

Žarenje za smanjenje zaostalih naprežanja u zavarima čelika S235JR

Zorić, Kristian

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:235:103840>

Rights / Prava: [Attribution 3.0 Unported/Imenovanje 3.0](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Kristian Zorić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Kristian Zorić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima koji su mi pružali podršku tijekom cijelog trajanja studija.

Posebno se želim zahvaliti svom mentoru dr. sc. Darku Landeku, te asistentu mag. ing. Mislavu Štefoku na uloženom trudu, vremenu i strpljenju tijekom izrade ovog rada.

Kristian Zorić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: KRISTIAN ZORIĆ Mat. br.: 0035213367

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja u zavarima čelika S235JR**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Stress-relief annealing in S235JR steel welds**

Opis zadatka:

Nakon zavarivanja u zavaru i zoni utjecaja topline nastaju zaostala naprezanja koja treba ukloniti naknadnom toplinskom obradom kako bi se postigla dobra mehanička svojstva zavarenog spoja. Žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja limova i ploča debljine do 90 mm propisano je normom ISO/NP 14745, dok za limove deblje od 100 mm postoje samo preporuke o izboru parametara žarenja. U teorijskom dijelu rada treba opisati svojstva čelika S235JR, postupke zavarivanja debelih čeličnih ploča i limova pod zaštitnim praškom i pod troskom te provedbu toplinske obrade zavara u svrhu smanjivanja zaostalih naprezanja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba proračunati parametre različitih varijanti žarenja za smanjenje zaostalih naprezanja te provesti ispitivanje tvrdoće i zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom prije i poslije žarenja zavara na ploči debljine 120 mm od čelika S235JR. Na temelju norme ISO/NP 14745 i rezultata ispitivanja predložiti dijagram postupka žarenja zavarenih konstrukcija od čeličnih ploča debljine od 90 do 150 mm.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć.

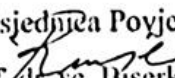
Zadatak zadan:
17. studenog 2022.

Rok predaje radu:
19. siječnja 2023.

Predviđeni datum obrane:
23. siječnja do 27. siječnja 2023.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. OPĆI KONSTRUKCIJSKI ČELIK S235	3
3. ZAVARIVANJE	5
3.1. Povijest zavarivanja.....	5
3.2. Zavarivanje debelih limova.....	6
3.2.1. Višeslojno i višeprolazno zavarivanje.....	7
3.2.2. Kontrola deformacija i napreznja zavara pri zavarivanju debelog lima.....	8
3.3. Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP)	10
3.3.1. Parametri EPP postupka	11
3.3.2. Navarivanje trakastom elektrodom	14
3.3.3. Elektrode	16
3.3.4. Zaštitni prašak	17
3.3.5. Oprema za EPP zavarivanje	18
4. TOPLINSKA OBRADA ZAVARA	19
4.1. Zaostala napreznja u zavaru	19
4.2. Žarenje za redukciju zaostalih napreznja	22
5. PRIPREMA I PROVEDBA POKUSA ŽARENJA U LABORATORIJSKOJ ELEKTRIČNOJ PEĆI.....	27
5.1. Priprema zavarenih uzoraka	27
5.2. Plan pokusa žarenja u laboratorijskoj električnoj peći.....	28
6. REZULTATI ŽARENJA U LABORATORIJSKOJ ELEKTRIČNOJ PEĆI	35
6.1. Ispitivanje tvrdoće prije i nakon žarenja za smanjenje zaostalih napreznja.....	35
6.2. Mjerenje zaostalih napreznja prije i nakon žarenja u laboratorijskoj peći	41

7. REZULTATI ŽARENJA U INDUSTRIJSKOJ VAKUUMSKOJ PEĆI	48
8. ZAKLJUČAK	57
LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1. Grede H-profila od konstrukcijskog čelika S235JR [9].....	4
Slika 2. Shema elektrolučnog zavarivanja [11].....	5
Slika 3. Shema višeslojnog višeprolaznog zavara [16]	8
Slika 4. Deformacija nastala uslijed zavarivanja debelih ploča [18]	9
Slika 5. Shema EPP postupka zavarivanja [20]	10
Slika 6. Položaji zavarivanja [23]	11
Slika 7. Navarivanje trakastom elektrodom [26]	15
Slika 8. Shema navarivanja trakastom elektrodom [24]	15
Slika 9. Shema zaostalih napreznja u zavaru [17].....	20
Slika 10. Zaostala napreznja u zavarima izmjerena X-zrakama [17].....	22
Slika 11. Temperaturno područje za žarenje za redukciju zaostalih napreznja [30].....	23
Slika 12. Tvrdoća martenzita prije i nakon žarenja na različitim temperaturama [31].....	25
Slika 13. Ispitni uzorak zavara	27
Slika 14. Plan postupka žarenja za uzorak A	29
Slika 15. Plan postupka žarenja za uzorak B	29
Slika 16. Plan postupka žarenja za uzorak C	30
Slika 17. Plan pokusa prema Hollomon-Jaffeovim parametrima	30
Slika 18. Električna komorna peć i mjerni uređaji za regulaciju temperature peći i mjerenje temperature uzorka.....	31
Slika 19. Stvarni dijagram procesa žarenja za uzorak A.....	32
Slika 20. Stvarni dijagram procesa žarenja za uzorak B.....	33
Slika 21. Stvarni dijagram procesa žarenja za uzorak C.....	33
Slika 22. AHT200 Leeb Hardness Tester.....	35
Slika 23. Tipovi udarnih naprava za AHT200 Leeb	35
Slika 24. Udarne naprave tipa D za mjerenje tvrdoće (1 – gumb za otpuštanje, 2 – napinjuća cijev, 3 – cijev za navođenje, 4 – zavojnica, 5 – priključni kabel, 6 – udarno tijelo, 7 – potporni prsten)	36
Slika 25. Koordinatni sustav ispitne mreže uzorka.....	36

Slika 26. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže prije žarenja u laboratorijskoj peći	37
Slika 27. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći.....	38
Slika 28. Tvrdoća uzorka B u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći	39
Slika 29. Tvrdoća uzorka C u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći	40
Slika 30. XRD uređaj sentenso μ -X360s (lijevo) i pripadajuća upravljačka jedinica (desno).	41
Slika 31. Mjerenje zaostalih naprezanja na uzorku zavara	41
Slika 32. Točke u kojima su mjerena zaostala naprezanja na ispitnom uzorku prije i poslije žarenja	42
Slika 33. Zaostala naprezanja na uzorku B u uzdužnom (x) smjeru prije žarenja	42
Slika 34. Zaostala naprezanja uzorka u početnom stanju u poprečnom (z) smjeru	43
Slika 35. Zaostala naprezanja nakon žarenja u laboratorijskoj peći mjerena u uzdužnom (x) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C	44
Slika 36. Zaostala naprezanja nakon žarenja u laboratorijskoj peći mjerena u poprečnom (z) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C	45
Slika 37. Shema presjeka laboratorijske električne peći sa žarenim uzorkom.....	46
Slika 38. Promjena temperature na uzorku B i u unutrašnjosti laboratorijske električne peći tijekom cijelog postupka žarenja	47
Slika 39. Vakuumska peć Rübig PC 70/90	48
Slika 40. Plan postupka žarenja u vakuumskoj peći za sva tri uzorka	49
Slika 41. Položaj ispitnih uzoraka za žarenje u vakuumskoj peći.....	49
Slika 42. Zagrijavanje ispitnih uzoraka u vakuumskoj peći: a) promjena temperature grijača peći, b) promjena temperature uzoraka	50
Slika 43. Tvrdoća uzorka A nakon žarenja u vakuumskoj peći	51
Slika 44. Tvrdoća uzorka B nakon žarenja u vakuumskoj peći	52
Slika 45. Tvrdoća uzorka C nakon žarenja u vakuumskoj peći	53
Slika 46. Zaostala naprezanja nakon žarenja u vakuumskoj peći mjerena u uzdužnom (x) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C	55
Slika 47. Zaostala naprezanja nakon žarenja u vakuumskoj peći mjerena u poprečnom (z) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav konstrukcijskog čelika S235 [6]	3
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika S235 [6].....	4
Tablica 3. Toplinska obrada čelika nakon zavarivanja [4].....	28
Tablica 4. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže prije žarenja.....	37
Tablica 5. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći	38
Tablica 6. Tvrdoća uzorka B u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći	39
Tablica 7. Tvrdoća uzorka C u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći	40
Tablica 8. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže nakon žarenja u vakuumskoj peći	51
Tablica 9. Tvrdoća uzorka B u točkama mreže nakon žarenja u vakuumskoj peći	52
Tablica 10. Tvrdoća uzorka C u točkama mreže nakon žarenja u vakuumskoj peći	53

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost utvrđena na kratkoj epruveti
e	mm	Nazivna debljina
E	N/mm ²	Youngov modul elastičnosti
P	1	Hollomon – Jaffeov parametar
p	Pa	Tlak
P_{crit}	1	Kritična vrijednost Hollomon – Jaffeovog parametra
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R_{eH}	N/mm ²	Gornja granica razvlačenja
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
T	°C	Temperatura
t	h	vrijeme držanja
β	K ⁻¹	Koeficijent toplinske dilatacije
ΔT	K	Temperaturni gradijent
ϑ	°C	Temperatura
σ	N/mm ²	Naprezanje
σ_{top}	N/mm ²	Toplinska naprezanja

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
EN	Europska norma
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
GMAW	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj plinskoj atmosferi
HRC	Tvrdoća po Rockwellu C
HV	Tvrdoća po Vickersu
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
PA	Zavarivanje u vertikalnom položaju
PB	Zavarivanje u horizontalno – vertikalnom položaju
PC	Zavarivanje u horizontalnom položaju
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U radu je opisano elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP) dvije ploče od čelika S235 debljine 120 mm. U teorijskom dijelu rada opisana su svojstva i primjena konstrukcijskog čelika S235, postupak zavarivanja pod praškom, nastanak zaostalih naprezanja u zavaru, te postupci toplinske obrade žarenja za smanjenje zaostalih naprezanja. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su žarenja za redukciju zaostalih naprezanja s različitim parametrima žarenja u manjoj i većoj električnoj peći. Utjecaj žarenja praćen je ispitivanjem tvrdoće i mjerenjem zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom. Provedena su žarenja za smanjenje zaostalih naprezanja u laboratorijskoj električnoj peći i industrijskoj vakuumskoj peći s parametrom žarenja $P = 17,16$. Žarenja u laboratorijskoj peći nisu popustila zaostala naprezanja zbog nejednoličnog zagrijavanja i ohlađivanja presjeka uzorka. Žarenje uzorka u industrijskoj vakuumskoj peći na $560\text{ °C}/4\text{ h}$ smanjila su zaostala naprezanja na cijelom presjeku na vrijednosti između -20 MPa do -50 MPa .

Ključne riječi: zavarivanje pod praškom; čelik S235; žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja; zaostala naprezanja u zavaru

SUMMARY

This paper describes submerged arc welding (SAW) of two S235 steel plates with a thickness of 120 mm. In the theoretical part of the paper, the properties and application of structural steel S235, the submerged arc welding process, the generation of residual stresses in the weld and the annealing heat treatment procedures to reduce residual stresses are described. In the experimental part of the paper, annealing was performed to reduce residual stresses with different annealing parameters in a smaller and larger electric furnace. The influence of annealing was detected by hardness testing and measurement of residual stresses by X-ray diffraction. Annealings were carried out to reduce residual stresses in a laboratory electric furnace and an industrial vacuum furnace with the annealing parameter $P = 17,16$. Annealings in the laboratory furnace did not relieve residual stresses due to non-uniform heating and cooling of the sample cross-section. Annealing the sample in an industrial vacuum furnace at $560\text{ °C} / 4\text{ h}$ reduced the residual stresses on the entire section to values between -20 MPa and -50 MPa .

Key words: submerged arc welding; steel S235; annealing to reduce residual stresses; residual stresses in the weld

1. UVOD

Zavarivanje je proizvodni proces spajanja dva ili više dijelova uz pomoć kombinacije topline i pritiska tvoreći spoj u fazi hlađenja. Zavarivanje se najčešće primjenjuje na metalima i plastomerima, ali može se primijeniti i na drvu. Za razliku od lemljenja, gdje ne dolazi do taljenja osnovnog materijala, zavarivanje je proces s visokim unosom topline koji se zasniva na taljenju osnovnog materijala s ili bez dodavanja dodatnog materijala kako bi se kreirao spoj. Tijekom procesa dolazi do brojnih mikrostrukturnih promjena koje moraju biti dovoljno kontrolirane kako bi krajnji rezultat bio zadovoljavajući. Iz tog su razloga uvedene brojne norme koje propisuju zahtjeve kako bi zavareni spoj bio kvalitetan. [1,2]

Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška uobičajen je postupak elektrolučnog zavarivanja koji uključuje stvaranje luka između kontinuirane elektrode i obratka. Sloj praha štiti zonu zavarivanja od plinova i vanjskih utjecaja, a može se koristiti i za dodavanje legiranih elemenata u zavarenu kupku. Od ostalih postupaka zavarivanja razlikuje se po tome što se električni luk i mjesto zavora uopće ne vide jer su pokriveni tekućom troskom i zaštitnim praškom. [1,3]

Većina operacija strojne i toplinske obrade, te osobito zavarivanja za posljedicu imaju pojavu zaostalih naprezanja u materijalu. Veća zaostala naprezanja mogu predstavljati veliku opasnost u eksploataciji, stoga treba obratiti pozornost na naknadnu toplinsku obradu žarenjem. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja je relativno jednostavan proces koji se za čelike sastoji od sporog zagrijavanja na temperaturu od 400 °C do 650 °C, nekoliko sati držanja na toj temperaturi, te sporog hlađenja. Zagrijavanjem se inicira plastična deformacija u područjima povišenih zaostalih naprezanja, čime se ona djelomično ili potpuno otklanjaju. [4]

TEORIJSKI DIO

2. Opći konstrukcijski čelik S235

Opći konstrukcijski čelici najzastupljeniji su metalni materijali u industrijskoj proizvodnji (65-80% mase) metalnih dijelova i konstrukcija. Najčešće se koriste pri izradi nosivih, pretežito zavarenih konstrukcija velike mase poput dizalica, mostova, brodova, automobilskih šasija te u industriji nafte i plina. Opći se konstrukcijski čelici dijele na dvije glavne podskupine: opće konstrukcijske čelike za nosive konstrukcije i čelike za strojogradnju. Konstrukcijski čelici imaju specifično optimiran kemijski sastav kako bi se postigla mehanička svojstva za odgovarajuće uvjete primjene. Mogu biti nelegirani (uglični) s masenim udjelom ugljika manjim od 0,6% i legirani s elementima poput kroma (Cr), mangana (Mn), nikla (Ni), silicija (Si), te volframa (W) u manjoj količini. [5]

Čelik S235JR pripada skupini nelegiranih konstrukcijskih čelika, a izrađen je u skladu sa standardom EN 10025-2. U oznaci, slovo S označava konstrukcijski čelik, 235 je vrijednost minimalne granice razvlačenja R_e u N/mm^2 za područje najmanjih debljina, dok JR predstavlja udarni rad loma od 27 J pri 20 °C. U tablici 1. je prikazan kemijski sastav konstrukcijskog čelika S235. [6]

Tablica 1. Kemijski sastav konstrukcijskog čelika S235 [6]

Oznaka prema EN 10027-1	Oznaka prema EN 10027-2	Maksimalni udio %C, za nominalni proizvod			Si % max	Mn % max	P % max	S % max	N % max	Cu % max
		Nazivna debljina, mm								
		≤16	>16 ≤40	>40						
S235JR	1.0038	0.17	0.17	0.20	-	1.40	0.035	0.035	0.012	0.55
S235J0	1.0114	0.17	0.17	0.17	-	1.40	0.030	0.030	0.012	0.55
S235J2	1.0117	0.17	0.17	0.17	-	1.40	0.025	0.025	-	0.55

Serijski konstrukcijskih čelika S235JR najčešće se koristi u strojarstvu, brodogradnji i građevinskoj industriji, ali može se naći i u ostalim granama industrije. Osobito su korisni jer nude jedinstvenu kombinaciju dobre zavarljivosti, zbog niskog sadržaja ugljika, sa zajamčenom čvrstoćom. Čelik S235JR nema mogućnost postizanja visoke tvrdoće kaljenjem, no i bez toga se, zbog svoje žilavosti, zavarljivosti i niske cijene, smatra jednim od najzastupljenijih konstrukcijskih čelika u svijetu. Primjer proizvoda od konstrukcijskog čelika S235JR može se vidjeti na donjoj slici. [7,8]



Slika 1. Grede H-profila od konstrukcijskog čelika S235JR [9]

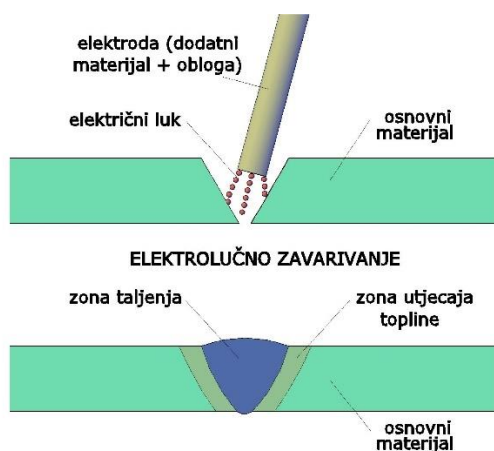
Od čelika S235 izrađuju se mnogi konstrukcijski proizvodi poput H greda, I greda, cijevi, ploča, kanala, šipki i čavala. Ti se proizvodi naširoko koriste u općim zahtjevima za zavarene konstrukcije i dijelove kao što su mostovi, dalekovodni tornjevi, kotlovi, proizvodne hale, trgovački centri i sl. [10]

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika S235 [6]

Oznaka prema EN 10027-1	Minimalna granica razvlačenja R_e , MPa						Vlačna čvrstoća R_m , MPa		Istezljivost A , %				Udarni rad loma	
	Nazivna debljina, mm						Nazivna debljina, mm		Nazivna debljina, mm				Temperatura	Min. apsorbirana energija
	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤125	>3 ≤100	>100 ≤125	>3 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤100	>100 ≤125	[°C]	[J]
S235JR	235	225	215		195	360-510	350-500	26	25	24	22	20	27	
S235JO	235	225	215		195	360-510	350-500	26	25	24	22	0	27	
S235J2	235	225	215		195	360-510	350-500	26	25	24	22	-20	27	

3. Zavarivanje

Zavarivanje je postupak spajanja materijala primjenom topline i sile, sa ili bez dodatnog materijala. Kod postupka se na mjestu spajanja dijelovi zagriju do omekšanja (plastičnosti) ili se rastale, te se nakon toga spajaju staljivanjem uz dodavanje ili bez dodavanja materijala. Zavareni spoj (slika 1.) sastoji se od zavara, odnosno dijela materijala koji je bio rastaljen i zone utjecaja topline (ZUT). Zona utjecaja topline okolni je dio zavara koji je zahvaćen prijenosom topline od zavara prema osnovnom materijalu uz pojavu mikrostrukturnih promjena i zaostalih naprezanja. [1]



Slika 2. Shema elektrolučnog zavarivanja [11]

Kakvoća i svojstvo zavarenog spoja ovise o brzini zavarivanja, količini i gibanju taline, miješanju osnovnog i dodatnog materijala, plinovima koji pri višim temperaturama ulaze u rastaljeni materijal, raspodjeli temperature na mjestu zavarivanja i dr. Zavarivanje je osobito važan postupak u gradnji čeličnih konstrukcija, ali se zavaruju i gotovo svi ostali metali, te staklo i dio polimernih materijala (plastomeri).

Postupci zavarivanja razvrstavaju se prema izvoru energije koja se pretvara u toplinu potrebnu za stvaranje spoja, a to su plinski plamen, električni luk, plazma, laser, elektronski snop i ultrazvuk. Izvori se razlikuju prema snazi, količini topline koja se unosi u osnovni materijal, najvećoj radnoj temperaturi i gustoći toplinskog toka.

