

Analiza mikrostrukture i svojstava zavarenog spoja čelika Hardox 450

Marić, Davor

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:865285>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Davor Marić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Davor Marić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na izdvojenom vremenu, savjetima i pomoći tijekom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se asistentici Heleni Lukšić na savjetima prilikom pisanja teorijskog dijela rada, asistentu Jurici Jačanu i tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pruženoj pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada te ostalim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Zahvaljujem se djelatnicima mehaničko-metalografskog laboratorija Zavoda za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o. na pomoći prilikom izvedbi ispitivanja.

Zahvaljujem se svojim roditeljima i prijateljima na velikoj podršci i vjeri u mene tijekom studiranja.

Davor Marić



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: 602-14/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DAVOR MARIĆ**

Mat. br.: 0035212279

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mikrostrukture i svojstava zavarenog spoja čelika Hardox 450**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of the microstructure and properties of the Hardox 450 steel welded joint**

Opis zadatka:

Konstruktivski čelici otporni na trošenje predstavljaju važnu skupinu čelika koji, uz uobičajena svojstva za konstrukcijske čelike, trebaju imati i visoku otpornost na abrazivski mehanizam trošenja. Kemijski sastav i mikrostruktura ovih čelika podešavaju se prema traženim svojstvima i vrlo su precizno definirani. Zbog velikog unosa topline pri zavarivanju osnovna mikrostruktura čelika se mijenja i zbog toga zavareni spoj predstavlja slabo mjesto u konstrukciji.

U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je opisati mikrostrukturu i svojstva konstrukcijskih čelika otpornih na trošenje te promjene koje nastaju u području zavarenog spoja. Obraditi recentna istraživanja koja se bave analizom utjecaja mikrostrukturnih promjenama na svojstva zavarenih spojeva ovih čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti karakterizaciju zavarenog spoja čelika Hardox 450.

Detaljno analizirati mikrostrukturu u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara. U navedenim područjima izmjeriti mikrotvrdoću u tjemenu, sredini i korijenu zavara. Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao: *Rede*
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:
Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. TROŠENJE.....	2
2.1. Abrazijsko trošenje	3
2.1.1. Mikrorezanje	3
2.1.2. Mikrobrazdanje	4
2.1.3. Mikronaprsnuće	4
2.1.4. Izvlačenje zrna	5
3. SVOJSTVA KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA OTPORNIH NA TROŠENJE	6
4. PONAŠANJE ČELIKA POVIŠENE OTPORNOSTI NA TROŠENJE U EKSPLOATACIJI	9
5. ZAVARIVANJE HARDOX ČELIKA.....	13
5.1. Unos topline	13
5.2. Vodikom inducirane pukotine.....	14
5.3. Minimalne temperature predgrijavanja i međuprolaza	15
5.4. Postizanje i mjerenje temperature predgrijavanja	17
5.5. Preporuke za izbjegavanje deformacija pri zavarivanju	19
5.6. Zaštitni plin	21
6. NAKNADNA TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA HARDOX ČELIKA.....	22
7. UTJECAJ NAČINA HLAĐENJA PRILIKOM BRUŠENJA NA ABRAZIJSKU OTPORNOST HARDOX ČELIKA	28
8. EKSPERIMENTALNI DIO	35
8.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja	35
8.2. Materijal za ispitivanje.....	35
8.3. Provedena ispitivanja	39
8.3.1. Analiza kemijskog sastava	39
8.3.2. Vizualno ispitivanje	40
8.3.3. Analiza strukture	40
8.3.4. Ispitivanje tvrdoće.....	43
8.3.4.1. Ispitivanje makrotvrdoće HV10.....	43
8.3.4.2. Ispitivanje mikrotvrdoće HV0,2	46
8.3.5. Ispitivanje vlačne čvrstoće	47

8.3.6.	Ispitivanje savijanja u tri točke	49
8.3.7.	Ispitivanje žilavosti	50
8.4.	Rezultati ispitivanja.....	51
8.4.1.	Rezultati analize kemijskog sastava.....	51
8.4.2.	Rezultati analize strukture.....	51
8.4.2.1.	Analiza makrostrukture.....	51
8.4.2.2.	Analiza mikrostrukture	51
8.4.3.	Rezultati mjerenja tvrdoće	60
8.4.3.1.	Rezultati mjerenja makrotvrdoće HV10	60
8.4.3.2.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2	60
8.4.4.	Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće.....	61
8.4.5.	Rezultati savojnog ispitivanja	61
8.4.6.	Rezultati ispitivanja žilavosti	62
8.5.	Osvrt na rezultate ispitivanja.....	63
8.5.1.	Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava.....	63
8.5.2.	Osvrt na rezultate analize mikrostrukture	63
8.5.3.	Osvrt na rezultate ispitivanja tvrdoće.....	63
8.5.4.	Osvrt na rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće.....	66
8.5.5.	Osvrt na rezultate savojnog ispitivanja	66
8.5.6.	Osvrt na rezultate ispitivanja žilavosti	66
9.	ZAKLJUČAK.....	68
	LITERATURA.....	69

POPIS SLIKA

Slika 2.1	Shematski prikaz trošenja [3]	2
Slika 2.2	Abrazija s dva tijela (a) i abrazija s tri tijela (b) [1]	3
Slika 2.3	Mikrorezanje [3]	4
Slika 2.4	Umor uzrokovan ponavljanim mikrobrazdanjem [3]	4
Slika 2.5	Mikronaprsnuća [3]	5
Slika 2.6	Izvlačenje zrna [3]	5
Slika 4.1	Bager gusjeničar (lijevo) i bager kombinirka (desno)[16]	9
Slika 4.2	Primjena Hardox čelika u podzemnoj eksploataciji sirovina [17]	10
Slika 4.3	Viškraka grabilica otpada [18]	11
Slika 4.4	Damper kamion u kamenolomu [19]	11
Slika 4.5	Primjena Hardox čelika u proizvodnji cementa [20]	12
Slika 5.1	Preporučeni maksimalni unos topline za Hardox čelike [21]	14
Slika 5.2	Razmak između elemenata i korijenskog otvora [21]	15
Slika 5.3	Preporučene minimalne temperature predgrijavanja Hardox čelika u ovisnosti o debljini ploče [21]	16
Slika 5.4	Predgrijavanje područja zavarivanja Hardox čelika električnim grijačima [21] ..	18
Slika 5.5	Područje mjerenja temperature predgrijavanja za različite zavarene spojeve [21]	18
Slika 5.6	Utjecaj površine poprečnog presjeka zavara na kut odstupanja [21]	19
Slika 5.7	Simetrični zavari [21]	19
Slika 5.8	Pozicioniranje dijelova prije zavarivanja [21]	20
Slika 5.9	Primjena tehnike zavarivanja korak unatrag i na preskok [21]	20
Slika 5.10	Zavarivanje od krutih područja prema labavijim krajevima [21]	21
Slika 6.1	Makroskopska slika poprečnog presjeka zavarenog spoja u stanju nakon zavarivanja (a) i u normaliziranom stanju (b) [14]	22
Slika 6.2	Raspodjela tvrdoće preko zavarenog spoja čelika Hardox 450 za različita stanja [14]	23
Slika 6.3	Mikrostruktura zavarenog spoja čelika Hardox 450 u području osnovnog materijala snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]	24
Slika 6.4	Mikrostruktura zavarenog spoja čelika Hardox 450 u području zavarenog metala snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]	24
Slika 6.5	Mikrostruktura zavarenog spoja čelika Hardox 450 u području linije staljivanja snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]	25
Slika 6.6	Mikrostruktura metala zavara nakon normalizacijskog žarenja snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]	25
Slika 6.7	Vrijednosti vlačne čvrstoće čelika Hardox 450 nakon zavarivanja i nakon toplinske obrade[14]	26
Slika 6.8	Vrijednosti udarnog rada loma čelika Hardox 450 nakon zavarivanja i nakon toplinske obrade[14]	26
Slika 6.9	Promjena prosječne veličine kristalnih zrna za različite temperature austenitizacije u karakterističnim zonama zavarenog spoja čelika Hardox 450 [14]	27
Slika 7.1	Mikrostruktura čelika Hardox 500 [2]	29
Slika 7.2	Specifična energija brušenja u ovisnosti o načinu hlađenja [2]	30
Slika 7.3	Omjeri brušenja za različite načine hlađenja [2]	31
Slika 7.4	Površinska hrapavost uzoraka [2]	31
Slika 7.5	SEM snimci brušenih površina i nastalih strugotina pri različitim načinima hlađenja[2]	32
Slika 7.6	Utjecaj načina hlađenja na mikrotvrdoću HV 10 brušenih površina [2]	33

Slika 7.7	Utjecaj načina hlađenja na volumen trošenja nakon 50 ciklusa grebanja za opterećenja od 10 i 20 N [2]	34
Slika 8.1	Zavareni spoj dviju ploča čelika Hardox 450 s rasporedom ispitnih uzoraka.....	36
Slika 8.2	Izgled ispitnih uzoraka za ispitivanje savijanjem i za statičko vlačno ispitivanje	37
Slika 8.3	Oblik i dimenzije ispitnog uzorka za ispitivanje udarne žilavosti [23]	37
Slika 8.4	Ispitni uzorak za analizu strukture i ispitivanje tvrdoće.....	38
Slika 8.5	Spektrometar LECO GDS 850A	39
Slika 8.6	Komora spektrometra u koju se postavlja ispitni uzorak	39
Slika 8.7	Uzorak za analizu makrostrukture.....	40
Slika 8.8	Rezalica Presi Mecatome T260	40
Slika 8.9	Uređaj za brušenje i poliranje Presi Mecatech 250	41
Slika 8.10	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	41
Slika 8.11	Metalografski uzorak nakon nagrizanja	42
Slika 8.12	Ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom [23].....	43
Slika 8.13	Izgled i geometrija otiska kod ispitivanja tvrdoće po Vickersu [23]	43
Slika 8.14	Uređaj za mjerenje tvrdoće.....	45
Slika 8.15	Skica zavarenog spoja i označena mjesta mjerenja tvrdoće HV10	45
Slika 8.16	Uređaj za mjerenje tvrdoće Instron Wilson-Wolpert Tukon 2100B	46
Slika 8.17	Skica zavarenog spoja i označena mjesta mjerenja tvrdoće HV0,2	46
Slika 8.18	Univerzalna kidalica Otto Wolpert Werke GmbH 30 TUZ 757	47
Slika 8.19	Ispitni uzorak postavljen u čeljust kidalice	48
Slika 8.20	Izgled ispitnih uzoraka nakon ispitivanja vlačne čvrstoće	48
Slika 8.21	Prostor kidalice namijenjen za ispitivanje savijanjem i pritiskom	49
Slika 8.22	Charpy-ev bat	50
Slika 8.23	Ispitni uzorci nakon provedenog ispitivanja žilavosti	50
Slika 8.24	Makrostruktura zavarenog spoja	51
Slika 8.25	Mikrostruktura metala zavara u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 100×	52
Slika 8.26	Mikrostruktura metala zavara u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 500×	52
Slika 8.27	Mikrostruktura osnovnog materijala, snimljena pri povećanju 200×.....	53
Slika 8.28	Mikrostruktura osnovnog materijala, snimljena pri povećanju 1000×.....	53
Slika 8.29	Mikrostruktura tjemena zavara, snimljena pri povećanju 50×	54
Slika 8.30	Mikrostruktura tjemena zavara, snimljena pri povećanju 100×	54
Slika 8.31	Mikrostruktura sredine metala zavara, snimljena pri povećanju 200×	55
Slika 8.32	Mikrostruktura sredine metala zavara, snimljena pri povećanju 500×	55
Slika 8.33	Mikrostruktura korijena zavara, snimljena pri povećanju 100×.....	56
Slika 8.34	Mikrostruktura korijena zavara, snimljena pri povećanju 200×.....	56
Slika 8.35	Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane tjemena zavara, snimljena pri povećanju 50×	57
Slika 8.36	Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane tjemena zavara, snimljena pri povećanju 200×.....	57
Slika 8.37	Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane sredine metala zavara, snimljena pri povećanju 50×	58
Slika 8.38	Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane sredine metala zavara, snimljena pri povećanju 200×	58
Slika 8.39	Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane korijena zavara, snimljena pri povećanju 50×.....	59
Slika 8.40	Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane korijena zavara, snimljena pri povećanju 200×.....	59
Slika 8.41	Izgled ispitnih uzoraka nakon savijanja	61
Slika 8.42	Srednje vrijednosti tvrdoće HV10 za različita područja zavarenog spoja.....	64

Slika 8.43	Srednje vrijednosti tvrdoće HV10 u tjemenu i korijenu zavarenog spoja.....	64
Slika 8.44	Srednje vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 za različita područja zavarenog spoja ..	65
Slika 8.45	Srednje vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u tjemenu, sredini i korijenu zavarenog spoja.....	65
Slika 8.46	Usporedba rezultata vlačne čvrstoće zavarenog spoja i osnovnog materijala.....	66
Slika 8.47	Usporedba rezultata ispitivanja žilavosti.....	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastavi konstrukcijskih čelika s poboljšanom otpornošću na trošenje za razred tvrdoće 450 HB	6
Tablica 2. Mehanička svojstva konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na trošenje	7
Tablica 3. Preporučene maksimalne temperature međuprolaza za Hardox čelike	17
Tablica 4. Kemijski sastav čelika Hardox 500 [2]	29
Tablica 5. Kemijski sastav čelika Hardox 450 zajamčen od strane proizvođača	35
Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala	35
Tablica 7. Mehanička svojstva dodatnog materijala	36
Tablica 8. Rezultati kvantitativne kemijske analize	51
Tablica 9. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10	60
Tablica 10. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2	60
Tablica 11. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće	61
Tablica 12. Rezultati ispitivanja žilavosti	62

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	istezljivost
HB		tvrdoća po Brinellu
HV		tvrdoća po Vickersu
I	A	jakost struje
KV	J	udarni rad loma (V-utor)
Q	kJ/mm	unesena toplina
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvencionalna granica razvlačenja
U	N	napon zavarivanja
U_c	J/mm ³	specifična energija brušenja
v_{zav}	mm/min	brzina zavarivanja

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
GDS	eng. <i>Glow Discharge Spectroscopy</i> / Optička emisijska spektrometrija
HAZ	engl. <i>Heat affected zone</i> / zona utjecaja topline
ISO	engl. <i>International Organization for Standardization</i> / Međunarodna organizacija za normizaciju
MAG	engl. <i>metal active gas</i> / elektrolučno zavarivanje uz zaštitu inertnih plinova
ZUT	zona utjecaja topline

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je karakterizacija zavarenog spoja čelika otpornog na trošenje oznake Hardox 450. U teorijskom dijelu rada opisana su svojstva konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na trošenje te njihovo ponašanje u eksploataciji. Detaljno je opisano zavarivanje Hardox čelika i naknadna toplinska obrada zavarenih spojeva. U eksperimentalnom dijelu rada prikazani su rezultati analize kemijskog sastava, mikrostrukturne analize i ispitivanja mehaničkih svojstava. Analizirani čelik Hardox 450 sadrži oko 0,2 % ugljika i ima relativno sitnozrnatu martenzitnu mikrostrukturu. Zbog velikog unosa topline pri zavarivanju, u zoni utjecaja topline zavarenog spoja, narušena je osnovna mikrostruktura i došlo je do pogrubljenja zrna. Linija staljivanja jasno je izražena, a metal zavara ima tipičnu lijevačku dendritnu mikrostrukturu. U odnosu na mikrotvrdoću osnovnog materijala koja je oko 430 HV_{0,2}, tvrdoća u ZUT-u je niža i iznosi približno 250 HV_{0,2}, a najniža tvrdoća izmjerena je u metalu zavara oko 210 HV_{0,2}. U istim područjima izmjerene su nešto niže vrijednosti tvrdoće HV₁₀. Vlačna čvrstoća zavarenog spoja znatno je niža od čvrstoće osnovnog materijala. Kod savojnog ispitivanja nije došlo do pojave pukotina na ispitnim uzorcima pri kutu savijanja od 180°. Pri ispitivanju udarnog rada loma, zona utjecaja topline imala je veću žilavost od metala zavara.

Ključne riječi: Hardox čelik, zavareni spoj, mikrostruktura, mehanička svojstva

SUMMARY

The aim of this master thesis was to perform the characterization of the welded joint of wear resistant steel grade Hardox 450. The properties of structural steels with improved wear resistance and their behaviour in exploitation were described in the theoretical part of the thesis. The welding of Hardox steels and the subsequent heat treatment of welded joints are described in detail. The results of the analysis of the chemical composition, microstructural analysis and testing of the mechanical properties are presented in the experimental part of the thesis.

The analysed Hardox 450 steel contains about 0.2 % carbon and has a relatively fine-grained martensitic microstructure. Due to the high heat input during welding, in the heat-affected zone of the welded joint, the basic microstructure was disturbed, and the grain coarsening occurred. The fusion line is clearly defined, and the weld metal has a typical casting dendritic microstructure. Compared to the microhardness of the base material, which is around 430 HV0.2, the hardness in HAZ is lower and is approximately 250 HV0.2, while the lowest hardness is measured in the weld metal, around 210 HV0.2. Slightly lower HV10 hardness values were measured in the same areas. The tensile strength of the welded joint is significantly lower than the strength of the base material. During the bending test, no cracks appeared on the test samples at a bending angle of 180°. While testing fracture toughness, the heat affected zone had higher toughness than the weld metal.

Key words: Hardox steel, welded joint, microstructure, mechanical properties

1. UVOD

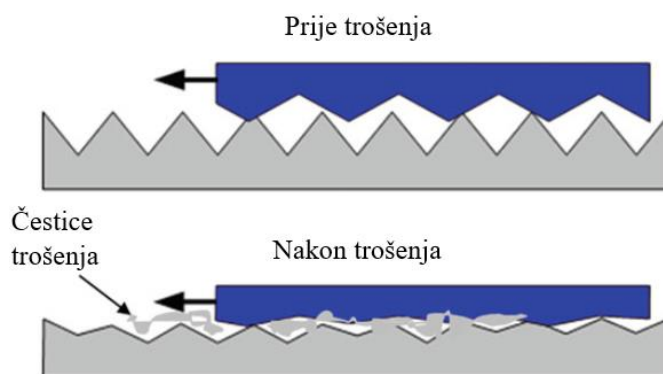
U nekim slučajevima trošenje materijala može biti poželjno, primjerice kod završne obrade i postizanja željene kvalitete površine, međutim ono najčešće predstavlja štetnu pojavu u mnogim inženjerskim primjenama jer može dovesti do kvara strojeva i njihovih dijelova što uzrokuje troškove zastoja, popravka ili zamjene [1].

Iz tog razloga pravilna tribološka primjena temelji se na kontroli i predviđanju trošenja materijala u njihovoj eksploataciji. Od velike je važnosti odabir i konstruiranje materijala za razne inženjerske potrebe vodeći računa o njihovoj primjeni odnosno relativnom gibanju i otpornosti materijala prema oštećenju. Istrošene površine često uzrokuju veliko trenje što također dovodi do povećanog gubitka snage [1].

Materijali otporni na trošenje često se primjenjuju kako bi se u eksploataciji mehanički dijelovi zaštitili od abrazivnog trošenja. Uglavnom se ovo svojstvo povezuje uz alate i alatne materijale, ali postoje i primjeri konstrukcijske primjene gdje je otpornost na trošenje jedno od najvažnijih svojstava. Niskolegirani čelici s dodatkom bora prepoznati su kao materijali koji zadovoljavaju ovaj kriterij. Proizvodnja ove vrste čelika započela je u Europi 1970. godine od strane švedske čeličane SSAB-Oxelösund i komercijalizirana je pod trgovačkim imenom "Hardox". Budući da ovaj čelik postiže visoku otpornost na abrazivno trošenje te ima visoku čvrstoću, dobru zavarljivost i sposobnost kaljenja, sve se više koristi u raznim primjenama za proširenje životnog vijeka skupih strojnih konstrukcija i njihovih dijelova [2].

2. TROŠENJE

Kada su dva tijela u relativnom gibanju između njihovih dodirnih ploha dolazi do trljanja koje rezultira trenjem. Kao posljedica trenja nakon određenog vremena dolazi do trošenja odnosno gubitka materijala jednog ili obadva tijela. Shematski prikaz trošenja vidljiv je na slici 2.1 [3].



Slika 2.1 Shematski prikaz trošenja [3]

Trošenje može biti posljedica kontakta i relativnog gibanja između dvaju čvrstih tijela, ali ono također može uključivati i odgovarajuće plinovito ili tekuće protutijelo. Iz tog razloga uvjeti trošenja podrazumijevaju oblike poput klizanja, kotrljanja, erozije, udara ili kavitacije u raznim okolišnim uvjetima [1].

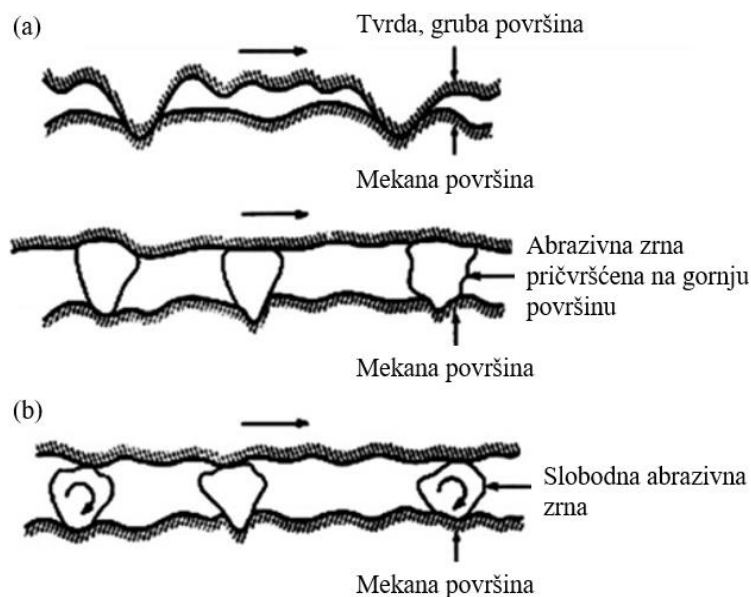
Mehanizmi trošenja mogu se podijeliti na četiri osnovne vrste, a to su:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija [4].

