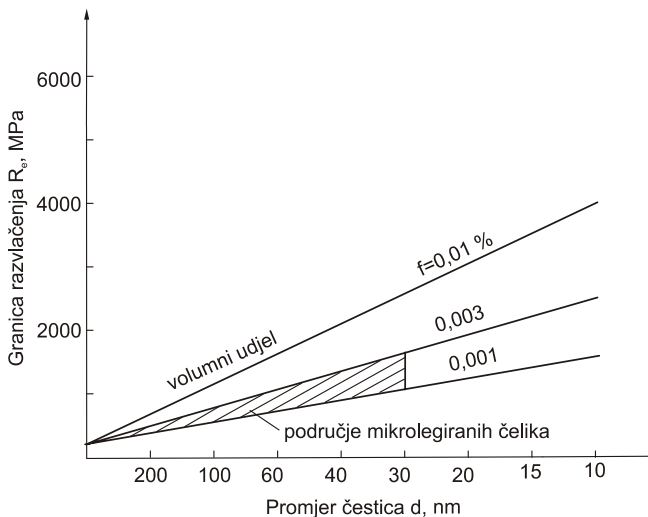
f - volumenski udjel čestica u ukupnom volumenu i

c - faktor rasporeda čestica.

Proizilazi za $d \ll D$:

$$\Delta\tau = c \cdot \frac{G \cdot b_v \cdot f^{1/3}}{d} \quad \dots(3.4)$$

tj. porast tangencijalnog naprezanja $\Delta\tau$ precipitacijskim otvrdnjavanjem je veći što je veći volumenski udjel čestica i što su čestice precipitata manje.



Slika 3.1. Povišenje granice razvlačenja usljed mehanizma obilaska čestica različitog promjera i volumenskog udjela [7].

Najdjelotvornije su čestice precipitata veličine 20-50 nm [8]. Eventualna njihova koagulacija u precipitate većih dimenzija djelovat će manjim intenzitetom na povišenje R_e . Uz veličinu i volumenski udjel čestica (slika 3.1) ulogu igra i razmak među njima (stupanj disperzije), što određuje potrebno naprezanje za potiskivanje dislokacija između čestica. Najjače očvršnuće je onda, kada su veličine čestica i razmak među njima upravo takvi, da ne nastupa odrez.

Povoljno djelovanje u smislu precipitiranja dovoljno čvrstih, dovoljno sitnih i dovoljno fino dispergiranih čestica (precipitata) imaju posebice elementi: Ti, V i Nb, koji s ugljikom i dušikom tvore karbide, nitrde i karbonitrde.

Očvrstuće putem sitnog zrna

Utjecaj granice zrna na gibanje dislokacija očituje se u povišenju naprezanja koje treba narinuti izvana (R_e) da se izazove plastična deformacija.

Brojnim istraživanjima dokazano je, da granica razvlačenja ovisi i o drugom korijenu recipročne vrijednosti veličine zrna, prema Hall-Petch-ovoj jednadžbi [7]:

$$R_e = R_0 + K_e \cdot d_z^{-1/2} \quad \dots(3.5)$$

gdje je:

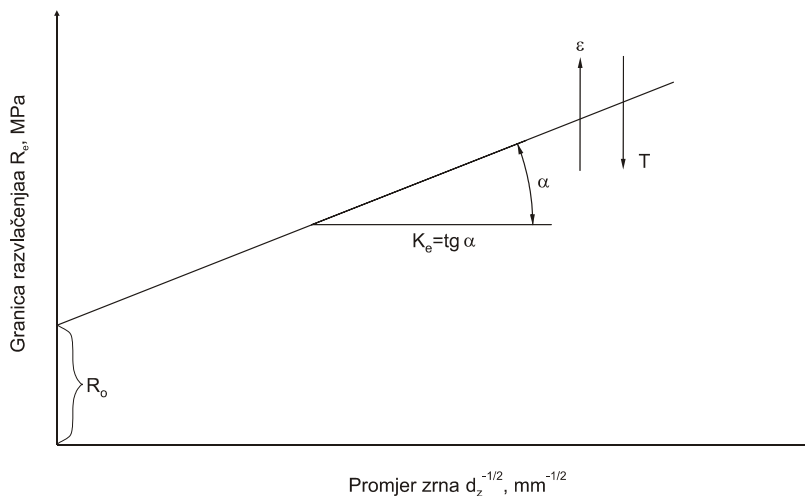
R_e – granica razvlačenja,

R_0 – nulto naprezanje ,

K_e – faktor koji ovisi o vrsti metala i

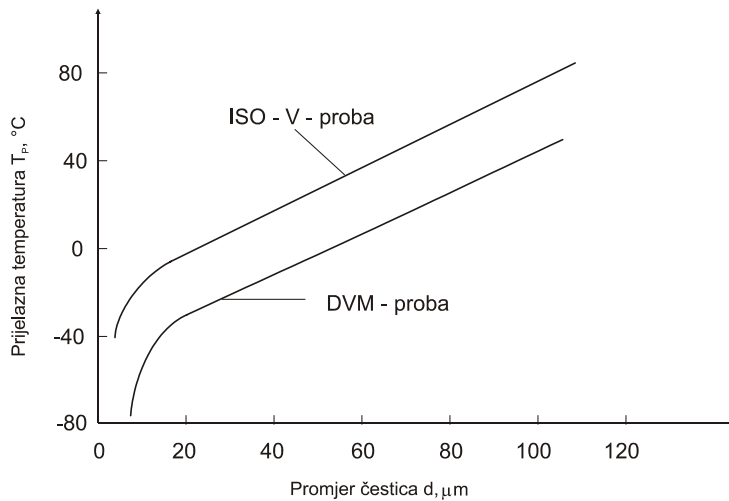
d_z – srednji promjer zrna.

Prikaz granice razvlačenja u ovisnosti o recipročnoj vrijednosti korijena srednjeg promjera zrna daje pravac u kojem je K_e koeficijent smjera. Temperatura T i brzina deformacije ε su parametri koji utječu na nagib pravca, a time i na granicu razvlačenja, slika 3.2.



Slika 3.2 Shematski prikaz ovisnosti granice razvlačenja i veličine zrna [7]

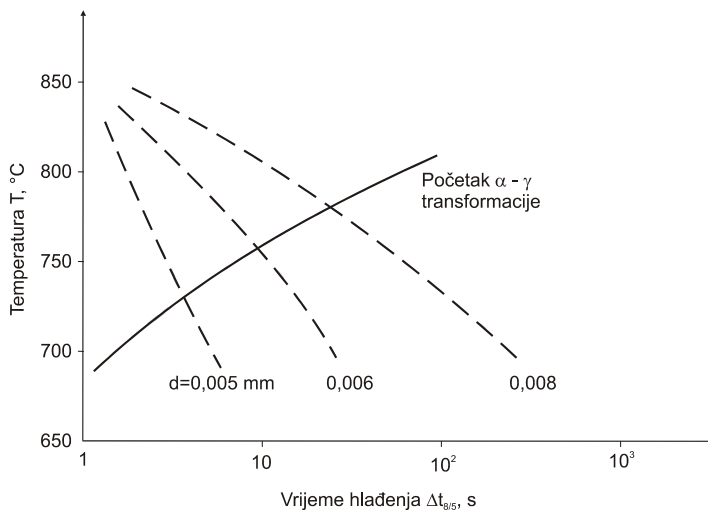
Veličina zrna utječe i na čvrstoću materijala (R_m), ali je taj utjecaj manji nego na granicu razvlačenja (R_e), pa stoga sa sitnoćom zrna raste R_e/R_m . Mehanizam očvrstuća putem usitnjenja zrna povećava istovremeno čvrstoću i udarnu radnju loma, odnosno snižava prijelaznu temperaturu. [7],[9] i [10]. Utjecaj veličine zrna i prijelazne temperature na udarnu radnju loma prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3 Utjecaj veličine zrna i prijelazne temperature na udarnu radnju loma [7].

Prema tome, sitno zrno je najdjelotvornije sredstvo za postizanje optimalnih svojstava. U praksi se teži sitnom austenitnom zrnu, jer ono predodređuje veličinu feritnog zrna.

Kako je već navedeno, jedan od načina reguliranja veličine austenitnog zrna je precipitacija finih čestica u austenitnoj strukturi, čime se sprječava porast zrna. Daljnja je mogućnost da se austenitno zrno usitni većim stupnjevima deformiranja i nižom temperaturom završnog valjanja. Uz to se bržim hlađenjem nakon valjanja potiskuje γ/α transformacija na niže temperature na kojima se povisuje gustoća klica, a snižava pokretljivost granica zrna, odakle opet proizlazi smanjenje feritnog zrna, slika 3.4.



Slika 3.4. Utjecaj brzine hlađenja nakon završenog valjanja na početak transformacije i veličinu feritnog zrna [7].

Konačno postoji mogućnost da se spriječi rekristalizacija austenitnih zrna pri valjanju prisutnošću TiN. Tada se deformira nerekristalizirani austenit, čime se postižu uzdužno izdužena zrna a time se jako povećava površina austenitnih zrna. Transformacijom te strukture u feritno-perlitnu proizlazi, usljed povećanja gustoće klica i zakočenog rasta, jako usitnjenje zrna.

Ovim načinima zaprečavanja nastaju četiri osnovne vrste zapreka koje se "postavljaju" radi ometanja kretanja dislokacija, u cilju povećanja granice razvlačenja.

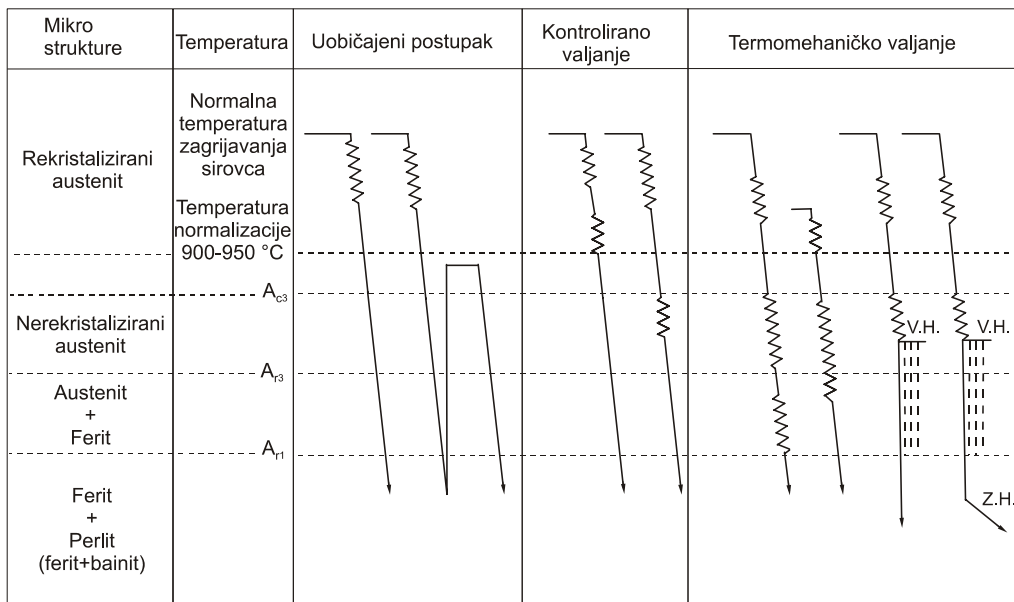
Prema veličini i geometrijskom obliku dijele se na:

- točkaste zapreke – atomi legiranih elemenata
- linijske zapreke – dislokacije
- plošne zapreke – granice zrna
- prostorne zapreke – precipitati.

Navedeni efekti mogu se dobiti proizvodnjom sitnozrnatih mikrolegiranih čelika na tri osnovna načina:

- uobičajenim toplim valjanjem i normalizacijom,
- poboljšavanjem nakon valjanja tj. kaljenjem i popuštanjem
- kontroliranim valjanjem, tj. termomehaničkom obradom.

Često se sitnozrnati mikrolegirani čelici u literaturi nazivaju normaliziranim (N - Normalized steel), poboljšani (QT-Quenched and tempered steel) i kontrolirano valjani (TMCP-Thermo-mechanical control proces). Treba napomenuti da postoji poseban vid kontroliranog valjanja, koje se naziva termomehaničko kontrolirano valjanje, [10,11], slike 3.5 i 3.6.

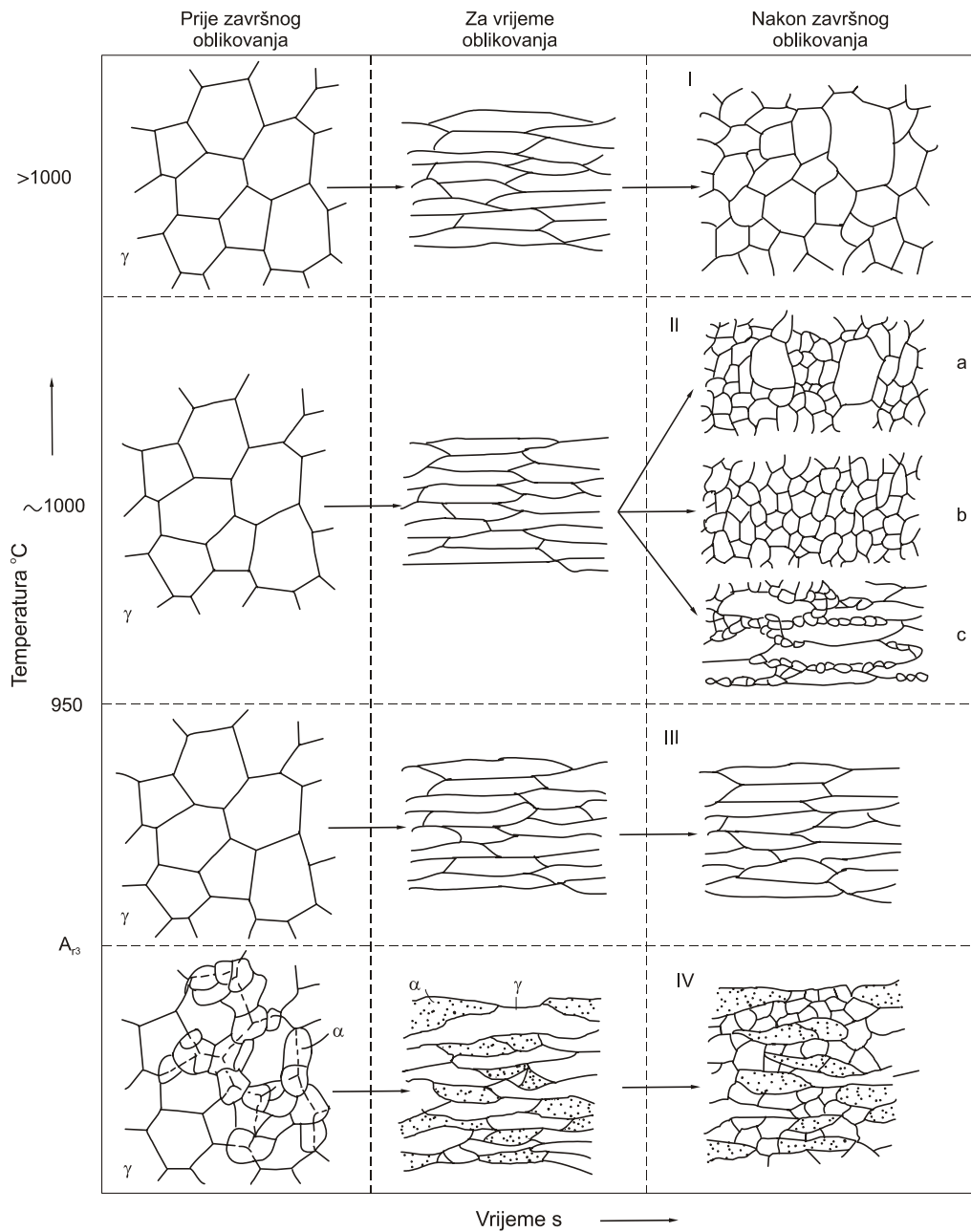


V.H.-vodeno hlađenje; Z.H.-Zračno hlađenje; A_{r1} - temperatura eutektoidne pretvorbe; A_{c3} , A_{r3} - temperature pretvorbe austenita pri zagrijavanju i hlađenju.

Slika 3.5. Princip postupka prerade mikrolegiranih čelika [11].

Definicije oba procesa valjanja razradila su klasifikacijska društva na osnovi postignutih mehaničkih svojstava i strukture materijala, a one glase:

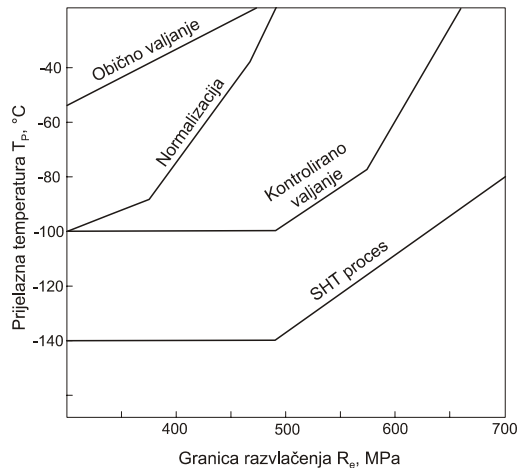
- kontrolirano valjanje je postupak kod kojeg se konačna temperatura valjanja najčešće kontrolira unutar područja normalizacijskog žarenja, pri čemu se austenit potpuno rekristalizira.
- termomehaničko kontrolirano valjanje je postupak koji sadrži strogu kontrolu temperature čelika i redukcije presjeka kod valjanja. Veliki dio redukcije presjeka odvija se ispod A_{r3} temperature, što omogućava, ako ga ima i rekristalizaciju austenita.



- a – gruba austenitna zrna
- b – rekristalizirana austenitna zrna
- c – izdužena nekristalizirana zrna

Slika 3.6. Utjecaj temperature završnog oblikovanja na mikrostrukturu čelika [10].

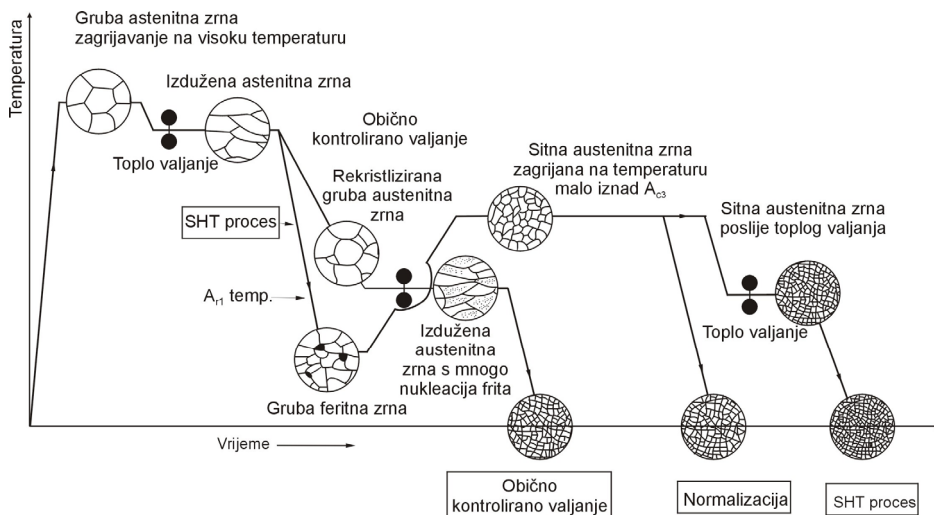
Utjecaj načina dobivanja čelika na granicu razvlačenja i temperaturu prijelaza u krhko stanje, ispitanu Charpy V-probom s utorom dubine 2 mm prikazuje slika 3.7.



Slika 3.7. Utjecaj načina dobivanja čelika na granicu razvlačenja i prijelaznu temperaturu [12].

Iz dijagrama na slici 3.7 je vidljivo da se pri SHT procesu (Sumitomo High Toughness) dobivaju čelici koji pri granici razvlačenja od 700 MPa imaju temperaturu prelaska u krhko stanje $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

SHT proces je postupak dobivanja čelika uz posebno kontrolirano valjanje na određenim temperaturama, pri čemu se dobivaju sitna austenitna zrna čijom transformacijom nastaje još sitnija struktura odličnih mehaničkih svojstava, slika 3.8.



Slika 3.8. Shematski dijagram promjene mikrostrukture ovisno o postupku dobivanja čeličnih limova prema postupku Sumitomo [12].

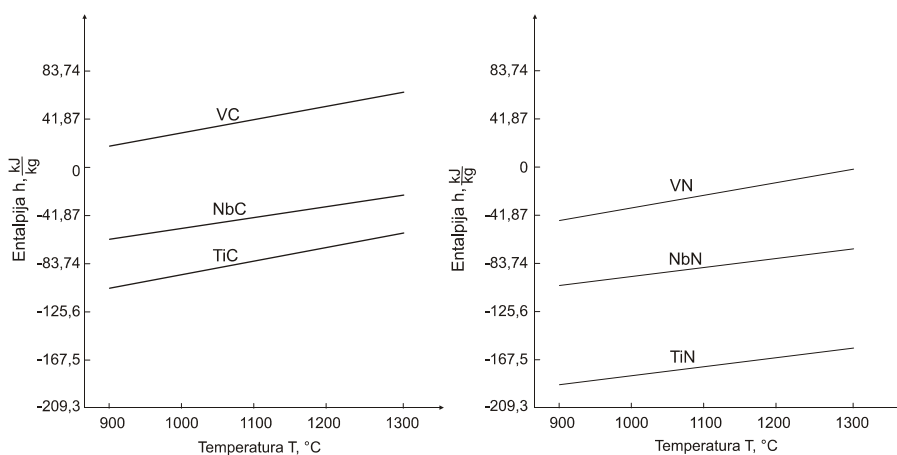
3.2. Utjecaj legirajućih elemenata na strukturne pretvorbe

U mikrolegiranim čelicima se mogu naći različiti kemijski elementi, bilo kao redoviti pratioци, nečistoće ili kao namjerno dodani sastojci s ciljem poboljšanja svojstava.

Smatra se da je za izradu spremnika za tekuće naftne plinove potrebno koristiti znatno čišće čelike nego do sada, kako bi se postigla otpornost na koroziju izazvanu naprezanjem (SCC-Stress Corrosion Craking), zbog prisustva vlažnog H₂S. Postotak sumpora ograničava se na manje od 0,001 %, a fosfora na manje od 0,005%, zbog poboljšanja zavarljivosti čelika [13]. Da se izbjegnu oštri oksidni uključci, kisika bi trebalo biti manje od 0,02 %, a da se izbjegnu segregacije treba smanjiti sadržaj ugljika na manje od 0,1 % i mangana na manje od 0,8 %, kako bi se dobili mali globularni sulfidni uključci. Silicij, iako je vrlo aktivan za povišenje čvrstoće i naprezanja tečenja, treba ograničiti na 0,5 %, zbog sniženja prijelazne temperature.

Za sitnozrnate mikrolegirane čelike zanimljiv je i utjecaj Ti, V i Nb, koji povoljno djeluju u smislu precipitiranja dovoljno čvrstih, dovoljno sitnih i dovoljno fino disperziranih čestica – precipitata [7,14,15 i 16]. Navedeni elementi sa C i N u mikrolegiranim čelicima stvaraju precipitate sastava: TiN, TiC, NbN, NbC, Nb(C,N), VN, VC i V(C,N). Najmanji afinitet prema C ima vanadij, tako da kod njega dolaze do veće važnosti nitridi. Vrsta nastalih karbida i/ili nitrida, ovisi i o sadržaju ugljika i dušika u čeliku.

Radi različitih iznosa entalpija precipitati se izlučuju iz austenita pri ohlađivanju na različitim temperaturama, slika 3.9.



Slika 3.9. Slobodne entalpije stvaranja karbida i nitrida V, Nb i Ti [7].

Pri najvišoj temperaturi (1300 °C) izlučuje se TiN. Ukoliko šarža čelika sadrži upravo stehiometrijske odnose Ti i N, postoji opasnost, da se sav N "potroši", pa se pri daljnjem ohlađivanju izlučuju samo karbidi NbC i VC. Ukoliko pak, šarža čelika sadrži više Ti nego N, u tom slučaju osim TiN može nastati Ti-karbosulfid ($Ti_4C_2S_2$) i TiC. Od precipitata djelotvorni su za povišenje čvrstoće samo oni, koherentni ili samokoherentni s feritom. Precipitati TiN se izlučuju po granicama austenitnih zrna i veoma su djelotvorni u smislu kočenja rekristalizacije pri valjanju, ali nisu koherentni u feritu nego u austenitu. Transformacijom austenita u ferit oni gube koherenciju i postaju nedjelotvorni.

Što više ako TiN-čestice tvore klice za nastanak VC, tada će i VC - precipitati biti inkohherentni u feritu, dakle nedjelotvorni.

Što se tiče zavarljivosti mikrolegiranih čelika, za mikrolegiranje je "popularniji" Nb nego V, jer on ne povisuje C-ekvivalent, a V ga povisuje. Međutim, postignuće $R_e > 400$ MPa nije moguće putem niobija, nego je potreban i dodatak vanadija. Sam vanadij preko svojih spojeva nije u stanju dovoljno zakočiti rekristalizaciju pri valjanju, pa se uz V dodaje još i 0,05% Ti (ili više), kada opet nastupa opasnost kompletnog "angažiranja" dušika od strane Ti (nastanak TiN).

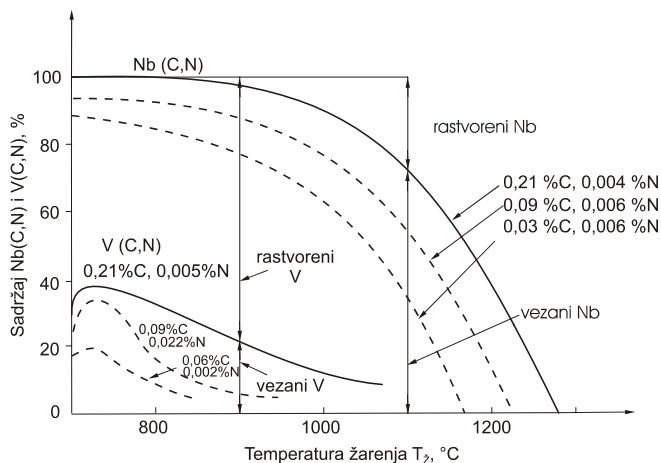
Prema literaturnim podacima [14] svakih 0,01% V povisuje prijelaznu temperaturu za 2 K, pa će npr, sadržaj od 0,2% V povisiti tu temperaturu za 40 K.

Sve ovo ukazuje da je zadovoljavajuća svojstva mikrolegiranih čelika moguće postići precizno odmjerenim dodacima, te regulacijom metalurškog procesa u uskim granicama. U tom će slučaju TiN djelovati u smislu kočenja rekristalizacije pri valjanju, dok će precipitati Nb(C,N), V(C,N) i TiC služiti kao "očvršćivači" čelika. Ovi se spojevi stvaraju s nižim temperaturama nego što je to slučaj s TiN.

Na svojstva zavara mikrolegiranih čelika uz sastav osnovnog materijala i dodatne žice utječu i ostali faktori kao što su sastavi praška, zaštitni plinovi ili plinovi iz atmosfere, rastvorivost elemenata, nečistoće itd. Konačni sastav metala zavara obično je između sastava osnovnog i dodatnog metala [17].

Prilikom zavarivanja u zoni utjecaja topline dolazi do rastvaranja postojećih precipitata. Slobodne entalpije stvaranja VC i VN ima najveću vrijednost u odnosu na ostale vanadijeve karbide i nitride, tj. oni su i najmanje stabilni, pa se rastvaraju najprije.

Već pri 1000 °C VC je skoro u potpunosti rastvoren, dok je NbC posve rastvoren tek pri 1250 °C. Slično vrijedi i za nitride, slika 3.10.



Slika 3.10 Utjecaj temperature žarenja i sadržaja C i N na izlučivanje V odnosno Nb karbonitrida [7].

Na slici 3.10 prikazani su rezultati 60-minutnog žarenja, nakon homogenizacijskog žarenja na 1300 °C. Iz slike se vidi da rastući postotak ugljika utječe na povećanje udjela rastvorenih metala.

Općenito gledano teži se dobivanju mikrolegiranog čelika za zavarene konstrukcije koji će pored dobrih mehaničkih svojstava samog čelika dati i dobra svojstva zavarenih spojeva na tim čelicima uz ekonomično zavarivanje. Pri tome se misli, da se uz zavarivanje visokoučinskim postupcima mogu dobiti dobra mehanička svojstva zavarenog spoja, posebice udarna radnja loma pri niskim temperaturama.

Istraživanja Pihl-a [18] upozoravaju na pojavu krhkosti zavarenih spojeva kod čelika koji u svom sastavu imaju povećan sadržaj V, naročito kod zavarivanja s većim unosima topline. Suzuki i Watanabe [19] tvrde da se visoka udarna radnja loma zavarenih spojeva pri niskim temperaturama može dobiti na čelicima zavarenim s visokim unosima topline, ukoliko se čeliku doda određena količina titana.

U posljednje vrijeme se intenzivno radi na razvoju mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće legiranih s Nb i Mo [20]. Umjesto Mo može se u proizvodnji čelika s povećanim sadržajem Nb koristiti i Ni, da bi se čeliku povećala žilavost.

Očito da je ostalo još mnogo toga nepoznato o djelovanju mikrolegirajućih elemenata u odnosu na ostale legirne elemente kao što su Mo, Ni, Cr, W i ostali, iako ih u čelicima nalazimo u malim količinama. Treba očekivati i interesantne rezultate i spoznaje o zajedničkom djelovanju rekristalizacije, precipitacije i transformacije kod dobivanja čelika toplim oblikovanjem.

Postoje još neke nepoznanice kod ponašanja ovih čelika, kako pri izradi zavarenih konstrukcija, tako i u uvjetima eksploatacije.

3.3. Problemi zavarljivosti i primjena zavarenih konstrukcija od mikrolegiranih čelika u eksploataciji

Pri proučavanju zavarivanja kao jedne od tehnoloških disciplina susreće se pojam "zavarljivost metala". To je kompleksan pojam pod kojim se podrazumijeva međuzavisnost materijala, konstrukcije i tehnologije. Tako DIN 8528 [21] prikazuje zavarljivost nekog konstrukcijskog elementa kroz utjecaj materijala, preko sposobnosti zavarivanja konstrukcije, do sigurnosti zavarene konstrukcije i mogućnosti zavarivanja.

Prema standardu ISO 581, metali se smatraju zavarljivim po određenom stupnju, određenim načinom zavarivanja i za danu svrhu, ako se može postići homogenost zavarenog spoja pri uporabi pogodnog postupka zavarivanja, tako da spoj odgovara zahtjevima njihovih lokalnih svojstava i njihovog utjecaja na konstrukciju.

Kvaliteta zavarenog spoja se može izraziti preko komparacije svojstva osnovnog materijala i zavarenog spoja. Redovito dolazi do razlike u svojstvima osnovnog materijala i zavarenog spoja, i ta je razlika veća, što je zavarljivost, kao kompleksna veličina, manja. Stoga je jedan od mogućih kriterija za definiranje zavarljivosti veličina navedene razlike svojstava [22].

3.3.1. Veličine koje utječu na zavarljivost

Elementi zavarljivosti su relevantne pojave u zavarenom spoju koje najčešće nastaju u momentu njegova formiranja ili tijekom eksploatairanja i predstavljaju čimbenike preko kojih se može definirati zavarljivost kao kompleksna veličina.

Najznačajniji utjecaj na zavarljivost ima materijal i njegov nominalni kemijski sastav, a u manjoj mjeri, primjese, rezidualni elementi, veličina zrna, vrsta primjenjene prethodne toplinske obrade, stanje izrade, veličina i oblik komada i konstrukcije. Korelacija kemijskog sastava, prvenstveno sadržaja ugljika, i zavarljivosti, može se dati jednadžbama za ekvivalent ugljika kao i parametarskim jednadžbama.

Uobičajeno je da je čelik s oko 0,25% C, na granici dobre zavarljivosti i što je sadržaj ugljika u čeliku veći, zavarljivost se smanjuje, ali pri ovome se ne može govoriti o linearnoj zavisnosti.

Ugljik je svakako element s kojim se mora računati za razliku od fosfora, sumpora i dr. kojih se razina nastoji smanjiti tehnološkim postupkom prerade čelika. Važan je i utjecaj plinova, posebice vodika, koji je direktni uzročnik nastanka hladnih pukotina.

Utjecaj vodika je značajan i u okviru određenih metoda ispitivanja zavarljivosti treba odrediti njegov sadržaj u uzorcima.

Utjecaj legirajućih elemenata u čeliku Mn, Cr, Ni, Mo,.. također nije linearan s porastom koncentracije. On se svakako veže na oblikovanje strukture, utjecaj većine legirajućih elemenata se iskazuje preko promjene zakaljivosti tj. preko utjecaja na transformiranje austenita u uvjetima hlađenja.

Izrada i konstrukcija, kao faktori koji utječu na zavarljivost, dolaze do izražaja pri formiranju konkretne zavarene konstrukcije.

Zavarljivost se svakako smanjuje s povećanjem debljine osnovnog materijala, kao i složenosti konstrukcije. Iz navedenog se vidi da veličina koje utječu na zavarljivost ima mnogo, što je i razlog da ne postoji jedinstveni pristup problemu definiranja zavarljivosti.

3.3.2. Tople pukotine

Tople pukotine se javljaju za vrijeme skrućivanja metala zavara i zone staljivanja, a mogu se očekivati i u ZUT-u i u metalu zavara. Jedan od osnovnih čimbenika koji utječu na pojavu toplih pukotina je kemijski sastav čelika [23].

Naročito je nepovoljan sumpor radi stvaranja lako taljivog eutektikuma Fe-FeS, koji ima talište 988 °C i veliku krhkost. Hlađenjem zavarenog spoja u njemu se mogu javiti zaostala vlačna naprezanja, koja se povećavaju sniženjem temperature. Ta zaostala naprezanja izazivaju elastično-plastičnu deformaciju zavarenog spoja, i ako ta deformacija bude veća od deformacijske sposobnosti metala, dolazi do nastajanja toplih pukotina.

Fosfor, slično kao i sumpor, snižava postojanost zavarenog spoja prema toplim pukotinama, bilo da smanjuje plastičnost zavarenog spoja, bilo da povećava nejednolikost rasporeda sumpora. Povećanjem sadržaja ugljika povećava se sklonost čelika prema ovoj pojavi. Ugljik, osim što utječe na nejednolikost rasporeda sumpora u metalu, djeluje i na smanjenje njegove taljivosti u željezu. To utječe na izdvajanje sulfidnih uključaka po granicama kristalita, što djeluje na smanjenje postojanosti čelika prema toplim pukotinama.

Osim S, P i C postojanost čelika prema ovoj pojavi stvaranja toplih pukotina smanjuje i niobij. Smanjenje sklonosti mikrolegiranih čelika prema nastajanju toplih pukotina postiže se ograničavanjem sadržaja sumpora i fosfora u osnovnom i dodatnom metalu, ili njihovo vezivanje u teško taljive spojeve. U vezi s tim je poznat pozitivan utjecaj mangana. Postojanost mikrolegiranih čelika se postiže i dodatkom modifikatora, pri čemu nastaje mikroznata neusmjerena struktura. Kao modifikatori se koriste Al, Ti, V i Zr koji, osim što smanjuju sklonost čelika prema toplim pukotinama, utječu i na poboljšanje mehaničkih svojstava metala zavara.

Sa stajališta zavarljivosti važne su samo pukotine u zoni utjecaja topline, jer one nastale u metalu zavara mogu biti otklonjene promjenom tehnologije zavarivanja, (tj. unosom topline) ili zamjenom vrste dodatnog metala. Inače, tople pukotine rijetko nastaju u mikrolegiranim čelicima.

3.3.3. Hladne pukotine

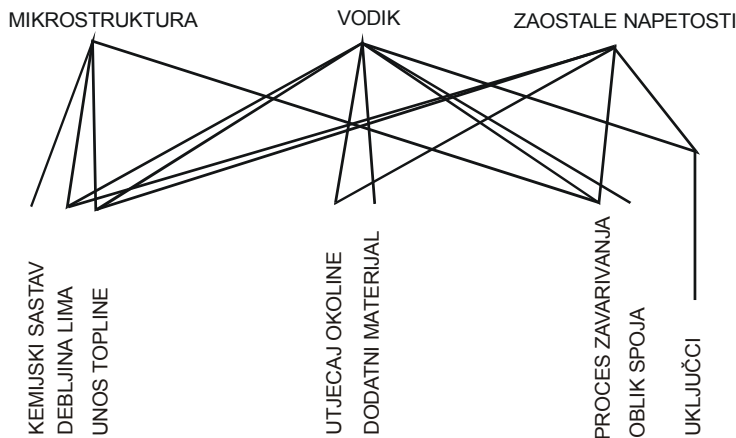
Hladne pukotine su greške koje nastaju poslije završenog zavarivanja ili poslije nanošenja pojedinih slojeva metala zavara na temperaturi bliskoj sobnoj ili povišenoj, ali ne većoj od 200 do 250 °C [24].

One su jedan od oblika makroskopskog i mikroskopskog diskontinuiteta zavara i ZUT-a, a često se nazivaju i zakašnjele pukotine.

Hladne pukotine su tipičan oblik nehomogenosti koji se najčešće javlja u zavarenim spojevima nisko i srednje legiranih čelika feritno-perlitne i martenzitne strukture, često u literaturi nazivane "vodikom uvjetovanim pukotinama" [24].

Do nastanka hladnih pukotina dolazi istovremenim djelovanjem sljedećih čimbenika:

1. postojanje neravnotežnih struktura u zavarenom spoju, što je karakteristično za čelike sklone zakaljivanju,
2. ako je u zavarenom spoju tijekom zavarivanja postojao vodik, koji nakon zavarivanja nije izašao van,
3. izražena napetost konstrukcije (velika vanjska naprezanja i velika debljina osnovnog materijala).



Slika 3.11. Čimbenici koji uvjetuju nastanak hladnih pukotina [25].

Hladne pukotine se neće pojaviti ako nisu ispunjena sva tri navedena preduvjeta, a bitno je napomenuti da su one prije svega svojstvene ZUT-u, a manje samom metalu zavara [4].

Mnogi istraživači klasificiraju hladne pukotine kao pojavu vodikove krhkosti čelika, ali kada se govori o ulozi vodika u nastanku pukotina, mora se prvenstveno objasniti podrijetlo prisustva vodika u zavarenom spoju.

Vodik nastaje pri disociranju vodene pare u električnom luku, a od procesa zavarivanja ovisi na koji način će vodena para doći u električni luk. Vodik može doći u metal najčešće iz:

- obloge elektrode,
- praška,
- vlažne okoline,
- nečistih plinova zaštitne atmosfere, nedovoljno očišćenih (neodmašćenih) elektrodnih žica i stranica spoja koji se zavaruje.

Stranice spoja pokrivene korozivnim slojevima predstavljaju intenzivni izvor vodika u metalu zavara.

Pri REL postupku zavarivanja vodik dolazi u zavareni spoj iz:

- kondenzirane vlage,
- vodene pare u atmosferi
- organskih tvari,
- vlage apsorbirane higroskopnom oblogom.

Kod EPP postupka iz:

- kristalizacijske vode iz zaštitnog praška

Pri MIG/MAG postupku iz:

- vlage apsorbirane na površini žice,
- vlage iz zaštitnog plina,
- zaštitnog praška žice, ako se zavaruje praškom punjenom žicom.

Kod TIG postupka iz:

- vlage apsorbirane na površini dodatne žice,
- vlage iz zaštitnog plina.

Osim ovih izvora vlage treba spomenuti i vanjske izvore, kao što su vlažnost atmosfere, vlaga na čeliku u blizini spoja (apsorpcija ili kondenzacija), moguće prisustvo ugljikovodika itd.

Ako se želi smanjiti sadržaj vodika u metalu zavara, tada elektrode ili prašak treba prije zavarivanja sušiti nekoliko sati na temperaturama 300 do 400 (°C) ili po uputama proizvođača elektroda.

Atomarni vodik iz metala zavara difundira u zonu utjecaja topline, koja je u području austenita. Hlađenjem, austenit prelazi u ferit koji može rastvoriti manju količinu vodika. Višak vodika smješta se po granicama zrna, na mjestima gdje postoje slobodni prostori i druge nečistoće. Dolazi do stvaranja slabije pokretljivih molekula vodika, a u njima zbog toplinskog stezanja metala raste tlak koji se još više povećava nastajanjem martenzita. Ako taj tlak bude veći od čvrstoće materijala, dolazi do nastanka pukotina, a to su ustvari lokalni, mali krhki lomovi.

Debljina i vrsta materijala zavarene konstrukcije često se ne može mijenjati, ali se zato može spriječiti unošenje vodika u zavar, a isto tako se može utjecati na izbjegavanje nastajanja krhkih struktura u zavarenom spoju.

Unošenje vodika u zavar se sprječava uporabom ispravno sušenih elektroda i praškova i čišćenjem za zavarivanje pripremljenih spojeva, od vlage i ostataka ulja i masti, koje sadrže vodik.

Nastajanje krhkih martenzitno-bainitnih struktura u metalu zavara se izbjegava djelovanjem na brzinu hlađenja zavarenog spoja. Sklonost prema pojavi pukotina ne ovisi samo od brzine hlađenja, nego naročito od brzine prolaska kroz temperaturni interval između 150 ... 120 °C, u kojem je nastajanje pukotina najvjerojatnije[26].

Temperatura predgrijavanja treba biti tako odabrana da osigura brzinu hlađenja u intervalu 150 do 120 °C manju od 10 K/s.

Kod višeslojnog zavarivanja treba voditi računa da temperatura između prolaza bude viša od temperature na kojoj nastaju pukotine. Ispitivanja provedena na sitnozrnatim mikrolegiranim čelicima s različitim koncentracijama vodika u metalu zavara i s različitim temperaturama predgrijavanja pokazuju da je kod čelika s nižom granicom razvlačenja dozvoljena veća koncentracija vodika i niža temperatura predgrijavanja [27].

Hladne pukotine se razlikuju od toplih u prvom redu po tome što su manje razgranate i manje otvorene. Ako su u pitanju otvorene pukotine, s pristupom zraka, onda su one oksidirane prevlakom crne boje - tople ili plave boje - hladne. Debljina oksidiranog sloja na ovim pukotinama vrlo je mala.

3.3.4 Osjetljivost zavara i zone utjecaja topline prema krhkom lomu

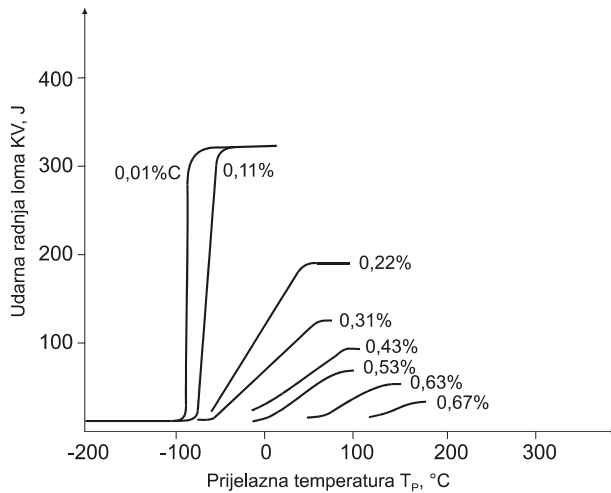
Krhki lom je širenje greške ili grešaka, najčešće tipa pukotina ili nečistoća, velikom brzinom, bez plastične deformacije. Brzina širenja dostiže približno brzinu zvuka u metalu [9]. Po pravilu krhki lom je transkristalni, ali pri niskim temperaturama može se javiti i po granicama zrna [28]. Početna greška iz koje kreće krhki lom može nastati pri izradi konstrukcije, umorom konstrukcije u eksploataciji ili korozijom.

Krhki lom nastaje zajedničkim djelovanjem više čimbenika, kao što su: duktilnost materijala pri radnoj temperaturi konstrukcije, postojanje oštrog zareza ili pukotine, veličina i predznak radnih i zaostalih naprezanja. Ukoliko se ukloni jedan od spomenutih čimbenika, bitno se smanjuje opasnost od pojave krhkog loma.

Najčešće korištena veličina za osiguranje otpora osnovnog materijala i materijala zavarenog spoja krhkom lomu je neka zadana vrijednost radnje loma (najčešće 27,5 J), za zadanu minimalnu radnu temperaturu konstrukcije.

U zavarenim konstrukcijama najčešće se radnja loma određuje po Charpy-ju s V-zarezom, iako su pouzdanije probe s velikim uzorcima, ali se rijetko koriste zbog visoke cijene izrade i ispitivanja [29].

Određivanje sklonosti prema lomnoj žilavosti se obično izražava prijelaznom temperaturom (T_p), odnosno temperaturom kod koje žilavi lom prelazi u krhki. Pri tome, temperatura prijelaza u krhko stanje mora biti niža od najniže eksploatacijske temperature konstrukcije. Na prijelaznu temperaturu čelika utječu: kemijski sastav, mehanička i toplinska obrada, veličina zrna i vrsta strukture [7,9, 30]. Dodaci Mn i Ni do 2% i Si do 0,5% smanjuju prijelaznu temperaturu, dok ugljik snižava radnju loma i povisuje prijelaznu temperaturu, slika 3.12.



Slika 3.12. Utjecaj sadržaja ugljika u čeliku na udarnu radnju loma [31]

Usitnjenje zrna djeluje na očvrnuće (manji utjecaj na R_m nego na R_e) i na povišenje radnje loma (sniženje prijelazne temperature). Taj se efekt još povisuje sniženjem postotka perlita.

Precipitacijsko očvrnuće znatnije povećava R_m i R_e ali i prijelaznu temperaturu. Zbog toga se djelovanje mehanizma očvrnuća mora ravnati prema djelovanju na sigurnost protiv krhkog loma. Za ocjenu sigurnosti služi koeficijent krhkosti [7]:

$$k_k = \frac{\Delta T_p}{\Delta R_e} \quad \dots(3.6)$$

gdje je:

k_k – koeficijent krhkosti

Bolje je ako je vrijednost koeficijenta krhkosti k_k niža, jer negativna vrijednost znači povećanje granice razvlačenja i sniženje prijelazne temperature.

Kod precipitacijskog očvrnuća perlitnih čelika $k_k = 3,5$ do 13 K/10 MPa, a kod očvrnuća sitnim zrnom k_k je redovito negativan i može iznositi i do $-6,4$ K/10 MPa [7].

Mikrolegirani čelici povišene čvrstoće legirani s Nb imaju nižu granicu razvlačenja, nisku prijelaznu temperaturu radi pretežnog očvrnuća sitnim zrnom, dok vanadijem legirani čelici imaju veću granicu razvlačenja ali i razmjerno nepovoljnu prijelaznu temperaturu zbog pretežnog očvrnuća precipitacijom karbonitrida.

Osiguranje od krhkog loma postiže se korištenjem materijala koji se duktilno ponaša pri radnoj temperaturi konstrukcije, te kontrolom homogenosti zavarenih spojeva i materijala konstrukcije, pri čemu veličina greške koje se može utvrditi primijenjenim metodama ispitivanja, mora biti manja od greške koja u radnim uvjetima može izazvati širenje nestabilne pukotine.

Mikrolegirani čelici povišene čvrstoće otporni su prema krhkom lomu, ali im se pri zavarivanju treba posvetiti puna pozornost. Prije početka izrade konstrukcije potrebno je atestiranjem odabrati postupak i parametre zavarivanja, te ih se pridržavati prilikom izrade stvarne konstrukcije. Pri tome je važno napomenuti, da uzorak za atest postupka mora oponašati njegove uvjete rada u konstrukciji, tj. treba biti dovoljnih dimenzija, maksimalne debljine i ukrućen kao najkrući čvor u konstrukciji.

3.3.5 Slojevito odvajanje

Do slojevitog odvajanja dolazi kod kutnih, jako upetih zavarenih spojeva većih debljina, kada stezanja uzrokovana toplinskim ciklusom zavarivanja djeluju u smjeru debljine lima. Pukotina ili razdvajanje može ostati pod površinom ili se može proširiti do površine na mjestima koncentracije naprezanja. Ove pukotine se uglavnom pojavljuju na krajevima zone utjecaja topline ili u osnovnom materijalu. Šire se cijepanjem po vertikali i terasasto se povezuju u ravnine paralelne s površinom zavarivanog lima.

Utvrđeno je da nepovoljan oblik i orijentacija uključaka manganovog sulfida u čeliku najviše pridonosi toj pojavi [20, 32]. Ovi sulfidi se većinom mogu plastično deformirati i zato se u procesu valjanja čelika izdužuju i stanjuju u uključke ravnog tipa. Vodik može pospješiti nastajanje ovog fenomena, pa se zbog toga upotrebljava suhi dodatni materijal prilikom zavarivanja.

Slojevito odvajanje je lako utvrditi ispitivanjem ultrazvukom, ali predstavlja vrlo neugodnu grešku za popravljavanje. Sklonost čelika slojevitom odvajanju ovisi o količini, tipu, veličini i raspodjeli uključaka, pri čemu treba smanjiti velike izdužene uključke ravnog tipa. Oni se smanjuju sniženjem sadržaja sumpora pri proizvodnji čelika na manje od 0,01%, ili dodatkom modifikatora. Naime, pri proizvodnji čelika uz dezoksidaciju u vakumu rastaljenog metala modificiraju se nemetalni uključci dodavanjem Ca i elemenata rijetkih zemalja, pri čemu nastaju okrugli uključci koji se ne deformiraju pri valjanju čelika.

3.3.6 Pukotine zbog naknadnog zagrijavanja

Prilikom žarenja zavarenih konstrukcija radi smanjenja zaostalih naprezanja u nekim mikrolegiranim čelicima povišene čvrstoće dolazi do stvaranja pukotina u zoni utjecaja topline i u metalu zavara [4, 26, 33]. Žarenje se obično vrši pri temperaturi od 500 do 800 °C, ovisno o vrsti čelika.

Ova vrsta pukotina može nastati u niskom temperaturnom području pri zagrijavanju do temperature žarenja (200-300 °C) ali i u području temperature žarenja [4].

Pukotine u niskom temperaturnom području mogu nastati pri velikoj brzini zagrijavanja kada nastaju veće razlike između temperature površine i unutrašnjosti zavarenog spoja, što je uzrok nastajanja toplinskih naprezanja. Ako pri zavarivanju nastaju neravnotežne strukture ili prezasićene otopine u većim količinama, toplinska zaostala naprezanja mogu se superponirati sa strukturnim zaostalim naprezanjima i izazvati pukotine, odnosno djelovati na propagiranje ranije nastalih hladnih ili toplih pukotina.

Da bi se spriječilo nastajanje ovih pukotina potrebno je brzinu zagrijavanja do 300 °C ograničiti na 15 do 30 K/s.

Drugi način rješenja ovog problema, koji se često primjenjuje je odžarivanje odmah nakon zavarivanja s temperature među slojevima 150 do 300 °C. Ipak, treba naglasiti da je primarno osigurati takve uvjete zavarivanja kod kojih neće nastati greške tipa toplih i hladnih pukotina. Osim toga treba voditi računa i o koncentracijama naprezanja u zavarenoj konstrukciji, koji mogu imati nepovoljan utjecaj na razvoj pukotina.

Pukotine koje nastaju u području temperature žarenja su kompleksne i one nastaju u pregrijanom grubozrnatom području zone utjecaja topline. U ovom području nastaju igličaste strukture faza raspada bainita ili martenzita s određenom količinom zaostalog austenita.

Nakon odžarivanja potrebno je izvršiti kontrolu zavarenih spojeva na pukotine jednom od metoda ispitivanja bez razaranja, a najčešće ultrazvukom.

4. UTJECAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA NA SVOJSTVA ZAVAREN OG SPOJA MIKROLEGIRANIH ČELIKA

Kod svih čelika, pa tako i kod mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće, za postizanje zadane kvalitete zavarenih spojeva potrebno je odrediti parametre zavarivanja i dosljedno ih primijeniti u praksi.

Kod različitih autora postoje razlike u skupu veličina koje se nazivaju parametrima zavarivanja.

Ne postoji suglasje oko određivanja njihove hijerarhije po važnosti, ali postoji suglasnost u tome da je potrebno propisivati parametre zavarivanja i da je pravilno propisivanje i provođenje tih parametara preduvjet za kvalitetan zavareni spoj [25],[34].

Korištenje podataka dobivenih provedenim ispitivanjem na čelicima istih i/ili sličnih mehaničkih svojstava i kemijskog sastava omogućuje smanjenje opsega ispitivanja na novim čelicima, skraćivanje trajanja i smanjenje troškova istraživanja, te usporedbu rezultata različitih autora.

Doprinosom istraživanju zavarljivosti ove grupe čelika, povećat će se pouzdanost zavarenih spojeva, što je od posebne važnosti za proizvode kod kojih postoji povećana opasnost od pojave greške (pukotina) u izradi, te opasnost od otkaza u eksploataciji.

4.1. Opći pristup određivanju parametara zavarivanja

4.1.1. Svrha istraživanja parametara zavarivanja

Zbog mogućih pojava grešaka u zavarenim spojevima, a time i mogućih otkaza zavarenih spojeva na zavarenim proizvodima, postavljaju se zahtjevi za pouzdanost i kvalitetu.

Može se reći da je jedan od osnovnih preduvjeta za pouzdan rad zavarenog proizvoda pravilno određivanje parametara i slijeda zavarivanja.

Široke mogućnosti izbora dodatnog materijala, postupka zavarivanja, parametara zavarivanja i konačnih svojstava primoravaju danas konstruktora, tehnologa i proizvođača na tijesnu međusobnu vezu kako bi se izabrala tehnički najprikladnija i, konačno, najekonomičnija (optimalna) kombinacija: dodatni materijal - postupak zavarivanja - parametri zavarivanja, a time i zadovoljavajuća svojstva zavarene konstrukcije kao cjeline.