3.1. Povijest zavarivanja

Tehnika zavarivanja otkrivena je tijekom pokušaja da se željezo preradi u korisne oblike. Zavarene oštrice razvijene su u prvom tisućljeću naše ere, a najpoznatije su one koje su proizveli

arapski oružari u Damasku u Siriji. Proces cementiranja za proizvodnju tvrdog čelika bio je poznat u to vrijeme, ali je dobiveni čelik bio vrlo krhak. Tehnika zavarivanja je uključivala međusloj relativno mekog i žilavog željeza, te materijal s visokim udjelom ugljika, nakon čega je slijedilo kovanje čekićem. Ovim postupkom su se proizvodile veoma čvrste oštrice za ondašnje, ali i za današnje vrijeme. [12]

U novije doba, uvođenjem lijevanog željeza, zavarivanje se ograničava na kovače i draguljare. Druge tehnike spajanja, poput pričvršćivanja vijcima ili zakovicama, naširoko su se primjenjivale na nove proizvode, od mostova i željezničkih strojeva do kuhinjskog posuđa. Suvremeni postupci zavarivanja taljenjem proizlaze iz potrebe za dobivanjem kontinuiranog spoja na velikim čeličnim pločama. Pokazalo se da zakivanje ima nedostataka, posebno kod zatvorenih spremnika kao što je kotao. [12]

Krajem 19. stoljeća pojavljuju se plinsko, elektrolučno i elektrootporno. Prvi pravi pokušaj usvajanja postupaka zavarivanja u širokom opsegu učinjen je tijekom Prvog svjetskog rata. Postupak plinskog zavarivanja izgaranjem acetilena u kisiku bio je dobro razvijen do 1916., a ista se tehnika koristi i danas. Glavna poboljšanja od tada bila su u opremi i sigurnosti. [12]

U tom je razdoblju također uvedeno elektrolučno zavarivanje korištenjem potrošne elektrode, ali gole žice koje su se u početku koristile stvarale su krhke varove. Rješenje je pronađeno omotavanjem gole žice azbestom i isprepletenom aluminijskom žicom. Moderna elektroda, uvedena 1907. godine, sastoji se od gole žice sa složenim slojem minerala i metala. Elektrolučno zavarivanje nije bilo široko korišteno sve do Drugog svjetskog rata, kada je hitna potreba za sredstvima za konstrukcije transportnih sustava, elektrana, i građevina potaknula nužan razvoj. [12]

3.2. Zavarivanje debelih limova

Suvremeni postupci zavarivanja taljenjem proizlaze iz potrebe za dobivanje kontinuiranog spoja na velikim čeličnim pločama. Spajanje debelih čeličnih ploča poput onih koje se koriste za gradnju brodova i strojeva jedan je od najsloženijih i najtežih zadataka zavarivanja. Problem je nadoknaditi praznine te velike razlike u tolerancijama. Svi dijelovi zahtijevaju pažljivu pripremu kako bi se osigurali trajno stabilni spojevi. Također, traženi rezultat često se postiže tek nakon nekoliko postupaka zavarivanja. [13,14]

Čelične ploče debljine od 10 do 15 mm spajaju se MAG postupkom elektrolučnog zavarivanja. Često se primjenjuje dugotrajna višeslojna tehnika. Kombiniraju se različiti postupci kako bi se

poboljšala kvaliteta zavara na vrlo učinkovit način: produktivno MAG zavarivanje s višom brzinom taljenja koristi se za korijen i slojeve za punjenje, a u nekim slučajevima i za cijeli zavar. Ostali standardni postupci koji se primjenjuju za spajanje debelih ploča uključuju ručno elektrolučno zavarivanje i elektrolučno zavarivanje, među koje spada i elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška. [13]

Kako bi se zajamčila učinkovitost i kvaliteta tijekom dugotrajnog procesa zavarivanja debelih ploča, bitno je odabrati postupak zavarivanja koji točno odgovara materijalima i plamenicima koji se koriste. Sve se više koriste novi postupci, na primjer hibridne tehnike GMAW i laserskog zavarivanja ili optimizirane MAG tandem tehnike. [13]

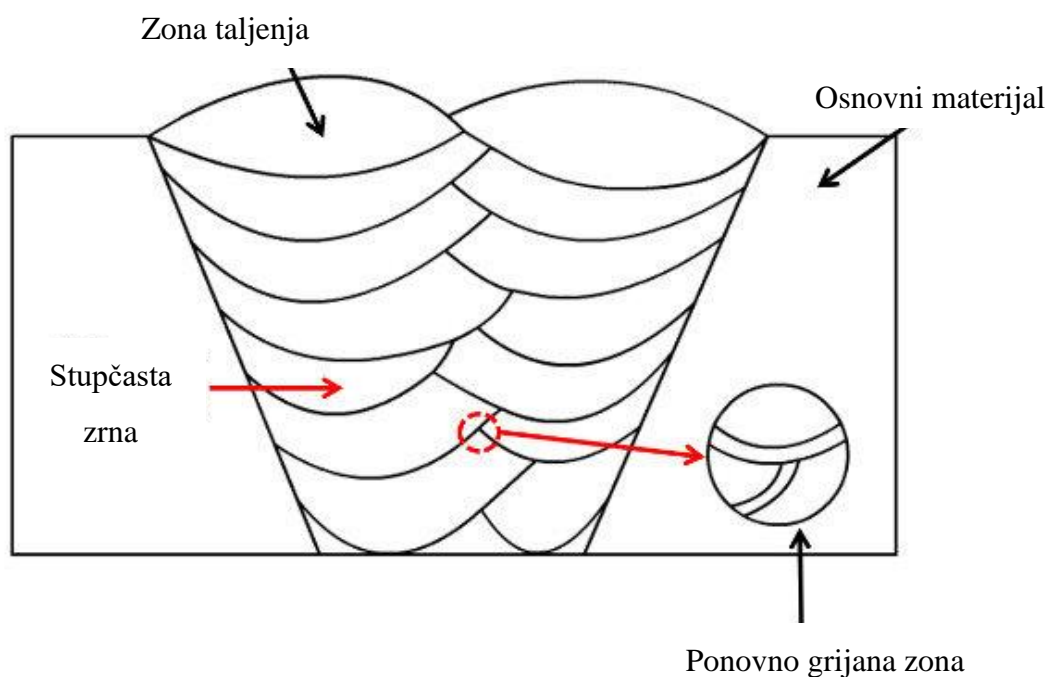
Kod zavarivanja debelih i ultra-debelih ploča, količina nataloženog metala dodatnog materijala za zavarivanje je velika, vrijeme zavarivanja je puno duže, a ukupni unos topline je visok. Zaostala naprezanja su posebno značajna u debelim zavarenim pločama, poput onih koje se koriste u proizvodnji brodskih trupova. Također, tijekom procesa moguće su pojave vrućih i hladnih pukotina. [13–15]

Prije nego što se debela ploča zavari, temperatura ploče je relativno niska. Na početku zavarivanja, temperatura luka će se povećati na 1250 – 1300 °C. kada se temperatura ploče iznenada promijeni, raspodjela temperature debele ploče je neravnomjerna, metal zavara postaje krut, a tendencija stvaranja hladnih pukotina se povećava. Kako bi se izbjegli takvi problemi, debela ploča se mora zagrijati prije zavarivanja. U stvarnom procesu proizvodnje, proces zavarivanja treba kontrolirati kako bi se spriječile pukotine nastale zavarivanjem. [13,15]

3.2.1. Višeslojno i višeprolazno zavarivanje

U postupku zavarivanja debelih limova važan princip je višeslojno i višeprolazno zavarivanje. Jednostruki prolaz najčešće ne može ispuniti ulogu u presjeku budući da je uložak zavara debele ploče dubok. Posljedica zavarivanja širokim prolazom je da je stežno naprezanje osnovnog metala za liniju zavara prilično veliko, a čvrstoća zavara relativno slaba, što je sklono pojavi pukotine. [15,16]

Prednost višeslojnog i višeprolaznog zavarivanja je u tome što je prethodni zavar proces „predgrijavanja“ za sljedeći, a potonji zavar je ekvivalentan procesu „naknadne toplinske obrade“ za prethodni. Ovaj je postupak prikazan na slici 3. Stanje raspodjele naprezanja tijekom procesa zavarivanja je učinkovito poboljšano, što pomaže u osiguravanju kvalitete zavarivanja. [15]



Slika 3. Shema višeslojnog višeprolaznog zavora [16]

Zavarivanje debelih ploča razlikuje se od zavarivanja srednjih i tankih ploča. Za dovršetak zavarivanja komponente potrebno je nekoliko sati ili čak nekoliko desetaka sati. Stoga je posebno važno pojačati provjeru procesa zavarivanja kako bi se problemi otkrili na vrijeme. [15]

Nakon sučeonog zavarivanja ploča debljina od 100 do 150 mm, zavar i osnovni materijal se trebaju zagrijati s obje strane infracrvenom električnom grijaćom pločom. Nakon zagrijavanja na temperaturu od 250 – 350 °C, koristi se azbest kao poklopac za očuvanje topline od 2 do 6 sati, a zatim se hladi na zraku. Takva naknadna toplinska obrada može spriječiti pojavu pukotina u liniji zavora i zoni utjecaja topline. [15]

3.2.2. Kontrola deformacija i naprezanja zavora pri zavarivanju debelog lima

U procesu zavarivanja, deformacija nakon sučeonog zavarivanja debelih ploča uglavnom je kutna deformacija, kao na slici 4. Kako bi se u proizvodnji kontrolirala deformacija, često se prvo zavari dio zavarenog spoja na prednjoj strani, zatim se dio okrene, te, nakon što se ugljik očisti iz korijena, zavari rub zavarenog kanala na stražnjoj strani, zatim se dio ponovno okrene i tako dalje. Općenito govoreći, dijelovi se mogu okretati tri do pet puta u postupku zavarivanja, tj. sve dok svi zavari na prednjoj strani nisu potpuno zavareni. [15,17]

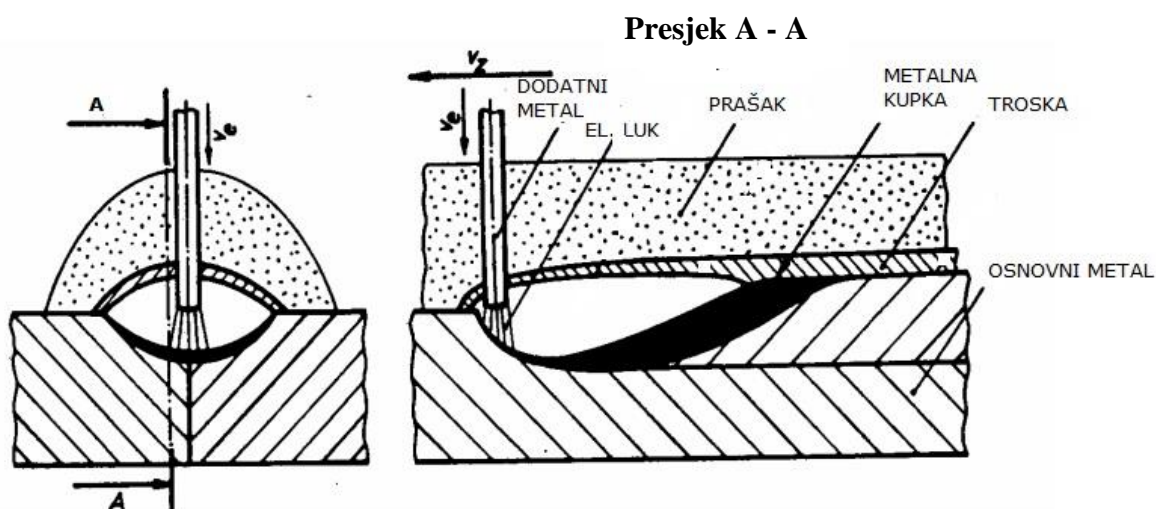
Osim toga, za kontrolu deformacije postavljaju se gumeni kalupi kao učvršćenja. Ova metoda općenito je prikladna za debele ploče posebnog oblika. Zbog jedinstvenog oblika, presjeka i dimenzija presjeka strukture debele ploče, teško je jamčiti točnost dimenzija u slobodnom stanju. Stoga je potrebno izraditi učvršćenja poput gumenih kalupa prema obliku komponente, zatim sastaviti, locirati i zavariti komponentu u fiksnom stanju kako bi se kontrolirala deformacija nastala zavarivanjem. [15,17]



Slika 4. Deformacija nastala uslijed zavarivanja debelih ploča [18]

3.3. Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP)

Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška (EPP) je postupak zavarivanja poznat još od 1929. godine i jedan je od prvih automatiziranih postupaka zavarivanja. U početku su se izrađivali topljeni praškovi, a od 1985. godine proizvode se i aglomerirani, koji su danas u širokoj uporabi. Kod EPP-a se spajanje metala ostvaruje električnim lukom koji se uspostavlja i održava između elektrode i osnovnog materijala ispod sloja praška. Kod ovog se postupka ne koristi pritisak na zavarivane ploče. [1,19]



Slika 5. Shema EPP postupka zavarivanja [20]

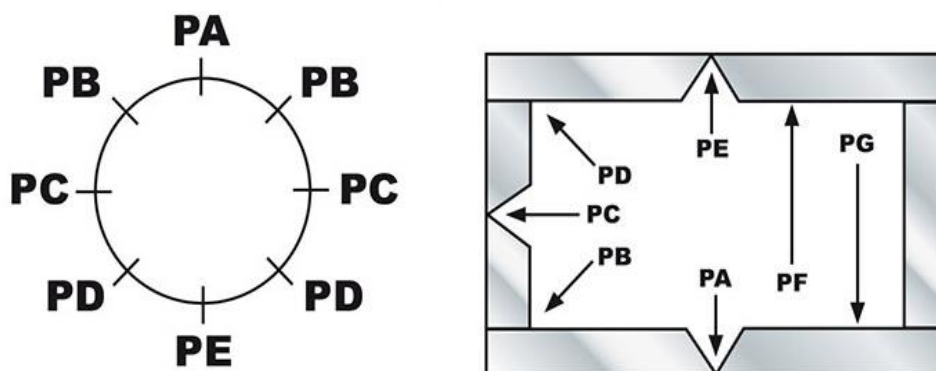
Na slici 5. je shematski prikaz EPP postupka zavarivanja. Žica za zavarivanje prolazi kroz kontaktnu vodilicu, a prašak se nanosi kroz lijevak na mjesto zavarivanja. Pod utjecajem topline električnog luka dolazi do taljenja žice, praška i osnovnog materijala. Metalna kupka prilikom zavarivanja ostaje potpuno zaštićena od okoline zbog sloja praška koji se djelomično topi i očvršćava kao troska, a djelomično ostaje u nepromijenjenom stanju. Uloga praška je, prema tome, analogna ulozi obloge elektrode kod ručnog elektrolučnog zavarivanja. Uslijed niske toplinske provodljivosti praška gubici topline su manji, a topljenje metala efikasnije. [20,21]

Zavari za istu dimenziju spoja mogu se izvesti u više ili manje prolaza, ovisno o željenoj strukturi i svojstvima zavara. Višestruki prolazi obično postavljaju kvalitetniji zavareni spoj. Polaritet se uspostavlja na početku i temelji se na tome je li potrebna maksimalna penetracija ili maksimalna stopa taloženja praška. [21]

Električni luk se određenom brzinom zavarivanja, koja može poprimiti vrijednosti do 800 mm/min, neprestano pomiče u pravcu zavarivanja, a rastaljeni materijal žice i osnovnog

materijala sjedinjuje se u jednu cjelinu i skrućuje u trosku staklastog oblika. Zbog svoje manje gustoće rastaljeni prah se diže na površinu rastaljene kupke i formira ispod sloja praha tekuću trosku u kojoj kupka skrućuje rub zavara. [1,21]

Elektrolučno zavarivanje pod praškom pogodan je za zavarivanje niskougličnih i niskolegiranih konstrukcijskih čelika, kao i srednje i visokolegiranih čelika. Upotrebu postupka također ograničuje i položaj zavara. Svi mogući položaji zavarivanja prikazani su na slici 6. Kod EPP-a najčešće se zavaruje u vertikalnom (PA) i horizontalno-vertikalnom (PB) položaju. Zavarivanje u horizontalnom (PC) položaju je moguće samo uz posebno kontrolirane uvjete. Kao takav, EPP postupak uglavnom se koristi u brodogradnji, strojarstvu, građevini, pri zavarivanju cijevi velikih promjera i tlačnih posuda. Još jedna varijacija ovog postupka je navarivanje, koje se koristi za preklapanje velikih radnih površina. [22]



Slika 6. Položaji zavarivanja [23]

Pošto proces zavarivanja nije vidljiv kod zavarivanja pod praškom, izrada korijenskog prolaza je vrlo zahtjevna. Jedno od rješenja je korištenje podloge u obliku metalnih tračnica. Iz istog razloga potrebno je pažljivo pripremiti radne komade. Još jedan nedostatak je taj što se u metalu zavara mogu pojaviti stupčasta zrna u kombinaciji s tendencijom vrućeg pucanja i segregacije. [1,21,24]

3.3.1. Parametri EPP postupka

Kvaliteta zavara i zone utjecaja topline ovisi o varijacijama u parametrima procesa, među kojima su najznačajniji [25]:

- jakost struje zavarivanja
- napon luka

- brzina zavarivanja
- vrsta praška i elektrode
- udaljenost mlaznice od ploče

Varijable zavarivanja kod zavarivanja pod praškom slične su ostalim postupcima elektrolučnog zavarivanja, uz nekoliko iznimaka. Kod EPP postupka, vrsta elektrode i vrsta praška obično se temelje na mehaničkim svojstvima koja zahtijeva zavar. Veličina elektrode povezana je s veličinom zavarenog spoja i preporučenom strujom za određeni spoj. Ovo se također mora uzeti u obzir pri određivanju broja prolaza ili šavova za određeni spoj. [21]

Prilikom odabira kombinacije praška/žice u obzir treba uzeti [22]:

- uklanjanje troske,
- sposobnost zavarivanja na nečistim površinama,
- brzinu zavarivanja,
- mogućnost višeslojnog zavarivanja,
- cijenu i potrošnju praška,
- mehaničke osobine.

Električna struja se vodičima dovodi od izvora električnog napona do radnog komada, odnosno od izvora do vodilice žice na samoj glavi uređaja. Žica za zavarivanje dovodi se sustavom za dovodjenje žice. Uključivanjem sklopke uspostavlja se električni luk i pokreće vozni sustav koji pomiče električni luk po mjestu zavarivanja ili se radni komad okreće dok luk miruje. [1,20]

Za jednoprolazne zavare, struja bi trebala biti dovoljna za zahtijevano prodiranje u cijeloj debljini zavarivane ploče, bez progorijevanja zavara. Što je struja veća, to je dublji prodor. U radu s više prolaza, struje zavarivanja treba odabrati na temelju veličine elektrode. Što je veća struja zavarivanja, veća je stopa taljenja (brzina taloženja). [1,20,21]

Elektrolučno zavarivanje pod praškom razlikuje se od elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom prema rasponu promjene slijedećih parametara [22]:

- jačine struje,
- napona električnog luka,
- brzine zavarivanja.

Ovi se parametri kod EPP postupka mijenjaju u znatno širim granicama, što omogućuje efikasniju primjenu ovog postupka. mijenjaju u relativno uskim granicama, kod EPP postupka je raspon promjena znatno veći. To omogućuje efikasniju primjenu ovog postupka zavarivanja,

osobito ako je neophodna velika produktivnost, što je često slučaj kod debelih limova i dugačkih šavova. [20,22]

Napon luka varira unutar užih granica od struje zavarivanja. On ima utjecaj na širinu i oblik šava. Viši naponi će uzrokovati da šav bude širi i ravniji. Izuzetno visok napon luka treba izbjegavati jer može izazvati pucanje. To je zato što se prekomjerna količina praška tali, te se višak dezoksidansa može prenijeti na talog zavara smanjujući pritom njegovu duktilnost. Viši napon luka također povećava količinu potrošene struje. Nizak napon luka osigurava čvršći luk koji poboljšava prodiranje, osobito na dnu dubokih utora. U slučaju da je napon prenizak, šav će biti vrlo uzak, imat će visoku krunu i troska će se teško skidati. [20,22]

Brzina zavarivanja utječe i na širinu šava i na prodiranje. Veće brzine kretanja proizvode uže šavove koji manje prodiru. To može biti prednost za zavarivanje limova gdje su potrebni mali šavovi i minimalno prodiranje. Međutim, ako je brzina prevelika, postoji tendencija za podrezivanje i poroznost, budući da se zavar brže hladi. Ako je brzina zavarivanja prespora, elektroda predugo ostaje u kupki rastaljenog metala. To stvara loš oblik šava i može uzrokovati prekomjerno prskanje i bljesak kroz sloj praška. [1,21]

Zavarivač je odgovoran za praćenje struje i napona luka pomoću ampermetra i voltmetra. Ovisno o vrsti izvora struje zavarivanja, zavarivač može povećati ili smanjiti jakost struje ili brzinu dodavanja žice. Brzinu kretanja voznog sustava prati indikator brzine te ju je moguće podešavati regulatorom. Ostatak praška koji je ostao nerastaljen vraća se pomoću usisavača natrag u spremnik za prašak, dok se skrućena troska odstranjuje sa zavara. [20]

Sekundarne varijable uključuju kut elektrode u odnosu na radnju, kut same radnje, debljinu sloja praška i udaljenost između vrha hvataljke struje i luka. Potonji čimbenik nazvan "stršenje" elektrode, ima značajan učinak na zavar. Uobičajena je udaljenost između kontaktnog vrha i obrade od 25 do 38 mm. Ako se izbočina poveća preko ove udaljenosti, to će uzrokovati predgrijavanje žice elektrode, što će uvelike povećati brzinu taloženja. Kako se izbočina povećava, prodiranje u osnovni metal se smanjuje. Ovaj čimbenik treba ozbiljno razmotriti jer je u nekim situacijama potrebna dobra penetracija u taline u osnovni materijal. [21,24]

Dubinu sloja praška također treba uzeti u obzir. Ako je pretanak, doći će do izraženijeg iskrenja kroz prašak ili bljesak luka. To također može uzrokovati poroznost. Ako je sloj praška prevelik, zavar može biti uzak i neravan. Previše malih čestica u prašku može uzrokovati pojavu rupa na površini budući da plinovi koji se stvaraju u zavarivanju možda neće moći izaći. Oni se ponekad nazivaju tragovima „peckanja“ na površini zavara. [21,22]

Sumarno, neke od prednosti EPP postupka zavarivanja bile bi sljedeće [3]:

- visoka efikasnost
- velika dubina provarivanja
- visoko kvalitetni zavari
- proizvodi minimalnu količinu dima i svjetla od luka
- automatizacija postupka
- 50-90% praška se može ponovno koristiti

Ograničenja EPP postupka jesu sljedeća [3]:

- nužno je precizno pripremiti spoj
- moguće zavarivanje samo u PA i PB pozicijama
- relativno problematični sustavi za rukovanje praškom
- potrebno uklanjanje troske između prolaza i nakon zavarivanja
- tijekom zavarivanja nije moguće praćenje električnog luka
- ostaci praška i troske mogu biti opasni po zdravlje čovjeka

3.3.2. Navarivanje trakastom elektrodom

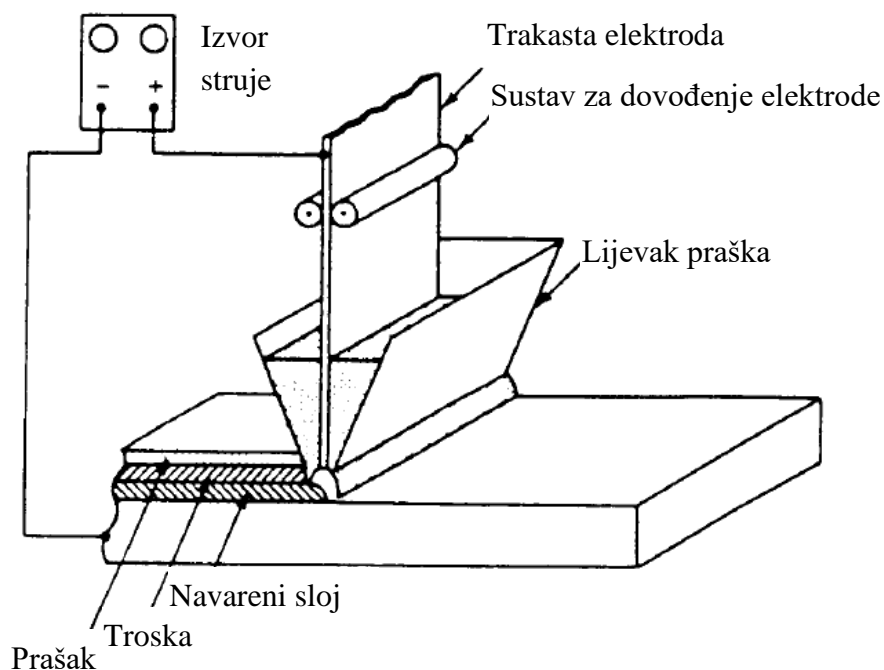
Posebna tehnika kod zavarivanja EPP postupkom je navarivanje trakastom elektrodom. Ova se varijanta koristi kada treba postaviti preklapanje na veliko područje. Na slici 7. je prikazano navarivanje zaštitnog sloja na čeličnu cijev trakastom elektrodom. Korištenjem trake umjesto žice u takvim slučajevima uštedi se puno vremena, a dobiva se kvalitetan sloj jednolikog sastava i teksture. [19,21]

Navarivanje trakastom elektrodom obično se koristi za spajanje oplata otpornih na koroziju s cijevnim limovima u tlačnim posudama. Navareni površinski slojevi tako štite donji sloj materijala od korozije. Osim vremena, ovim se postupkom štede i novčana sredstva, jer nema potrebe da cijeli dio bude izrađen od skupljih materijala, poput nehrđajućeg čelika ili legure nikla. [19,24]



Slika 7. Navarivanje trakastom elektrodom [26]

Uobičajene su trake dimenzija 30 x 0,5 mm ili 60 x 0,5 mm i koriste se umjesto žice za zavarivanje. Struje koje se koriste za taljenje trake veće su od struja za taljenje žice, s obzirom na veću površinu presjeka. Konstrukcija glave za zavarivanje malo je drugačija s obzirom na to da glava treba prenositi električnu energiju na traku umjesto na žicu. Shema procesa prikazana je na donjoj slici. [24]



Slika 8. Shema navarivanja trakastom elektrodom [24]

Kod zavarivanja EPP postupkom javljaju se neke tipične pogreške, od kojih su najčešće [19]:

- nastanak pora,
- neprovareni korijen zavara,
- pukotine od skrućivanja.