Abrazija i adhezija smatraju se najopasnijim mehanizmima jer je kod njih uobičajen veliki stupanj trošenja koji, ukoliko se ne uoči na vrijeme ili se ne spriječi, može dovesti do jako štetnih posljedica [1].

Općenito, abrazivno trošenje može se klasificirati kao trošenje s dva ili tri tijela. Kada postoje samo dva tijela u relativnom kretanju i jedno je znatno tvrđe, takvo abrazivno oštećenje naziva se abrazijom dvaju tijela. To se događa u mehaničkim postupcima obrade materijala, kao što su brušenje, rezanje i strojna obrada. U abraziji s tri tijela, čvrste abrazivne čestice djeluju kao međufazni elementi trećeg tijela između dva pomična primarna tijela i odgovorni su za trošenje

jedne ili obje površine, prvenstveno ovisno o njihovoj tvrdoći. To se primjerice događa kod poliranja. Na slici 2.2 shematski je prikazana abrazija s dva i abrazija s tri tijela [1].



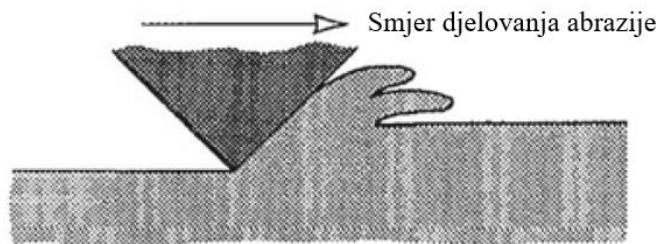
Slika 2.2 Abrazija s dva tijela (a) i abrazija s tri tijela (b) [1]

2.1. Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje predstavlja oštećenje materijala nastalo destruktivnim djelovanjem tvrdih čestica ili izbočina. Ono ovisi o dinamici kontakata materijala i o njihovim svojstvima te je povezano s utiskivanjem tvrdih neravnina u mekši materijal. Uslijed relativnog gibanja do abrazijskog trošenja može doći na jednoj ili obje površine tijela [4].

2.1.1. Mikrorezanje

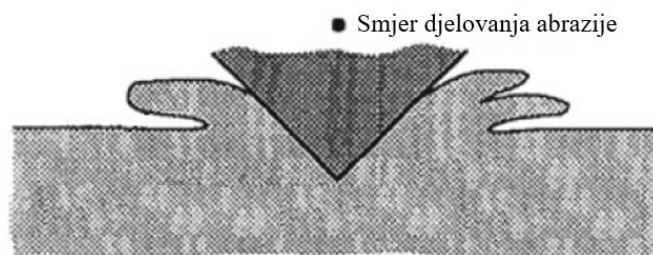
Vrsta abrazije u kojoj tvrde neravnine ili čestice klize preko meke površine uzrokujući time oštećenje zbog plastične deformacije naziva se mikrorezanje, slika 2.3. Tvrde čestice mogu biti između dviju površina koje su u relativnom gibanju, ali mogu biti i sastavni dio jedne ili obje površine u obliku izbočina. Produkti trošenja nastalog ovom vrstom abrazije najčešće su u obliku strugotina [1].



Slika 2.3 Mikrorezanje [3]

2.1.2. Mikrobrazdanje

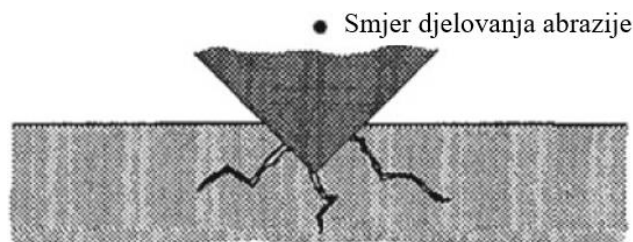
Ukoliko tvrda neravnina ostavlja brazdu u mekšem materijalu te ukoliko se njeni rubovi odvoje od površine materijala kao produkti trošenja onda govorimo o mikrobrazdanju, slika 2.4. Moguće je i da tijekom mikrobrazdanja ne dolazi do stvaranja produkata trošenja već samo do potiskivanja dijela materijala na rubove brazde koji će uslijed kontinuiranog relativnog gibanja kroz dulje vrijeme proći kroz plastičnu deformaciju te naposljetku deformacijski otvrdnuti. Takvi otvrdnuti rubovi postaju novi izvor abrazivnog djelovanja [1].



Slika 2.4 Umor uzrokovan ponavljanim mikrobrazdanjem [3]

2.1.3. Mikronaprsnuće

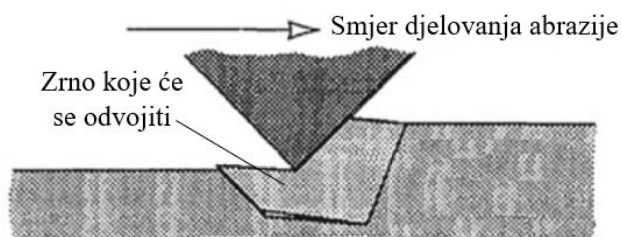
Ova vrsta abrazivskog trošenja javlja se kada tvrda neravnina klizi preko krhkog materijala. Budući da krhki materijali ne mogu podnijeti veće plastične deformacije, dolazi do stvaranja mikropukotina. Ovisno o kontaktu, pukotine mogu ići duboko u površinu (središnja pukotina na 90°), a mogu se stvarati i bočne pukotine ispod 30° kao i manje lokalne pukotine orijentirane u različitim smjerovima. Na slici 2.5 prikazan je mehanizam mikronaprsnuća [1].



Slika 2.5 Mikronaprsnuća [3]

2.1.4. Izvlačenje zrna

Izvlačenje zrna predstavlja vrstu abrazijskog trošenja karakterističnu za višefazne materijale s mekom matricom i ugrađenom tvrdom fazom te za materijale koji imaju krupozrnatu strukturu. Tvrdi neravnina koja klizi preko takvih površina može zahvatiti tvrdu fazu ili zrno, slika 2.6. Ukoliko je neravnina dovoljno snažna može doći do izvlačenja zrna što rezultira rupama na površini. Ta područja postaju koncentratori naprezanja te su potencijalna mjesta za napredovanje oštećenja tijekom daljnjeg klizanja [1].



Slika 2.6 Izvlačenje zrna [3]

3. SVOJSTVA KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA OTPORNIH NA TROŠENJE

Procesi proizvodnje čelika otpornih na trošenje kao i njihov sastav mogu se znatno razlikovati ovisno o proizvođaču čelika. Debljina ploče ili trake također utječe na legiranje, a time i na svojstva čelika budući da je s povećanom debljinom potrebno više legiranja kako bi se osiguralo otvrdnjavanje odnosno otpornost na trošenje. Kao što kod općih konstrukcijskih čelika broj u oznaci predstavlja minimalnu granicu razvlačenja, kod velike većine konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na trošenje broj u oznaci predstavlja tvrdoću [5].

U tablici 1 prikazani su kemijski sastavi nekoliko konstrukcijskih čelika s poboljšanom otpornošću na trošenje razreda tvrdoće 450 HB, prema izvješćima njihovih proizvođača.

Tablica 1. Kemijski sastavi konstrukcijskih čelika s poboljšanom otpornošću na trošenje za razred tvrdoće 450 HB

maseni udio, %										
Vrsta čelika	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	B	ostalo
Hardox 450 [6]	0,26	0,7	1,6	0,025	0,010	1,4	0,6	1,5	0,005	-
Raex 450 [7]	0,26	0,8	1,7	0,025	0,015	1,5	0,5	1		-
Xar 450 [8]	0,22	0,8	1,5	0,020	0,007	1,3	0,5	-		Cu: 0,3
Brinar 450 [9]	0,22	0,4	1,5	0,015	0,005	1,2	0,4	-		Al: 0,1
Dillidur 450 [10]	0,25	0,7	1,6	0,025	0,010	1,5	0,5	0,8		*

*Cu: 0,3 + V: 0,08 + Nb: 0,05

Svi čelici navedeni u gornjoj tablici imaju relativno nizak udio ugljika. Nizak udio ugljika vrlo je važan s obzirom da se radi o konstrukcijskim čelicima kod kojih je zavarljivost vrlo važno svojstvo. Utjecaj legirnih elemenata na otpornost materijala abrazijskom trošenju proizlazi iz njihovog učinka na mikrostrukturu. Tako čelici s poboljšanom otpornošću na trošenje, uz odgovarajući sadržaj ugljika, trebaju imati dovoljan sadržaj bora te kombinaciju nikla i molibdena. Kombinacija ova dva

elementa ima veći utjecaj na prokaljivost nego svaki od tih elemenata zasebno. Za postizanje odgovarajuće tvrdoće tijekom kaljenja važan je bor te u nekim slučajevima krom [5].

Iako se legiranjem može povećati tvrdoća, a time i otpornost na abrazijsko trošenje to ne znači da je povećana otpornost i prema drugim mehanizmima trošenja. Zhu J. i Ren X. u svom istraživanju navode kako se povećanjem sadržaja supstitucijskih legirnih elemenata smanjuje delaminacija, ali se istodobno povećava kvazi-nanometarsko trošenje kod srednjeugljičnih čelika [11].

U tablici 2 navedena su neka mehanička svojstva konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na trošenje za određene debljine ploče (d).

Tablica 2. Mehanička svojstva konstrukcijskih čelika poboljšane otpornosti na trošenje

Vrsta čelika	d, mm	HB	R_m , N/mm ²	$R_{p0,2}$, N/mm ²	A, %	Žilavost (-20 °C), J
Hardox 450 [6]	3,2 - 80	425-475	-	1250	-	50*
Raex 450 [7]	6 - 40	420-500	1450	1250	9	30*
Xar 450 [12]	15	420-480	1400	1200	10	27
Brinar 450 [9]	20	410-470	1390	1135	9	40
Dillidur 450 [10]	20	420-480	1400	950	11	35

*ispitna temperatura -40 °C

Niskolegirani čelici visoke čvrstoće otporni na trošenje imaju brojne prednosti. Osim niskog udjela legirnih elemenata i dobre otpornosti na trošenje, imaju visoku žilavost i jednostavan proces proizvodnje. Trenutno se mikrolegiranje i toplinska obrada koriste za poboljšanje njihove čvrstoće, žilavosti i otpornosti na trošenje, uglavnom dodavanjem elemenata poput Ti, B, Nb i V. Od navedenih mikrolegirajućih elemenata, Ti se obično koristi kako bi se stvorili precipitanti nanoveličine koji imaju izvrsnu stabilnost na visokim temperaturama te koji sprječavaju rast austenitnih zrna. Međutim, neprikladno dodavanje Ti može uzrokovati stvaranje TiN-uključaka makroveličine. Takvi uključci lako mogu dovesti do krhkih lomova čime se smanjuje udarna žilavost pri niskim temperaturama i vijek trajanja mikrolegiranog čelika. Iz tog razloga ulažu se određeni naponi za bolje kontroliranje stvaranja i rasta TiN-uključaka, jer ove mikročestice pogoršavaju žilavost čelika [13].

Hardox čelici spadaju u najrašireniju skupinu niskolegiranih čelika otpornih na abrazivno trošenje. Ovu skupinu čelika odlikuju vrlo visoka čvrstoća, otpornost na udarna opterećenja, obradivost te dobra zavarljivost. Komercijalno dostupni Hardox čelici klasificirani su na temelju prosječne tvrdoće prema Brinellu pa tako postoje Hardox 400, Hardox 450, Hardox 500, Hardox 550 i Hardox 600. Navedeni popis može poslužiti i kao kriterij zavarljivosti pri čemu čelici s nižim brojem u oznaci imaju bolju zavarljivost. Osim spomenutih vrsta, postoje i Hardox HiTuff (visoke udarne čvrstoće), HiTemp (otporan na visoke temperature) i Hardox Extreme, koji se opisuje kao najtvrdja komercijalno dostupna čelična ploča na svijetu.

Kemijski sastav Hardox čelika uvelike varira, a razlog tome je širok raspon debljina ploča i potreba za postizanjem homogene strukture kao i tvrdoće po cijelom presjeku čeličnih poluproizvoda. Takva svojstva ostvaraju se odgovarajućim postupkom kaljenja čelika uz odgovarajući legirni dodatak bora, uz povećani udio Cr, Mn i Ni te, ukoliko je to potrebno, povećanjem debljine ploče [14].

4. PONAŠANJE ČELIKA POVIŠENE OTPORNOSTI NA TROŠENJE U EKSPLOATACIJI

Istrošenost strojnih elemenata nepovoljno utječe na njihovu trajnost i pouzdanost. S ovim problemom susreću se brojne grane industrije kao što su rudarstvo, građevinarstvo ili poljoprivreda. Jedan od glavnih izvora koji određuju ukupne troškove proizvodnje predstavljaju čimbenici koji utječu na brzinu trošenja strojnih elemenata. Primjerice u industriji eksploatacije mineralnih sirovina, zbog vrlo teških uvjeta rada, takvi elementi se često moraju mijenjati. Svaki zastoj stroja uključuje troškove koji se odnose na održavanje odnosno popravak infrastrukture, ali i troškove materijala koji nije eksploatiran [15].

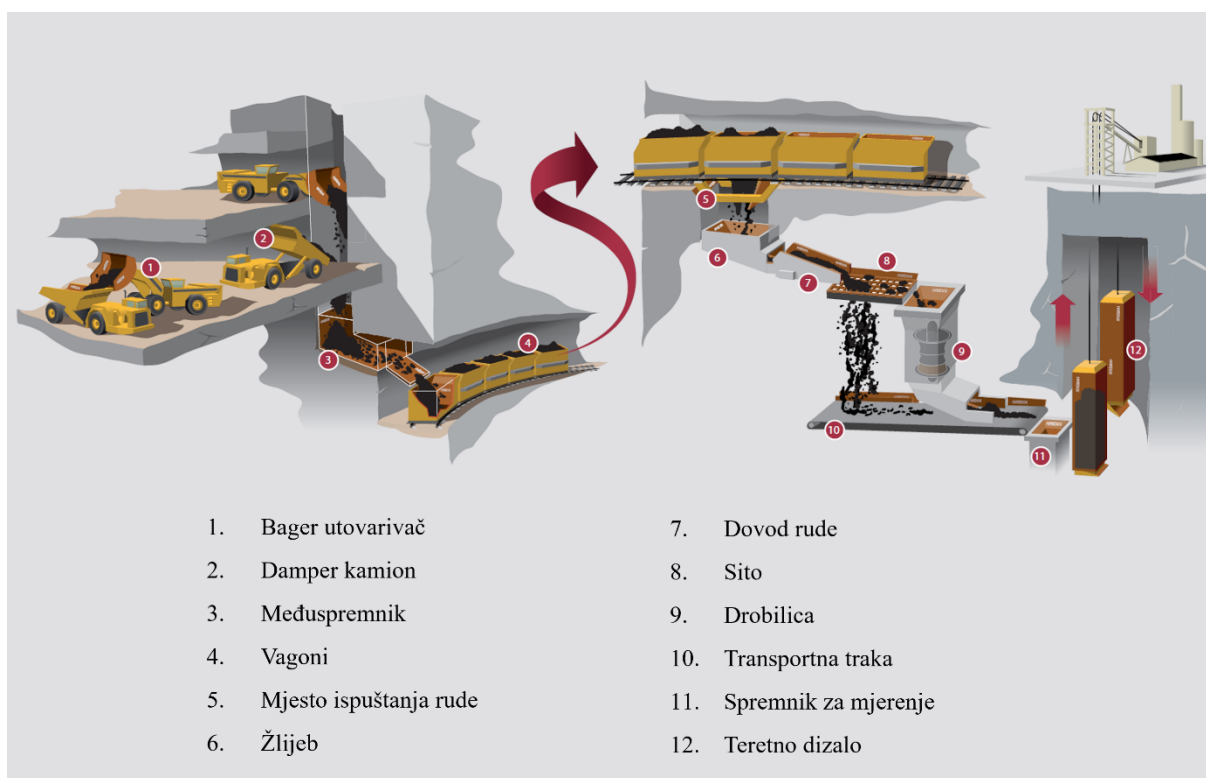
U eksploataciji prirodnih agregata kao što su pijesak, šljunak i glina koriste se građevinski strojevi manjeg kapaciteta obrade kao što su bageri prikazani na slici 4.1. Okolišni čimbenici koji uzrokuju trošenje kod bagera određeni su vrstom agregata, što znači da ih se ne može praktično regulirati. Stoga aktivnosti vezane uz optimizaciju elemenata kao što su primjerice korpe bagera moraju biti usmjerene na poboljšanje dizajna, odabir najboljih konstrukcijskih rješenja i izbor optimalnih materijala [15].



Slika 4.1 Bager gusjeničar (lijevo) i bager kombinirka (desno)[16]

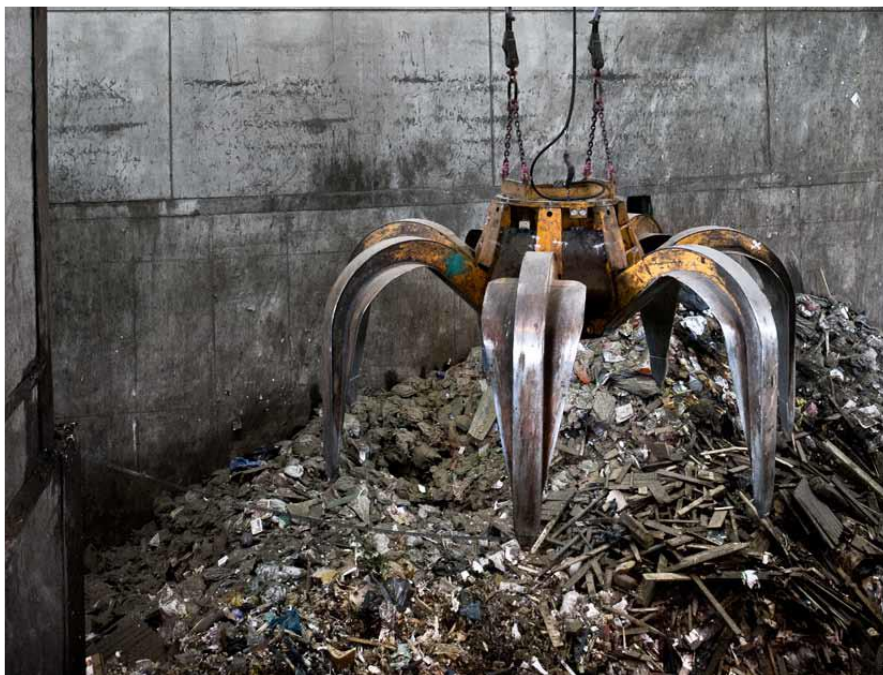
Trenutno čelična industrija zadovoljava zahtjeve konstruktora strojeva nudeći novije i sve bolje materijale u pogledu traženih svojstava čvrstoće. Jedna od skupina materijala čijom bi se primjenom mogla smanjiti energetska potrošnja konstrukcije te istodobno povećati njezina trajnost, jesu niskolegirani, martenzitni čelici legirani borom. Ove čelike karakterizira povećana

otpornost na abraziju. Ono što je zajedničko većini komercijalno dostupnih čelika poboljšane otpornosti na trošenje jest visoka čvrstoća te dovoljno dobra duktilnost i udarni rad loma, osobito pri nižim temperaturama. Navedena svojstva dobivaju se kroz posebno termomehaničko valjanje te kontroliranje kemijskog sastava. Osobito veliki utjecaj na svojstva ima dodavanje bora u vrlo malim količinama (obično između 0,002 i 0,005 %) te vrlo nizak sadržaj nečistoća, što se posebno odnosi na sumpor. Jedan od predstavnika čelika poboljšane otpornosti na trošenje je Hardox 600. Glavna područja primjene ovog, ali i ostalih Hardox čelika su u rudarskoj industriji [15]. Na slici 4.2 prikazan je primjer podzemne eksploatacije sirovina te primjena Hardoxa za izgradnju opreme koja se pri tome koristi.



Slika 4.2 Primjena Hardox čelika u podzemnoj eksploataciji sirovina [17]

U građevinskoj industriji Hardox čelici koriste se za proizvodnju oplata, drobilica i utovarivača na bagerima, a u transportnoj industriji za proizvodnju kontejnera, podova i zidova poluprikolica i prikolica za tegljače te kamione za odvoz otpada [15]. U recikliranju se također primjenjuju za izradu drobilica, mlinova čekićara i višekrake grabilice otpada koja je prikazana na slici 4.3.



Slika 4.3 Višekraka grabilica otpada [18]

Hardox čelici važni su i u proizvodnji cementa. Njihova primjena od površinske eksploatacije vapnenca u kamenolomu pa sve do utovara i transporta konačnog proizvoda uključuje abrazivne postupke iskopavanja, drobljenja, prosijavanja i mljevenja kamena. Na slici 4.4 prikazan je damper kamion u kamenolomu.



Slika 4.4 Damper kamion u kamenolomu [19]

U eksploataciji vapnenačke stijene, čija prosječna tvrdoća iznosi oko 150 HV, dolazi do kliznog trošenja. U takvim okolnostima životni vijek za čelik oznake Hardox 500 otprilike je 3 do 4 puta dulji u usporedbi sa čelikom S235 što bi značilo da je ploča od 25 mm debljine čelika S235 ekvivalentna ploči debljine 8 mm Hardox 500. Korištenjem Hardox čelika umjesto općeg konstrukcijskog čelika smanjuje se težina i produljuje životni vijek čeličnih konstrukcija. Na slici 4.5 prikazana je primjena Hardox čelika u proizvodnji cementa [20].



Slika 4.5 Primjena Hardox čelika u proizvodnji cementa [20]

5. ZAVARIVANJE HARDOX ČELIKA

Kako bi se osigurao kvalitetan zavar potrebno je očistiti područje zavora radi uklanjanja vlage, ulja, korozije ili neke druge nečistoće. Osim čišćenja i pripreme površine, potrebno je obratiti pažnju i na izbor dodatnog materijala za zavarivanje, unos topline, redoslijed zavarivanja i veličinu razmaka u korijenskom dijelu spoja [21].