Variranjem parametara zavarivanja, osim na kvalitetu zavarenih spojeva, djeluje se i na utrošak energije, odnosno na troškove zavarivanja, te je zbog toga potrebno parametre zavarivanja odrediti tako da, osim traženih svojstava i dovoljne pouzdanosti, sveukupni troškovi zavarivanja (materijala i energije) budu što manji.

4.1.2. Pristup određivanju parametara zavarivanja

Šire gledano, varijable u procesu zavarivanja su:

- specifična unesena toplina,
- jakost struje zavarivanja, A
- napon električnog luka, V
- brzina zavarivanja,
- temperatura metala kojeg se zavaruje
(temperatura predgrijavanja, temperatura između prolaza),
- polaritet i vrsta struje,
- promjer elektrode (žice),
- nagib elektrode (žice),
- duljina slobodnog kraja žice,
- tehnika: povlačenjem ili poprečnim osciliranjem,
- toplinska obrada nakon zavarivanja i dr.

Osnovu svakog postupka zavarivanja čini izbor primarne i sekundarne energije, odnosno topline unesene predgrijavanjem i topline unesene izvorom energije zavarivanja u osnovni materijal, karakteriziran specifičnim toplinskim svojstvima koja uzrokuju formiranje temperaturnog polja. To polje neposredno utječe na strukturu materijala, čije karakteristike definiraju mehanička svojstva metala zavara, a posebno zone utjecaja topline.

Poznavanje procesa širenja topline i formiranja temperaturnog polja mogu dati odgovore na pitanje kakvu se strukturu može očekivati na osnovi parametara procesa zavarivanja i, povratnom vezom, odgovoriti kakve je parametre potrebno uporabiti da bi se dobilo takvo temperaturno polje koje će osigurati povoljnu strukturu zavara i zone utjecaja topline.

4.2. Temperaturna polja pri zavarivanju

Potreba izučavanja provođenja topline kod zavarivanja proizlazi iz činjenice da distribucija temperaturnog polja pri zavarivanju i hlađenju zavarenog spoja ima značajan utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja. Naime, količina zavarivanjem unesene topline utječe na distribuciju temperaturnog polja i na brzinu hlađenja zavarenog spoja (vrlo često se u zavarivanju taj utjecaj iskazuje i vremenom trajanja hlađenja, (napr. od 800 do 500 °C), što konačno uvjetuje strukturne transformacije koje se odvijaju pri hlađenju zavarenog spoja i postizanje odgovarajućih mehaničkih svojstava u zavarenom spoju. Te se strukturne transformacije mogu pratiti u anizotermičkom TTT dijagramu, ali je za iskazivanje međuovisnosti između brzine hlađenja, odnosno trajanja hlađenja, nužno razumijevanje uobičajenih i najčešće korištenih analitičkih modela fizikalnih pojava provođenja topline kod zavarivanja.

4.2.1. Kratak pregled proučavanja problema temperaturnih polja pri zavarivanju

Studij toka topline pri zavarivanju nema tako dugu povijest. Prvi radovi iz ovog područja pojavili su se 1935. godine [35], a paralelno su počela istraživanja u ovom području u SAD-u i Japanu, a nešto kasnije i u Europi.

Temeljne studije toka topline pri zavarivanju dao je istraživač Rosenthal (1935-1940 g.) [35], u svojim prvim radovima u kojima se iznose problemi kvazistacionarnih

temperaturnih polja. Istovremeno istraživač Tanaka provodi analizu i proračun nekih nestacionarnih pojava u procesu zavarivanja.

U razdoblju od 1950. do 1955. godine istraživač Adams provodi daljnja istraživanja na području temperaturnih polja pri zavarivanju, dok se u Europi pojavljuju značajni istraživači Rykalin [36],[37], Wells i Cristensen. Iz tog su vremena poznate i mnoge analitičko-eksperimentalne formule. Noviji radovi [38],[39],[40] i [41] ukazali su na više problema iz zavarivačke prakse koje je potrebno rješavati i pri tome koristiti temperaturna polja, kao jedan od alata.

Svi dobiveni izrazi spomenutih autora bili su analitički, eksperimentalni ili analitičko-eksperimentalni. Analitički izrazi uglavnom su zbog složenosti procesa zavarivanja dani u pojednostavljenom obliku. To bi bilo nužno kako bi se sam proces zavarivanja mogao aproksimativno opisati u analitičkom obliku. Prema tvrdnjama autora, i ovakvi su izrazi, s dovoljnom točnošću, udovoljavali praktičnim zahtjevima.

4.2.2. Uvod u problem nestacionarnosti temperaturnih polja pri zavarivanju

Proces zavarivanja predstavlja jedan specifičan oblik nastajanja temperaturnog polja, zbog unošenja u materijal, toplinske energije pomičnim toplinskim izvorom. Shodno toj činjenici govorimo o nestacionarnom, odnosno pretpostavljenom kvazistacionarnom temperaturnom polju unutar promatranog materijala. Prijelazna područja izrazite nestacionarnosti prema pretpostavljenoj kvazistacionarnosti se javljaju npr. na početku i na kraju procesa zavarivanja, kada je bitno naglašen problem rubnih i/ili početnih uvjeta, dok se stacionarno temperaturno polje uspostavlja nakon beskonačnog vremena i dovoljnih dimenzija tijela, oko pomičnog toplinskog izvora. U prijelaznim područjima različite su brzine hlađenja u zavarenom spoju, pa su kod nekih materijala mehanička svojstva bitno različita u odnosu na svojstva u području pretpostavljene kvazistacionarnosti.

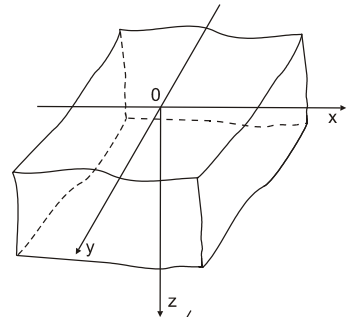
Kvazistacionarnim konceptom kvazistacionarnog temperaturnog polja bitno se pojednostavljuje proračun jer otpada nestacionarni član i temperaturno polje ostaje vremenski, ali ne i prostorno, nepromjenjivo u odnosu na pomični koordinatni sustav, čije se ishodište poklapa s mjestom djelovanja toplinskog izvora. [36], [37], [38], [41] i [42]. U nastavku se daje klasifikacija najčešćih modela tijela i izvora topline koji se koriste pri zavarivanju.

4.2.3. Određivanje temperaturnih polja pri zavarivanju

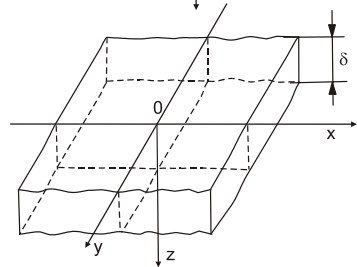
Oblik tijela i oblik izvora topline, pored toplinsko fizikalnih svojstava materijala i uvjeta prijelaza topline u okolinu, glavni su faktori koji utječu na širenje topline pri zavarivanju. Matematički modeli za određivanje temperaturnih polja pri zavarivanju koji se u ovom radu koriste, dobiveni su uz pretpostavku primjene pojednostavljenih oblika tijela i izvora topline, te uz pojednostavljenje, budući da nije obuhvaćena promjena fizikalnih svojstava materijala ovisno o temperaturi.

Oblici tijela koji se u praksi pojavljuju u različitim kombinacijama, svode se uglavnom na sljedeće:

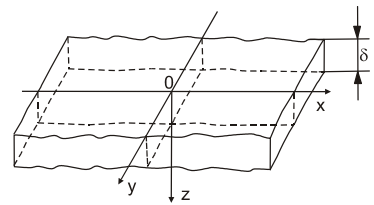
- a) Polubeskonačno tijelo. Dimenzije u smjerovima Ox, Oy i Oz su dovoljno velike da se pretpostavljaju kao beskonačne. Tok topline, odnosno vođenje topline je trodimenzionalno. ($\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \text{const.}$)



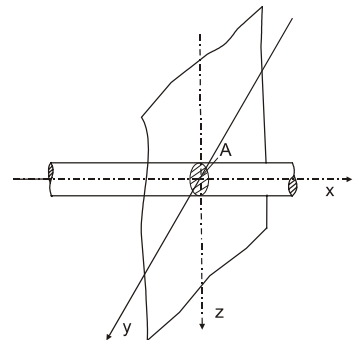
- b) Ravni sloj. Neograničeno se proteže u smjeru Ox i Oy , dok se u smjeru Oz računa s konačnom dimenzijom lima δ . Temperature nisu po debljini lima iste. Vođenje topline je trodimenzionalno. ($\lambda_x = \lambda_y \neq \lambda_z$)



- c) Tanki lim. Predpostavlja se da je temperatura po debljini lima ista – isti je raspored temperaturnog polja s jedne i s druge strane lima. ($\lambda_x = \lambda_y; \lambda_z = \infty$). Vođenje topline je dvodimenzionalno. Takav raspored temperatura dobiva se kod sučeljenog zavarivanja tankih limova ili kod jednostranog zavarivanja u jednom prolazu.



- d) Šipka je izduženo tijelo u smjeru x , s izjednačenim temperaturama u svakom poprečnom presjeku, što daje linearni tok topline u podužnom smjeru ($\lambda_x = \text{const}; \lambda_y = \infty; \lambda_z = \infty$).



Slika 4.1. Pojednostavljeni modeli tijela za vođenje topline pri zavarivanju. [36], [37], [42].

Oblici izvora topline dijele se prema karakteru raspodjele energije u prostoru, prema vremenskom djelovanju i dr. (nepokretni i pokretni,...).

Prema karakteru raspodjele energije u prostoru razlikuju se sljedeći izvori topline:

- točkasti izvor topline kod kojeg je energija koncentrirana u jednoj točki, umjesto u krugu grijanja,
- linijski izvor topline kod kojeg je energija koncentrirana u jednoj liniji,
- plošni izvor topline kod kojeg je energija koncentrirana u jednoj plohi,
- volumenski izvor topline kod kojeg je energija koncentrirana u određenom volumenu.

Prema vremenskom djelovanju razlikuju se sljedeći izvori topline:

- trenutni,
- trajni, kod kojih se intenzitet može mijenjati tijekom vremena,
- impulsni.

4.2.4. Matematički modeli fizikalnih pojava provođenja topline kod zavarivanja

Polazeći od univerzalne diferencijalne jednačbe (4.1), izvedeni su modeli koji opisuju djelovanje trenutnih i pomičnih izvora topline na pojedine modele tijela koje se zavaruje.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots(4.1)$$

gdje je:

a - koeficijent toplinske difuzije $m^2 s^{-1}$

Ovo je homogena linearna parcijalna diferencijalna jednačba II reda, paraboličnog tipa, koja daje vezu između brzine promjene temperature neke točke u odnosu na raspored temperatura u okolini te točke.

Ako na radno tijelo djeluje neki izvor topline $F(x,y,z,t)$, te ako istovremeno dolazi i do prijelaza topline s metalnog predmeta na okolinu, tada jednačba vođenja topline (4.1) poprima oblik:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho \cdot c} \cdot F(x,y,z,t) - b \cdot T \quad \dots(4.2)$$

c, λ, ρ - fizikalna svojstva materijala

b - koeficijent intenziteta pada temperature zbog odvođenja topline s tijela na okoliš, s^{-1}

Rješavanjem diferencijalne jednačbe (4.1) dobivena su rješenja za hlađenje nakon djelovanja nepokretnog trenutnog (impulsnog) izvora topline za uobičajene kombinacije oblika tijela i oblika nepomičnih izvora topline: [36], [37], [38], [41] i [42].

Plošni izvor u beskonačnoj šipci:

$$T(x,t) - T_0 = \frac{\frac{Q}{A}}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \quad \dots(4.3)$$

Linijski izvor u beskonačnom limu:

$$T(r,t) - T_0 = \frac{\frac{Q}{\delta}}{2 \cdot \rho \cdot (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot t})^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \quad \dots(4.4)$$

Točkasti izvor u beskonačnom tijelu

$$T(x,t) - T_0 = \frac{Q}{c \cdot \rho \cdot (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot t})^3} \cdot \exp\left(-\frac{R^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \quad \dots(4.5)$$

gdje je:

T_0 - početna temperatura (temperatura predgrijavanja), °C(K)

ΔT - razlika temperature u pojedinoj točki tijekom zavarivanja i početne temperature

Q - dovedena toplina, J ;

R - radijus vektor u prostoru, m, (mm); r - radijus vektor u ravnini, m, (mm)

Pri zavarivanju se najčešće koriste pomični izvori topline određene snage i brzine kretanja, te se uz pretpostavku da je koordinatni sustav pokretan i da mu je ishodište uvijek u središtu izvora topline, mogu izvesti neki pojednostavljeni izrazi koji opisuju djelovanje pokretnih izvora topline na uobičajene modele tijela pri zavarivanju.

U nastavku se daje klasifikacija uobičajenih modela tijela i modela pokretnih izvora topline za zavarivanje, za uobičajene modele tijela i pokretne toplinske izvore [36].

4.2.4.1. Pomični linijski izvor topline – tanka ravna ploča

Djelovanje pomičnog linijskog izvora topline na tanki ravni sloj opisuje jednadžba (4.6) u pokretnom koordinatnom sustavu:

$$T(x,t) - T_0 = \psi_2 \cdot \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(-\frac{v \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot K_0 \left[r \cdot \sqrt{\left(\frac{v}{2 \cdot a}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \alpha}{a \cdot c \cdot \rho \cdot \delta}\right)} \right] \quad \dots(4.6)$$

gdje je:

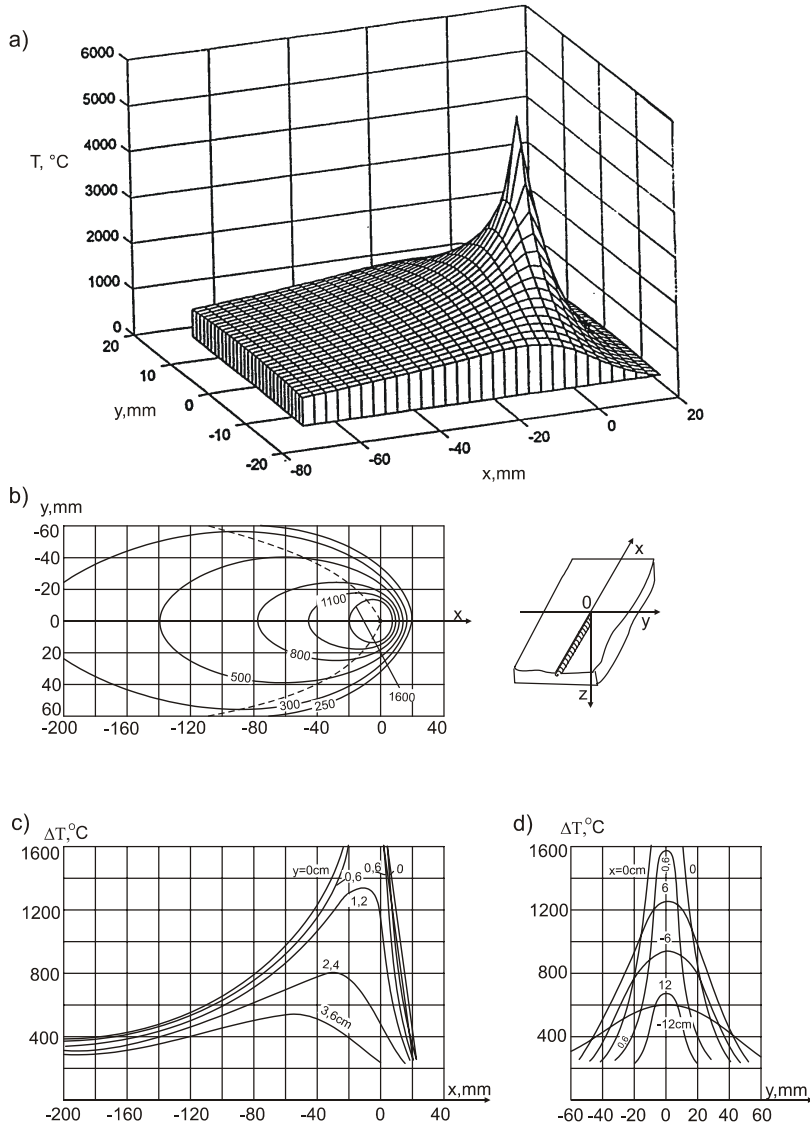
K_0 - modificirana Besselova funkcija nultog reda, druge vrste;

ψ_2 - faktor toplinskog zasićenja

q – tok energije, W; $q = U \cdot I \cdot \eta$, η - koeficijent iskorištenja topline električnog luka

Nakon početka zavarivanja dolazi do postupnog toplinskog zasićenja – uravnoteženja između količine dovedene i odvedene topline, te se nakon dovoljno dugog vremena zavarivanja uspostavlja tzv. pretpostavljeno kvazistacionarno temperaturno polje. Teorijski bi bilo potrebno beskonačno dugo vrijeme za postizanje stacionarnog stanja.

Primjer [36] kvazistacionarnog temperaturnog polja (faktor zasićenja $\psi_2 = 1$) nastalog usljed djelovanja pokretnog linijskog izvora topline energijom $q/v = 4184$ J/mm ($v=1$ mm/s), na tankom ravnom limu prikazan je na slici 4.2.



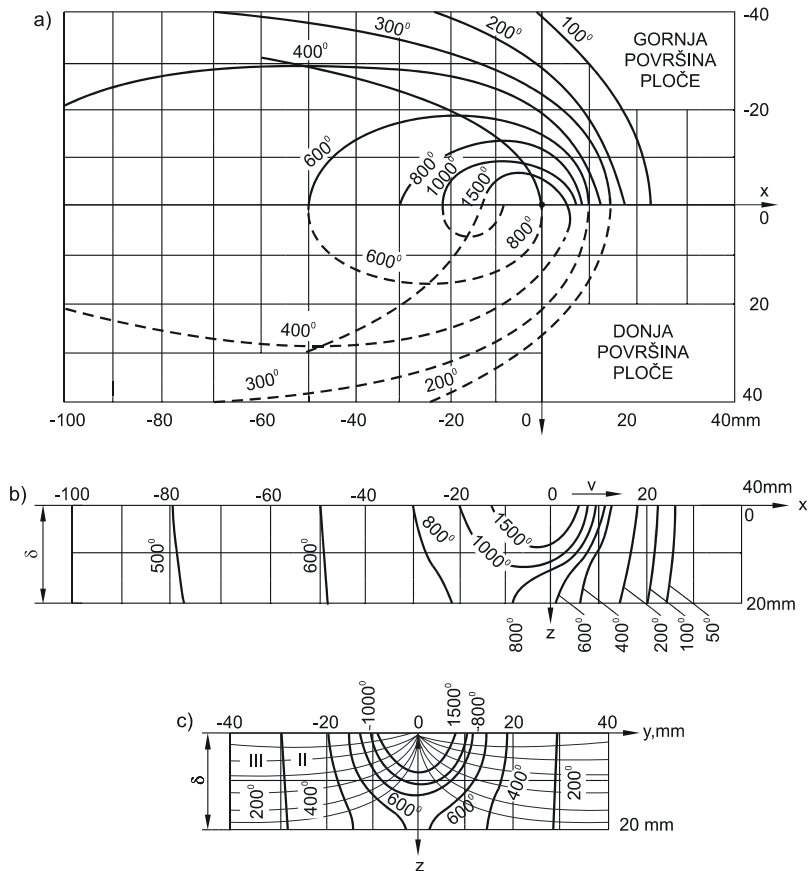
Slika 4.2. Kvizistacionarno temperaturno polje nastalo djelovanjem pomičnog linijskog izvora topline OO' , po tankom limu debljine 10 mm u smjeru osi x . ($q/v=4184 \text{ J/mm}$; $a=10 \text{ mm}^2/\text{s}$; $\lambda=0,042 \text{ W/mm}^{\circ}\text{C}$; $b=0,0028 \text{ 1/s}$ i $\alpha=33,4 \cdot 10^{-6} \text{ J/mm}^2\text{s}^{\circ}\text{C}$) [36].

- Prostorni prikaz razdiobe temperaturnog polja ($x=-70 \text{ mm}$ do 20 mm s korakom 3 mm , $y=-15 \text{ mm}$ do 15 mm s korakom 1 mm).
- Izoterme na površini ploče u ravnini xy i krivulja maksimalnih temperatura (crtkano)
- Razdioba temperature u ravnini xz , za vrijednosti $y=\text{const}$.
- Razdioba temperature u ravnini yz , za vrijednosti $x=\text{const}$.

4.2.4.2. Pomični točkasti izvor topline na ravnoj ploči

$$\Delta T(x, r, t) = \psi_2 \cdot \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(-\frac{v \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot \left\{ K_0\left(\frac{v \cdot r}{2 \cdot a}\right) + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot z}{\delta}\right) \cdot K_0\left[r \cdot \sqrt{\left(\frac{v}{2 \cdot a}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{\delta}\right)^2}\right] \right\} \quad \dots(4.7)$$

Primjer kvazistacionarnog temperaturnog polja (faktor zasićenja $\psi_3=1$) nastalog usljed djelovanja pomičnog točkastog izvora energijom $q/v=4184$ J/mm ($v=1$ mm/s), na ravni sloj debljine 20 mm, prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Kvazistacionarno temperaturno polje nastalo djelovanjem točkastog izvora topline brzinom v , na ravni sloj debljine 20 mm u smjeru osi x ($q/v = 4184$ J/mm, $\delta = 20$ mm, $a = 10$ mm²/s, $\lambda = 0,042$ W/mm²°C) [36].

- a) Izoterme i krivulje maksimalnih temperatura na gornjoj ($z=0$) - pune izoterme i donjoj ($z=\delta$) - crtkane izoterme, površini lima
- b) Izoterme u uzdužnom presjeku xOz
- c) Izoterme i linije toplinskog toka u poprečnom presjeku yOz

Model pokretnog točkastog izvora na tijelu debljine δ u literaturi se često naziva model vođenja topline u ravnom sloju debljine δ i najčešće se susreće u praksi. Temperaturno polje koje opisuje ovaj model definirano je jednadžbom 4.7, ali se iz razloga jednostavnijeg analitičkog izračunavanja zanemaruje konvekcija pa se koristi sljedeća jednadžba:

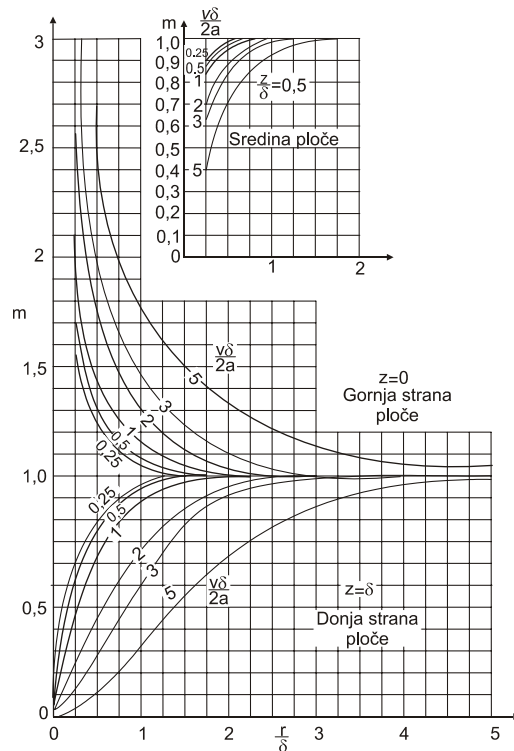
$$\Delta T(r, x, z) = \psi_2 \cdot m(r, z) \cdot \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta} \cdot \exp\left(-\frac{v \cdot x}{2 \cdot a}\right) \cdot K_0\left(\frac{v \cdot r}{2 \cdot a}\right) \quad \dots(4.8)$$

gdje je:

m - koeficijent za računanje provođenja topline u ravnom sloju

Koeficijent m se određuje izrazom (4.9.) ili pomoću dijagrama sa slike 4.4.

$$m(r, z) = 1 + \frac{2}{K_0\left(\frac{v \cdot r}{2 \cdot a}\right)} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{\delta}\right) \cdot K_0\left(\frac{\pi \cdot n \cdot r}{\delta} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{v \cdot \delta}{2 \cdot a \cdot \pi \cdot n}\right)^2}\right) \right] \quad \dots(4.9)$$



Slika 4.4. Dijagram za određivanje faktora m [36], [37], [38], [42].

K_0 je modificirana Besselova funkcija koja je obrazložena jednadžbama 4.12 i 4.13. Faktor m može se odrediti analitički i uz pomoć dijagrama na slici 4.4., ali je u tom slučaju moguće računanje temperature neke točke samo na gornjoj i donjoj površini ploče i u sredini ploče. Pri proračunima temperaturnog polja uz pomoć računala koriste se analitičke jednadžbe, pa je moguće izračunavanje temperaturnog polja u smjeru debljine ploče.

4.2.4.3 Faktor toplinskog zasićenja kod dvodimenzijuskog vođenja topline

Faktor toplinskog zasićenja ψ_2 definira se jednadžbom: [36], [37], [42].

$$\psi_2 = \frac{\Delta T \cdot (r, x, t)}{\Delta T \cdot (r, x, t \rightarrow \infty)} \quad \dots(4.10)$$

i predstavlja omjer između temperature promatrane točke i temperature iste točke u pretpostavljenom kvazistacionarnom stanju. Njegova vrijednost mijenja se od $\psi_2 (t=0)=0$ do $\psi_2 (t \rightarrow \infty)=1$. Njegov je vremenski porast mjera toplinskog zasićenja promatrane točke u tijelu. U strukturu faktora zasićenja moraju ući kako fizikalno toplinska svojstva materijala, tako i vremenske odnosno prostorne koordinate promatrane točke.

Analitičko određivanje faktora zasićenja za dvodimenzijusko vođenje topline obrazlaže se sljedećim jednadžbama:

$$\psi_2 = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{K_0(\rho_2)} \cdot \int_0^\omega \frac{1}{\omega} \exp \left[-\frac{\rho_2}{2} \cdot \left(\omega + \frac{1}{\omega} \right) \right] d\omega \right\} \quad \dots(4.11)$$

gdje su bezdimenzijski faktori:

$$\omega = \frac{v \cdot t}{r}; \quad \rho_2 = \frac{v \cdot r}{2 \cdot a}$$

Za analitičko određivanje faktora zasićenja nužno je poznavanje Besselove funkcije nultog reda, druge vrste, imaginarnog argumenta (K_0), kao i Gama funkcije ($\Gamma(n)$). Besselova funkcija prikazana u MacDonaldovom obliku pogodna ja za analitička izračunavanja [42].

$$K_n(\rho_2) = \frac{\pi \cdot I_{-n}(\rho_2) - I_n(\rho_2)}{2 \cdot \sin(n \cdot \pi)} \quad \dots(4.12)$$

gdje je:

$K_n(X)$ – MacDonalдова funkcija

$I_n(X)$, $I_{-n}(X)$ – Besselove funkcije

$\Gamma(X)$ – Gama funkcija

n – red Besselove funkcije

$$I_n = \frac{\left(\frac{\rho_2}{2}\right)^n}{\Gamma(n+1)} + \frac{\left(\frac{\rho_2}{2}\right)^{n+2}}{1!\Gamma(n+2)} + \frac{\left(\frac{\rho_2}{2}\right)^{n+4}}{2!\Gamma(n+3)} + \dots \quad \dots(4.13)$$

Faktor toplinskog zasićenja može se odrediti i iz dijagrama konstruiranog na osnovi gornjih jednadžbi [36], za odabranu točku u pokretnom koordinatnom sustavu sa ishodištem u sredini izvora topline.

No, budući da je važno odrediti ciklus toplinskog zasićenja nekoliko točaka u zavarenom spoju, pogodnije je korištenje kompjutorskih programa koji daju kao izlazni podatak grafički prikaz toka zasićenja, kao i numeričke vrijednosti pripadajućih temperatura. [42].

4.2.4.4. Faktor toplinskog zasićenja kod trodimenzijskog vođenja topline

Analogno jednadžbi 4.10, faktor toplinskog zasićenja za trodimenzijsko vođenje topline može se prikazati jednadžbom:

$$\Psi_3 = \frac{\Delta T(R, x, t)}{\Delta T(R, x, t \rightarrow \infty)} \quad \dots(4.14)$$

dok se za analitičko izračunavanje može koristiti sljedeća formula:

$$\Psi_3(\rho_3, \tau) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{\rho_3}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right) \right] + \frac{1}{2} \cdot \exp(2 \cdot \rho_3) \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{\rho_3}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right) \right] \quad \dots(4.15)$$

gdje su:

$$\rho_3 = \frac{v \cdot R}{2 \cdot a} \quad \dots(4.16)$$

$$\Phi(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-z^2) dz \quad \dots(4.17)$$

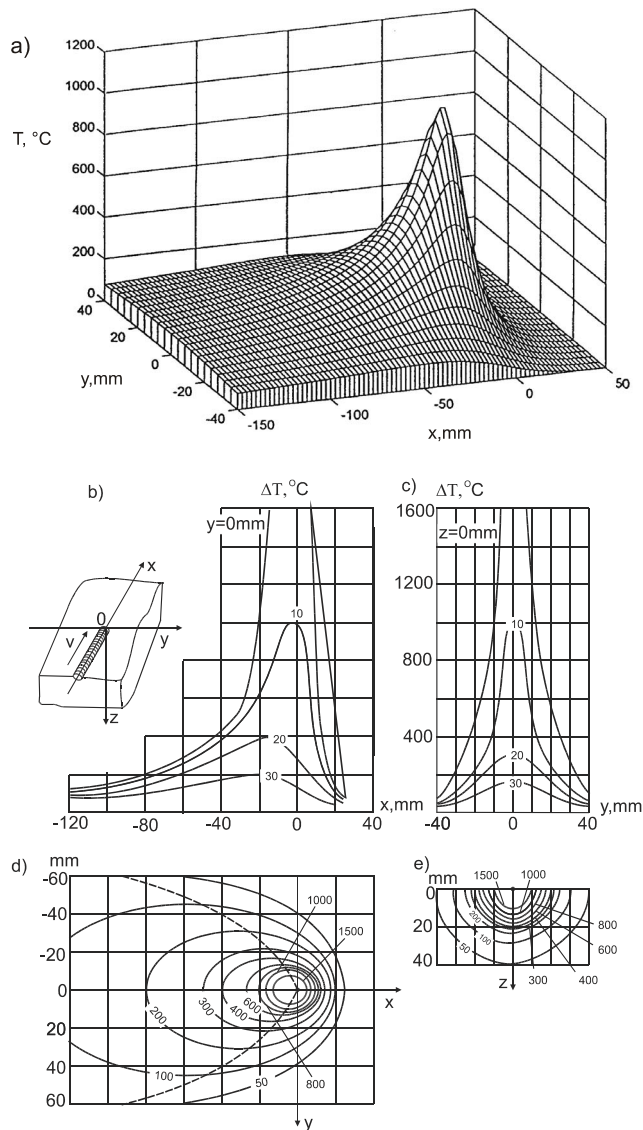
I ovdje se za određivanje faktora toplinskog zasićenja može koristiti dijagram izrađen na osnovi navedenih formula, kao i kompjutorski program koji daje numeričke vrijednosti pripadajućih temperatura.

4.2.4.5. Pomični točkasti izvor topline - polubeskonačno tijelo

Jednadžba (4.18) opisuje djelovanje pomičnog točkastog izvora na polubeskonačno tijelo:

$$\Delta T(x, R, t) = \Psi_3 \cdot \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \exp\left[-\frac{v \cdot (x + R)}{2 \cdot a}\right] \quad \dots(4.18)$$

Primjer kvazistacionarnog temperaturnog polja nastalog usljed djelovanja pomičnog točkastog izvora energije $q/v = 4184 \text{ J/mm}$ ($v = 1 \text{ mm/s}$), na ravni sloj debljine 20 mm prikazan je na slici 4.5.



Slika 4.5. Kvazistacionarno temperaturno polje nastalo djelovanjem točkastog izvora topline na polubeskonačno tijelo u smjeru osi x . ($q/v = 4184 \text{ J/mm}$; $a = 10 \text{ mm}^2/\text{s}$; $\lambda = 0,042 \text{ W/mm}^{\circ}\text{C}$) [36]

- Prostorni prikaz razdiobe temperaturnog polja na $z=10 \text{ mm}$ ispod površine lima
- Izoterme na površini u ravninama $y=\text{const.}$, (xOz).
- Razdioba temperature u ravninama $x=\text{const.}$, (yOz).
- Razdioba temperature u ravnini xOy i krivulja maksimalnih temperatura (crtkano)
- Izoterme i linije toplinskog toka u ravnini yOz ($x=0$)

U navedenim jednadžbama veličine ψ_2 i ψ_3 predstavljaju korekcijske faktore ili faktore toplinskog zasićenja, dok rješenja, navedena iza tih faktora predstavljaju funkcije temperaturnog polja.

Moguća je i daljnja simplifikacija ovih jednadžbi ukoliko bi se radilo o slučajevima zavarivanja brzopomičnim i visokoučinskim toplinskim izvorima, tj. ukoliko bi brzina gibanja toplinskog izvora težila u beskonačnost, ali tako da omjer q/v ostane stalan ($v \rightarrow \infty$, $q \rightarrow \infty$). U tim su slučajevima temperaturni gradijenti u smjeru osi y i z bitno veći nego li u smjeru osi x , smjeru gibanja toplinskog izvora.

Ta činjenica bitno pojednostavljuje oblik rješenja u odnosu na jednadžbe (4.6, 4.7 i 4.18), pa uz zanemarivanje rasipanja topline prema okolišu, navedena rješenja poprimaju jednostavnije oblike [38].

Za slučaj zavarivanja brzopomičnim visokoučinskim izvorom ravne tanke ploče (2D) vrijedi jednadžba:

$$\Delta T(y,t) = \frac{\frac{q}{v}}{v \cdot \delta \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \delta \cdot t}} \exp\left(-\frac{y^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \quad \dots(4.19)$$

dok je rješenje, graničnog stanja širenja topline kod jednostrano graničnog tijela (3D), predstavljeno jednadžbom:

$$\Delta T(y,t) = \frac{\frac{q}{v}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot v \cdot t} \exp\left(-\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \quad \dots(4.20)$$

U jednadžbama (4.19) i (4.20) se za vrijeme t uzima ono vrijeme u kojem toplinski izvor prolazi ravninom u kojoj se upravo i nalazi točka za koju računamo temperaturu. U standardu SEW [43], kao i u literaturnim izvorima jednadžbe (4.19) i (4.20) prilagođene su praktičnom računanju vremena hlađenja zavarenog spoja u temperaturnom intervalu 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$).

U jednadžbama su približno uzete u obzir promjene fizikalnih svojstava (λ , ρ i c) za čelike povišene čvrstoće u temperaturnom intervalu 800 do 500 °C, pa je tako za pojednostavljeni 2D model dobivena jednadžba (4.21).

$$\Delta t_{8/5} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c} \cdot \left(\frac{q}{v}\right)^2 \cdot \frac{1}{\delta^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)^2 \right] \quad \dots(4.21)$$

Do ove se jednadžbe dolazi iz jednadžbe (4.19), tako da se za sredinu zavara $y=0$ odnosno $r=0$, riješe jednadžbe po t za $T=500$ °C, te se odbije vrijednost za $T=800$ °C.

Za 3D model $\Delta t_{8/5}$ izračunava se jednadžbom (4.22).

$$\Delta t_{8/5} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \frac{q}{v} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right) - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right) \right] \quad \dots(4.22)$$

Brzine hlađenja pri temperaturi T prikazane su izrazima (4.23) za 2D model vođenja topline i (4.24) za 3D model.

$$w = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{(T - T_0)^3 \cdot \delta^2}{\left(\frac{q}{v} \right)^2} \quad \dots(4.23)$$

$$w = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T - T_0)^2}{\frac{q}{v}} \quad \dots(4.24)$$

Umjesto brzine hlađenja češće se koristi približna inverzna vrijednost vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$.

Iz jednadžbi (4.21) i (4.22) izvedene su jednadžbe za računanje unesene energije (toplinskog inputa) za 2D (jednadžba 4.25) i 3D (jednadžba 4.26) model:

$$E_{ef} = \frac{q}{v} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \delta^2 \cdot \Delta t_{8/5}}{\sqrt{\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2}} \quad \dots(4.25)$$

$$E_{ef} = \frac{q}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \Delta t_{8/5}}{\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0}} \quad \dots(4.26)$$




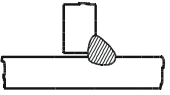
Model vođenja topline određuje se na temelju granične debljine, koja se dobije rješavanjem jednadžbi (4.25) i (4.26) i rješavanjem po varijabli "δ". Tako se dobije jednadžba (4.27) za graničnu debljinu δ_{gr} :

$$\delta_{gr} = \sqrt{\frac{q}{2 \cdot \rho \cdot c} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right)} \quad \dots(4.27)$$

Ako je $\delta > \delta_{gr}$ upotrebljava se jednadžba (4.25) za 2D vođenje topline, a za $\delta < \delta_{gr}$ upotrebljava se jednadžba (4.26) za 3D vođenje topline.

Poboljšanje jednadžbi za računanje trajanja hlađenja $\Delta t_{8/5}$ (4.21) i (4.22), odnosno jednadžbi za računanje unesene energije (4.25) i (4.26) predstavlja uvođenje faktora odvođenja topline za različite oblike zavarenih spojeva.

Tablica 4.1. Utjecaj oblika zavara na odvođenje topline pri zavarivanju [44].

VRSTA ZAVARA	FAKTOR ZAVARA	
	DVODIMENZIJSKI ODVOD TOPLINE F_2	TRODIMENZIJSKI ODVOD TOPLINE F_3
	1	1
	0,9	0,9
	0,67.... 0,9	0,67
	0,45....0,67	0,67

U literaturi se mogu naći i jednadžbe za E_{ef} s uvrštenim srednjim vrijednostima fizikalno-toplinskih veličina (λ , c i ρ) za temperaturni ciklus 800 do 500 °C . U nastavku se daju jednadžbe prema SEW 88 [43]:

$$E_{ef} = \frac{q}{v} = \frac{\Delta t_{8/5}}{(0.67 - 5 \cdot 10^{-4} \cdot T_0) \cdot F_3} \cdot \frac{1}{\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0}} \quad \dots(4.28)$$

$$E_{ef} = \frac{q}{v} = \delta \cdot \sqrt{\frac{\Delta t_{8/5}}{(0.043 - 4.3 \cdot 10^{-5} \cdot T_0) \cdot F_2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{500 - T_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)^2}} \quad \dots(4.29)$$

Kod ovih razrađenih modela odvođenja topline utjecajne su veličine:

w - brzina hlađenja °C/s

T_0 - temperatura predgrijavanja, °C

E_{ef} – efektivni unos topline, J/mm

δ - debljina lima, mm

λ, c, ρ, a - fizikalna svojstva materijala (u gornjim jednadžbama uvrštene su srednje vrijednosti za temperaturni interval od 800-500 °C)

F_1, F_2 – faktori odvođenja topline na okolinu

r, r_1, r_2, r_3, r_4 - radijus vektor u ravnini, m, (mm)

x, x_0, y, y_0, y_1, z – koordinantne osi, m, (mm)

Vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$, ili brzinu hlađenja, potrebno je odrediti eksperimentalno, i to za najslabiju zonu zavarenog spoja (npr. dio zone utjecaja topline uz granicu taljenja). Kod većine čelika, a posebno kod mikrolegiranih čelika, problematično je područje ZUT-a uz "liniju staljivanja"

To je područje pregrijavanja strukture s grubim brzoohlađenim zrnom.

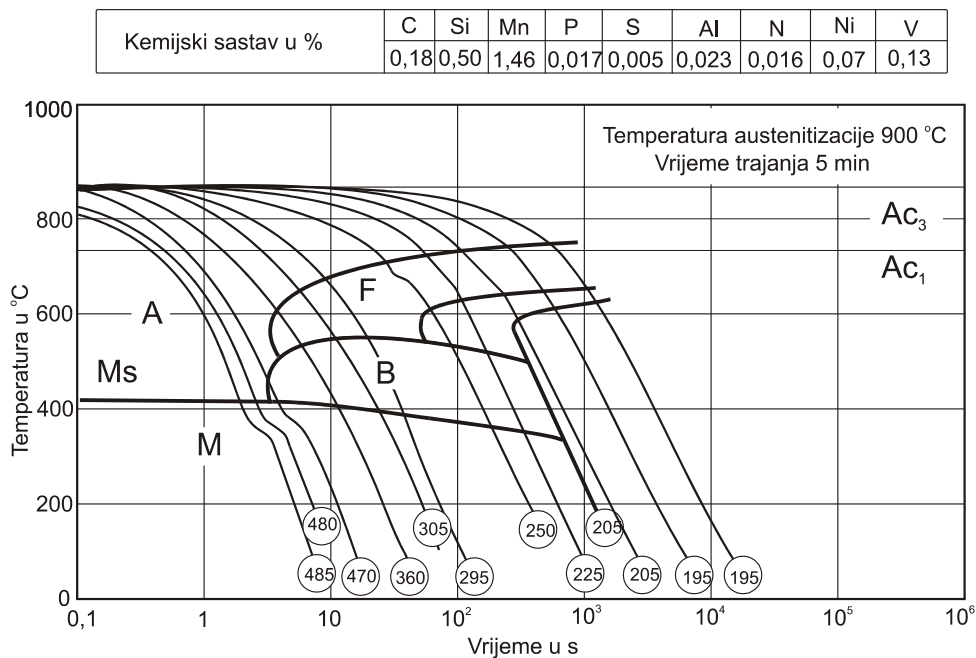
Vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ za mikrolegirane čelike iznosi 10 do 30 s, a za čelik TStE 420 se preporuča 8 do 16 s [45]. Ono se ograničava radi toga da bi se spriječio porast veličine zrna u ZUT-u i zavaru i time smanjenje žilavost s jedne strane te, s druge strane onemogućiti postojanje struktura povišene tvrdoće u zavarenom spoju.

4.3. TTT – dijagrami

Za određivanje optimalne vrijednosti $\Delta t_{8/5}$ mogu se koristiti anizotermički TTT-dijagrami (Temperature - Time - Transformation), koji se za većinu čelika mogu pronaći u literaturi ili se mogu dobiti od proizvođača.

Zbog razlika u odnosu na toplinsku obradu, za zavarivanje čelika obično se traže i dijagrami s temperaturom austenitizacije što je moguće bliže granici taljenja.

Na slici 4.6. prikazan je anizotermički TTT – dijagram, gdje se mogu uočiti udjeli struktura i brzine hlađenja nakon austenitizacije na 900 °C.



Slika 4.6. Anizotermički TTT- dijagram mikrolegiranog čelika s 0.18 C, 0.50 Si, 1.46 Mn, 0.017 P, 0.005 S, 0.023 Al, 0.016 N, 0.07 Ni, 0.13 V, nakon zagrijavanja na 900 °C [46].

TTT - dijagram je konstruiran za čelik kemijskog sastava naveden uz dijagram i za probe promjera 4,5 mm i duljine 15 mm.

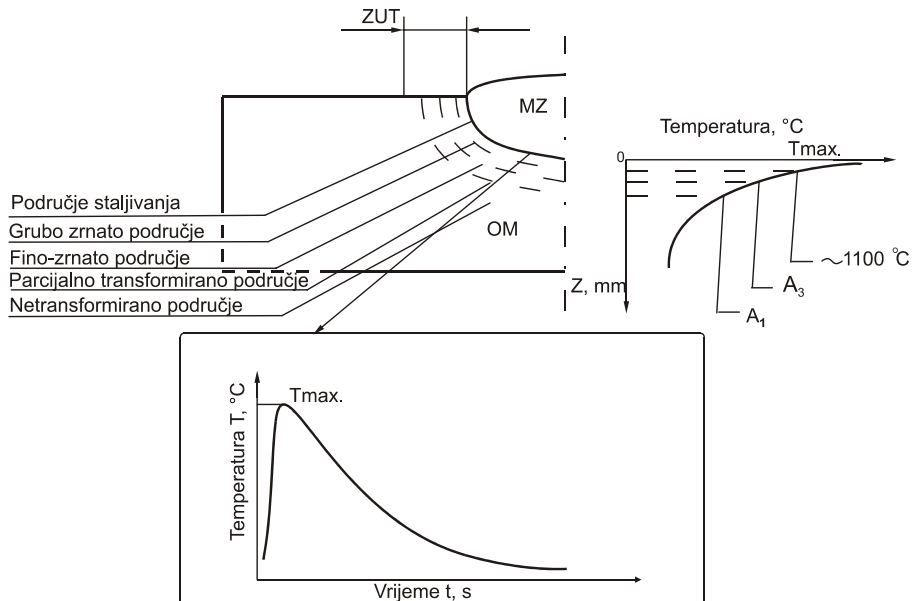
Ovakav tip TTT - dijagrama služi samo za praćenje promjena mikrostrukture pri neprekidnom ohlađivanju (brzom ili sporom) ali ne vrijedi za praćenje pojava pri ugrijavanju. Podatke o promjenama bržeg ugrijavanja daju posebni TTA – dijagrami (vrijeme – temperatura – austenitizacija).

5. TRANSFORMACIJA STRUKTURE PRI ZAVARIVANJU

5.1 Opća razmatranja

Transformacije strukture pri elektrolučnom zavarivanju posljedica su toplinskog ciklusa zavarivanja, mehaničkih i drugih svojstava zone taljenja i zone utjecaja toplote zagrijavanja i hlađenja, a imaju odlučujući utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Sa stajališta tvrdoće i žilavosti značajno je poznavanje fenomena strukturnih transformacija i utvrđivanje glavnih utjecajnih čimbenika koji ih determiniraju. Toplinski ciklus pojedinih točaka u zoni taljenja za vrijeme zavarivanja jednoprolaznog zavarenog spoja može se shematski prikazati slikom 5.1, gdje se toplinski ciklus dijeli u tri faze:

- zagrijavanje od početne temperature materijala do temperature taljenja,
- taljenje
- hlađenje do početne temperature materijala.



Slika 5.1 Shematski prikaz toplinskog ciklusa pojedinih točaka jednoprolaznog zavarenog spoja feritno-perlitnog čelika [46].

Zagrijavanjem od početne temperature materijala do temperature taljenja (npr. nelegiranog ili niskolegiranog čelika), dolazi do strukturnih transformacija kao i do širenja materijala usljed lokalnog zagrijavanja.

U području temperatura ispod točke A_{c1} najčešće se zapaža tendencija uklanjanja neravnotežnih stanja koja su mogla biti prisutna u čeliku prije zavarivanja.

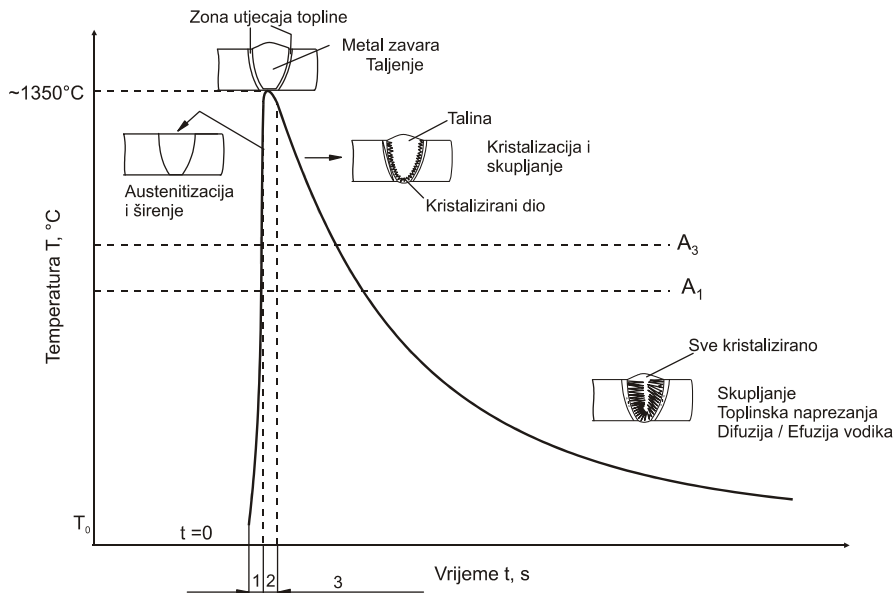
Kod čelika koji su prije zavarivanja pretrpjeli hladnu plastičnu deformaciju dolazi do rekristalizacije, dok kod onih koji su prethodno zakaljeni dolazi do popuštanja tvrdoće, što dovodi do određenih promjena mehaničkih svojstava. Ispod temperature A_1 odvija se i popuštanje zaostalih naprezanja.

Porastom temperature prelazi se točka austenitizacije A_{c3} . Blizu temperature taljenja, zrna austenita su povećana usljed pregrijavanja, a pojava je značajna sa stajališta strukture i mehaničkih svojstava zavarenog spoja nakon hlađenja.

Nakon postizanja temperature taljenja formira se zona taljenja u kojoj dolazi do niza metalurško-kemijskih reakcija, što ima utjecaj na postizanje određenog kemijskog sastava i svojstava spoja. U zoni taljenja dolazi do miješanja rastaljenog osnovnog i dodatnog materijala, a prisutne su i kemijske reakcije rastaljenog materijala sa drugim plinskim ili tekućim fazama.

Hlađenjem, odnosno odvođenjem topline dolazi do postupnog skrućivanja rastaljenog materijala u zoni taljenja. S hlađenjem i povećanjem čvrstoće počinju se javljati naprezanja usljed spriječenog skupljanja materijala što bi se moralo kompenzirati samom plastičnošću materijala kako ne bi došlo do pojave pukotina.

Na slici 5.2 shematski su prikazane zona taljenja i zona utjecaja topline zavarenog spoja nakon izvođenja zavarivanja u jednom prolazu. Važno je naglasiti da se zona utjecaja topline sastoji od nekoliko područja (grubo-zrnato područje, područje normalizacije, područje djelomične prekristalizacije), obzirom na mehanička svojstva, strukturu, veličinu zrna i faze koje pojavljuju nakon strukturne transformacije.



Slika 5.2 Shematski prikaz zona zavarenog spoja izvedenog u jednom prolazu.

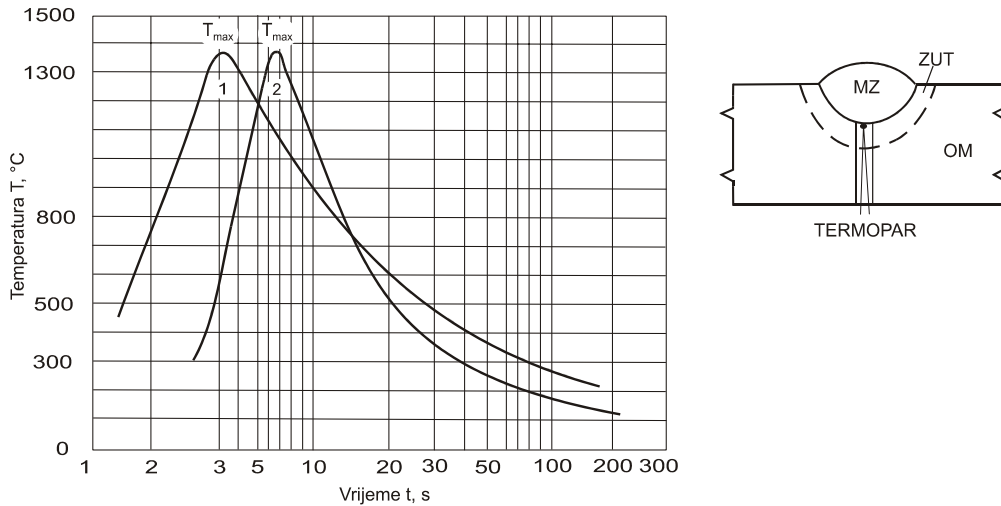
Transformacije struktura metala zavara najčešće se zbog njegove veće čistoće odvijaju nešto prije transformacije osnovnog materijala u ZUT-u.

Transformacija strukture ovisi od sklonosti osnovnog materijala prema zakaljivanju, a ovisno o uvjetima zavarivanja to će transformacija proteći u uvjetima više-manje ravnotežnog ili neravnotežnog stanja. Neovisno o pojavi neravnotežnih struktura, usljed pregrijavanja austenita u ZUT-u će doći do porasta zrna tim više što je temperatura viša (iznad 1100 °C) i što je zadržavanje na toj temperaturi dulje.

Transformaciju struktura materijala prati različita rastvorljivost vodika. Po završetku transformacije strukture, nastala bainitna ili martenzitna struktura ima manju rastvorljivost vodika i drugih plinova u odnosu na austenitnu strukturu. Ukoliko je usljed ohlađivanja (posebice je tu bitna brzina transformacije i sadržaj kemijskih elemenata) višak vodika difundirao u još ne transformirani austenit, a transformacijom austenita u martenzit, martenzit je zasićen vodikom tako da dolazi do pojave krhkosti.

Daljnijim će hlađenjem biti u određenoj mjeri ispunjen i treći uvjet, odnosno pojaviti će se zaostala naprezanja kada je opasnost od nastanka hladnih pukotina i lamelnog odvajanja praktički najveća.

Toplinski ciklusi se razlikuju od postupka do postupka zavarivanja. Primjeri toplinskih ciklusa za ručno elektrolyčno zavarivanje i zavarivanje pod praškom za definiranu točku ZUT-a mogu se vidjeti na slici 5.3.



Slika 5.3 Toplinski ciklus u zoni utjecaja topline pri elektroćuñnom zavarivanju pod praškom 1 i rućnom elektroćuñnom zavarivanju 2 [47].

Vidljiv je utjecaj unesene topline koja je karakteristićna za pojedine postupke zavarivanja, na brzinu, odnosno vrijeme hlađenja, a time i karakteristićne strukturne transformacije.