Stvaranje ugljičnog monoksida tijekom zavarivanja pod praškom može rezultirati nastajanjem pora. Do toga dolazi uslijed povećanja sadržaja kisika u zavarenoj smjesi, uzrokovanog taljenjem segregacijskih zona ili prodiranjem oksida od korozije ili kamenca. Upotrebom žica s visokim sadržajem silicija, te praha s visokim sadržajem MnO ova se pojava može izbjeći. Nastale pore mogu se prepoznati jer se protežu do površine zrna i raspoređene su u obliku gnijezda. Greške može uzrokovati nedovoljna penetracija radi predebelih elektroda ili pogrešne brzine zavarivanja, kao i udar magnetskog luka zbog neispravnog položaja terminala za uzemljenje. [19,22]

Tijekom zavarivanja može doći do segregacije čestica u mikrostrukturi materijala, što za posljedicu ima nehomogeno raspoređena svojstva po strukturi zavara. Najveću tendenciju ka segregaciji pri zavarivanju imaju čelici s visokim udjelom ugljika i austenitni nehrđajući čelici. Poseban oprez treba biti pri zavarivanju dubokih, uskih šavova, gdje se faze s niskim talištem guraju u jezgru poprečnog presjeka zavara, te se tamo skrućuju posljednji. To može dovesti do skupljanja, ali i do stvaranja vrućih pukotina koje propagiraju interkristalno. Ovaj se problem može riješiti prilagodbom geometrije zavara, odnosno proširenjem šava. [21]

3.3.3. Elektrode

Uobičajeno je koristiti elektrode u obliku žice, koje se isporučuju u promjerima od 1,2 do 12 mm. Promjeri glavnog fokusa iznose od 2,4 do 4 mm. Žice su obložene bakrom radi zaštite od korozije i bolje električne vodljivosti. Označavanje žičanih elektroda za zavarivanje pod praškom nelegiranih i sitnozrnatih čelika vrši se slovom „S“ nakon kojeg slijedi broj koji, podijeljen s faktorom 2, iskazuje prosječni sadržaj mangana u postocima (npr. S2 EN 756). [1,21]

Osim žičanih elektroda, posebno za navarivanje i oblaganje, koriste se i trakaste elektrode. One su debljine od 0,5 do 1 mm i širine od 30 do 60 mm. Za spajanje i za popravak zavara dostupne su i žice punjene praškom. [21]

3.3.4. Zaštitni prašak

Prašak koji se koristi za EPP zavarivanje mora ispunjavati istu funkciju kao i omotač elektroda u obliku šipke. To je zrnati, taljivi proizvod od minerala i metala, pripremljen prema različitim metodama. Može se razlikovati kao rastopljeni 760 (F), aglomerirani (A) i miješani (M) prašak. Osim klasifikacije prema glavnim komponentama, moguća je razlika temeljena na stupnju alkalnosti. [19]

Vrste praška prema stupnju legiranja silicijem i manganom dijele se na [19]:

- 1) neutralne – nemaju veliki utjecaj na promjene sadržaja Mn i Si, no uzrokuju sniženje sadržaja Cr. Imaju mali utjecaj na kemijski sastav i mehanička svojstva zavara. Pogodni su za debljine veće od 25 mm, te za višeslojno zavarivanje, dok kod jednoslojnog zavarivanja može doći do poroznosti metala zavara.
- 2) aktivne – kroz prašak se dodaju male količine Mn i Si što smanjuje pojavu poroznosti, osobito kod zavarivanja korodiranih površina. Ovi su praškovi pogodni za jednoslojno zavarivanje. Najčešće se koriste pri naponu luka do 36 V uz velike brzine zavarivanja. Kod aktivnih se praškova troska lako uklanja.
- 3) legirane – legirni se elementi dodaju kroz prašak. Na stupanj legiranja veliki utjecaj imaju parametri zavarivanja.

Još jedna značajka je kvaliteta praha koja pokazuje za koje su osnovne materijale praškovi za zavarivanje prikladni. Na zavar bitno utječu ponašanje i sastav taline, te nosivost struje. Velika se važnost stoga mora dati izboru kombinacije žice za zavarivanje i praška. Norma EN 756 sadrži podatke o minimalnoj granici razvlačenja, vlačnoj čvrstoći, istezanju i udarnoj čvrstoći metala zavara kao funkciju kombinacije žice i praška. [3]

Odabir kombinacije žice i praška temelji se na svojstvima materijala zavarenih čelika i metalurškom ponašanju. Tijekom zavarivanja dolazi do reakcije između tekućeg metala i troske, te plinova otopljenih u talini. To rezultira, ovisno o temperaturi i koncentraciji uključenih elemenata, istovremenim sagorijevanjem i nakupljanjem određenih elemenata. Ugljik izgara iz svih prašaka. Silicij se obično nakuplja u talini, dok mangan može i izgorjeti i nakupljati se. Omjer dovoda mangana i silicija od žice do elektrode dolazi iz praška. [3]

Na mehanička svojstva zavarenog spoja može se utjecati kombinacijom žice i praška. Norma EN 760 sadrži podatke o ponašanju pri izgaranju i mehaničkim svojstvima, te navodi da su kemijski sastav i mehanička svojstva metala zavara međusobno ovisni. [1,24]

3.3.5. Oprema za EPP zavarivanje

Oprema za zavarivanje koja se koristi za sustave zavarivanja pod praškom sastoji se od tri komponente: sustava za dodavanje praha, sustava za dovod žice i izvora struje za zavarivanje. Ovisno o stupnju mehanizacije, postoje i sredstva za pomicanje glave za zavarivanje kojom se upravlja pripadajućom upravljačkom jedinicom. [21]

Prašak za zavarivanje dovodi se crijevom do točke taljenja gdje je glava za zavarivanje u prašku. Neiskorišteni prah leži labavo na čvrstom sloju troske i može se izvaditi i ponovno koristiti. Dovod žice sastoji se od motora za dovod žice i dva valjka za dovod između kojih prolazi žica. Jedan od valjaka nalazi se na osovini motora i uzrokuje uklanjanje žice s kalema, dok drugi valjak djeluje protutlačno. Brzina kojom se dovodi žica mora se kontrolirati tako da duljina luka rezultira željenom strujom zavarivanja. [1,21]

4. Toplinska obrada zavara

U proizvodnji opreme, postoje slučajevi kada je potrebno toplinski obraditi čelične zavare nakon zavarivanja. To je zato što se metalurgija zavara značajno razlikuje od metalurgije osnovnog metala. Stope zagrijavanja i hlađenja zavara mnogo su brže od onih tijekom procesa proizvodnje osnovnog metala. [27]

Općenito, mikrostruktura metala čeličnog zavara složena je mješavina dvaju ili više konstituenata, kao što su poligonalni ferit, igličasti ferit, karbidni agregati ferita i dr. Ponekad se mogu formirati gornji i donji bainit, martenzit, te mikrokonstituenti austenita s martenzitom. Ova mješavina mikrostrukture može dovesti do vrlo različitih vrijednosti mehaničkih i korozijskih svojstava zavara, pošto su svojstva čelika povezana s njegovim mikrostrukturnim sastavom. Stoga se, kao rješenje za ujednačavanje strukture zavara, primjenjuje toplinska obrada. [14,28]

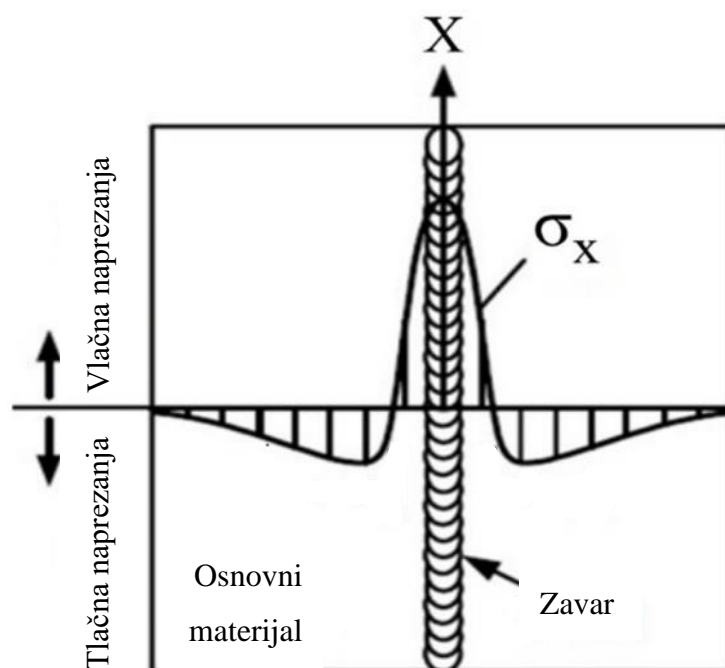
Toplinska obrada uključuje zagrijavanje i hlađenje metala ili legure u čvrstom stanju s namjerom promjene jedne ili više karakteristika materijala. Postupci toplinske obrade uključuju: normalizaciju, kaljenje (površinsko kaljenje, indukcijsko kaljenje itd.), popuštanje, žarenje i dr. Ciljevi žarenja su poboljšanje obradivosti, povećanje duktilnosti, usitnjavanje kristalnog zrna i priprema za idući postupak, modifikacija električnih i magnetskih svojstava, smanjenje zaostalih naprezanja itd.

4.1. Zaostala naprezanja u zavaru

Unutarnja naprezanja javljaju se u materijalu nakon izvođenja različitih operacija, te ostaju tamo čak i kada je izvor uklonjen. Operacije koje uzrokuju ova unutarnja naprezanja uključuju postupke hladnog deformiranja, strojnu obradu, brzo zagrijavanje, hlađenje i promjene faze čvrstog stanja tijekom toplinske obrade, nejednoliko hlađenje tijekom lijevanja, te širenje i skupljanje zavarenih spojeva. [27]

Toplinski ciklus zavarivanja stvara nehomogeno zagrijavanje i hlađenje u područjima u blizini izvora topline, uzrokujući tako zaostala naprezanja u zavaru. Povišena temperatura koja se javlja tijekom zavarivanja dovodi do lokalnog širenja volumena unutar i oko zone taljenja koja je ograničena hladnijim okolnim materijalom, uzrokujući toplinska naprezanja koja mogu rezultirati deformacijama. Kako se rub zavara skuplja tijekom skrućivanja, ponovno ga ograničava hladniji okolni materijal. To uzrokuje vlačna naprezanja u području zavara koja su

uravnotežena tlačnim zaostalim napreznjima u području daljem od zavora, što je shematski prikazano na donjoj slici. [29]



Slika 9. Shema zaostalih napreznja u zavaru [17]

Učinci zaostalih napreznja posebno su značajni kada je komponenta podvrgnuta cikličkom opterećenju. Zbog kombinacije mikrostrukturnih modifikacija i vlačnih zaostalih napreznja zavori su općenito kritična područja strukturnih komponenti, koja su posebno osjetljiva na lom uslijed umora materijala. [29]

Zaostala napreznja su izraženija kod debelih zavarenih ploča, primjerice onih koje se koriste u proizvodnji brodskih trupova. Konvencionalna metoda zavarivanja koju trenutno koriste brodograditelji uključuje nizak unos topline (manje od 2 kJ/mm) u više prolaza, što je uobičajena praksa već desetljećima. Međutim, kako bi se povećala produktivnost i učinkovitost proizvodnje, predlažu se i procjenjuju nove tehnike zavarivanja s ciljem smanjenja zaostalih napreznja i poboljšanja dinamičke izdržljivosti. Ove tehnike općenito uključuju jedan prolaz s iznimno visokim unosom topline (više od 60 kJ/mm). [29]

Općenito, zaostala napreznja uslijed zavarivanja mogu se klasificirati u dvije skupine: uzdužne i poprečne komponente (uzdužne su obično veće od poprečnih). Na slici 9. prikazana je krivulja klasičnog uzdužnog zaostalog napreznja. Krivulja nalikuje Gaussovoj distribuciji: vlačno

naprezanje izraženo je u središtu zavara i progresivno se smanjuje što je dalje od središta. Izvan granice zavara vlačno naprezanje se naglo smanjuje i pretvara u tlačno naprezanje. Ova je krivulja naprezanja izračunata na temelju ekspanzije materijala i temperature, te se dugo vremena smatralo da se zaostala naprezanja distribuiraju upravo na ovaj način. [17]

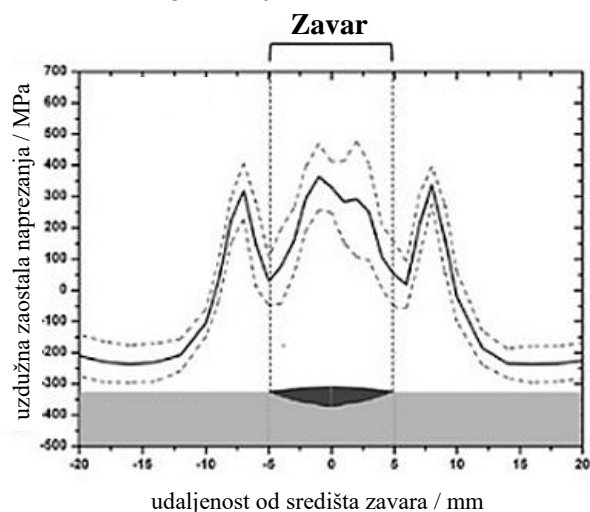
Danas, razvojem nedestruktivnih tehnika analiziranja naprezanja i mjerne opreme kao što su Barkhausenov šum, difrakcija X-zraka, difrakcija neutrona i ultrazvučna metoda, istraživači mogu analizirati naprezanje zavarivanja izravno iz obratka bez strojne obrade ili oštećenja uzorka i dobiti stvarnu krivulju naprezanja. Dvije uobičajene metode eksperimentalnog mjerenja su difrakcija rendgenskih zraka i difrakcija neutrona koje su primjenjivane u mnogim istraživanjima o naprezanjima u zavarima niskougličnih čelika. [17]

Slika 10. prikazuje uzdužne profile naprezanja pri zavarivanju različitih čelika s niskim udjelom ugljika. Sve ove krivulje pokazuju zajednički fenomen: postoje mjesta visokog naprezanja izvan granice zavara. Krivulje nisu Gaussovog oblika već M-oblika. Vrijednosti naprezanja na tim mjestima mogu biti veće od onih na središtu zavara, kao što je slučaj u b) i c) primjeru. Kako bi se razumio razlog ovakvog oblika krivulje, potrebno je razmotriti promjene u zoni utjecaja topline (ZUT) zavara jer se lokalni ekstremi nalaze upravo u tom području. [17]

Ova zaostala naprezanja mogu biti izuzetno opasna za dio u eksploataciji jer rezultira stvaranjem pukotina, međukristalnom korozijom, promjenom dimenzija ili savijanjem. Kako bi se prevladala ta zaostala naprezanja, nakon hladnog deformiranja, strojne obrade, kaljenja i operacija oblikovanja izvodi se žarenje za redukciju zaostalih naprezanja. [4]

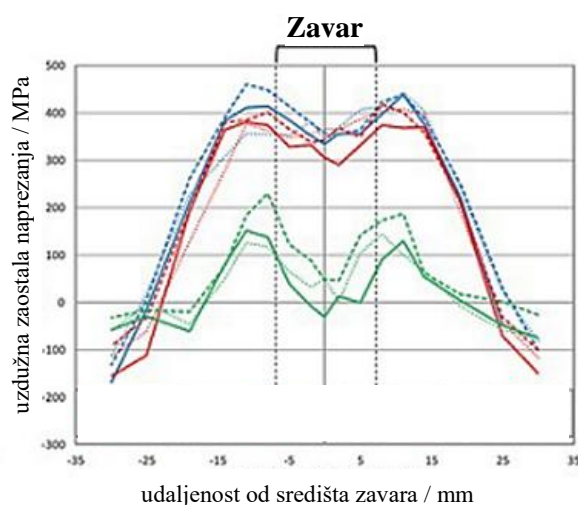
Osnovni materijal: S1100QL

Bez dodatnog materijala



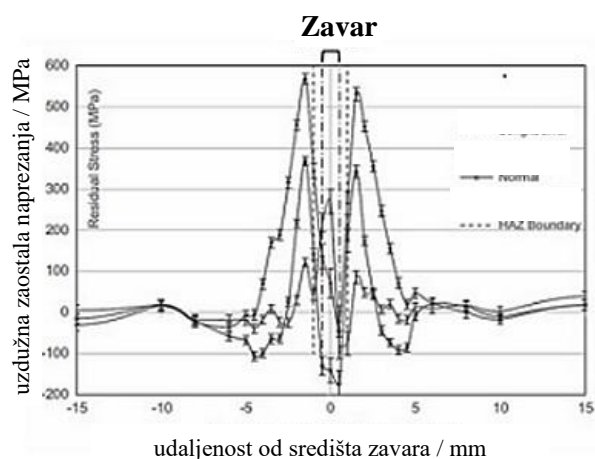
Osnovni materijal: CSA G40.21M Grade 350WT

Dodatni materijal: AWS A5.18-2005



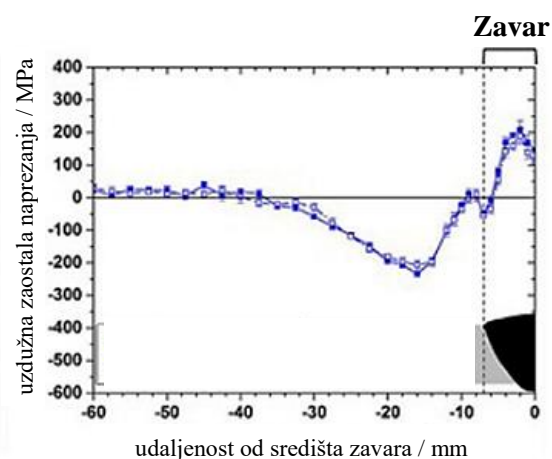
Osnovni materijal: ASTM A387 Grade 91

Bez dodatnog materijala



Osnovni materijal: S355J2H+N

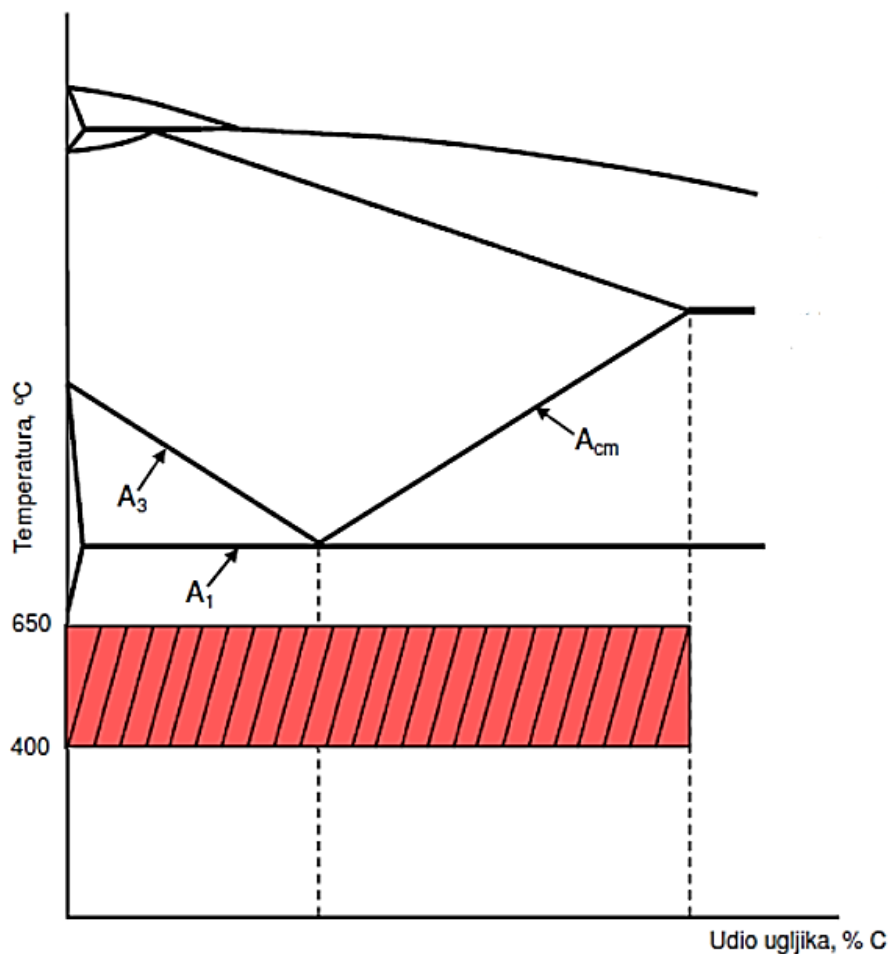
Dodatni materijal: ISO 14341-A-G 4Si1



Slika 10. Zaostala naprežanja u zavarima izmjerena X-zrakama [17]

4.2. Žarenje za redukciju zaostalih naprežanja

Tijekom žarenja za redukciju naprežanja materijal se zagrijava ispod donje kritične linije A_1 (crveno šrafirano područje na slici 11.) bez mijenjanja mikrostrukture materijala. Zagrijavanje inicira plastičnu deformaciju u područjima elastične deformacije koja su izvor zaostalih naprežanja. Time se djelomično ili potpuno popuštaju naprežanja bez izazivanja ikakve promjene dimenzija. [27]



Slika 11. Temperaturno područje za žarenje za redukciju zaostalih naprezanja [30]

Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja koristi se iz dva razloga. Prvi je očigledno redukcija zaostalih naprezanja koje su izazvane prethodnom obradom. Uzrok samih naprezanja su nejednake unutarnje deformacije nastale prijelazom iz elastične u plastičnu deformaciju. Osim toga, uzrok nastajanja zaostalih naprezanja također mogu biti rezultat konstantne plastične deformacije. [29]