5.1. Unos topline

Većina postupaka zavarivanja izvode se izmjeničnom ili istosmjernom strujom. Za oba načina unos topline računa se prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (1)$$

gdje je:

Q - unesena toplota, kJ/mm

k - koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja

U - napon zavarivanja, V

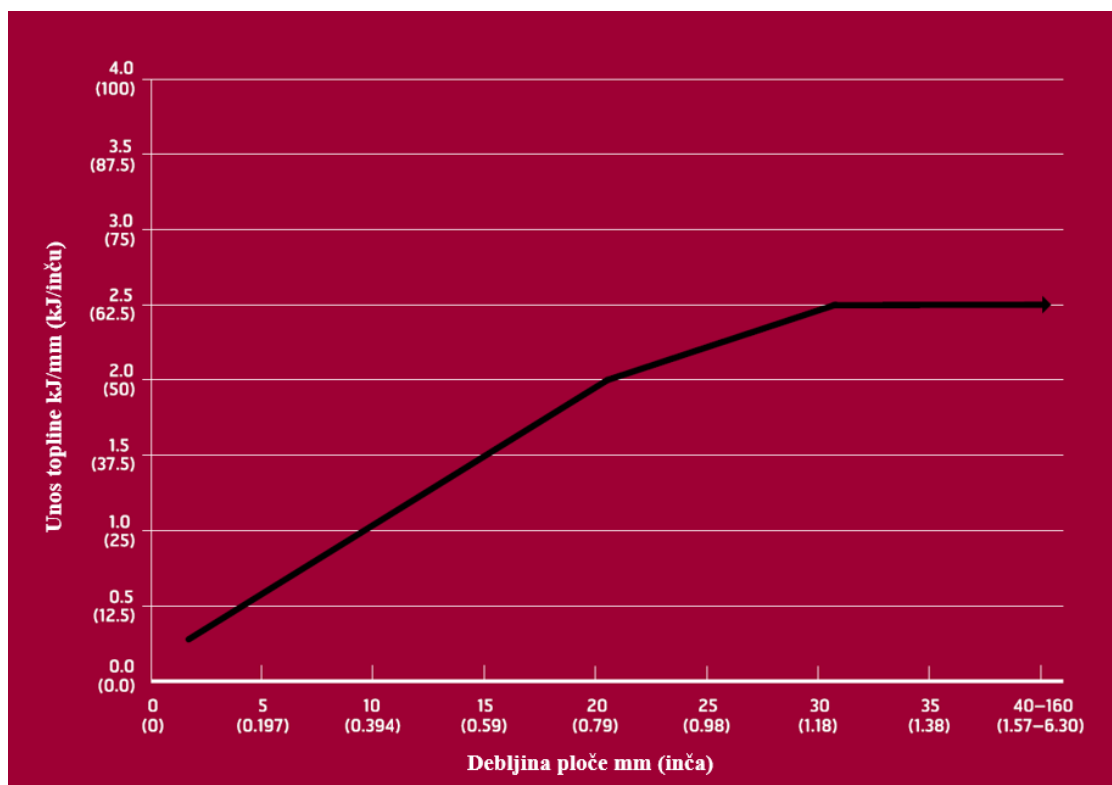
I - jakost struje zavarivanja, A

v_{zav} - brzina zavarivanja, mm/min.

Prekomjerni unos topline povećava širinu zone utjecaja topline (ZUT), što zauzvrat pogoršava mehanička svojstva kao i otpornost na trošenje u području ZUT-a. Zavarivanje s malim unosom topline daje prednosti kao što su:

- povećana otpornost na trošenje ZUT-a
- smanjena distorzija (jednoprolazni zavareni spojevi)
- povećana žilavost spoja
- povećana čvrstoća spoja [21].

Međutim, vrlo nizak unos topline može negativno utjecati na udarnu žilavost. Na slici 5.1 prikazan je preporučeni maksimalni unos topline za različite debljine ploča Hardox čelika [21].

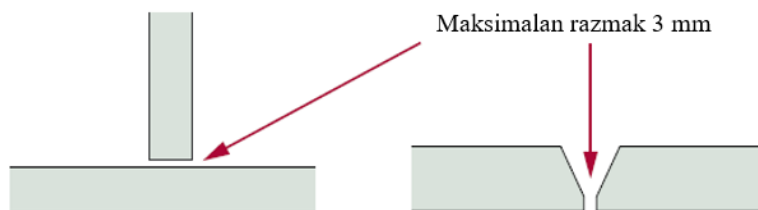


Slika 5.1 Preporučeni maksimalni unos topline za Hardox čelike [21]

5.2. Vodikom inducirane pukotine

Budući da imaju relativno nizak maseni udio ugljika i ugljični ekvivalent, sve vrste Hardox čelika otpornije su na pojavu pukotina induciranih vodikom u odnosu na ostale čelike s povećanom otpornosti na trošenje. Kako bi se što više smanjila mogućnost pojave vodikom induciranih pukotina mogu se poduzeti sljedeće radnje:

- predgrijavanje područja zavora na preporučenu minimalnu temperaturu
- korištenje dodatnih materijala i postupaka koji osiguravaju maksimalni sadržaj vodika od 5 ml na 100 g metala zavora
- čišćenje spoja od nečistoća poput hrđe, masti ili ulja
- primjena pravilnog redoslijeda zavarivanja kako bi se smanjilo zaostalo naprezanje
- početak i kraj zavora trebaju biti odmaknuti najmanje 50 do 100 mm od ruba kako bi se izbjegla prekomjerna naprezanja u tim područjima
- veličina razmaka između elemenata i korijenskog otvora ne bi trebala biti veća od 3 mm, slika 5.2 [21]



Slika 5.2 Razmak između elemenata i korijenskog otvora [21]

Kao što je već spomenuto, dodatni materijali predstavljaju jedan od mogućih načina unosa vodika u metal zavara i zonu utjecaja topline. Kako bi unos vodika bio što manji, potrebno je kontrolirati sadržaj vlage u dodatnim materijalima. Zbog toga se prije zavarivanja provodi njihovo sušenje [22].

5.3. Minimalne temperature predgrijavanja i međuprolaza

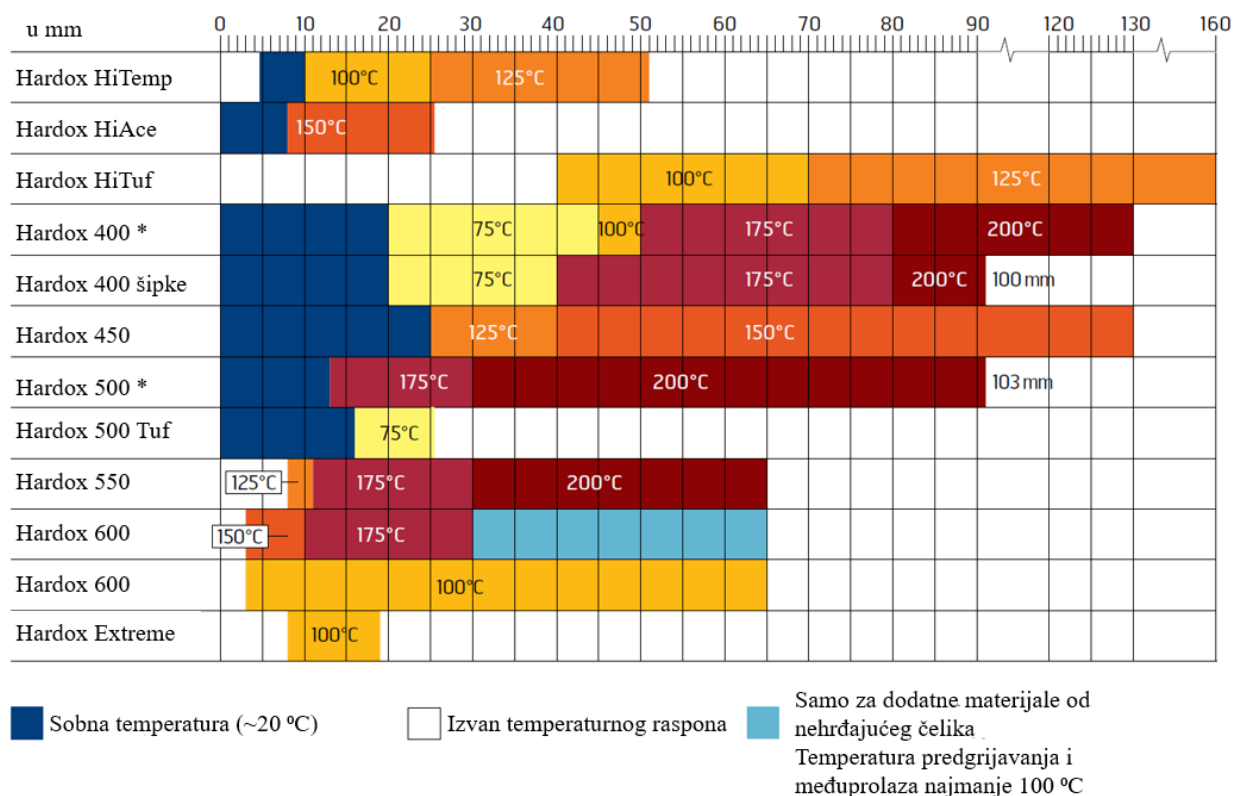
Kako bi se izbjegla opasnost od nastanka vodikom induciranih pukotina neophodno je pridržavati se preporučene minimalne temperature predgrijavanja kao i postupaka za dobivanje i mjerenje temperature unutar i oko spoja [21].

Jedinstvena kombinacija legiranih elemenata optimizira mehanička svojstva Hardox čelika i određuje temperaturu predgrijavanja i temperaturu međuprolaza tijekom zavarivanja te se može koristiti za izračun ekvivalenta ugljika. Obično je za viši ekvivalent ugljika potrebna viša temperatura predgrijavanja i međuprolazna temperatura. Ekvivalent ugljika izražava se kao CEV ili CET prema dolje navedenim formulama [21].

$$CEV = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo + \%Cr + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (2)$$

$$CET = \%C + \frac{\%Mn + \%Mo}{10} + \frac{\%Cr + \%Cu}{20} + \frac{\%Ni}{40} \quad (3)$$

Minimalne preporučene temperature predgrijavanja i maksimalne temperature međuprolaza tijekom zavarivanja prikazane su na slici 5.3 i u tablici 3. Osim ako nije drugačije navedeno, ove vrijednosti su primjenjive za zavarivanje nelegiranim i niskolegiranim dodatnim materijalima [21].



* Temperatura predgrijavanja vrijedi i za cijevi

Slika 5.3 Preporučene minimalne temperature predgrijavanja Hardox čelika u ovisnosti o debljini ploče [21]

Vrijednosti temperatura predgrijavanja prikazanih na slici 4.3 vrijede za toplinske unose od 1,7 kJ/mm ili više. Ukoliko je toplinski unos od 1,0 do 1,69 kJ/mm poželjno je povećati temperaturu za 25 °C iznad preporučene temperature predgrijavanja. Za unos topline manji od 1,0 kJ/mm potrebno je izračunati preporučenu minimalnu temperaturu predgrijavanja. Izračun se može obaviti pomoću posebne aplikacije kao što je SSAB WeldCalc. Ako je vlažnost visoka ili je temperatura okoline ispod 5 °C potrebno je povećati minimalne preporučene temperature predgrijavanja za 25 °C [21].

Ukoliko se zavaruju dvije ploče iste vrste Hardox čelika koje su različitih debljina, deblja ploča određuje potrebne temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature. Kada se različite vrste čelika zavaruju zajedno, ploča koja zahtijeva najvišu temperaturu predgrijavanja određuje potrebnu temperaturu predgrijavanja i međuprolazne temperature [21].

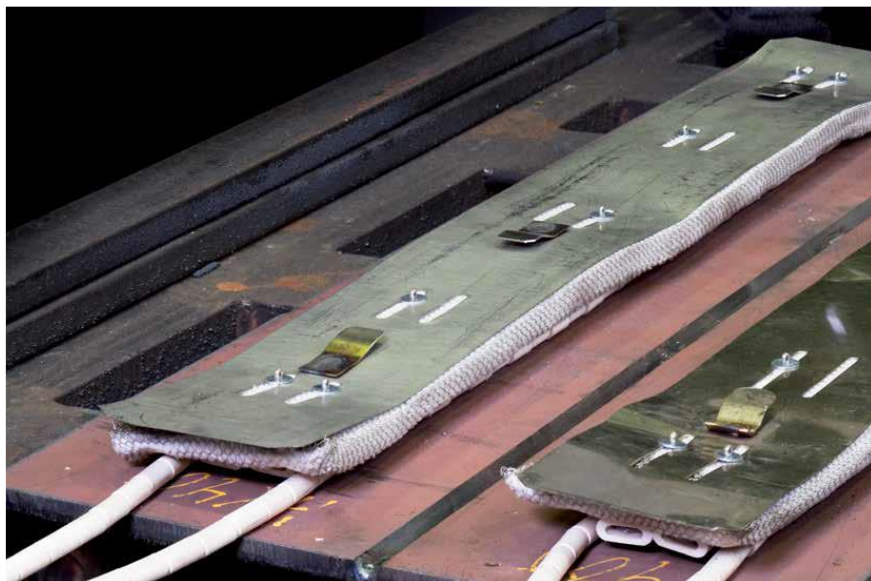
Tablica 3. Preporučene maksimalne temperature međuprolaza za Hardox čelike

Vrsta čelika	Temperatura, °C
Hardox HiTemp	300
Hardox HiTuf	300
Hardox HiAce	225
Hardox 400/400 cijevi i okrugle šipke	225
Hardox 450	225
Hardox 500/500 cijevi	225
Hardox 500 Tuf	225
Hardox 550	225
Hardox 600	225
Hardox Extreme	100

U određenim slučajevima, za Hardox HiTemp i Hardox HiTuf, mogu se koristiti međuprolazne temperature do približno 400 °C. Navedene međuprolazne temperature prikazane u tablici 3 su maksimalne preporučene temperature u spoju (na vrhu metala zavora) ili neposredno uz spoj netom prije početka sljedećeg prolaza zavarivanja [21].

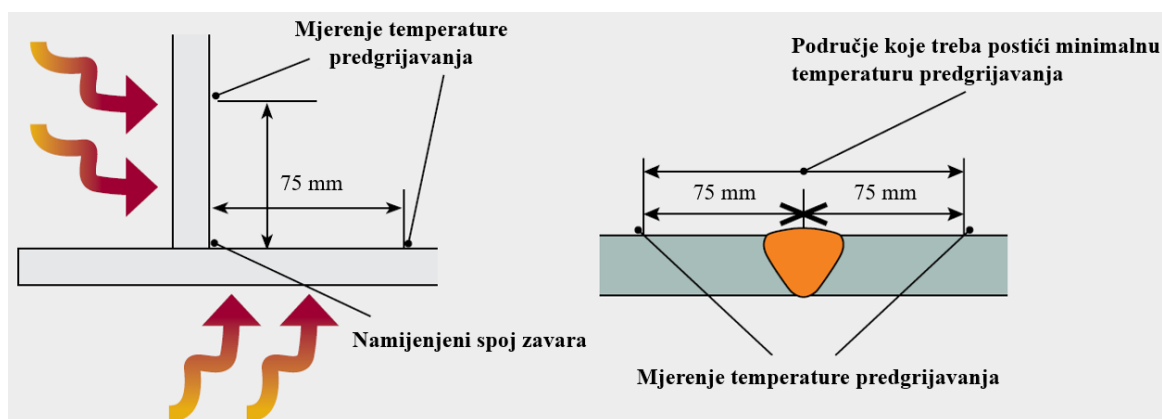
5.4. Postizanje i mjerenje temperature predgrijavanja

Potrebna temperatura predgrijavanja može se postići na nekoliko načina. Jedno od najboljih rješenja predstavljaju električni grijači u obliku obloga koja se postavljaju oko pripremljenog spoja te se na taj način može postići ravnomjerno zagrijavanje područja. Na slici 5.4 prikazano je predgrijavanje Hardox čelika električnim grijačima [21].



Slika 5.4 Predgrijavanje područja zavarivanja Hardox čelika električnim grijačima [21]

Mjerenje temperature predgrijavanja vrši se nakon isteka minimalnog vremena čekanja koje iznosi 2 min za svakih 25 mm debljine čelika. Minimalnu temperaturu predgrijavanja treba postići u području od 75 mm s obje strane predviđenog zavarenog spoja, slika 5.5. Temperatura bi se trebala mjeriti pomoću kontaktnog termometra ili sličnog uređaja [21].

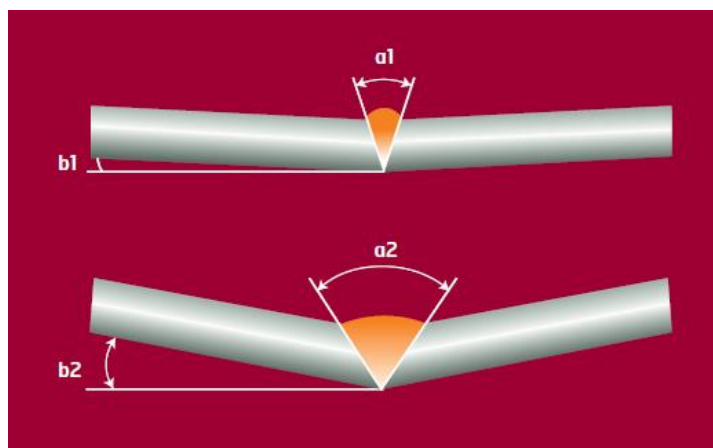


Slika 5.5 Područje mjerenja temperature predgrijavanja za različite zavarene spojeve [21]

5.5. Preporuke za izbjegavanje deformacija pri zavarivanju

Deformacije tijekom i nakon zavarivanja povezane su s debljinom osnovne ploče i postupkom zavarivanja. Kako bi se što više smanjile, osobito pri zavarivanju tanjih ploča, mogu se poduzeti sljedeći koraci:

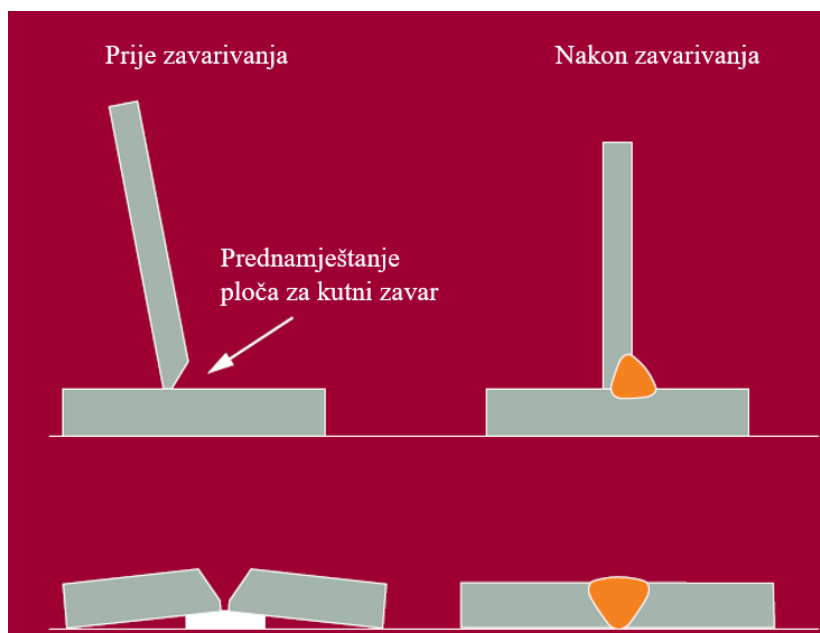
- zavarivanje sa što manjim unosom topline (vrijedi za jednoprolazno zavarivanje)
- smanjenje površine poprečnog presjeka zavara kao što je prikazano na slici 5.6
- primjena simetričnih zavara, slika 5.7
- prednamještanje, stezanje ili postavljanje dijelova pod određenim kutom prije zavarivanja kako bi se kompenzirala deformacija, slika 5.8
- izbjegavanje nepravilnog otvora korijena spoja
- smanjenje količine dodatnog materijala i optimiziranje debljine grla kod kutnih zavara
- smanjenje razmaka između mjesta pripajanja
- primjena tehnike zavarivanja korak unatrag (engl. *back-step welding*) ili tehnike zavarivanja na preskok (engl. *skip welding*), slika 5.9
- zavarivanje od krutih područja prema labavijim krajevima, slika 5.10 [21].