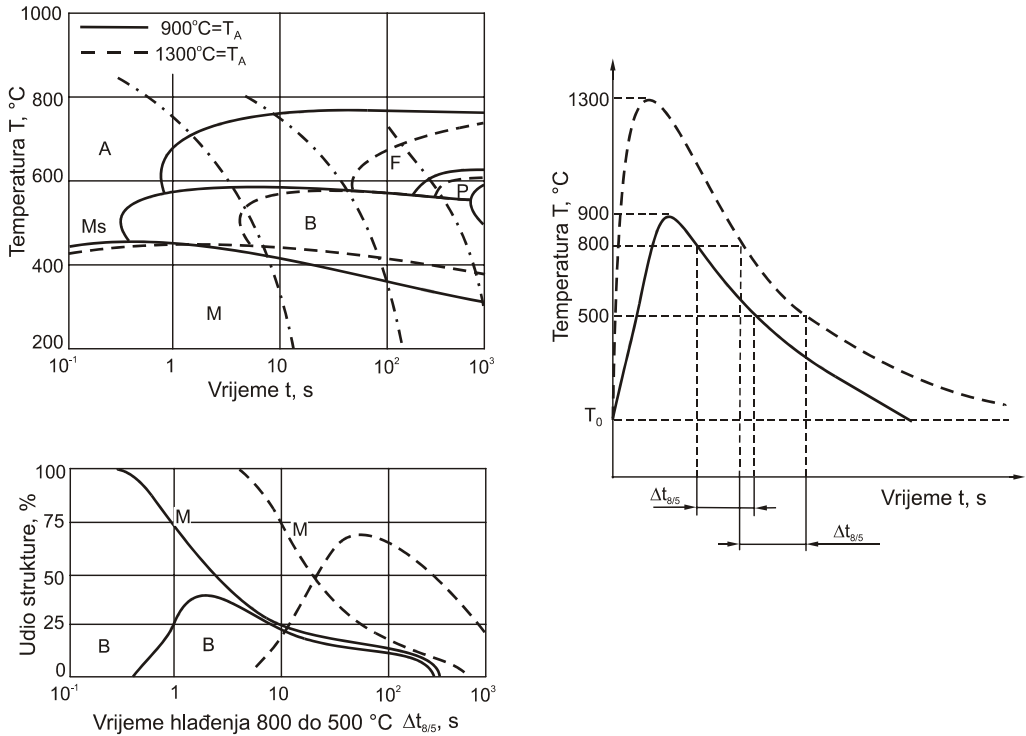
Ove pojave su vrlo kompleksne, nisu neovisne i predmet su istraživanja u mnogim svjetskim institutima, između ostalih i IIW-a i njegove komisije IX.

5. 2. Utjecaj transformacije strukture na svojstva zavarenog spoja

Zavarivanje ćelika vezano je uz kompleksne promjene strukturnih stanja materijala koje se odvijaju uz specifićan naćin dovođenja i odvođenja topline, tj. lokalno zagrijavanje i specifićne uvjete hlađenja, koji određuju karakter transformacije strukture. Sa stajališta svojstava zavarenog spoja više se razmatraju utjecaji brzine strukturne transformacije pri hlađenju, jer se pri hlađenju formiraju svojstva zavarenog spoja koja determiniraju tvrdoću i žilavost zavarenog spoja u eksploataciji.

Za praćenje strukturnih transformacija pri hlađenju zavarenog spoja posebice su pogodni anizotermićki TTT (Temperature – Time – Transformation) dijagrami. Zbog razlićitosti u odnosu na toplinsku obradu, za zavarivanje ćelika obićno se traže dijagrami sa temperaturom austenitizacije što je moguće bliće granici taljenja, gdje je u većini slućajeva slabljenje osnovnog materijala usljed zavarivanja najizraženije.

Na slici 5.4 je prikazan TTT dijagram za jedan niskolegirani čelik gdje se mogu uočiti razlike u udjelima struktura nakon austenitizacije na 900 °C i 1300 °C [48].



Slika 5.4. Anizotermički TTT dijagram niskolegiranih čelika s 1,2Mn; 0,67Ni i 0,1V nakon zagrijavanja na 900 °C i 1300 °C [48].

Karakteristike toplinskog ciklusa (T_0 , T_{max} , w , ...) uvjetuju karakter strukturne transformacije pri zavarivanju. O zadanoj brzini, odnosno vremenu hlađenja ovisit će izgled krivulje toplinskog ciklusa $T(t)$, što će nakon hlađenja zavarenog spoja dati strukturu željenih mehaničkih svojstava. Kod većine čelika, polazeći od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$, određuju se parametri zavarivanja preko kojih će se ostvariti željeni toplinski ciklus.

Bržim hlađenjem će atomi vodika koji se mogu pojaviti u zavaru ostati zarobljeni u kristalnoj rešetki. Tvoreći molekule H_2 , mogu prouzročiti hladne pukotine, dok pri sporom hlađenju mogu nastati krupnija kristalna zrna niske žilavosti.

Ovisno o zahtjevima na zavareni spoj te karakteristikama materijala, odabire se vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ koje će osigurati tražena svojstva zavarenog spoja. Unutar tog ograničenog područja moguće je postizanje željenog vremena hlađenja primjenom analitičkih metoda proračuna temperaturnih polja i odgovarajućih TTT dijagrama.

Osnovni materijal, zona utjecaja topline (ZUT) i metal zavara moraju imati minimalno propisana svojstva. Propisi obično zahtijevaju vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja, istezljivosti i vrijednosti žilavosti na određenim temperaturama, no ponekad se traže i druga svojstva kao npr. trajna konvencionalna granica puzanja, otpornost prema koroziji i dr. Svi navedeni zahtjevi mogu se približno postići primjenom odgovarajuće tehnologije zavarivanja, uz određenu brzinu hlađenja kao rezultat kontroliranog unosa topline, predgrijavanje uz naknadnu toplinsku obradu.

Sa stajališta vrijednosti čvrstoće u zavarenom spoju obično nema većih problema da se postignu željene vrijednosti, s tim što su vrijednosti čvrstoće u ZUT-u više od vrijednosti čvrstoće u osnovnom materijalu.

Utvrđivanje vrijednosti čvrstoće u ZUT-u pri ispitivanjima realnih zavarenih spojeva je problem s obzirom na malu širinu ZUT-a, pa se ispitivanja vrše za kompletan zavareni spoj. Zbog nemogućnosti analize promjene čvrstoće u pojedinim područjima ZUT-a, pristupilo se ispitivanjima na uzorcima nakon simulacije toplinskih ciklusa na simulatorima zavarivačkih ciklusa. U literaturi se stoga mogu pronaći različite eksperimentalno dobivene formule za procjenu i orijentacijsko izračunavanje čvrstoće ZUT-a [49].

Međutim te jednadžbe ne uključuju sadržaj nečistoća koje mogu značajno utjecati na tvrdoću, i svaka vrijedi uz odgovarajuća ograničenja npr. u pogledu sadržaja kemijskih elemenata i čvrstoće čelika.

Tako se na primjer za čelike povišene čvrstoće granica razvlačenja R_e (MPa) orijentacijski računa po sljedećoj formuli [49]:

$$R_e = 877,9 - 397(\ln \Delta t_{8/5}) + 46,7 \cdot (\ln \Delta t_{8/5})^2 + 551,1 C_E \cdot (\ln \Delta t_{8/5}) - 75,43 C_E \cdot (\ln \Delta t_{8/5})^2 - 3466 \cdot C - 168,3 \cdot Si - 608,4 \cdot Mn - 1983 \cdot Cu + 155,4 \cdot Ni + 9364 \cdot Cr \cdot C + 3602 \cdot C_E \quad \dots(5.1)$$

gdje je :

$$C_E = C + Mn/6 + Si/24 + Mo/29 + V/14 ,$$

A vlačna čvrstoća R_m (MPa) po sljedećoj formuli [49]:

$$R_m = 978,9 - 360 \cdot (\ln \Delta t_{8/5}) + 34,32 \cdot (\ln \Delta t_{8/5})^2 - 461,7 C_E \cdot (\ln \Delta t_{8/5}) - 56,10 C_E \cdot (\ln \Delta t_{8/5})^2 - 4504 \cdot C - 278,4 \cdot Si - 477,6 \cdot Mn - 1704 \cdot Cu + 159,4 \cdot Ni + 7858 \cdot Cr \cdot C + 2526 \cdot C_E + 2409 \cdot P_{cm} \quad \dots(5.2)$$

gdje je:

$$P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/15 + 5B$$

Čvrstoća u ZUT-u se može procijeniti i preko izmjerene tvrdoće ZUT-a. Tako se u literaturi i nalaze različite formule proizašle iz eksperimentalnih istraživanja i statističke obrade podataka [49].

$$R_e = 3,1 \cdot HV \cdot 0,1^{n_o} - 80 \quad \dots(5.3)$$

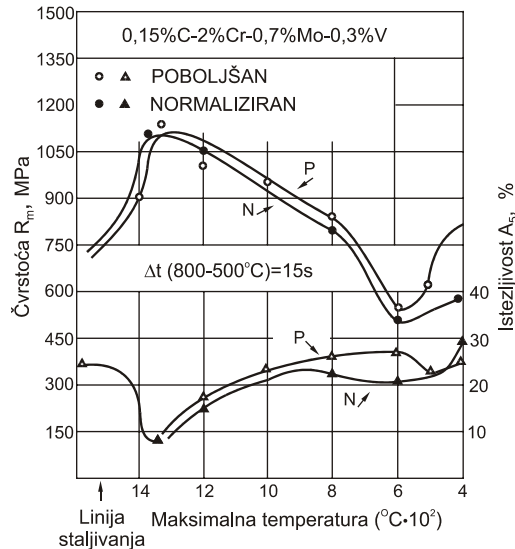
gdje su:

HV - vrijednost tvrdoće u Vickersima

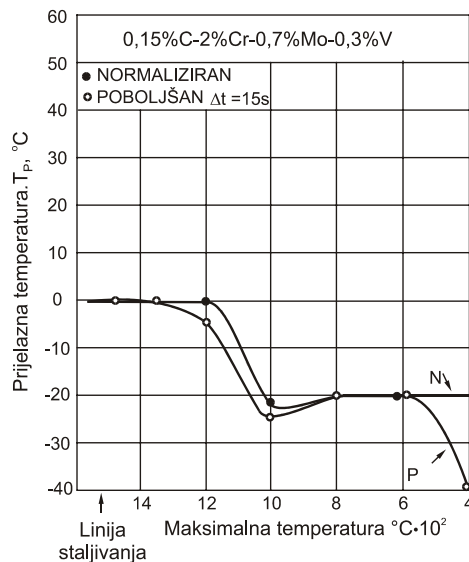
n_o - eksponent otvrdnjavanja koji se određuje preko $\Delta t_{8/5}$

$$n_o = 0,065 (\Delta t_{8/5})^{0,17}$$

Na slici 5.5 prikazana je promjena čvrstoće i istezljivosti niskolegiranog čelika u poboljšanom (P) i normaliziranom (N) stanju, nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja, a na slici 5.6 prikazana je promjena prijelazne temperature (T_p) iz žilavog u krhko stanje nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja (kriterij za prijelaznu temperaturu je 35 J/cm^2).



Slika 5.5 Promjene čvrstoće i istezljivosti ovisno o maksimalnoj temperaturi pojedinih zona niskolegiranog čelika u poboljšanom (P) i normaliziranom (N) stanju, nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja [4].



Slika 5.6 Promjena prijelaznih temperatura ovisno o maksimalnoj temperaturi pojedinih zona niskolegiranog čelika u poboljšanom (P) i normaliziranom (N) stanju, nakon simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja [4].

U literaturi postoje različite formule za procjenu maksimalnih vrijednosti tvrdoće u zavarenom spoju, koje su vrlo korisne kao orijentacijske vrijednosti kod procjene strukturnih transformacija pri zavarivanju i prije planova pokusa eksperimentalnih istraživanja. Pošto su prilično raspršene u literaturi, ovdje se daju one najčešće, pogodne za čelike povišene čvrstoće i niskolegirane čelike.

Formula Suzuki: [50],[51]

$$HV_{\max} = H_{\infty} + K / \{ 1 + \exp[a(\log \Delta t_{8/5} - Y_5)] \} \quad \dots(5.4)$$

gdje je :

$$K = 269 + 454 \cdot C - 36 \cdot Si - 79 \cdot Mn - 57 \cdot Cu - 12 \cdot Ni - 53 \cdot Cr - 122 \cdot Mo - 169 \cdot Nb - 7089 \cdot B$$

$$H_{\infty} = 884 \cdot C + 287 - K$$

$$a \cdot K = 478 + 3364 \cdot C - 256 \cdot Si + 66 \cdot Ni - 408 \cdot Mo - 1321 \cdot V - 1559 \cdot Nb$$

$$Y_5 = -0,085 + 2,07 \cdot C + 0,459 \cdot Mn + 0,655 \cdot Cu + 0,122 \cdot Ni + 0,222 \cdot Cr + 0,788 \cdot Mo + 30 \cdot B$$

Formula Yurioka [52]

$$HV_{\max} = 406 \cdot C + 164 \cdot C_{EI} - 183 - (369 \cdot C - 149 \cdot C_{EI} + 100) \cdot \arctan X \quad \dots(5.5)$$

gdje je:

$$X = (\log \Delta t_{8/5} - 2,822 \cdot C_{EI} + 0,262) / (0,526 - 0,195 \cdot C_{EI})$$

$$C_{EI} = C + Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/40 + Cr/6 + Mo/4 + V/5 + Nb/5 + 10 \cdot B$$

$$C_{EII} = C - Si/30 + Mn/5 + Cu/5 + Ni/20 + Cr/4 + Mo/6 + 10 \cdot B$$

Navedena jednadžba vrijedi za čelike kemijskog sastava iz tablice 5.1. i vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ do 100 s.

Formula Terasaki [50],[51]

$$H_{\max} = HV_0 + (HV_M - HV_0) \cdot \exp[-0.2(\Delta t_{8/5} / \Delta t_{8/5M}) - 1] \quad \dots(5.6)$$

gdje je:

HV_M – tvrdoća martenzita

$$HV_M = 812C + 293$$

$$HV_0 = 164 \cdot (C + Si/2 + Cr/7 + Mo/2 + V + Nb + 7B) + 153$$

$$\log \Delta t_{8/5M} = 2.5(C + Mn/3 + Cu/4 + Ni/8 + Cr/10 + Mo/3 + 5B) - 1.27$$

Formula Beckert [50],[51]

$$H_{\max} = B + (A - B) \exp(-b \cdot \Delta t_{8/5})^2 \quad \dots(5.7)$$

gdje je:

$$A = 939 \cdot C + 284$$

$$B = 167 \cdot (C_{EB})^{2.42} + 137$$

$$b = \exp(-0.013 \cdot B + 0.8)$$

$$C_{EB} \text{ (Beckert)} = C + Si/11 + Mn/2.9 + Cu/3.9 + Ni/17 + Cr/3.2 + Mo/3.4$$

Formula Düren [50],[51]

$$H_{\max} = 2.019 \cdot [C \cdot (1 - 0.5 \cdot \log \Delta t_{8/5}) + 0.3 \cdot (C_{ED} - C)] + 66 \cdot (1 - 0.8 \cdot \log \Delta t_{8/5}) \quad \dots (5.8)$$

gdje je:

$$C_{ED} \text{ (Düren)} = C + \text{Si}/11 + \text{Mn}/8 + \text{Cu}/9 + \text{Cr}/5 + \text{Ni}/17 + \text{Mo}/6 + \text{V}/3$$

Navedene, eksperimentalno dobivene jednadžbe omogućavaju orijentacijsku procjenu svojstava zavarenog spoja u ZUT-u. Za bolje procjene svojstava zavarenog spoja nužno je prije eksperimentalnog istraživanja koristiti i druge metode za orijentacijsku procjenu strukturnih transformacija (npr. simulacija procesa zavarivanja, probe zavarljivosti). Na osnovi tih formula izrađen je kompjutorski program [53] koji pruža mogućnosti provjere varijanti parametara zavarivanja i procjena maksimalno očekivanih vrijednosti tvrdoće.

Predviđanje maksimalnih vrijednosti tvrdoće u ZUT-u koristi se za predviđanje opasnosti nastanka pukotina usljed napetosne korozije (SCC) kod mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće. Prema literaturnim podacima [54], realna opasnost nastanka ovih pukotina je tvrdoća ZUT-a oko 400 HV ili neznatno iznad te tvrdoće. Rijetko se u martenzitno-bainitnoj strukturi ZUT-a nađu ove pukotine, češće su to pukotine uvjetovane vodikom.

Ograničenja primjene pojedinih formula s obzirom na sadržaj kemijskih elemenata prikazana su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Sadržaj kemijskih elemenata u čelicima na kojima su provedena ispitivanja iz kojih su proizašle formule za izračunavanje maksimalno očekivane tvrdoće [50],[51].

Kem. element	Yurioka	Terasaki	Düren	Suzuki
C	0.03-0.25	0.03-0.25	0.1-0.33	0.017-0.09
Si	0.15-0.45	0.15-0.45	do 0.35	0.21-0.27
Mn	0.87-2.06	0.87-2.06	do 1.45	1.45-1.87
Cu	do 0.23	do 0.23	do 0.03	-
Ni	do 0.81	do 0.81	do 0.05	-
Cr	do 0.85	do 0.85	do 0.05	-
Mo	do 0.33	do 0.33	-	-
V	do 0.06	do 0.06	-	-
Nb	do 0.06	do 0.06	-	do 0.043
Ti	do 0.018	do 0.018	-	0.01-0.02
B	do 0.0018	do 0.0018	-	0.0007-0.0012

Usporedbom vrijednosti maksimalnih tvrdoća u ZUT-u uz liniju staljivanja dobivenih vlastitim eksperimentalnim istraživanjima i analitičkih vrijednosti tvrdoće dobivenih pomoću formule Yurioka, uočava se prihvatljiva razlika kod kraćih vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ (do vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10$ sekundi razlika je do 40 HV), dok se kod duljih vremena hlađenja razlika značajno povećava.

Navedeno upućuje na oprez pri korištenju analitičkih formula za orijentacijsku procjenu maksimalno očekivanih tvrdoća i na uvažavanje ograničenja primjene tih formula (sadržaj kemijskih elemenata, čvrstoća, $\Delta t_{8/5}$...).

Za uobičajene nelegirane i niskolegirane čelike može se maksimalna tvrdoća izračunati iz poznatog sadržaja kemijskih elemenata po formuli [31]:

$$HV_{\max} = 90 + 1050 \cdot C + 47 \cdot Si + 75 \cdot Mn + 30 \cdot Ni + 31 \cdot Cr \quad \dots(5.9)$$

Pored navedene formule susreće se i formula Boothbya i Cottrella: [31]

$$HV_{\max} = 2019 \cdot [(1 - 0.5 \cdot \log \Delta t_{8/5}) \cdot C + 0.3 \cdot (C_{EB} - C)] + 66 \cdot (1 - 0.8 \cdot \log \Delta t_{8/5}) \quad \dots(5.10)$$

gdje je:

$$C_{EB} \text{ (Boothby i Cottrell)} = C + Si/11 + Mn/8 + Cu/9 + Cr/5 + Ni/17 + Mo/6 + V/3$$

Maksimalne vrijednosti tvrdoće pojavljuju se uz liniju staljivanja sa strane ZUT-a. Kod mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće, izrazito povećanje tvrdoće, može prouzročiti pojavu hladnih pukotina u izradi i/ili pojavu pukotina usljed korozije uz naprezanje u uvjetima agresivnog medija u eksploataciji.

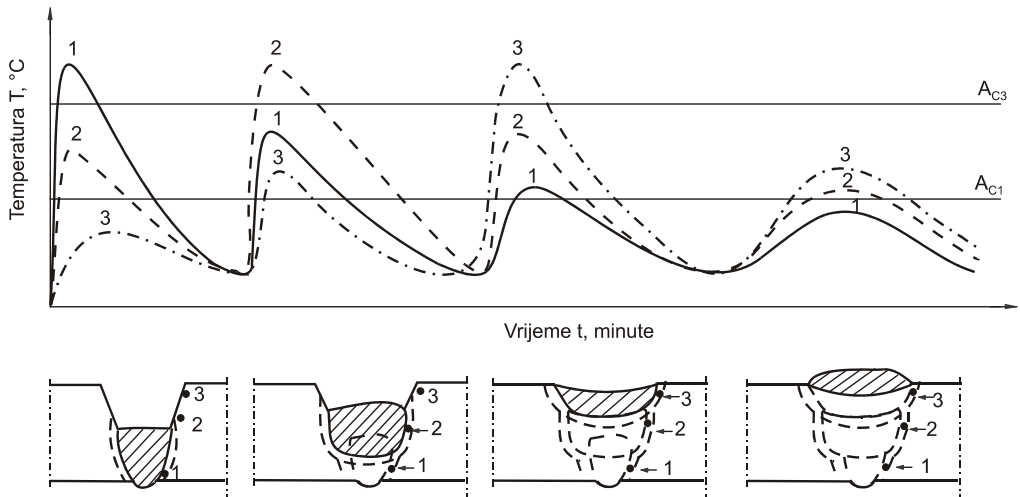
Problem niske žilavosti pri nižim temperaturama može se pojaviti kod čelika većih čvrstoća i s višim sadržajem ugljika. Ovaj se problem može riješiti uz određenu brzinu hlađenja koja se ostvaruje kontroliranim unosom topline, predgrijavanjem ili naknadnom toplinskom obradom zavarenog spoja. Pošto položaj zarezima ima signifikantan utjecaj na rezultate ispitivanja žilavosti KV u ZUT-u, potrebno je više pozornosti posvetiti određivanju položaja zarezima pri ispitivanju žilavosti, te dobro razmotriti strukture ZUT-a s obzirom da se radi o mikrolegiranim čelicima povišene čvrstoće.

U praksi se gotovo uvijek zavarivanje izvodi u više prolaza. Tako su kao primjer višeprolaznog zavarivanja na slici 5.7 prikazani toplinski ciklusi za tri točke.

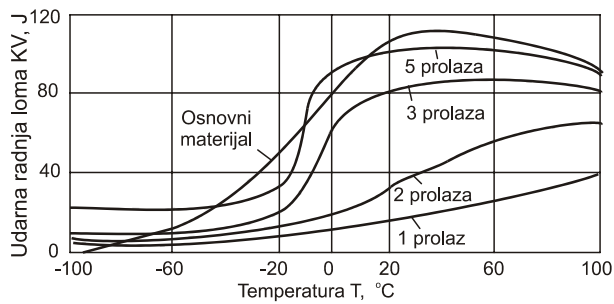
Kod višeprolaznog zavarivanja svaka točka prolazi kroz različite toplinske cikluse, tako da je ukupno vrijeme hlađenja, pod utjecajem predgrijavanja od prethodnog prolaza, dulje.

Udarana radnja loma svakog narednog prolaza u odnosu na prethodni prolaz je viša (slika 5.8), dok su tvrdoća uz liniju staljivanja i temperatura prijelaza u krhko stanje kod svakog narednog prolaza niže (slika 5.9).

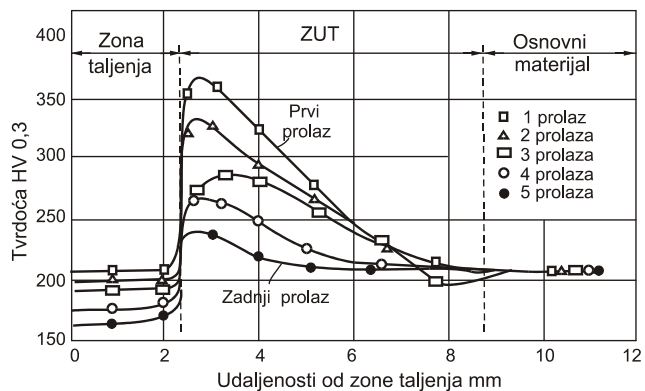
Porast tvrdoće u ZUT-u nastupa pri manjim unosima topline, odnosno pri većim brzinama hlađenja, jer će u ZUT-u nastati tvrde strukture. Porast tvrdoće je veći što je viši sadržaj ekvivalenta ugljika u čeliku.



Slika 5.7 Toplinski ciklus triju točaka tijekom višeslojnog zavarivanja dugačkim zavarima [49].



Slika 5.8 Utjecaj broja prolaza na udarnu radnju loma pri višeslojnom zavarivanju [31].



Slika 5.9 Utjecaj broja prolaza na tvrdoću nakon simulacije zavarivanja [31].

6. ISTRAŽIVANJE UTJECAJA BRZINE HLAĐENJA NA SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA

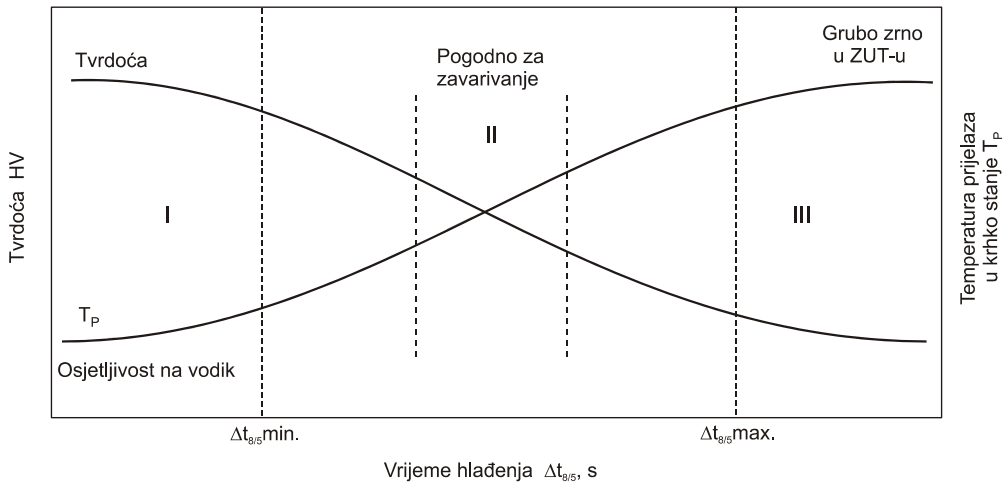
6.1. Definiranje programa istraživanja

Za razumijevanje utjecaja brzine hlađenja na svojstva zavarenog spoja, značajna su istraživanja utjecaja temperaturnih polja na transformaciju mikrostrukture pri zavarivanju, što ima utjecaja na mehanička svojstva zavarenog spoja. Taj se utjecaj može iskazati preko brzine hlađenja, odnosno trajanja hlađenja pri transformaciji strukture.

Iz postojeće literature koja obrađuje utjecaj temperaturnih polja na mehanička svojstva zavarenog spoja od čelika povišene čvrstoće i predpokusima na simulatoru toplinskih ciklusa provedenim u Laboratoriju za zavarivanje Fakultete za strojništvo u Mariboru, proizlazi da je nedovoljno poznat utjecaj vremena hlađenja od 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$), tj. brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće TStE 420. Posebice je važno istaknuti utjecaj brzine hlađenja na tvrdoću i žilavost jednoprolaznog zavara na navedenim čelicima.

Brzina hlađenja tj. vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ ima značajan utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ može se odrediti iz TTT – dijagrama. Pri određivanju ovog vremena mora se voditi računa kako bi se odredilo vrijeme hlađenja za najnepovoljniju zonu utjecaja topline.

Brzina hlađenja utječe na strukturu ZUT-a, a time i na mehanička svojstva tj. na udarnu radnju loma i tvrdoću. Odabirom optimalne brzine hlađenja može se postići zadovoljavajući odnos tvrdoće i udarne radnje loma, tj. može se postići mikrostruktura koja je manje podložna nastanku i razvoju hladnih pukotina, svojstveni ovoj vrsti čelika. Na slici 6.1 prikazan je kvalitativni utjecaj vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ na mehanička svojstva zavara.



Slika 6.1 Kvalitativni utjecaj vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ na tvrdoću i temperaturu prijelaza u krhko stanje [54].

Za određivanje parametara zavarivanja izrađeni su računalni programi, a temeljem jednadžbi vođenja topline obrađenih u poglavlju 4.2. i zahtjeva prikazanog na slici 6.1.

Postupak određivanja parametara je sljedeći:

1. Odabir vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ za najosjetljiviju zonu u zavarenom spoju.
2. Odabir temperature predgrijavanja (T_0), temperature između prolaza.
3. Izračunavanje toplinskog inputa za trodimenzionalni model vođenja topline.
4. Računanje granične debljine ($\delta_{gr.}$).
5. Računanje brzine zavarivanja $v = f(\Delta t_{8/5}, w, E, U, I, \dots)$
6. Računanje duljine slobodnog kraja žice za MAG postupak zavarivanja.

Vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ ili brzina hlađenja $w_{8/5}$ je polazna veličina. Ovu veličinu je potrebno odrediti eksperimentalno i to za najslabiju zonu zavarenog spoja, dio ZUT-a uz granicu taljenja. Obično se uzima zona koja doseže najvišu temperaturu zagrijavanja-austenitizacije od 1350 °C. To je područje pregrijavanja strukture s grubim brzo hlađenim zrnom. Za određivanje optimalne vrijednosti $\Delta t_{8/5}$ mogu se koristiti anizotermički TTT dijagrami s temperaturom austenitizacije 1350 °C.

Najvažnija je optimalna vrijednost $\Delta t_{8/5}$, ali za mikrolegirane čelike povišene čvrstoće potrebno je znati i donju i gornju graničnu vrijednost. Niže vrijednosti od donje granice znače obično prebrzo hlađenje i mogu uvjetovati suviše krhku strukturu [54]. Više vrijednosti od gornje granice dat će previše grubo zrno i pad čvrstoće. Kako je za čelik TStE 420 preporučeno $\Delta t_{8/5} = 8$ do 16 s, treba odrediti unos topline za srednju vrijednost $\Delta t_{8/5} = 12$ s kao optimum, te donju granicu uz 8s i gornju granicu uz 16s.

Granice treba izbjegavati, a treba zavarivati s optimalnim unosom topline.

Prema [55] za MAG-postupak zavarivanja čelika povišene čvrstoće, debljine 15 mm, preporučaju se sljedeći parametri:

- unos topline 1400 do 2000 J/mm-uz jakost struje zavarivanja od 140 do 170 A
- temperaturu predgrijavanja (130 + 20) °C.

Usporedbom navedenih parametara s parametrima dobivenim korištenjem kompjutorskog programa napravljenog na osnovi standarda SEW-088 [43], može se zaključiti kako nema značajnog odstupanja u pogledu unosa topline. Kod tumačenja ovakvih odstupanja potrebno je uvijek imati na umu orijentacijsku vrijednost računskih metoda iz razloga npr. kemijskog sastava materijala, primjene TTT – dijagrama s temperaturom austenitizacije približno 950 °C, a ne za kritičnu zonu zavarenog spoja koja se nalazi na približno 1350 °C, što je vidljivo sa slike br. 5.2.

6.2. Izbor osnovnog materijala

Za eksperimentalna istraživanja odabran je mikrolegirani čelik povišene čvrstoće TStE 420 od koga su se proizvodile posude pod tlakom. Ovi čelici nisu još dovoljno istraženi, a na osnovi dosadašnjih iskustava u primjeni mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće, postoji opasnost od pojave SCC na posudama pod tlakom koje se trenutno nalaze u eksploataciji.

Podaci o sadržaju kemijskih elemenata kod ovog čelika prikazani su u tablici 6.1, dok su podaci o mehaničkim svojstvima prikazani u tablici 6.2. Ispod vrijednosti za sadržaj kemijskih elemenata i mehaničkih svojstava kod pojedinog čelika, u tablici 6.1 i 6.2 prikazane su i vrijednosti dobivene pri ispitivanjima u sklopu istraživanja koje je provedeno.

Tablica 6.1. Kemijski sastav ispitivanog čelika [56]

VRSTA OSNOVNOG MATERIJALA		KEMIJSKI SASTAV									
		C %	Si %	Mn %	Pmax %	Smax %	Ni %	N %	Al %	V %	Cu%
TStE 420	PODACI PROIZVOĐAČA	≤ 0,20	≤ 0,60	1,00-1,70	0,030	0,025	≤ 0,80	0,025	≤ 0,020	≤ 0,20	≤ 0,07
	NALAZ LABORATORIJA	0,18	0,30	1,47	0,017	0,005	0,22	0,016	0,023	0,13	0,02

Tablica 6.2. Pregled mehaničkih svojstava[56]

VRSTA OSNOVNOG MATERIJALA		GRANICA RAZVLAČENJA $R_{p0,2}$ N/mm ²	VLAČNA ČVRSTOĆA R_m N/mm ²	ISTEZLJIVOST A_5 %	KONTRAKCIJA Z %	SAVIJANJE $\alpha = 180^\circ$	
						uzd.	pop.
TStE 420	PODACI PROIZVOĐAČA	min. 420	530-680	min. 19	min. 55	2,5a	3,5a
Normalizirano stanje ≤ 16 mm	NALAZ LABORATORIJA	422	577	30	61,9	+	+

Kemijska analiza je rađena na uređaju "Leco CS 224; Spektrofotometar 55B", a mehanička ispitivanja na elektronskoj kidalici "Wolpert TZZ" 250 kN tvrtke "Bratstvo" Novi Travnik.

U tablici 6.3 prikazani su rezultati ispitivanja udarne radnje loma za navedeni čelik, kod različitih temperatura na kojima je vršeno ispitivanje.

Tablica 6.3. Minimalna udarna radnja loma KV (J) prema podacima [56].

ČELIK	SMJER VALJANJA	KV, J					
		TEMPERATURA °C					
		20	0	-20	-40	-50	-60
TStE 420	uzdužno	63	55	47	34	27	-
	poprečno	40	34	27	20	16	-

Dobiveni rezultati pri ispitivanju udarne radnje loma (Charpy-V) na temperaturama 20; 0; -20 i -40 °C su (smjer valjanja-uzdužno):

Temperatura 20 °C srednja vrijednost KV = 261 J
(pojedinačno: 257 J, 264 J i 261 J)
Temperatura 0 °C srednja vrijednost KV = 257 J
(pojedinačno: 251 J, 258 J i 263 J)
Temperatura -20 °C srednja vrijednost KV = 245 J
(pojedinačno: 245 J, 251 J i 241 J)
Temperatura -40 °C srednja vrijednost KV = 182 J
(pojedinačno: 188 J, 170 J i 187 J)

Udarne radnje loma je ispitivana na Charpy uređaju PW 30/15 u "Bratstvu" Novi Travnik, a ponovljeno ispitivanje na Fakulteti za Strojništvo u Mariboru na Charpy uređaju tipa Rpk 300, tvrtke "Amsler".

6.3. Metode ispitivanja

6.3.1. Simuliranje toplinskog zavarivačkog ciklusa

Simulacija zavarivačkih ciklusa se posljednjih godina koristi pri istraživanju zavarljivosti, što uključuje ispitivanje različitih vrsta diskontinuiteta zavarenih spojeva i detaljno istraživanje ZUT-a, koji je sa stajališta mikrostrukture izrazito heterogeni dio zavarenog spoja.

Pri istraživanju ZUT-a realnih zavarenih spojeva, često nije moguće pripremiti odgovarajuće epruvete radi veoma uskog ZUT-a, a samim tim uskih pojedinih strukturnih područja unutar ZUT-a.

Pri simulaciji toplinskih zavarivačkih ciklusa pojedine strukture se "sintetički" realiziraju. Tako se ostvaruju povoljni uvjeti za razjašnjenje znatnog broja pitanja koja su u svezi s ponašanjem materijala u uvjetima toplinskih zavarivačkih ciklusa. Pomoću simulacije se mogu ostvariti dovoljno široka područja homogenih i ponovljivih struktura, tako da se za ispitivanje mehaničkih svojstava mogu koristiti klasični postupci ispitivanja [57].

Pri simuliranju se ostvaruju ponovljivi ciklusi s maksimalnom temperaturom većom ili jednakom 1350 °C pri čemu se teži za ostvarivanjem onih karakterističnih ciklusa koji se javljaju u realnom ZUT-u. Dobivene strukture ostvarene simulacijom pokazuju dobru suglasnost sa strukturama na realnim spojevima [58], [59] i [60]. Međutim, postoje određeni uvjeti kod primjene simuliranih zavarivačkih ciklusa koji utječu da se dobiveni rezultati ne mogu potpuno prenijeti na realan konstrukcijski dio. S obzirom da ZUT predstavlja kompleksan sustav uskih strukturnih faza, pri simulaciji se realizira točno definirano područje, izostaju elementi interakcije.

Također, pri simulaciji radi relativno malih dimenzija uzorka, ne dolazi do pojave naprezanja koja se inače javljaju na realnim uzorcima. Nastanak martenzita ili bainita uvjetuje samo lokalnu promjenu volumena što nema izraženiji utjecaj na ukupan volumen i eventualni nastanak naprezanja.

Osim toga, izostaje mogućnost praćenja utjecaja difuzijskog vodika koji može znatno utjecati na svojstva ZUT-a, mada neke suvremene konstrukcije simulatora zavarivačkih ciklusa omogućavaju i praćenje interakcije vodika s metalom. Međutim, neovisno od izvjesnih ograničenja, metode simulacije se koriste pri istraživanju utjecaja toplinskih ciklusa na ponašanje materijala.

Simulacija jednoprolaznog ZUT-a omogućuje otkrivanje najslabije točke u materijalu i predstavlja dragocjen način za proučavanje relevantnih strukturnih promjena u ZUT-u. Rezultati dobiveni pri jednoprolaznoj simulaciji se ne mogu koristiti pri usporedbi s višeprolaznim zavarivanjem, te se smatra da se ispitivanje u cilju kvalifikacije čelika i postupka zavarivanja moraju provoditi uz primjenu simulacije višeprolaznog zavarivanja.

Većina istraživača ima suglasna mišljenja u pogledu karakteristika toplinskog ciklusa jednoprolazne simulacije. Međutim, mišljenja su različita u pogledu oblika ciklusa višeprolazne simulacije.

Obično se pri simuliranju jednoprolaznog zavarivanja prihvaćaju toplinski ciklusi s maksimalnom temperaturom između 1200 °C i 1350 °C. U slučaju simulacije višeprolaznog zavarivanja na bazi analize raspodjele temperatura, moguće je definirati određeni broj tipičnih kombinacija različitih toplinskih ciklusa.

Utvrđeno je npr. da brzi toplinski ciklus s niskom maksimalnom temperaturom ($T_{max} < 500$ °C) u narednoj simulaciji nema posljedica na strukturu pa se može odbaciti. Također se ne primjenjuje austenitizacija na visokoj temperaturi jer se njome "briše" utjecaj prethodnih simulacija, odnosno prethodno korištenih toplinskih ciklusa.

Istraživanje Devillers-a [61] pokazuje da su moguće tipične kombinacije u višeprolaznoj simulaciji koje se sastoje od jedne ili dvije austenitizacije s popuštanjem. Kod svih kombinacija, temperatura prvog maksimuma je ~ 1350 °C i odnosi se na točke koje su udaljene 0,5 mm od linije taljenja.

Za razliku od pojedinih autora, koji smatraju da je potrebno koristiti cikluse koji se dobiju na osnovi konkretnih mjerenja pri realnom zavarivanju, noviji radovi pokazuju opravdanost istraživanja uz primjenu "srednjeg" toplinskog ciklusa.

Ukoliko se primjenjuje ugljični ili mikrolegirni čelik, toplinski ciklus $T_{max} > A_{c3}$, dovodi do povećanja austenitnog zrna, što je praćeno smanjenjem žilavosti. Ako se primjeni višestruki toplinski ciklus koji ima dva temperaturna maksimuma, T_1 i T_2 pri čemu je npr. $T_1 = 1300$ °C a $T_2 = 600$ °C doći će do neznatnih promjena strukture nastale nakon prvog ciklusa [62].

Najviše vrijednosti udarne radnje loma su vezane za sitno feritno zrno kao rezultat maksimuma na temperaturi malo višoj od A_{c3} . Iznad ove temperature dolazi do smanjenja udarne radnje loma. Osim toga maksimum na 600 °C smanjuje tvrdoću u ZUT-u i ima umjereno povoljan utjecaj na žilavost [63], [64].

Pri istraživanjima u ovom radu koristio se jednoprolazni simulirani toplinski ciklus s $T_{max} \sim 1350$ °C, jer se na ovaj način dobiju najnepovoljniji uvjeti pri kojima nastaje grubozrnati ZUT.

S obzirom na vrstu uređaja na kojima se vrši ispitivanje simuliranjem uvjeta zavarivanja ili po nazivu, može se kazati da se najčešće koriste sljedeće metode simulacije:

- dilatometrijska,
- in situ,
- IMET,
- računске,
- simulator toplinskih ciklusa napr.(Thermorestor, Smitweld, ...),
- nestandardne

6.3.2. Dilatometrijska metoda

Promjene iz površinski centrirane kristalne rešetke u prostorno centriranu kristalnu rešetku i obratno, uvjetuje premještanje atoma, što rezultira izmjenom parametara rešetke. Širenje i skupljanje se registrira pomoću dilatometrijske metode.

Stariji tipovi dilatometara nisu imali mogućnosti simulacije brzih procesa koji se dešavaju pri zavarivanju, pa su se na njima mogli raditi samo dijagrami kontinuiranog preobražaja austenita za uvjete toplinske obrade.

Razvojem programiranih brzih dilatometara omogućeno je simuliranje cijelog procesa zavarivanja, pa time i izrada dijagrama pretvorbe austenita za uvjete zavarivanja.

Uzorci malih dimenzija zagrijavaju se velikim brzinama, nekoliko stotina °C/s, do željene maksimalne temperature, a zatim hlade različitim brzinama. Pri tome se registriraju dijagrami ovisnosti temperature i deformacije od vremena. Na ovim dijagramima se određuju osnovni parametri toplinskog ciklusa (T_{max} , $\Delta t_{8/5}$, $w_{8/5}$). Temperature pretvorbe se uobičajeno određuju odklonom dilatometrijske krivulje od krivulje koja se dobije toplinskom dilatacijom uzoraka bez pretvorbe.

Dijagram pretvorbe austenita za uvjete zavarivanja izrađuje se u sistemu temperatura-vrijeme, s tim da se kao početna temperatura uobičajeno uzima temperatura početka pretvorbe, na primjer A_{c3} .

Iako su sve faze pretvorbe u čeliku vrlo značajne, posebnu pozornost zaslužuje izučavanje kinetike martenzitne pretvorbe. Taj proces se najjednostavnije ispituje na osnovi dilatometrijskih krivulja primjenom metode odsječka [65].

Obrada rezultata dilatometrijske analize obuhvaća i ispitivanje mikrostrukture te mjerenje tvrdoće dilatometrijskih uzoraka. Za potpunu analizu strukturnih pretvorbi izrađuju se dijagrami struktura-vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ ili brzina hlađenja w . Nedostatak dilatometrijskih metoda je relativno mala osjetljivost na feritnu reakciju, čije se prisustvo identificira pri udjelu iznad 10%. Ovaj se problem rješava kombiniranjem dilatometrijskih i magnetometrijskih ispitivanja.

U novije vrijeme koristi se metoda prve i druge derivacije izmjerenih toplinskih ciklusa. Ona se temelji na činjenici da se pri faznim promjenama, usljed promjene slobodne energije sistema pojavljuju u toplinskom ciklusu mali otkloni, koji se na krivulji temperatura-vrijeme veoma teško uočavaju. Na krivulji derivacije temperature po vremenu ove promjene su uočljivije i moguće je preciznije odrediti temperaturu pretvorbe. Ova se metoda može rabiti samostalno ili u kombinaciji s dilatometrijskim ispitivanjem.

6.3.3. Metoda čepa (in situ)

Zahvaljujući mogućnosti da se iz prve i druge derivacije temperature po vremenu odrede temperature pretvorbe, razvijena je metoda "in situ" ili metoda usađenog čepa. Kod ove metode navaruje se dodatni materijal na ploču, u koju su usađeni čepovi od materijala koji se ispituje. Toplinski ciklus se registrira pomoću termoelemenata postavljenih direktno u zonu utjecaja topline. Variranjem parametara navarivanja dobivaju se različiti toplinski ciklusi. Njihovom derivacijom određuju se temperature pretvorbe, a metalografskom analizom čepova strukturni sastavi zona utjecaja topline za pojedinu brzinu hlađenja. Na ovaj način određuje se dijagram pretvorbe austenita za uvjete zavarivanja.

Za razliku od anizotermičkih dijagrama ovdje se na apscisu nanosi vrijeme $\Delta t_{8/5}$. Karakteristično je da se kod metode "in situ" rezultati ispitivanja dobivaju mjerenjem u stvarnoj zoni utjecaja topline.

6.3.4. Metoda IMET-1

Metodom IMET-1 određuje se utjecaj brzine hlađenja w i vremena hlađenja od T_{max} do temperature A_{r3} , na mehanička svojstva i strukturu zone utjecaja topline. Ova ispitivanja se izvode na posebno konstruiranom uređaju, u kome se uzorci mogu zagrijavati i hladiti različitim brzinama, kao kod realne zone utjecaja topline. Naknadnim ispitivanjem mehaničkih svojstava i mikrostrukture uzoraka izrađuju se dijagrami struktura-brzina hlađenja i mehanička svojstva-brzina hlađenja.

Ova metoda omogućava i ispitivanje kinetike promjene mehaničkih svojstava, kinetike procesa faznih pretvorbi, homogenizacije, rasta zrna u uvjetima toplinskih ciklusa zavarivanja, kao i ispitivanje utjecaja plastičnih deformacija visoko temperaturnih faza na njihovu postojanost u zadanom intervalu pretvorbe, te mehanička svojstva metala pri zavarivanju.

Ova metoda je razvijena i najčešće se koristi u Rusiji dok je njena primjena u drugim zemljama rijetka.

6.3.5. Računske metode

Razvoj matematičkih modela za određivanje parametara toplinskog ciklusa inicirao je izučavanje mogućnosti matematičkog izračunavanja nekih svojstava zone utjecaja

toplina, a time i izučavanje elemenata zavarljivosti čelika [66]. Najveći broj autora bavio se mogućnošću izračunavanja mehaničkih svojstava zone utjecaja topline.

Pošto fizikalni model mehaničkih svojstava, u ovisnosti od strukture, kemijskog sastava, toplinskog ciklusa zavarivanja, veličine zrna i drugih termomehničkih veličina, nije još uvijek uspješno razjašnjen, ostaje kao metoda rješavanja matematičko-statističko određivanje funkcionalne ovisnosti iz rezultata ispitivanja [67].

Najprihvatljiviji postupak računanja je pomoću regresijske analize na osnovi većeg broja eksperimentalnih rezultata, za što postoje računalni programi. Ovi programi su pokazali zadovoljavajuću podudarnost eksperimentalnih i računskih vrijednosti.

6.3.6. Ostale metode

Razvijen je veliki broj poznatih metoda za ispitivanje svojstava i strukture zone utjecaja topline u ovisnosti od tehnologije i parametara zavarivanja čelika. Sve ove metode (valjkasta, Čabelkina, križasta i dr.) se zasnivaju na ispitivanju uzoraka zavarenih u različitim uvjetima.

Pojedini autori se za ispitivanje nekih svojstava čelika značajnih za ocjenu njihove osjetljivosti na proces zavarivanja, služe metodama koje su poznate, ali se koriste za ispitivanje u druge svrhe (utjecaj žarenja na smanjenje zaostalih naprezanja, porast austenitnog zrna, tvrdoća, mikrostruktura i mehanička svojstva zone utjecaja topline). Čak se izrađuju dijagrami pretvorbe austenita za uvjete zavarivanja.

U novije vrijeme se koristi optički dilatometar, koji omogućava ispitivanja do viših maksimalnih temperatura u odnosu na klasični dilatometar, pa i do 1500 °C.

Stalni razvoj laboratorijske tehnike omogućava primjenu sve većeg broja metoda za ispitivanje svojstava čelika simulacijom procesa zavarivanja.

6.4. Analiza svojstava zone utjecaja topline na simuliranim uzorcima

Promjene svojstava čelika u zoni utjecaja topline pod djelovanjem toplinskog ciklusa u odnosu na svojstva osnovnog materijala definiraju praktično osjetljivost čelika na zavarivanje. Na ove promjene utječe veliki broj faktora vezanih za svojstva osnovnog materijala i karakter toplinskog ciklusa. Pri tome se u zoni utjecaja topline mijenja veći broj svojstava osnovnog materijala.

Ako se ovo promatra za određeni čelik onda su njegova svojstva:

- kemijski sastav,
- mehanička svojstva,
- termomehnička obrada,
- struktura i dr.,

mogu smatrati kao polazne veličine, a parametri toplinskog ciklusa:

- maksimalna temperatura T_{max} ,
- vrijeme hlađenja 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) ili brzina hlađenja $w_{8/5}$,
- vrijeme zagrijavanja od A_{c3} do T_{max} (t')
- vrijeme hlađenja od T_{max} do temperature A_{r3} (t'')

veličinama koje utječu na:

- strukturne promjene
- precipitacione procese
- mehanička svojstva zone utjecaja topline.

Jasno je da se ovdje radi o velikom broju faktora s različitim stupnjem utjecaja i međusobne povezanosti, te bi razmatranje interakcije svih pobrojanih faktora suviše kompliciralo primjenjivost metode.

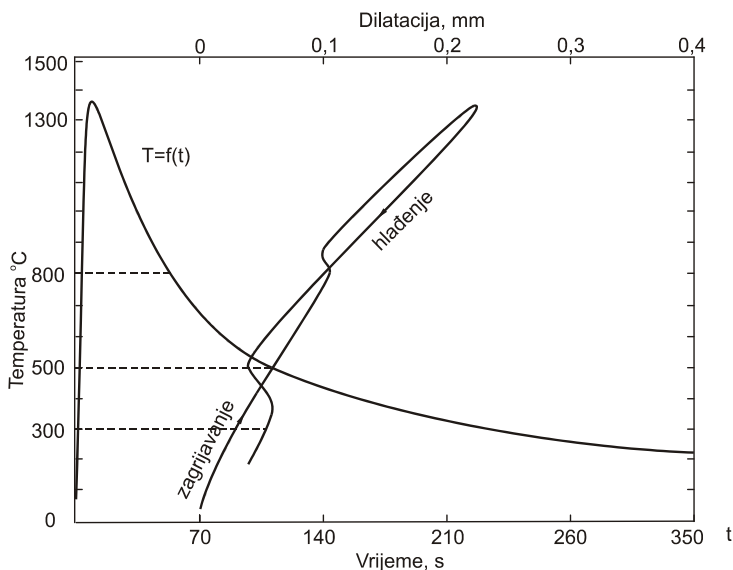
Analiza utjecaja svih mogućih kombinacija toplinskih ciklusa bi znatno uvećala broj utjecajnih faktora, a opseg ispitivanja potrebnih za donošenje ocjene o zavarljivosti čelika strahovito bi porastao. Zbog toga je uobičajeno da se za donošenje opće ocjene o osjetljivosti čelika na zavarivanje, ispitivanja vrše toplinskim ciklusima koji odgovaraju pregrijanom području zone utjecaja topline. Pri tome se koristi maksimalna temperatura ciklusa $T_{max}=1300$ do 1400 °C, a vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ varira.

Na taj način se uvjeti ispitivanja znatno pojednostavljuju i analiza promjene svodi na utjecaj samo jednog faktora (vremena ili brzine hlađenja u intervalu 800 do 500 °C).

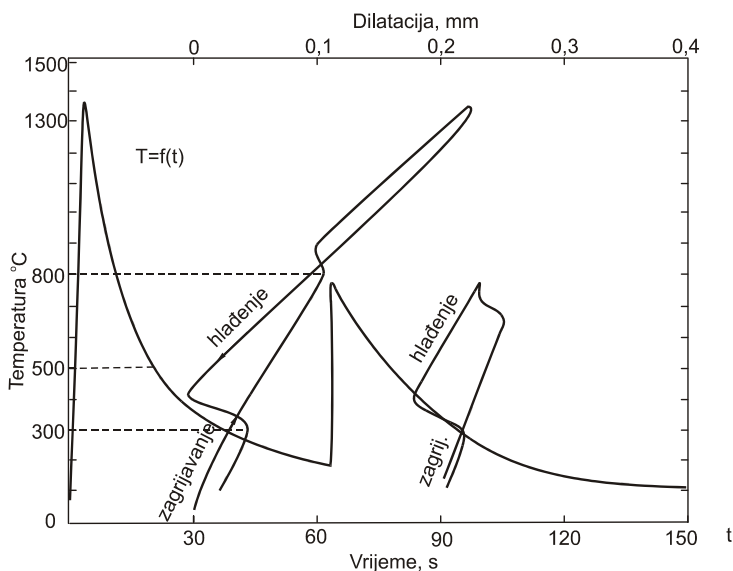
Ako se želi izvršiti analiza ponašanja čelika ili promjena svojstava pojedinih područja zone utjecaja topline u konkretnim radnim uvjetima, moraju se odabrati odgovarajući toplinski ciklusi kojima će se uzorci podvrći. Broj mogućih kombinacija koji se u praksi pojavljuje je velik te se pokušalo toplinske cikluse sistematizirati:

- jednostavni ciklusi (jednoslojno zavarivanje i navarivanje),
- složeni ciklusi (višeslojno zavarivanje i zavarivanje kratkim zavarima)

Primjeri dijagrama simulacije toplinskih ciklusa prikazani su na slici 6.2 i 6.3.



Slika 6.2 Prikaz jednostavnog dijagrama simulacije toplinskog ciklusa [68].



Slika 6.3 Prikaz složenog dijagrama simulacije toplinskog ciklusa [68].

6.4.1. Rast austenitnog zrna

Značaj veličine austenitnog zrna za strukturu nastalu pri transformaciji $\gamma \rightarrow \alpha$ je opće poznat. Sitno austenitno zrno uzrokuje i sitnu sekundarnu strukturu, a time i bolju žilavost. Faktori koji utječu na porast austenitnog zrna su temperatura austenitizacije i vrijeme austenitizacije, što u toplinskom ciklusu odgovara temperaturi T_{max} , vremenu zagrijavanja od A_{c3} do T_{max} i vremenu hlađenja od T_{max} do temperature A_{r3} .