Drugi razlog odnosi se na obratke debelih stijenki obrađivanih na visokim temperaturama. Takvi su obratci najčešće neravnomjerno ohlađivani što izaziva naprezanja. Veća razlika debljine stijenke obratka doprinosi većim napreznjima, kao i viša temperatura obratka, što je slučaj kod zavarivanja. [27]

Temperatura na koju se čelik zagrijava kod ovog postupka iznosi od 400 °C do 650 °C. Na toj se temperaturi drži 2 ili više sati, te se vrlo sporo hladi. Ako se ne želi poništiti efekt očvršćivanja nastalim prethodnim hladnim gnječenjem čeličnog obratka, žarenje se izvodi ispod

temperature rekristalizacije. U slučaju da je čelik prethodno zakaljen, može se izvesti djelomično popuštanje zaostalih naprežanja na temperaturi od 100 °C do 300 °C što neće bitno umanjiti njegovu tvrdoću. [27]

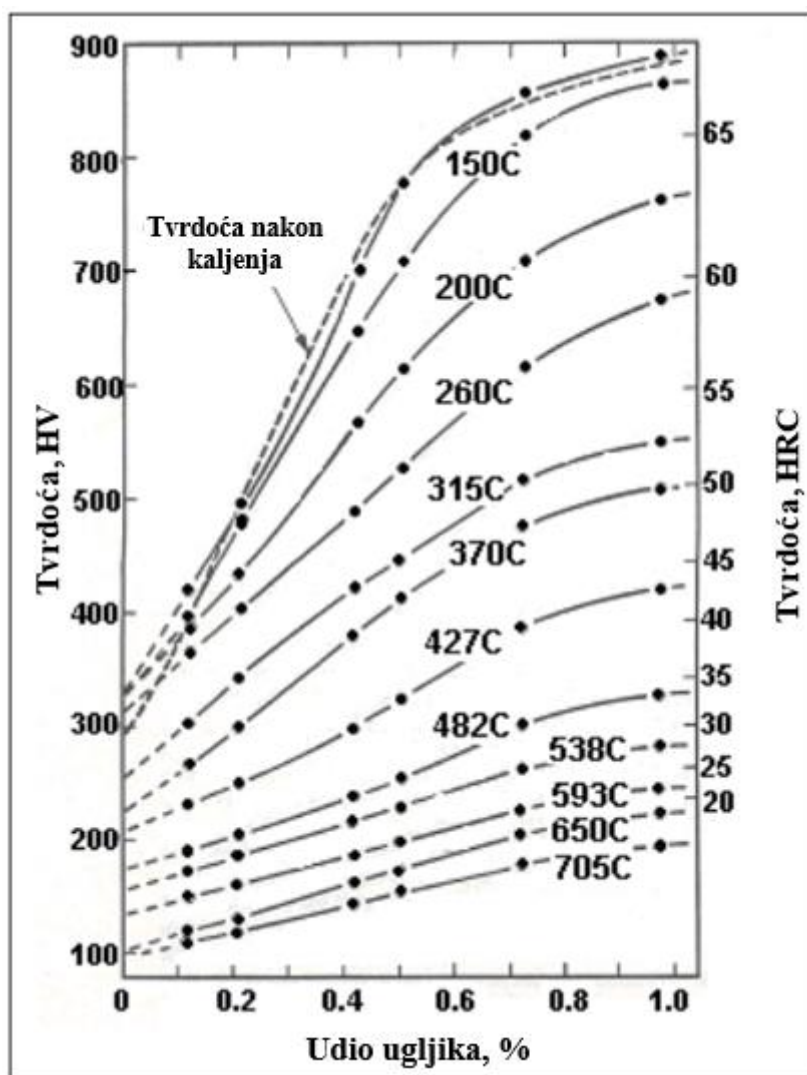
Rezultati procesa žarenja za redukciju naprežanja ovisni su o temperaturi i vremenu procesa, koji mogu biti u korelaciji pomoću Hollomon-Jaffeovog parametra ili Larsen-Millerovog parametra. Oba parametra predstavljaju učinak toplinske obrade na materijal. Očekuje se da procesi koji pokazuju isti parametar žarenja pokazuju isti učinak, npr. na tvrdoću. Jednadžba prema kojoj se određuje ovaj parametar dana je izrazom [31]:

$$P = \frac{T(20 + \log(t))}{1000} \quad (1)$$

gdje je:

P	1	Hollomon – Jaffeov parametar
T	K	temperatura žarenja
t	h	vrijeme držanja

Procesi žarenja ovise o temperaturi na kojoj se žari i vremenu držanja na toj temperaturi. Nepravilan odabir ovih parametara može potencijalno uzrokovati povećanje krhkosti, napetosnu koroziju, pucanje i zaostalo naprežanje. Nadalje, odabir odgovarajuće temperature i vremena ovisi o sadržaju ugljika i sastavu čelika. Na slici 12. je prikazana međuovisnost temperature žarenja kao funkcije sadržaja ugljika u ugljičnom čeliku. [31]



Slika 12. Tvrdoća martenzita prije i nakon žarenja na različitim temperaturama [31]

Međutim, ovi više tradicionalni numerički izrazi pretpostavljaju izotermne procese žarenja koji rijetko postoje u pećima za žarenje zbog perioda zagrijavanja prije držanja na određenoj temperaturi. Ukupno vrijeme držanja ovisi o potrebnoj vrijednosti tvrdoće koja ovisi o mehaničkim zahtjevima za proizvod. Ukupno vrijeme žarenja također je ovisno o veličini i obliku obratka. [31]

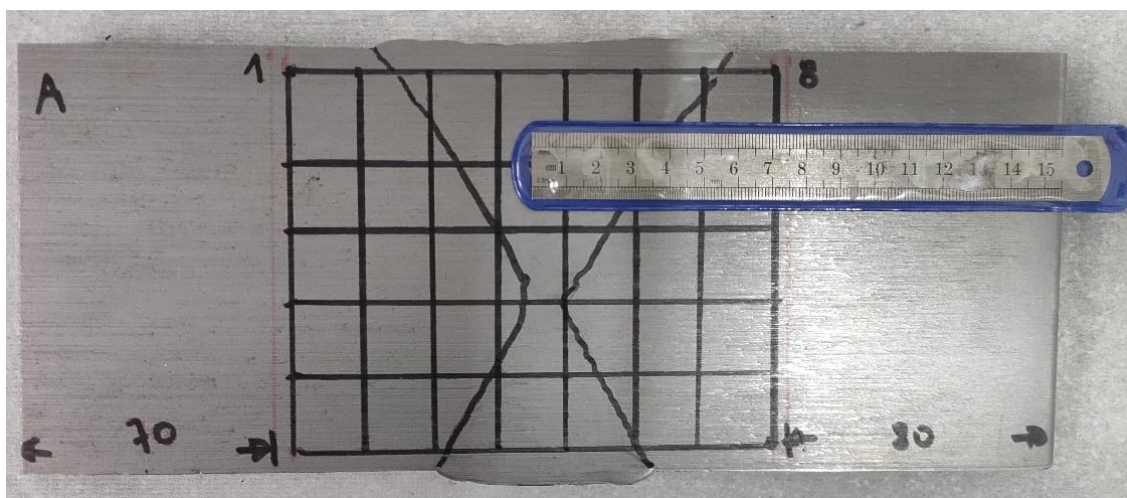
EKSPERIMENTALNI DIO

5. Priprema i provedba pokusa žarenja u laboratorijskoj električnoj peći

5.1. Priprema zavarenih uzoraka

Ispitni su uzorci izrađeni u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Dvije ploče konstrukcijskog čelika S235 zavarene su EPP postupkom struje jačine 600 A pod naponom od 28 V. Brzina zavarivanja bila je 45 cm/min, sa žicom promjera 4 mm. Zaštitni prašak korišten u procesu je prema normi EN ISO 14174: S A FB 1 55 AC H5 prašak za ugljične i niskolegirane čelike.

Iz zavara su izrezani uzorci A, B i C, te su potom obrađeni glodanjem i brušenjem kako bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta površine za daljnja ispitivanja. Nadalje, u radu se pretpostavlja da su uzorci istog polaznog stanja. Dimenzije uzoraka su 300 x 120 x 18 mm. Jedan je uzorak prikazan na slici 13 i na njemu se jasno vidi rub zavara što će olakšati tumačenje rezultata u nastavku rada. Na uzorku je u pripremi nacrtana mreža s 48 sjecišta, odnosno 48 kontrolnih točaka razmaknutih 20 mm za koje će se uspoređivati podaci.



Slika 13. Ispitni uzorak zavara

U ovom će se radu ispitati tvrdoća, te zaostala naprežanja u određenim točkama uzorka prije i nakon postupka žarenja. Cilj je pronaći korelaciju između parametara žarenja i zaostalih naprežanja u zavaru. Nužna posljedica žarenja je smanjenje tvrdoće, a pretpostavka je da će uzorak žaren na najvišoj temperaturi najduže vremena potpuno otpustiti naprežanja u zavaru nastala tijekom i nakon zavarivanja.

5.2. Plan pokusa žarenja u laboratorijskoj električnoj peći

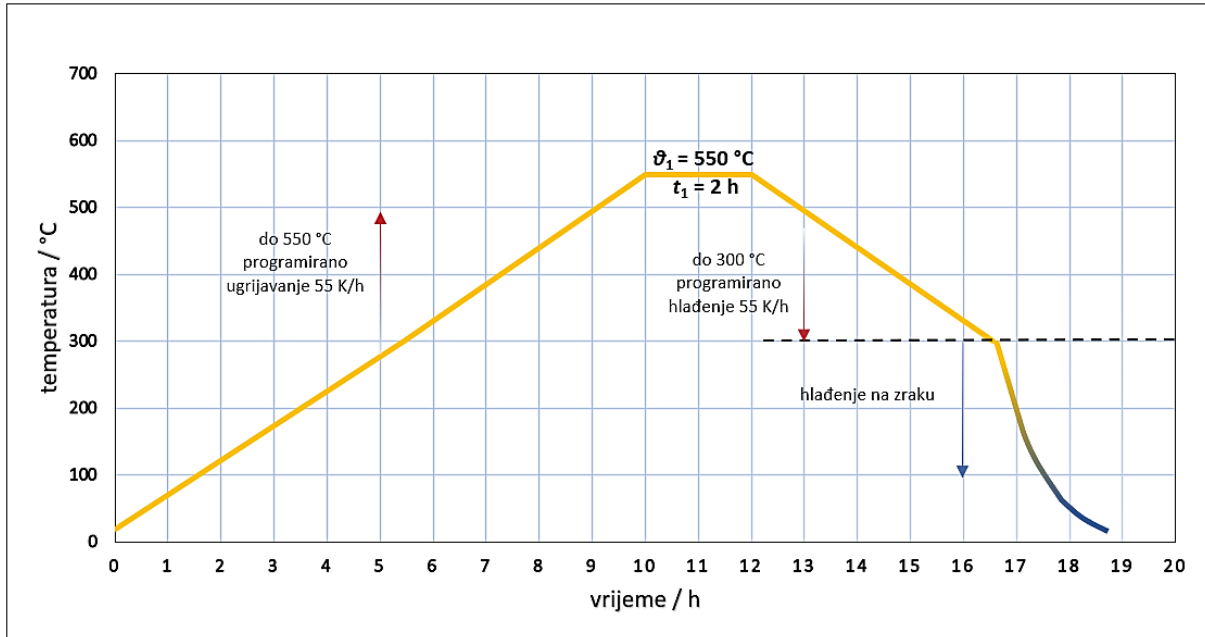
Uzorci A, B i C podvrgnut će se istom postupku žarenja (za smanjenje zaostalih naprezanja) s različitim vrijednostima vremena i temperature žarenja. U tablici 3. je izvod iz norme ISO/NP 14745:2007 vezan za toplinsku obradu čelika S235 nakon zavarivanja. Prema normi, preporučena temperatura držanja iznosi od 550 do 600 °C. Vrijeme držanja na toj temperaturi ovisi o debljini materijala, a pošto se radi o uzorcima koji su deblji od onih za koje propisuje norma, uzet će se vremena od 2, 3 i 4 sata.

Tablica 3. Toplinska obrada čelika nakon zavarivanja [4]

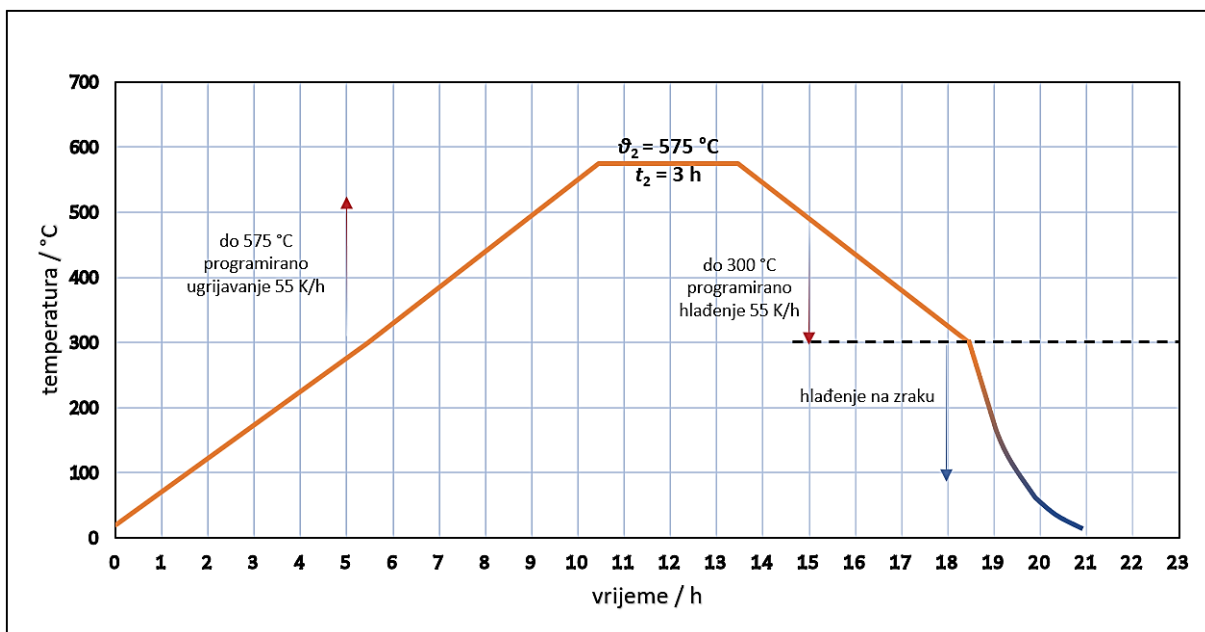
Skupina materijala prema ISO/TR 15608	Materijal	Temperatura držanja, °C	Debljina materijala e , mm	Vrijeme držanja, min	P_{crit}
1.1	Čelici s $R_{eH} \leq 275$ MPa	550 – 600	$e \leq 35$ $35 < e \leq 90$ $e > 90$	30 $e-5$ $40+0,5e$	17,5

Kako ovi postupci izgledaju u grafičkom prikazu može se vidjeti na slikama 14 do 16. Premda je u normi ISO 14745:2007 propisano regulirano ugrijavanje, odnosno hlađenje brzinom od 55 K/h tek iznad 300 °C, radi ograničenja na programatoru peći, uzorci su bili ugrijavani konstantnom brzinom (55 K/h) već od sobne temperature.

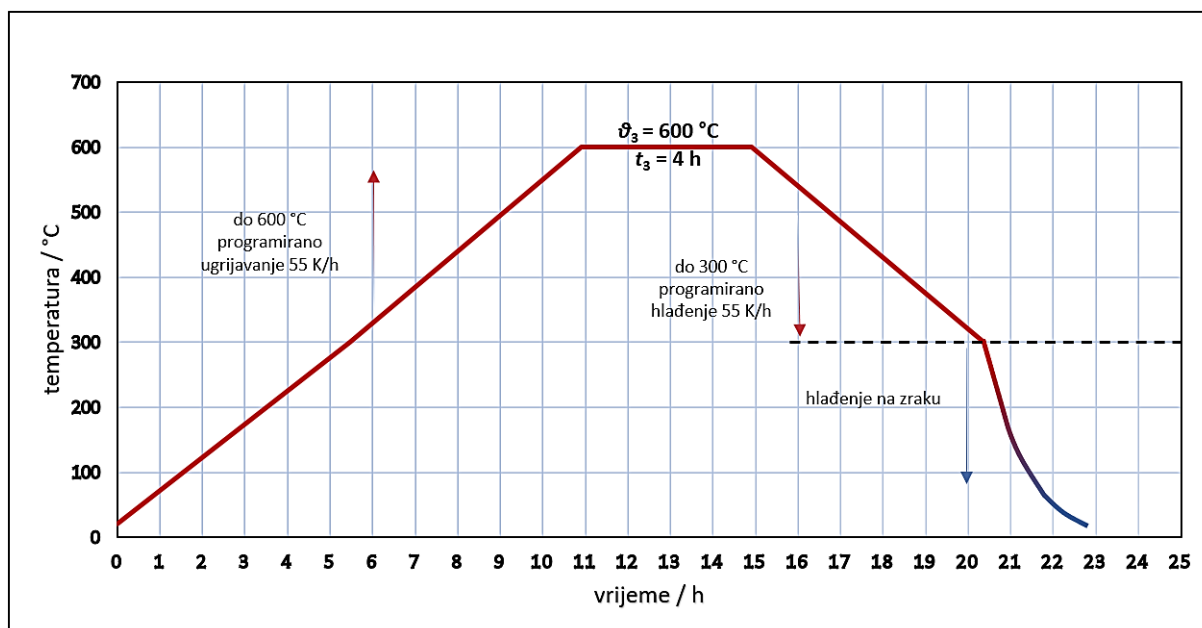
Za zavarene uzorke takav program ne predstavlja problem, štoviše, još je sigurnije zaključiti da će uzorak biti dobro progrijan. S druge strane, ovaj režim ugrijavanja povećava ukupno vrijeme postupka za oko 5 sati, što znači i povećanu potrošnju energije.



Slika 14. Plan postupka žarenja za uzorak A

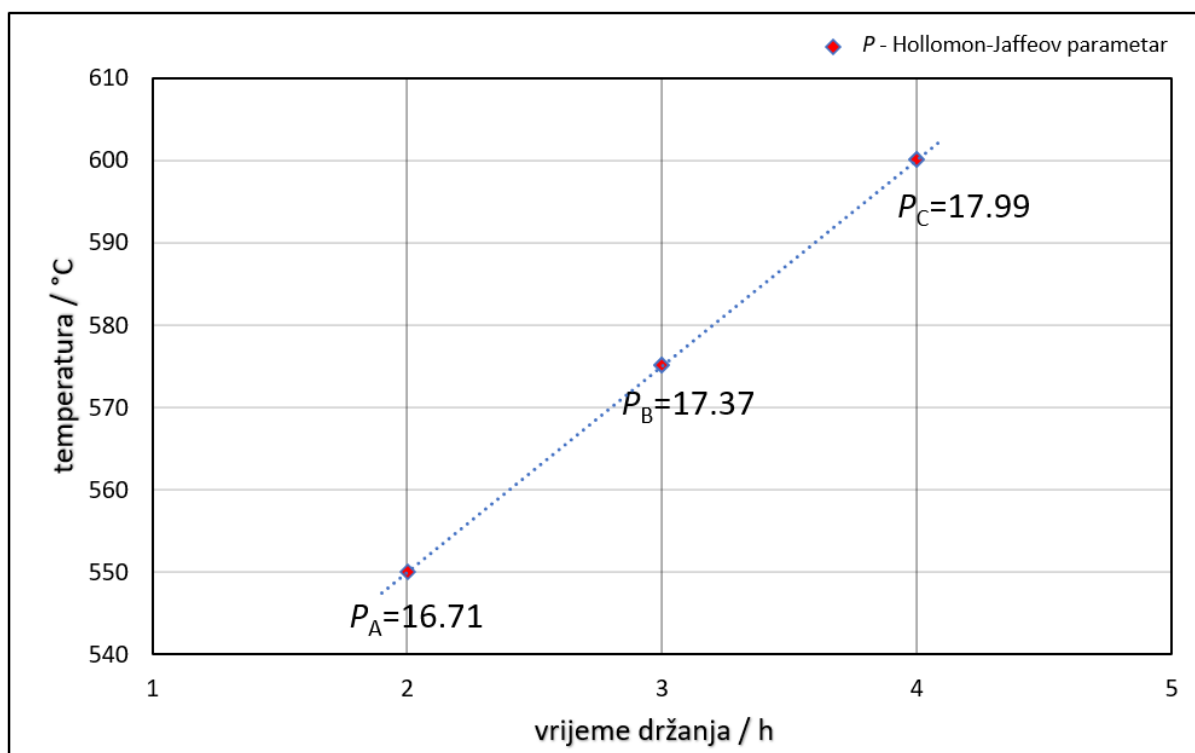


Slika 15. Plan postupka žarenja za uzorak B



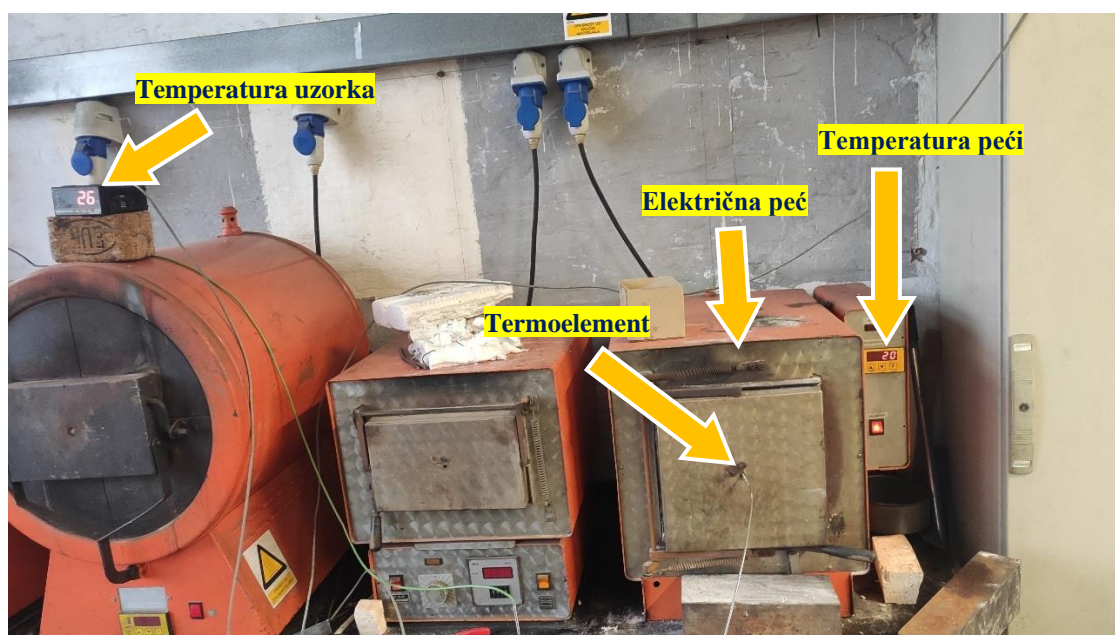
Slika 16. Plan postupka žarenja za uzorak C

Na slici 17. prikazan je plan pokusa s izračunatim Hollomon – Jaffeovim parametrima za svaki od uzoraka.