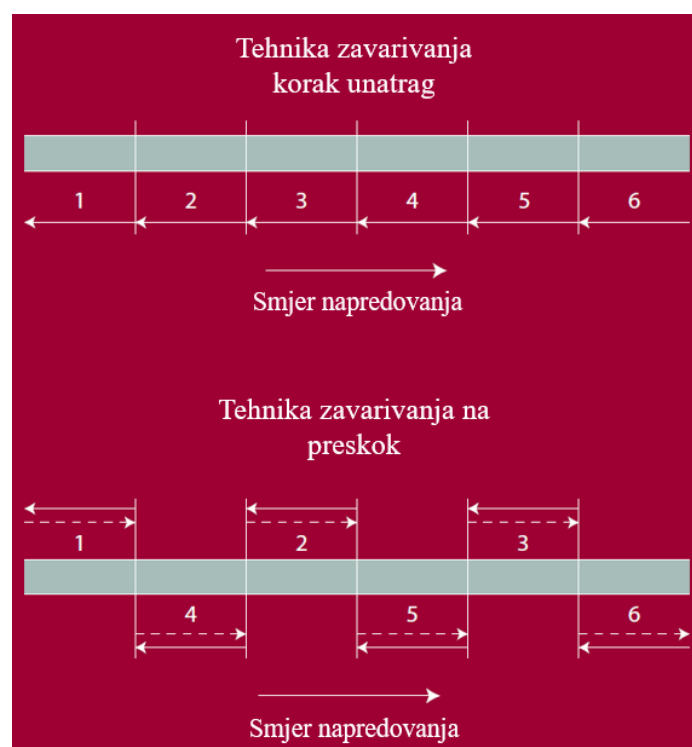
Slika 5.6 Utjecaj površine poprečnog presjeka zavara na kut odstupanja [21]



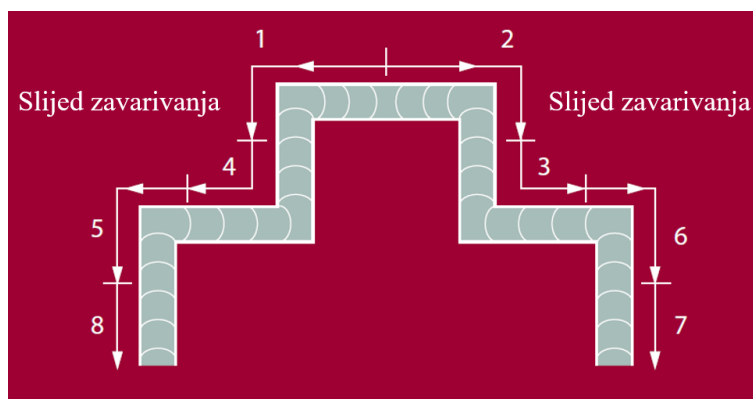
Slika 5.7 Simetrični zavari [21]



Slika 5.8 Pozicioniranje dijelova prije zavarivanja [21]



Slika 5.9 Primjena tehnike zavarivanja korak unatrag i na preskok [21]



Slika 5.10 Zavarivanje od krutih područja prema labavijim krajevima [21]

5.6. Zaštitni plin

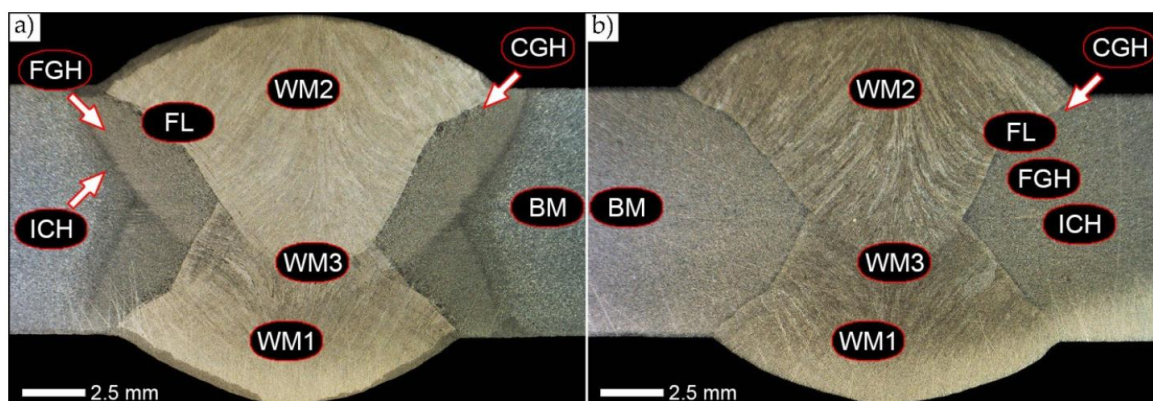
Prilikom zavarivanja Hardox čelika obično se primjenjuju isti zaštitni plinovi kao i kod zavarivanja nelegiranih i niskolegiranih čelika. Zaštitni plinovi koji se koriste kod zavarivanja Hardox čelika MAG postupkom obično sadrže mješavinu argona (Ar) i ugljičnog dioksida (CO_2). Mala količina kisika (O_2) ponekad se koristi zajedno s argonom i ugljičnim dioksidom kako bi se stabilizirao električni luk i smanjila količina prskanja. Za ručno zavarivanje preporučuje se mješavina zaštitnog plina od oko 18 do 20 % ugljikovog dioksida u argonu, što olakšava dobro prodiranje u materijal s razumnom količinom prskanja. Ako se pak koristi automatsko ili robotsko zavarivanje, može se koristiti zaštitni plin koji sadrži 8 do 10 % ugljikovog dioksida u argonu kako bi se optimizirao rezultat zavarivanja s obzirom na produktivnost i razinu prskanja [21].

6. NAKNADNA TOPLINSKA OBRADA ZAVARENIH SPOJEVA HARDOX ČELIKA

Istraživački članak pod nazivom „Austenite Grain Growth Analysis in a Welded Joint of High-Strength Martensitic Abrasion-Resistant Steel Hardox 450”, autora Konat Ł i dr. bavi se analizom mikrostrukturnih promjena u zavarenom spoju čelika Hardox 450 [14].

Zavarljivost ovih čelika vrlo je važan kriterij u njihovoj praktičnoj primjeni. Primjerice čelici Hardox 400 i Hardox 450 odlikuju se dobrom zavarljivošću, dok Hardox 500 ima zadovoljavajuću zavarljivost. Međutim kod svakog od tih čelika zavarivanje može uzrokovati strukturne promjene unutar široke zone utjecaja topline. Mikrostrukturne promjene mogu utjecati na promjenu tvrdoće, te na lokalni gubitak otpornosti na abrazivno trošenje. Iz tog su razloga autori ovog članka istražili promjene do kojih dolazi tijekom zavarivanja te njihovo moguće smanjenje pomoću naknadne toplinske obrade zavarenih spojeva. Nakon što su zavarene dvije ploče Hardox 450 čelika dimenzija $1000 \times 200 \times 10$ mm, iz njih su obradom abrazivnim vodenim mlazom i elektroerozijom izrezani ispitni uzorci. Određeni dio ispitnih uzoraka podvrgnut je naknadnoj toplinskoj obradi koja se sastojala od normalizacijskog žarenja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Grijanje uzoraka provedeno je u komornoj peći u zaštitnoj atmosferi neutralnog plina argona (99,95 %) [14].

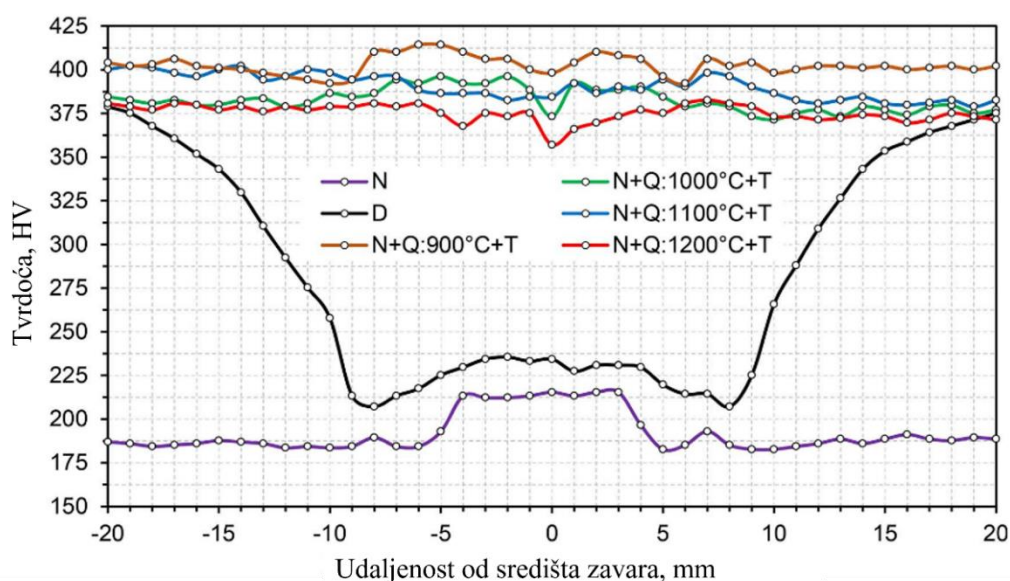
Na slici 6.1 prikazan je izgled poprečnog presjeka zavarenog spoja čelika Hardox 450 prije i nakon normalizacije. WM označava metal zavara, FL predstavlja liniju staljivanja, BM osnovni materijal, FGH zonu utjecaja topline finog zrna, CGH zonu utjecaja topline grubog zrna dok ICH predstavlja međukritičnu zonu utjecaja topline [14].



Slika 6.1 Makroskopska slika poprečnog presjeka zavarenog spoja u stanju nakon zavarivanja (a) i u normaliziranom stanju (b) [14]

Na slici 6.2 prikazan je raspored tvrdoće preko zavarenog spoja nakon zavarivanja, prije (D) i nakon što su se provele različite toplinske obrade: normalizacija (N), kaljenje (Q) i popuštanje (T). Također je prikazan i utjecaj variranja temperature austenitizacije od 900 °C do 1200 °C [14].

Najveće promjene mikrotvrdoće u karakterističnim područjima zavarenog spoja izmjerene su u stanju nakon zavarivanja bez dodatne toplinske obrade. Vrijednosti tvrdoće u ZUT-u i u metalu zava puno su niže od tvrdoće osnovnog materijala. Nakon provedene normalizacije izmjerene tvrdoće su znatno niže nego u prethodnom stanju, ujednačene su u osnovnom materijalu i u ZUT-u, a nešto višu tvrdoću ima metal zava. Nakon kaljenja i popuštanja postignuta je znatno viša tvrdoća u odnosu na normalizirano stanje. Nema razlike između tvrdoće osnovnog materijala, ZUT-a i metala zava. Vrijednosti tvrdoće slične su tvrdoći osnovnog materijala u isporučenom stanju. S povećanjem temperature austenitizacije od 900 °C do 1200 °C dolazi do smanjenja tvrdoće [14].

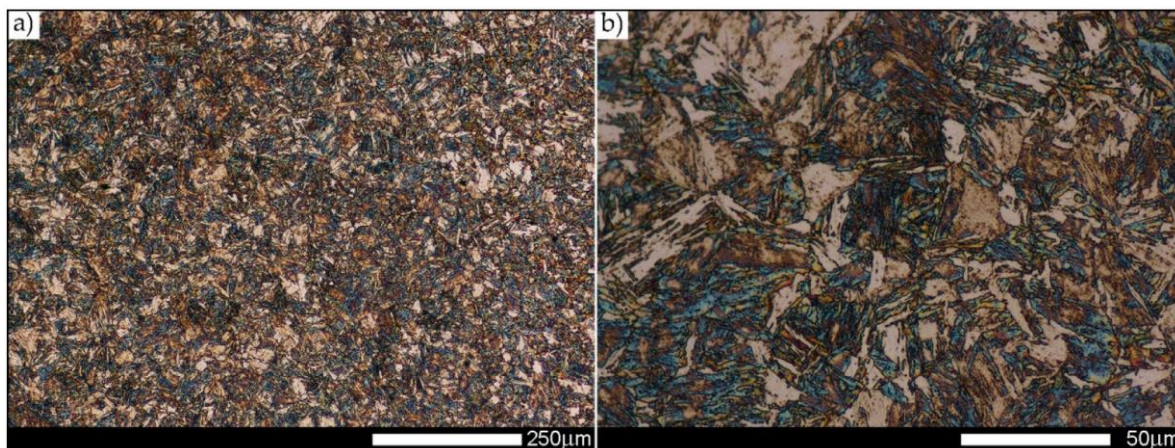


Slika 6.2 Raspodjela tvrdoće preko zavarenog spoja čelika Hardox 450 za različita stanja [14]

Promjene tvrdoće u području zavarenog spoja ovise o primijenjenoj tehnologiji zavarivanja, parametrima i uvjetima zavarivanja, kemijskom sastavu osnovnog i dodatnog materijala, kao i mikrostrukturi osnovnog materijala u isporučenom stanju [14].

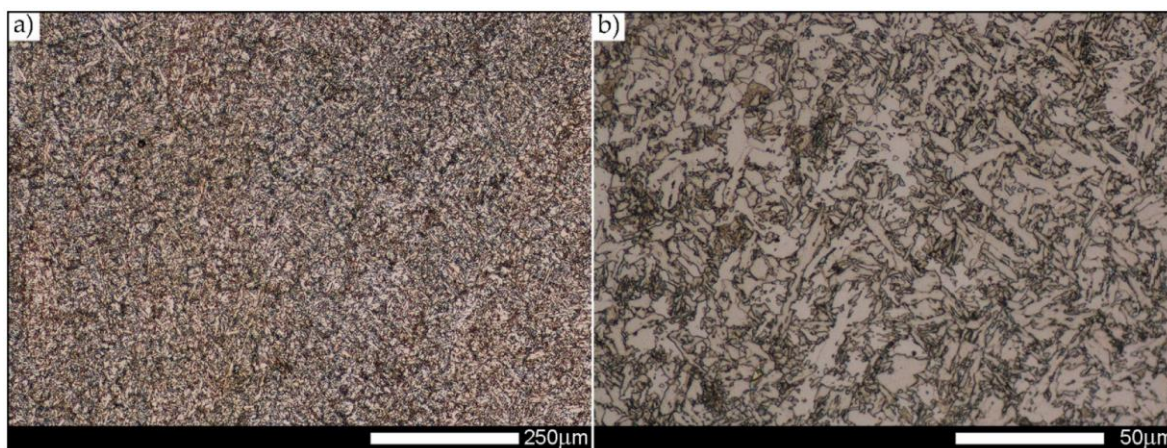
U području osnovnog materijala, čelik Hardox 450 ima martenzitnu mikrostrukturu. Martenzit nema igličastu već pločastu morfologiju, kao što je vidljivo na slici 6.3. Autori su zaključili da

je ovakva morfologija najvjerojatnije rezultat procesa samopopuštanja nakon kaljenja, koje se provodi u čeličani neposredno nakon termomehaničkog valjanja [14].



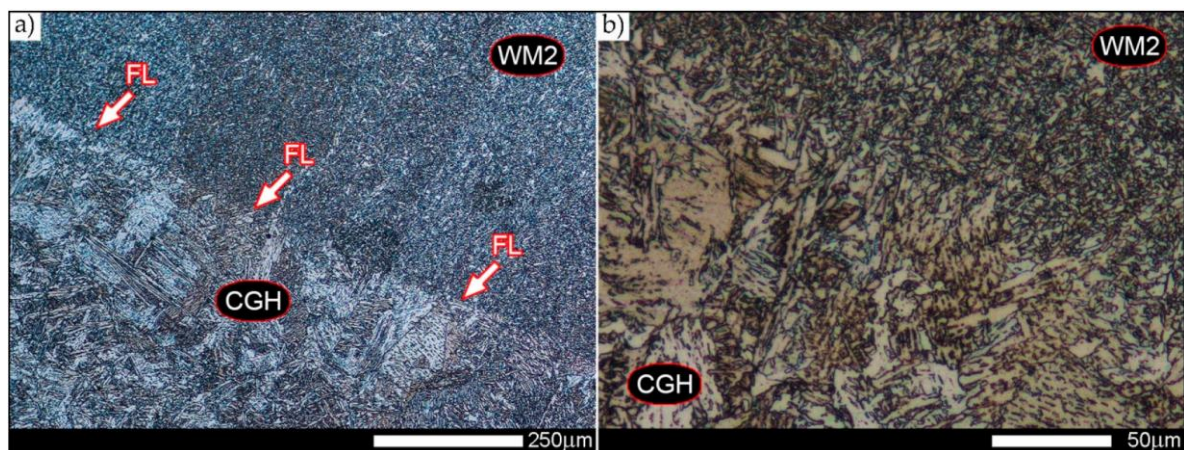
Slika 6.3 Mikrostruktura zavarenog spoja čelika Hardox 450 u području osnovnog materijala snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]

Nakon zavarivanja, u području metala zavara vidljiva je karakteristična ljevačka mikrostruktura nastala usmjerenom kristalizacijom. Sastoji se od igličastog ferita, a mjestimice se može uočiti Widmanstättenov tip strukture s precipitatima trustita, slika 6.4 [14].



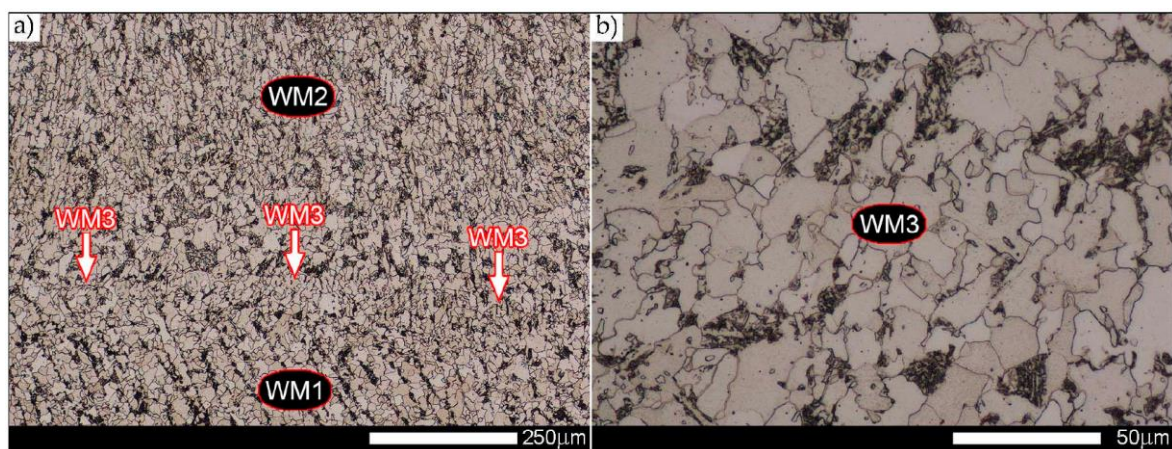
Slika 6.4 Mikrostruktura zavarenog spoja čelika Hardox 450 u području zavarenog metala snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]

Na slici 6.5 prikazana je mikrostruktura u području linije staljivanja, između metala zavara i ZUT-a. Linija staljivanja je vrlo jasno definirana. Cijelom njenom duljinom vidljiva je prisutnost sorbita i trustita [14].



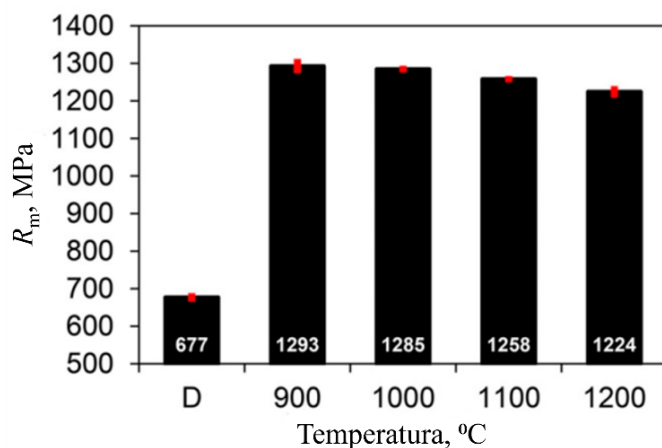
Slika 6.5 Mikrostruktura zavarenog spoja čelika Hardox 450 u području linije staljivanja snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]

Na slici 6.6 prikazana je mikrostruktura metala zavara u normaliziranom stanju. Mikrostruktura se sastoji uglavnom od ferita. Mjestimice se mogu vidjeti i perlitna zrna s manje ili više izraženim lamelama cementita. Po granicama nekih feritnih zrna vide se precipitati tercijarnog cementita [14].



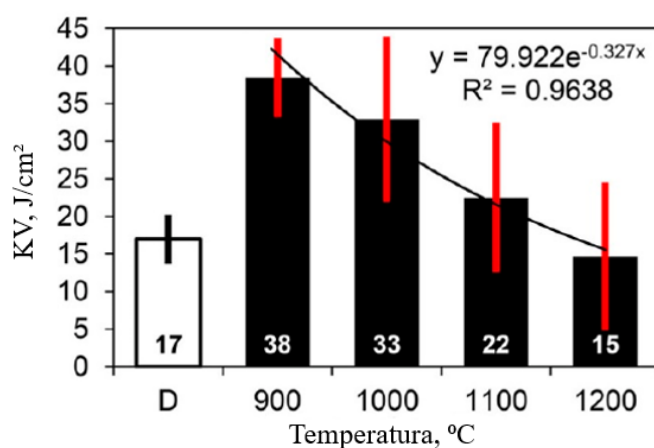
Slika 6.6 Mikrostruktura metala zavara nakon normalizacijskog žarenja snimljena pri povećanju 100× (a) i 500× (b) [14]

Provedena ispitivanja pokazala su da zavareni spoj Hardoxa 450 ima prosječnu vlačnu čvrstoću od 677 MPa, što predstavlja 85 % od deklarirane vlačne čvrstoće metala zavara i 50 % vlačne čvrstoće osnovnog materijala. Toplinska obrada zavarenog spoja Hardoxa 450, koja se sastoji od normalizacije ($\vartheta_a = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) i kaljenja ($\vartheta_a = 900\text{ do }1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), rezultirala je značajnim povećanjem čvrstoće (R_m) kao što je vidljivo na slici 6.7 [14].



Slika 6.7 Vrijednosti vlačne čvrstoće čelika Hardox 450 nakon zavarivanja i nakon toplinske obrade[14]

Povišenje temperature austenitizacije tijekom kaljenja uzrokovalo je značajne promjene kod udarne žilavosti zavarenog spoja ispitivanog čelika, slika 6.8. Najveću udarnu žilavost ima zavareni spoj kaljen s 900 °C. Navedene promjene vrijede za ispitivanja na +20 °C i na -40 °C. Daljnje povećanje temperature austenitizacije rezultira smanjenjem udarne žilavosti, što je posebno vidljivo kod ispitivanja provedenog na temperaturi -40 °C, gdje je kod uzoraka kaljenih s temperature austenitizacije između 1000 °C i 1200 °C uočeno značajno smanjenje žilavosti [14].



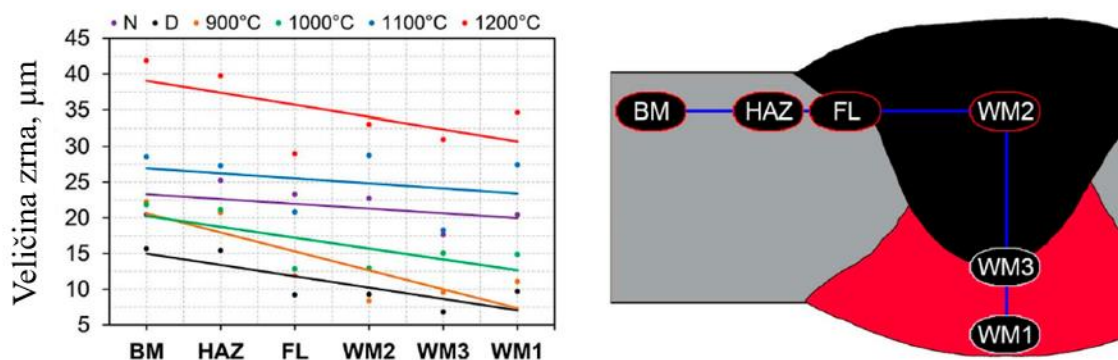
Slika 6.8 Vrijednosti udarnog rada loma čelika Hardox 450 nakon zavarivanja i nakon toplinske obrade[14]

Prosječna veličina kristalnih zrna materijala u stanju isporuke iznosila je 15,7 μm . Postupci kaljenja s temperature austenitizacije u rasponu između 900 °C i 1000 °C nisu izazvali

značajnije promjene veličine zrna, koja je približno iznosila $22\text{ }\mu\text{m}$. Tek pri kaljenju s viših temperatura ($1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), dolazi do naglog povećanja prosječne veličine zrna na $28,2\text{ }\mu\text{m}$, odnosno $41,9\text{ }\mu\text{m}$. U zoni metala zavara mikrostruktura je tipična ljevačka s uglavnom vrlo sitnim kristalnim zrnima [14].