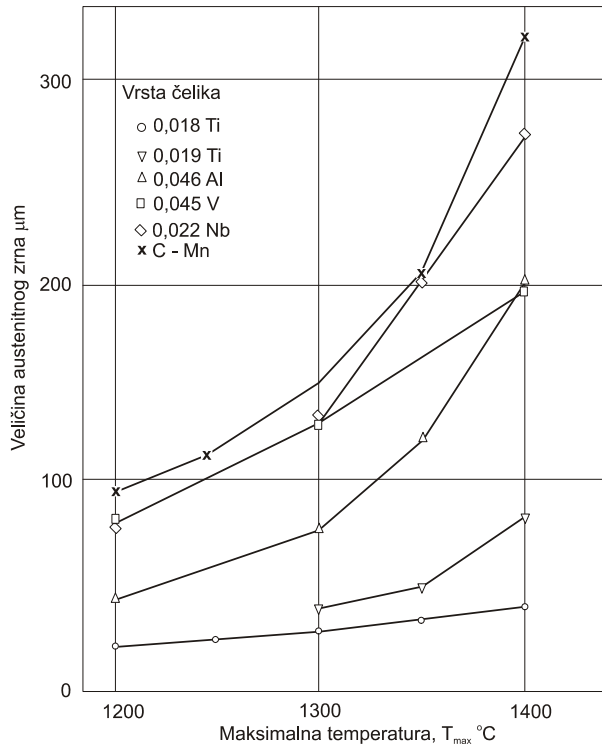
Kod nelegiranih čelika bez dodatka elemenata koji obrazuju disperzoide, po pravilu kod izotermalnog žarenja dolazi do ravnomjernog porasta zrna s temperaturom.

Diskontinuirani porast zrna koji karakterizira usporeni porast kod nižih temperatura i nagli porast zrna kod određene temperature, susreće se kod čelika koji tvore disperzoide Al, V, Ti i Nb [69].

Kod dostizanja temperature na kojoj se disperzoidi rastvaraju, nastaju fino disperzirane izlučevine koje su uzrok nepokretnosti granice zrna i dolazi do izrazitog porasta zrna.

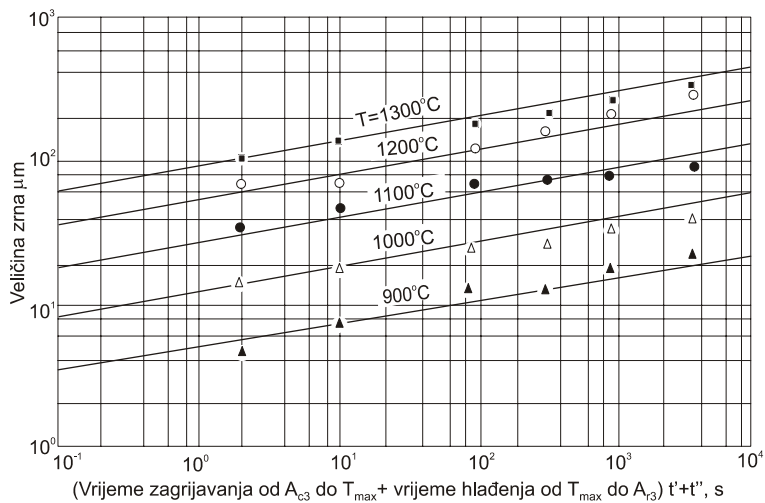
Ispitivanje rasta austenitnog zrna u uvjetima zavarivanja bilo je predmetom rada više istraživača [69], [70], [71]. Istraživanjem simuliranih uzoraka malih dimenzija razjašnjena je veza između veličine austenitnog zrna, temperature austenitizacije i vremena zagrijavanja od A_{c3} do T_{max} i vremena hlađenja od T_{max} do temperature A_{r3} .

Potvrđena je poznata činjenica da najveći utjecaj na porast austenitnog zrna ima maksimalna temperatura ciklusa. Na slici 6.4 prikazana je zavisnost veličine austenitnog zrna od maksimalne temperature toplinskog ciklusa za jedan C-Mn čelik, legiran različitim mikrododacima.



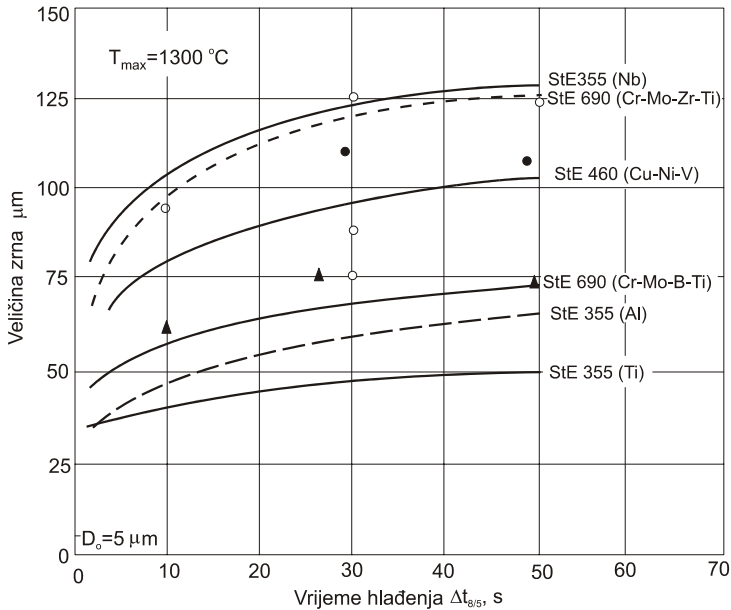
Slika 6.4 Veličina austenitnog zrna u simuliranom ZUT-u, različiti vrsta čelika [70].

Zavisnost porasta austenitnog zrna od vremena držanja čelika (Cr-Mo-Zr-Ti) na različitim maksimalnim temperaturama prikazana je na slici 6.5, gdje je ovo vrijeme označeno kao parametar toplinskog ciklusa $t' + t''$.



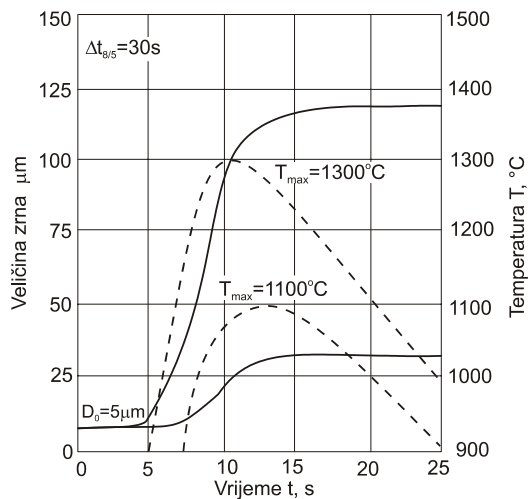
Slika 6.5 Ovisnost veličine austenitnog zrna od vremena zagrijavanja od A_{c3} do T_{max} (t') i vremena hlađenja od T_{max} do temperature A_{r3} (t'') za čelik tipa Cr-Mo-Zr-Ti [69].

Na slici 6.6 prikazan je dijagram ovisnosti veličine austenitnog zrna od $\Delta t_{8/5}$ za nekoliko čelika pri $T_{max}=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 6.6 Utjecaj vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ na veličinu austenitnog zrna u ZUT-u, pri trodimenzijskom odvođenju topline [69].

Na slici 6.7 prikazan je dijagram rasta austenitnog zrna, koji je ucrtan u dijagram toplinskih ciklusa za $T_{max}=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T_{max}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ kod Cr-Mo-Zr-Ti čelika [71].



Slika 6.7 Rast austenitnog zrna kod toplinskih ciklusa sa $T_{max}=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T_{max}=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ za Cr-Mo-Zr-Ti čelike [71].

Analiza prikazanih dijagrama pokazuje da prevladavajući utjecaj na veličinu austenitnog zrna kod zavarivanja ima maksimalna temperatura toplinskog ciklusa. Vrijeme $\Delta t_{8/5}$, vrijeme zagrijavanja od A_{c3} do T_{max} i vrijeme hlađenja od T_{max} do temperature A_{r3} , imaju manji utjecaj na rast zrna, jer su ona za najveći broj realnih toplinskih ciklusa relativno kratka.

Grubo "primarno" austenitno zrno treba izbjegavati, jer ima sljedeće neugodne posljedice:

- pogoršava elasticitet ZUT-a,
- grubo zrno koči kinetiku raspada austenita, preferirajući izlučivanje ferita u cijepanim ravninama austenita i nastanak Widmannstättenove mikrostrukture ili bezdifuzionu promjenu
- povećava sklonost čelika na likvacijske i hladne pukotine, kao i nastanak pukotina kod toplinske obrade žarenjem.

Poznavanje dijagrama raspada austenita za uvjete zavarivanja će omogućiti, prognoziranje mikrostrukture u zoni utjecaja topline. Poznato je određivanje graničnih uvjeta kod kojih nastaje čisto martenzitna, feritno-bainitna ili feritno-perlitna struktura. To pak na drugoj strani omogućava optimiziranje procesa zavarivanja, kod kojeg mikrostruktura ZUT-a ima zadani sastav.

6.4.2. Utjecaj broja prolaza

Utjecaj broja prolaza na strukturu i druga svojstva ZUT-a razmatran je u više radova [69, 71, 72], pri čemu su ispitivanja vršena simulacijom djelovanja složenog toplinskog ciklusa. Praktički je zbog velikog broja mogućih kombinacija, teško sustavno pristupiti analizi utjecaja broja prolaza. Zbog toga se navodi kratki sažetak ispitivanja prema literaturnim podacima [72].

Simuliranjem čelika StE 360, StE 470 i StE 690 složenim toplinskim ciklusom 1350-1000-900-700-500 °C, utvrđeno je sljedeće:

- predgrijana zona kod zagrijavanja samo na 1350 ° imala je kod čelika StE 360 i StE 470 martenzitno-bainitnu strukturu, a kod čelika StE 690 martenzitnu strukturu, što je rezultiralo smanjenjem udarne radnje loma u odnosu na osnovni materijal.
- simulacijom u pet slojeva duktilnost zone utjecaja topline je dostigla vrijednost osnovnog materijala usljed sitnjenja zrna i popuštanja. Pretpostavlja se da u ovom slučaju sitnjenje zrna ima veći utjecaj na udarnu radnju loma od precipitacije.
- simulacija dvostrukim ciklusom daje izvjesna poboljšanja u veličini zrna i kod Mn-Mo-Ni čelika, ali se time žilavost pregrijane zone ne poboljšava.
- simuliranjem ciklusa 1300-850 °C; 1300-720 °C; 1300-600 °C na ovim čelicima utvrđeno je da se pri drugom toplinskom ciklusu na 850 °C mikrostruktura transformirala u fino-zrnatu martenzitno-bainitnu strukturu.

Međutim, ni u ovom slučaju udarna radnja loma se nije poboljšala. Kod drugog ciklusa s $T_{max}=720$ °C utvrđeno je čak i smanjenje udarne radnje loma u odnosu na rezultate simulacije poslije prvog ciklusa s $T_{max}=1300$ °C. Jedino objašnjenje za dobivene rezultate jeste da je u ovom slučaju utjecaj precipitacijskog otvrdnjavanja veći od utjecaja sitnjenja zrna [73].

6.4.3. Utjecaj mikrolegiranja

Osnovne prednosti koje se postižu legiranjem čelika s malim dodacima Nb, V, Ti, Zr, B i dr. su povećanje vrijednosti vlačne čvrstoće i udarne radnje loma.

Maksimalne vrijednosti udarne radnje loma kod ovih čelika se dobivaju kada je odnos dušika i mikrolegirajućih elemenata u ravnoteži [74]. Za mikrolegirane čelike s Nb, V i Ti u nazočnosti aluminija ovaj odnos se izražava preko neravnotežnog faktora "B", što se može prikazati jednačom 6.1.

$$"B" = \frac{14}{27} \cdot Al + \frac{14}{48} \cdot Ti + \frac{14}{51} \cdot V + \frac{14}{93} \cdot (Nb - N) \quad \dots(6.1)$$

Za "B" veće ili manje od nule jedan dio mikrolegirajućih elemenata ili dio dušika je u krutom rastvoru. U oba slučaja smanjuje se žilavost, a njene maksimalne vrijednosti se dobivaju kada je "B"=0.

Procesi izlučivanja mikrolegirajućih elemenata mogu značajno utjecati na svojstva zavarenog spoja [72]. Procesi izlučivanja u zoni utjecaja topline vezani su s veličinom i oblikom izlučenih čestica u osnovnom materijalu.

Kinetika rastvaranja ne ovisi samo od temperature, već i od vrste mikrolegirajućeg elementa i sadržaja C+N [4].

Kako je čelik TStE 420 legiran vanadijem pokazat će se neke karakteristike ovog legirajućeg elementa.

Vanadij kao legirajući element u količinama iznad 0,1 % već se dugo i često koristi. Dodavanje vanadija u količinama ispod 0,1 % kao legirajućeg elementa, relativno je novijeg datuma i najčešće se koristi kod konstrukcijskih zavarljivih čelika sa sadržajem ugljika do 0,25 %.

Vanadij ne utječe značajnije na točku A_{c1} do sadržaja 1,0 %, ali točku A_{c3} povisuje čak i pri sadržajima manjim od 0,1 % [4].

Najpoznatije djelovanje vanadija izraženo je formiranjem precipitata, koji se u ovisnosti od temperature i sadržaja vanadija, ugljika i dušika izlučuju u austenitu, podeutektoidnom i eutektoidnom feritu, tijekom ili poslije $\gamma \rightarrow \alpha$ pretvorbe. Vrste precipitata (karbid, nitrid ili karbonitrid) zavise od sadržaja dušika i ugljika. Precipitati očvršćavaju čelike ali ako su grubi mogu imati i negativan utjecaj na udarnu radnju loma [75]. Ako su formirani na nižim temperaturama precipitati mogu spriječiti porast austenitnog zrna, a time djelovati na sitnjenje feritnog zrna.

Rastvorljivost vanadij-nitrida i vanadij-karbonitrida u austenitu kod niskolegiranih konstrukcijskih čelika ispitali su mnogi autori što je rezultiralo odgovarajućim jednadžbama [75]:

$$\log(V)(N) = -\frac{7070}{T} + 2,27 \quad \dots(6.2)$$

$$\log(V)(N) = -\frac{6900}{T} + 2,35 \quad \dots(6.3)$$

$$\log(V)(N) = -\frac{7840}{T} + 3,02 \quad \dots(6.4)$$

$$\log(V)(N) = -\frac{9500}{T} + 6,72 \quad \dots(6.5)$$

Za rastvorljivost vanadij-nitrida i vanadij-karbida u feritu koriste se sljedeće jednadžbe:

$$\log(V)(N) = -\frac{8120}{T} + 2,48 \quad \dots(6.6)$$

$$\log(V)(N) = -\frac{8300}{T} + 4,55 \quad \dots(6.7)$$

Iz navedenih jednadžbi uočljivo je da je veća rastvorljivost vanadij-karbida i u feritu i u austenitu od vanadij nitrida. Zbog toga se vanadij-nitridi u feritu mnogo stabilnije ponašaju tj. otporniji su na proces okrupnjavanja čestica, pa precipitacija vanadij-nitrida daje veći efekt očvršćivanja u odnosu na karbide za dani sadržaj vanadija. Analiza svojstava zone utjecaja topline pokazuje da vanadij do 0,1 % u izvjesnoj mjeri negativno djeluje na udarnu radnju loma pri malim brzinama hlađenja. Za sadržaje veće od 0,25 % negativno djelovanje na udarnu radnju loma zone utjecaja topline, javlja se i pri većim brzinama hlađenja. Gubitku duktilnosti vjerojatno pridonosi otvrdnjavanje usljed izlučivanja vanadij-nitrida u obliku koherentnog tipa precipitata [47].

Na nekim konstrukcijskim čelicima mikrolegiranim s vanadijem utvrđen je povoljan utjecaj smanjenja sadržaja ugljika na udarnu radnju loma zone utjecaja topline. To upućuje na mogućnost da se sniženjem sadržaj ugljika, a time i smanjenjem opsega precipitacijskog otvrdnjavanja, može postići bolja udarna radnja loma zone utjecaja topline. Pri tome treba voditi računa o zahtijevanim vrijednostima vlačne čvrstoće i granice razvlačenja čelika [76].

6.5. Istraživanje na realno zavarenim spojevima

Pri istraživanju ZUT-a realnih zavarenih spojeva, često nije moguće pripremiti odgovarajuće epruvete radi veoma uskog ZUT-a, a samim tim i uskih pojedinih strukturnih područja unutar ZUT-a.

Epruvete za ispitivanje ZUT-a realnih zavarenih spojeva se uglavnom uzimaju rezanjem okomito na smjer zavarivanja, tako da je ZUT sadržan u ispitnom volumenu samog uzorka.

Nedostatak ovih ispitivanja je nehomogena struktura ispitnog materijala pri čemu su pojedina strukturna područja vrlo uska, a njihova geometrija nepregledna. Također, pri ispitivanju zavarljivosti primjenom realnih zavarenih uzoraka ne postoji mogućnost utvrđivanja djelovanja određenog utjecajnog faktora, jer se oni ne mogu diferencirano promatrati. Osim toga, jednim ispitivanjem prema određenoj metodi se dobiva informacija o jednom elementu zavarljivosti što uvjetuje da se za jedan materijal mora primijeniti veći broj metoda i uzoraka.

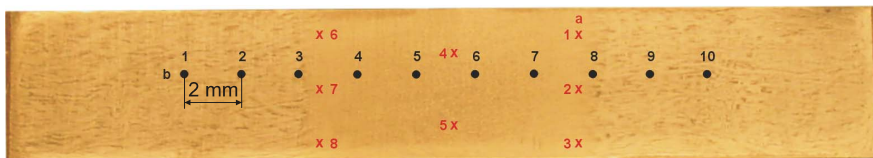
6.6. Ispitivanje tvrdoće na simuliranim i realno zavarenim spojevima

Podatak o tvrdoći u zavarenom spoju često se ne daje kao kompletna informacija koju bi stručnjak za područje zavarivanja uz dovoljnu pouzdanost mogao koristiti za dalje analize zavarljivosti i procjene ponašanja zavarenih spojeva u eksploataciji. Tvrdoća u zavarenom spoju i tvrdoća osnovnog materijala može se promatrati sa stajališta statističke teorije uzoraka, što znači da konačni rezultat mjerenja tvrdoće može poprimiti bilo koju vrijednost iz određenog osnovnog skupa tvrdoća. Rasipanje mjerenjem dobivenih vrijednosti tvrdoća veće je kod zavarenih spojeva nego kod osnovnog materijala, budući da se zavareni spoj sastoji od metala zavara i zone utjecaja topline, a te se zone sastoje od pojedinih područja.

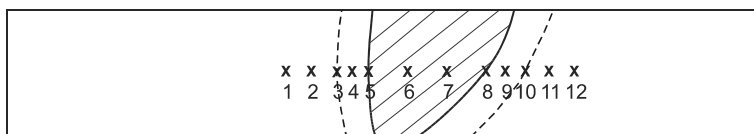
Na realnim uzorcima zavarenih spojeva nije uvijek moguće izmjeriti tvrdoću u svim područjima i na dovoljnom broju uzoraka pa se tada pristupa mjerenju tvrdoće na simuliranim uzorcima.

Tvrdoća u zavarenom spoju se mjeri obično u skladu s preporukama dokumenta MIZ-a IX-1609-90, konturnom metodom i mjerenjem po presjeku zavarenog spoja.

Na slici 6.8 dan je shematski prikaz načina mjerenja tvrdoće na simulirani uzorcima, a na slici br. 6.9 prikazano je mjerenje tvrdoće po presjeku na realno zavarenim uzorcima.



Slika 6.8 Mjerenje tvrdoće po konturi a) i presjeku b) na simuliranim uzorcima

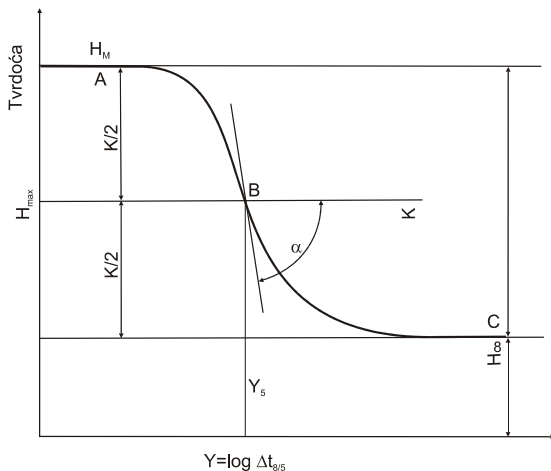


Slika 6.9 Skica mjerenja tvrdoće po presjeku na realno zavarenim uzorcima

Konturna metoda mjerenja tvrdoće koristi se kada se žele utvrditi maksimalne vrijednosti tvrdoća, što je važno za ocjenu sklonosti čelika krhkom lomu i koroziji uz naprezanje. Naziv "konturna" dolazi od toga što se tvrdoća mjeri konturno duž linije taljenja.

Maksimalna tvrdoća ne ovisi samo od kemijskog sastava čelika, već i od korištene toplinske snage zavarivanja, koja ima utjecaja na vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$. Autor [4] pretpostavlja da krivulja tvrdoće ima oblik kao na slici 6.10.

Maksimalna vrijednost tvrdoće dobije se kod kratkih vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$, kod kojih se stvara čista martenzitna struktura (H_M).



Slika 6.10 Shematski prikaz ovisnosti tvrdoće od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ [4].

gdje je :

$Y = \log \Delta t_{8/5}$,

a H_{∞} , K , α i Y_5 su konstante koje ovise od kemijskog sastava čelika.

Kada je u pitanju maksimalna dozvoljena tvrdoća ZUT-a, općenito prihvaćeni limit bio je 350HV, odnosno za niskolegirane čelike koji rade u području temperatura puzanja 400 HV (ali ne više od 125 HV iznad tvrdoće osnovnog materijala). Danas neki autori maksimalna tvrdoću povezuju s kemijskim sastavom čelika i sadržajem difuzijskog vodika [77].

6.7. Ispitivanje udarne radnje loma na simuliranim i realno zavarenim spojevima

Određivanje udarne radnje loma u zoni utjecaja topline zavarenih spojeva, je jedno od diskutabilnih mehaničkih ispitivanja koja se provode na zavarenim konstrukcijama. Problemi kod određivanja udarne radnje loma u ZUT-u uglavnom su vezani uz činjenicu što zavareni spoj s osnovnim materijalom predstavlja heterogenu cjelinu, u kojoj svaki dio ima različita mehanička svojstva.

U samoj zoni utjecaja topline, koja inače zauzima relativno usko područje, susrećemo se s nekoliko bitno različitih struktura koje uvjetuju isto tako različite rezultate udarne radnje loma. To područje se u principu može podijeliti u tri različita pojedinačna područja u kojima je čelik određen vremenski period bio podvrgnut drugom toplinskom utjecaju.

Neposredno uz zavar leži pregrijano područje u kojem je temperatura bila blizu temperature taljenja. Kod pregrijavanja čelika dolazi do nastanka krupnijeg zrna i struktura pregrijanog područja, ovisno o uvjetima zavarivanja, može biti čak i martenzitna.

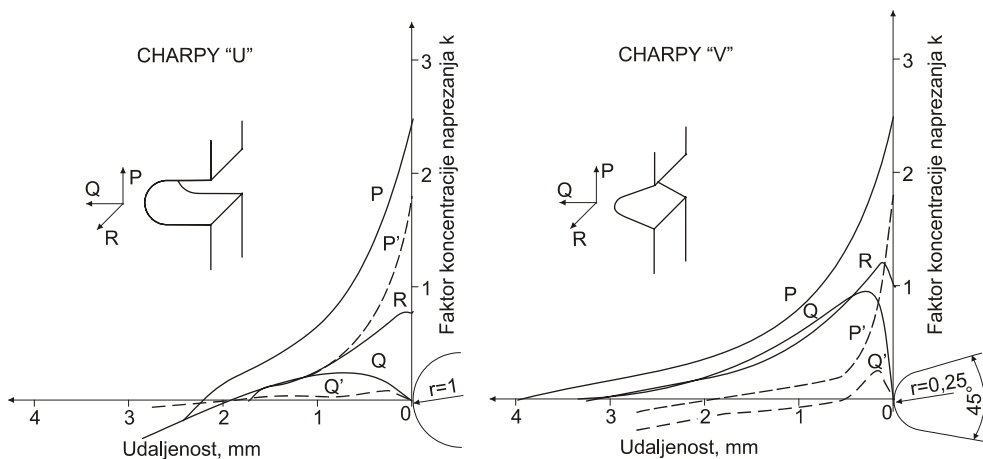
Na pregrijano područje veže se područje osnovnog materijala, a zagrijano je na temperaturu koja približno odgovara temperaturi normalizacije (900 do 1200 °C), tako da nastaje normalizirana struktura.

Izvan tog područja leži treće područje podjele gdje je osnovni materijal bio zagrijan na temperaturu od 700 do 900 °C, a čija je struktura u skladu s temperaturom, bila pretvorena djelomice u austenit koji je nakon hlađenja transformirao u sitna zrna ferita i perlita.

Iz svega se može zaključiti da dobivene vrijednosti energije loma direktno ovise o lokaciji zarez u zoni utjecaja topline, pa je otuda i objašnjenje zašto dolazi do velikog rasipanja rezultata dobivenih u ZUT-u kod realno zavarenih spojeva, dok kod simuliranih uzoraka koji imaju širi ZUT, to rasipanje je minimalno.

Za ispitivanje udarne radnje loma ima mnogo različitih metoda koje imaju različite uvjete opterećivanja kao i različite načine ocjenjivanja loma. Sve te metode se najviše razlikuju po obliku i dimenzijama ispitnih epruveta, a bitna je razlika je u obliku i dimenzijama samog zarez.

Probe za ispitivanje udarne radnje loma se vrednuju preko utrošenog rada za lom epruvete i temperature pri kojoj je rad loma utrošen. Rad se obično reducira na jedinicu poprečnog presjeka, te se daje u dimenzijama J. Epruvete sa različitim zarezima imaju različita oštro koncentrirana naprezanja, što prikazuje slika 6.11., za dva tipa zarez.



Slika 6.11. Rezultati foto-elastometrijske studije rasporeda napreznja u polju oko zarez (trodimenzijska analiza zamrzavanja napreznja) savijane epruvete [78].

gdje su :

P,R,Q - veličine glavnih napreznja u označenim pravcima u osi epruvete

P',R' - veličine glavnih napreznja na površini epruvete

k – faktor koncentracije napreznja u odnosu na zamišljeno napreznje čistog savijanja.

ISO je usvojila Charpy-V zarez na epruveti kao međunarodni standard, a u RH se za ispitivanje udarne radnje loma koristi HRN ISO 148 [79].

Osim rada potrebnog za lom epruvete, postoji i jedan drugi kriterij, kojeg su naročito cijenili anglosaksonski istraživači, a to je izgled prijelomne površine.

Uočeno je dosta rano da se rad potreban za lom epruvete snižava sa sniženjem temperature. Kasnija ispitivanja su pokazala da se ovdje radi o svojstvu materijala da niže od određenih temperatura prelazi u krhkost. Ta se temperatura tj. zona naziva temperatura ili zona prijelaza u krhko stanje.

Kao kriterij prijelaza u krhko stanje se uzima veličina rada ili izgled prijelomne površine (određeni postotak zrnatog izgleda, kao pokazatelj krhkog prijeloma). Usvojeni kriterij prijelaza u krhko stanje po literaturnim podacima [80] je rad u iznosu od 27,5 J.

Probe tipa Charpy su malih dimenzija i ne mogu predstavljati pravu sliku stanja napreznja i deformacija u stvarnim konstrukcijama, što znači da one mogu pokazivati samo odnose, a ne apsolutne vrijednosti.

6.7.1 Ispitivanje udarne radnje loma Charpy-V metodom

Ovo ispitivanje služi kako bi se ocijenila žilavost, tj. svojstvo da se materijal lomi s više ili manje plastičnom deformacijom.

Obično nema problema kod postizanja tražene vrijednosti čvrstoće, ali je mnogo veći problem kod zahtjeva jednolike žilavosti u ZUT-u. Za dobro zavarljive čelike žilavost ZUT-a može biti ista koja se garantira i za osnovni metal. Niže vrijednosti žilavosti mogu biti problem pri zavarivanju čelika s višim sadržajem ugljika i na čelicima većih čvrstoća. Ovaj problem se može razriješiti ograničenjem unosa topline, primjenom predgrijavanja ili naknadne toplinske obrade zavarenog spoja.

Smanjenje žilavosti u ZUT-u je obično posljedica "transformacijskog otvrdnjavanja". Ovo nastaje, prije svega, zbog mikrostrukturnih transformacija $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. Priroda ovih transformacija ovisi o kemijskom sastavu čelika, maksimalnoj temperaturi i brzini hlađenja izraženom vremenom hlađenja između temperature 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$). Očekivane mikrostrukture mogu se predvidjeti iz poznatih dijagrama za određene čelike ili se u nekim slučajevima mogu i izračunati po određenim relacijama. Povećan porast zrna ukazuje na krhkost ove zone.

Na rezultate ispitivanja žilavosti ZUT-a ima presudan utjecaj položaj zarez, tako da rezultati mogu znatno rasipati i nisu dovoljno pouzdani. Potrebno je više pozornosti posvetiti ovom ispitivanju i dobro razmotriti strukture ZUT-a s obzirom na vrstu zavarivanog čelika, te precizno odrediti položaj zarez pri ispitivanju žilavosti ZUT-a.

Da bi se ovo izbjeglo kod realno zavarenih uzoraka svaki uzorak je nagrižen i poslije izrade zarezova oblikovala se proba za ispitivanje udarne radnje loma.

Krhkost u zoni utjecaja topline

Krhkim lomovima nazivamo one lomove, koji se dešavaju pri naprezanju ispod granice razvlačenja, a lomne površine su gotovo bez trajnih deformacija.

Krhki lom se širi bez plastične deformacije, brzinom približno jednakoj brzini zvuka u metalu [81]. Sklonost prema krhkom lomu obično se izražava prijelaznom temperaturom, tj. temperaturom kod koje žilavi lom prelazi u krhki. Prijelazna temperatura u krhko stanje mora biti niža od najniže eksploatacijske temperature konstrukcije. Krhki lom najčešće nastaje uzajamnim djelovanjem više čimbenika i to niske žilavosti na radnoj temperaturi konstrukcije naprezanja, te radnih i zaostalih naprezanja.

Na prijelaznu temperaturu utječu: kemijski sastav, toplinska obrada, veličina zrna i vrsta mikrostrukture [67]. Legirni elementi Mn i Ni do 2% snižavaju prijelaznu temperaturu, dok najveći broj drugih, uključujući i dušik, povisuje prijelaznu temperaturu.

Kod odgovornijih konstrukcija (mostova, brodova, posuda pod tlakom i dr.) nisu dovoljna samo dosad spomenuta saznanja, nego se koriste i saznanja mehanike loma.

Mehanika loma se između ostalog koristi za analizu uzroka lomova, kriterija prihvatljivosti grešaka, procjenu vijeka trajanja uz određenje uvjete eksploatacije, propisivanje osjetljivosti metoda kontrole, izbor tehnologije zavarivanja (parametara) i dr.

Kod debljih ili čvrstih materijala primjenjujemo linearno elastičnu mehaniku loma (faktor intenziteta naprezanja za slučaj otvaranja pukotine - K_I , lomna žilavost - K_{IC}).

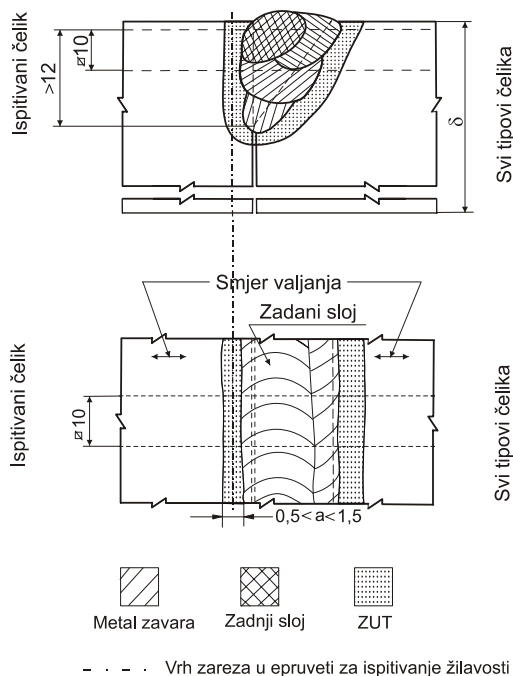
U slučaju pojave veće plastične zone uz vrh pukotine vrši se mjerenje otvaranja vrha pukotine (Crack Tip Opening Displacement) CTOD ili samo COD (Crack Opening Displacement).

Utjecaj položaja zarezova pri ispitivanju udarne radnje loma

Preduvjet za dobivanje vrijednosti energije loma u ZUT-u je obuhvaćanje jasno definiranog strukturnog područja. S obzirom na mogućnost usporedbe rezultata pokusa s osnovnim materijalom, treba zarezove za ispitivanje udarne radnje loma postaviti okomito na površinu lima. Zahtjev za taj položaj zarezova uvjetovan je zahtjevom da treba zavarivati u istom smjeru u kome se općenito šire pukotine koje ugrožavaju kompaktnost zavarenih spojeva. Opasnost dobivanja iskrivljenih rezultata ispitivanja zbog nehomogene strukture, je znatno niža nego kod ispitivanja sa zarezom postavljenim paralelno s površinom lima, a ti uvjeti postavljanja zarezova su i propisani normama [67].

U svrhu ispitivanja, zavareni spoj se izvodi nanošenjem dodatnog materijala u brižljivo kontroliranim uvjetima, u jednom ili više prolaza u asimetrični, jednostrano ili

dvostrano zakošen žlijeb (polu “V” ili “K”), kao što je prikazano na slici 6.12. Za zavare izvedene pod zaštitom troske koristi se “I” žlijeb.



Slika 6.12 Priprema žlijeba koja se preporuča za ispitivanje udarne radnje loma ZUT-a [82]

Položaj zavarenog spoja mora biti okomit na smjer valjanja lima. Penetracija pojedinih slojeva na vertikalnoj strani mora biti približno jednaka.

Svi slojevi u području ZUT-a koja se ispituje moraju biti izvedeni s jednakim unosom topline.

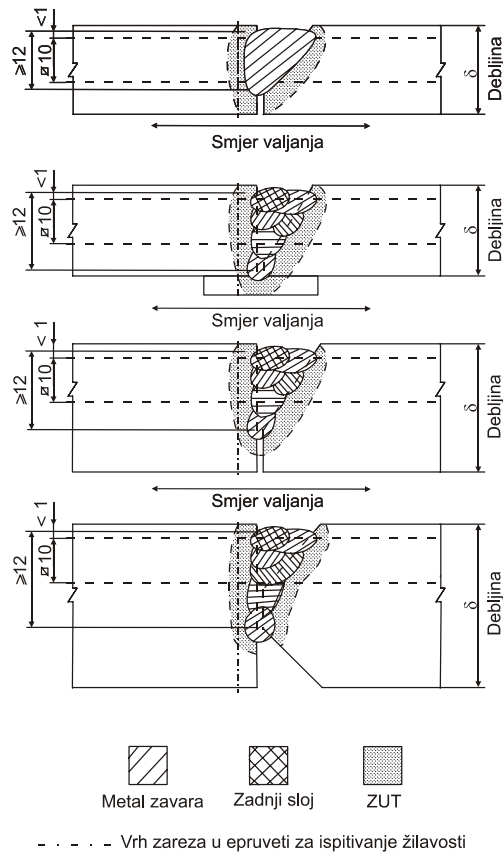
Dimenzije ispitne ploče moraju biti u razmjeru s količinom unesene topline.

Zavareni sklop mora biti toplinski izoliran da bi se postigla željena brzina hlađenja i da se izbjegnu toplinski gubici kroz potpore. Zavareni uzorak ne smije biti uklješten.

Moraju se izraditi četiri uzorka s različitim brzinama hlađenja u rasponu $800 - 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta t_{8/5}$). Duljinu zavara treba definirati tako da se dobiju brzine hlađenja i temperature međuslojeva koje reprezentiraju normalne uvjete hlađenja u stvarnoj konstrukciji.

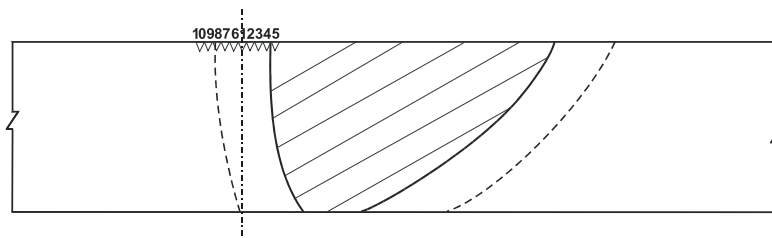
Minimalno treba obraditi četiri kompleta od po tri epruvete, sa zarezom okomitim na površinu komada.

Po preporuci vrh zarez zavarenog uzorka mora biti potpuno u ZUT-u, izvan metala zavara i na udaljenosti 0,5 i 1,5 mm od zone taljenja (slika 6.13.)



Slika 6.13 Položaj vrha zarez u epruveti za ispitivanje udarne radnje loma koji se preporuča [82].

Da bi se odredilo koje područje ZUT-a pokazuje najnižu energiju loma, određene su energije loma po presjeku ZUT-a. Probe su bile s "V" zarezom, pri čemu se varirala udaljenost zarez od linije taljenja. Pomak vrha zarez bio je po 0,5 mm ulijevo i u desno od linije koja pokazuje vrh zarez slika 6.14. Ispitano je deset epruveta za svaku vrijednost vremena hlađenja ($\Delta t_{8/5} = 5, 10, 25$ i 50 s) na temperaturi $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i to po pet sa svake strane linije.



Slika 6.14 Eksperimentalno određivanje vrha zarez s najnižom udarnom radnjom loma

Nakon određivanja najniže energije loma, uzimaju se daljnje probe, kako bi se odredila krivulja udarna radnja loma - temperatura ispitivanja i odredilo kritično područje zavara i ZUT-a. Ova krivulja pokazuje ponašanje udarne radnje loma najnepovoljnijeg područja zavarenog spoja kod zadanih parametara zavarivanja. Iz ove krivulje se mogu dobiti podaci kod koje temperature, kod postojećih parametara zavarivanja u kritičnom području zavarenog spoja, se može postići minimalna vrijednost energije loma i pod nepovoljnim uvjetima.

7. EKSPERIMENTALNI RAD

7.1. Simulirani zavarivački ciklus

7.1.1. Simulatori toplinskog ciklusa

Veliki napredak u razvoju metoda ispitivanja pojedinih svojstava zone utjecaja topline omogućila je pojava specijalno konstruiranih simulatora toplinskih ciklusa zavarivanja. Svaki ovaj uređaj ima svoje specifičnosti, ali u principu kod svih se u posebnoj komori u vakuumu ili inertnom plinu uzorci različitog oblika podvrgavaju toplinskom ciklusu. Pri tome se, ovisno od tipa uređaja mogu mjeriti, odnosno ispitivati [83]:

- utjecaj toplinskog ciklusa na mehanička svojstva
- hladne i tople pukotine
- utjecaj naknadne toplinske obrade
- prijelazne temperature krhkosti u zoni utjecaja topline
- naprezanje, dilatacija
- izrada dijagrama pretvorbe austenita i dr.

Za analizu kinetike faznih i strukturnih promjena u zoni utjecaja topline i kod simulatora koriste se principi dilatometrijske i diferencijalne toplinske analize. Međutim, za razliku od dilatometrijske metode i metode in situ, ovdje se mogu koristiti i uzorci većih dimenzija koji služe za ispitivanje mehaničkih svojstava zone utjecaja topline i drugih ispitivanja. Uređaji ove vrste su opremljeni računalima što u mnogome olakšava evidentiranje i obradu rezultata ispitivanja.

Ispitivanje ovisnosti tvrdoće i udarne radnje loma kritične zone u zavarenom spoju ovisno o vremenu hlađenja od 800 do 500 °C za sitnozrnati čelik TStE 420 provedeno je na simulatoru toplinskog ciklusa tipa Smitweld. Ovo ispitivanje često se koristi za ispitivanje zavarljivosti osnovnog materijala, jer su troškovi ispitivanja niži u odnosu na druge metode ispitivanja zavarljivosti, a može se ispitati utjecaj većeg broja varijabli na zavarljivost.

Pored ove metode postoji još nekoliko sličnih metoda koje služe za simulaciju ciklusa zavarivanja (na primjer Thermorestor, Gleeble), a pojedine institucije posjeduju simulatore koje su sami projektirali kao što je Instytut iz Gliwica, Poljska [72].

Simulator toplinskog ciklusa tipa " TCS 1405 Smitweld "

Simulator toplinskog ciklusa sastoji se od dva osnovna sustava:

- sustav zagrijavanja i hlađenja
- kontrolni sustav.

Može se koristiti za široko područje metalurških istraživanja vezanih za zavarivanje i toplinsku obradu.

Sustav za zagrijavanje i hlađenje ima takve karakteristike da omogućava ostvarivanje odabranog vremena hlađenja u uskim granicama.

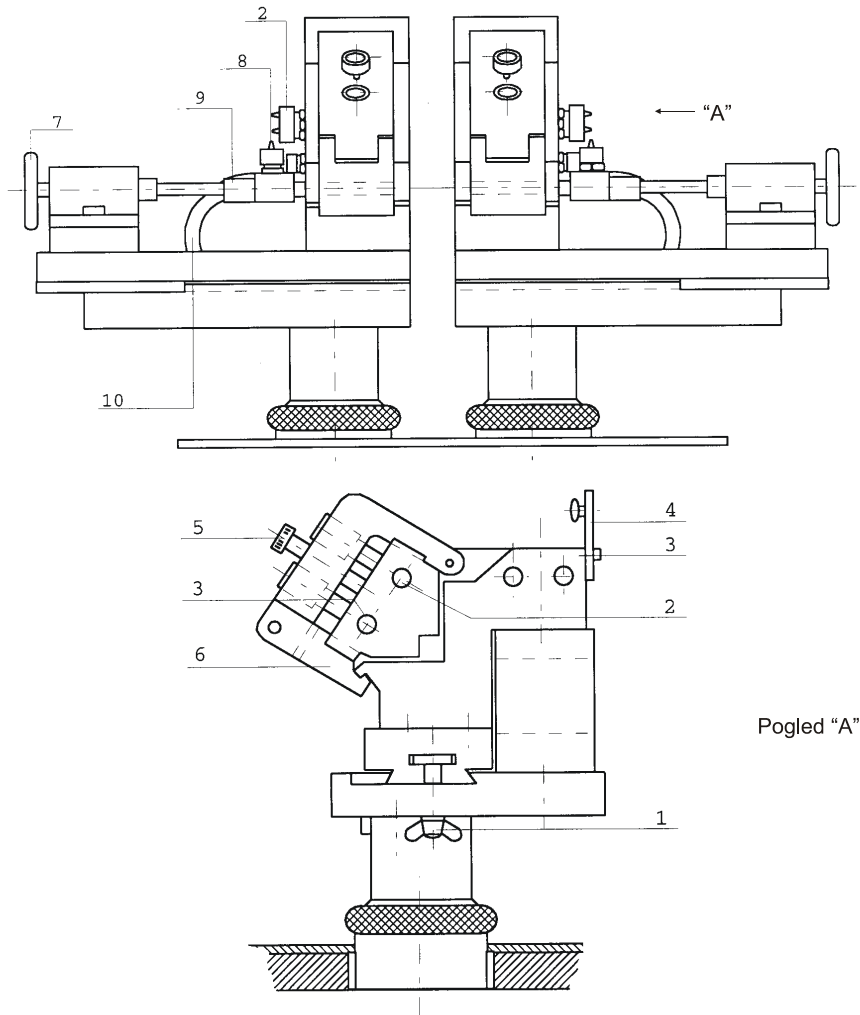
Najvažnija funkcija kontrolnog sustava je da uspoređuje izlaz termo-pare na epruveti sa zadanim temperatura-vrijeme ciklusom. Kompjutorizacija kontrolnog sustava omogućuje promjene u ciklusu temperatura-vrijeme u realnim uvjetima postrojenja.

Faktori ograničenja su maksimalna snaga uređaja (područje zagrijavanja) i maksimalna vrijednost brzine hlađenja.

Na slici 7.1. prikazan je simulator toplinskog ciklusa TCS 1405 Smitweld u kome se provodi zagrijavanje i hlađenje epruveta, a na slici 7.2. je prikazan kompletan uređaj za simuliranje.

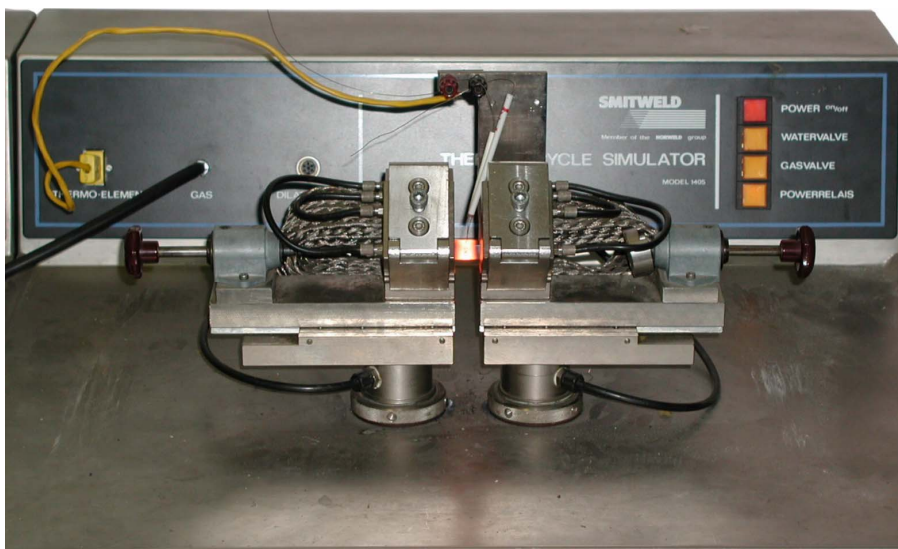
Na uređaju je moguća i simulacija toplinskog ciklusa u zaštitnoj atmosferi (argon, helij i dr.).

Oprema se priključuje na napon od 380 V i struju frekvencije 50 Hz. Za hlađenje epruvete potreban je priključak na vodovodnu mrežu, a može se koristiti voda manje kvalitete.



1. Temeljni vijak s maticom
2. Priklučci za cijevi za indirektno hlađenje
3. Kanali za protok vode za indirektno hlađenje
4. Nosač dilatometra i mjerača temperature
5. Temeljni vijak za čeljusti
6. Blok čeljusti za učvršćenje
7. Vijak za stezanje kod primjene direktnog hlađenja
8. Priklučci za cijevi za direktno hlađenje
9. Blok za direktno hlađenje
10. Kabel za struju

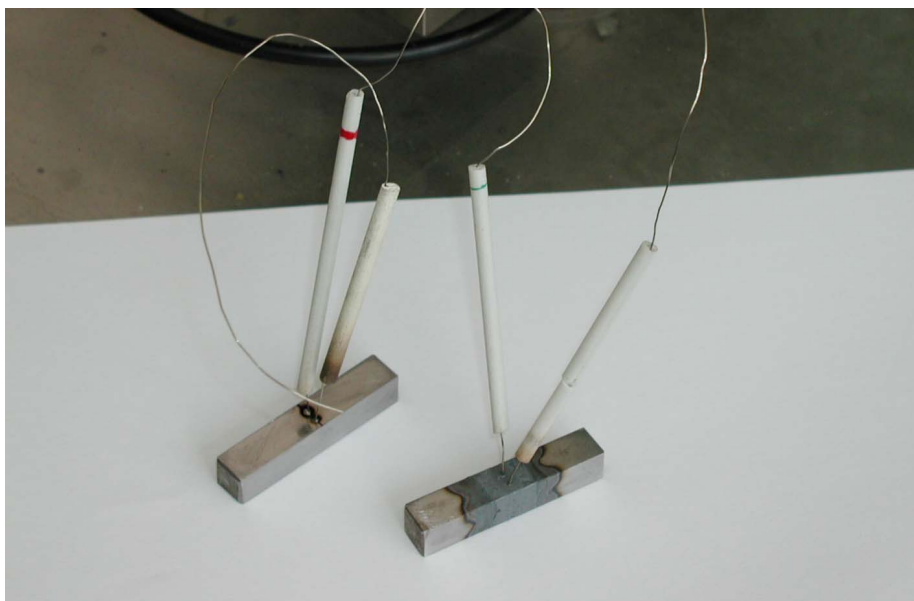
Slika 7.1. Shematski prikaz simulatora toplinskog ciklusa TCS 1405 Smitweld [84].



Slika 7.2. Uređaj za simuliranje uzoraka.

Personalno računalo korišteno u sklopu sistema za ispitivanje je priključeno na napon od 220 V, a ima izlaze za printer, ploter, simulator toplinskog ciklusa i dva priključka za vlačno-tlačnu jedinicu.

Epruveta za ispitivanje simulacijom toplinskog ciklusa prikazana je na slici 7.3.



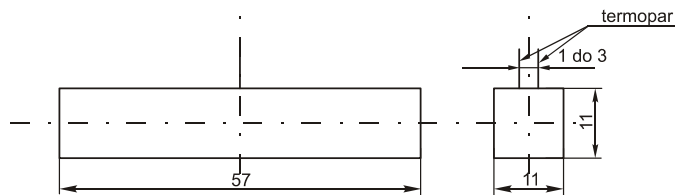
Slika 7.3. Epruveta za ispitivanje simulacijom toplinskog ciklusa prije i nakon simuliranja toplinskog ciklusa zavarivanja.

Zbog osjetljivosti elektroda za zagrijavanje u svrhu izbjegavanja iskrenja između kontaktne elektrode i površine, epruveta za ispitivanje mora biti polirana. Taj zahtjev je tim jače naglašen ukoliko se želi snimiti dijagram dilatacije. Epruveta za ispitivanje je dimenzija 57x11x11 mm, a moguće je koristiti i epruvete drugih dimenzija. Moguća su dva načina hlađenja epruvete za vrijeme ispitivanja i to:

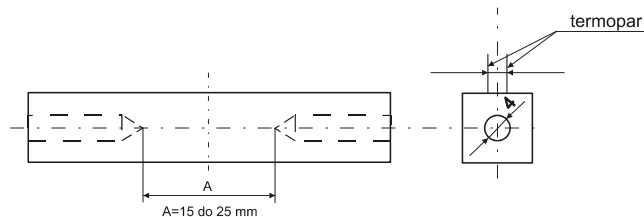
- direktno hlađenje
- indirektno hlađenje.

Da li će se rabiti indirektno ili i indirektno i direktno hlađenje zajedno, ovisi o zadanom vremenu hlađenja. Za veće brzine hlađenja tj. za kraće vrijeme hlađenja, primjenjuje se direktno i indirektno hlađenje zajedno. Indirektno se hlađenje ostvaruje preko vodom hlađenih čeljusti-elektroda, a direktno kroz prethodno izbušene provrte promjera 4 mm s oba čela epruvete, duljine 15 do 25 mm.

Na slikama 7.4. i 7.5. su prikazane dimenzije epruveta za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje i indirektno i direktno hlađenje.



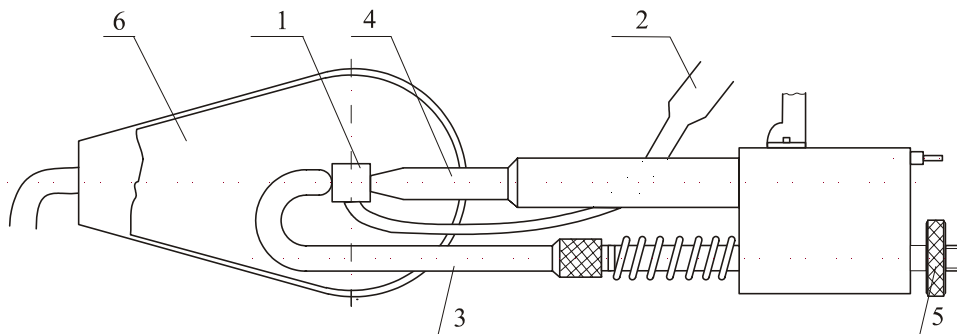
Slika 7.4. Dimenzije epruvete za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje indirektno hlađenje [60].



Slika 7.5. Dimenzije epruvete za ispitivanje na simulatoru toplinskog ciklusa kada se primjenjuje indirektno i direktno hlađenje [60].

Promjena temperature za vrijeme ispitivanja registrira se preko termopara postavljenog na površinu epruvete.

Postavljanje termopara prikazano je na slici 7.6.



1 – epruveta, 2 – termopar, 3 - nepomični senzor dilatometra, 4 – pomični senzor dilatometra, 5 – mikrometerski vijak za pridržavanje dilatometra, 6 – jedinica plinske zaštite

Slika 7.6 Položaj dilatometra, termopara i jedinice plinske zaštite u odnosu na epruvetu za ispitivanje [83].

Termo-parovi se postavljaju na sredini epruvete gledajući po uzdužnoj simetriji. Nakon toga epruveta se postavlja na donji nepomični dio uređaja, a zatim se steže preko steznih čeljusti-elektroda. Udaljenost steznih čeljusti u horizontalnoj ravnini iznosi 10 do 25 mm, ovisno o brzini hlađenja.

Da bi se spriječio utjecaj okoline može se simulacija provoditi u zaštiti inertnog plina, na primjer argona. Pri ispitivanju se koristi argon čistoće 99.9 %, a protočna količina je 10 l/min.

Pri mjerenju dilatacije za vrijeme toplinskog ciklusa koristi se dilatometar prikazan na slici 7.6.

Sastoji se od dva kvarcna senzora od kojih je jedan pomičan i daje signal o promjeni dimenzija epruvete. Postavlja se na sredinu epruvete gledano na uzdužnu os epruvete.

7.1.2. Plan pokusa

Za ispitivanje na simulatoru priređeno je 300 proba dimenzija 57x11x11 mm, od materijala TStE 420. Probe su izrezivane u pravcu valjanja osnovnog materijala. Na svakoj ploči iz koje su izrezivani uzorci provjeren je smjer vlakana pri valjanju. Debljina osnovnog materijala bila je 15 mm.