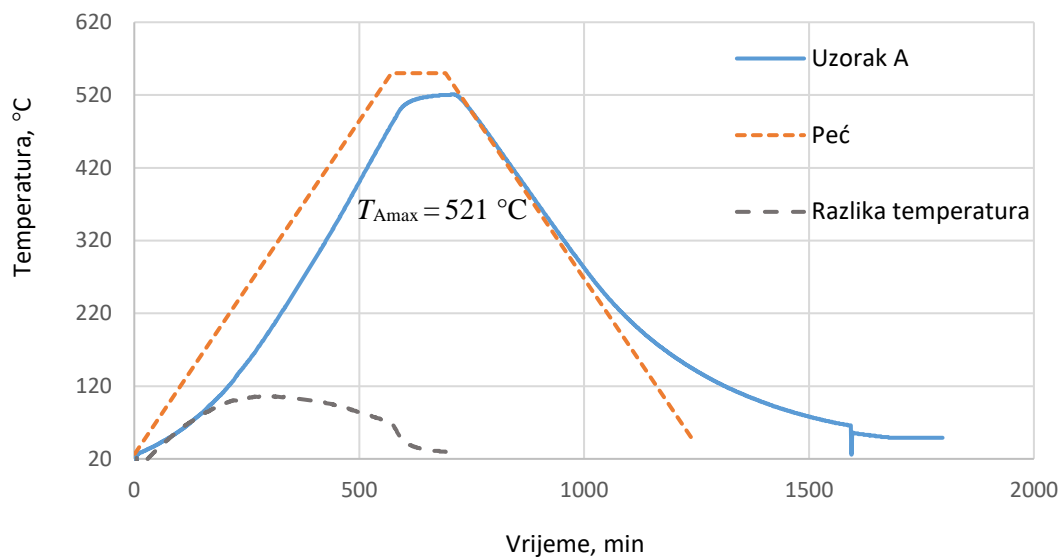


Slika 17. Plan pokusa prema Hollomon-Jaffeovim parametrima

Kad su poznati svi parametri procesa, kreće se u izvođenje pokusa. U maloj laboratorijskoj električnoj peći se pomoću programatora odrede četiri točke temperature, te vrijeme potrebno da se dosegnu te temperature. Time se osigurava potrebna brzina zagrijavanja i hlađenja od 55 K/h. Pošto se zbog kondukcije uzorak zagrijava sporije negoli peć, u uzorak se ugrađuje termoelement koji prati temperaturu samog uzorka, te ostavlja trag u računalu. Prikaz sustava može se vidjeti na slici 18. Na taj će se način dobiti dvije krivulje na grafu, jedna za peć, druga za uzorak, kao na slici 19.



Slika 18. Električna komorna peć i mjerni uređaji za regulaciju temperature peći i mjerenje temperature uzorka



Slika 19. Stvarni dijagram procesa žarenja za uzorak A

Uspoređujući stvarni i planirani dijagram žarenja za uzorak A, može se primijetiti kako uzorak A nije dosegao maksimalnu temperaturu peći od 550 °C. Maksimalna temperatura uzorka iznosila je oko 30 °C manje od predviđene. Može se navesti nekoliko elemenata koji su utjecali na ovakav ishod. Jedan od njih je tehnička nesavršenost električne peći i njenih senzora za temperaturu. U kombinaciji s nesavršeno postavljenim termoelementom u uzorku, ovi se utjecaji ne mogu zanemariti, te sigurno u nekoj mjeri utječu na odstupanje.

Kao glavni razlog ove razlike temperatura navodi se sama veličina uzorka. Koeficijent vodljivosti topline za ugljični čelik jednostavno nije dovoljan da bi se temperatura uzorka ovih dimenzija izjednačila s temperaturom peći u tako kratkom vremenskom periodu.

S ovom spoznajom, žarenja za uzorke B i C modificirat će se na sljedeći način:

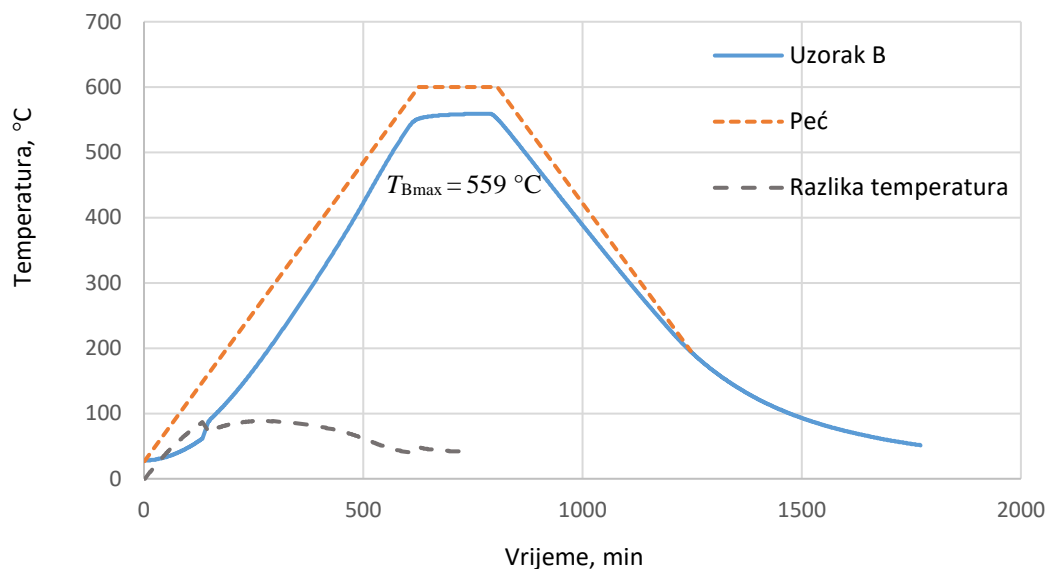
- temperatura peći za uzorak B umjesto 575 °C bit će postavljena na 600 °C uz nepromijenjeno vrijeme držanja od 3 h
- temperatura peći za uzorak C umjesto 600 °C bit će postavljena na 650 °C uz nepromijenjeno vrijeme držanja od 4 h

Shodno ovim promjenama, vrijednosti Hollomon – Jaffeovog parametra se također mijenjaju prema jednadžbi (1), te njihove nove vrijednosti iznose:

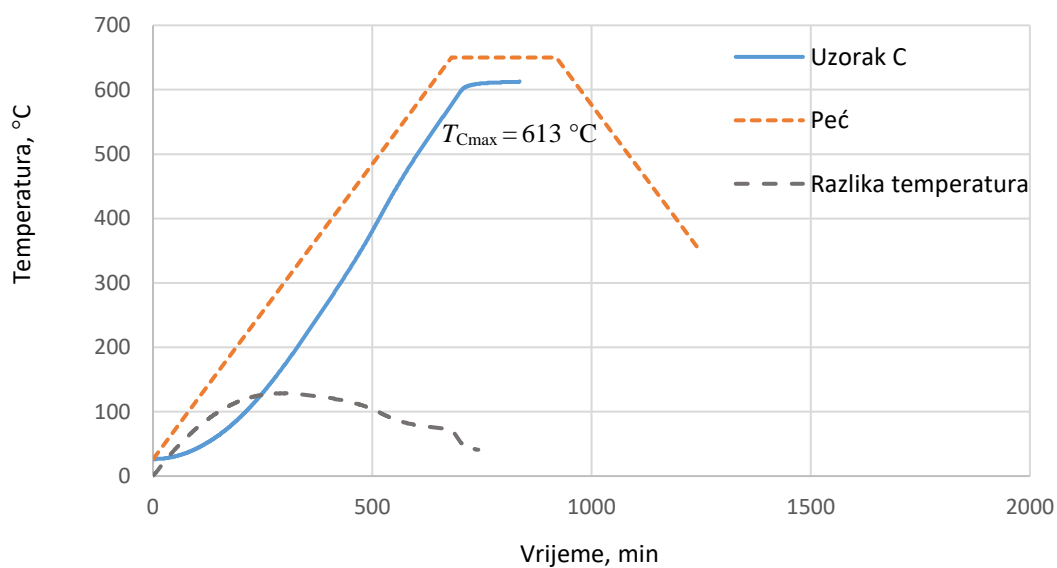
- $P_A = 16,71$

- $P_B=17,88$
- $P_C=19,02$

Više vrijednosti Hollomon – Jaffeovog parametra znače veći utjecaj toplinske obrade na čelik, no treba uzeti u obzir da su ovo predviđene vrijednosti. Stvarne vrijednosti parametara bit će izračunate u nastavku kada budu poznate stvarne temperature žarenja za sve uzorke.



Slika 20. Stvarni dijagram procesa žarenja za uzorak B



Slika 21. Stvarni dijagram procesa žarenja za uzorak C

Radi tehničkih problema s mjerenjem temperature uzorka tijekom hlađenja, krivulje temperatura za uzorak C nisu potpuno iscrtane. Međutim, za potrebe ovog rada dovoljno je bilo poznavati samo temperaturu žarenja što se iz dijagrama može iščitati.

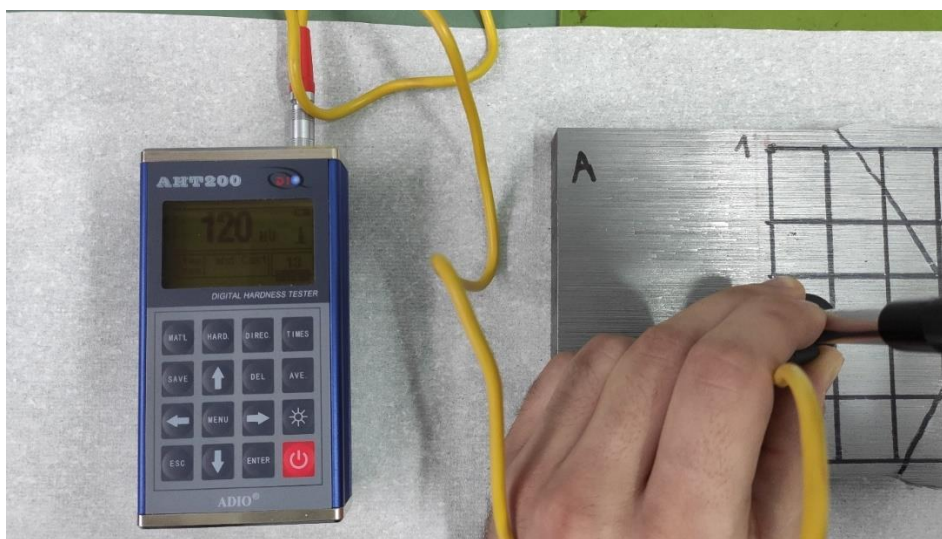
Kad su poznate sve temperature žarenja, mogu se izračunati i stvarne vrijednosti Hollomon – Jaffeovog parametra iz jednadžbe (1):

- $P'_A = 16,12$
- $P'_B = 17,04$
- $P'_C = 18,26$

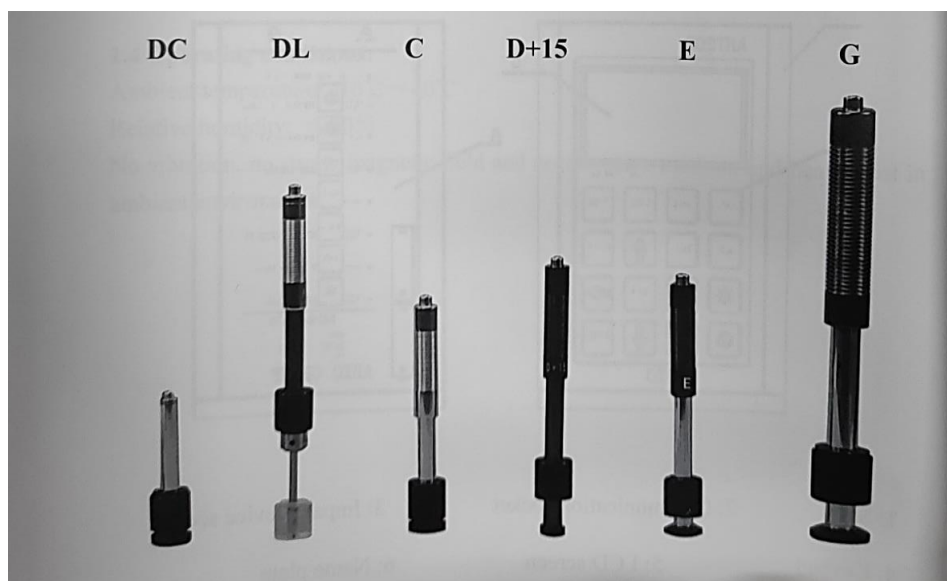
6. Rezultati žarenja u laboratorijskoj električnoj peći

6.1. Ispitivanje tvrdoće prije i nakon žarenja za smanjenje zaostalih naprezanja

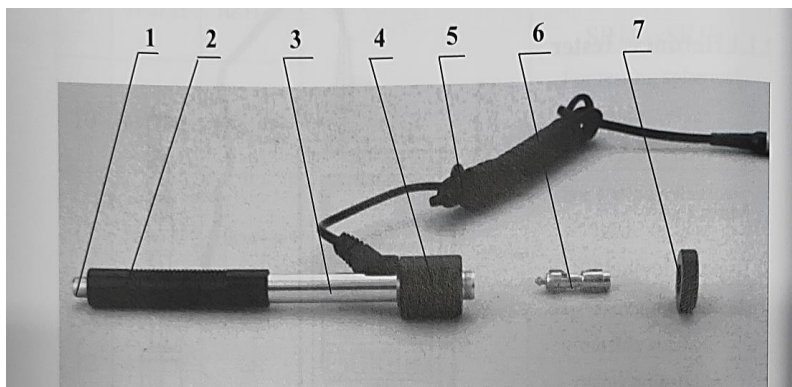
Tvrdoća u pojedinim točkama uzoraka mjerena je uređajem AHT200 Leeb prikazanim na slici 22. AHT200 Leeb je prijenosni uređaj veličine pametnog mobitela koji nudi opciju spajanja jedne od 7 vrsta udarnih naprava prikazanih na slici. U ovom radu je za mjerenje tvrdoće korištena naprava D. Prikaz naprave kao i njezinih elemenata moguće je vidjeti na slikama 23 i 24.



Slika 22. AHT200 Leeb Hardness Tester



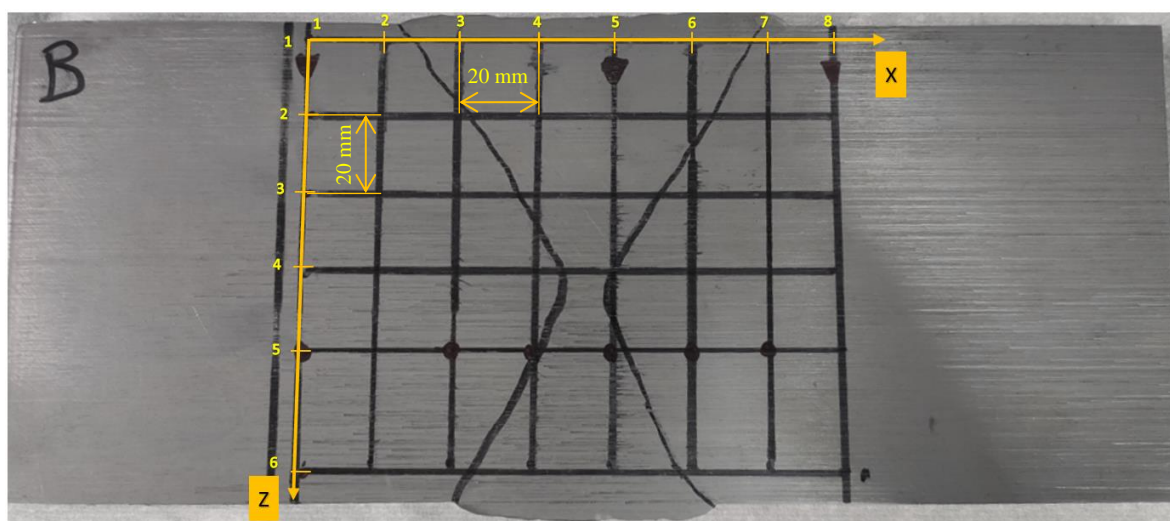
Slika 23. Tipovi udarnih naprava za AHT200 Leeb



Slika 24. Udarne naprava tipa D za mjerenje tvrdoće (1 – gumb za otpuštanje, 2 – napinjuća cijev, 3 – cijev za navođenje, 4 – zavojnica, 5 – priključni kabel, 6 – udarno tijelo, 7 – potporni prsten)

Postupak mjerenja sastoji se od postavljanja udarne naprave okomito na mjesto na kojem se želi ispitati tvrdoća. Pridržavajući napravu, plastična cijev se napne, te se pritisne gumb za otpuštanje. Pritiskom na gumb, udarno tijelo koje na čelu ima oblik kuglice pada i odbija se od površine ispitivanog materijala. Senzor potom mjeri odskok tijela od površine materijala i šalje podatak u elektronički uređaj koji na temelju zadane konfiguracije za, u ovom slučaju, konstrukcijski čelik vraća povratnu informaciju tj. tvrdoću u toj točki.

Postupak za jednu točku traje svega nekoliko sekundi, stoga se u ovom radu tvrdoća prije žarenja ispitivala na jednom uzorku u 48 točaka, na mreži točaka prikazanoj na slici 25. Pošto su sva tri uzorka izrađena iz istog zavara i pretpostavlja se da su uzorci identični, nije bilo potrebe mjeriti tvrdoću druga dva uzorka u svim točkama.

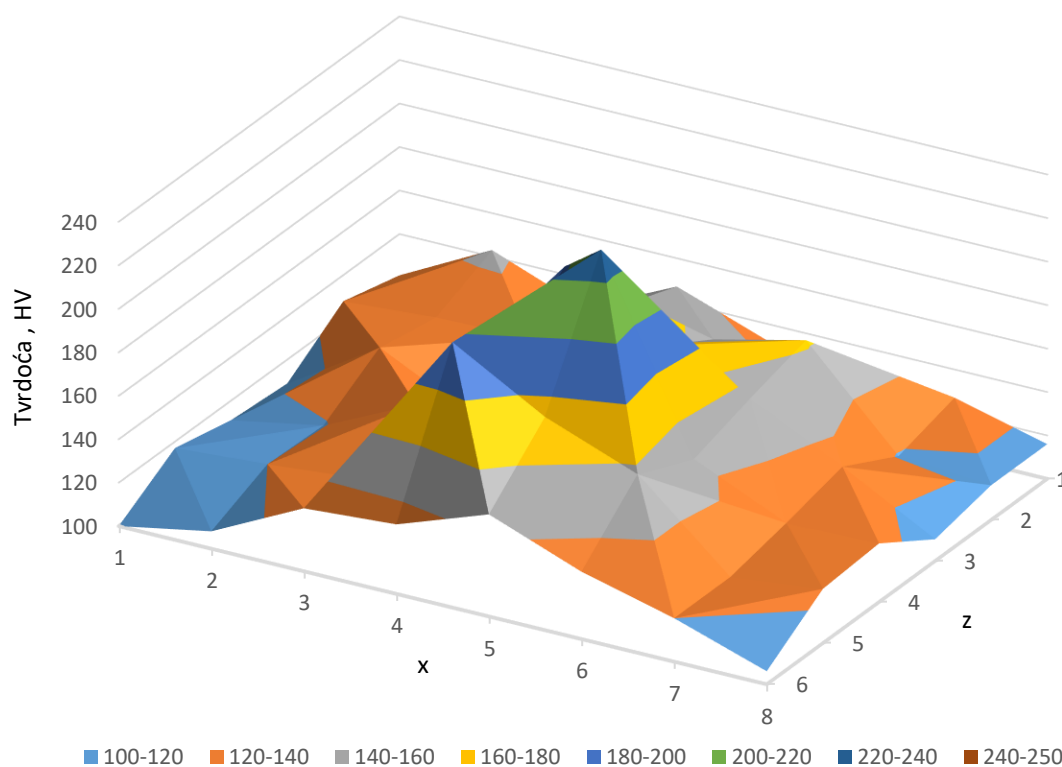


Slika 25. Koordinatni sustav ispitne mreže uzorka

Rezultati ispitivanja uzorka A prije žarenja prikazani su u tablici 4., te grafički prikazani na slici 26. Iz rezultata ispitivanja tvrdoće uočava se najviša vrijednost tvrdoće (171 HV do 231 HV) u korijenu zavora, na presjecištima redaka 4 i 5, sa stupcima 4 i 5.

Tablica 4. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže prije žarenja

Tvrdoća uzorka A, HV								
Broj retka na osi z	Broj stupca na osi x							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	121	143	127	147	132	120	127	116
2	128	131	132	157	152	162	119	116
3	109	136	115	194	168	154	133	110
4	111	119	139	171	231	145	126	127
5	117	120	124	197	173	157	120	125
6	98	108	129	132	147	131	120	106



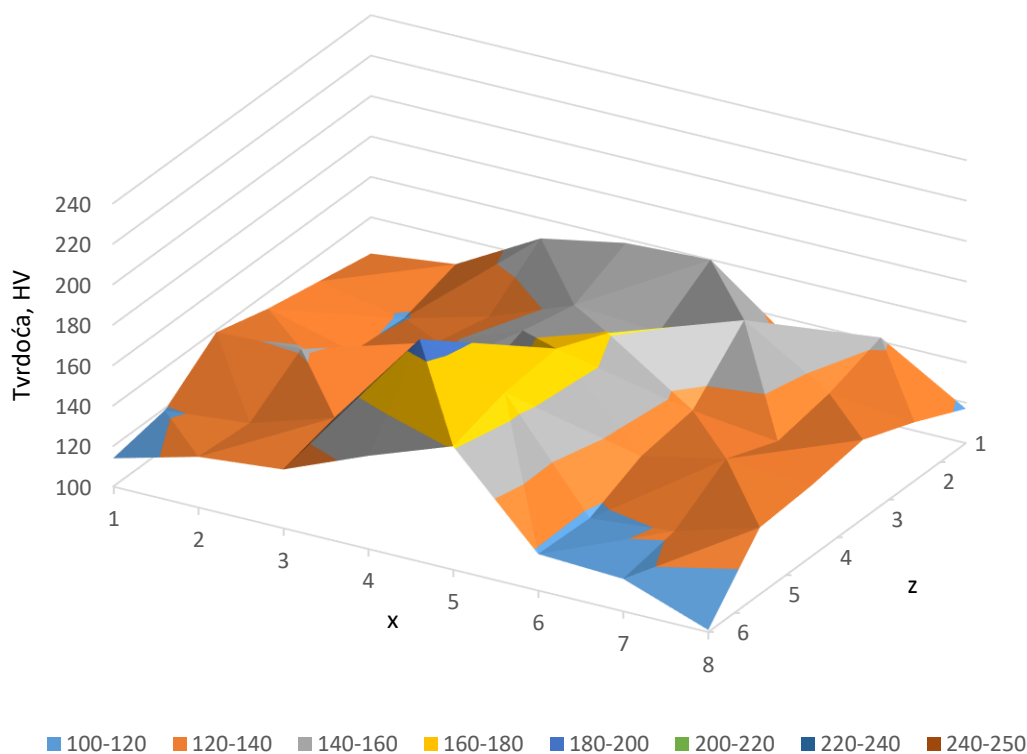
Slika 26. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže prije žarenja u laboratorijskoj peći

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je najveća tvrdoća zavora oko središta, odnosno u korijenu zavora. Pretpostavka je da će se žarenjem generalno smanjiti tvrdoća, a posebno u području

korijena zavara. Vrijednosti tvrdoće uzorka nakon žarenja s različitim parametrima mogu se vidjeti u tablicama 5 do 7 i njima pripadajućim slikama 27 do 29.