Što se tiče udarnih svojstava materijala, najkritičniju zonu predstavlja linija staljivanja. Prosječna veličina zrna u zoni utjecaja topline, prije i nakon provedenih toplinskih obrada slična je vrijednostima u osnovnom materijalu, što dokazuje da na ovom području nema tendencije rasta zrna kao posljedice povišene temperature [14].

Na slici 6.9 prikazana je promjena prosječne veličine kristalnih zrna za različite temperature austenitizacije u karakterističnim zonama zavarenog spoja čelika [14].



Slika 6.9 Promjena prosječne veličine kristalnih zrna za različite temperature austenitizacije u karakterističnim zonama zavarenog spoja čelika Hardox 450 [14]

7. UTJECAJ NAČINA HLAĐENJA PRILIKOM BRUŠENJA NA ABRAZIJSKU OTPORNOST HARDOX ČELIKA

Općenito se Hardox čelik proizvodi u obliku ploča koje se režu u razne oblike različitim postupcima rezanja kao što je rezanje plazma lukom, rezanje abrazivnim vodenim mlazom, lasersko rezanje, obrada električnim pražnjenjem, prije njihovog sastavljanja ili zavarivanja. Iz tog su razloga do sada istraživanja bila usmjerena uglavnom na istraživanju učinaka specifičnih parametara različitih postupaka rezanja i zavarivanja na površinski i potpovršinski integritet čelika. Međutim zbog težine obrade ove vrste materijala, malo je provedenih istraživanja kako bi se ispitali učinci parametara procesa obrade na cjelovitost obrađene površine [2].

Kada se poveća tvrdoća materijala koji se strojno obrađuje, nužno je koristiti odgovarajuće uvjete rezanja kako bi se izbjeglo prekomjerno trošenje alata i degradacija cjelovitosti strojno obrađene površine uslijed generiranih toplinskih učinaka u zoni rezanja. Iz tog razloga se materijali povišene tvrdoće i povišene otpornosti na abraziju moraju pažljivo obrađivati [2].

Metoda obrade brušenjem mora se koristiti s oprezom jer uklanjanje materijala ovim postupkom stvara mehaničke i toplinske učinke koji bi mogli promijeniti cjelovitost površine ukoliko postupak nije dobro kontroliran. Iz tog razloga uloženi su naponi istraživača kako bi identificirali parametre brušenja koji optimiziraju površinsku cjelovitost. Iako se smatra da kontrola temperature u zoni brušenja odabirom odgovarajućih uvjeta brušenja kao što su brzina brušenja, radna brzina i kvaliteta brusne ploče smanjuje štetne toplinske učinke, upotreba učinkovitog rashladnog sredstva odlučujuća je u očuvanju cjelovitosti brušene površine. Posljednjih godina utvrđeno je da primjena kriogenog hlađenja značajno smanjuje temperaturu brušenja u kontaktnoj zoni između brusne ploče i radnog materijala i značajno poboljšava integritet brušene površine [2].

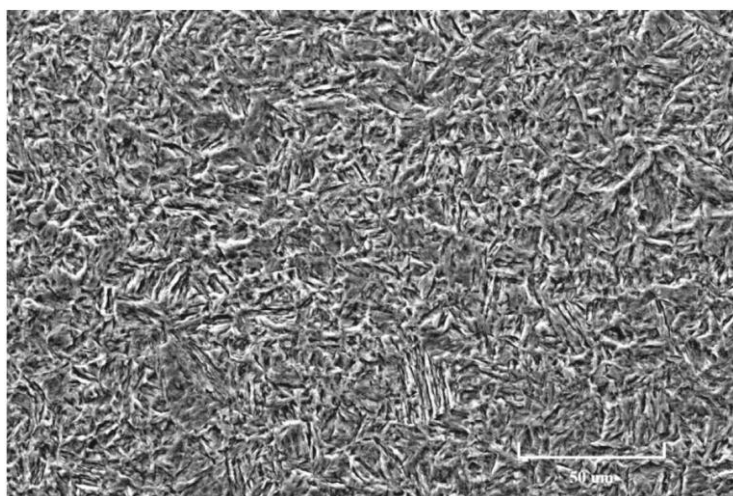
Hardox čelici najčešće imaju martenzitnu mikrostrukturu koja je vrlo osjetljiva na povišenu temperaturu. Kako se u postupku brušenja lokalno površina može jako zagrijati, čelik može izgubiti svoje glavno svojstvo otpornosti na trošenje. Stoga je važno istražiti učinke načina hlađenja na obradivost brušenjem i stabilnost površine ovog materijala [2].

U istraživačkom radu „Effects of the cooling mode on the integrity and the multi-pass micro-scratching wear resistance of Hardox 500 ground surfaces” autora Bensaid K. i dr. ispitivan je utjecaj režima hlađenja pri brušenju na stabilnost brušene površine Hardoxa 500. Kemijski sastav ispitivanog materijala dan je tablici 4 [2].

Tablica 4. Kemijski sastav čelika Hardox 500 [2]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Maseni udio elemenata, %	0,27	0,5	1,6	0,025	0,01	1,2	0,25	0,25	0,005

Na slici 7.1 prikazana je mikrostruktura čelika Hardox 500 nagriženog u otopini 3 %-tnog nitala koji u referentnom stanju ima kaljenu martenzitnu strukturu [2].

**Slika 7.1 Mikrostruktura čelika Hardox 500 [2]**

Svi uzorci su izrezani u ploče debljine 20 mm postupkom abrazivnog vodenog mlaza kako bi se izbjegli eventualni toplinski učinci izazvani postupkom rezanja korištenim za pripremu uzoraka. Površina uzoraka brušena je brusnim papirom granulacije 180 uz obilno hlađenje vodom. Nakon toga slijedilo je fino brušenje pod istim uvjetima hlađenja koristeći slijed abrazivnih brusnih papira 240, 320, 400, 600, 800 i 1200. Ovako pripremljeni uzorci brušeni su brusnom pločom sa sol-gel zrnima aluminijske oksida na tri načina:

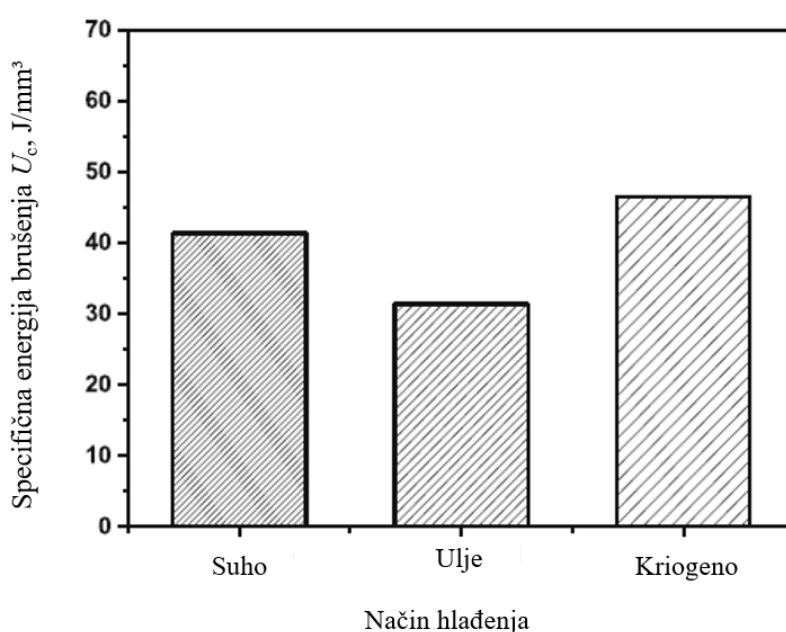
- bez sredstva za hlađenje
- uz hlađenje u ulju
- uz hlađenje tekućim dušikom [2].

Odabrane vrijednosti brzine brušenja, radne brzine i dubine rezanja jednake su onima koje se obično koriste u industriji [2].

Obradivost brušenjem ocjenjuje se prema sili brušenja, specifičnoj energiji brušenja potrebnoj za uklanjanje materijala i omjeru između volumena uklonjenog materijala i potrošenog

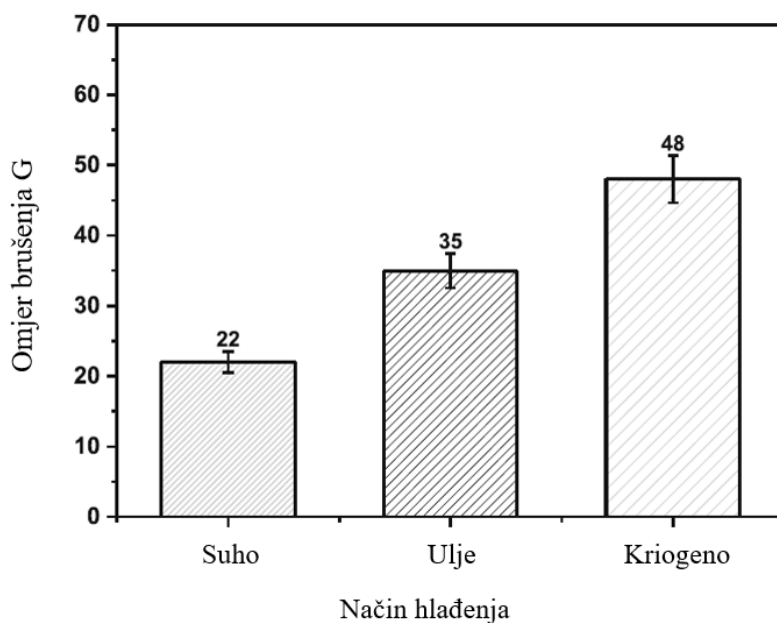
volumena brusne ploče (omjer brušenja). Obradivost brušenjem je time bolja što su sile i energija brušenja manje [2].

Kao što je prikazano na slici 7.2, brušenje pri kriogenom hlađenju zahtijeva puno više energije nego brušenje u topljivom ulju ili bez sredstva za hlađenje. U skladu s tim, može se smatrati da kriogeno hlađenje ne poboljšava obradivost brušenjem Hardoxa 500 i da su uvjeti bez sredstva za hlađenje i hlađenje uljem bolji. Međutim povećanje specifične energije brušenja pri kriogenom hlađenju uzrokovano je većom učinkovitošću hlađenja pomoću tekućeg dušika koji povećava tvrdoću strojno obrađenih gornjih slojeva materijala Hardox 500 [2].



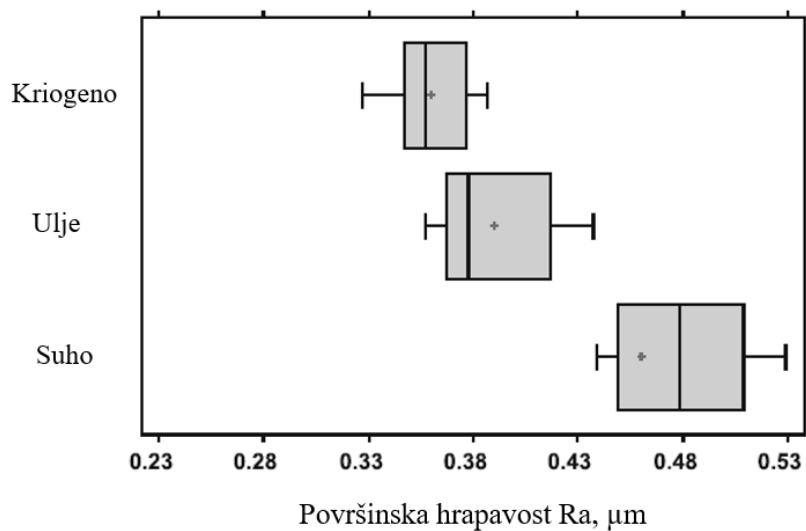
Slika 7.2 Specifična energija brušenja u ovisnosti o načinu hlađenja [2]

Procijenjeni omjeri brušenja G (volumen uklonjenog materijala po jedinici volumena trošenja brusne ploče) za različite načine hlađenja prikazani su na slici 7.3. Ova slika jasno pokazuje da je kriogeni način hlađenja doveo do značajnog povećanja omjera brušenja u usporedbi sa suhim načinom i hlađenjem topljivim uljem. Razlog tome je što se na niskim temperaturama abrazivna zrna zadržavaju dulje vrijeme rezanja što rezultira manjim lomom reznih rubova i pomicanja zrnaca. Iz tog razloga niska stopa trošenja abrazivnih zrnaca povećava omjer brušenja. Iako brušena površina Hardoxa 500 postaje tvrđa pod kriogenim hlađenjem, omjer brušenja postaje veći u ovom načinu hlađenja u usporedbi s uvjetima suhog i topljivog ulja [2].



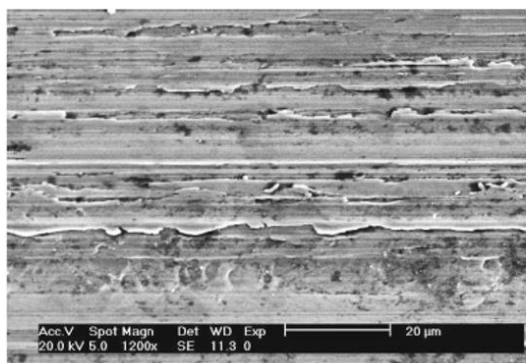
Slika 7.3 Omjeri brušenja za različite načine hlađenja [2]

Rezultati mjerenja hrapavosti brušenih površina dobivenih različitim načinima hlađenja prikazani su dijagramom na slici 7.4. Vidljivo je da je najniži prosjek površinske hrapavosti nastao kada je korišteno kriogeno hlađenje, te da suho brušenje stvara najveću hrapavost površine [2].

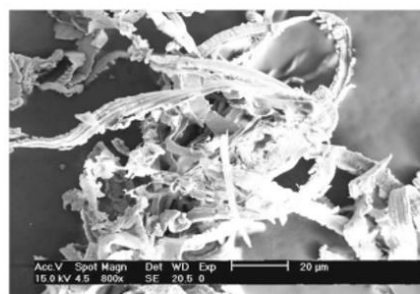
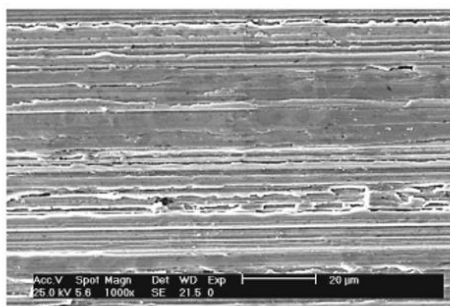


Slika 7.4 Površinska hrapavost uzoraka [2]

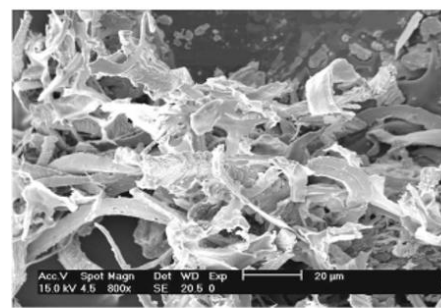
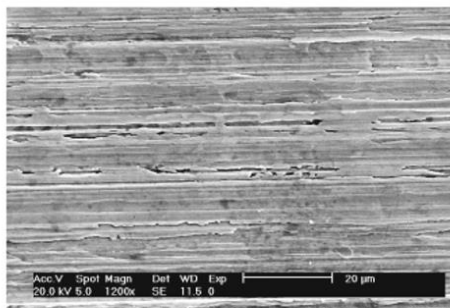
Mikrografski snimci dobivenih površina i izgled strugotine nastale pri brušenju prikazani su na slici 7.5 [2].



a) Suhi uvjeti



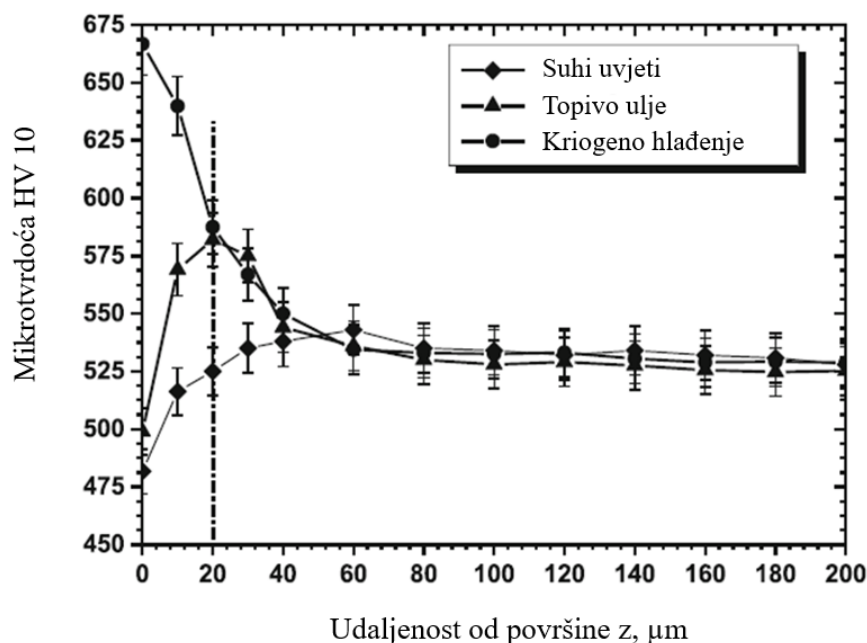
b) Hlađenje topivim uljem



c) Kriogeno hlađenje

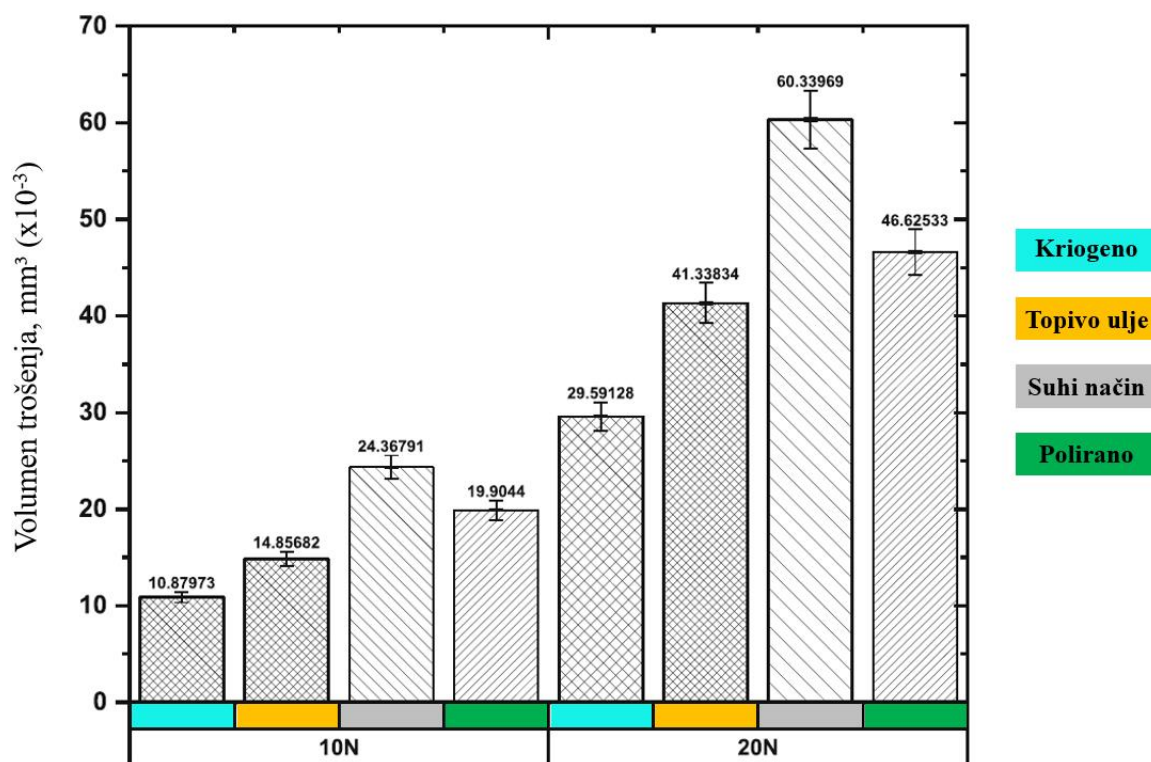
Slika 7.5 SEM snimci brušenih površina i nastalih strugotina pri različitim načinima hlađenja[2]

Na slici 7.6 prikazane su vrijednosti mikrotvrdoće brušenih površina pri različitim načinima hlađenja. Vidljivo je da kriogeno hlađenje stvrdnjava gornje slojeve površina, a hlađenje s topljivim uljem i brušenje bez sredstva za hlađenje omekšavaju površinske slojeve [2].



Slika 7.6 Utjecaj načina hlađenja na mikrotvrdoću HV 10 brušenih površina [2]

Gubici volumena nakon 50 ciklusa grebanja procijenjeni za poliranu i brušene površine koje su hlađene različitim načinima pri opterećenju od 10 i 20 N, prikazani su na slici 7.7. Najmanji gubitak volumena za brušene površine postiže se korištenjem kriogenog hlađenja te on za opterećenja od 10 i 20 N predstavlja 54 % odnosno 63 % volumena dobivenog za polirano stanje. U slučaju uzoraka hlađenih topivim uljem, ovi postoci su 74 % i 88 %. S druge strane, povećanje volumena trošenja u usporedbi s poliranim stanjem bilježi se u slučaju brušenja u suhim uvjetima (122 % za opterećenje od 10 N i 129 % za 20 N). Ovi rezultati pokazuju da suhi način treba izbjegavati kada se razmatra brušenje čelika Hardox 500 te da se za hlađenje preporučuje kriogeno hlađenje ili uporaba topljivog ulja [2].