Predviđeno je ispitivanje tvrdoće i žilavosti simuliranih uzoraka. Ovim ispitivanjem se želi pokazati ovisnost tvrdoće i udarne radnje loma o brzini hlađenja $w_{8/5}$ tj. vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ za najkritičniju zonu zavarenog spoja koja se nalazi uz liniju staljivanja.

Podaci o sadržaju kemijskih elemenata kod ovog čelika prikazani su u tablici broj 6.1, dok su podaci o mehaničkim svojstvima prikazani u tablici 6.2. Pored standardom propisanih vrijednosti sadržaja kemijskih elemenata i mehaničkih svojstava kod

pojednog čelika, u tablici 6.1 i 6.2 prikazane su i vrijednosti dobivene pri ispitivanjima u sklopu istraživanja koje je provedeno.

Prvi pokus simuliranja se sastojao u simuliranju zavarivačkog toplinskog ciklusa u jednom prolazu i dva prolaza. Pri simuliranju u jednom prolazu uzorci su zagrijavani na različite temperature (600, 700, 780, 960, 1100 i 1350 °C), a nakon toga uzorci su hlađeni na zraku. Kako su neki uzorci zagrijavani na temperaturu nižu od 800 °C nije se moglo mjeriti vrijeme hlađenja od 800 do 500 °C, nego se mjerilo vrijeme hlađenja 500 do 300 °C ($\Delta t_{5/3}$).

Parametri simuliranja u jednom prolazu prikazani su u tablici 7.1 Svrha eksperimenta je utvrđivanje promjene strukture nastale usljed zagrijavanja i uvid u promjene tvrdoće.

Tablica 7.1 Parametri simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u jednom prolazu

OZNAKA PROBE	T_{max} , °C	$v_{zg.}$, °C/s	Zadržavanje na T_{max} , s	Vrijeme hlađenja, s	T_z , °C
600	601	200	3	$\Delta t_{5/3}=10,6$	< 150
700	703	200	3	$\Delta t_{5/3}=10,3$	< 150
780	795	200	3	$\Delta t_{5/3}=9,8$	< 150
960	970	200	3	$\Delta t_{8/5}=10,4$	< 150
1100	1109	200	3	$\Delta t_{8/5}=10,5$	< 150
1350	1366	200	3	$\Delta t_{8/5}=9,6$	< 150

gdje je:

$v_{zg.}$ - brzina zagrijavanja, °C/s

T_z - izmjerena temperatura na kraju mjerenja ciklusa zavarivanja, °C

T_{max} - maksimalna temperatura toplinskog ciklusa °C

$\Delta t_{5/3}$ – vrijeme hlađenja od 500 do 300 °C

Pri simuliranju u dva prolaza, probe su označavane brojem koji predstavlja temperaturu zagrijavanja, a za svaku temperaturu su načinjena po tri uzorka. Brzina zagrijavanja uzoraka je bila 200 °C/s.

U tablici 7.2. prikazani su parametri simuliranja uzoraka u dva prolaza (prvi pokus).

Tablici 7.2. Parametri simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza.

OZNAKA PROBE	T_{max} °C I ciklus	$\Delta t_{5/3}$ I ili $\Delta t_{8/5}$ I, s	T_{max} °C II ciklus	$\Delta t_{5/3}$ II ili $\Delta t_{8/5}$ II, s	$v_{zg.}$ °C/s	Zadržavanje na T_{max} , s	T_z , °C
600-1	1357	$\Delta t_{5/3}=9,4$	604	$\Delta t_{5/3}=10,8$	200	3	< 150
600-2	1365	$\Delta t_{5/3}=10,0$	606	$\Delta t_{5/3}=10,8$	200	3	< 150
600-3	1359	$\Delta t_{5/3}=9,9$	601	$\Delta t_{5/3}=10,8$	200	3	< 150
700-1	1358	$\Delta t_{5/3}=9,4$	713	$\Delta t_{5/3}=10,4$	200	3	< 150
700-2	1360	$\Delta t_{5/3}=9,8$	710	$\Delta t_{5/3}=10,4$	200	3	< 150
700-3	1366	$\Delta t_{5/3}=9,8$	708	$\Delta t_{5/3}=10,5$	200	3	< 150
780-1	1355	$\Delta t_{5/3}=10,2$	794	$\Delta t_{5/3}=10,4$	200	3	< 150
780-2	1360	$\Delta t_{5/3}=9,9$	800	$\Delta t_{5/3}=10,3$	200	3	< 150
780-3	1380	$\Delta t_{5/3}=9,7$	796	$\Delta t_{5/3}=10,3$	200	3	< 150
960-1	1356	$\Delta t_{8/5}=10,0$	980	$\Delta t_{8/5}=10,7$	200	3	< 150
960-2	1367	$\Delta t_{8/5}=10,0$	971	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
960-3	1362	$\Delta t_{8/5}=9,6$	993	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
1100-1	1365	$\Delta t_{8/5}=9,5$	1148	$\Delta t_{8/5}=10,4$	200	3	< 150
1100-2	1357	$\Delta t_{8/5}=9,4$	1118	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
1100-3	1361	$\Delta t_{8/5}=9,8$	1118	$\Delta t_{8/5}=10,4$	200	3	< 150
1350-1	1357	$\Delta t_{8/5}=9,4$	1372	$\Delta t_{8/5}=10,6$	200	3	< 150
1350-2	1356	$\Delta t_{8/5}=9,8$	1386	$\Delta t_{8/5}=10,2$	200	3	< 150
1350-3	1357	$\Delta t_{8/5}=9,8$	1412	$\Delta t_{8/5}=9,6$	200	3	< 150

Drugi pokus simuliranja obavljen je na uzorcima s držanjem na temperaturi austenitizacije $T_{max} \approx 1350$ °C, 3 s, a nakon toga uzorci su hlađeni. Ovdje se radilo o jednostrukom ciklusu simuliranja. Ovim pokusom simuliranja dobivene su niske vrijednosti udarne radnje loma.

Treći pokus simuliranja obavljen je na uzorcima bez držanja na temperaturi austenitizacije. Hlađenje je bilo uvjetovano propisanim vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}$, tj. brzinom hlađenja $w_{8/5}$.

Kako se tijekom eksperimentalnog istraživanja na simuliranim uzorcima pojavljuje veći broj ispitnih uzoraka, služilo se sljedećom shemom označavanja:

S - uzorci simulirani na simulatoru tipa Smitweld

Prvi broj označava temperaturu na kojoj se ispituje žilavost

- 1 - sobna temperatura (20 °C)
- 2 - temperatura (0 °C)
- 3 - temperatura (-20 °C)
- 4 - temperatura (-40 °C)
- 5 - temperatura (-60 °C)

Drugi broj označava vrijeme hlađenja 800 °C do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) tj. brzinu hlađenja 800 do 500 ° ($w_{8/5}$).

0 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 5$ s

1 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 10$ s

2 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 25$ s

3 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 50$ s

Zadnja brojičana oznaka označava redni broj uzorka.

Primjer:

Uzorak **S 101** – uzorak simuliran na simulatoru toplinskog ciklusa, udarna radnja loma ispitivana na sobnoj temperaturi, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5$ s, a redni broj uzorka kod ovog vremena hlađenja je 1.

Uzorak **S 434** – uzorak simuliran na simulatoru toplinskog ciklusa, udarna radnja loma ispitivana na temperaturi -40 °C, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s, a redni broj uzorka kod ovog vremena hlađenja je 4.

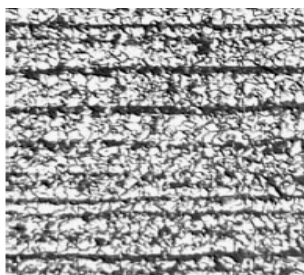
U tablici 7.3 prikazani su parametri simuliranja za treći pokus.

Tablica 7.3 Parametri simuliranja zavarivačkog toplinskog ciklusa bez držanja uzorka na temperaturi austenitizacije.

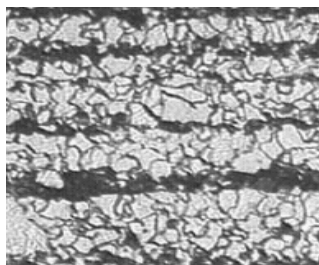
REDNI BROJ	OZNAKA PROBE	T_{max} °C	$\Delta t_{8/5}$, s	T_z °C	REDNI BROJ	OZNAKA PROBE	T_{max} °C	$\Delta t_{8/5}$, s	T_z °C
1	S 101	1341	5,0	< 130	41	S 121	1354	25,6	< 150
2	S 102	1344	5,2	< 130	42	S 122	1355	25,4	< 150
3	S 103	1351	5,0	< 130	43	S 123	1355	25,0	< 150
4	S 104	1344	4,8	< 130	44	S 124	1354	25,4	< 150
5	S 201	1343	5,2	< 135	45	S 221	1358	25,6	< 145
6	S 202	1340	5,0	< 135	46	S 222	1358	25,5	< 145
7	S 203	1351	5,0	< 135	47	S 223	1368	25,6	< 145
8	S 204	1339	5,0	< 135	48	S 224	1355	25,6	< 145
9	S 301	1344	5,0	< 135	49	S 321	1363	25,6	< 145
10	S 302	1349	5,0	< 135	50	S 322	1374	25,6	< 145
11	S 303	1349	5,1	< 135	51	S 323	1369	25,1	< 145
12	S 304	1367	5,0	< 135	52	S 324	1357	25,6	< 145
13	S 401	1341	4,9	< 137	53	S 421	1357	25,6	< 145
14	S 402	1352	5,0	< 137	54	S 422	1353	25,6	< 145
15	S 403	1348	5,0	< 137	55	S 423	1358	25,6	< 145
16	S 404	1342	5,0	< 137	56	S 424	1356	25,3	< 145
17	S 501	1349	5,1	< 137	57	S 521	1360	25,6	< 125
18	S 502	1348	4,9	< 137	58	S 522	1380	25,6	< 143
19	S 503	1349	5,0	< 137	59	S 523	1381	25,8	< 131
20	S 504	1351	5,0	< 137	60	S 524	1379	25,7	< 143
21	S 111	1363	10,0	< 137	61	S 131	1350	51,2	< 160
22	S 112	1360	9,9	< 137	62	S 132	1355	50,8	< 160
23	S 113	1358	10,0	< 137	63	S 133	1351	50,8	< 160
24	S 114	1363	10,1	< 137	64	S 134	1350	50,7	< 160
25	S 211	1363	10,1	< 137	65	S 231	1357	51,0	< 160
26	S 212	1359	9,6	< 137	66	S 232	1355	51,4	< 160
27	S 213	1370	10,2	< 137	67	S 233	1352	50,8	< 160
28	S 214	1365	10,1	< 137	68	S 234	1351	50,6	< 160
29	S 311	1371	9,6	< 135	69	S 331	1356	51,0	< 160
30	S 312	1378	9,6	< 135	70	S 332	1352	51,0	< 160
31	S 313	1361	9,7	< 135	71	S 333	1352	51,0	< 160
32	S 314	1360	9,8	< 135	72	S 334	1351	51,0	< 160
33	S 411	1371	10,2	< 135	73	S 431	1352	51,0	< 160
34	S 412	1371	10,2	< 135	74	S 432	1351	51,2	< 160
35	S 413	1357	10,0	< 135	75	S 433	1360	50,8	< 160
38	S 414	1355	10,1	< 137	76	S 434	1355	50,7	< 160
36	S 511	1355	10,2	< 135	77	S 531	1351	51,0	< 156
39	S 512	1355	10,2	< 135	78	S 532	1351	51,0	< 156
37	S 513	1359	9,9	< 136	79	S 533	1352	50,9	< 156
40	S 514	1359	9,9	< 136	80	S 534	1352	50,9	< 156

7.1.3. Rezultati prvog pokusa simuliranja

Nakon pripreme i poliranja uzoraka snimljene su mikrostrukture pri povećanju 100 i 200 puta. Mikrostrukture su prikazane na slikama 7.7, 7.8 i 7.9.

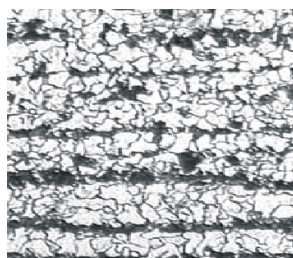
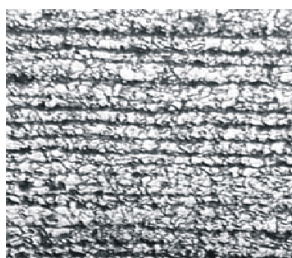


povećanje 100x

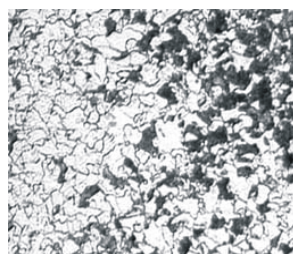
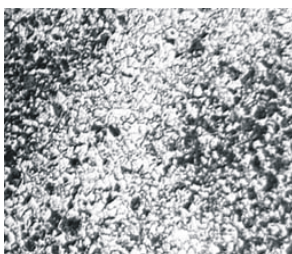


povećanje 200x

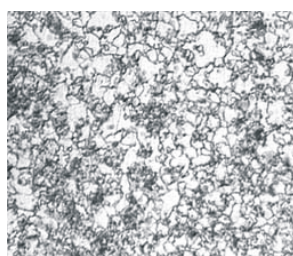
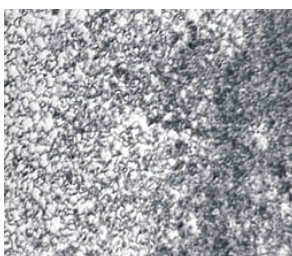
Slika 7.7 Struktura čelika TStE 420 prije simulacije procesa zavarivanja
povećanje 100x povećanje 200x



Maksimalna temperatura toplinskog ciklusa 600 °C



Maksimalna temperatura toplinskog ciklusa 700 °C



Maksimalna temperatura toplinskog ciklusa 780 °C

Slika 7.8 Struktura čelika TStE 420 nakon simulacije procesa zavarivanja
(temperatura zagrijavanja 600, 700 i 780 °C)

Struktura čelika TStE 420 prije simulacije procesa zavarivanja je sitnozrnata feritno-perlitna koja je trakasta kao posljedica završne obrade valjanjem. Na uzorku koji je zagrijavan do 600 °C nije došlo do značajnih promjena u strukturi. Pri temperaturi zagrijavanja na 700 °C došlo je do povećanja zrna i početka raspada perlitne faze. Pri ispitivanju je uočeno da se izdvajaju precipitati. Zbog toga dolazi do porasta tvrdoće. Na uzorku koji je zagrijavan na 780 °C došlo je do disperzije precipitata u feritnoj matrici uz daljnji porast tvrdoće, a na temperaturi 960 °C dolazi do usitnjavanja zrna uz ravnomjerniju raspodjelu precipitata. Kod uzoraka zagrijvanih na više temperature (1100 i 1350 °C) dolazi do strukturne transformacije u bainitno-troostitnu strukturu nastalu utjecajem topline. Takva struktura uvjetuje još veći porast tvrdoće.

Dijagrami ovisnosti temperature zagrijavanja o vremenu hlađenja za svaki simulirani uzorak nalaze se u prilogu br. 1.

Nakon pripreme uzoraka izvršeno je mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom (HV10). Mjesto mjerenja prikazano je na slici 6.8 a.

Mjerenje je vršeno po 8 puta za svaki uzorak i izračunata je srednja vrijednost tvrdoće. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 7.4.

Tablica 7.4. Izmjerene tvrdoće uzoraka – Vickers metoda

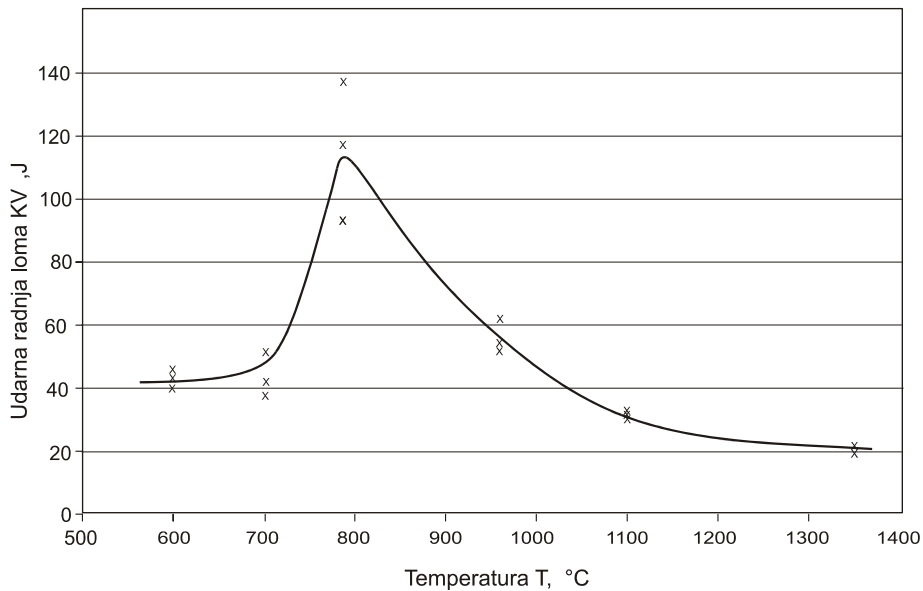
OZNAKA PROBE	TVRDOĆA HV10								
	Mjerenje								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Srednja tvrdoća
20-1	176	178	180	179	177	178	179	178	178
600-1	305	309	299	305	311	300	301	306	304
700-1	297	281	285	308	306	290	304	298	296
780-1	279	295	294	299	302	285	289	286	291
960-1	272	261	254	304	303	267	271	263	274
1100-1	304	308	309	333	326	310	303	313	313
1350-1	352	355	354	357	361	349	343	340	351

Također je vršeno mjerenje udarne radnje loma na simuliranim uzorcima iz ovog pokusa na temperaturi 20 °C. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 7.5.

Tablica 7.5 Vrijednosti udarne radnje loma kod dvostrukog simuliranja.

OZNAKA PROBE	Temperatura mjerenja, °C	Udarne radnje loma, J
600-1	20	47,5
600-2	20	48
600-3	20	40
700-1	20	39
700-2	20	52
700-3	20	43
780-1	20	93
780-2	20	136
780-3	20	119
960-1	20	53
960-2	20	51
960-3	20	50
1100-1	20	35
1100-2	20	35
1100-3	20	32
1350-1	20	22
1350-2	20	22
1350-3	20	20

Dijagram ovisnosti udarne radnje loma kod dvostrukog simuliranja o T_{max} drugog ciklusa simuliranja prikazan je na slici br. 7.10.

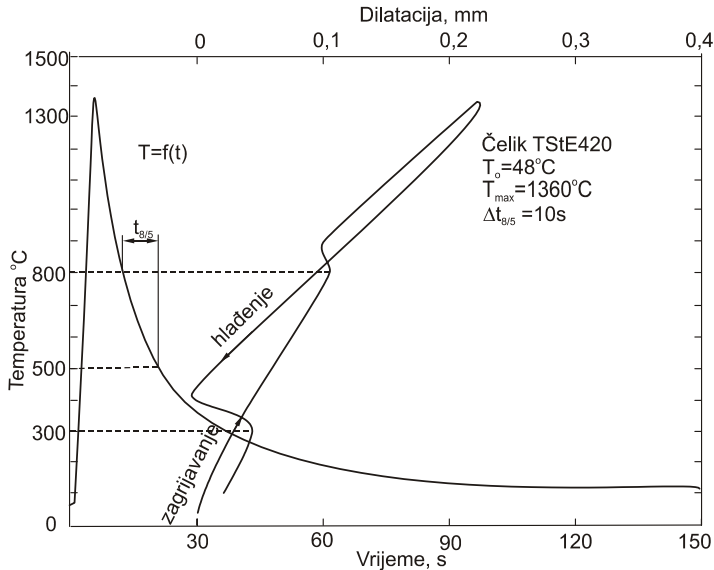


Slika 7.10 Dijagram ovisnosti udarne radnje loma o T_{max} drugog ciklusa simuliranja

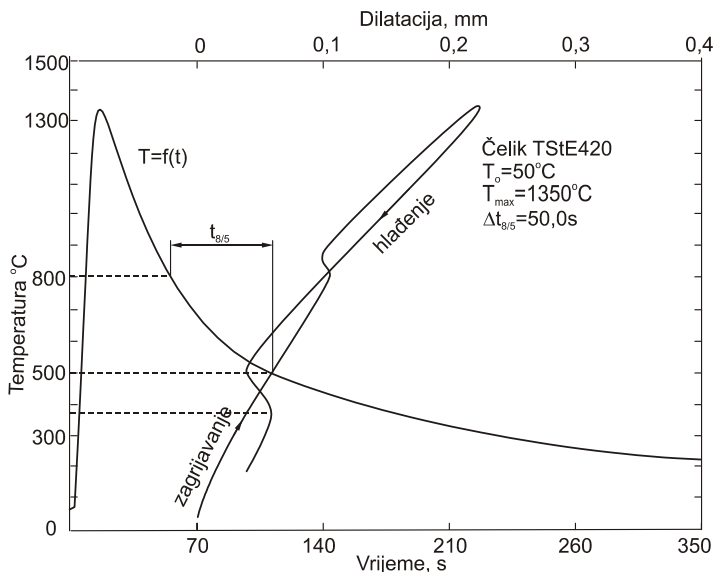
Iz dijagrama je vidljivo da su maksimalne vrijednosti udarne radnje loma dobivene kada je T_{max} drugog ciklusa simuliranja iznosila 780 °C.

7.1.4. Dobiveni rezultati mjerenja tvrdoće simuliranih uzoraka u drugom pokusu

Jednoprolazni grubozrnati ZUT dobiven je na simulatoru toplinskog ciklusa za brzine hlađenja tj. vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5, 10, 25$ i 50 s. Primjer ovakvog načina hlađenja s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10$ s prikazan je na slici 7.11, a za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s na slici 7.12.



Slika 7.11 Dijagram simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja na simulatoru Smitweld TCS 1405 s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10$ s.



Slika 7.12 Dijagram simulacije toplinskog ciklusa zavarivanja na simulatoru Smitweld TCS 1405 sa vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s.

Mjesta mjerenja tvrdoće na simuliranim uzorcima u trećem pokusu bila su identična mjestima u prvom pokusu, s tim da je mjerena tvrdoća na uzorcima s vremenima hlađenja $\Delta t_{8/5}=5, 10, 25$ i 50 s. Također, je mjerena tvrdoća i po presjeku spoja, kako je prikazano na slici 6.8 b.

Mjerenje je vršeno po 8 puta za svaki uzorak konturnom metodom prema slici 7.13 i 10 puta po presjeku simuliranog uzorka prema slici 6.8b, te je izračunata i srednja vrijednost tvrdoće pri mjerenju konturnom metodom.

Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 7.6 i 7.7.

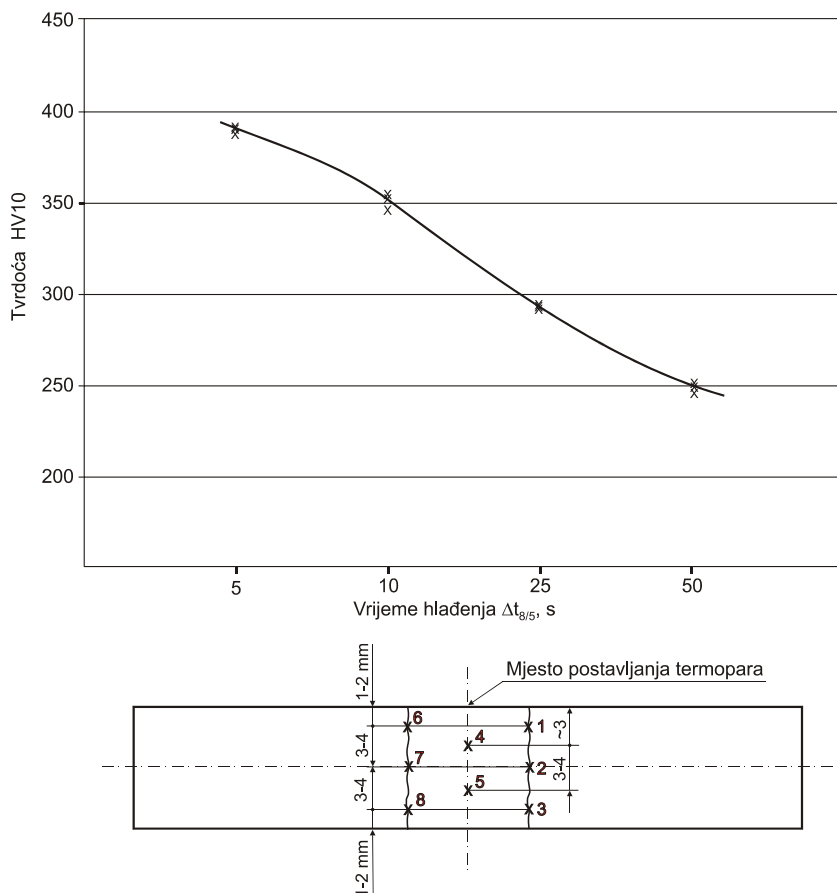
Tablica 7.6. Izmjerene tvrdoće uzoraka u trećem pokusu (jednostruko simuliranje $T_{max} \approx 1350$ °C - prema slici 7.13) – konturna metoda

OZNAKA PROBE	TVRDOĆA HV10								
	Mjerenje								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Srednja tvrdoća
S 101	380	381	367	393	401	369	361	359	376
S 102	373	361	363	388	391	365	355	354	369
S 103	375	377	369	388	394	366	353	356	372
S 111	348	346	343	389	391	343	341	339	357
S 112	340	339	334	380	378	334	333	331	346
S 113	328	329	340	382	388	353	343	342	351
S 121	279	283	281	300	302	287	280	284	287
S 122	281	285	285	299	306	283	281	281	288
S 123	279	280	283	300	303	280	281	279	286
S 131	245	247	253	270	269	243	249	241	252
S 132	249	244	250	256	258	245	244	248	249
S 133	243	247	250	259	261	244	247	249	250

Tvrdoće prikazane u tablici 7.6 pokazuju da s povećanjem vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ dolazi do pada tvrdoće, tako da prosječna tvrdoća na uzorcima hlađenim s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}= 50$ s iznosi 66% vrijednosti tvrdoće izmjerene na uzorcima hlađenim s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}= 5$ s.

Maksimalne vrijednosti tvrdoće u ZUT-u su bile oko 400 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}= 5$ s, 390 HV kod vremena $\Delta t_{8/5}= 10$ s, 300 kod vremena $\Delta t_{8/5}= 25$ s i oko 260 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}= 50$ s.

Ovisnost srednje vrijednosti izmjerene tvrdoće HV10 o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$, tj. o brzini hlađenja prikazana je na slici 7.13.

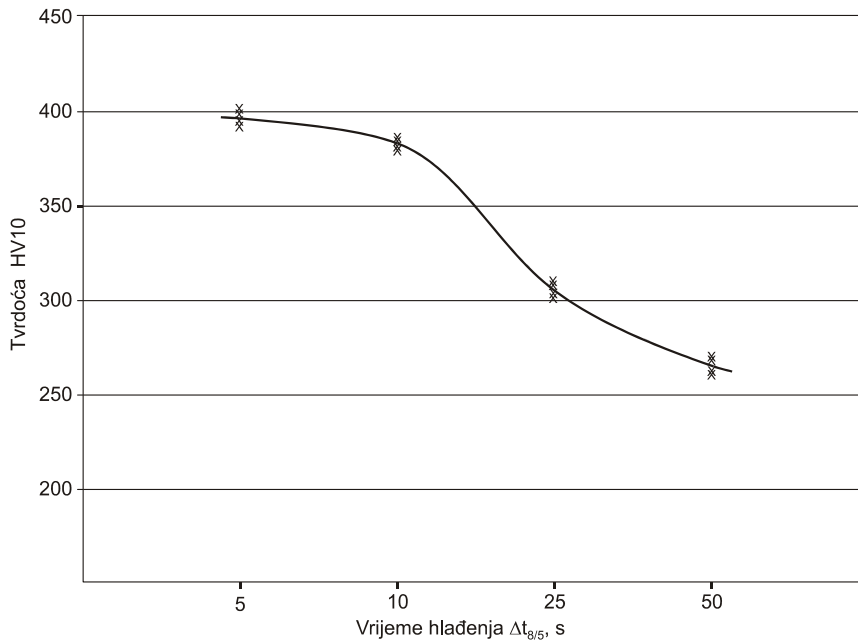


Slika 7.13 Ovisnost tvrdoće o vremenu hlađenja 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) – mjerenje tvrdoće konturnom metodom (tablica 7.6)

Tablica 7.7. Izmjerene tvrdoće uzoraka u trećem pokusu (jednostruko simuliranje $T_{max} \approx 1350$ °C - prema slici 6.8 b) – tvrdoće mjerene po presjeku

OZNAKA PROBE	TVRDOĆA HV10									
	Mjerenje									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Udaljenost mm	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
S 501	183	179	312	367	390	397	345	297	179	179
S 502	181	182	303	355	393	401	358	305	181	183
S 503	180	178	308	351	398	417	349	310	180	178
S 511	177	177	253	343	383	376	341	279	183	181
S 512	181	183	249	331	380	394	342	266	179	183
S 513	180	179	260	339	388	391	335	259	183	180
S 521	179	179	221	264	312	306	254	230	179	179
S 522	180	178	229	271	308	313	259	233	183	180
S 523	178	177	231	279	302	300	263	227	177	180
S 531	179	183	221	244	251	255	236	221	177	177
S 532	183	180	225	247	259	261	243	223	181	183
S 533	177	180	219	241	261	263	239	220	180	179

Ovisnost srednje vrijednosti izmjerene tvrdoće HV10 po presjeku u ZUT-u o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$, tj. o brzini hlađenja prikazana je na slici 7.14.



Slika 7.14. Ovisnost tvrdoće o vremenu hlađenja 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) – mjerenje tvrdoće po presjeku (tablica 7.7 - mjerenje br.5 i 6)

Tvrdoće mjerene po presjeku i prikazane u tablici 7.7 pokazuju da s povećanjem vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ dolazi do pada tvrdoće u ZUT-u, tako da prosječna tvrdoća u ZUT-u na uzorcima hlađenim s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s iznosi 65% vrijednosti tvrdoće izmjerene na uzorcima hlađenim s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5$ s.

Maksimalne vrijednosti tvrdoće u ZUT-u su bile oko 417 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5$ s, 394 HV kod vremena $\Delta t_{8/5} = 10$ s, 310 kod vremena $\Delta t_{8/5} = 25$ s i oko 260 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s.

U prilogu 2 prikazane su izmjerene vrijednosti tvrdoća konturnom metodom HV5, HV10 i HV30 na simuliranim uzorcima u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$, a također je dan dijagramski prikaz izmjerenih tvrdoća i njihova usporedba.

7.1.5. Dobiveni rezultati ispitivanja žilavosti simuliranih uzoraka

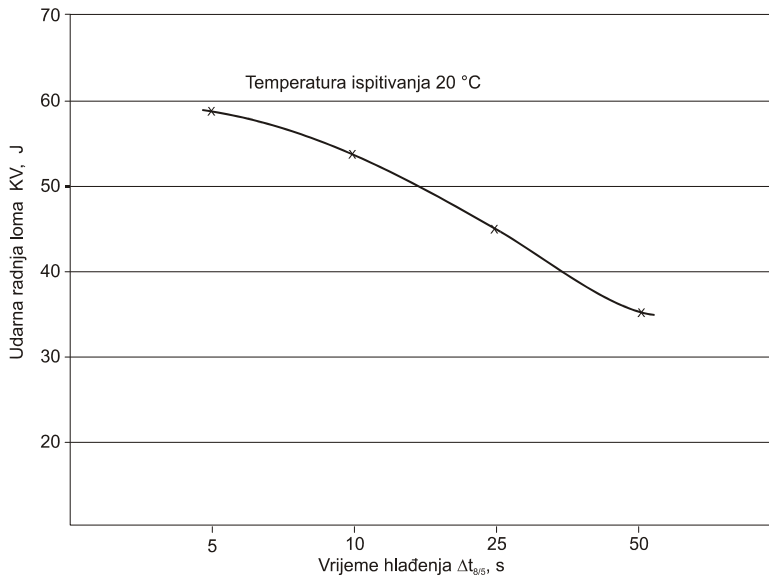
Udarna radnja loma na uzorcima zavarenim simuliranim ciklusom zavarivanja ispitivana je po Charpy-ju, na temperaturama 20 °C; 0 °C; -20 °C; -40 °C i -60 °C. Rezultati ispitivanja za uzorke S (uzorci simulirani na simulatoru tipa Smitweld bez držanja na temperaturi austenitizacije) prikazani su u tablici 7.8.

Tablica 7.8 Vrijednosti udarne radnje loma dobivene pri ispitivanju simuliranih uzoraka na različitim temperaturama.

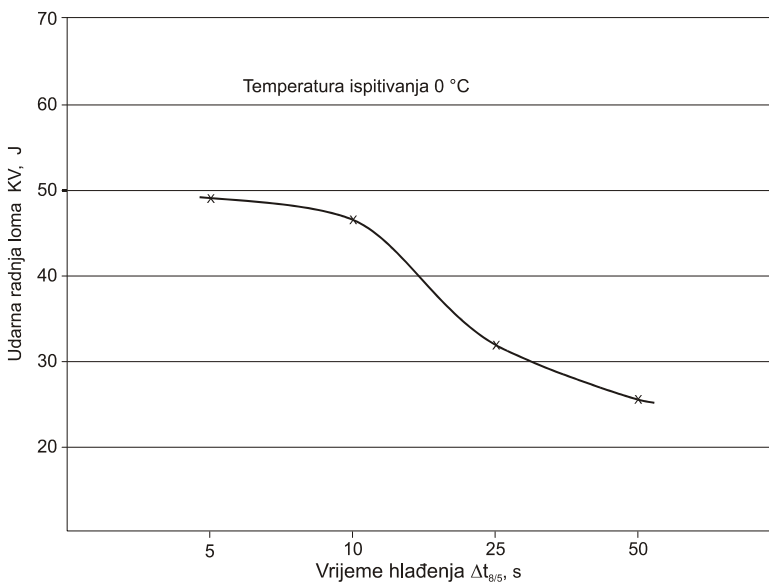
Br.probe	Oznaka	$\Delta t_{8/5}$, s	KV, J	Temperatura ispitivanja, °C
1	S 101	5	59,0	20
3	S 102	5	58,0	20
2	S 103	5	61,0	20
4	S 104	5	56,0	20
5	S 201	5	49,0	0
6	S 202	5	47,0	0
7	S 203	5	45,0	0
8	S 204	5	52,0	0
9	S 301	5	38,0	-20
10	S 302	5	37,0	-20
11	S 303	5	41,0	-20
12	S 304	5	49,0	-20
13	S 401	5	36,0	-40
14	S 402	5	33,5	-40
15	S 403	5	32,0	-40
16	S 404	5	35,0	-40
17	S 501	5	14,0	-60
18	S 502	5	18,0	-60
19	S 503	5	15,0	-60
20	S 504	5	13,0	-60
21	S 111	10	57,0	20
22	S 112	10	48,0	20
23	S 113	10	52,0	20
24	S 114	10	55,0	20
25	S 211	10	47,0	0
26	S 212	10	45,0	0
27	S 213	10	49,0	0
28	S 214	10	46,5	0
29	S 311	10	36,0	-20
30	S 312	10	40,0	-20
31	S 313	10	44,0	-20
32	S 314	10	39,0	-20
33	S 411	10	32,0	-40
34	S 412	10	34,0	-40
35	S 413	10	30,0	-40
36	S 414	10	32,0	-40
37	S 511	10	16,0	-60
38	S 512	10	13,0	-60
39	S 513	10	15,0	-60
40	S 514	10	12,0	-60

Br.probe	Oznaka	$\Delta t_{8/5}$, s	KV, J	Temperatura ispitivanja, °C
41	S 121	25	42,0	20
42	S 122	25	46,0	20
43	S 123	25	45,0	20
44	S 124	25	43,5	20
45	S 221	25	35,0	0
46	S 222	25	32,0	0
47	S 223	25	30,0	0
48	S 224	25	29,5	0
49	S 321	25	24,0	-20
50	S 322	25	22,0	-20
51	S 323	25	25,0	-20
52	S 324	25	23,0	-20
53	S 421	25	18,0	-40
54	S 422	25	20,0	-40
55	S 423	25	19,0	-40
56	S 424	25	21,0	-40
57	S 521	25	10,0	-60
58	S 522	25	11,0	-60
59	S 523	25	9,0	-60
60	S 524	25	12,5	-60
61	S 131	50	35,0	20
62	S 132	50	32,0	20
63	S 133	50	37,0	20
64	S 134	50	36,0	20
65	S 231	50	26,0	0
66	S 232	50	28,0	0
67	S 233	50	25,0	0
68	S 234	50	27,5	0
69	S 331	50	17,0	-20
70	S 332	50	19,0	-20
71	S 333	50	21,0	-20
72	S 334	50	20,0	-20
73	S 431	50	10,0	-40
74	S 432	50	8,0	-40
75	S 433	50	8,0	-40
76	S 434	50	9,0	-40
77	S 531	50	6,0	-60
78	S 532	50	5,0	-60
79	S 533	50	4,5	-60
80	S 534	50	6,0	-60

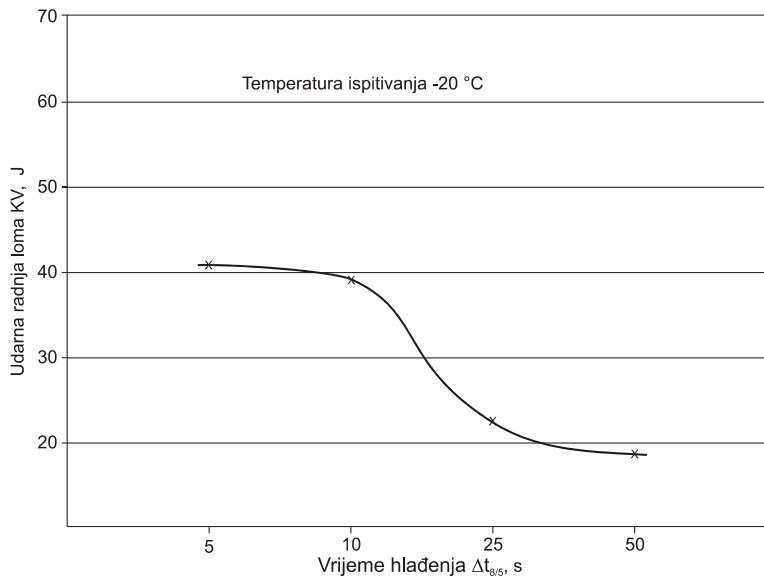
Na slikama 7.15 do 7.18 prikazana je ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$, tj. od brzine hlađenja kod simuliranih uzoraka. Na slikama su, također, naznačene i temperature pri kojima je ispitivana udarna radnja loma.



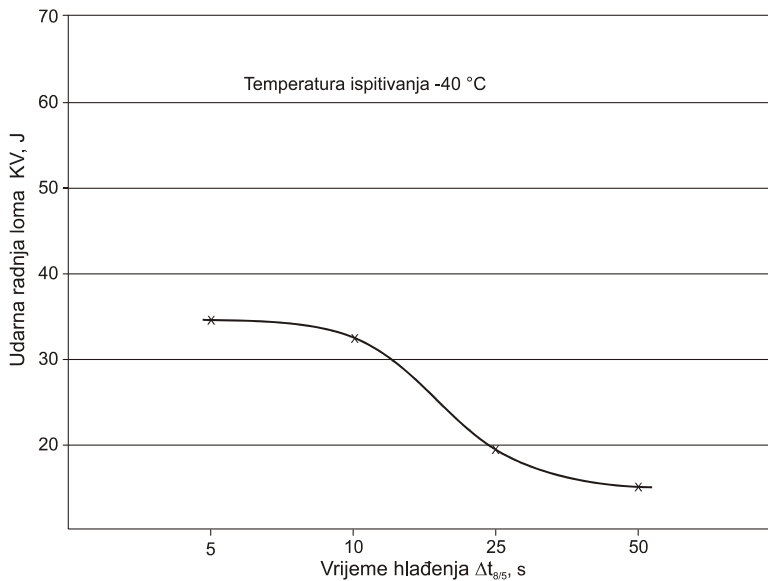
Slika 7.15 Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature 20 °C



Slika 7.16 Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature 0 °C



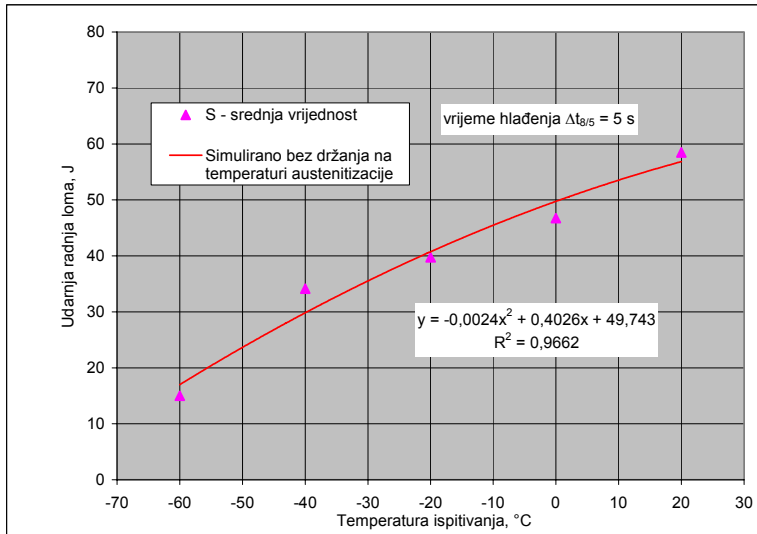
Slika 7.17 Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature -20 °C



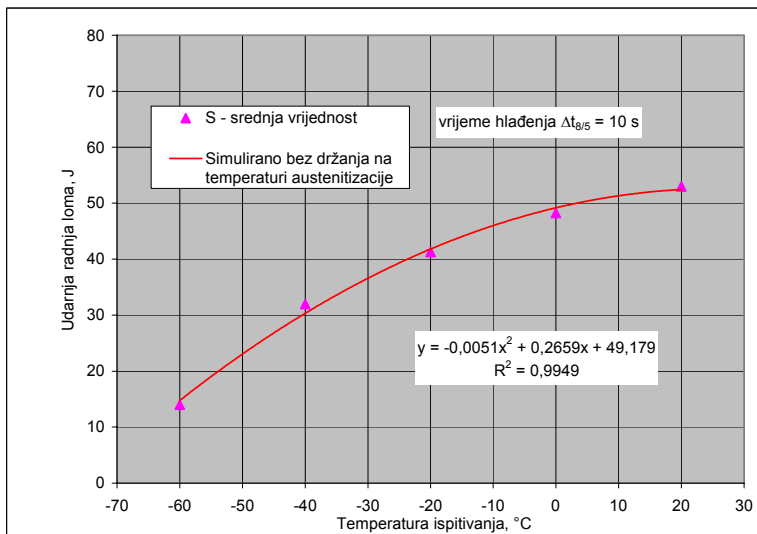
Slika 7.18 Ovisnost udarne radnje loma od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod temperature -40 °C

Dijagram za temperaturu ispitivanja - 60 °C nije prikazan, jer su vrijednosti udarne radnje loma bile ispod 15 J.

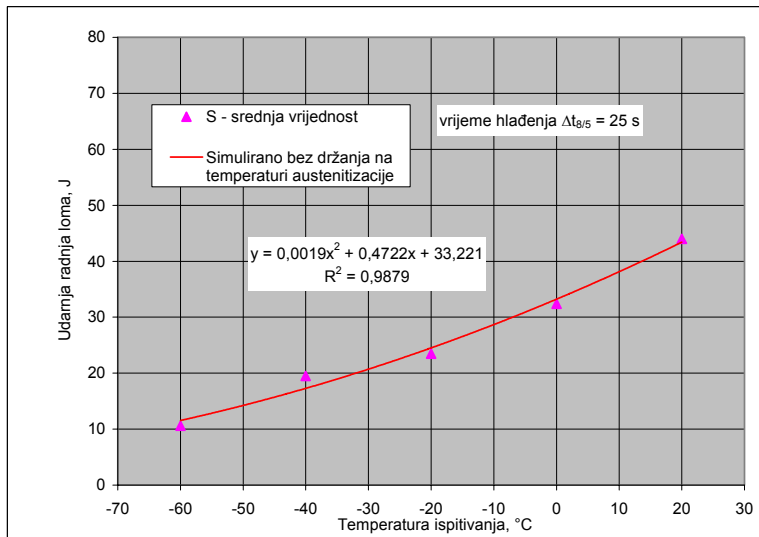
Na slikama 7.19 do 7.22 prikazana je ovisnost udarne radnje loma od temperature ispitivanja.



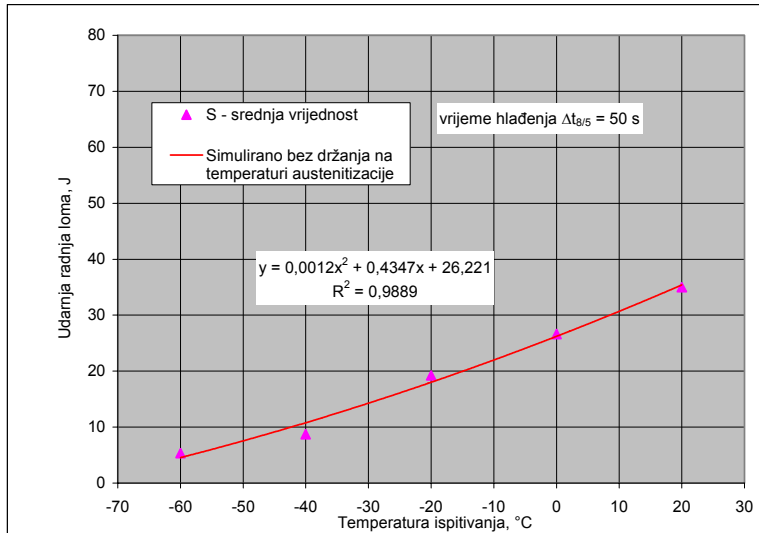
Slika 7.19 Utjecaj temperature ispitivanja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5} = 5$ s



Slika 7.20 Utjecaj temperature ispitivanja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5} = 10$ s



Slika 7.21 Utjecaj temperature ispitivanja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5} = 25$ s



Slika 7.22 Utjecaj temperature ispitivanja na udarnu radnju loma kod $\Delta t_{8/5} = 50$ s

Na dijagramima 7.15 do 7.18 prikazana je ovisnost udarne radnje loma od temperature ispitivanja i vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ kod simuliranih uzoraka "S".

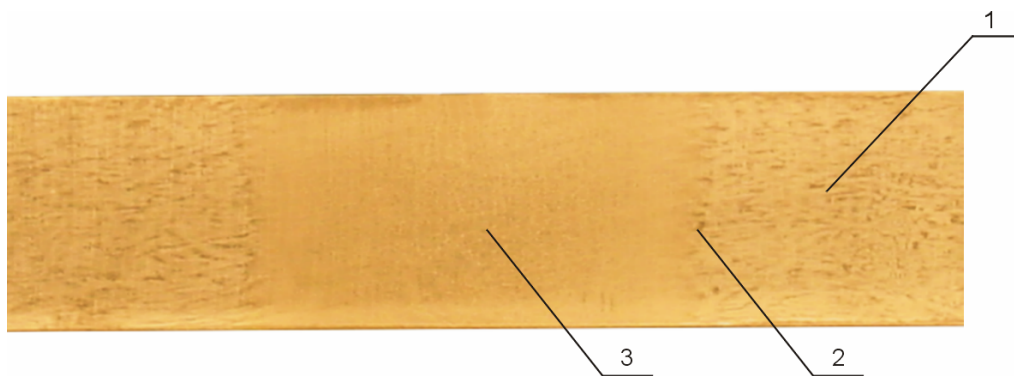
Iz dijagrama se može uočiti da s povećanjem vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$, tj. sa smanjenjem brzine hlađenja dolazi do sniženja vrijednosti udarne radnje loma. Najviše vrijednosti udarne radnje loma simuliranih uzoraka su kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5s$, a najniže kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50s$.

Kod temperatura ispitivanja $20^{\circ}C$ i $0^{\circ}C$ dolazi do postupnog pada udarne radnje loma s povećanjem vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$, dok je kod nižih temperatura ispitivanja taj pad izraženiji, naročito ako je vrijeme hlađenja iznad 10s.

Dobivene vrijednosti udarne radnje loma kod temperature ispitivanja $20^{\circ}C$ i $0^{\circ}C$ kod sva četiri vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ 5, 10, 25 i 50s su iznad vrijednosti 27,5 J. Kod nižih temperatura ispitivanja dobivene vrijednosti udarne radnje loma su iznad 27,5 J kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5s$ i 10s. Kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 25s$ i 50s vrijednosti udarne radnje loma su ispod ove granice iz razloga što pri povećanju vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ i nižim temperaturama dolazi do većeg pogrubljenja zrna, a samim tim i do smanjenja ukupne energije loma, kao i lošeg odnosa energije stvaranja pukotine i energije širenja pukotine, a posljedica je niža žilavost [85].

7.1.6. Metalografski pregled pojedinih zona simuliranog uzorka

Nakon mjerenja tvrdoće, na uzorcima je napravljen metalografski pregled pojedinih zona zavarenog spoja kako je to prikazano na slici 7.23.

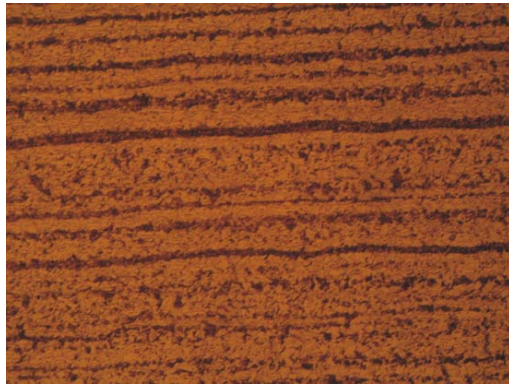


Oznaka i lokacija snimanja:

1. Osnovni materijal OM
2. Prijelaz OM i ZUT
3. ZUT

Slika 7.23 Lokacije snimanja mikrostrukture na simuliranom uzorku

Na slikama 7.24 do 7.33 prikazane su mikrostrukture osnovnog materijala, prijelaza OM i ZUT-a i zone utjecaja topline.



Slika 7.24 Mikrostruktura osnovnog materijala TStE420, normalizirano stanje, povećanje 200x

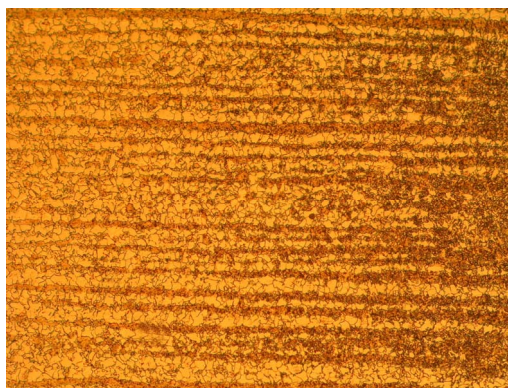


povećanje 100x

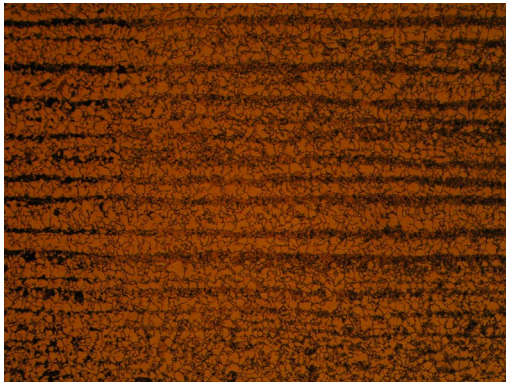


povećanje 50x

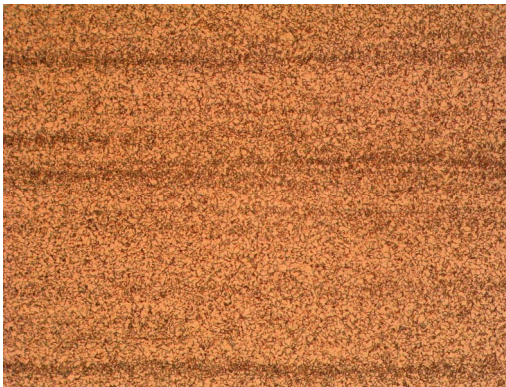
Slika 7.25 Mikrostruktura osnovnog materijala TStE420, normalizirano stanje,



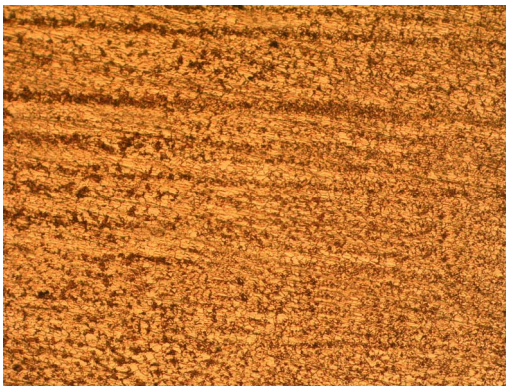
Slika 7.26 Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$



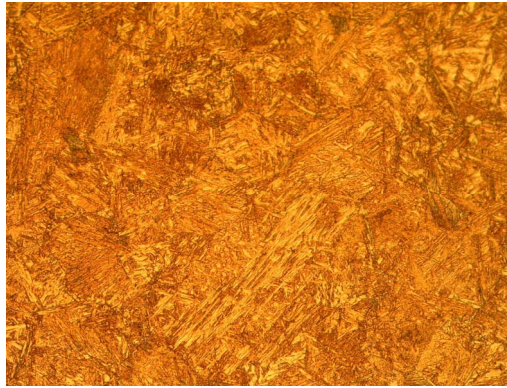
Slika 7.27 Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$



Slika 7.28 Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$



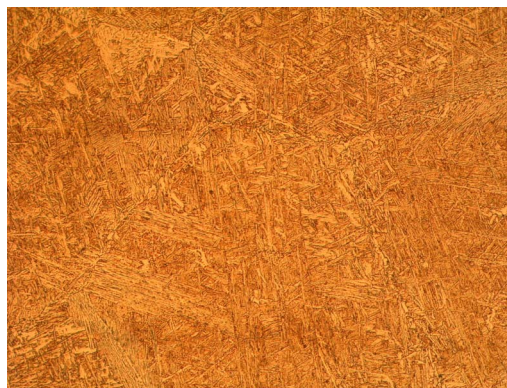
Slika 7.29 Mikrostruktura prijelaza OM/ZUT čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$



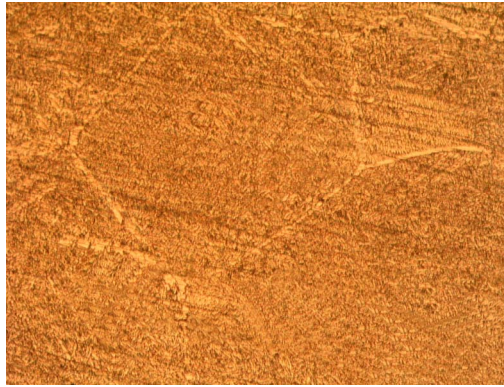
Slika 7.30 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$



Slika 7.31 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$



Slika 7.32 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$



Slika 7.33 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$

Struktura osnovnog materijala je trakasta feritno-perlitna što prikazuju slike 7.24 i 7.25. Veličina zrna osnovnog materijala je bila 11,4; 10,6; 12,2 i 10,8.