Tablica 5. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći

Tvrdoća uzorka A, HV								
Broj retka na osi z	Broj stupca na osi x							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	122	127	150	158	160	128	142	117
2	127	119	130	146	143	159	133	129
3	132	121	136	152	161	133	128	139
4	139	141	131	142	172	129	138	135
5	119	123	136	185	169	117	121	133
6	114	125	129	146	161	118	116	101

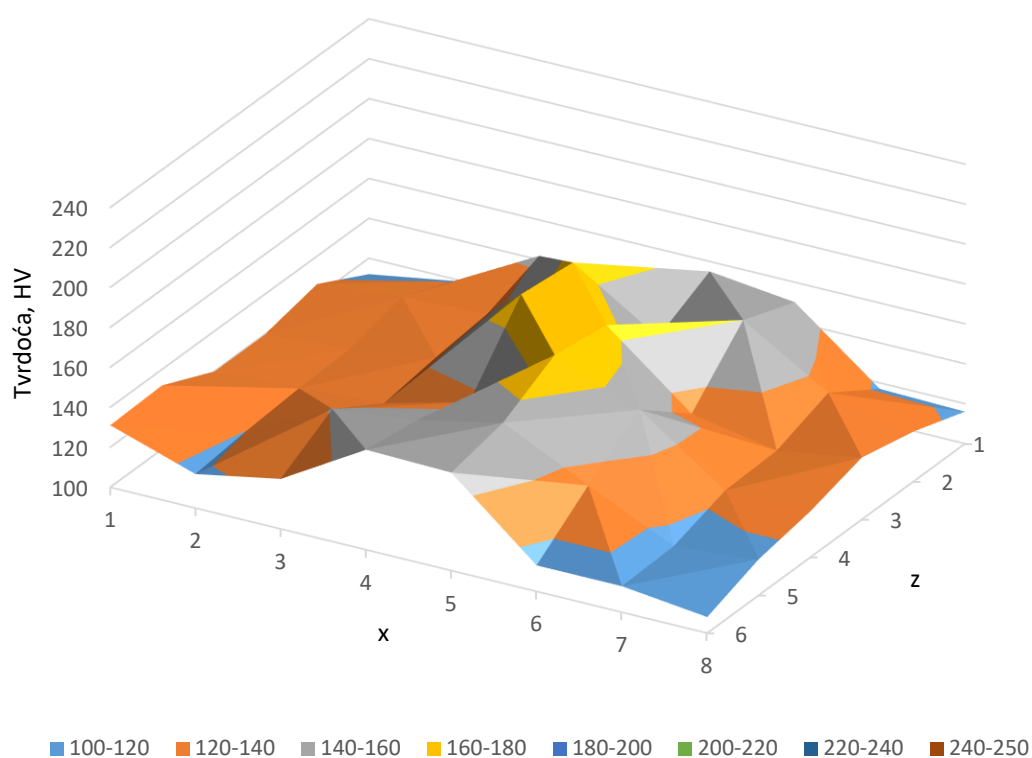


Slika 27. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći

Iz rezultata ispitivanja tvrdoće na uzorku A uočava se najviša vrijednost tvrdoće (142 HV do 185 HV) u korijenu zavara, na presjecištima redaka 4 i 5, sa stupcima 4 i 5. Iz rezultata se uočava da je najviša vrijednosti tvrdoće 231 HV smanjena žarenjem na 550 °C/2 h na iznos 172 HV.

Tablica 6. Tvrdoća uzorka B u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći

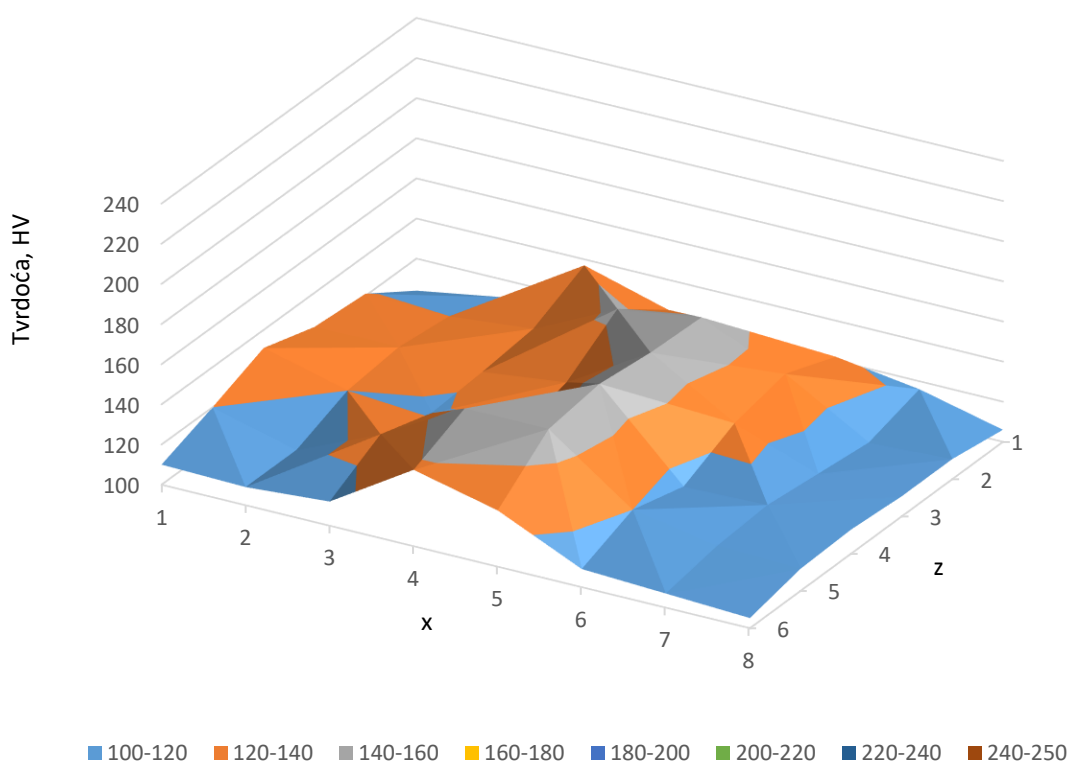
Tvrdoća uzorka B, HV								
Broj retka na osi z	Broj stupca na osi x							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	112	119	142	135	155	150	117	116
2	126	130	132	168	141	160	134	125
3	120	123	129	171	166	132	124	131
4	120	122	125	136	170	153	123	123
5	132	120	141	146	155	134	114	118
6	131	117	125	150	149	113	113	108

**Slika 28. Tvrdoća uzorka B u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći**

Iz rezultata ispitivanja tvrdoće na odžarenom uzorku B uočava se najviša vrijednost tvrdoće (136 HV do 170 HV) u korijenu zavora, na presjecištima redaka 4 i 5, sa stupcima 4 i 5. Kod ovog uzorka, najviša vrijednosti tvrdoće 231 HV (u zavarenom stanju) smanjena je žarenjem na 575 °C/3 h na iznos 170 HV.

Tablica 7. Tvrdoća uzorka C u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći

Tvrdoća uzorka C, HV								
Broj retka na osi z	Broj stupca na osi x							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	104	111	137	125	114	122	116	106
2	121	120	124	144	150	132	108	110
3	123	123	121	126	151	126	111	110
4	131	120	119	118	154	113	114	112
5	120	109	127	150	150	120	112	111
6	110	109	112	138	128	109	107	105

**Slika 29. Tvrdoća uzorka C u točkama mreže nakon žarenja u laboratorijskoj peći**

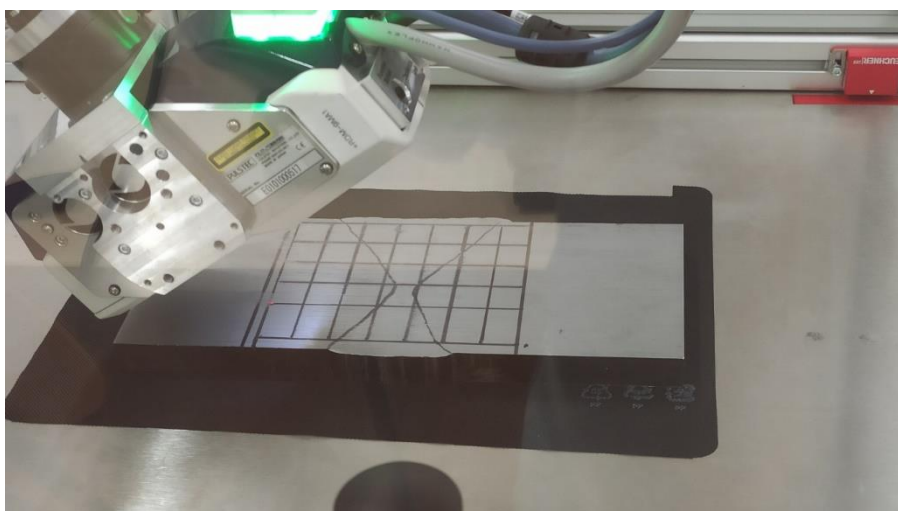
Iz rezultata ispitivanja tvrdoće na odžarenom uzorku C uočava se najviša vrijednost tvrdoće (118 HV do 150 HV) u korijenu zavora, na presjecištima redaka 4 i 5, sa stupcima 4 i 5. Kod ovog uzorka, najviša vrijednosti tvrdoće 231 HV (u zavarenom stanju) smanjena je žarenjem na 600 °C/4 h na iznos 150 HV.

6.2. Mjerenje zaostalih naprezanja prije i nakon žarenja u laboratorijskoj peći

U Laboratoriju za zavarivanje mjerena su zaostala naprezanja na uzorcima pomoću prijenosnog difraktometra X-zraka Pulstec μ -X360s tvrtke Sentenso, prikazanim na slici 30. Postavljanje mjerne glave uređaja u položaj za mjerenje zaostalih naprezanja prikazano je na slici 31.

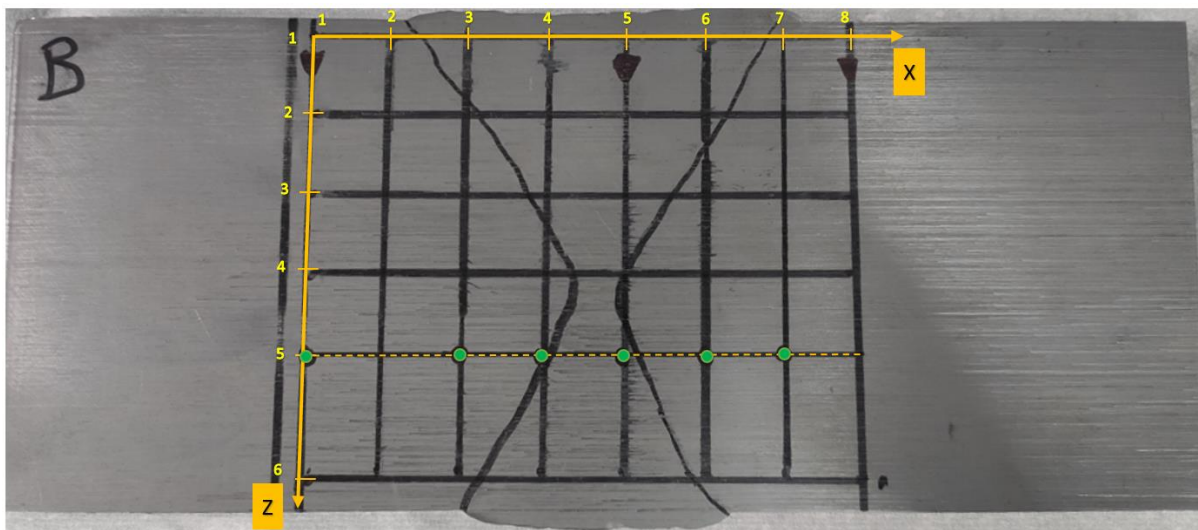


Slika 30. XRD uređaj sentenso μ -X360s (lijevo) i pripadajuća upravljačka jedinica (desno)



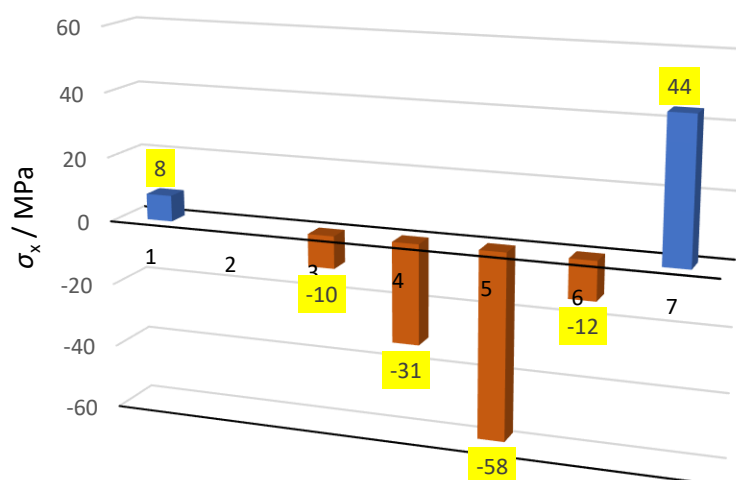
Slika 31. Mjerenje zaostalih naprezanja na uzorku zavara

Zaostala naprezanja su mjerena u 6 točaka, prikazanih na slici 32., u uzdužnom (x) i poprečnom (z) smjeru. Kao i za tvrdoću, pošto se kreće od pretpostavke da su uzorci u početnom stanju identični, nema potrebe mjeriti naprezanja svih uzoraka, već je dovoljno samo na jednom, da se utvrdi početno stanje prije žarenja.

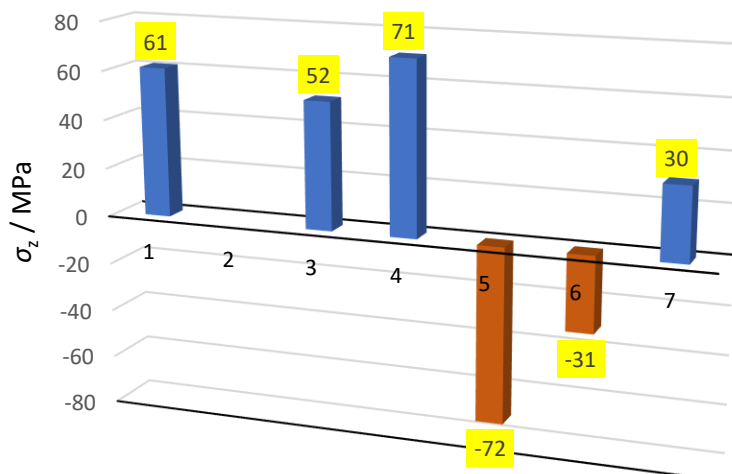


Slika 32. Točke u kojima su mjerena zaostala naprezanja na ispitnom uzorku prije i poslije žarenja

Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja u uzdužnom (x) i poprečnom (z) smjeru na uzorku B prikazani su na slikama 33 i 34.



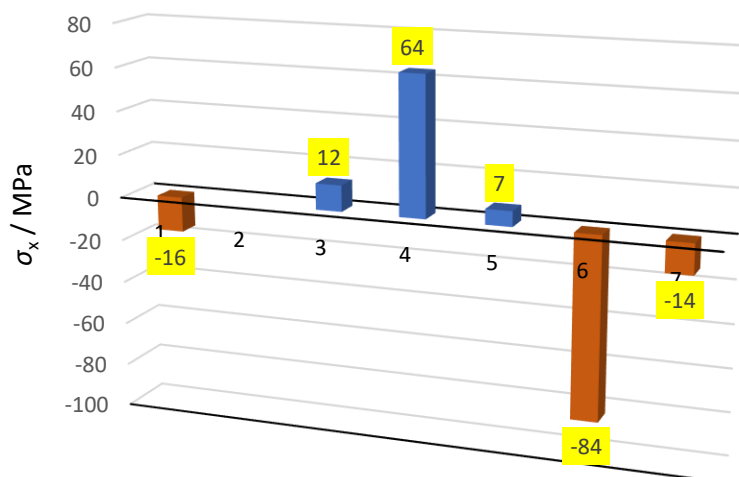
Slika 33. Zaostala naprezanja na uzorku B u uzdužnom (x) smjeru prije žarenja



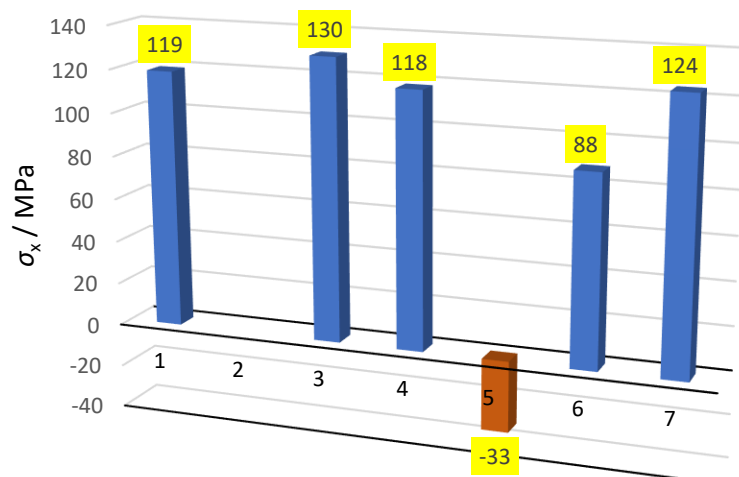
Slika 34. Zaostala naprezanja uzorka u početnom stanju u poprečnom (z) smjeru

Najviša vrijednost zaostalih naprezanja izmjerena je na presjecištu retka (z) 5 i stupaca (x) 4 i 5, koji se nalaze u krojenu zavara. Izmjerena naprezanja na presjecištu retka 5 i stupca 5 su tlačna i iznose od -58 MPa do -72 MPa. Na presjecištu retka 5 i stupca 4, u području zone utjecaja topline naprezanja su vlačna u smjeru z i tlačna u smjeru x. Iz izmjerenih naprezanja uočava se da naprezanja mijenjaju predznak na prijelazu iz zavara u zonu utjecaja topline u skladu s teorijski pretpostavljenom raspodjelom naprezanja prikazanom na slikama 9 i 10. Na istom mjestu nalaze se i najviše vrijednosti tvrdoće (173 HV do 197 HV).