Slika 7.7 Utjecaj načina hlađenja na volumen trošenja nakon 50 ciklusa grebanja za opterećenja od 10 i 20 N [2]

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Osnovni cilj eksperimentalnog dijela ovog rada bio je provođenje karakterizacije zavarenog spoja čelika Hardox 450. U okviru karakterizacije zavarenog spoja provedena je:

- analiza kemijskog sastava osnovnog materijala
- analiza mikrostrukture u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara
- mjerenje mikrotvrdoće, u tjemenu, sredini i korijenu zavara
- statičko vlačno ispitivanje
- savojno ispitivanje
- ispitivanje žilavosti.

8.2. Materijal za ispitivanje

Ispitivanja su provedena na konstrukcijskom čeliku s poboljšanom otpornošću na abrazijsko trošenje, s oznakom Hardox 450. Kemijski sastav ispitivanog čelika Hardox 450, zajamčen od strane proizvođača, naveden je u tablici 5.

Tablica 5. Kemijski sastav čelika Hardox 450 zajamčen od strane proizvođača

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
Udio, %	0,19	0,19	1,05	0,009	0,001	0,40	0,08	0,03	0,001	ostatak

Zavarivanje je izvedeno u zaštiti aktivnog plina (engl. *metal active gas* - MAG). Postupak zavarivanja izveden je u vodoravnom položaju (PA), a pri zavarivanju koristio se dodatni materijal u obliku krute žice, oznake ESAB OK AristoRod 12,63. Kemijski sastav žice koja je korištena kao dodatni materijal prikazan je u tablici 6, a mehanička svojstva u tablici 7.

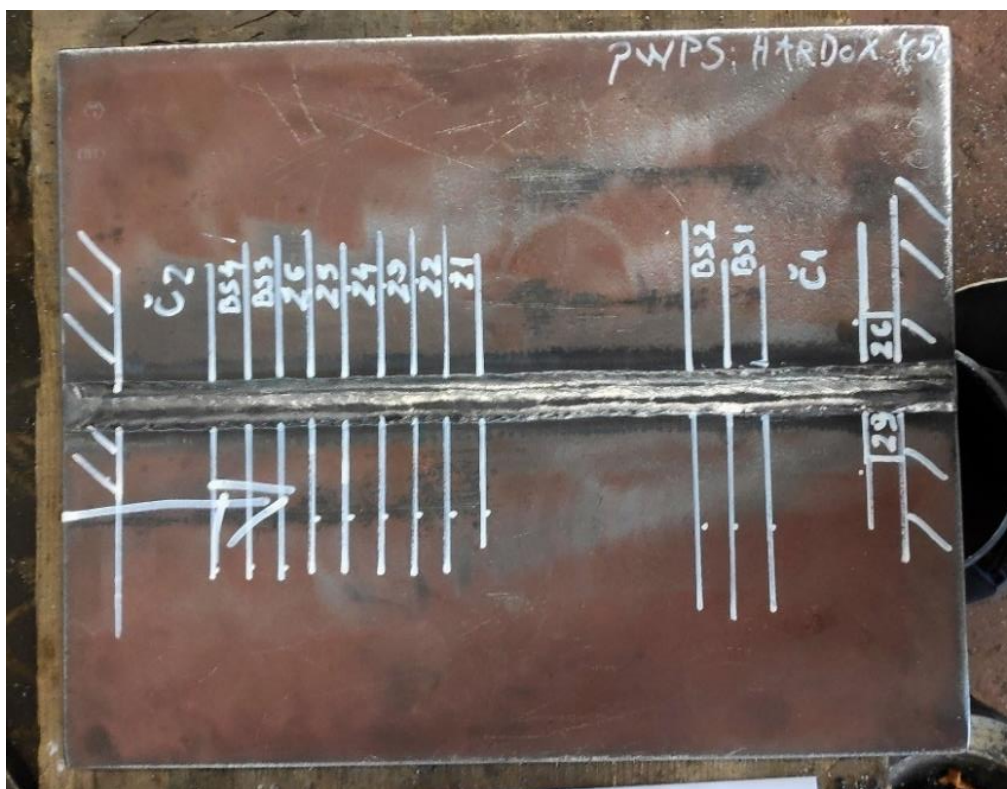
Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ti+Zr
Udio, %	0,09	0,89	1,75	0,011	0,006	0,04	<0,01	0,01	0,02	0,01	0,02

Tablica 7. Mehanička svojstva dodatnog materijala

Vlačna čvrstoća R_m , MPa	590
Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	490
Istezljivost A , %	28
Udarni rad loma (na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) KV, J	90

Ispitni uzorci za sva potrebna ispitivanja izrezani su iz zavarenog spoja dviju ploča, čije su dimenzije $300 \times 150 \times 12$. Na slici 8.1 vidi se zavareni spoj s rasporedom ispitnih uzoraka za sva predviđena ispitivanja.

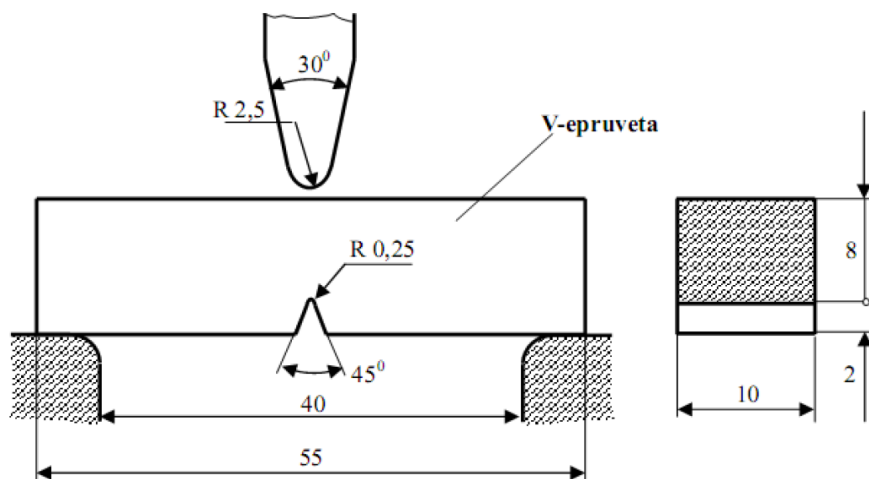
**Slika 8.1 Zavareni spoj dviju ploča čelika Hardox 450 s rasporedom ispitnih uzoraka**

Na slici 8.2 prikazan je izgled ispitnih uzoraka za ispitivanje savijanja (lijevo) te za ispitivanje vlačne čvrstoće (desno).



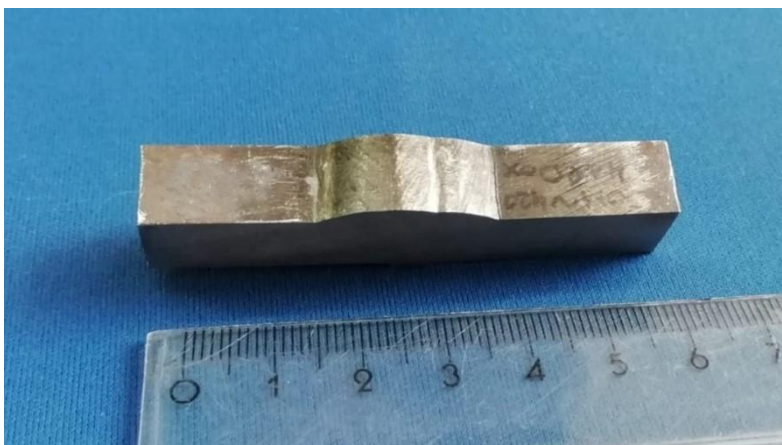
Slika 8.2 Izgled ispitnih uzoraka za ispitivanje savijanjem i za statičko vlačno ispitivanje

Za potrebe ispitivanja žilavosti izrezani su ispitni uzorci čiji su oblik i dimenzije prikazani na slici 8.3.



Slika 8.3 Oblik i dimenzije ispitnog uzorka za ispitivanje udarne žilavosti [23]

Za potrebe analize makrostrukture i mikrostrukture te za ispitivanje makrotvrdoće HV10 i mikrotvrdoće HV0,2 izrezan je ispitni uzorak prikazan na slici 8.4.



Slika 8.4 Ispitni uzorak za analizu strukture i ispitivanje tvrdoće

8.3. Provedena ispitivanja

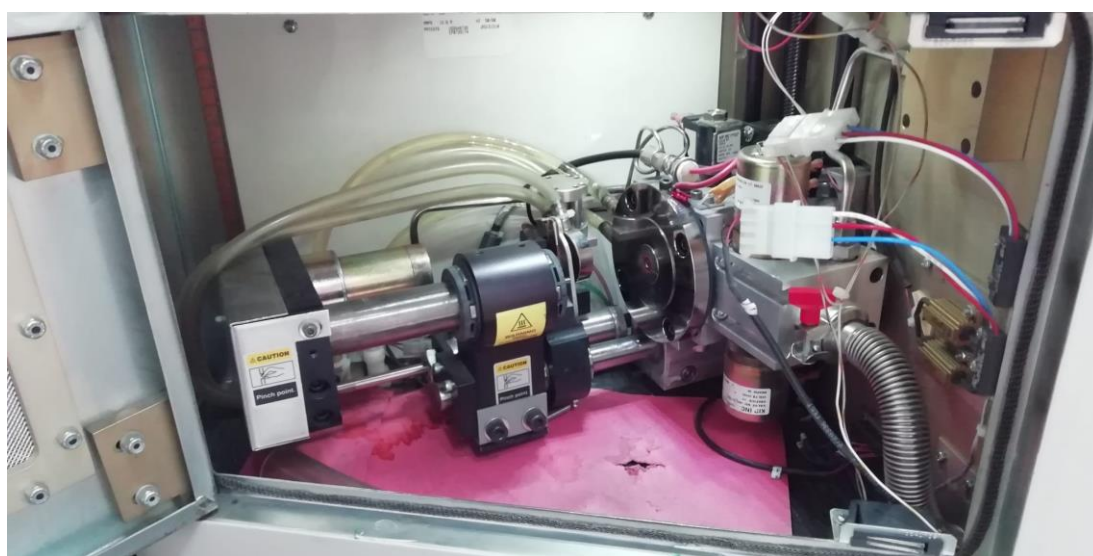
8.3.1. Analiza kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava provedena je na Zavodu za materijale u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje na spektrometru LECO GDS 850A. Uređaj radi na principu optičke emisijske spektroskopije s tinjajućim izbojem, a prikazan je na slici 8.5



Slika 8.5 Spektrometar LECO GDS 850A

Na slici 8.6 prikazana je komora spomenutog uređaja u koju se postavlja ispitni uzorak.



Slika 8.6 Komora spektrometra u koju se postavlja ispitni uzorak

8.3.2. Vizualno ispitivanje

Vizualno ispitivanje spada u metode kontrole bez razaranja i predstavlja prvi korak analize zavora. Ova metoda kontrole ne oduzima puno vremena i relativno je jeftina, a provodi se radi utvrđivanja kvalitete zavora odnosno otkrivanja mogućih grešaka i oštećenja u zavoru i oko njega. Korištena pomagala pri ovom ispitivanju su povećalo, baterijska lampa i Luxmetar UT381.

8.3.3. Analiza strukture

Kako bi rukovanje ispitnim uzorkom prilikom analize mikrostrukture bilo što pogodnije, potrebno je pripremiti kvalitetan metalografski uzorak. Najprije se iz zavarenog spoja izreže uzorak prikazan na slici 8.7 na kojem će se provesti makro i mikro ispitivanje. Za analizu mikrostrukture iz njega se izreže uzorak koji dimenzijama odgovara kalupu za zalijevanje. Rezanje je obavljeno pomoću rezalice Presi Mecatome T260 prikazane na slici 8.8.

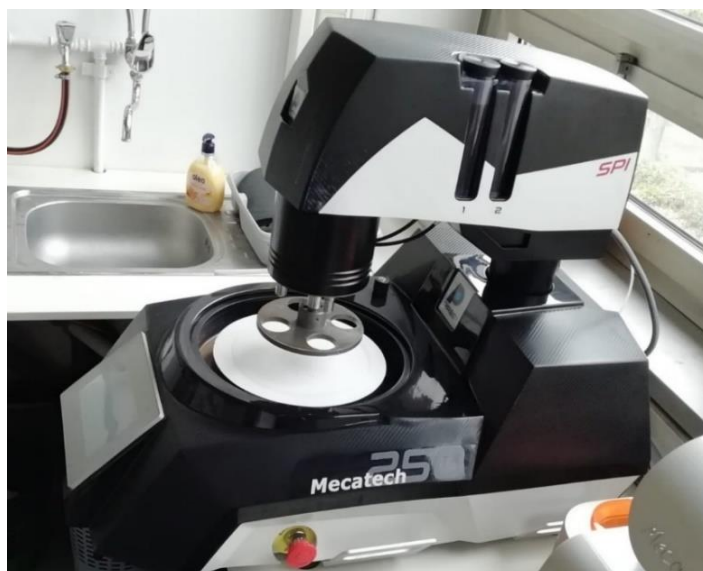


Slika 8.7 Uzorak za analizu makrostrukture



Slika 8.8 Rezalica Presi Mecatome T260

Izrezani ispitni uzorak postavlja se u kalup i potom zalijeva u polimernoj masi. Nakon skrućivanja polimerne mase metalografski uzorak se brusi i polira kako bi njegova površina bila dovoljno dobra za analizu mikrostrukture. Brušenje i poliranje obavljeno je pomoću uređaja Presi Mecatech 250, prikazanog na slici 8.9.



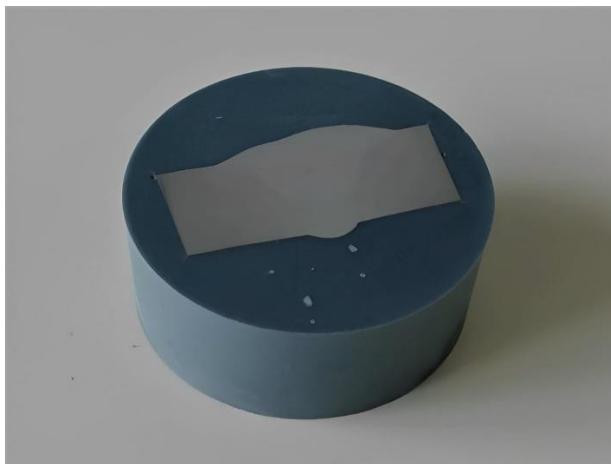
Slika 8.9 Uređaj za brušenje i poliranje Presi Mecatech 250

Nakon poliranja provedena je analiza mikrostrukture pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51, prikazanog na slici 8.10.



Slika 8.10 Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Mikrostruktura je promatrana pri povećanjima 50×, 100×, 200×, 500× i 1000× u poliranom i nagriženom stanju. Sredstvo za nagrizanje je 3 %-tna otopina dušične kiseline u etilnom alkoholu, poznata i pod nazivom 3 %-tni Nital. Na slici 8.11 prikazan je metalografski uzorak nakon nagrizanja na kojem se jasno može uočiti zavareni spoj.

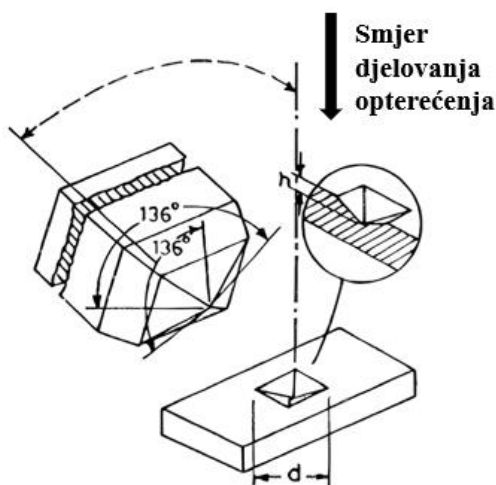


Slika 8.11 Metalografski uzorak nakon nagrizanja

8.3.4. Ispitivanje tvrdoće

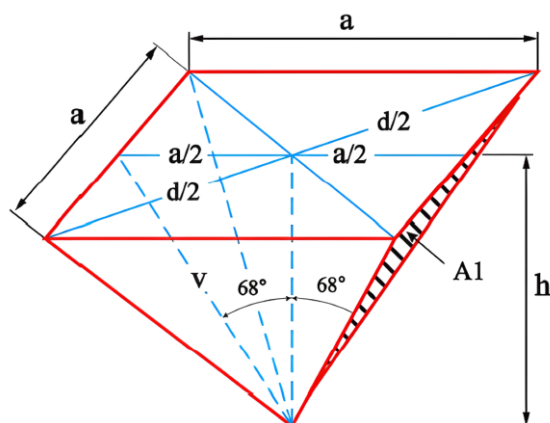
8.3.4.1. Ispitivanje makrotvrdoće HV10

Mjerenje tvrdoće HV10 provedeno je metodom prema Vickersu u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o. u Zagrebu. Metoda prema Vickersu podrazumijeva utiskivanje penetratora u obliku dijamantne piramide vršnog kuta od 136° s pravokutnom bazom u čistu površinu ispitnog uzorka. Iz površine otiska u materijalu odnosno sile opterećenja računa se tvrdoća. Na slici 8.12 shematski je prikazano ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom.



Slika 8.12 Ispitivanje tvrdoće Vickersovom metodom [23]

Izgled i geometrija otiska nakon rasterećenja kod ispitivanja tvrdoće Vickersovom metodom prikazani su na slici 8.13.



Slika 8.13 Izgled i geometrija otiska kod ispitivanja tvrdoće po Vickersu [23]

Izvod izraza za tvrdoću po Vickersu HV glasi [23]:

$$a = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$v = \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d}{2\sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ} \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{a \cdot v}{2} = \frac{\frac{d}{\sqrt{2}} \cdot \frac{d}{2\sqrt{2} \cdot \sin 68^\circ}}{2} = \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ} \quad (6)$$

Ukupna površina otiska iznosi:

$$A = 4 \cdot A_1 = 4 \cdot \frac{d^2}{8 \cdot \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \cdot \sin 68^\circ} \quad (7)$$

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{F \cdot 2 \cdot \sin 68^\circ}{d^2} = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (8)$$

S obzirom da silu unosimo u njutnima potrebno je prethodni izraz podijeliti sa 9,81 i konačno dobivamo:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (9)$$

gdje je:

d – srednja dijagonala otiska, mm

a – stranica baze piramide, mm

v – visina stranice piramide, mm

A_1 – površina stranice piramide, mm²

F – sila utiskivanja, N

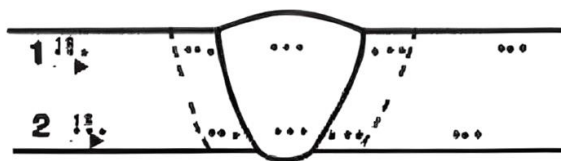
HV – tvrdoća po Vickersu

Mjerenje tvrdoće obavljeno je na uređaju za ispitivanje tvrdoće Karl Frank GmbH prikazanom na slici 8.14 pri čemu je sila utiskivanja iznosila 98,1 N (HV10).



Slika 8.14 Uređaj za mjerenje tvrdoće

Na ispitnom uzorku provedeno je ukupno 30 mjerenja tvrdoće. Mjerenjem su obuhvaćeni metal zavara (6 mjerenja), zona utjecaja topline (12 mjerenja) i osnovni materijal (12 mjerenja). Na slici 8.15 prikazane su pozicije za mjerenje tvrdoće na zavarenom spoju.



Slika 8.15 Skica zavarenog spoja i označena mjesta mjerenja tvrdoće HV10

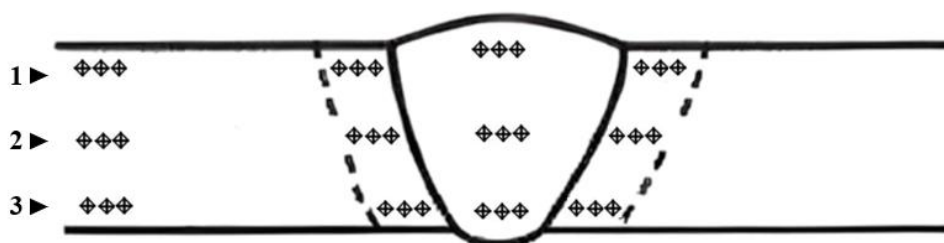
8.3.4.2. Ispitivanje mikrotvrdoće HV0,2

Mikrotvrdoća HV0,2 ispitana je u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje je provedeno metodom prema Vickersu na uređaju Instron, Wilson-Wolpert Tukon 2100B, koji je prikazan na slici 8.16.



Slika 8.16 Uređaj za mjerenje tvrdoće Instron Wilson-Wolpert Tukon 2100B

Sila utiskivanja iznosila je 1,962 N (HV0,2), a ukupno je provedeno 36 mjerenja. Mjesta mjerenja tvrdoće prikazana su na slici 8.17.



Slika 8.17 Skica zavarenog spoja i označena mjesta mjerenja tvrdoće HV0,2

8.3.5. Ispitivanje vlačne čvrstoće

Mjerenje vlačne čvrstoće provedeno je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o. Ispitivane su tri epruvete, od kojih su dvije izrezane iz zavarenog spoja čelika Hardox 450 dok je jedna epruveta izrezana iz osnovnog materijala. Ispitivanje je provedeno na univerzalnoj kidalici 30 TUZ 757 proizvođača Otto Wolpert Werke GmbH, prikazanoj na slici 8.18.



Slika 8.18 Univerzalna kidalica Otto Wolpert Werke GmbH 30 TUZ 757

Ispitnim uzorcima najprije je izračunata površina poprečnog presjeka, a potom se postavljaju i upinju u čeljusti kidalice kao što je prikazano na slici 8.19. Uzorak se potom rasteže sve do puknuća. Temperatura prilikom izvođenja ispitivanja iznosila je 19 °C. Na slici 8.20 prikazan je izgled ispitnih uzoraka nakon ispitivanja vlačne čvrstoće.