U zoni utjecaja topline došlo je do pogrubljenja strukture i povećanja zrna. Strukture se sastoje od gornjeg bainita i martenzita (slike 7.30 do 7.33). Najgrublje zrno ima uzorak hlađen s vremenom $\Delta t_{8/5}= 50s$ i tu je veličina zrna 4.

Veličina zrna je određivana po ASTM E-112 96 - metodom kruga, metodom crtama i kvantitativnom analizom mikrostrukture prema programu Buehler OMNIMET® Report, koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (slika 7.34. - veličina zrna osnovnog materijala i slika 7.35. - veličina zrna ZUT-a kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}= 50s$).



OMNIMET[®] Report

Buehler Ltd.
41 Waukegan Rd.
Lake Bluff, IL 60044
1-800-BUEHLER
www.buehler.com

Requester:
Vendor:
Material: TStE420
Heat No:

Report :
Objective: 500X
Calibration: 0.22286 µm/Pixel

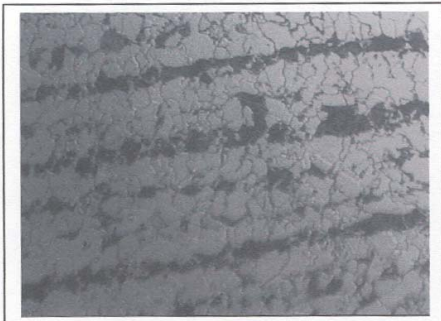


Fig. 1 Captured image

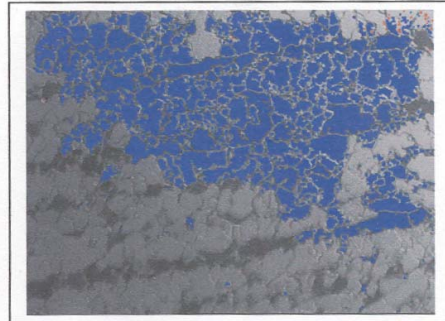


Fig. 2 Detected image

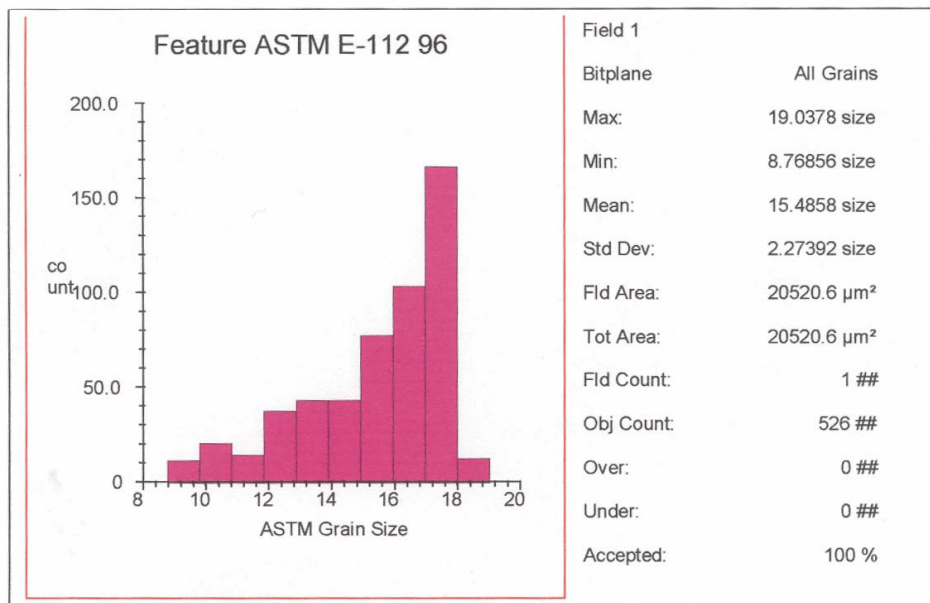


Fig. 3 Image Analysis Measurements

Comments * Min - maximum grain size
** Max - minimum grain size

Slika 7.34 Dijagram kvantitativne analize mikrostrukture za mjerenja veličine zrna po programu Buehler OMNIMET[®] Report - osnovni materijal.

Requester:
Vendor:
Material: TStE420
Heat No:

Report :
Objective: 100X
Calibration: 0.53191 µm/Pixel

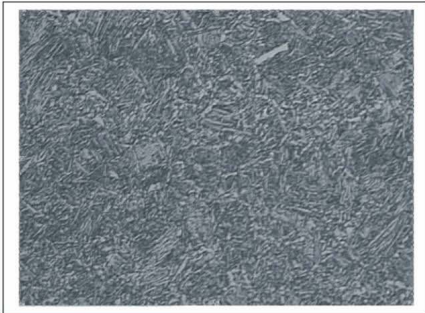


Fig. 1 Captured image

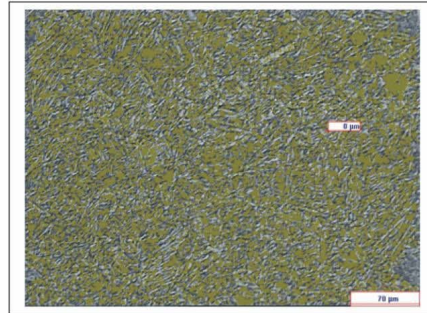


Fig. 1 Detected image

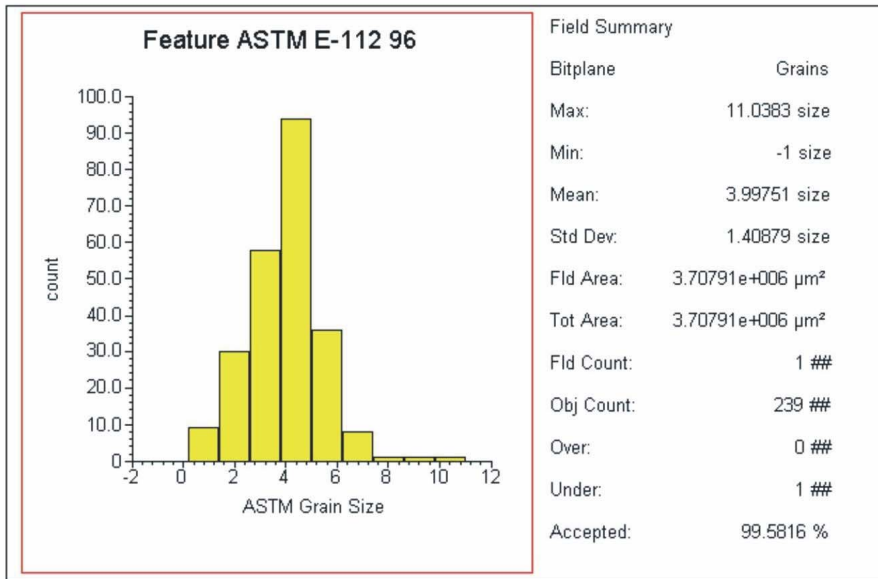


Fig. 3 Image Analysis Measurements

Comments *Min - maximum grain size
**Max - minimum grain size

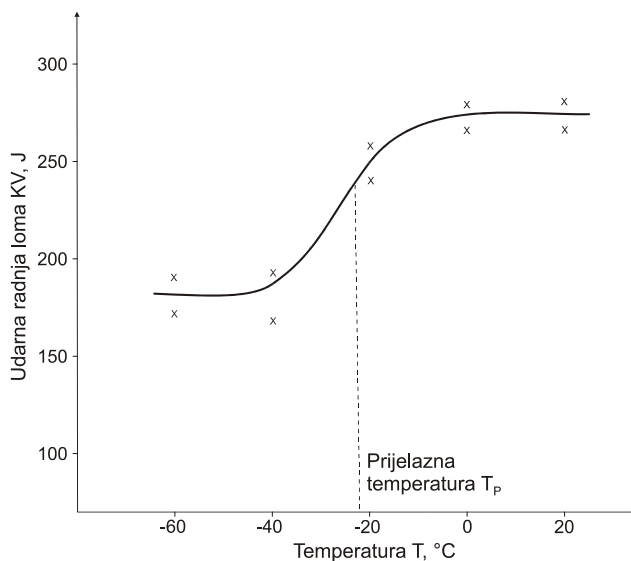
Slika 7.35 Dijagram kvantitativne analize mikrostrukture za mjerenja veličine zrna po programu Buehler OMNIMET® Report - ZUT kod $\Delta t_{8/5} = 50s$.

Kod osnovnog materijala, također, je dijagramski određena prijelazna temperatura krhkog u žilavi prijelom.

Prijelazna temperatura se definira kao temperatura pri kojoj se na prijelomnoj površini pojavljuje 50% krhkog i 50% žilavog prijeloma.

Prijelazna temperatura je ispitivane na Fakulteti za strojništvo u Mariboru na Charpy uređaju tipa Rpk 300, tvrtke "Amsler". Program za bilježenje podataka je Impact Win, a brzina bilježenje podataka je 10^6 podataka/s. Energija udara koja je bila na raspolaganju iznosi 300 J.

Na slici 7.36 prikazan je dijagram prijelazne temperature osnovnog materijala koji nije simuliran.



Slika 7.36 Dijagram prijelazne temperature osnovnog materijala TSSt 420 koji nije simuliran

Dijagram na slici 7.36 je konstruiran na osnovi podataka iz poglavlja 5.2.

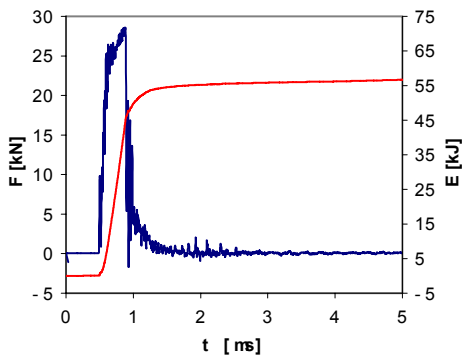
7.1.7. Dijagrami sila-vrijeme i energija-vrijeme kod simuliranih uzoraka

Kako su ispitivanja udarne radnje loma rađena na instrumentiranom Charpy batu s osciloskopom, bilo je moguće dati ocjenu kako udarno (impulsno) djelovanje utječe na udarne karakteristike i ocjenu plastičnosti ispitivanog mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće.

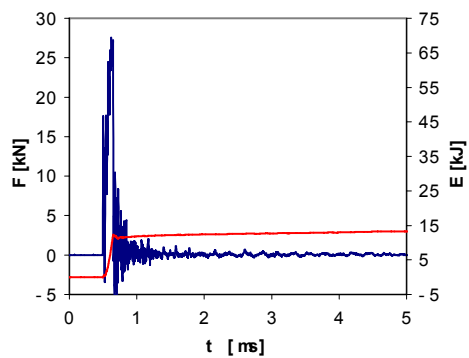
Ispitivanjem su dobivene dvije ovisnosti:

- sila-vrijeme
- energija-vrijeme.

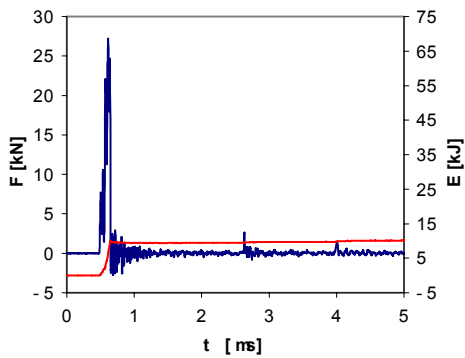
Na slikama 7.37 do 7.40 prikazani su dijagrami ispitivanja ove dvije ovisnosti kod simuliranih uzoraka. Ispitivanja su vršena na temperaturama 20 °C, - 20°C i - 40°C.



S 101 $\Delta t_{8/5} = 5$ s T = 20 °C

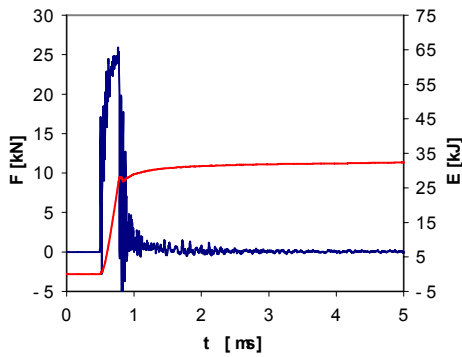


S 301 $\Delta t_{8/5} = 5$ s T = -20 °C

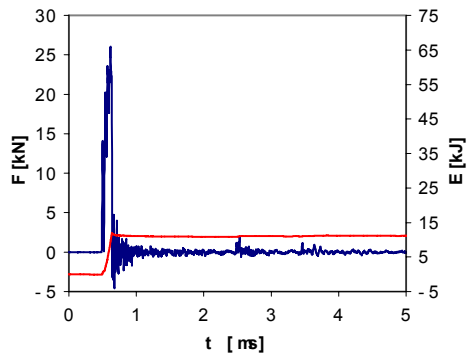


S 401 $\Delta t_{8/5} = 5$ s T = -40 °C

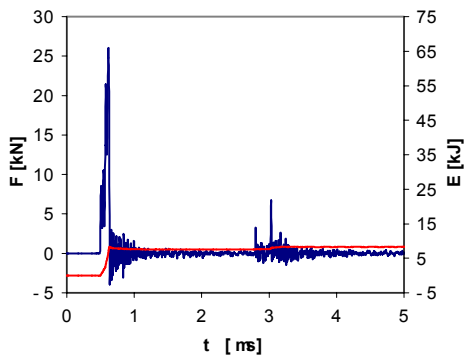
Slika 7.37 Dijagrami ovisnosti sila-vrijeme i energija-vrijeme kod uzoraka S 101, S 301 i S 401, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5$ s.



S 111 $\Delta t_{8/5} = 10$ s T = 20 °C

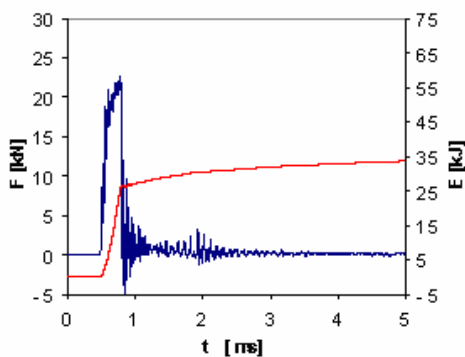


S 311 $\Delta t_{8/5} = 10$ s T = -20 °C

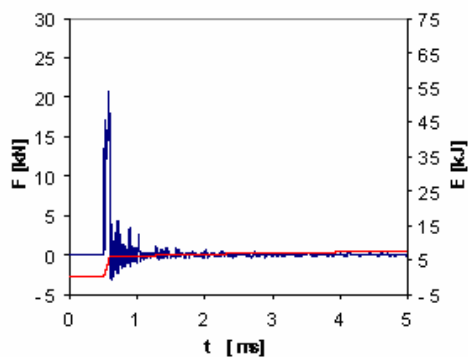


S 411 $\Delta t_{8/5} = 10$ s T = -40 °C

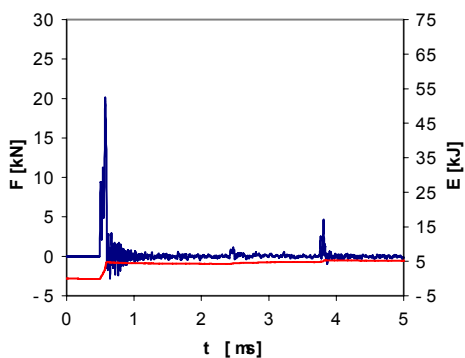
Slika 7.38 Dijagrami ovisnosti sila-vrijeme i energija-vrijeme kod uzoraka S 111, S 311 i S 411, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10$ s.



S 121 $\Delta t_{8/5} = 25$ s T = 20 °C

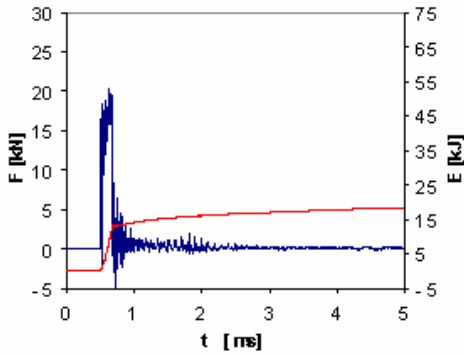


S 321 $\Delta t_{8/5} = 25$ s T = -20 °C

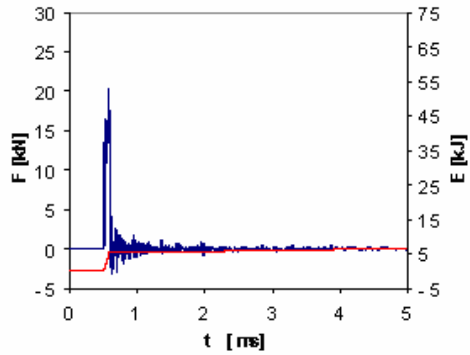


S 421 $\Delta t_{8/5} = 25$ s T = -40 °C

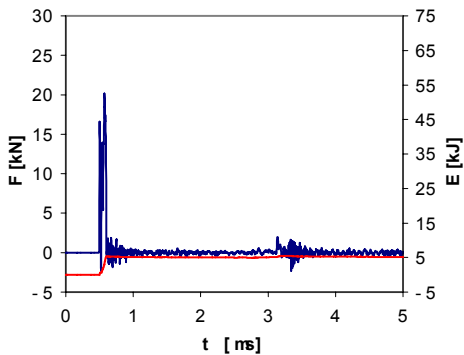
Slika 7.39 Dijagrami ovisnosti sila-vrijeme i energija-vrijeme kod uzoraka S 121, S 321 i S 421, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25$ s.



S 131 $\Delta t_{8/5} = 50$ s T = 20 °C



S 331 $\Delta t_{8/5} = 50$ s T = -20 °C



S 431 $\Delta t_{8/5} = 50$ s T = -40 °C

Slika 7.40 Dijagrami ovisnosti sila-vrijeme i energija-vrijeme kod uzoraka S 131, S 331 i S 431, za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s.

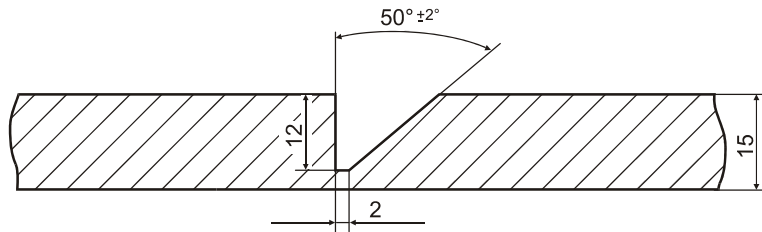
Iz prikazanih slika može se uočiti da je primjer duktilnog ponašanja mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće uočljiv kod uzoraka S 101, S 111 i S 121. Krhko ponašanje ispitivanog čelika uočljivo je naročito kod uzoraka S 411, S 421 i S 431.

7.2. Realno zavarivanje

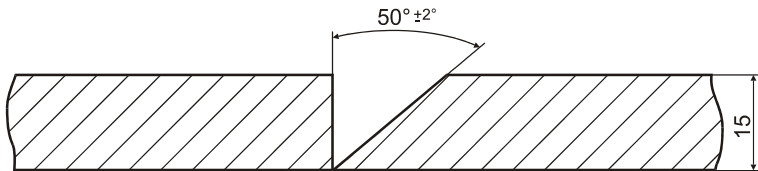
7.2.1. Plan pokusa

Planom pokusa predviđeno je ispitivanje tvrdoće i udarne radnje loma realno zavarenih uzoraka od čelika TStE 420. Debljina osnovnog materijala bila je 15 mm.

Pri ispitivanju realnim ciklusom zavarivanja, zavarivanje za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5s$, se provodilo u pripremi prikazanoj na slici 7.41, a zavarivanje s vremenima hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10, 25$ i $50s$ u 1/2 "V" pripreme prikazanoj na slici 7.42, na ploči debljine 15 mm.



Slika 7.41 Skica pripreme za zavarivanje realno zavarenih uzoraka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5s$.



Slika 7.42 Skica pripreme za zavarivanje realno zavarenih uzoraka s vremenima hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10, 25$ i $50s$.

Priprema prikazana na slici 7.41, korištena je zbog nemogućnosti dobivanja vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5s$, na pripremi prikazanoj na slici 7.42.

Zavarivalo se praškom punjenom žicom FILTUB 12B $\varnothing 1,6$ mm, proizvođača "Elektroda Jesenice" u jednom prolazu.

Sadržaj kemijskih elemenata i mehanička svojstva čistog metala zavara, prema podacima iz kataloga izrađivača dodatnog materijala prikazani su u tablici 7.9

Tablica 7.9. Podaci o dodatnom materijalu za zavarivanje [86]

DODATNI MATERIJAL	ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV %			MEHANIČKA SVOJSTVA					
	C	Si	Mn	$R_{p0,2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A ₅ %	KV, J 20 °C	KV, J -20 °C	KV, J -40 °C
FILTUB 12 B	0,05	0,35	1,40	> 420	510-610	>26	> 160	> 100	> 60

Kako se tijekom eksperimentalnog istraživanja pojavljuje veći broj ispitnih uzoraka, služilo se sljedećom shemom označavanja:

R - uzorci zavarivani realnim ciklusom zavarivanja

Prvi broj označava temperaturu na kojoj se ispituje žilavost

- 1 - sobna temperatura (20 °C)
- 2 - temperatura (0 °C)
- 3 - temperatura (-20 °C)
- 4 - temperatura (-40 °C)
- 5 - temperatura (-60 °C)

Drugi broj označava vrijeme hlađenja 800 °C do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$)

- 0 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 5$ s
- 1 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 10$ s
- 2 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 25$ s
- 3 - vrijeme $\Delta t_{8/5} = 50$ s

Zadnja brojčana oznaka označava redni broj uzorka.

Primjer:

Uzorak **R 101** – uzorak realno zavaren, udarna radnja loma ispitivana na sobnoj temperaturi, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5$ s, a redni broj uzorka kod ovog vremena hlađenja je 1.

Uzorak **R 434** – uzorak realno zavaren, udarna radnja loma ispitivana na temperaturi -40 °C, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s, a redni broj uzorka kod ovog vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ je 4.

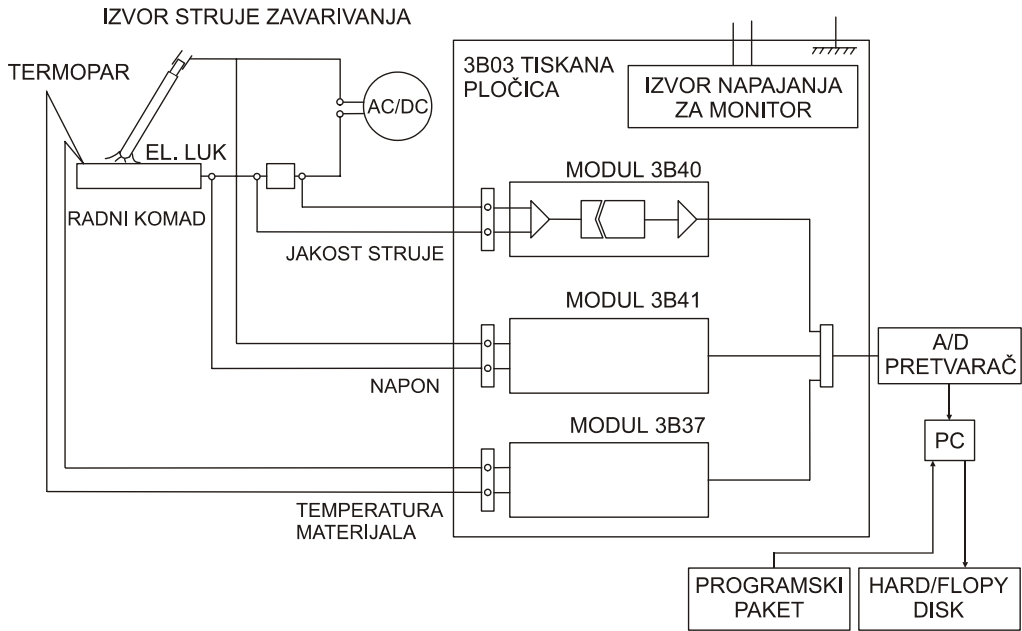
7.2.2. Praćenje i registracija glavnih parametara elektrolučnog zavarivanja pomoću on-line monitoring sistema

Suvremena moderna elektronika koja se između ostaloga ugrađuje u opremu za zavarivanje, omogućuje inteligentniji rad te opreme. Memoriju opreme moguće je napuniti znanjem i iskustvom stečenim kod različitih tehnoloških postupaka, pa tako i znanjem i iskustvom stečenim kod zavarivanja. Na temelju toga se mogu donositi odluke u procesu zavarivanja tj. moguće je procesom zavarivanja, odnosno parametrima zavarivanja upravljati tako da se postiže visoka kvaliteta zavarenih spojeva. Također je moguće tijekom zavarivanja pomoću metode bez razaranja npr. ultrazvukom pratiti kvalitetu zavarenih spojeva, te pravovremeno izabrati nove parametre zavarivanja u cilju stabilnosti procesa zavarivanja i dobivanja stabilne i prihvatljive kvalitete zavarenog spoja.

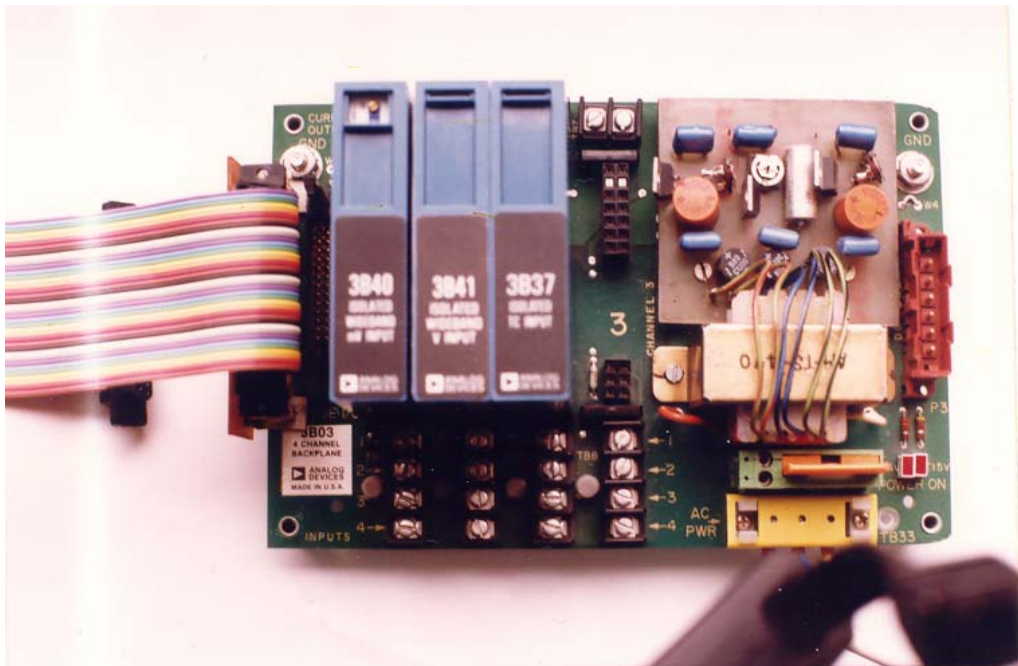
Za istraživanja mogućnosti detektiranja i sprečavanja pojava grešaka u zavarenom spoju, u okviru istraživačkog projekta na Strojarskom fakultetu u Slavonskom Brodu, nabavljena je računalna kartica (I/O kartica za ISA) AT-mio-16X, zajedno s odgovarajućim softverom od tvrtke National Instruments-SAD. To je brzi 16-bitni analogno-digitalni konverter – ADC s ukupno najvećom brzinom uzimanja uzoraka mjerenja 100.000 u sekundi. Najmanja moguća brzina je 0,00153 uzoraka u sekundi, odnosno jedan uzorak svakih 11 minuta, za spore promjene.

Uređaj prikazan na slici 7.43 se sastoji iz [87]:

- izvora napajanja monitora,
- 3B03 tiskane pločice,
- modula 3B41 za mjerenje napona,
- modula 3B40 za mjerenje struje,
- modula 3B37 za mjerenje temperature,
- analogno/digitalnog konvertera (A/D pretvarač),
- računala s magnetskim medijem za pohranjivanje podataka, te
- programskog (software) paketa.



Slika 7.43 Shematski prikaz uređaja za registraciju parametara zavarivanja [87].



Slika 7.44 Fotografija glavnih elektroničkih komponenti uređaja [87].

Tiskana pločica je projektirana kao nosač 4 izolacijsko-pretvaračka modula. Na pločici se nalazi i temperaturna kompenzacija za svaki modul. S tiskane pločice se analogni signali do A/D pretvarača odvođe pomoću odgovarajućeg kabela. Izolacijsko-pretvarački modul, pored električnog odvajanja A/D pretvarača od mjernog instrumenta, ima zadatak prilagoditi mjerne signale na električne veličine pogodne za dalju obradu.

Modul 3B37 prima signale iz termo-pare i osigurava dva izlaza proporcionalno ulaznom signalu. Izlazni signali su 0-10 V, te 4-20 mA ili 0-20 mA. Ulazni krug zaštićen je od prenapona 220 V.

Izolirani širokopojasni milivoltni ulazni modul je projektiran za ulazne signale od ± 10 mV do ± 100 mV. Mjerenjem pada napona na otporniku 60mV/500A modul se koristi pri snimanju parametara zavarivanja. Iz tih podataka dobije se vrijednost struje zavarivanja. Mjerenje jakosti struje provodi se pomoću Hallove sonde.

Modul 3B41 je izolacijsko-pretvarački naponski modul, projektiran za ulaz od $\pm 1V$ do $\pm 10V$. Ostale tehničke karakteristike su identične modulu 3B40. Koristi se za mjerenje napona zavarivanja, pri čemu je otpornički djelitelj 1:5.

Na hardware se ne postavljaju nikakvi posebni zahtjevi. Ukoliko se želi postići veliki broj konverzija u sekundi, tada je potrebno da računalo na kojem se program izvodi, radi u što bržem taktu i da je procesorska moć što veća.

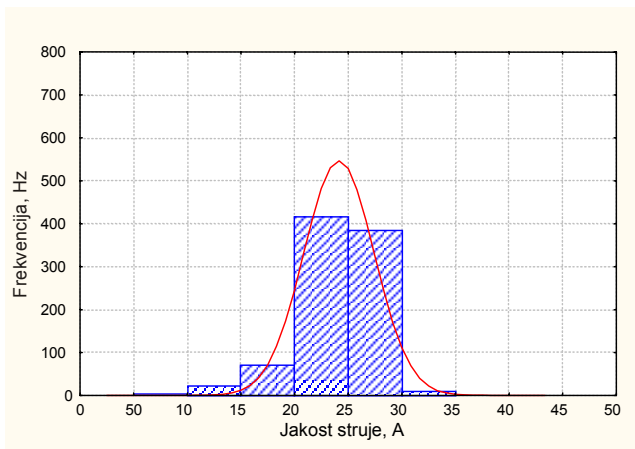
Potprogram za uzimanje podataka očitava podatke iz A/D pretvarača i snima ih na magnetski medij. Potprogram za pregled podataka služi za brzi pregled snimljenih podataka kako bi se stekao uvid u ispravnost istih. Moguće je pri pregledu podataka promatrati određenih dio podataka (npr. određeno vremensko trajanje) te mijenjati maksimalnu veličinu koja će biti prikazana na y osi.

On - line monitor može mjeriti i registrirati parametre zavarivanja (napona i jakosti struje) u području od 1 do 10 kHz. Pri tome se kod zavarivanja na monitoru pokazuju RMS (Root Mean Square) vrijednosti napona i struje zavarivanja, a naknadno (off-line) je moguće statistički obraditi parametre zavarivanja u nekom od na tržištu dostupnih software-a za statističku obradu parametara. Budući da ne postoje pisane procedure ili propisi koji pokrivaju područje korištenja on-line monitoring sistema, primjena uređaja, statistička obrada podataka, kao i interpretacija rezultata mjerenja zahtjeva određena predznanja i praktična iskustva [88].

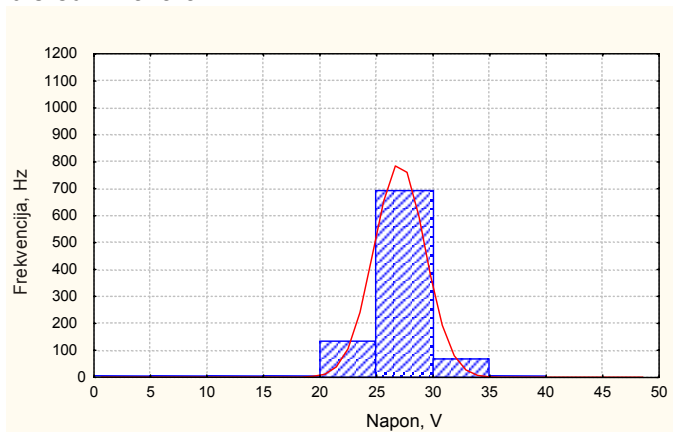
Ekperimentalni dio mjerenja parametara zavarivanja on-line monitorom pri MAG-postupku zavarivanja, izveden je pri realnom pokusu zavarivanja na FSB-u u Zagrebu.

Vršena su tri mjerenja parametara zavarivanja, pri čemu su registrirani parametri prikazani u tablici 7.10 (ploče 2, 3 i 4).

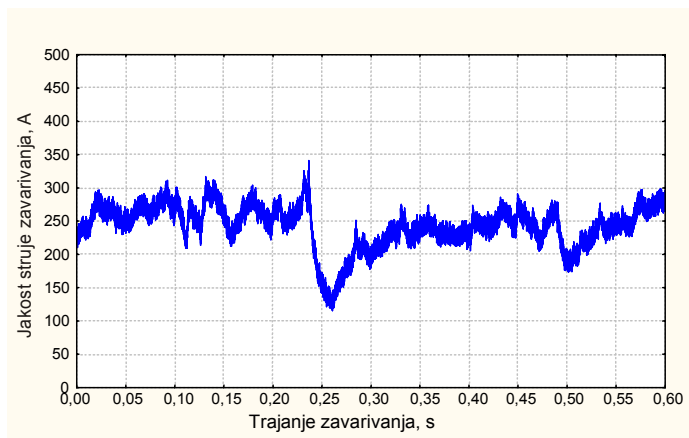
Na slikama 7.45 do 7.49 mogu se vidjeti prikazi podataka za vrijeme snimanja parametara zavarivanja uporabom programa ARC (Arc Sensing Modul).



Slika 7.45 Razdioba frekvencije jakosti struje pri MAG-postupku zavarivanja u sredini zavara



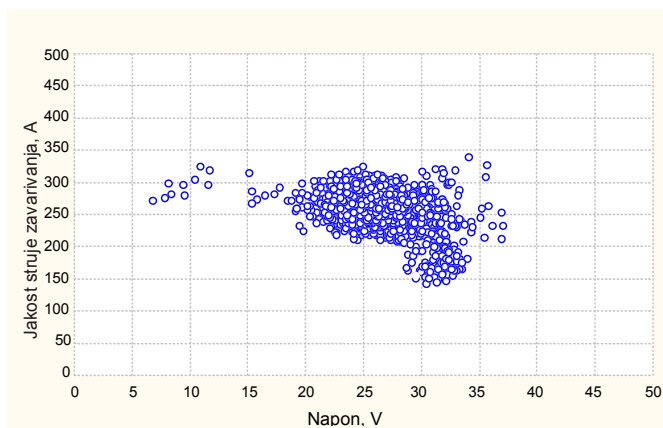
Slika 7.46 Razdioba frekvencije napona pri MAG-postupku zavarivanja u sredini zavara



Slika 7.47 Promjena jakosti struje u funkciji od vremena pri MAG-postupku zavarivanja



Slika 7.48 Promjena napona u funkciji od vremena pri MAG-postupku zavarivanja



Slika 7.49 Dijagram jakosti struje u funkciji od napona

Da bi se ocjenjivalo i upravljalo procesom tijekom procesa zavarivanja, mora se karakterizirati utjecajne faktore na zavarivanje: parametri, oprema i dodatni materijal. O kvaliteti zavarivanja kao procesu ovisi kvaliteta zavarenih spojeva, odnosno zavarenog proizvoda ili zavarene konstrukcije.

U svrhu praćenja parametara zavarivanja tijekom i nakon zavarivanja postoje programi i uređaji, koji se obično nazivaju analizatori i koji su komercijalno raspoloživi. Naime, dio informacija se može očitati iz oscilograma za napon $U = f(t)$ i struju $I = f(t)$, ali statistički obrađeni podaci iz oscilograma, koji daju krivulju razdiobe vjerojatnosti-krivulje gustoće za napon i struju pružaju mogućnost bolje ocjene procesa preko parametara razdiobe.

Takve obrade-analize zavarivanja obično se provode trenutno, on-line i mogu se koristiti za upravljanje procesom zavarivanja.

Kako bi se postigao krajnji cilj-zavareni spojevi bez greške, potrebno je da oprema za zavarivanje omogućava kontinuirano:

- praćenje i mjerenje parametara
- prikupljanje i obradu podataka
- bilježenje
- upravljanje, mjerenje, povratnu vezu, korekciju parametara
- otkrivanje grešaka u nastajanju
- pravovremeno sprječavanje pojave grešaka (proizvod bez grešaka)

Kako je već ranije navedeno u poglavlju 4., glavni parametri zavarivanja su napon i jakost struje. Vrlo brze promjene parametara zavarivanja može se pratiti korištenjem raznih senzora, hardware i software za akviziciju podataka. Senzori registriraju željene parametre u procesu zavarivanja koji se pomoću A/D kartice (analogno-digitalne kartice) mogu pretvarati u digitalne vrijednosti, te uz pomoć odgovarajućih programa na računalu pohraniti u memoriju. Obradom snimljenih podataka mogu se dobiti različite informacije o sljedećem:

- procesu zavarivanja
- ponašanju dodatnog materijala (prijenosu kapljica u električnom luku)
- ponašanje izvora struje (dinamička karakteristika izvora struje)
- stabilnost visine luka i dr.

Ako parametri odstupaju od propisanih granica, mogu se pojaviti proizvodne, geometrijske ili metalurške greške. Krajnji cilj primjene tehničkih dostignuća je rad sa što manje pogrešaka.

Izvođenje eksperimentalnog istraživanja uz registriranje parametara zavarivanja pomoću ovakvog uređaja pruža mogućnost preciznog registriranja i obrade podataka koji se kasnije mogu koristiti u proračunima.

7.2.3. Izvedba realnog zavarivanja

EPP i MAG-postupak zavarivanja se najčešće koriste pri izradi posuda pod tlakom, pa su iz tog razloga predviđena istraživanja za ove postupke zavarivanja.

U predpokusima zavarivanja probne ploče su pripremljene od čelika TStE 420 dimenzija 150x300x15 mm.

Kod EPP-postupka korištena je 1/2"V" pripreme s kutom pripreme 60°. Brzina zavarivanja je bila od 0,3 m/min do 0,5 m/min. Pri zavarivanju je korištena žica promjera 3 mm. Zavareno je šest ploča, ali ovim postupkom zavarivanja se nije moglo dobiti vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ niže od 25 s. Stoga se odustalo od ovog načina zavarivanja.

Pri MAG postupku zavarivanja korištena je priprema prikazana na slikama 7.41 i 7.42 s kutom pripreme 50°. Zavareno je deset ploča dok se nisu dobile tražene brzine zavarivanja, tj. vremena hlađenja 800 do 500 °C i to $\Delta t_{8/5}$ = 5, 10, 25 i 50s.

Vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ mjereno uranjanjem termo-para u talinu što je prikazano slikom 7.50.



Slika 7.50 Način uranjanja termo-para Ni-CrNi u talinu

Krivulje hlađenja snimane su računalom po programu Matex.

Prema planu pokusa provedeno je MAG-zavarivanje uz registraciju srednjih vrijednosti parametara zavarivanja pomoću on-line monitora. Parametri zavarivanja registrirani su također digitalnim instrumentima. Nije bilo odstupanja u izmjenjenim veličinama, jednim i drugim načinom registriranja parametara zavarivanja.

Parametri zavarivanja (napon, jakost struje zavarivanja, brzina zavarivanja), promjer žice, toplinski input za pojedine zavare prikazani su u tablici 7.10. Izračuni unosa topline urađeni su prema jednadžbama iz poglavlja 4.2.4.

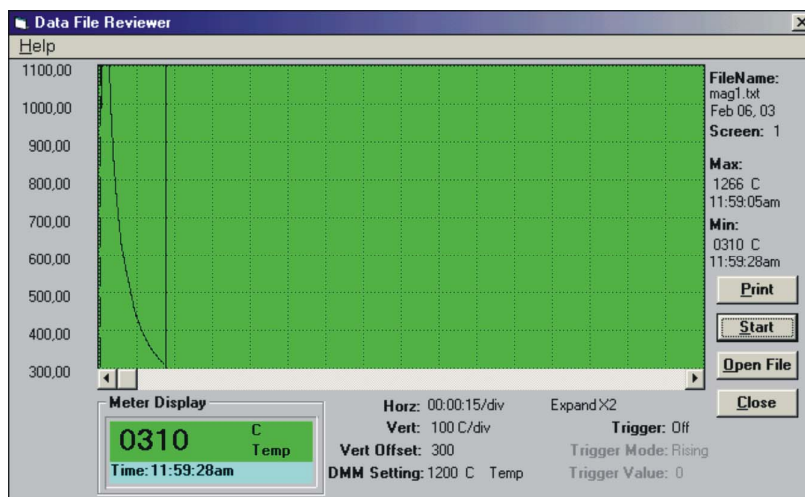
Tablica 7.10 Parametri MAG-zavarivanja karakterističnih uzoraka

Br. ploče	Ploča 1	Ploča 2	Ploča 3	Ploča 4
\varnothing žice(mm)	1,6	1,6	1,6	1,6
T_0 (°C)	17	17	17	17
v (cm/min)	40,0	35,4	31,0	24,2
$\Delta t_{8/5}$ (s)	5,0	10,0	25,0	50,0
I (A)	220	220	225	230
U (V)	24	24	24	24,5
E (J/mm)	1332	1491	2250	2328

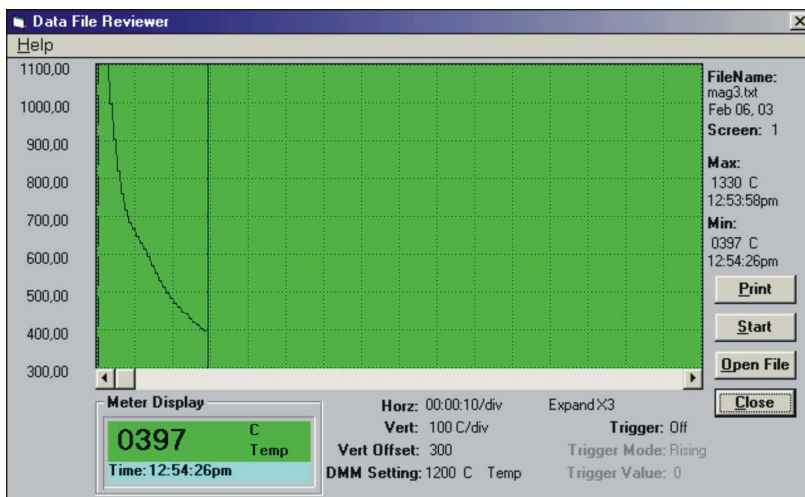
Zavarivanje je vršeno s njihanjem u jednom prolazu osim u slučaju ploče 1 kada se zavarivalo bez njihanja. Širina njihanja bila je 10 mm, a broj njihanja je 35 po minuti. Korišteni zaštitni plin je CO₂, a protok plina bio je 15 l/min.

Brzina dotoka žice u svim mjerenjima bila je 6 m/min, a razmak između kontaktne cjevčice i površine lima bio je 18 mm.

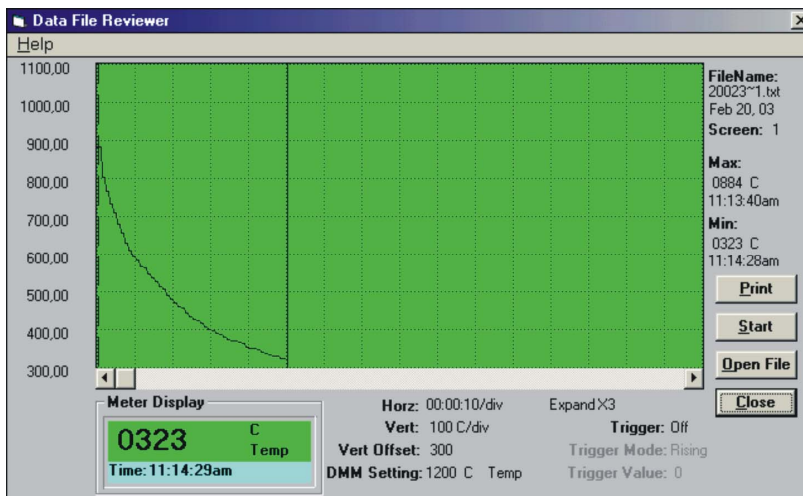
Na slikama 7.51 do 7.54 prikazani su dijagrami hlađenja snimani računalom po programu Matex, za ploču 1, 2, 3 i 4.



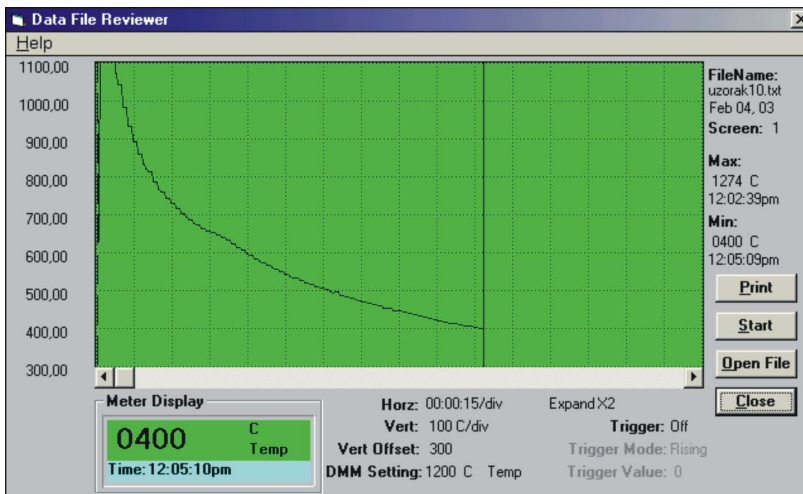
Slika 7.51 Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br.1. Ostvareni $\Delta t_{8/5} = 5$ s.



Slika 7.52 Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br.2. Ostvareni $\Delta t_{8/5} = 10$ s.



Slika 7.53 Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br.3. Ostvoreni $\Delta t_{8/5} = 25s$.



Slika 7.54 Dijagramski prikaz ovisnosti temperature o vremenu pri realnom zavarivanju probne ploče br.4. Ostvoreni $\Delta t_{8/5} = 50s$.

7.2.4. Dobiveni rezultati mjerenja tvrdoće realno zavarenih uzoraka

Nakon zavarivanja ploča, strojnom obradom i dodatnom obradom u metalografskom laboratoriju, priređeni su uzorci za mjerenje tvrdoće HV10. Uzorci su nakon toga blago nagrizeni 3 % - tnom HNO_3 do razine da bi se pri povećanju kod mjerenja tvrdoće jasno vidjela linija staljivanja i otisak Vickersove piramide na način kako je to prikazano na slici 7.55.

Tvrdoća je mjerena na pet uzoraka iz svake pojedinačne zavarene ploče.

Dobivene vrijednosti tvrdoća prikazane su u tablici 7.11.

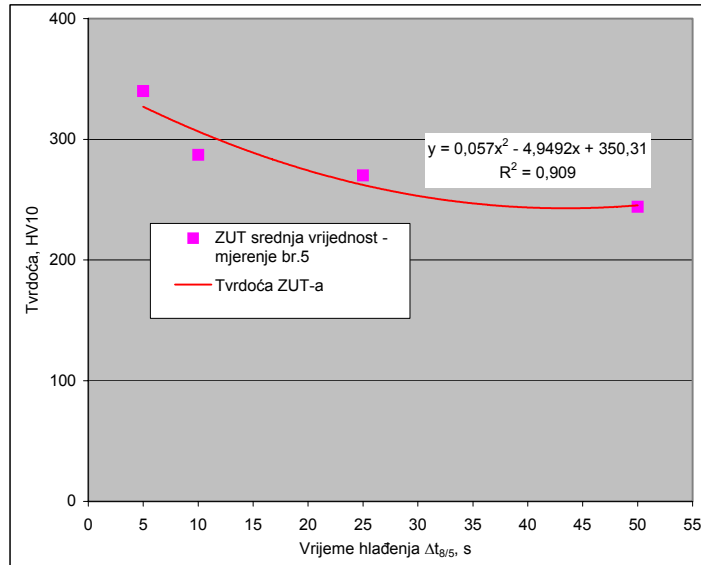
Tablica 7.11 Vrijednosti tvrdoće HV10 kod realno zavarenih uzoraka - tvrdoće mjerene po presjeku zavarenog spoja

OZNAKA PROBE	TVRDOĆA HV10											
	Mjerenje											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R 101	188	186	218	262	345	274	275	339	292	231	186	187
R 102	183	185	215	253	322	270	268	330	262	238	187	190
R 103	190	191	218	287	344	282	285	335	292	230	186	188
R 104	181	185	218	262	342	282	284	337	272	231	182	183
R105	187	185	218	262	347	278	273	341	292	237	183	185
R 111	188	186	221	240	306	254	260	317	262	236	193	188
R 112	189	186	225	248	286	262	260	290	252	232	186	187
R 113	188	186	229	256	297	258	259	293	252	228	190	187
R 114	187	185	219	224	273	255	252	269	248	223	186	189
R 115	188	186	217	237	274	262	260	275	241	213	184	185
R 121	185	181	201	227	279	224	225	287	243	208	181	188
R 122	187	189	217	237	267	234	235	264	235	215	191	193
R 123	188	186	229	235	263	232	234	268	237	214	193	195
R 124	188	186	210	239	269	230	228	267	241	203	183	185
R 125	190	187	216	237	271	227	229	273	234	213	186	187
R 131	185	182	193	220	240	209	210	246	215	198	181	180
R 132	183	186	191	218	241	205	207	244	222	194	187	190
R 133	190	191	205	232	246	213	215	240	225	207	186	188
R 134	191	187	194	215	245	219	221	248	212	195	185	183
R 135	187	185	190	216	250	209	214	250	221	197	188	189

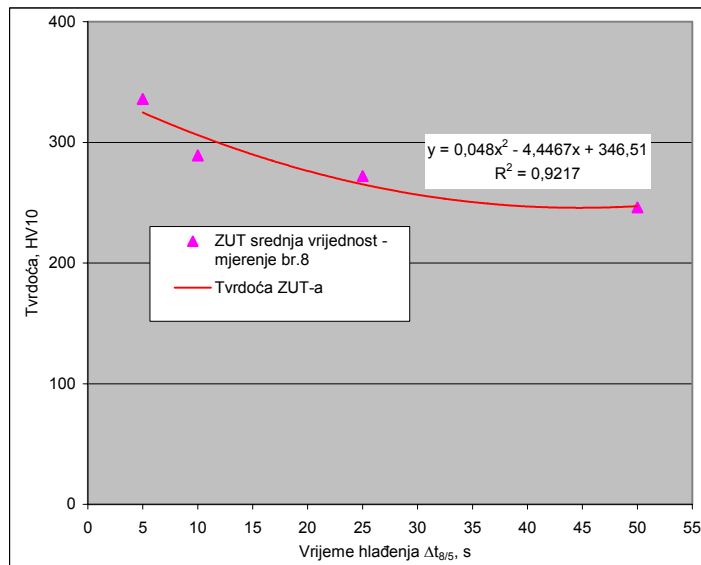


Slika 7.55 Mjerenje tvrdoće HV10 po presjeku zavarenog spoja

Po osnovi rezultata iz tablice 7.11 napravljeni su dijagrami ovisnosti tvrdoće o vremenu hlađenja 800 do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$) tj. o brzini hlađenja 800 do 500 °C i prikazani na slikama 7.56 do 7.58.