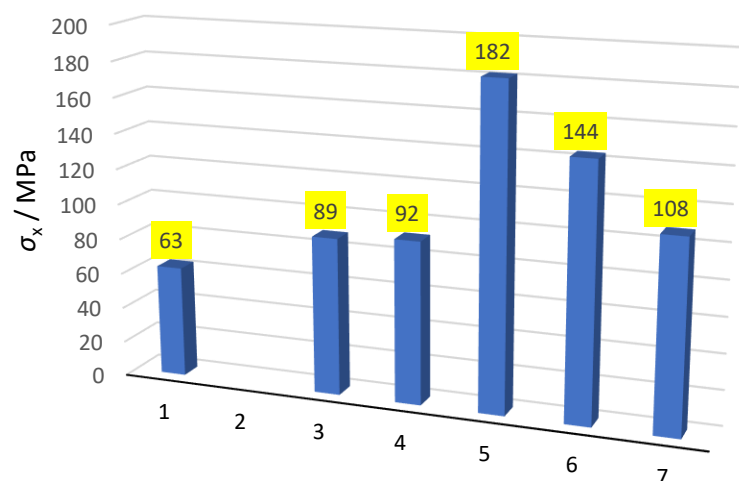
Zaostala naprezanja nakon žarenja u laboratorijskoj električnoj peći prikazana su na slikama 35 i 36, mjerena u uzdužnom i poprečnom smjeru u točkama označenim na slici 32. Iz rezultata mjerenja vidljiv je značajan porast zaostalih naprezanja na svim uzorcima, suprotno očekivanom smanjenju zaostalih naprezanja. U polaznom stanju najviša zaostala tlačna naprezanja u uzdužnom i poprečnom smjeru pojavila su se na presjecištu retka $z = 5$ i stupca $x = 5$. Na istom mjestu na uzorku A nakon žarenja na $550\text{ °C}/2\text{ h}$ izmjereno je 7 MPa (vlačna naprezanja) u uzdužnom smjeru (x) i -190 MPa (tlačna naprezanja) u poprečnom smjeru. Primjenom žarenja u laboratorijskoj peći na uzorku A zaostala naprezanja su povećana i djelomično su promijenila smjer. Slična pojava uočena je i na ostalim uzorcima. Također je uočena pojava da su u poprečnom smjeru na svim uzorcima nakon žarenja nastala tlačna zaostala naprezanja, koja poprimaju iznose od -84 MPa do -308 MPa.



a)

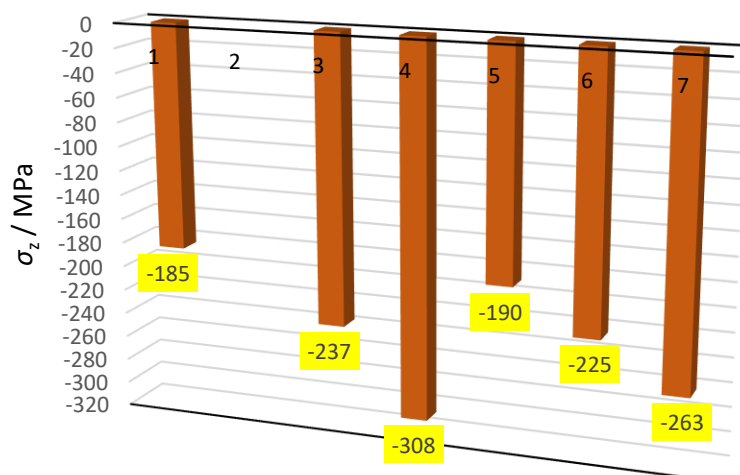


b)

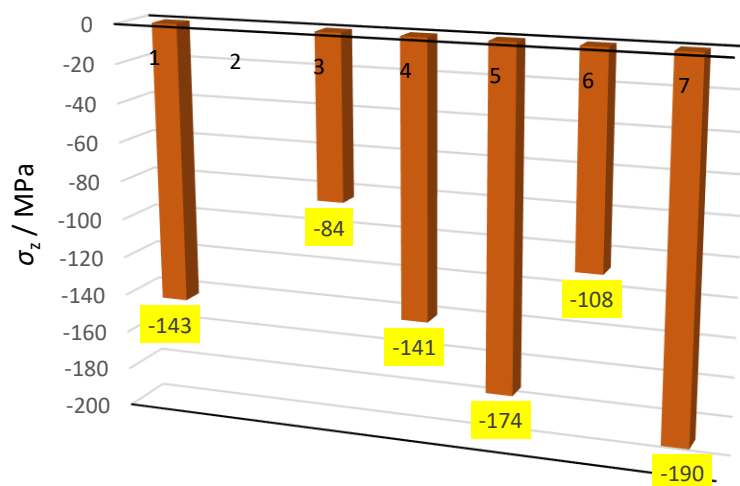


c)

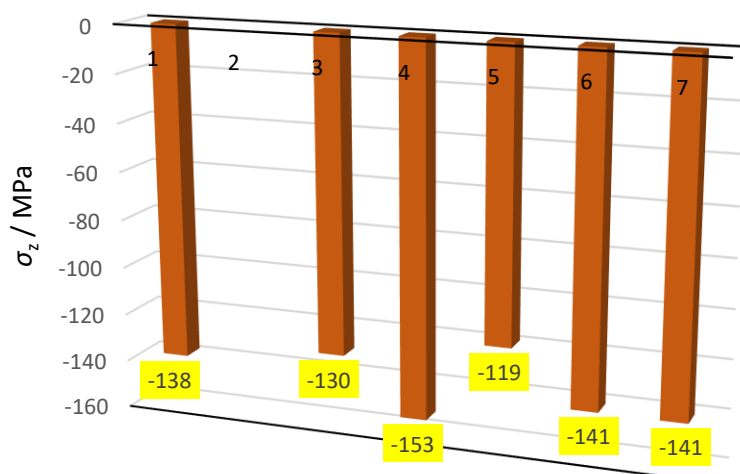
Slika 35. Zaostala naprezanja nakon žarenja u laboratorijskoj peći mjerena u uzdužnom (x) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C



a)



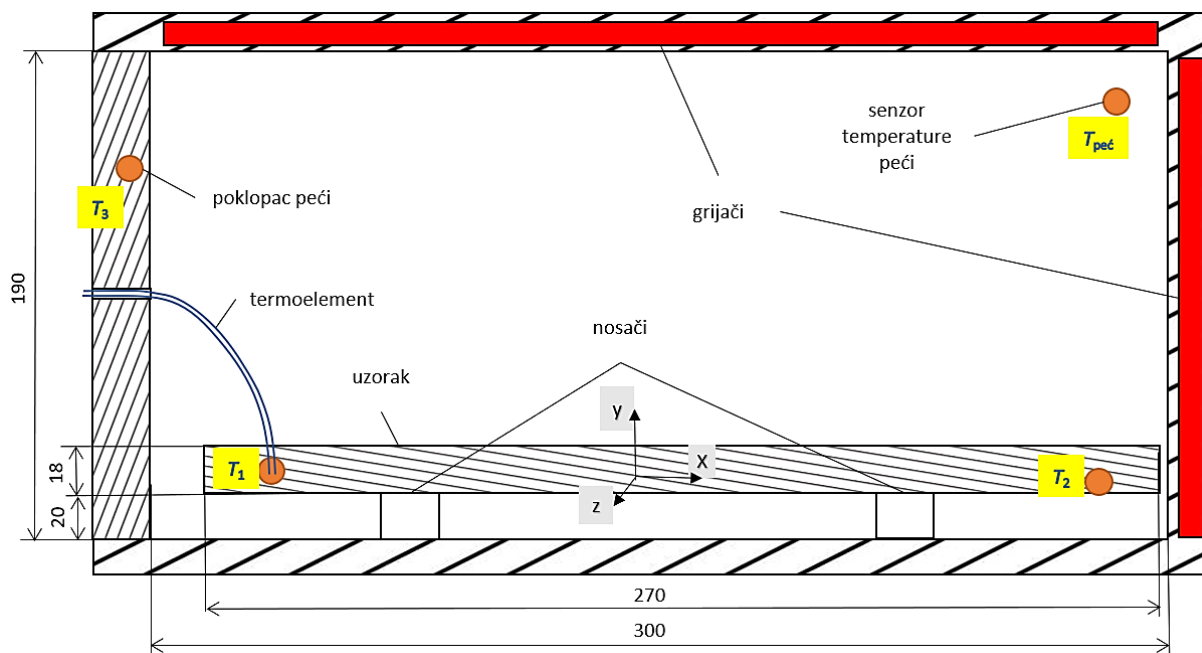
b)



c)

Slika 36. Zaostala naprezanja nakon žarenja u laboratorijskoj peći mjerena u poprečnom (z) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C

Iz prikazanih rezultata jasno je vidljivo kako proces žarenja za redukciju zaostalih napreznja nije bio uspješno proveden. Umjesto smanjenja napreznja, kako je bilo očekivano, napreznja su se povećala u nekim točkama i za više od 100%. Objašnjenje ovakvih ishoda može se protumačiti na temelju sheme presjeka laboratorijske električne peći prikazane na slici 37.

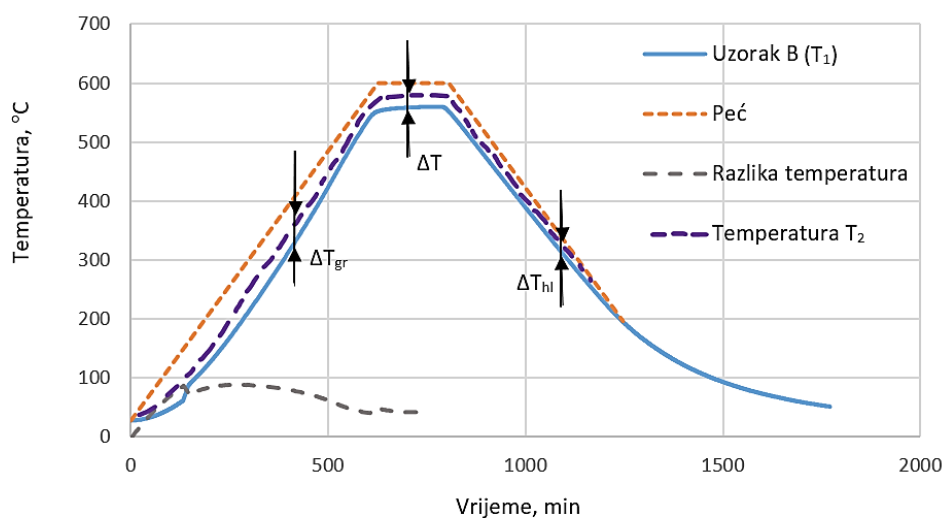


Slika 37. Shema presjeka laboratorijske električne peći sa žarenim uzorkom

Naime, glavni uzrok neuspješnog žarenja za redukciju zaostalih napreznja u laboratorijskoj električnoj peći bio je nepovoljan omjer volumena uzorka i volumena peći, odnosno neravnomjerna raspodjela temperature u peći. Uzorak ove veličine nije prikladan za toplinsku obradu u maloj električnoj peći. Kao što je vidljivo i na grafičkim prikazima temperature uzorka i peći (slike 19 do 21), razlika između temperature peći i temperature uzorka je značajno izražena tijekom zagrijavanja i držanja, a prisutna je i kod programiranog hlađenja. U provedenim žarenjima, ova razlika temperature izmjerene na termoelementu regulatora peći i termoelementu postavljenom u uzorak uz vrata peći iznosila je između 100 °C do 120 °C.

Ono što je bitno naglasiti je da se termoelementom u uzorku mjeri temperaturu uzorka na dijelu koji je bio bliže vratima peći (na slici temperatura T_1). Uzme li se u obzir da su grijači u peći postavljeni s gornje i stražnje strane, te s dvije bočne strane, dolazi se do zaključka da je područje koje mjeri termoelement (temperatura T_1) među najnižim temperaturama uzorka. Jedina niža temperatura u području peći je ona na vratima peći (temperatura T_3). Točka T_2 ,

primjerice, koja je na drugom kraju uzorka bliže je grijaču u peći, te će stoga imati višu vrijednost temperature i prema njoj se provodi automatska regulacija snage grijača peći. Dakle, iako smo podatke mjerenja imali samo za temperature T_1 i $T_{\text{peć}}$, pomoću skice i saznanja o položajima grijača u peći možemo dati uvid u preostale temperature T_2 i T_3 prikazane na slici 38 ($T_{\text{peć}} > T_2 > T_1 > T_3$), na primjeru žarenja uzorka B. Krivulja promjene temperature T_2 tijekom žarenja će se nalaziti negdje između temperature peći i temperature T_1 .



Slika 38. Promjena temperature na uzorku B i u unutrašnjosti laboratorijske električne peći tijekom cijelog postupka žarenja

U svakom trenutku postoji razlika između temperature peći i uzorka te razlika temperature po presjeku uzorka u točkama T_1 i T_2 . Razlika vrijednosti temperature T_1 i T_2 uzrokuje najveći temperaturni gradijent koji stvara nova zaostala toplinska naprezanja tijekom i nakon postupaka žarenja. Jednadžba kojom se računaju toplinska naprezanja je sljedeća [32]:

$$\sigma_{top} = \beta \cdot E \cdot \Delta T \quad (2)$$

gdje je:

σ_{top} N/mm² toplinska naprezanja

β K⁻¹ koeficijent toplinske dilatacije

E N/mm² Youngov modul elastičnosti

ΔT K temperaturni gradijent

7. Rezultati žarenja u industrijskoj vakuumskoj peći

7.1. Plan pokusa žarenja u vakuumskoj peći

Pošto se ne može sa sigurnošću reći koliki je dio zaostalih napreznja uistinu bio razgrađen u fazi držanja na temperaturi žarenja, ono što se može zaključiti je da su zasigurno nastala nova napreznja u fazi hlađenja. To je vidljivo iz mjerenja, te je razjašnjeno u diskusiji. Kako je cilj ovog rada bio reducirati zaostala napreznja u zavaru, preostaje još vidjeti do koje mjere je to moguće. Poznavajući razloge radi kojih su prethodna žarenja rezultirala neuspjehom, uzorci zavara će se još jednom podvrgnuti toplinskoj obradi žarenja.

Za razliku od prethodnih, ovo će se žarenje odvijati u drugoj, vakuumskoj peći Rübiger PC 70/90. Svi uzorci bit će žareni pod jednakim uvjetima u struji inertnog plina dušika:

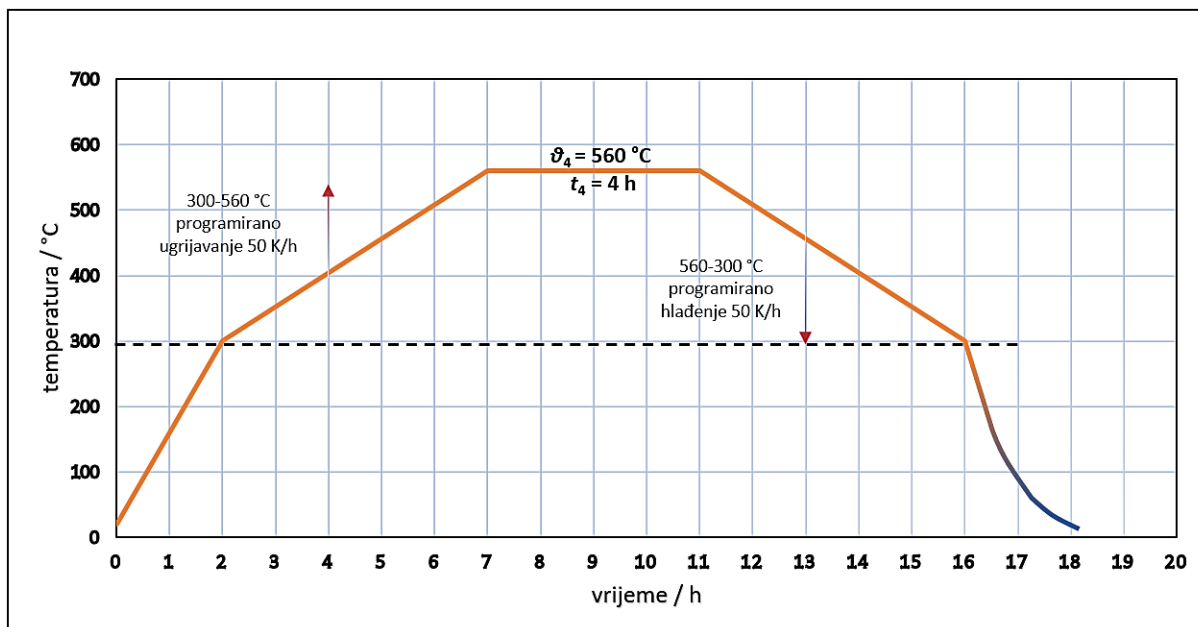
- $p = 2 \text{ mbar}$
- $T_{\text{žar}} = 550 \text{ °C}$
- $t_{\text{držanja}} = 4 \text{ h}$
- $N_2 - 5 \text{ l/h}$
- $H_2 - 5 \text{ l/h}$

Ova peć ima veći kapacitet od električne, stoga je moguće sve uzorke žariti u jednoj šarži. Zbog termoelemenata koji su postavljeni na više razina, te ventilatora koji puno bolje reguliraju i raspoređuju toplinu po cijelom volumenu peći, za očekivati je kako ovaj postupak neće naići na probleme kao prethodni. Na slici 39. prikazana je industrijska vakuumska peć PC 70/90.

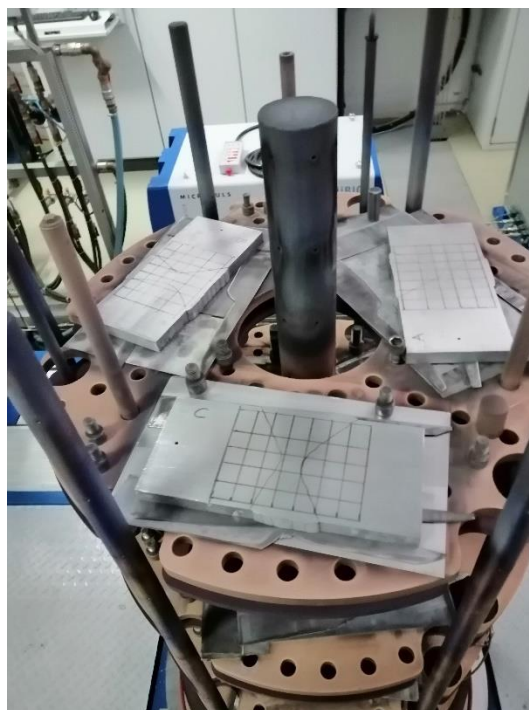


Slika 39. Vakuumska peć Rübiger PC 70/90

Na slici 40. prikazan je dijagram postupka žarenja za redukciju zaostalih naprezanja zadan u regulacijskom sustavu vakuumske peći primijenjen istovremeno na sva tri ispitna uzorka. Na slici 41. prikazani su ispitni uzorci postavljeni u šaržirnu napravu u peći prije početka žarenja.

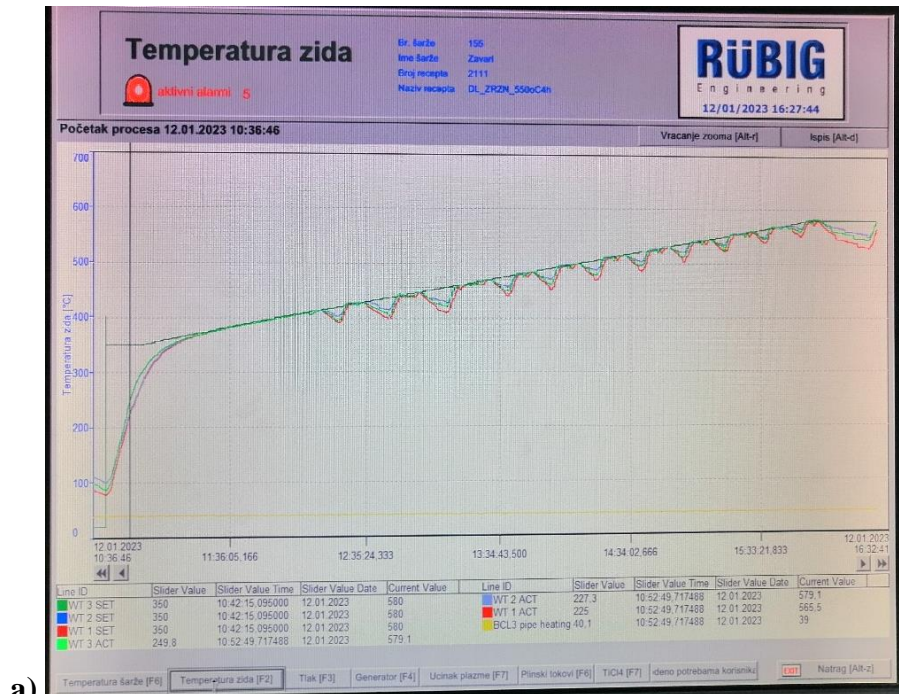


Slika 40. Plan postupka žarenja u vakuumskoj peći za sva tri uzorka

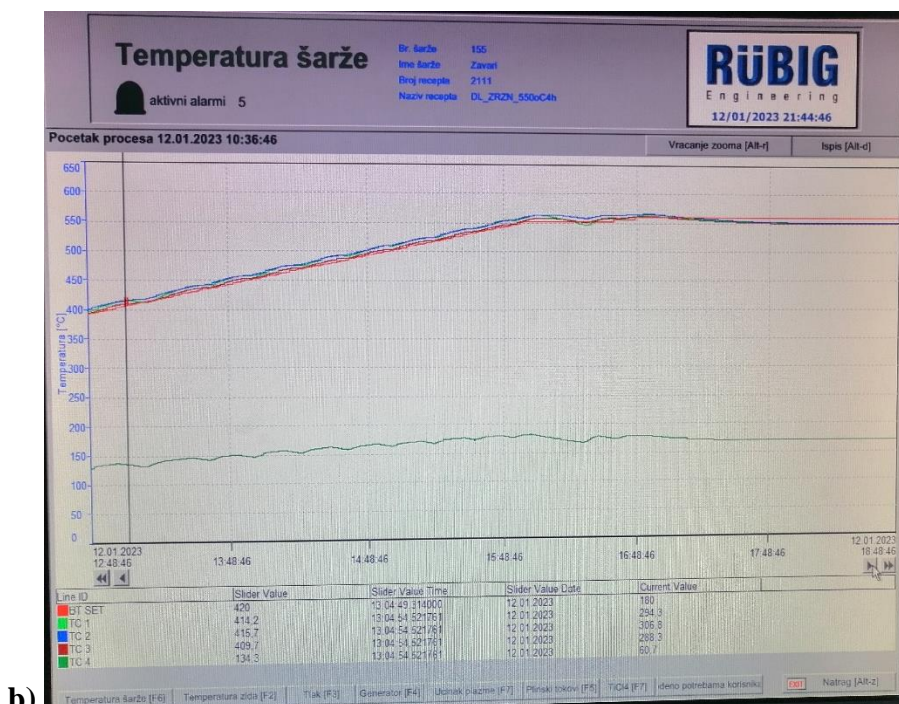


Slika 41. Položaj ispitnih uzoraka za žarenje u vakuumskoj peći

Na slici 42. prikazana je promjena temperature zida peći i uzorka tijekom ugrijavanja. Automatska regulacija temperature peći provodila se u čitavom volumenu peći uz ostvarenje brzine ugrijavanja 50 K/h.



a)



b)

Slika 42. Zagrijavanje ispitnih uzoraka u vakuumskoj peći: a) promjena temperature grijača peći, b) promjena temperature uzorka

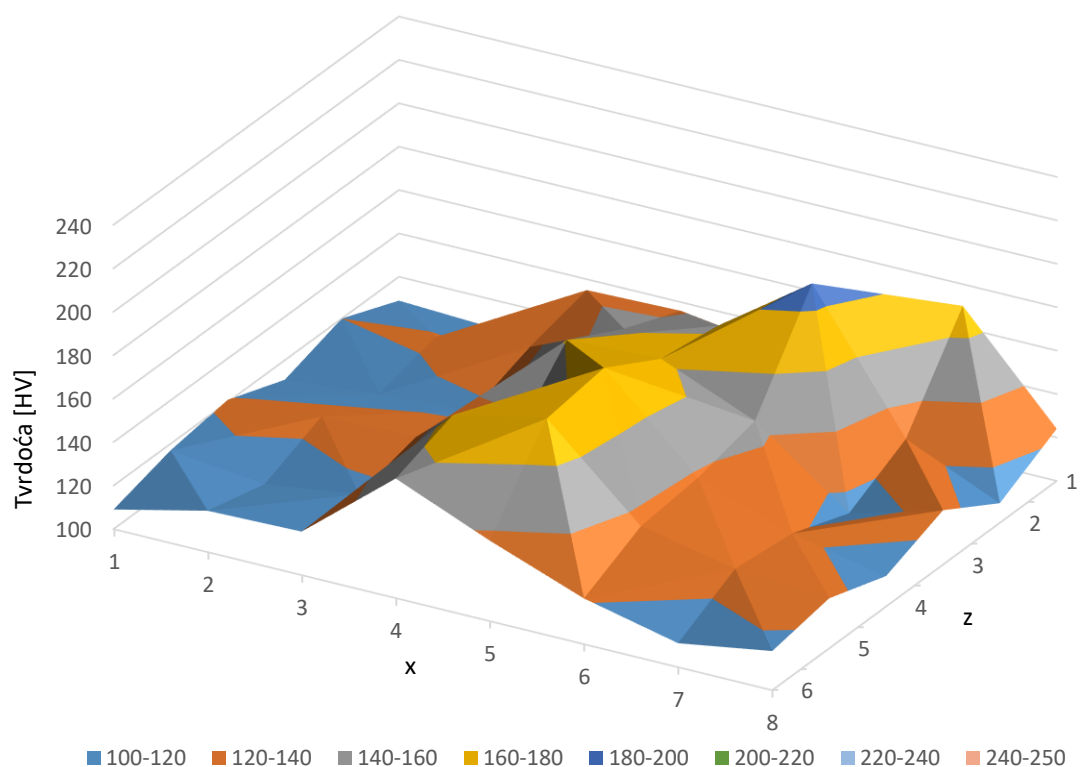
Iz podataka o žarenju može se izračunati Hollomon – Jaffeov parametar koji iznosi $P = 17,16$.