Slika 8.19 Ispitni uzorak postavljen u čeljust kidalice



Slika 8.20 Izgled ispitnih uzoraka nakon ispitivanja vlačne čvrstoće

8.3.6. Ispitivanje savijanja u tri točke

Ispitivanje savijanja u tri točke također je provedeno na spomenutoj univerzalnoj kidalici proizvođača Otto Wolpert Werke GmbH. Na slici 8.21 prikazan je prostor kidalice namijenjen za ispitivanje savijanjem i pritiskom na kojem su vidljivi oslonci i trn.



Slika 8.21 Prostor kidalice namijenjen za ispitivanje savijanjem i pritiskom

Razmak između dvaju oslonaca na koji se postavlja ispitni uzorak iznosio je 114 mm. Ispitni uzorak savija se pomoću trna promjera 78 mm. Kut savijanja iznosio je 180°, a temperatura prilikom izvođenja ispitivanja bila je 21 °C. Ovim ispitivanjem utvrđuje se kvaliteta zavora odnosno njegova otpornost uslijed savijanja. Ukoliko nakon savijanja na mjestu zavora ne postoje pukotine smatra se da je zavar prihvatljive kvalitete.

8.3.7. Ispitivanje žilavosti

Ispitivanje žilavosti odnosno otpornosti materijala na lom također je provedeno u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju d.o.o. Žilavost je ispitivana pomoću Charpy-evog bata Otto Wolpert-Werke PW 30/15, prikazanog na slici 8.22. Pri ispitivanju se epruveta lomi udarcem bata. Žilavost predstavlja energiju bata koja je utrošena za lom epruvete. Energija se mjeri iz razlika potencijalne energije bata prije i nakon loma. U ovom ispitivanju potencijalna energija Charpy-eva bata iznosila je 300 J, a ispitna temperatura $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 8.22 Charpy-ev bat

Na slici 8.23 prikazani su ispitni uzorci nakon provedenog ispitivanja žilavosti.



Slika 8.23 Ispitni uzorci nakon provedenog ispitivanja žilavosti

8.4. Rezultati ispitivanja

8.4.1. Rezultati analize kemijskog sastava

U tablici 8 prikazani su rezultati kvantitativne kemijske analize osnovnog materijala čelika Hardox 450.

Tablica 8. Rezultati kvantitativne kemijske analize

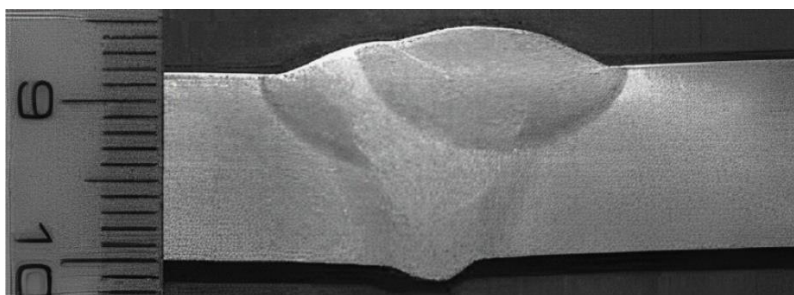
maseni udio, %										
*C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	B	Fe
0,17-0,25	0,165	1,05-1,11	<0,02	<0,001	0,40-0,42	0,021-0,035	0,07-0,09	<0,001	<0,002	ostatak

*srednja vrijednost: 0,20

8.4.2. Rezultati analize strukture

8.4.2.1. Analiza makrostrukture

Vizualnim pregledom nisu uočene nikakve greške niti nepravilnosti na zavarenom spoju. Nikakve greške nisu uočene ni na makro nagriženom uzorku prikazanom na slici 8.24. Površina uzorka nagrižena je u 5 %-tnom Nitalu, prema propisima norme ISO/TR 16060. Nakon nagrizanja na navedenom uzorku jasno se vide linija staljivanja i pojedinačni prolazi u zavaru.

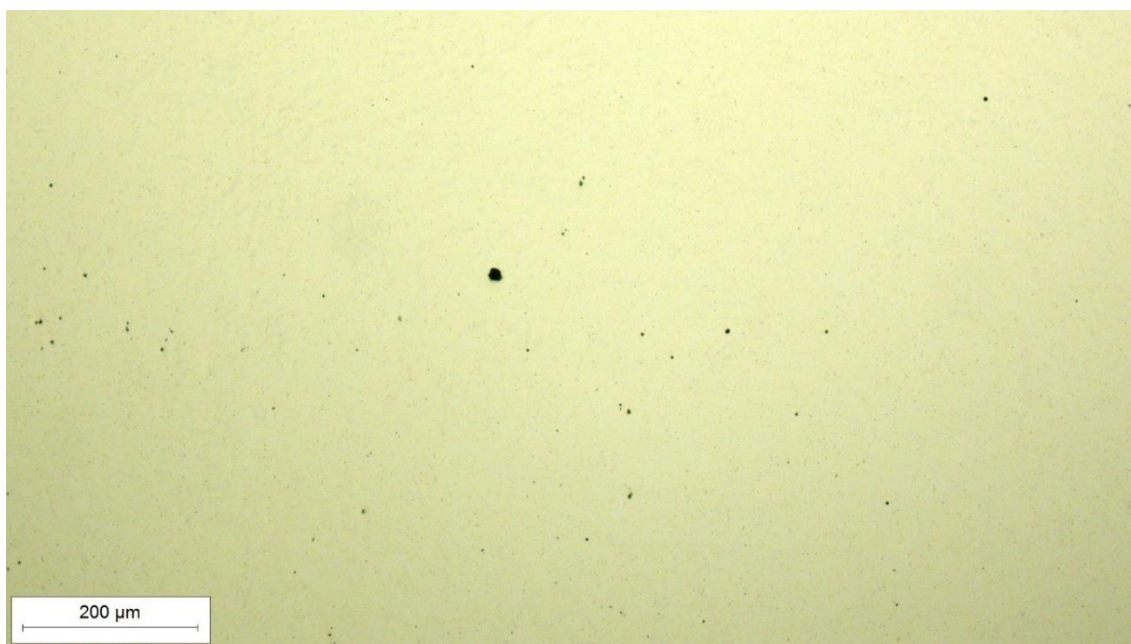


Slika 8.24 Makrostruktura zavarenog spoja

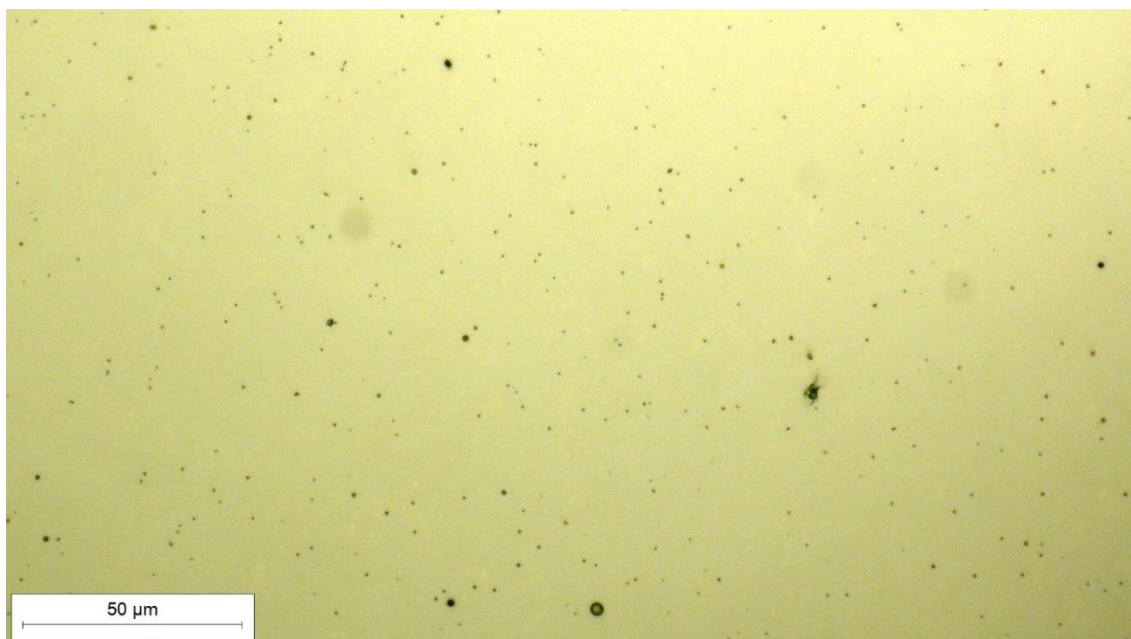
8.4.2.2. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u poliranom i nagriženom stanju, u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavora.

Na slikama 8.25 i 8.26 prikazana je površina metala zavora u poliranom stanju. Na cijelom području zavarenog spoja nisu uočene nikakve nepravilnosti.



Slika 8.25 Mikrostruktura metala zavora u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 100×

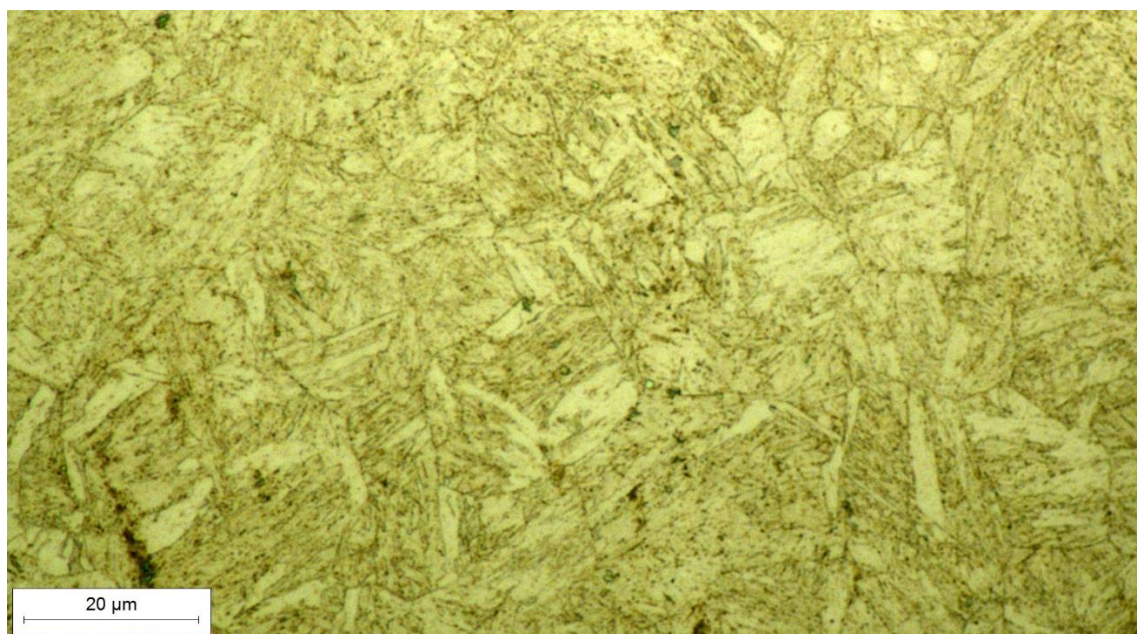


Slika 8.26 Mikrostruktura metala zavora u poliranom stanju, snimljena pri povećanju 500×

Na slikama 8.27 i 8.28 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala u nagriženom stanju. Mikrostruktura je martenzitna i relativno sitnozrnata. Prema srednjoj veličini promjera kristalnih zrna određena je veličina zrna G koja se kreće u rasponu od 8 do 10. Pri većem povećanju ($1000\times$) mogu se uočiti sitni precipitati karbida koji su se homogeno izlučili po cijeloj masi. Kako se radi o vrlo sitnim česticama, za detaljniju analizu udjela, veličine i vrste karbida, potrebno je provesti analizu na elektronskom mikroskopu.

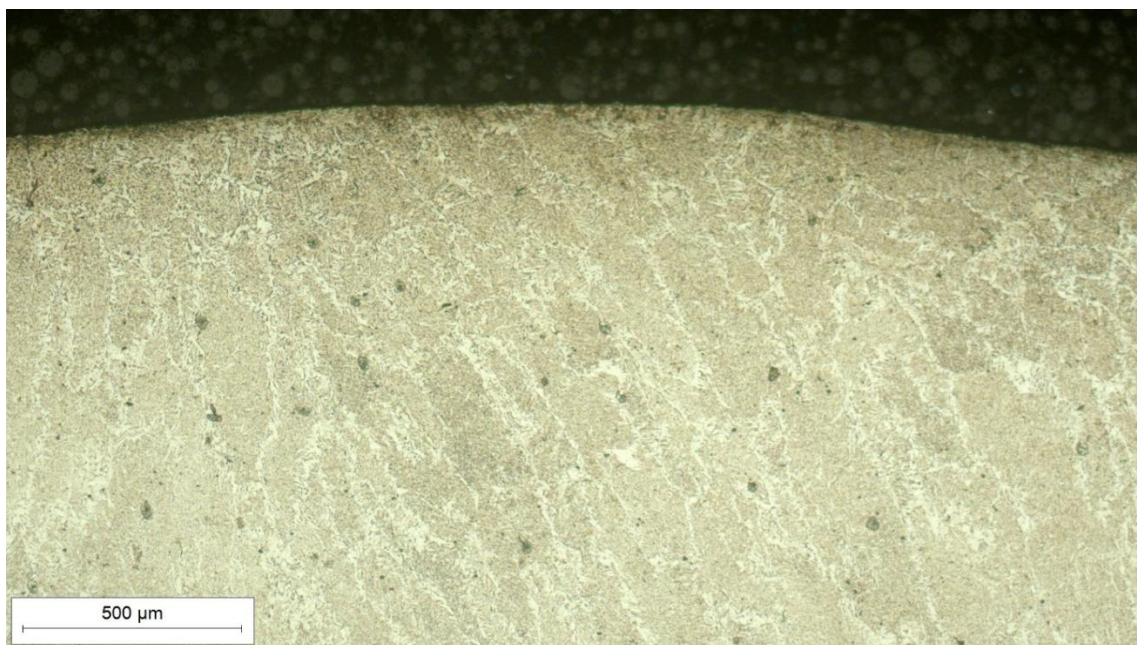


Slika 8.27 Mikrostruktura osnovnog materijala, snimljena pri povećanju $200\times$



Slika 8.28 Mikrostruktura osnovnog materijala, snimljena pri povećanju $1000\times$

Na slikama 8.29 i 8.30 prikazana je mikrostruktura metala zavara u tjemenu zavarenog spoja, u nagriženom stanju pri dva različita povećanja. Mikrostruktura je tipična ljevačka struktura, uobičajena za metal zavara, bez prisutnih nepravilnosti.

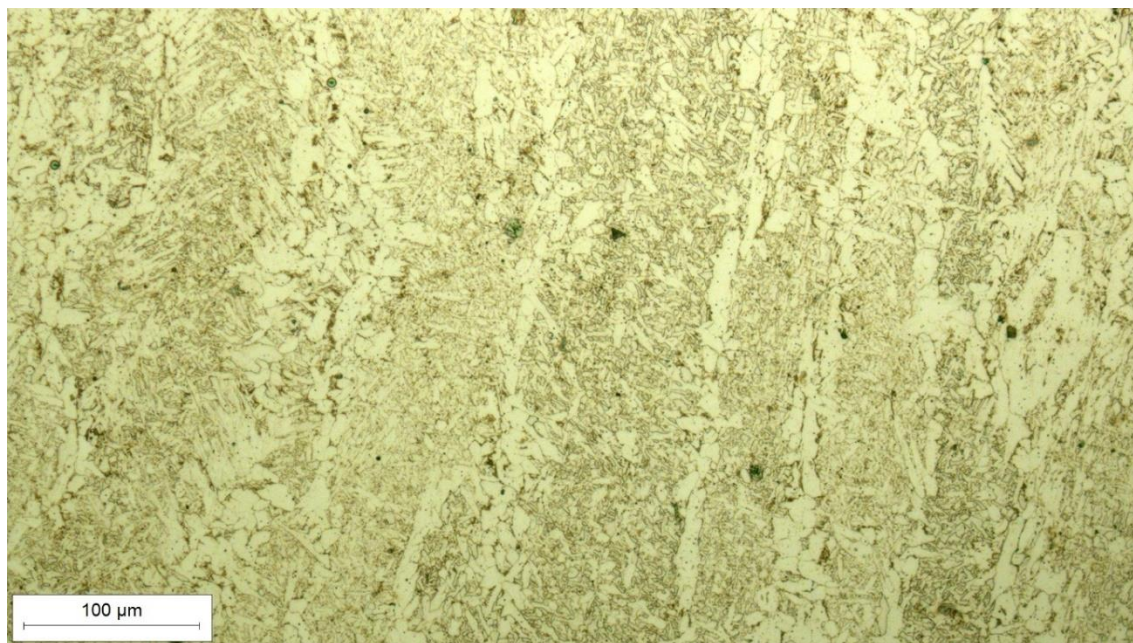


Slika 8.29 Mikrostruktura tjemena zavara, snimljena pri povećanju 50×

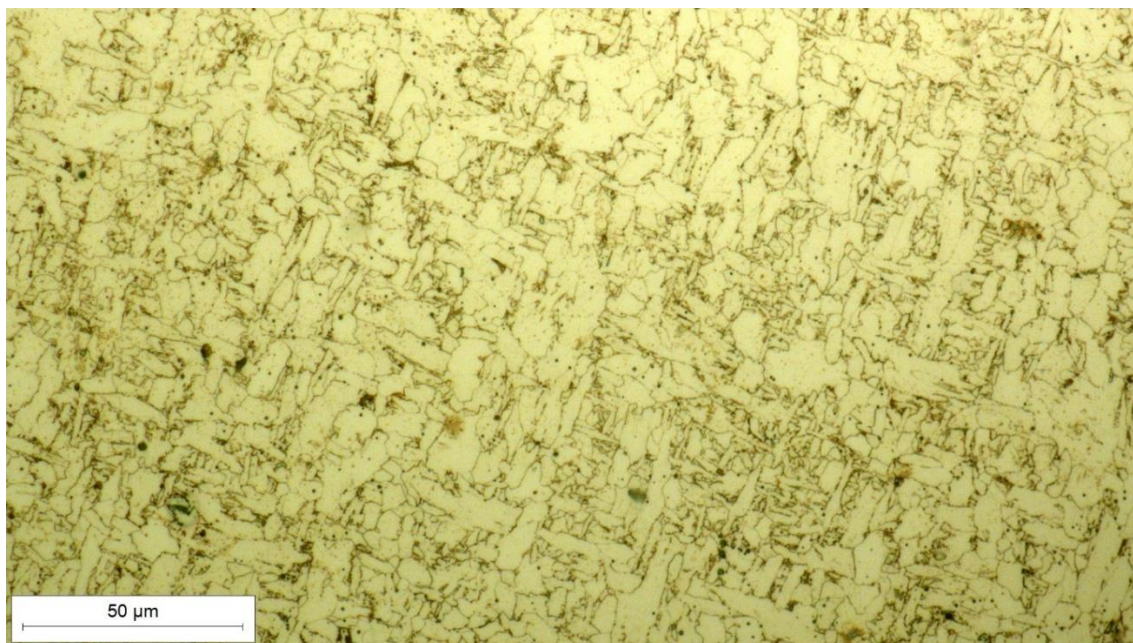


Slika 8.30 Mikrostruktura tjemena zavara, snimljena pri povećanju 100×

Na slikama 8.31 i 8.32 prikazana je mikrostruktura sredine metala zavora u nagriženom stanju. Ni ovdje nisu uočene nikakve nepravilnosti, mikrostruktura je slična mikrostrukтури u drugim dijelovima metala zavora.



Slika 8.31 Mikrostruktura sredine metala zavora, snimljena pri povećanju 200×

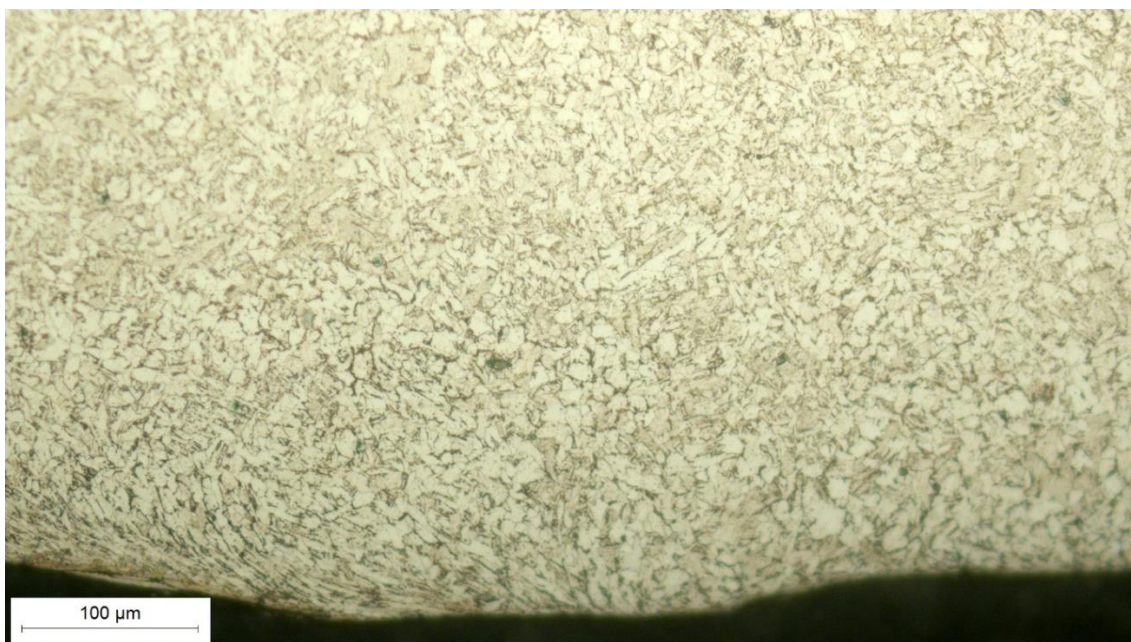


Slika 8.32 Mikrostruktura sredine metala zavora, snimljena pri povećanju 500×

Na slikama 8.33 i 8.34 prikazana je mikrostruktura u korijenu zavarenog spoja u nagriženom stanju. Mikrostruktura je sitnozrnatija i manje dendritna od mikrostrukture u sredini i tjemenu metala zavara. Nisu uočene nikakve mikrostrukturne nepravilnosti.