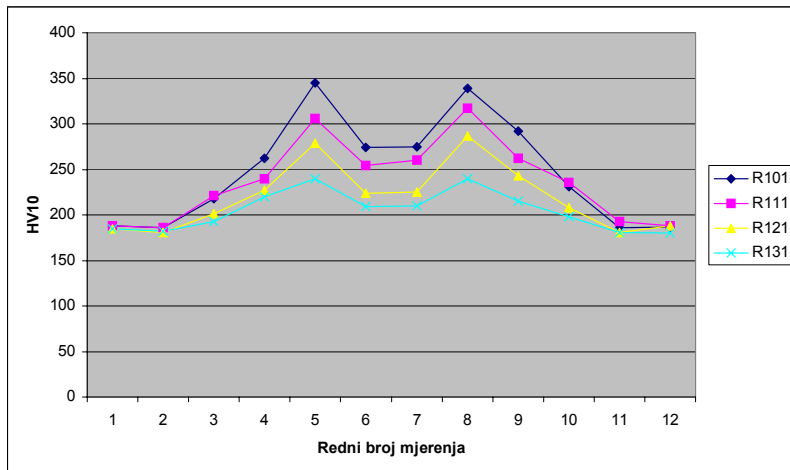


Slika 7.56 Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće ZUT-a kod realno zavarenog spoja o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ (mjerenje br.5. iz tablice 7.11.)



Slika 7.57 Ovisnost srednje vrijednosti tvrdoće ZUT-a kod realno zavarenog spoja o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ (mjerenje br.8. iz tablice 7.11.)

Kako bi se istaknuli uočeni efekti porasta tvrdoća, izmjerene vrijednosti su prikazane na slici 7.58.



Slika 7.58 Usporedba dijagrama tvrdoća pri različitim vremenima hlađenja $\Delta t_{8/5}$
R101- $\Delta t_{8/5}=5s$ R111- $\Delta t_{8/5}=10s$ R121- $\Delta t_{8/5}=25s$ R131- $\Delta t_{8/5}=50s$
(podaci iz tablice 7.11 i mjerenje tvrdoće prema slici 7.55.)

Tvrdoće mjerene po presjeku i prikazane u tablici 7.11 pokazuju da s povećanjem vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ dolazi do pada tvrdoće u ZUT-u, tako da prosječna tvrdoća u ZUT-u na uzorcima hlađenim pri vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}= 50s$ iznosi 72% vrijednosti tvrdoće izmjerene na uzorcima hlađenim pri vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}= 5s$.

Maksimalne vrijednosti tvrdoće u ZUT-u su bile oko 345 HV pri vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}= 5s$, 317 HV pri vremenu $\Delta t_{8/5}= 10s$, 287 pri vremenu $\Delta t_{8/5}= 25s$ i oko 250 HV pri vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}= 50s$.

7.2.5. Dobiveni rezultati ispitivanja udarne radnje loma realno zavarenih uzoraka

Kako je zona utjecaja topline heterogena zona, veoma je važno da rez zarez bude na mjestu, gdje je minimalna udarna radnja loma. U tom cilju su i provedena variranja smještaja zareza, za što je prikazano na slici 6.14 uz objašnjenje - poglavlje 6.

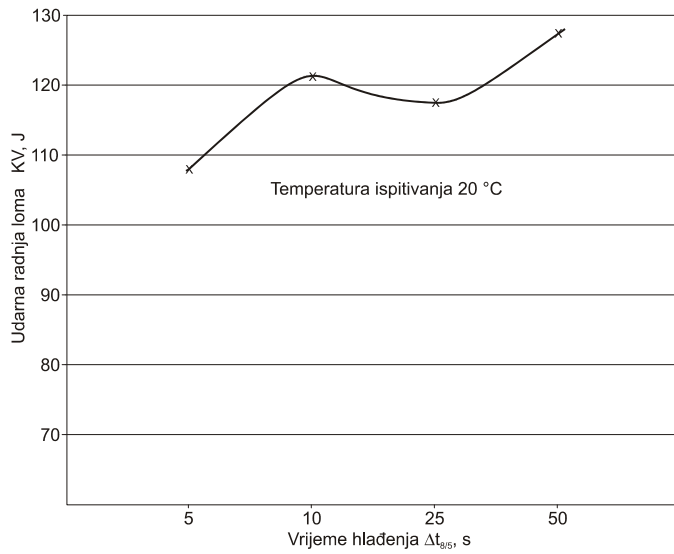
Udarne radnje loma na realno zavarenim uzorcima ispitivana je po Charpy-ju, na temperaturama 20 °C; 0 °C; -20 °C; -40 °C i -60 °C. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 7.12.

Tablica 7.12 Vrijednosti udarne radnje loma dobivene pri ispitivanju realno zavarenih uzoraka na različitim temperaturama.

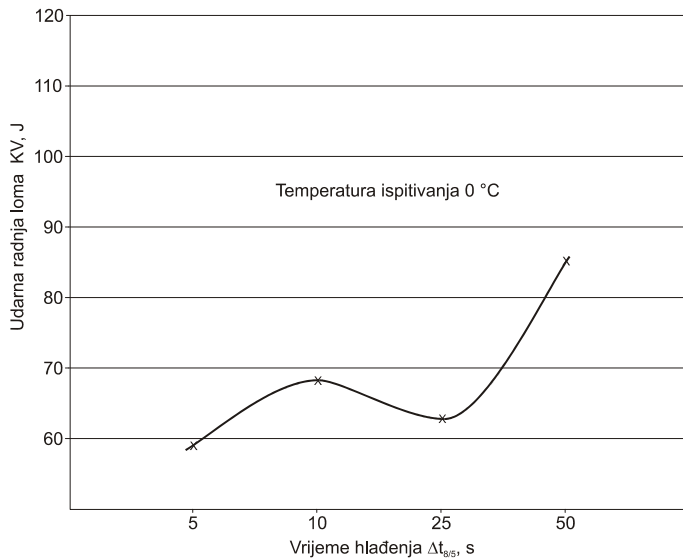
Br.probe	Oznaka	$\Delta t_{8/5}$, s	KV, J	Temperatura ispitivanja, °C
1	R 101	5	111	20
3	R 102	5	107	20
2	R 103	5	117	20
4	R 104	5	104	20
5	R 201	5	54	0
6	R 202	5	69	0
7	R 203	5	58	0
8	R 204	5	56	0
9	R 301	5	45	-20
10	R 302	5	44	-20
11	R 303	5	41	-20
12	R 304	5	49	-20
13	R 401	5	26	-40
14	R 402	5	31	-40
15	R 403	5	33	-40
16	R 404	5	29	-40
17	R 501	5	15	-60
18	R 502	5	17	-60
19	R 503	5	22	-60
20	R 504	5	20	-60
21	R 111	10	125	20
22	R 112	10	123	20
23	R 113	10	124	20
24	R 114	10	118	20
25	R 211	10	60	0
26	R 212	10	67	0
27	R 213	10	75	0
28	R214	10	69	0
29	R 311	10	48	-20
30	R312	10	44	-20
31	R 313	10	46	-20
32	R 314	10	57	-20
33	R 411	10	35	-40
34	R 412	10	32	-40
35	R 413	10	38	-40
36	R 414	10	37	-40
37	R 511	10	25	-60
38	R 512	10	21	-60
39	R 513	10	20	-60
40	R 514	10	23	-60

Br.probe	Oznaka	$\Delta t_{8/5}$, s	KV, J	Temperatura ispitivanja, °C
41	R 121	25	117	20
42	R 122	25	118	20
43	R 123	25	120	20
44	R 124	25	110	20
45	R 221	25	63	0
46	R 222	25	67	0
47	R 223	25	57	0
48	R 224	25	61	0
49	R 321	25	55	-20
50	R 322	25	39	-20
51	R 323	25	46	-20
52	R 324	25	50	-20
53	R 421	25	27	-40
54	R 422	25	32	-40
55	R 423	25	33	-40
56	R 424	25	35	-40
57	R 521	25	19	-60
58	R 522	25	21	-60
59	R 523	25	20	-60
60	R 524	25	18	-60
61	R 131	50	131	20
62	R 132	50	128	20
63	R 133	50	132	20
64	R 134	50	120	20
65	R 231	50	85	0
66	R 232	50	80	0
67	R 233	50	90	0
68	R234	50	83	0
69	R 331	50	48	-20
70	R332	50	53	-20
71	R 333	50	49	-20
72	R 334	50	51	-20
73	R 431	50	29	-40
74	R 432	50	33	-40
75	R 433	50	30	-40
76	R 434	50	36	-40
77	R 531	50	20	-60
78	R 532	50	22	-60
79	R 533	50	23	-60
80	R 534	50	19,5	-60

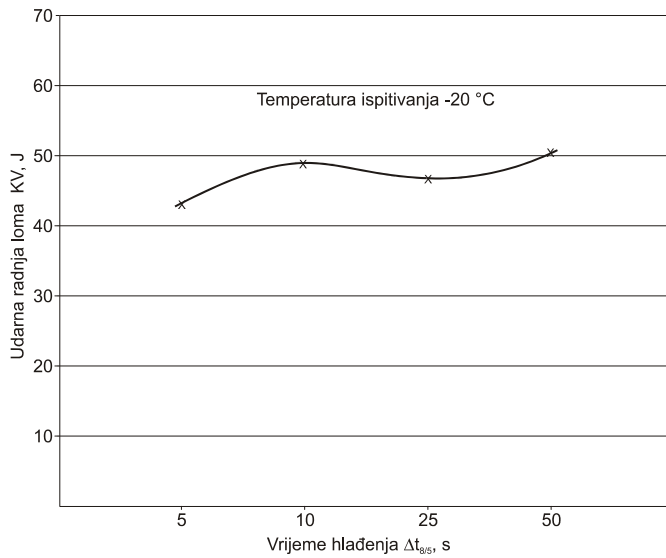
Na dijagramima 7.59 do 7.63 prikazana je ovisnost udarne radnje loma o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ tj. o brzini hlađenja. Na dijagramima su naznačene i temperature pri kojima je ispitivana udarna radnja loma.



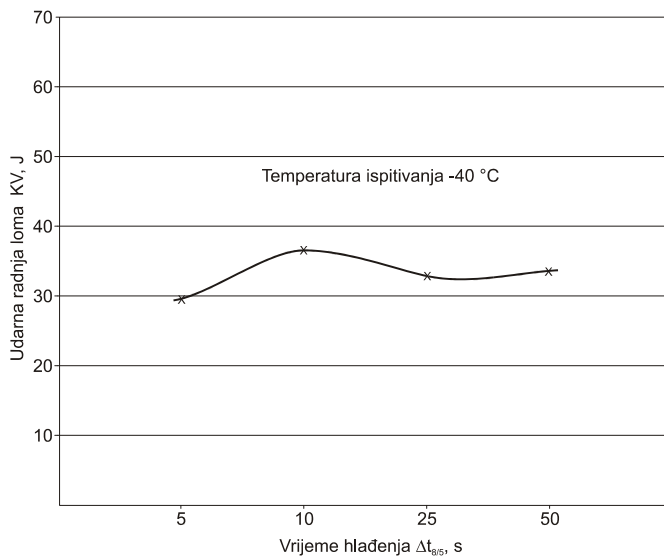
Slika 7.59 Ovisnost udarne radnje loma o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature 20°C.



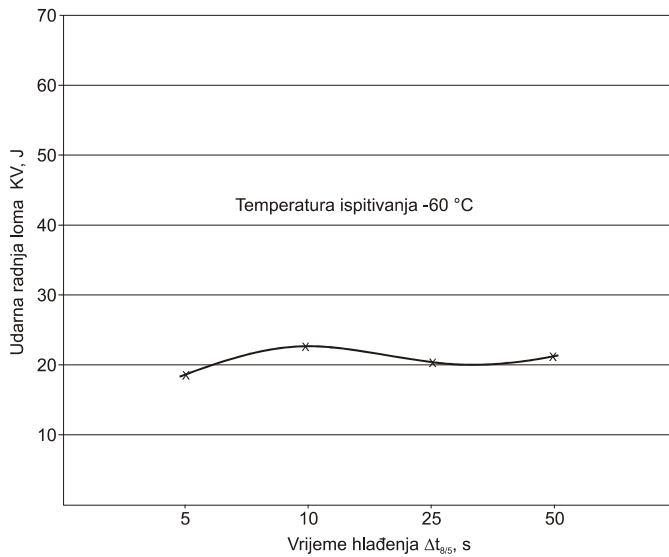
Slika 7.60 Ovisnost udarne radnje loma o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature 0°C.



Slika 7.61 Ovisnost udarne radnje loma o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature -20°C.

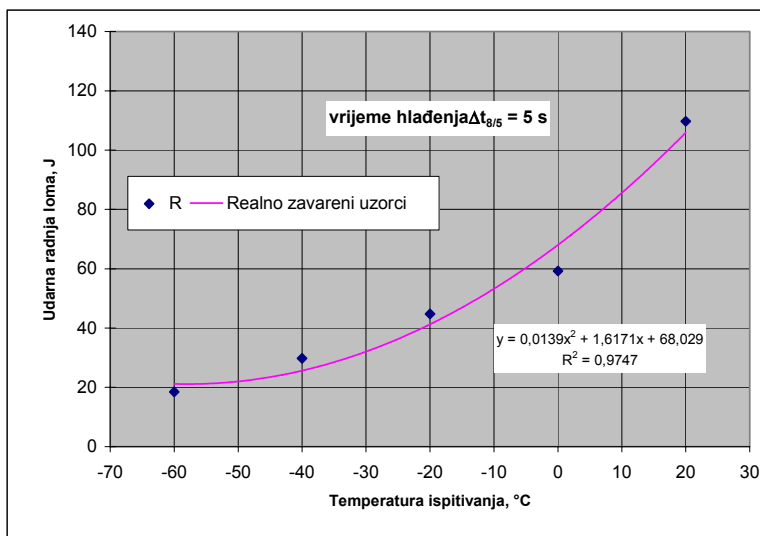


Slika 7.62 Ovisnost udarne radnje loma o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature -40°C.

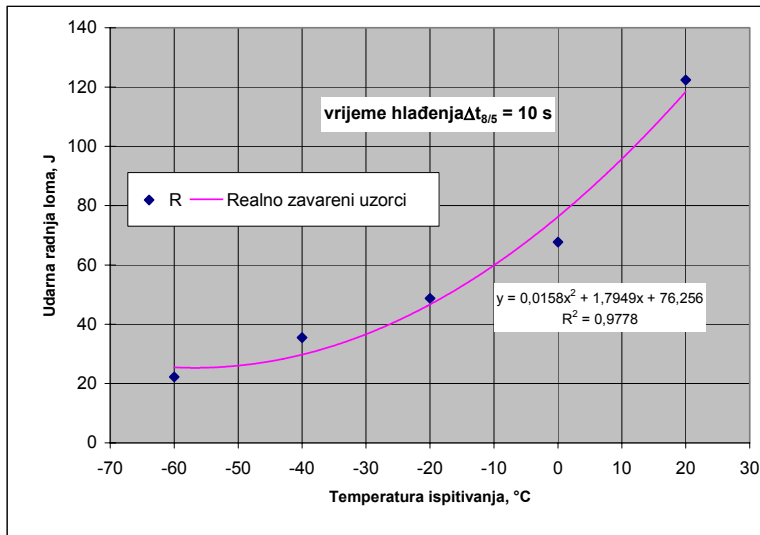


Slika 7.63 Ovisnost udarne radnje loma o vremenu hlađenja $\Delta t_{8/5}$ realno zavarenih uzoraka kod temperature -60°C .

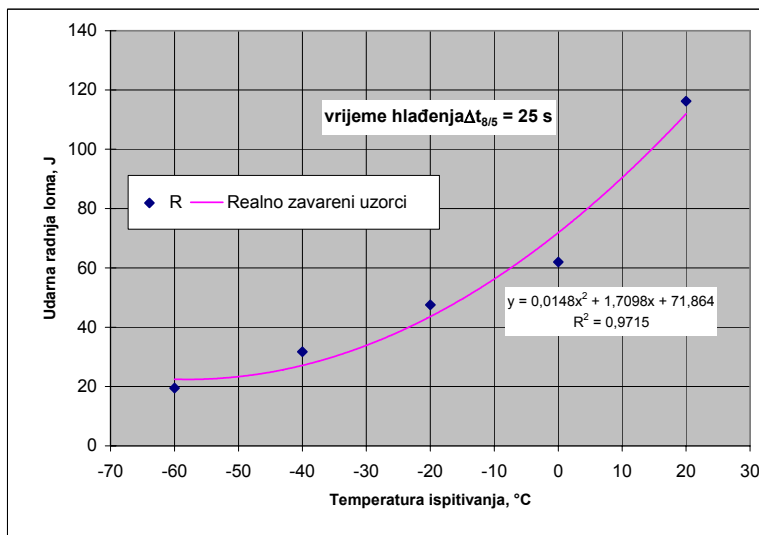
Na slikama 7.64 do 7.67 prikazana je ovisnost udarne radnje loma o temperaturi ispitivanja kod uzoraka koji su zavarivani realnim ciklusom zavarivanja. Uz dijagrame su navedeni podaci o vremenima hlađenja $\Delta t_{8/5}$ tj. o brzini hlađenja.



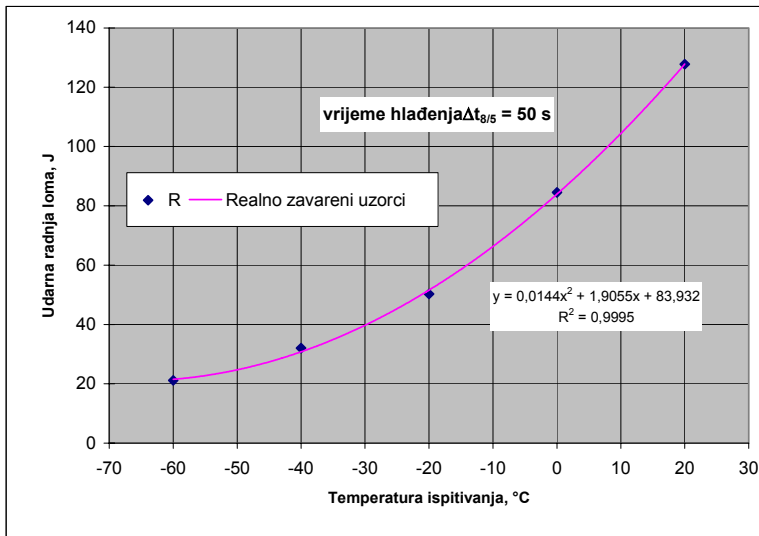
Slika 7.64 Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5\text{s}$.



Slika 7.65 Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10$ s.



Slika 7.66 Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 25$ s.



Slika 7.67 Ovisnost udarne radnje loma o temperaturi kod realno zavarenog uzorka s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s.

Iz dijagrama sa slika 7.55 do 7.63 može se zaključiti sljedeće:

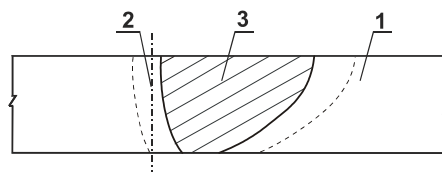
Najniže vrijednosti udarne radnje loma kod ispitivanja realno zavarenih uzoraka dobivene su kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5$ s.

S povećanjem vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$, raste i vrijednost udarne radnje loma, s tim da kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 25$ s ona nešto pada, da bi ponovno rasla kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 50$ s.

Sa sniženjem temperature ispitivanja dolazi do pada udarne radnje loma, tako da srednja vrijednost udarne radnje loma za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5$ s kod temperature ispitivanja -40 °C iznosi približno 27% od srednje vrijednosti udarne radnje loma za isto vrijeme hlađenja kod temperature ispitivanja 20 °C. Za vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5} = 10$ s taj odnos je približno 29%.

7.2.6 Metalografski pregled pojedinih zona realno zavarenog uzorka

Nakon mjerenja tvrdoće, na uzorcima je napravljen metalografski pregled pojedinih zona zavarenog spoja kako je to prikazano na slici 7.68.



Oznaka i lokacija snimanja:

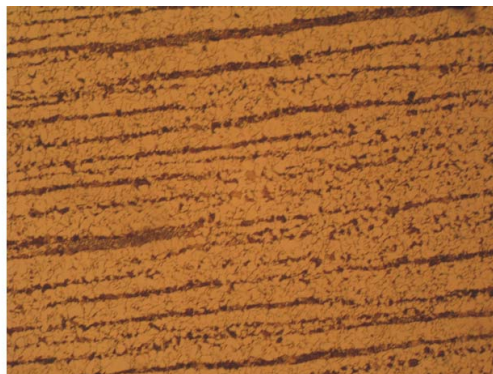
1. Osnovni materijal OM
2. Zona utjecaja topline ZUT
3. Zavar Z

Slika 7.68 Lokacije snimanja mikrostrukture na realno zavarenom uzorku

Na slikama 7.69 do 7.77 prikazane su mikrostrukture osnovnog materijala, zone utjecaja topline i zavara.

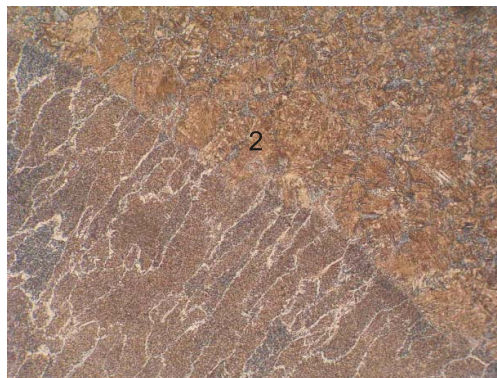


povećanje 50x

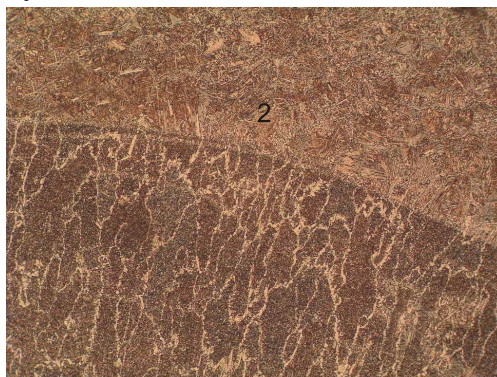


povećanje 100x

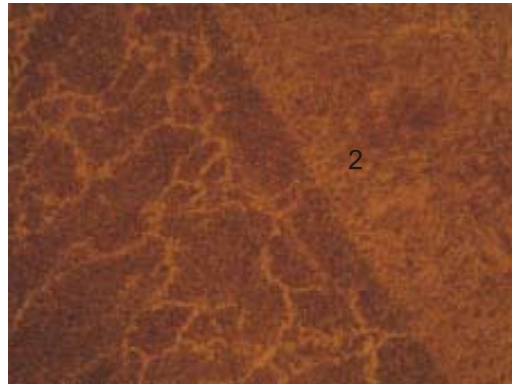
Slika 7.69 Mikrostruktura osnovnog materijala TStE420, normalizirano stanje,



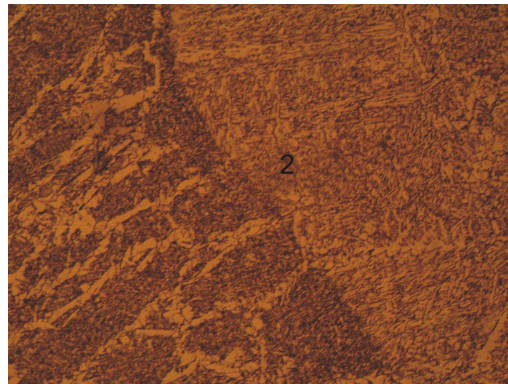
Slika 7.70 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$



Slika 7.71 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$



Slika 7.72 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$



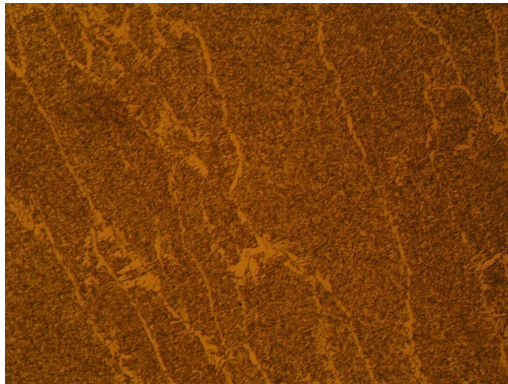
Slika 7.73 Mikrostruktura ZUT-a čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$



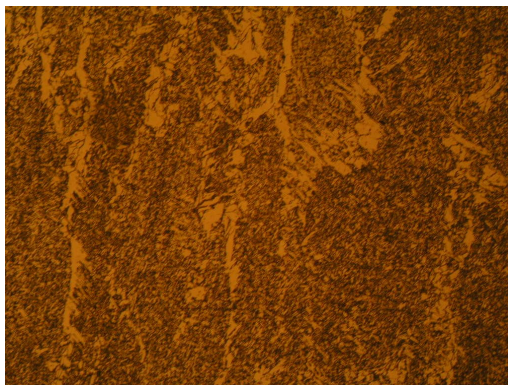
Slika 7.74 Mikrostruktura zavara čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$



Slika 7.75 Mikrostruktura zavara čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$



Slika 7.76 Mikrostruktura zavara čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$



Slika 7.77 Mikrostruktura zavara čelika TStE420, povećanje 200x, vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$

Struktura osnovnog materijala je trakasta feritno-perlitna, što je prikazano na slici 7.69. Veličina zrna osnovnog materijala je bila 11,4; 10,6; 12,2 i 10,8.

U zoni utjecaja topline došlo je do pogrubljenja strukture i povećanja zrna. Strukture se sastoje od martenzita i bainita. (slike 7.70 do 7.73). Najgrublje zrno ima uzorak hlađen s vremenom $\Delta t_{8/5}=50s$ i tu je veličina zrna 6.

Mikrostruktura zavara je bainitno-feritna sa stubastim kristalima, što pokazuju slike 7.74 do 7.77.

Veličina zrna je određivana po ASTM E-112 96 - metodom kruga, metodom crtama i kvantitativnom analizom mikrostrukture prema programu Buehler OMNIMET® Report, koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

7.3. Ispitivanje uzoraka na elektronskom scanning mikroskopu

Pri ispitivanju zavarenih spojeva u velikoj mjeri primjenjuje se i ispitivanje strukturnih pojava. Osobitost tehnologije zavarivanja je da se u području spajanja najčešće odvijaju mnogobrojne strukturne promjene taljenja, izgaranje nekih elemenata i dolegiranje nekim elementima, difuzija, dezoksidacija, kristalizacije, rekristalizacije, prekristalizacije, i dr. Radi toga je i praćenje tih metalurških pojava složeno i zahtijeva ispitivanje strukturnih svojstava.

Princip rada scanning mikroskopa opisan je u literaturi [92]. Ispitivani uzorci su izloženi djelovanju primarnog elektronskog snopa koji scannira dio površine uzorka, tj. čini određeni raster.

Elektronski snop ima relativno mali promjer (ispod $1\mu m$, zavisno od vrste eksperimentalne tehnike) te, zahvaljujući drugim svojstvima elektronskih mikroskopa, ima mogućnost većih povećanja uz veću rezoluciju slike, u usporedbi sa svjetlosno optičkim mikroskopima. Primarni elektronski snop prouzrokuje razne pojave u ispitivanom materijalu, zavisno od atomske izgradnje prisutnih kemijskih elemenata. Među ostalim, primarni elektronski snop izbija elektrone iz elektronskog omotača (sekundarni izbijeni elektroni), jedan dio primarnog elektronskog snopa se odbija (povratno-odbijeni elektroni), materijal apsorbira dio primarnog elektronskog snopa (apsorbirani elektroni), a također pobuđuje rendgensko zračenje koje je karakteristično za svaki element [93].

Sve te pojave registriraju odgovarajući detektori pomoću kojih se dobiju slike stanja i pojava na ispitivanom uzorku. Za opis pojedinih eksperimentalnih tehnika koriste se u literaturi internacionalne oznake koje kratko i jednoznačno opisuju vrstu slike.

U istraživanjima na području zavarivanja korisne informacije o strukturnom stanju materijala mogu dati sljedeće eksperimentalne tehnike:

7.3.1 Scanning elektronska slika

Slika se dobiva detektiranjem sekundarnih (izbijenih) elektrona (SEI, Secondary electron image). U području zavarivanja ta tehnika je prikladna za tzv. fraktografsku analizu lomova. U pojedinim zonama prijeloma zavarenog spoja može se utvrditi karakter loma, pa se tako dobiva informacija o tome u kojoj zoni je nastupio krhki lom.

Pri ispitivanju nije potrebna nikakva posebna priprema uzorka, ispituju se svježi nekontaminirani uzorci veličine do $\varnothing 50 \times 30mm$. S većih uzoraka može se uzeti odgovarajući otisak (replika), koja vjerodostojno predstavlja originalni uzorak.

Za fraktografsku analizu prijelomnih površina potrebno je odgovarajuće predznanje iz fraktografije kao i iskustvo.

Prilozi struktura nakon scanning analize pružaju mogućnost uočavanja područja žilavog (duktilnog) i krhkog loma na prijelomnoj površini.

Žilavi lom nastaje nakon različito velike plastične deformacije.

Za njega su karakteristične jamice koje nastaju kada se poslije velike smične deformacije potrgaju ligamenti prostornih mikroudubljenja. Ta mikroudubljenja su nastala udruživanjem praznih prostora (vakancija), koje stvaraju pomični pragovi dislokacija ispred vrha pukotine na različitim stranim mikrotjelima kao što su precipitati i uključci.

Mikroudubljenja rastu pri povećanju plastične deformacije s resorpcijom dislokacija i udruživanjem manjih jamica. Dokaz za koalescenciju je valovito dno velikih jamica.

Krhki lom oblikuju realne ravne pločice (facete) nastale cijepanjem u svakom kristalnom zrnju u ravnini napredovanja pukotine. Autor [94] navodi da krhki lom napreduje brzinom s najviše 0,38 brzine zvuka u čeliku

Mehanizam krhke dekohezije je elastično rastezanje atomskih veza do konačnog razdvajanja. Pošto je orijentacija kristalne mrežice u različitim zrnima različita, različit je i prostorni položaj kristalne plohe npr. plohe (001) u α -željezu, u kojoj se to cijepanje izvršilo [94].

Kako se pri ispitivanju udarne radnje loma pokazalo da s povećanjem vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ udarna radnja loma ima više vrijednosti a nakon toga pada, izvršen je pregled i analiza karakterističnih uzoraka na scanning elektronskom mikroskopu.

7.3.2. Rezultati ispitivanja na elektronskom mikroskopu

Ukupno je skenirano deset uzoraka na elektronskom mikroskopu tipa "Quanta 200" američke tvrtke FEI s povećanjem do 50.000 puta. Pri ispitivanju je postignut vakuum u komori za ispitivanje od 5×10^{-3} Pa, a ispitivanje je provedeno na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, Geološkom odsjeku u Zagrebu.

Analiza i procjena udjela žilavog loma provedena je na Metalurškom institutu u Zenici prema ASTM E 23-96 [95].

Karakteristike ispitivanja skeniranih uzoraka su prikazane u tablici 7.13. i 7.14.

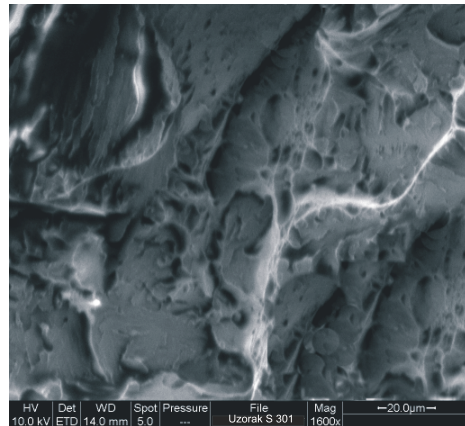
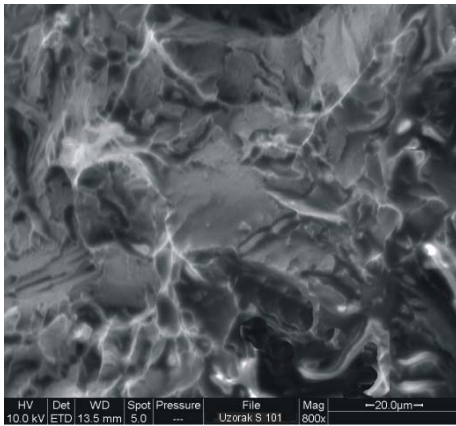
Tablica 7.13. Prikaz karakteristika skeniranih simuliranih uzoraka na elektronskom mikroskopu (vidjeti str.103, 110 i 111)

OZNAKA UZORKA	S101	S301	S111	S311	S121	S321
KV, J	59,0	38,0	57,0	36,0	42,0	24,0
Temperatura ispitivanja	20 °C	-20 °C	20 °C	-20 °C	20 °C	-20 °C
Vrsta loma	žilavi lom	krhki lom	žilavi lom	krhki lom	~ 80% žilavi lom	krhki lom

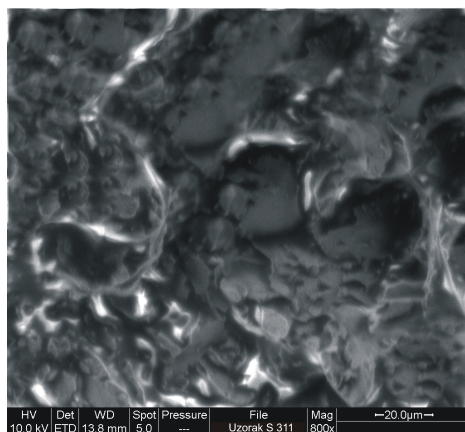
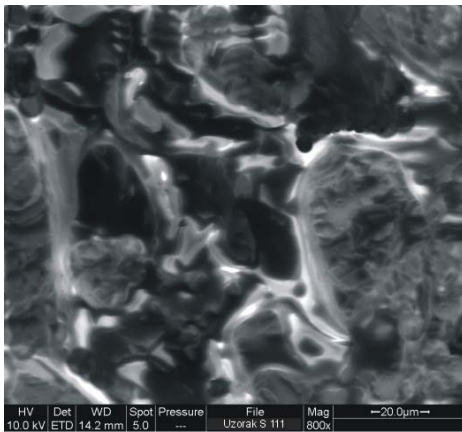
Tablica 7.14. Prikaz karakteristika skeniranih realno zavarenih uzoraka na elektronskom mikroskopu (vidjeti str.130, 141 i 143)

OZNAKA UZORKA	R101	R301	R111	R311
KV, J	111,0	45,0	124,0	48,0
Temperatura ispitivanja	20 °C	-20 °C	20 °C	-20 °C
Vrsta loma	žilavi lom	2/3 žilavi lom	žilavi lom	~ 80% žilavi lom

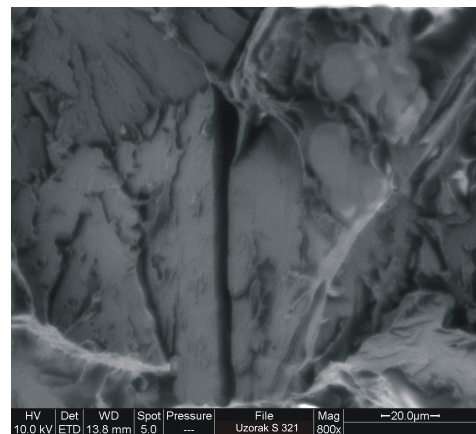
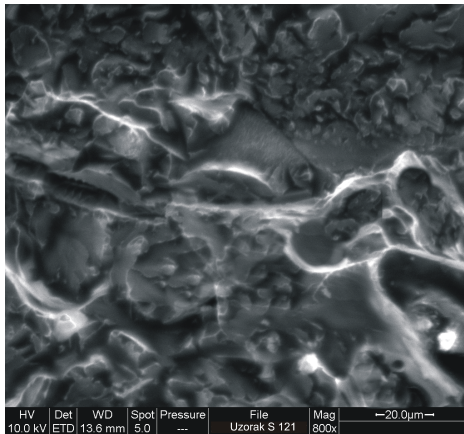
Na slikama 7.78 do 7.82 prikazane su prijelomne površine uzorka iz tablica 7.13. i 7.14.



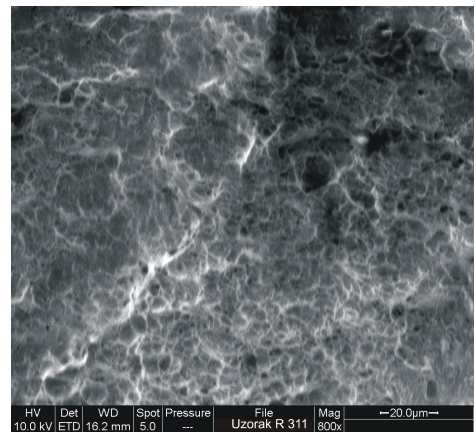
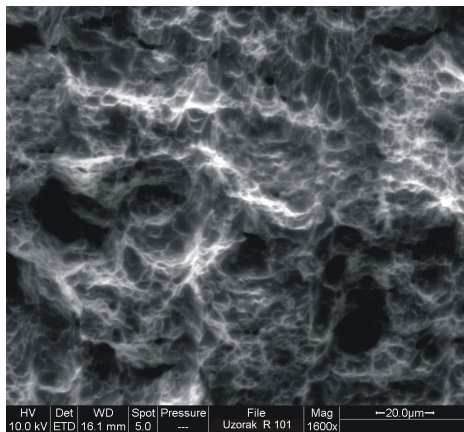
Slika 7.78 Prijelomne površine uzorka S101 i S301 ($\Delta t_{8/5} = 5s$)



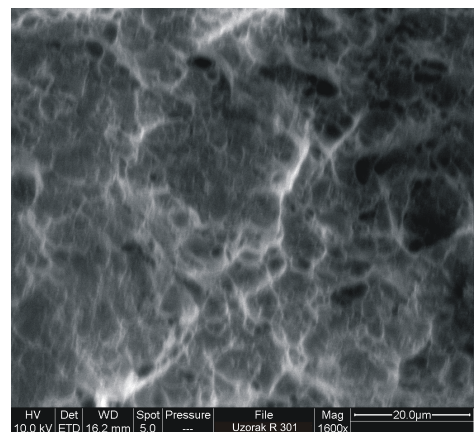
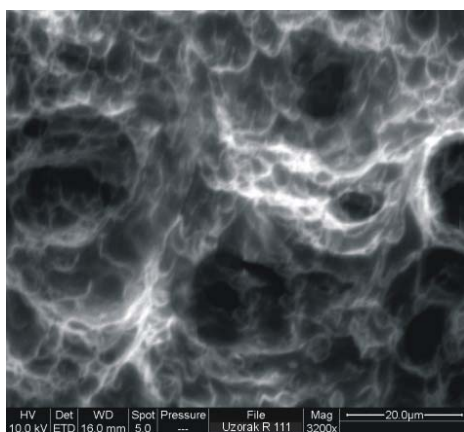
Slika 7.79 Prijelomne površine uzorka S111 i S311 ($\Delta t_{8/5} = 10$)



Slika 7.80 Prijelomne površine uzorka S121 i S321 ($\Delta t_{8/5} = 25s$)



Slika 7.81 Prijelomne površine uzorka R101 i R311 ($\Delta t_{8/5} = 5s$)



Slika 7.82 Prijelomne površine uzorka R111 i R311 ($\Delta t_{8/5} = 10s$)

Tipični primjeri krhkog i žilavog prijeloma prikazani su na slikama 7.80 i 7.81.

Kod uzorka S 321 uočava se da prijelom ima karakteristike krhkog loma (slika 7.80). Na slici se mogu uočiti ravne pločice (facete) nastale cijepanjem u svakom kristalnom zrnju u ravni napredovanja pukotine. Mjesta zastoja širenja mikropukotine se konično presijecaju, a njihovi rubovi su klinasto stanjeni.

Kod realno zavarenog uzorka R111 sa slike 7.81 uočava se da prijelom ima karakteristike žilavog loma, premda je strukturno stanje u zoni loma različito, pa su i mehanizmi loma različiti.

Vidljivo je prisustvo grubih jama, grebena kidanja po bridovima određenih zona i usmjerenih jamica po granama oblika dendrita. Otvor jamica je usmjeren u pravcu "izvora" prijeloma, što ukazuje da se radi o smicajnom razaranju. Koalescencija praznina se dogodila kao posljedica plastične deformacije na vrhu mikropukotine i prekidom ligamenata među mikropukotinama.

8. ZAKLJUČAK

Zavarivanje mikrolegiranih čelika može se izvesti većinom uobičajenih postupaka. Pri tome se dobivaju zavareni spojevi odgovarajuće čvrstoće i žilavosti, koji se mogu uspoređivati sa svojstvima osnovnog materijala.

Brzina hlađenja, tj. vrijeme hlađenja $\Delta t_{8/5}$ ima značajan utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Odabirom optimalne brzine hlađenja može se postići zadovoljavajući odnos tvrdoće i udarne radnje loma, tj. može se postići mikrostruktura koja je manje podložna nastanku i razvoju hladnih pukotina.

Pri eksperimentalnim zavarivanjima korištena je suvremena tehnika registriranja parametara zavarivanja pomoću tzv. on-line monitora. Ovakav pristup praćenju i registriranju parametara zavarivanja pruža jasniju sliku glede ocjene stabilnosti procesa zavarivanja i točnijeg određivanja unesene energije. U sklopu primjene uređaja postoji mogućnost provođenja statističke obrade parametara zavarivanja nakon zavarivanja.

Pri smanjenju brzine hlađenja $w_{8/5}$, tj. povećanju vremena hlađenja 800 °C do 500 °C ($\Delta t_{8/5}$), dolazi do pada tvrdoće kod simuliranih uzorka, što je prikazano na slici 7.13 (str. 111). Prosječna tvrdoća HV10 mjerena konturnom metodom, kod vremena $\Delta t_{8/5}=50$ s iznosi 66% od vrijednosti tvrdoće kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5$ s.

Maksimalne vrijednosti tvrdoće u ZUT-u bile su oko 400 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5$ s, 390 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=10$ s, 300 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=25$ s i 260 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=50$ s. Prosječna tvrdoća HV10 mjerena po presjeku simulirane probe kod vremena $\Delta t_{8/5}=50$ s iznosi 65% od vrijednosti tvrdoće kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5$ s.

Nakon simulacije zavarivanja u jednom prolazu maksimalne vrijednosti tvrdoće na ispitivanim uzorcima su bile nešto iznad 400 HV, što znači da postoji vjerojatnost nastanka pukotina u eksploataciji uz naprezanje te korozivni medij kojem je izložen zavareni spoj.

Udarne radnje loma kod simuliranih uzoraka, također, opada s porastom vremena hlađenja ($\Delta t_{8/5}$) i kod temperature 20 °C vrijednost udarne radnje loma kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=50$ s iznosi 60% od vrijednosti udarne radnje loma kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5$ s.

Ova razlika se smanjuje sa sniženjem temperature, tako da kod temperature - 40 °C vrijednost udarne radnje loma kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=50$ s iznosi 26% od vrijednosti udarne radnje loma kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5$ s.

Struktura osnovnog materijala je trakasta feritno-perlitna. Veličina zrna je 10.

U zoni utjecaja topline došlo je do pogrubljenja zrna. Struktura se sastoji od gornjeg bainita i martenzita (slike 7.30 do 7.33). U osnovnoj strukturi se također pojavljuje Widmannstättenova struktura koja negativno utječe na udarnu radnju loma.

Najgrublje zrno ima uzorak hlađen s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$ i tu je veličina zrna 4. Veličina zrna ima utjecaj na udarnu radnju loma, tako da je najniža kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$, što je vidljivo na slikama (7.15 do 7.18)

Pri ispitivanju tvrdoće realno zavarenih uzoraka uočava se pad tvrdoće u ZUT-u s porastom vremena hlađenja, što je prikazano na slikama 7.56 do 7.58.

Prosječna tvrdoća u ZUT-u na uzorcima hlađenim s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$ iznosi 72% vrijednosti tvrdoće izmjerene na uzorcima hlađenim s vremenom hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$.

Maksimalne vrijednosti tvrdoće u ZUT-u bile su oko 345 HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$, 317HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$, 287HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$ i oko 250HV kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$.

Udarna radnja loma kod realno zavarenih uzoraka je najniža kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$. Ona se povećava kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$, a nakon toga pada, tako da kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$ je nešto viša, nego kod vremena hlađenja 5s. S daljnjim porastom vremena hlađenja dolazi i do porasta udarne radnje loma (slike 7.59 do 7.63).

Mikrostruktura zone utjecaja topline je grublja bainitno-martenzitna (slike 7.70 do 7.73).

S porastom vremena hlađenja raste i veličina zrna, s tim da je veličina zrna kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$, manja nego kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$. To je svakako jedan od razloga zbog čega udarna radnja loma ima više vrijednosti kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$, nego kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=5s$. Zaključak je da veličina zrna kod realno zavarenih uzoraka nema dominantan utjecaj na vrijednost udarne radnje loma.

Mikrostruktura zavara je bainitno-feritna sa stubastim kristalima, što prikazuju slike 7.74 do 7.77.

Kako bi se pojasnio utjecaj strukture na udarnu radnju loma vršeno je i ispitivanje uzoraka na elektronskom scanning mikroskopu.

Tipični primjeri krhkog i žilavog prijeloma prikazani su na slikama 7.80 i 7.81.

Promatranjem struktura na elektronskom scanning mikroskopu može se zaključiti da je kod simuliranih uzoraka dominantna veličina zrna pa stoga i imamo pri nižim temperaturama ispitivanja pojavu transkristalnog krhkog loma.

Kod realno zavarenih uzoraka udio žilavog loma nije ispod trideset posto. Veličina zrna je manja kod realnih zavara zbog gradijenta temperature, koji ne postoji kod simuliranja. Zbog svega navedenog i imamo pojavu da su udarne radnje loma više kod realno zavarenih uzoraka nego kod simuliranih uzoraka.

Rezultati istraživanja pokazuju svu kompleksnost problema kod izbora tehnologije simuliranja ZUT-a kao najkritičnijeg dijela zavarenog spoja. Iz ovih rezultata proizlazi da količina unesene topline u mnogome ovisi od broja prolaza, te u tom pravcu treba tretirati i realno zavarivanje ove vrste čelika.

Temeljem provedenih eksperimenata kao i dosadašnjih saznanja i iskustava iz prakse, pokazalo se povoljnije zavarivati u više prolaza ako se radi o zavarivanju mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće veće debljine (u ovom istraživanju debljina materijala je bila $\delta=15mm$). Razlog tomu je i pojava da će se uz liniju staljivanja

materijala osim mikrostruktura jednoprolaznog ZUT-a, naći i različite mikrostrukture višeprolaznih zona utjecaja topline. Ovakve mikrostrukture uvjetuju i bolja mehanička svojstva, nego što ih imaju uzorci simulirani u jednom prolazu.

Parametri zavarivanja primijenjeni kod simuliranog ciklusa zavarivanja daju nam najnepovoljniju grubozrnatu mikrostrukturu jednoličnu po čitavom presjeku simuliranog uzorka. Posljedica toga je najviša vrijednost tvrdoće i najniža vrijednost udarne radnje loma. Ovako određeni parametri zavarivanja predstavljaju polaznu osnovu za izbor parametara realnog zavarivanja kojim će se dobiti sitnozrnata mikrostruktura u ZUT-u a time i povoljnije vrijednosti udarne radnje loma i niže vrijednosti tvrdoće.

Parametri realnog zavarivanja korišteni pri ispitivanjima u sklopu ovog rada kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=10$ s, dali su uobičajene vrijednosti udarne radnje loma pri niskim temperaturama -20 i -40 °C (slika 7.20), te se stoga i preporuča ovo vrijeme hlađenja ili neznatno više kod realnog zavarivanja.

Provedenim istraživanjima u sklopu ove radnje ostvareni su doprinosi, od kojih su najznačajniji:

- mogućnost optimiranja parametara zavarivanja temeljem dobivenih eksperimentalnih rezultata ispitivanja utjecaja brzine hlađenja na tvrdoću i udarnu radnju loma mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće TStE 420,
- pri ispitivanjima na toplinski simuliranim uzorcima, utvrdilo se da je jednoprolazni grubozrnati ZUT sa značajno nižim vrijednostima udarne radnje loma i nešto višim vrijednostima tvrdoće, u odnosu na praktično izvedene jednoprolazne zavarene spojeve. Razlog tomu je što su dobivena mehanička svojstva kod simuliranih uzoraka posljedica ugrijavanja i hlađenja dok je kod realnih uzoraka i dodatni materijal utjecao na nastalu mikrostrukturu, a time i na postignuta mehanička svojstva.
- optimalni unos efektivne energije pri zavarivanju odabranog mikrolegiranog čelika povišene čvrstoće bi trebao biti približno 1500 J/mm (što odgovara približno trajanju hlađenja od 800 na 500 °C - 10 do 12 s), a preporučuje se zavarivanje MAG-postupkom zavarivanja s praškom punjenom žicom, karakteristika prikazanih u tablici 7.9.,
- dobiveni podaci o fraktografskim ispitivanjima prijelomnih površina (primjenom scanning mikroskopije i uobičajene analize mikrostrukture) i ostali podaci o ispitivanjima mehaničkih svojstava na jednoprolazno i višeprolazno toplinski simuliranim uzorcima kao i na realno zavarenim spojevima predstavljaju doprinose koji mogu poslužiti proizvođačima čelika, ali i projektantima i tehnolozima u praksi kao pomoć kod pristupa izboru parametara zavarivanja i ujedno kao i upozorenje na složenost uvjeta zavarljivosti i primjene mikrolegiranih čelika povišene čvrstoće.

U nastavku istraživanja bilo bi poželjno opsežnije istraživanje transformacije strukture pri zavarivanju potpomognuto numeričkim, analitičkim i eksperimentalnim metodama, kao i proširenje istraživanja na ostale mikrolegirane čelike.

Također, bi se mogla opsežnije istražiti korelacija između tvrdoće i udarne radnje loma u zoni utjecaja topline, kao i ovisnost njihovih promjena o unesenoj toplini.

LITERATURA

- [1] *LUKAČEVIĆ Z.* RAZVOJ ZAVARIVANJA POSUDA POD TLAKOM. ZBORNIK RADOVA "STRATEGIJA RAZVOJA ZAVARIVANJA U HRVATSKOJ".HDTZ, OPATIJA, 1993.
- [2] *JAKŠIĆ S.
VELJAČA I.
ŠEPAROVIĆ B.* ISPITIVANJE OBJEKATA U EKSPLOATACIJI. ZAVARIVANJE 5-6, 1989.
- [3] *McHENRY H.I
READ D.T.
SHIVES T.R.* FAILURE ANALYSIS OF AN AMINE-APSORBER PRESSURE VESSEL. MATERIALS PERFORMANCE, (26), 8, PP. 18-24, 1987.
- [4] *HRIVNÁK I.* TEÓRIA ZVARITEL'NOSTI KOVOV A ZLIATIN VYDAVATEL 'STVO SLOVENSKEJ AKADEMIE VIED, BRATISLAVA, 1989.
- [5] *GABROVŠEK M.* UTJECAJ METALURGIJE IZRADE ČELIKA NA TEHNOLOŠKA SVOJSTVA LIMOVA POVIŠENE ČVRSTOĆE. ZAVARIVANJE 5-6, 1989.
- [6] *NOVOSEL M.
KRUMES D.* ŽELJEZNI MATERIJALI II DIO "KONSTRUKCIJSKI ČELICI", STROJARSKI FAKULTET U SLAVONSKOM BRODU. SLAVONSKI BROD, 1995.
- [7] *STRASSBURGER C.* ENTWICKLUNGEN ZUR FESTIGKEITSSTEIGERUNG DER STÄHLE. VERLAG STAHLISEN MBH. DÜSSELDORF, 1976
- [8] *NOVOSEL M.
KRALJ S.* ČELICI POVIŠENE I VISOKE ČVRSTOĆE ZAVARIVANJE 3-4, 1991.
- [9] *BAGGERUD A.* METALURGIJA ZAVARIVANJA, DOKUMENT MIZ-a XIV-196-64
- [10] *TANAKA T.* CONTROLLED ROLLING OF STEEL PLATE AND STRIP, INTERNATIONAL METALS REVIEWS, 4, PP. 185-211, 1981.
- [11] *PUCHACZEWSKI N.* PRIMJENA TERMOMEHANIČKIH OBRADENIH ČELIKA POVIŠENE ČVRSTOĆE ZA IZRADU BRODSKOG TRUPA I POMORSKIH KONSTRUKCIJA, ZBORNIK RADOVA MEĐUNARODNOG SAVJETOVANJA "ZAVARIVANJE U BRODOGRADNJI". HDTZ , SPLIT, 1986.
- [12] *NOZAKI N.
BESSYO K.
HASHIMOTO T.* DELOPMENT OF SHT PROCES FOR MANUFACTURING HIGH TOUGHNESS STEEL BY TERMOMECHANICAL TREATMENT, SUMITOMO TECHNICAL BULLETIN 11, 1979.
- [13] *HUMPHRIES M.S.
LAUGHLIN J.E.* STATUS OF MATERIALS FOR HYDROGEN SERVICE AND FUTURE TECHNICAL NEEDS FOR THE PETROLEUM INDUSTRY, IC ON INTERACTION OF STEELS WITH HYDROGEN IN PETROLEUM INDUSTRY PRESSURE VESSEL SERVICE, M.P.C., PARIS, 1989.