7.2. Ispitivanje tvrdoće nakon žarenja u industrijskoj vakuumskoj peći

Rezultati ispitivanja tvrdoće na mreži mjernih točaka nakon žarenja u vakuumskoj peći prikazani su u tablicama 8 do 10 i na slikama 43 do 45.

Tablica 8. Tvrdoća uzorka A u točkama mreže nakon žarenja u vakuumskoj peći

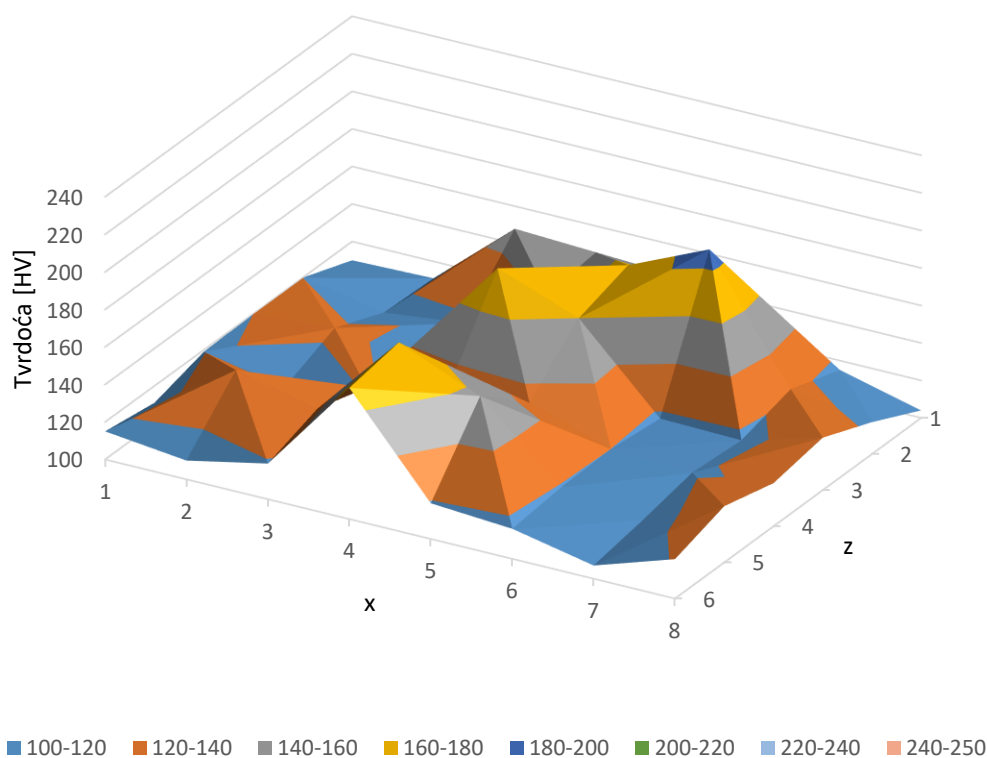
Tvrdoća uzorka A, HV								
Broj retka na osi z	Broj stupca na osi x							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	109	107	135	136	130	133	170	124
2	120	122	128	147	159	189	128	109
3	111	115	118	161	163	145	113	125
4	121	124	125	131	178	138	123	114
5	117	112	118	165	174	135	126	123
6	109	119	120	155	137	121	111	118



Slika 43. Tvrdoća uzorka A nakon žarenja u vakuumskoj peći

Tablica 9. Tvrdoća uzorka B u točkama mreže nakon žarenja u vakuumskoj peći

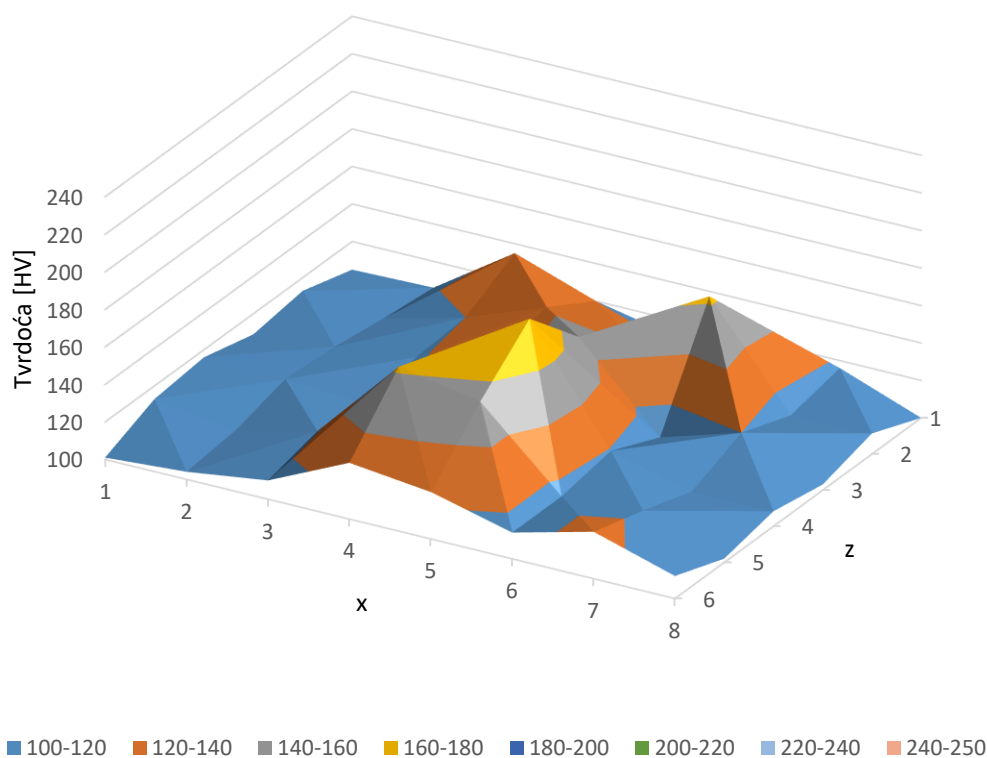
Tvrdoća uzorka B, HV								
Broj retka na osi z	Broj stupca na osi x							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	110	111	148	146	144	125	115	104
2	120	112	117	143	169	188	124	117
3	120	123	116	176	160	117	116	128
4	119	111	121	131	134	120	118	123
5	111	139	129	175	157	119	112	130
6	115	110	119	170	119	116	107	121

**Slika 44. Tvrdoća uzorka B nakon žarenja u vakuumskoj peći**

Iz rezultata ispitivanja tvrdoće na uzorcima A i B može se uočiti da maksimalne vrijednosti tvrdoće (189 HV i 188 HV) više nisu u korijenu, već bliže čelu zavaru, odnosno na presjecištu 2. retka i 6. stupca. Općenito, može se primijetiti podjednaka raspodjela tvrdoće po cijelom zavaru.

Tablica 10. Tvrdoća uzorka C u točkama mreže nakon žarenja u vakuumskoj peći

Tvrdoća uzorka C, HV								
Broj retka na osi z	Broj stupca na osi x							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	105	106	135	120	111	109	116	100
2	113	109	120	136	132	163	110	111
3	109	113	118	132	150	107	120	103
4	116	115	112	120	179	119	108	108
5	113	107	117	162	154	114	117	102
6	101	104	110	130	125	114	125	112

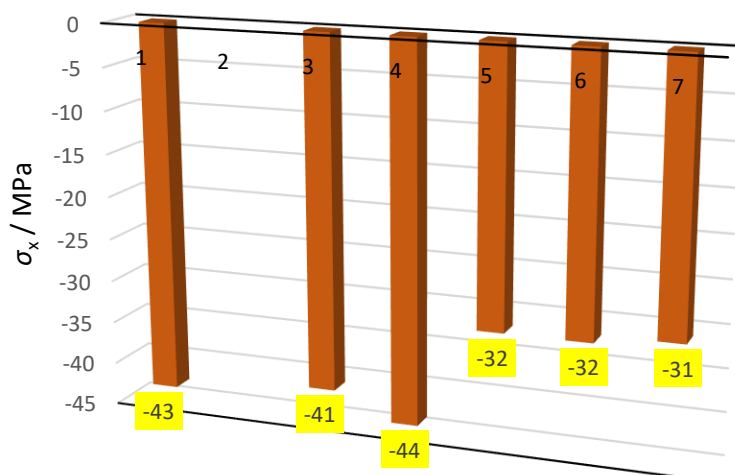
**Slika 45. Tvrdoća uzorka C nakon žarenja u vakuumskoj peći**

Iz rezultata ispitivanja tvrdoće na svim ispitnim uzorcima uočena je slična vrijednost tvrdoće u korijenu zavara, koja iznosi od 120 HV do 180 HV. Ova vrijednost ukazuje da je tijekom žarenja u vakuumskoj peći tvrdoća ostala u nepromijenjenom rasponu vrijednosti kao i prije žarenja, ali je raspodjela vrijednosti tvrdoće ravnomjernija po mreži mjernih točaka.

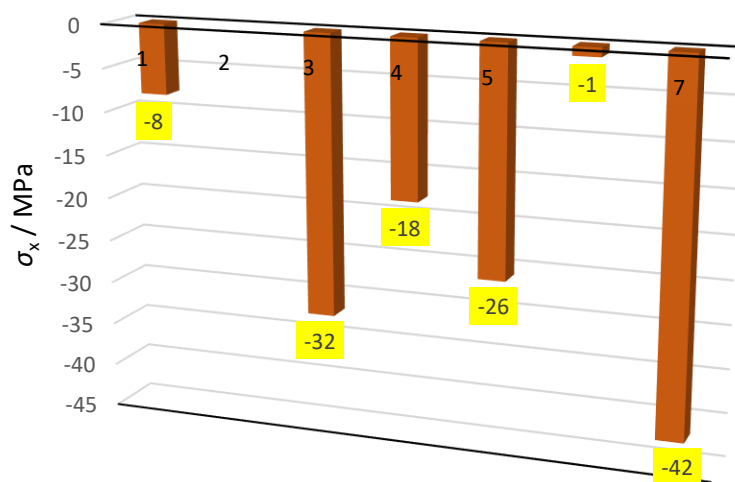
7.3. Mjerenje zaostalih naprezanja prije i nakon žarenja u vakuumskoj peći

Nakon žarenja za redukciju zaostalih naprezanja u industrijskoj vakuumskoj peći ponovo je provedeno mjerenje zaostalih naprezanja rendgenskom difrakcijom na svim uzorcima, na istim mjernim točkama kao i prije žarenja. Rezultati mjerenja zaostalih naprezanja prikazani su na slikama 46 i 47.

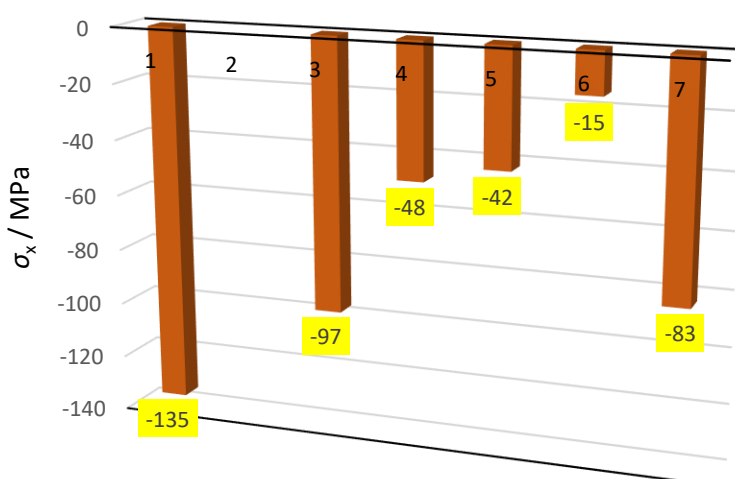
Iz rezultata mjerenja zaostalih naprezanja uočava se značajno smanjenje vrijednosti zaostalih naprezanja u odnosu na vrijednosti prije žarenja i prisutnost isključivo tlačnih zaostalih naprezanja na čitavoj površini ispitnog uzorka: u zavaru, zoni utjecaja topline i osnovnom materijalu. U odnosu na polazno stanje, žarenjem u vakuumskoj peći postignuto je značajno smanjenje zaostalih naprezanja. U mjernom području u korijenu zavora (presjecište 5. retka i 5. stupca) žarenjem u vakuumskoj peći zaostala naprezanja na uzorku C smanjena su sa 182 MPa na -42 MPa. Slična smanjenja ostvarena su i na ostalim uzorcima.



a)

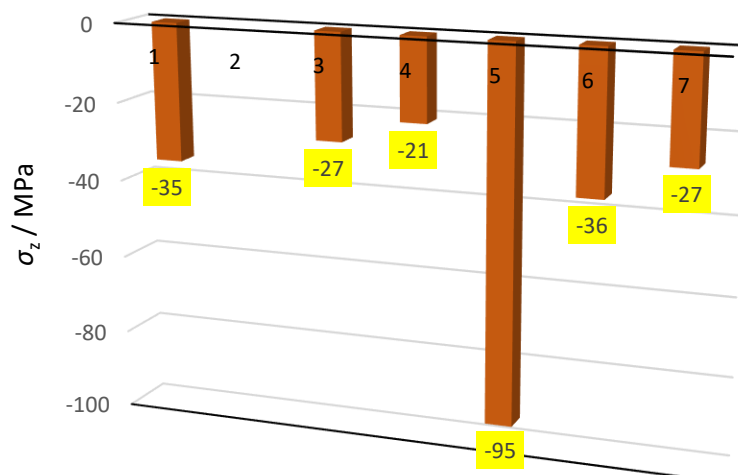


b)

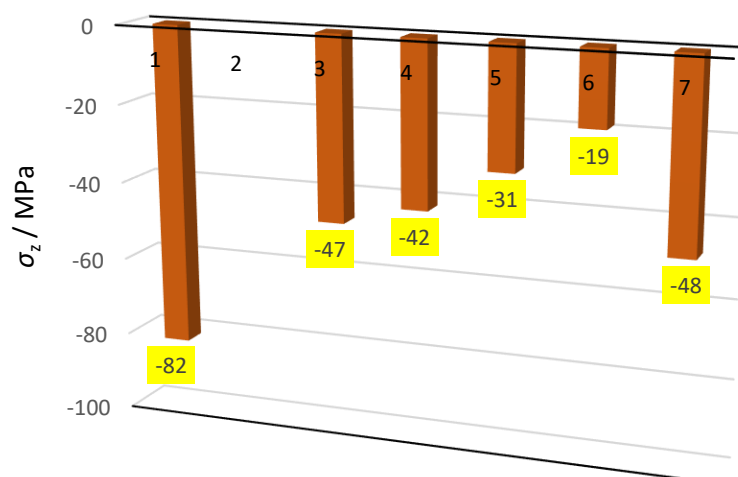


c)

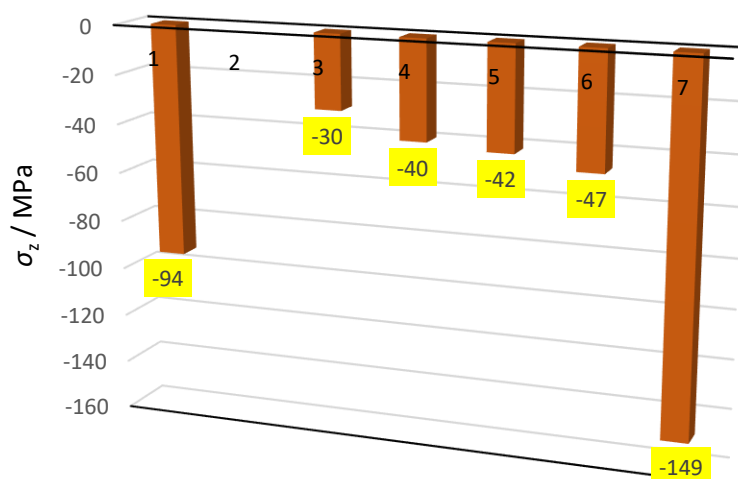
Slika 46. Zaostala napreznja nakon žarenja u vakuumskoj peći mjerena u uzdužnom (x) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C



a)



b)



c)

Slika 47. Zaostala naprezanja nakon žarenja u vakuumskoj peći mjerena u poprečnom (z) smjeru na uzorcima: a) uzorak A, b) uzorak B, c) uzorak C

8. ZAKLJUČAK

U radu je opisano elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP) dvije ploče od čelika S235 debljine 120 mm. U teorijskom dijelu rada opisana su svojstva i primjena konstrukcijskog čelika S235, postupak zavarivanja pod praškom, nastanak zaostalih napreznja u zavaru, te postupci toplinske obrade žarenja za smanjenje zaostalih napreznja.

U eksperimentalnom dijelu rada su provedeni postupci žarenja za redukciju zaostalih napreznja na tri uzorka istog zavara pod praškom. Ispitni uzorci zavara bili su deblji od uobičajenih zavara za koje su normom ISO/TR 14745:2007 propisani parametri toplinske obrade. Provedeno je žarenje s četiri vrijednosti Hollomon – Jaffeov-og parametra, od $P = 16,71$ do $P = 17,99$. Iz provedenih ispitivanja tvrdoće i mjerenja zaostalih napreznja u uzdužnom i poprečnom smjeru u zavaru, zoni utjecaja topline i osnovnom materijalu, zaključuje se sljedeće:

- Žarenjem u laboratorijskoj peći na $550\text{ °C}/2\text{ h}$ i $575\text{ °C}/3\text{ h}$ tvrdoća je smanjena na 170 HV, dok je žarenjem na $600\text{ °C}/4\text{ h}$ tvrdoća smanjena na 150 HV.
- Najviše vrijednosti tvrdoće nakon žarenja u laboratorijskoj peći bile su u području korijena zavara, dok su nakon žarenja u vakuumskoj peći vrijednosti bile podjednako raspoređene po mreži mjernih točaka.
- Žarenjem u vakuumskoj peći zaostala napreznja u uzdužnom smjeru (od 60 MPa do 150 MPa) i poprečnom smjeru (od -130 MPa do -270 MPa) smanjila su se u raspon od -20 MPa do -50 MPa.

Opće preporuke u daljnjim istraživanjima su:

- Istražiti omjer veličine obratka i radnog volumena peći u kojoj se vrši žarenje.
- Pripremiti glatku površinu obratka prilikom mjerenja zaostalih napreznja rendgenskom difrakcijom.
- Izbjegavati grubu obradu odvajanjem čestica kojom se s radnog komada otpuštaju zaostala napreznja nastala unosom topline.

LITERATURA

- [1] Živčić, M. Zavarivanje i srodni postupci. Zagreb: Društvo za tehniku zavarivanja SRH; 1966.
- [2] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-welding#howitworks>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [3] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-submerged-arc-welding>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [4] ISO/TR 14745:2007: Welding – Post weld heat treatment parameters for steels.
- [5] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2002.
- [6] EN 10025-2:2004: Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike.
- [7] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [8] Major M, Nawrot J, Major I. Structural S235 and S355 Steels - Numerical Analysis of Selected Rods Connection. U: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing; 2019.
- [9] <https://www.theworldmaterial.com/1-0038-steel-s235jr-material/>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [10] <https://www.theworldmaterial.com/1-0038-steel-s235jr-material/>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [11] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/c/c4/Zona_taljenja.jpg, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [12] <https://www.britannica.com/technology/welding>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [13] <https://www.binzel-abicor.com/HR/hrv/solutions/main-focus/thick-plate-welding/>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [14] Kartal ME, Kang YH, Korsunsky AM, Cocks ACF, Bouchard JP. The influence of welding procedure and plate geometry on residual stresses in thick components. Int J Solids Struct. 2016 velj 1;80:420–9
- [15] https://www.linkedin.com/pulse/thick-plate-welding-steel-structure-sine-xing/?trk=articles_directory, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.

- [16] Wu K, Yan Y, Cao R, Li X, Jiang Y, Yang F, i ostali. Microstructure and charpy impact toughness of a 2.25Cr-1Mo-0.25V steelweld metal. *Materials*. 2020 srp 1;13(13)
- [17] Lai HH, Wu W. Practical examination of the welding residual stress in view of low-carbon steel welds. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):2717–26
- [18] <https://neutrons.ornl.gov/content/colorado-school-mines-researchers-use-neutrons-study-weld-induced-stress-relief-renewable>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [19] Cankar J, Bregant M, Šolar M. Novine kod zavarivanja i navarivanja pod praškom; 2010.
- [20] <https://www.masinskiprirucnik.com/elektrolucno-zavarivanje-pod-praskom-epp-postupak/>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [21] <https://weldguru.com/submerged-arc-welding/>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [22] Vuković V. Tehničko-tehnološki i ekonomski pokazatelji opravdanosti navarivanja venca monoblok točkova kvaliteta er7 železničkih vozila za brzine kretanja do 120 km/h [doktorski rad]. Novi Sad: Tehnički fakultet „Mihajlo Pupin“ Zrenjanin; 2013.
- [23] HRN EN ISO 6947:2011: Zavarivanje i srodni postupci -- Položaji pri zavarivanju.
- [24] <https://mewelding.com/submerged-arc-welding-saw/>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [25] Patel HN, Chauhan VD, George PM. Effect of process parameters on submerged arc welding: A review. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics Inc.; 2021. doi: 10.1063/5.0036234
- [26] <https://www.youtube.com/watch?v=zz5F2XafdWE>, Pristupljeno: 16. siječnja 2023.
- [27] Bryson WE. Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels. Carl Hanser Verlag; Munich; 2009.
- [28] Lee HY, Biglari FR, Wimpory R, Nikbin KM. Treatment of residual stress in failure assessment procedure. *Eng Fract Mech*. 2006 ruj;73(13):1755–71
- [29] Jang J-I, Son D, Lee Y-H, Choi Y, Kwon D. Assessing welding residual stress in A335 P12 steel welds before and after stress-relaxation annealing through instrumented indentation technique [Internet]. Dostupno na: www.actamat-journals.com
- [30] Matijević, B. TII i PT - Toplinska obrada. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [31] Yao X, Gu J, Totten GE. A historical overview of steel tempering parameters. Sv. 3, *Int. J. Microstructure and Materials Properties*. 2008.
- [32] Ivo Alfrević. *Nauka o čvrstoći I*. Zagreb: Tehnička knjiga; 1995.