- [14] *DE BOER H. SCHRIEVER U.* ERFAHRUNGEN BEI DER HERSTELLUNG VANADIENLEGIERTER HSLA STAHL, THYSSEN TECHNISCHE BERICHTE, HEFT 21, 1989.
- [15] *BENTLEY K.P.* PRECIPITATION DURING STRESS RELIEF OF WELDS IN Cr-Mo-V STEELS, BRITISH WELDING JOURNAL, X 1964.
- [16] *MURRAY J.D.* STRESS-RELIEF CRACKING IN CARBON AND LOW ALLOY STEELS, BRITISH WELDING JOURNAL, VIII 1967.
- [17] *EASTERLING K.* INTRODUCTION TO THE PHYSICAL METALLURGY OF WELDING, BUTTERWORTHS & CO (PUBLISHERS) LTD, 1983.
- [18] *PIEHL K.H.* VERHALTEN DER DRUCKBEHALTER STAHL BEIM SCHWEISSEN, STAHL UND EISEN, 93, 1973.
- [19] *WATANABE I. SUZUKI M.* NEW STEELS FOR HIGH HEAT INPUT WELDING, METAL CONSTRUCTION, 16 1984.
- [20] *AŽMAN S. SIKOŠEK D.* ZAVARIVANJE KONSTRUKCIONIH MIKROLEGIRANIH ČELIKA NA BAZI Ni-Mo-Nb I PRAKTIČNA ISKUSTVA KOD IZRADE, PRERADE I UPOTREBE PUNJENIH ŽICA, ŽELEZARNA JESENICE, 1986.
- [21] DIN 8528 TEIL 1. SCHWEISSBARKEIT: METALISCHEWERKSTOFFE, BEGRIFFE, BEUTH VERLAG, BERLIN, 1989.
- [22] *DUNĐER M. KRALJ S.* PRISTUP ODREĐIVANJU PARAMETARA ZAVARIVANJA POBOLJŠANOG ČELIKA Ck 45 I 25 CrMo 4, ZAVARIVANJE1/2, ZAGREB 2002.
- [23] *KARLSSON L.* MATHEMATICAL MODELS APPROXIMATING BUTT WELDING PROCESS COURSE AND PREVENTION OF HOT CRACKING, IIW DOC. X-806-76.
- [24] *NAKAMURA A. INGAKI M. MITANI Y.* COLD CRACKING IN MULTILAYER WELDS OF LOW-ALLOY-HIGH STRENGTH STEEL, WELDING JOURNAL, 47 1968.
- [25] *DUNĐER M.* ODREĐIVANJE PARAMETARA ZAVARIVANJA ČELIKA ZA POBOLJŠAVANJE. MAGISTARSKI RAD. FSB ZAGREB ,1997.
- [26] *MIŠINA N.* ISTRAŽIVANJE UTJECAJA TOPLINSKE OBRADNE NA SVOJSTVA ZAVARENIM SPOJEVA MIKROLEGIRANIH ČELIKA. DOKTORSKA DISERTACIJA, FSB ZAGREB 1991.
- [27] *SEMJAN V.* TEORIJA ZAVARLJIVOSTI ČELIKA. ENERGOINVEST INSTITUT ZA ZAVARIVANJE. SARAJEVO, 1989.
- [28] *RADOVIĆ A.* SKLONOST PREMA KRHKOM LOMU ZAVARENIM SPOJEVA ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE, ZAVARIVAČ, 1974.
- [29] *LUKAČEVIĆ Z.* PROJEKTIRANJE, PROIZVODNJA I MONTAŽA PROIZVODA IZ VISOKOČVRSTIH ČELIKA. ZAVARIVANJE 5-6,1989.

- [30] *HARISS B.*
BUNSELL A.R. STRUCTURE AND PROPERTIES OF ENGINEERING MATERIALS, LANGMAN, LONDON AND NEW YORK, 1977.
- [31] *BEARA LJ.* UTJECAJ PARAMETARA ZAVARIVANJA NA SVOJSTVA ZAVARA MIKROLEGIRANIH ČELIKA IZVEDENIH ELEKTORLUČNIM ZAVARIVANJEM POD ZAŠTITOM CO₂. DOKTORSKA DISERTACIJA, FSB ZAGREB 1988.
- [32] *LUKAČEVIĆ Z.* IZBOR OPTIMALNOG POSTUPKA ZAVARIVANJA VISOKOČVRSTIH ČELIKA. ZAVARIVANJE 5-6, 1973.
- [33] *SANDSTROM R.*
GRAHN H. UTJECAJ TOPLINSKE OBRADJE POSLIJE ZAVARIVANJA NA KRHKI LOM, ZBORNIK RADOVA MEĐUNARODNOG SAVJETOVANJA "NAPONI I DEFORMACIJE U ZAVARENIM KONSTRUKCIJAMA", ZAGREB, 1982.
- [34] *PROBST R.*
HEROLD H. KOMPENDIUM DER SCHWEISSTECHNIK SCHWEISSMETALLURGIE DVS-VERLAG GMBH, DÜSSELDORF, 1997.
- [35] *GALOVIĆ A.* TEMPERATURNO POLJE KOD ZAVARIVANJA. MAGISTARSKI RAD. FSB ZAGREB, 1979.
- [36] *RYKALIN, N.N.* BERECHNUNG DER WÄRMEVORGÄNGE BEIM SCHWEISSEN. VEB VERLAG TECHNIK BERLIN, 1957.
- [37] *RYKALIN, N.N.* DIE WÄRMEGRUNDLAGEN DES SCHWEISSVORGANGES, VERLAG TECHNIK BERLIN, 1952.
- [38] *GALOVIĆ A.* PRIMJENA METODE KONAČNIH ELEMENATA NA PRORAČUN NESTACIONARNOG POLJA PRI ZAVARIVANJU RAVNIH PLOČA. ZAVARIVANJE 3, 1980.
- [39] *SAMARDŽIĆ I.*
GALOVIĆ A.
GALOVIĆ M. NESTACIONARNOST TEMPERATURNIH POLJA PRI ZAVARIVANJU. ZAVARIVANJE 36, 1993.
- [40] *SAMARDŽIĆ I.*
STOJĆ A. THREDIMENSIONAL TEMPERATURE FIELD DISTRIBUTION DURING WELDING. 4TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, HRVATSKA UDRUGA PROIZVODNOG STROJARSTVA, OPATIJA, 1997.
- [41] *SAMARDŽIĆ I.,*
STOJĆ A. WEAKENING DUE TO TEMPERATURE FIELD NONSTATIONARITY DURING WELDING. THE INTERNATIONAL WELDING CONFERENCE, JAPAN-SLOVAK WELDING SYMPOSIUM, KOŠICE, 1996.
- [42] *BLUME F.*
KALISCH D. BERECHNUNG VON TEMPERATURFELDERN BEIM MAG-SCHWEISSEN MIT DER EVD, SCHWEISSTECHNIK, 12/1984.
- [43] STAHL-EISEN-WERKSTOFFBLÄTER (SEW) 088, SCHWEISSGEEIGNETE FEINKORNBAUSTÄHLE, VERLAG STAHL EISEN MBH, DÜSSELDORF, 1983.
- [44] *SEYFFARTH P.* ATLAS SCHWEISS-ZTU-SCHAUBILDER. DVS-VERLAG GMBH, DÜSSELDORF 1992.

- [45] *UWER, D. DEGENKOLBE, J.* TEMPERATURZYKLEN BEIM LICHTBOGEN - SCHWEISSEN - BERECHNUNG VON ABKÜHLZEITEN, SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN, 12/1972., PP. 1-5
- [46] *WINKLER F.* SCHWEISSEN VON HÖHERFESTEN FEINKORNBAUSTÄHLEN. BÖHLER SCHWEISSTECHNIK AUSTRIA GMBH, 1989.
- [47] *HRIVNÁK I.* ZAVARLJIVOST ČELIKA. IRO "GRAĐEVINSKA KNJIGA", BEOGRAD, 1982.
- [48] *RUGE J.* HANDBUCH DER SCHWEISSTECHNIK. BAND I: WERKSTOFFE, SPRINGER-VERLAG, BERLIN, 1980.
- [49] *IMAMOVIĆ A.* UTICAJ TERMIČKOG ZAVARIVAČKOG CIKLUSA NA POJAVU KRTHI PODRUČJA U ZONI UTJECAJA TOPLINE VISOKOČVRSTIH ČELIKA. DOKTORSKA DISERTACIJA. MOSTAR, 1990.
- [50] *SUZUKI H.* CARBON EQUIVALENT AND MAXIMUM HARDNESS. TRANSACTION OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, VOL. 15, NO.1, APRIL 1984.
- [51] *SUZUKI H.* A NEW FORMULA FOR ESTIMATING HAZ MAXIMUM HARDNESS IN WELDED STEEL. TRANSACTION OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, VOL. 16, NO.2, OCTOBER 1985.
- [52] *YURIOKA N.* PREDICTION OF HAZ HARDNESS OF TRANSFORMABLE STEELS. METAL CONSTRUCTION, APRIL, 1987.
- [53] *CHAN B.* WELDING HARDNESS – COMPUTER PROGRAM .DEPARTMENT OF MECHANICAL AND AEROSPACE ENGINEERING. FACULTY OF MECHANICAL AND AEROSPACE ENGINEERING, OTTAWA, CANADA, 1994.
- [54] *LUKAČEVIĆ Z. SAMARDŽIĆ I.* PRIMJEDBE NA RAČUNANJE I MJERENJE UNOSA TOPLINE PRI REL ZAVARIVANJU SITNOZRNATIH ČELIKA, ZAVARIVANJE 2 ,1988.
- [55] *LIMPEL I.* PROBLEMATIKA ZAVARIVANJA I ZAVARLJIVOST ČELIKA POVIŠENE I VISOKE ČVRSTOĆE. ZBORNİK REFERATA "ZAVARIVANJE METALA POVIŠENE I VISOKE JAČINE", HDTZ, ZAGREB 1974.
- [56] *WEGST C.W.* STAHLSCHLÜSSEL, VERLAG STAHLSCHLÜSSEL WEGST GMBH, DÜSSELDORF, 2001.
- [57] *THAULOW C. i dr.* THE HAZ TOUGHNESS OF LOW CARBON MICROALLOYED STEELS IIW DOC. X-119-96, 1996.
- [58] *BERKHOUT C.F.* A COMPARASION OF THE MISROSTRUCTURES IN THE SIMULATED AND WELD HAZ. A RESEARCH APPLICATION SEMINAR, LONDON, APRIL 1972.

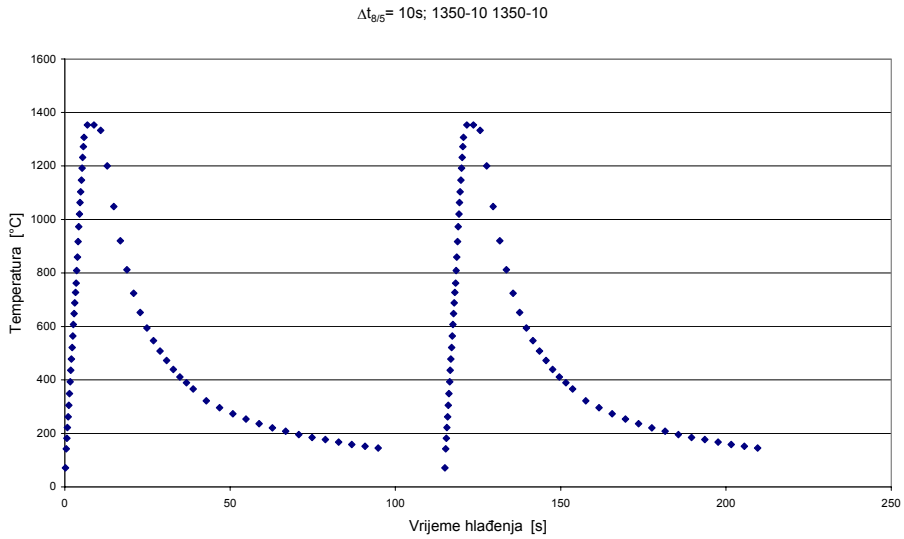
- [59] *CARDINAL N.* FACTORS AFFECTING THERMALLY SIMULATED HAZ MICROSTRUCTURES. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING. PART 6, PP. 35-4, ROSA G. FLORENCE, ITALY, 1996.
- [60] *IMAMOVIĆ A.
SEMJAN V.* SIMULACIJA TOPLINSKOG ZAVARIVAČKOG CIKLUSA KAO METODA ZA ISTRAŽIVANJE ZAVARLJIVOSTI ZAVARIVANJE 5/6, 1991.
- [61] *HANNERZ N.E.:* IDEALIZED THERMAL CYCLE FOR WELD HEAT ZONE SIMULATION OF STEEL, IIW DOC. IX-1436-86, 1986.
- [62] *BERNASOVSKY P.:* THE STUDY OF STEEL WELDABILITY BY SIMULATION OF THERMAL AND DEFORMATION CYCLES OF WELDING ON THE EQUIPMENT THERMORESTOR-W, IIW DOC. IX-975-76, 1976.
- [63] *BOWKER J.T.,
TUGHNES S.
McGRATH J.T.* EVALUATION OF THE MICROSTRUCTURE RELATIONSHIP OF SIMULATED REGIONS IN HSLA STEEL, IIW DOC. IX-1568-89, 1989.
- [64] *YAN CHENG.
CHEN J.H.* MICROSTRUCTURE AND TOUGHNESS OF LOCAL BRITTLE ZONES OF HSLA STEEL MULTIPASS WELD METALS, IIW DOC. II-1233-94, II-A-912-94, 1994.
- [65] *TODIĆ B.* PRILOG OCJENI ZAVARLJIVOSTI METODOM SIMULACIJE TOPLINSKOG CIKLUSA ZAVARIVANJA, DOKTORSKA DISERTACIJA, STROJARSKI FAKULTET, ZENICA, 1989.
- [66] *SEIFFARTH P.* BERECHNUNG DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN IN DER WÄRMEEINFLUSSZONE VOM SCHWEISSVERBINDUNGEN NIEDERLEGIRTE STÄHLE MIT PROGRAMMIERBARER TASCHENRECHNER, SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN 7/1983.
- [67] *BECKERT M.* KOMPENDIUM DER SCHWEISSTECHNIK. BAND 3. EIGNUNG METALLISCHER WERKSTOFFE ZUM SCHWEISSEN. DVS-VERLAG GMBH, DÜSSELDORF, 1997.
- [68] *IMAMOVIĆ A.
SEMJAN V.* POJAVE KRHKOSTI U ZUT-U ČELIKA HSLA. ZAVARIVANJE 1-2, 1997.
- [69] *HERTEL J. i dr.* AUSTENITKORNWACHSTUM NORMALGEGLÜHTER UND VERGÜTETER FEINKORNBAUSTÄHLE IN DER WÄRMEEINFLUSSZONE EINER SCHWEISSNAHT, SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN 5/1986.
- [70] *HART P.H.M.* THE INFLUENCE OF VANADIUM-MICROALLOYING ON THE WELDABILITY OF STEELS, WELDING RESEARCH ABROAD, 50, 2004, 3 PP. 28-34.
- [71] *PICKERING F.B.* THE SPECTRUM OF MICROALLOYED HIGH STRENGTH LOW ALLOY STEELS. STEELS TECHNOLOGY AND APPLICATIONS. PHILADELPHIA, 1983.

- [72] *BROZDA J.,
PILARCZYK J.* WELDING THERMAL CYCLES SIMULATION AS METHOD OF STEEL WELDABILITY EVALUATION. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE JOINING OF METALS, JOM 2. HELSINGOR, DENMARK 1984.
- [73] *AKSELSEN O.M.* A REVIEW OF FACTORS AFFECTING MICROSTRUCTURE AND TOUGHNESS IN SIMULATED HEAT AFFECTED ZONES OF STRUCTURAL STEELS. REPORT NTH N-7034, TRONDHEIM, 1982.
- [74] *SCHMIDTMANN E.* EINFLUSS DES GEFÜGEAUFBAUS AUF DIE ZÄHIGKEITSEIGENSCHAFTEN DER WÄRMEEINFLUSSZONE VON SCHWEISSVERBINDUNGEN DER HOCHFESTEN BAUSTÄHLE StE 360 UND StE 470. STAHL UND EISEN 99-1979.
- [75] *ARATA Y.* WELDABILITY CONCEPT HARDNESS PREDICTION AMERICAN SOCIETY FOR METALS. OHIO 1982.
- [76] *STRASSBURGER C.* ENTWICKLUNGEN ZUR FESTIGKEITSSTEIGERUNG DER STÄHLE, VERLAG STAHLISEN MBH, DÜSSELDORF, 1976.
- [77] *SAMARDŽIĆ I.
DUNĐER M.* HARDNESS MEASUREMENT IN WELD JOINTS OF HIGH STRENGTH STEELS BY CONTOUR AND TANGENTIAL METHOD, 5TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, HRVATSKA UDRUGA PROIZVODNOG STROJARSTVA, OPATIJA, 1999.
- [78] *RAK I.
VAUPOTIČ A.* PROBLEMATIKA POJAVE HLADNIH VODIKOVIH PUKOTINA U ZAVARIMA ČELIKA SA POVIŠENOM ČVRSTOĆOM. MEĐUNARODNO SAVJETOVANJE "ZAVARIVANJE U BRODOGRADNJI". HDTZ, SPLIT, 1986.
- [79] HRN ISO 148 – ISPITIVANJE ŽILAVOSTI PREMA CHARPY-U (V – ZAREZ) , 1999.
- [80] *ACHAR D.R.G.
KOCAK M.
EVANS G.M.* EFFECT OF NITROGEN ON TOUGHNESS AND STRAIN AGE EMBRITTLEMENT OF FERRITIC STEEL WELD METAL. SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING, VOL 3, NO 5, 1998.
- [81] *LUKAČEVIĆ Z.* MODELI POUZDANOSTI ZAVARENIH SPOJEVA. DOKTORSKA DISERTACIJA. FSB ZAGREB, 1984.
- [82] PREPORUKE ZA UPOTREBU CHARPY V-TESTA KAO DODATNE INFORMACIJE O KRHKOSTI TOPLINSKI UTJECAJNE ZONE U ZAVARIMA NA ČELIKU, IIV/IIS DOC. 475-75, ZAVARIVANJE 1-2, 1977.

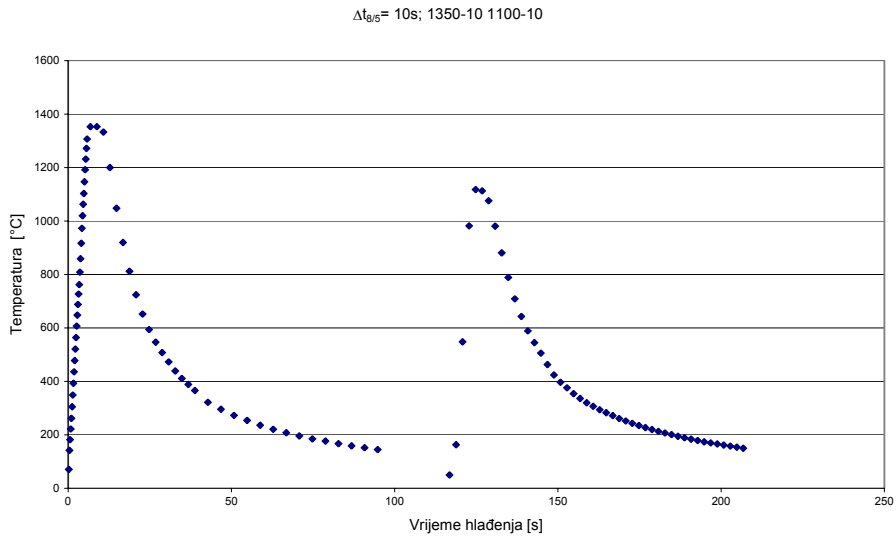
- [83] *SAMARDŽIĆ I.,
DUNĐER M.* CONTRIBUTION TO WELDABILITY INVESTIGATION OF TS1E 420 ON WELDING THERMAL CYCLE SIMULATOR, 8TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, HRVATSKA UDRUGA PROIZVODNOG STROJARSTVA, BRIJUNI, 2002.
- [84] THERMAL CYCLE SIMULATOR MODEL TCS 1405. PROSPEKT FIRME "SMITWELD"
- [85] *ANTOLOVICH S.D
ANTOLOVICH B.F.* AN INTRODUCTION TO FRACTURE MECHANICS, ASM HANDBOOK, VOLUME 19 FATIGUE AND FRACTURE, 1997.
- [86] WELDING CONSUMABLES, SŽ "ELEKTRODE JESENICE", JESENICE 2004.
- [87] *SAMARDŽIĆ I.* DOPRINOS POUZDANOSTI ZAVARENIH SPOJEVA. DOKTORSKA DISERTACIJA, TEHNIČKI FAKULTET RIJEKA, RIJEKA, 1996.
- [88] *DUNĐER M.
SAMARDŽIĆ I.
KOLUMBIĆ Z.* MEASURING, ACQUISITION AND PROCESSING OF MAIN WELDING PARAMETERS BY ON – LINE MONITORING SYSTEM, 7TH INTERNATIONAL RESEARCH/EXPERT CONFERENCE "TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF MACHINERY AND ASSOCIATED TECHNOLOGY" TMT 2003, LORET D MAR, BARCELONA, SPAIN, 2003
- [89] *DUNĐER M.
SAMARDŽIĆ I.* MONITORING PROCESA ZAVARIVANJA. 5. MEĐUNARODNI ZNANSTVENO-STRUČNI SKUP "TENDENCIJE U RAZVOJU STROJARSKIH KONSTRUKCIJA I TEHNOLOGIJA", STROJARSKI FAKULTET U ZENICI, ZENICA, 2000.
- [90] *GLIHA V.
TAUČER M.* ODPORNOST GRUBOZRNATEGA PODROČJA TVP NA LOM PRI DOMAĆEM VISOKOTRDOSTNEM JEKLU NIONICRAL 70 Z OZIROM NA HITROST OHLAJANJA, ZAVARIVANJE 5-6, 1991.
- [91] *OSAMA A.* ZAVARLJIVOST I SVOJSTVA POBOLJŠANIH VISOKO-ČVRSTIH ČELIKA S NISKIM SADRŽAJEM UGLJIKA. ZAVARIVANJE 29,1986.
- [92] *STUPNIŠEK M.* SUVREMENE METODE STRUKTURNIH ISPITIVANJA ZAVARENIH I ZALEMLJENIH SPOJEVA, ZAVARIVANJE 6, 1979.
- [93] *FILETIN T.
KOVAČIČEK F.
INDOF J.* SVOJSTVA I PRIMJENA MATERIJALA, HRVATSKO DRUŠTVO ZA MATERIJALE I TRIBOLOGIJU, ZAGREB, 2002.
- [94] *VODOPIVEC F.* KOVINE IN ZLITINE, INŠTITUT ZA KOVINSKE MATERIJALE IN TEHNOLOGIJE, LJUBLJANA, 2002.
- [95] ASTM E 23, ASTM STANDARDS, 1995.
- [96] *DUNĐER M.
SAMARDŽIĆ I.
MALINA J.* WEAKENING IN ARC WELDED JOINTS DUE TO TEMPERATURE FIELD NONSTATIONARY, EUROJOIN 4, HDTZ, CAVTAT-DUBROVNIK, 2001.

PRILOG 1

Slike P.1.1. do P.1.12 koje prikazuju rezultate promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza i u jednom prolazu.

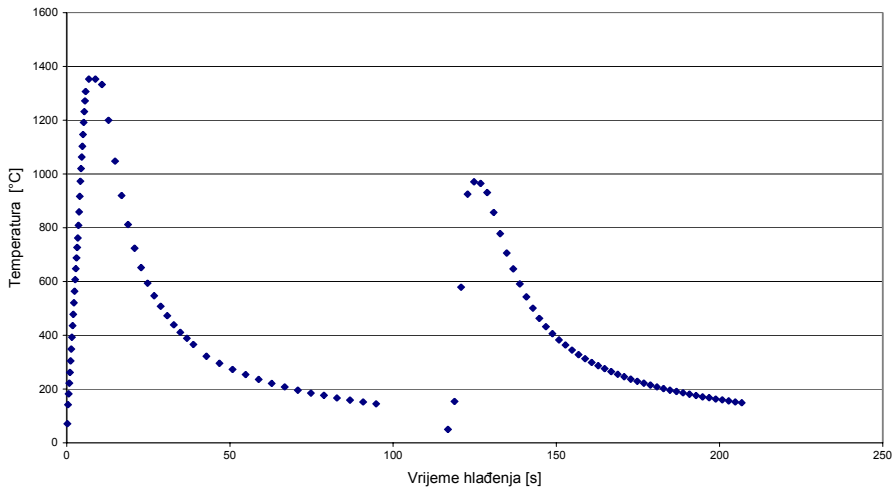


Slika P.1.1 Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10\text{ s}$. Oba prolaza su bila s maksimalnom temperaturom od $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$



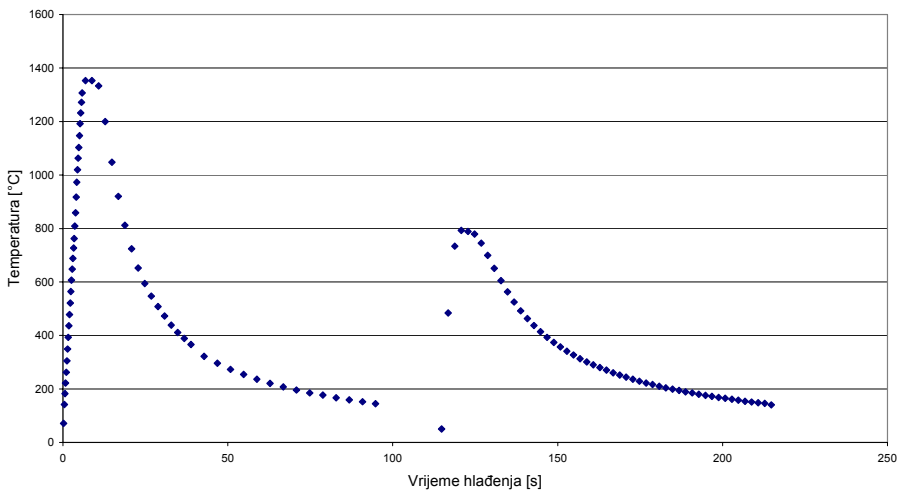
Slika P.1.2 Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10\text{ s}$. Maksimalna temperatura prvog prolaza $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$, a drugog $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$\Delta t_{8/5} = 10\text{s}; 1350\text{-}10\ 960\text{-}10$



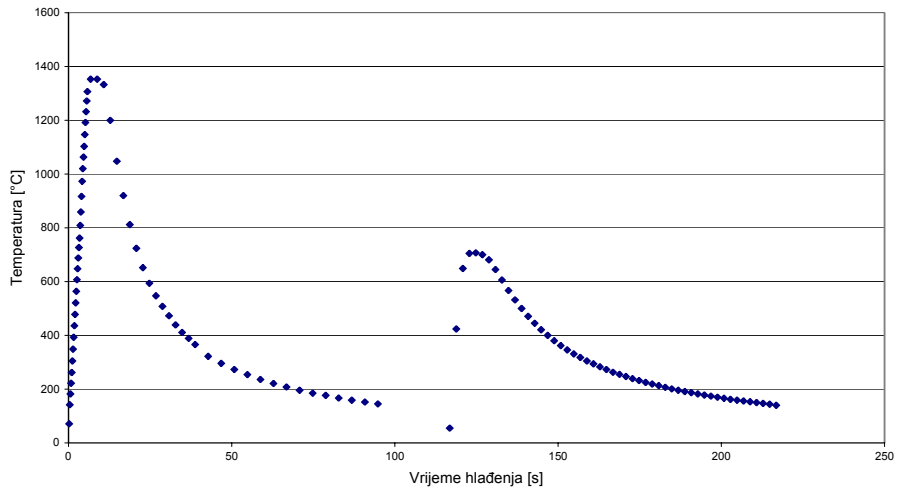
Slika P.1.3 Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 960 °C.

$\Delta t_{8/5} = 10\text{s}; 1350\text{-}10\ 780\text{-}10$



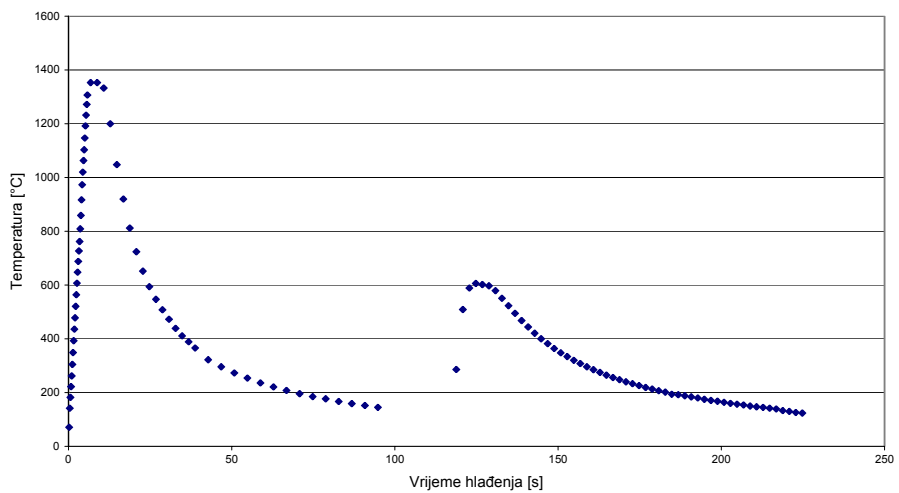
P.1.4 Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5} = 10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 780 °C.

$\Delta t_{8/5}=10\text{s}; 1350\text{-}10\text{ }700\text{-}10$

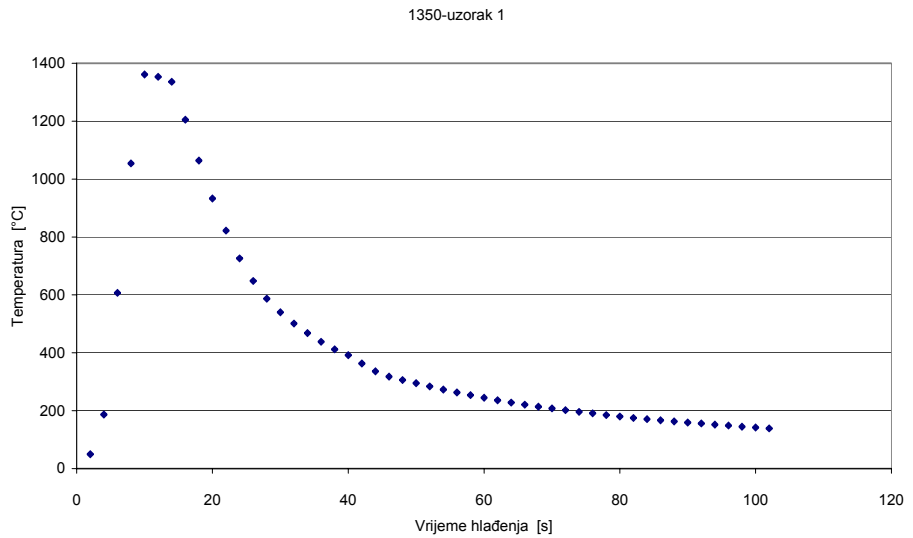


Slika P.1.5 Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5}=10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 700 °C.

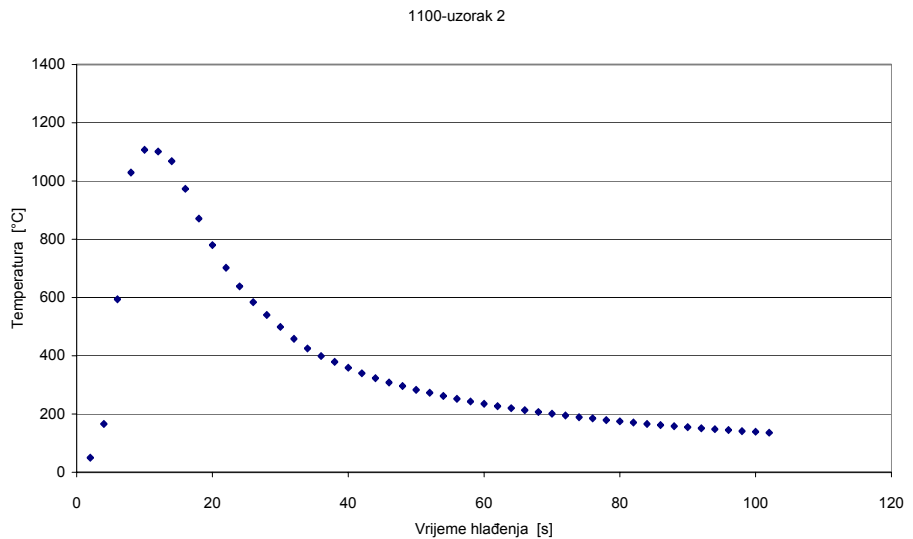
$\Delta t_{8/5}=10\text{s}; 1350\text{-}10\text{ }600\text{-}10$



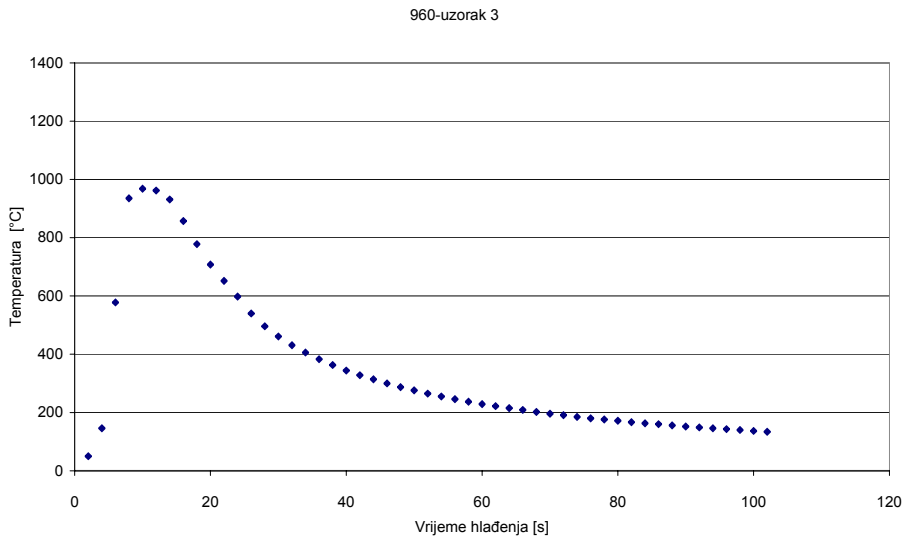
Slika P.1.6 Dijagram promjene temperature tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u dva prolaza s $\Delta t_{8/5}=10$ s. Maksimalna temperatura prvog prolaza 1350 °C, a drugog 600 °C.



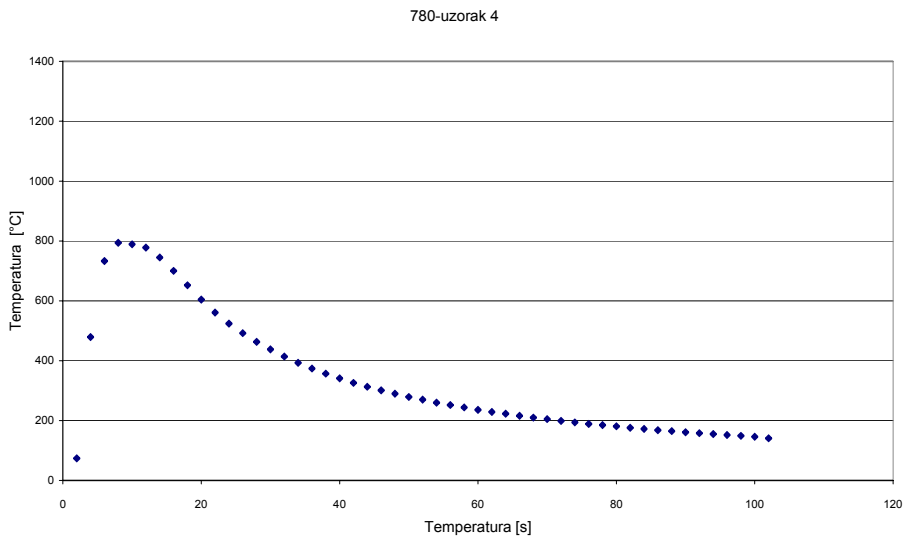
Slika P.1.7 Dijagram promjena temperature tijekom simuliranja zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 1350 °C.



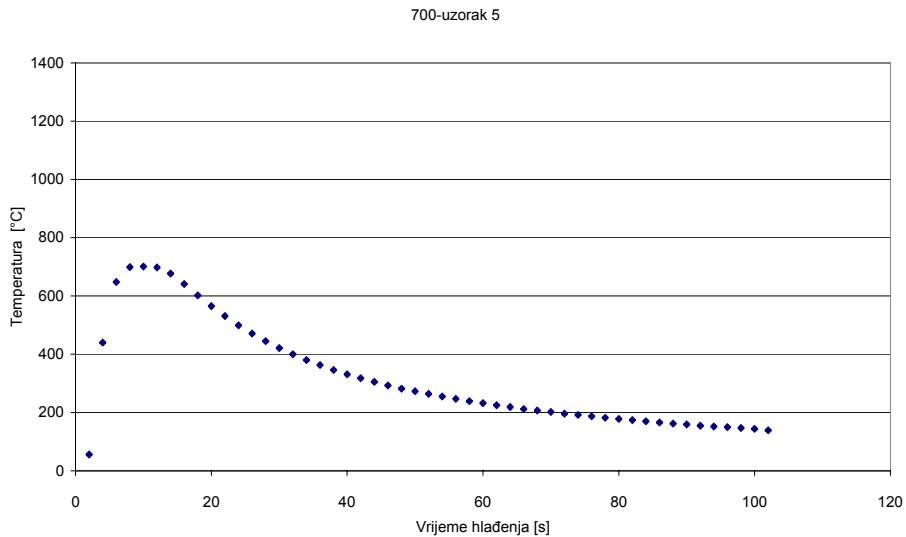
Slika P.1.8 Dijagram promjena temperatura tijekom simuliranja zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 1100 °C.



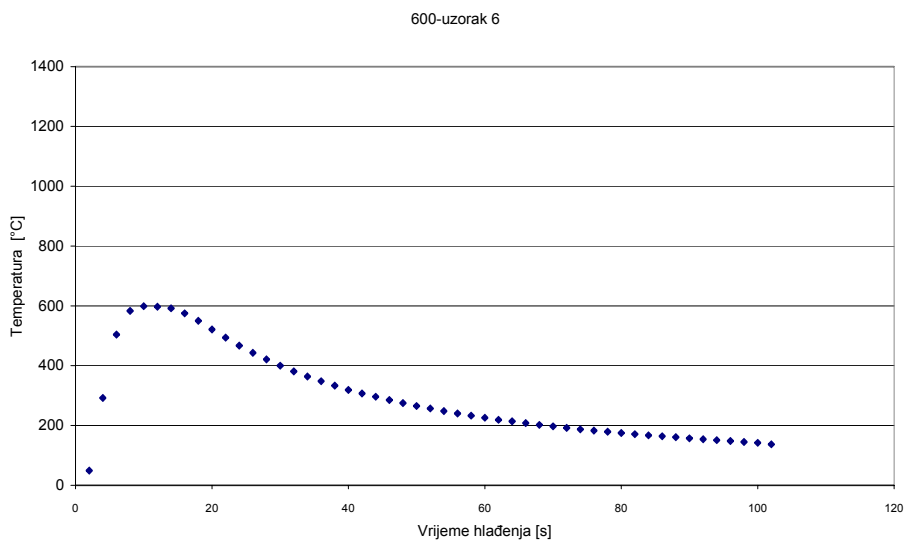
Slika P.1.9 Dijagram promjena temperatura tijekom simuliranja zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 960 °C.



Slika P.1.10 Dijagram promjena temperatura tijekom simuliranja zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 780 °C.



Slika P.1.11 Dijagram promjena temperatura tijekom simuliranja zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 700 °C.



Slika P.1.12 Dijagram promjena temperatura tijekom simuliranja zavarivačkog toplinskog ciklusa. Maksimalna temperatura 600 °C.

PRILOG 2

Tablice P.2.1 do P.2.3 i slike P.2.1. do P.2.5. koje prikazuju rezultate promjene srednje vrijednosti tvrdoće u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$ tijekom simulacije zavarivačkog toplinskog ciklusa u jednom prolazu. Mjerenje tvrdoće je vršeno prema slici 6.8b konturnom metodom.

Tablica P.2.1. Vrijednosti tvrdoće HV5 u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$

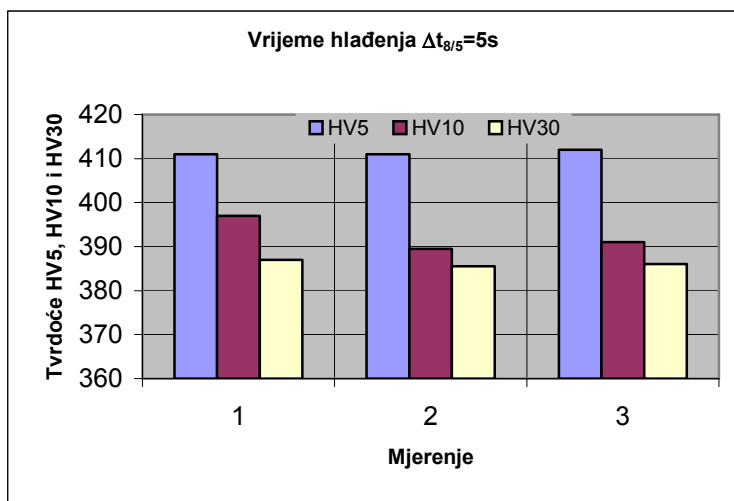
OZNAKA PROBE	TVRDOĆA HV5								
	Mjerenje								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Srednja vrijednost
S 101	388	398	395	413	408	396	397	388	398
S 102	391	389	393	413	409	390	392	395	397
S 103	395	399	397	410	414	391	393	395	399
S 111	278	277	280	348	343	277	280	281	296
S 112	305	302	307	343	349	294	301	296	312
S 113	265	270	268	333	336	279	283	271	288
S 121	274	269	261	299	286	277	264	278	276
S 122	279	278	275	304	298	275	272	275	282
S 123	283	275	280	306	302	277	269	280	284
S 131	254	264	253	285	280	238	234	232	255
S 132	246	251	253	271	273	264	254	255	258
S 133	259	260	264	281	285	248	250	251	262

Tablica P.2.2 Vrijednosti tvrdoće HV10 u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$

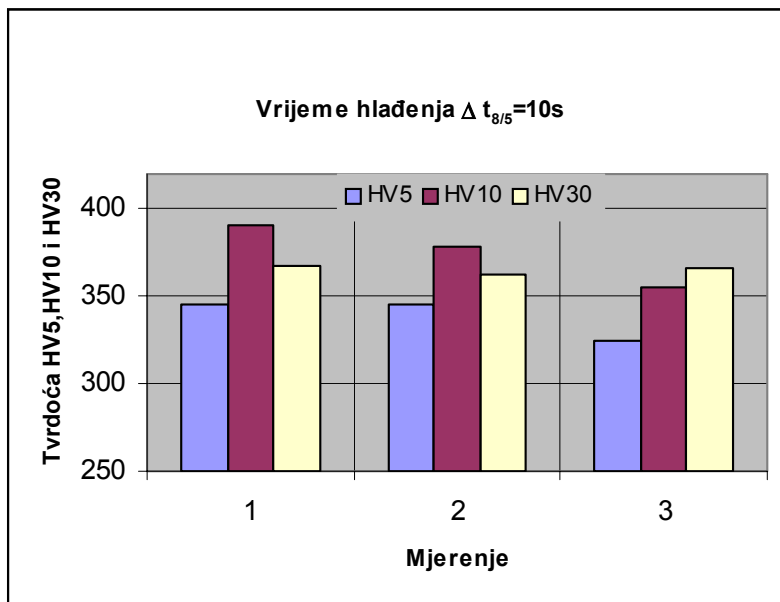
OZNAKA PROBE	TVRDOĆA HV10								
	Mjerenje								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Srednja tvrdoća
S 101	380	381	367	393	401	369	361	359	376
S 102	373	361	363	388	391	365	355	354	369
S 103	375	377	369	388	394	366	353	356	372
S 111	348	346	343	395	397	343	341	339	357
S 112	340	339	334	380	378	334	333	331	346
S 113	328	329	340	382	388	353	343	342	351
S 121	279	283	281	300	302	287	280	284	287
S 122	281	285	285	299	306	283	281	281	288
S 123	279	280	283	300	303	280	281	279	286
S 131	245	247	253	270	271	243	249	241	252
S 132	249	244	250	256	258	245	244	248	249
S 133	243	247	250	259	261	244	247	249	250

Tablica P.2.3 Vrijednosti tvrdoće HV30 u ovisnosti od vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}$

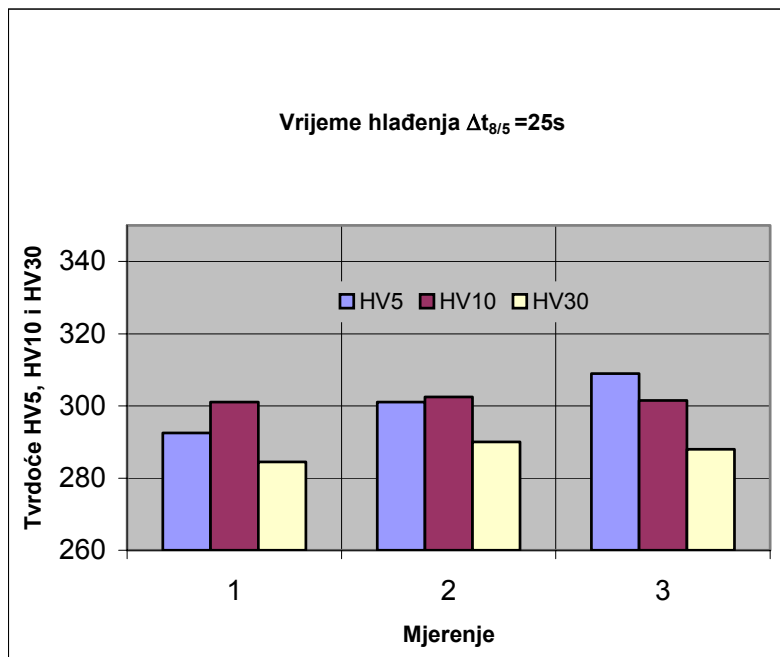
OZNAKA PROBE	TVRDOĆA HV30								
	Mjerenje								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Srednja tvrdoća
S 101	332	339	341	389	385	342	339	336	350
S 102	335	342	337	388	383	336	332	330	348
S 103	339	337	333	387	385	344	340	345	351
S 111	312	315	316	371	364	294	291	293	320
S 112	300	305	307	373	369	295	289	287	316
S 113	307	310	309	370	367	298	304	305	321
S 121	277	278	280	284	285	276	277	274	279
S 122	275	277	278	291	289	276	277	273	280
S 123	276	275	274	287	289	271	273	272	277
S 131	248	245	247	255	260	246	244	243	249
S 132	251	252	250	257	258	241	244	243	250
S 133	245	241	243	253	255	233	237	234	243



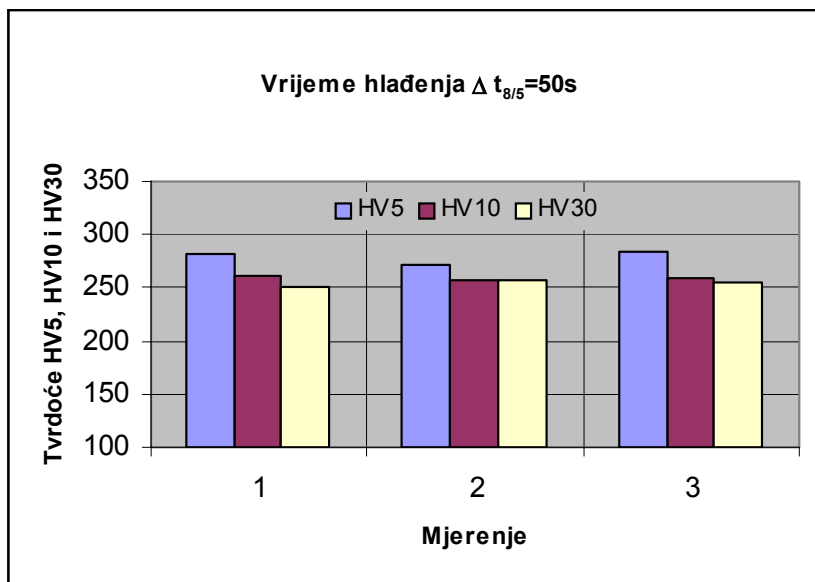
Slika P.2.1 Usporedba tvrdoća HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5} = 5s$



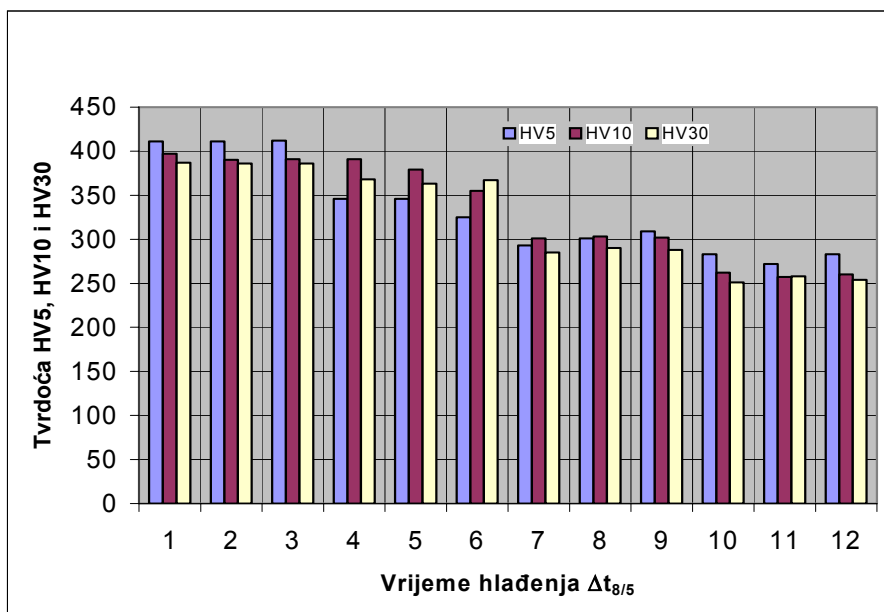
Slika P.2.2 Usporedba tvrdoća HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=10s$



Slika P.2.3 Usporedba tvrdoća HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=25s$



Slika P.2.4 Usporedba tvrdoća HV5, HV10 i HV30 kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}=50s$



Slika P.2.5. Usporedba vrijednosti tvrdoće HV5, HV10 i HV30 simuliranih uzoraka kod vremena hlađenja $\Delta t_{8/5}= 5s$ (mjerenje 1, 2 i 3); $\Delta t_{8/5}= 10s$ (mjerenje 4, 5 i 6); $\Delta t_{8/5}= 25s$ (mjerenje 7, 8 i 9) i $\Delta t_{8/5}= 50s$ (mjerenje 10, 11 i 12).

ŽIVOTOPIS

Mr.sc. Marko Dunder je rođen 13.8.1955. god. u Žepču. Gimnaziju je završio 1974. god., a nakon završene gimnazije pohađa Metalurški fakultet u Zenici. Diplomirao je 1979. godine s naslovom rada: "Određivanje koeficijenta prijenosa topline u kovačkoj peći pomoću Fourierovih redova"

Poslije toga zaposlio se kao profesor na Strojarsko-tehničkoj školi u Zenici.

Od 1983. do 1992. god. radio je u tvornici MMK "Bratstvo" u Novom Travniku na poslovima tehnologa zavarivanja, upravnika tehnologije i tehničkog rukovoditelja.

Na Institutu za zavarivanje "Energoinvest" u Sarajevu 1988. god. završio je specijalizaciju iz područja zavarivanja, nakon čega je dobio diplomu Inženjera specijaliste zavarivanja.

Početak 1998.god. je magistrirao na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na temelju obrane magistarskog rada "Određivanje parametara zavarivanja čelika za poboljšavanje".

Diplomu evropskog inženjera zavarivanja (EWE), stekao je 1999. god.

Od 1993. god. do 2005. god. je radio u Ministarstvu unutarnjih poslova BiH, a početkom 2005. god. se zaposlio u poduzeću "HOLDINA" d.o.o. Sarajevo.

Sudjelovao je u znanstveno istraživačkom projektu za 2002 i 2003 god. u okviru zajedničke suradnje između Bosne i Hercegovine i Slovenije pod nazivom "Studij vijeka trajanja oštećenih zavarenih konstrukcija - mogućnost popravke i korištenja". Aktivno govori njemački jezik i služi se engleskim jezikom.

Član je Društva za zavarivanje BiH (član Upravnog odbora), Asocijacije za kontrolu kvaliteta BiH (član Nadzornog odbora), Hrvatskog društva za tehniku zavarivanja (HDTZ), Hrvatske udruge proizvodnog strojarstva (HUPS) i Hrvatskog društva za toplinsku obradbu i inženjerstvo površina (HDTOIP).

Stručni je suradnik Fakulteta strojarstva u Slavonskom Brodu.

Do sada je kao autor i koautor objavio dva rada u časopisu "Zavarivanje" i 14 radova u domaćim i inozemnim zbornicima radova.

CURRICULUM VITAE

Mr.sc. Marko Dunder was born 13th of August 1955 in Žepče, Bosnia and Herzegovina. He finished high school in 1974 and after that he attended Faculty of Metallurgy in Zenica. He graduated in 1979 with thesis “Determination of heat transfer coefficient in forging furnace by Fourier’s series”

After that he was employed on Mechanical-technical school in Zenica as a professor.

From 1983 to 1992 he was working in factory MMK “Bratstvo” in Novi Travnik as a welding technologist, Head of technology department and Executive technical manager.

On the Institute for welding “Energoinvest” in Sarajevo 1988 he finished education in the field of welding and became a welding engineer specialist.

At the beginning of the 1998 he finished education for Master of science on the Faculty Of Mechanical Engineering And Naval Architecture in Zagreb based on master thesis “Determination of welding parameters of steels for quenching”.

European welding engineer diploma he got in 1999.

From the 1993 to 2005 he was working in Ministry of the Interior of BiH. From the beginning of 2005 he is employed in company “HOLDINA” d.o.o. Sarajevo.

He was engaged in scientific research project in 2002 and 2003 as a part of Bosnia and Herzegovina and Slovenia bilateral cooperation named: “Study of product lifetime of welded construction with failures – possibilities of reparation and reservice”.

He is speaking and writing in German language and he is also using English language.

He is a member of the Bosnia and Herzegovina Welding Society (member of Management board), Association for Quality Control in BiH (member of Supervision board), Croatian Welding Society (CWS), Croatian Association of Production Engineering, Croatian Society for Heat Treatment and Surface Engineering.

He is professional collaborator at the Mechanical engineering faculty in Slavonski Brod.

So far he published as an author or coauthor two papers in Croatian Welding journal and 14 papers in proceedings of international professional and scientific conferences.