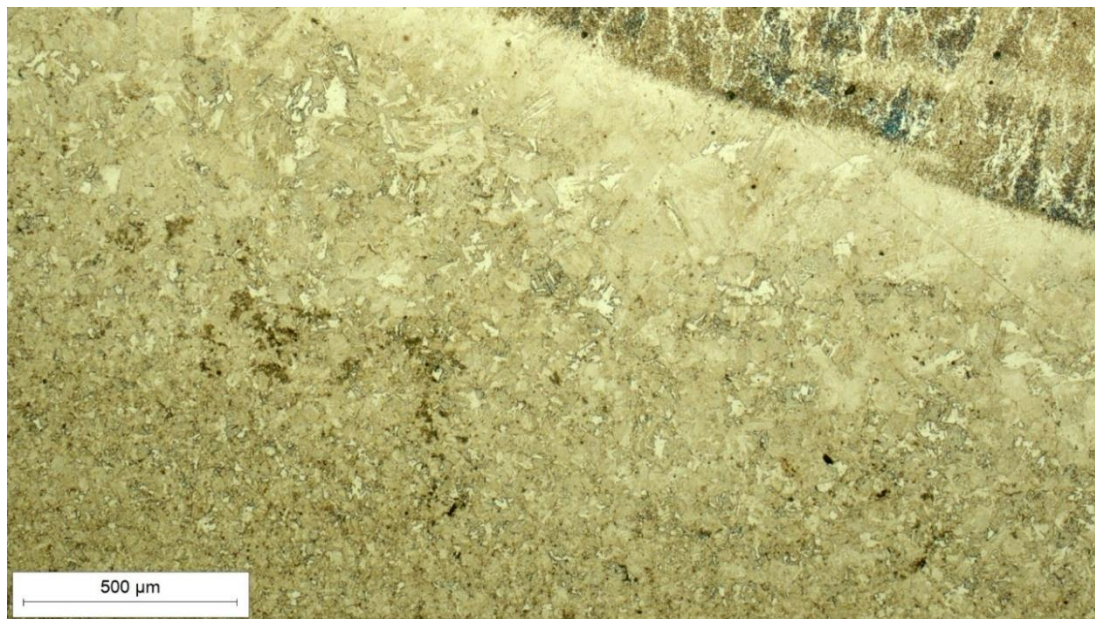


Slika 8.33 Mikrostruktura korijena zavara, snimljena pri povećanju 100×

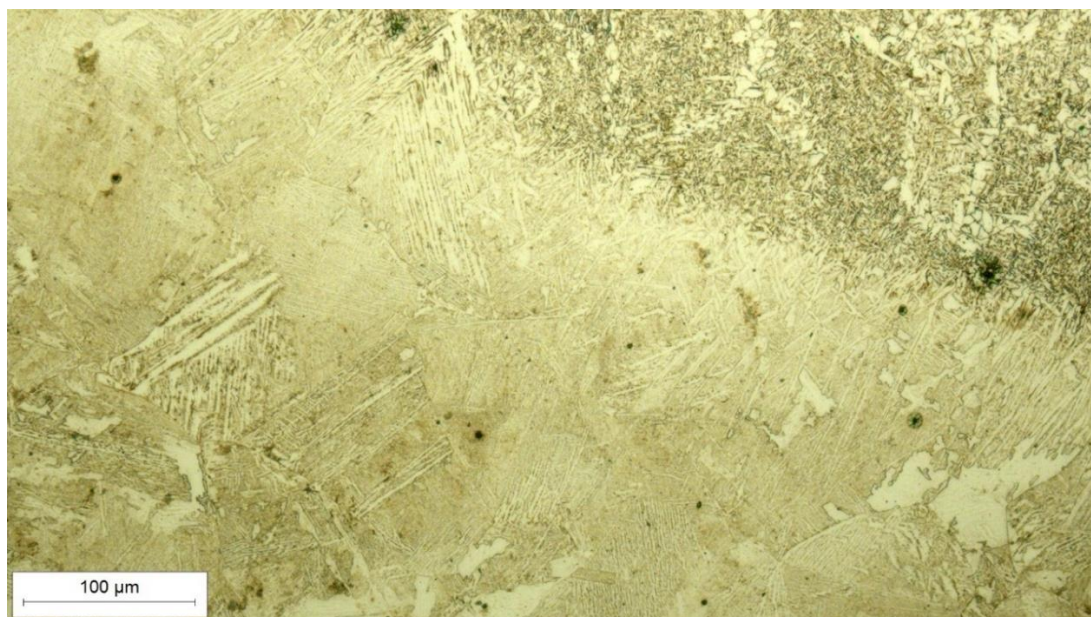


Slika 8.34 Mikrostruktura korijena zavara, snimljena pri povećanju 200×

Na slikama 8.35 i 8.36 prikazana je mikrostruktura zavarenog spoja čelika Hardoxa 450 u području zone utjecaja topline s lijeve strane tjemena zavara. Linija staljivanja jasno je izražena. U području visokotemperaturnog ZUT-a, zbog velikog unosa topline pri zavarivanju narušena je martenzitna mikrostruktura osnovnog materijala, a došlo je i do porasta zrna. S obzirom na udio ugljika i nagrizanje u 3 %-tnom Nitalu, krupna svijetla zrna u području ZUT-a predstavljaju feritnu fazu.

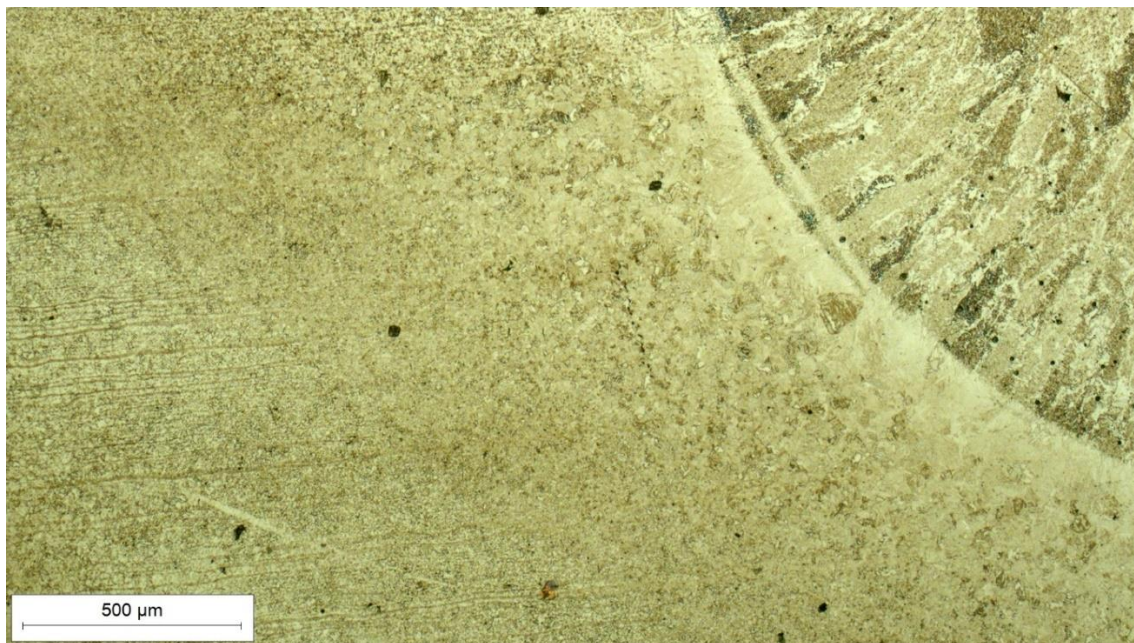


Slika 8.35 Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane tjemena zavara, snimljena pri povećanju 50×



Slika 8.36 Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane tjemena zavara, snimljena pri povećanju 200×

Na slikama 8.37 i 8.38 prikazana je mikrostruktura zavarenog spoja u području zone utjecaja topline s lijeve strane u sredini zavora. I ovdje je linija staljivanja jasno izražena, a u području zone utjecaja topline očit je porast kristalnih zrna, osobito bliže liniji staljivanja.

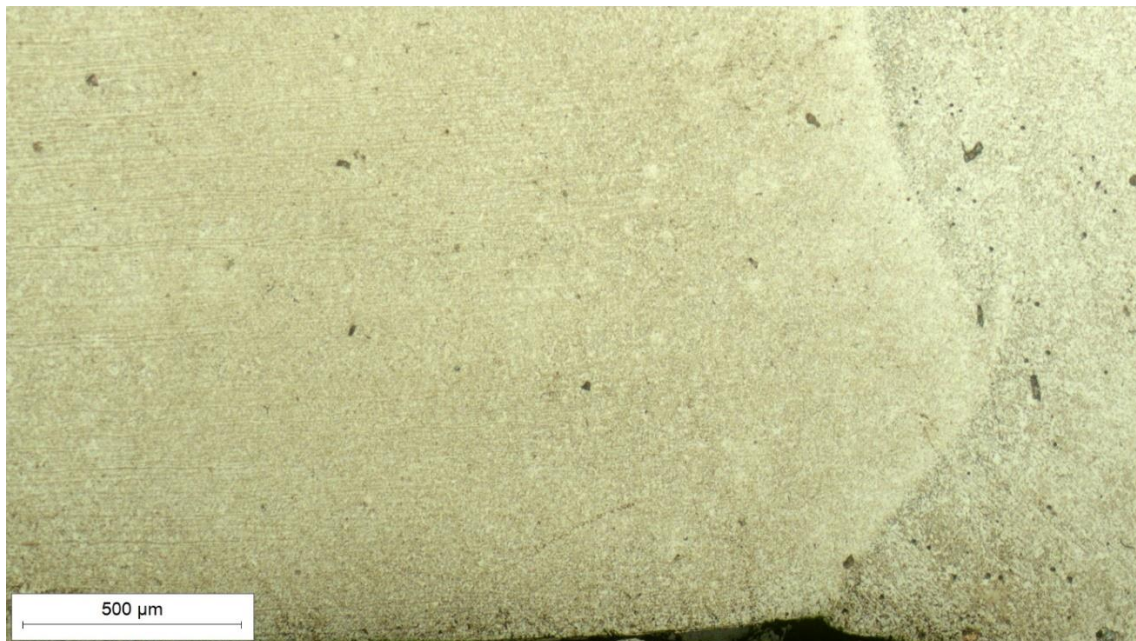


Slika 8.37 Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane sredine metala zavora, snimljena pri povećanju 50×



Slika 8.38 Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane sredine metala zavora, snimljena pri povećanju 200×

Na slikama 8.39 i 8.40 prikazana je mikrostruktura zavarenog spoja čelika u području zone utjecaja topline s lijeve strane korijena zavora. Jasno je izražena linija staljivanja, a u odnosu na sredinu i tjeme zavora, zona utjecaja topline znatno je uža i porast zrna je puno manji.



Slika 8.39 Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane korijena zavora, snimljena pri povećanju 50×



Slika 8.40 Mikrostruktura ZUT-a s lijeve strane korijena zavora, snimljena pri povećanju 200×

8.4.3. Rezultati mjerenja tvrdoće

8.4.3.1. Rezultati mjerenja makrotvrdoće HV10

Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 osnovnog materijala, zone utjecaja topline i zavara prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10

Položaj otiska	osnovni materijal (lijevo)	ZUT (lijevo)	metal zavara	ZUT (desno)	osnovni materijal (desno)
1. niz	403	277	187	273	376
	413	283	198	274	392
	409	274	193	262	378
	$\bar{x}$	408	193	270	382
2. niz	383	199	190	193	343
	387	196	189	196	350
	383	193	187	206	350
	$\bar{x}$	384	189	198	348

8.4.3.2. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2

Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2 osnovnog materijala, zone utjecaja topline i zavara u područjima uz lice zavara, sredinu i uz korijen zavara prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Položaj otiska	osnovni materijal	ZUT (lijevo)	metal zavara	ZUT (desno)
1. niz	432	253	219	289
	419	334	221	321
	419	325	212	289
	$\bar{x}$	423	217	300
2. niz	438	224	185	231
	438	219	191	217
	419	207	207	212
	$\bar{x}$	432	194	220
3. niz	452	221	203	210
	432	217	212	224
	401	217	205	224
	$\bar{x}$	428	207	219

8.4.4. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

U tablici 11 prikazani rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće za zavareni spoj (eprovete Z1 i Z2) i za osnovni materijal (eproveta OM).

Tablica 11. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće

Oznaka epruvete	Dimenzije epruvete		Maksimalna sila N	Vlačna čvrstoća N/mm ²	Ispitna temperatura °C
	Presjek mm × mm	Površina presjeka mm ²			
Z1	24,54 × 11,87	291,29	194600	668	19
Z2	24,57 × 11,82	290,42	188800	650	
OM	9,82 × 11,95	117,35	172160	1467	

8.4.5. Rezultati savojnog ispitivanja

Na ispitnim uzorcima u blizini zavara odnosno na mjestu savijanja nisu vidljive pukotine. Izgled ispitnih uzoraka nakon savijanja pod kutom od 180° prikazan je na slici 8.41.



Slika 8.41 Izgled ispitnih uzoraka nakon savijanja

8.4.6. Rezultati ispitivanja žilavosti

Tablica 12 prikazuje rezultate ispitivanja žilavosti za ispitne uzorke uzete iz sredine metala zavara i iz sredine zone utjecaja topline.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja žilavosti

Broj uzorka	Pozicija uzorka	Udarni rad loma, J		Temperatura ispitivanja, °C
			$\bar{x}$	
1	metal zavara	128	110	-20
2		97		
3		106		
4	ZUT	190	176	
5		174		
6		163		

8.5. Osvrt na rezultate ispitivanja

8.5.1. Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Srednja vrijednost sadržaja ugljika iznosi 0,198 % što ukazuje na to da je Hardox 450 niskougljični čelik. Udjeli ostalih elemenata, osobito legiranih elemenata karbidotvoraca (Cr, Mo, B) također odgovaraju udjelima navedenim od strane proizvođača. Udjeli sumpora i fosfora koji predstavljaju nečistoće vrlo su niski i nalaze se unutar dopuštenih količina.

8.5.2. Osvrt na rezultate analize mikrostrukture

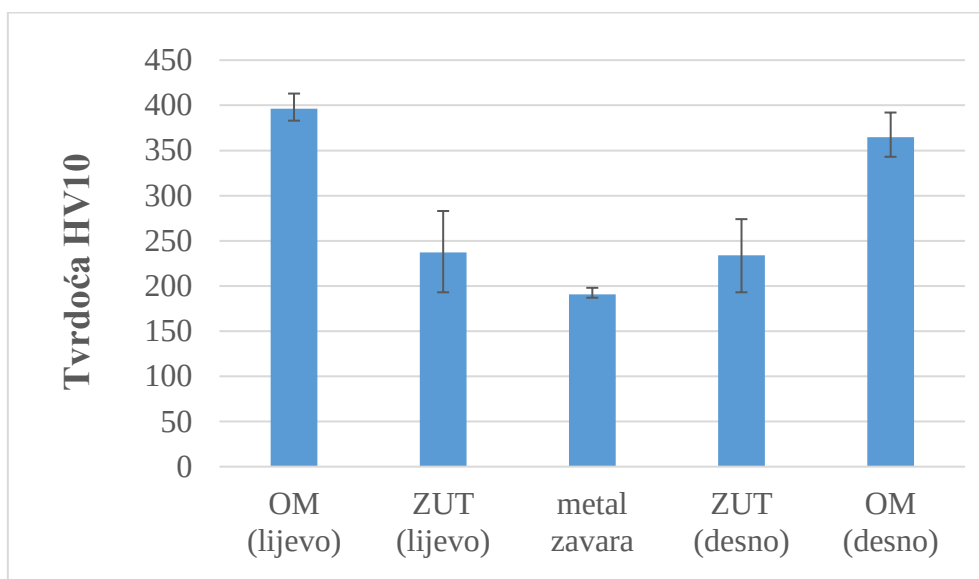
Analizom mikrostrukture u poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti u strukturi zavarenog spoja. U nagriženom stanju vidljiva je relativno sitnozrnata martenzitna mikrostruktura osnovnog materijala ($G = 8-10$). Zona utjecaja topline, metal zavara i osnovni materijal jasno se razlikuju. Linija staljivanja je jasno izražena i dijeli gnječenu strukturu osnovnog materijala od metala zavara koji ima tipičnu ljevačku mikrostrukturu. U zoni utjecaja topline uočen je porast zrna osobito u tjemenu i sredini zavara. Zbog velikog unosa topline nestala je martenzitna mikrostruktura u visokotemperaturnom ZUT-u, a formirala su se krupna feritna zrna.

8.5.3. Osvrt na rezultate ispitivanja tvrdoće

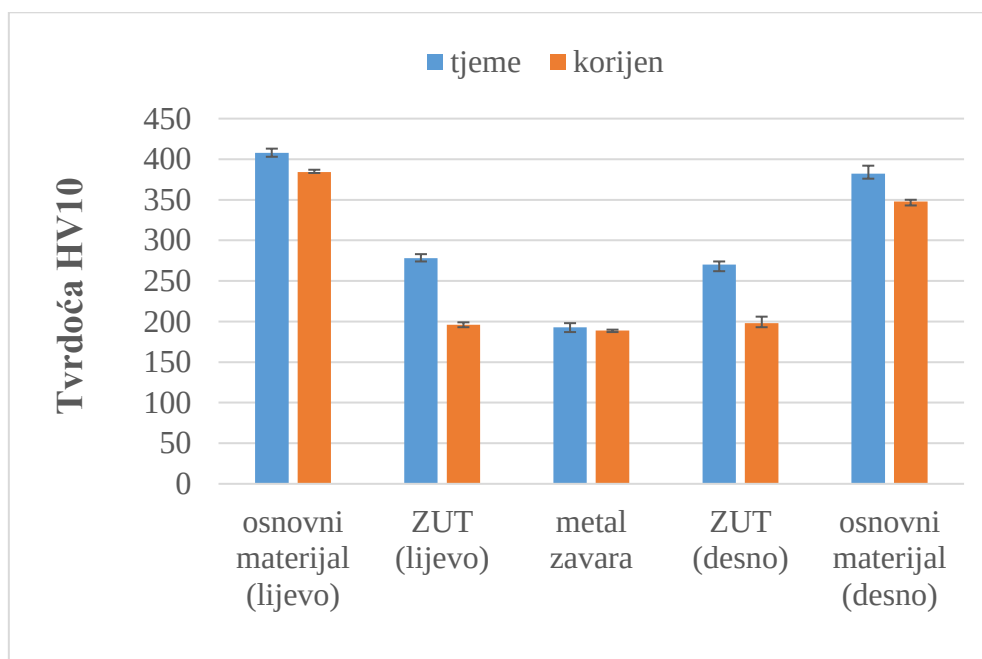
Analiza rezultata dobivenih pri mjerenju makrotvrdoće HV10 pokazala je da najmanju tvrdoću ima metal zavara (191 HV10), nešto veće vrijednosti izmjerene su u zoni utjecaja topline (oko 236 HV10) dok najveću tvrdoću ima osnovni materijal (između 364 HV10 i 396 HV10). Na slici 8.42 prikazane su srednje vrijednosti tvrdoće HV10 u navedenim područjima. Također je primjetno da su vrijednosti tvrdoće veće uz tjeme nego u korijenu zavara. Najveća razlika prisutna je u zoni utjecaja topline, a najmanje razlike u tvrdoći između tjemena i korijena prisutne su u metalu zavara slika 8.43.

Na slikama 8.44 i 8.45 prikazane su srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara. Najviše vrijednosti izmjerene su u osnovnom materijalu, a najniže u metalu zavara. U osnovnom materijalu nema velike razlike u mikrotvrdoći na rubovima i u sredini ploče. U zoni utjecaja topline najviša mikrotvrdoća izmjerena je u tjemenu zavara, a sredina i korijen zavara imaju podjednaku mikrotvrdoću. U metalu zavara nema velike razlike u mikrotvrdoći između tjemena, sredine i korijena zavara.

U svim područjima zavarenog spoja vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 više su od vrijednosti tvrdoće HV10.



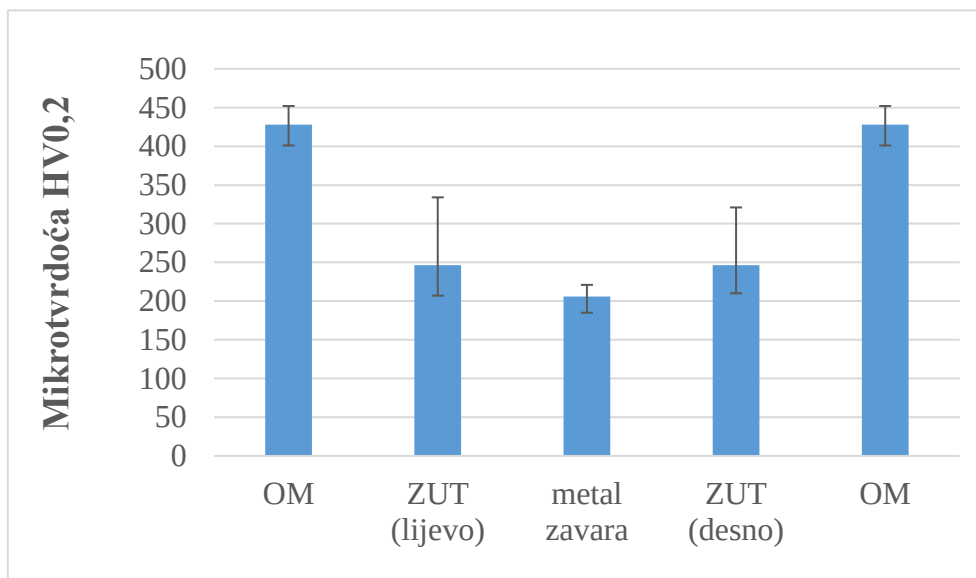
Slika 8.42 Srednje vrijednosti tvrdće HV10 za različita područja zavarenog spoja



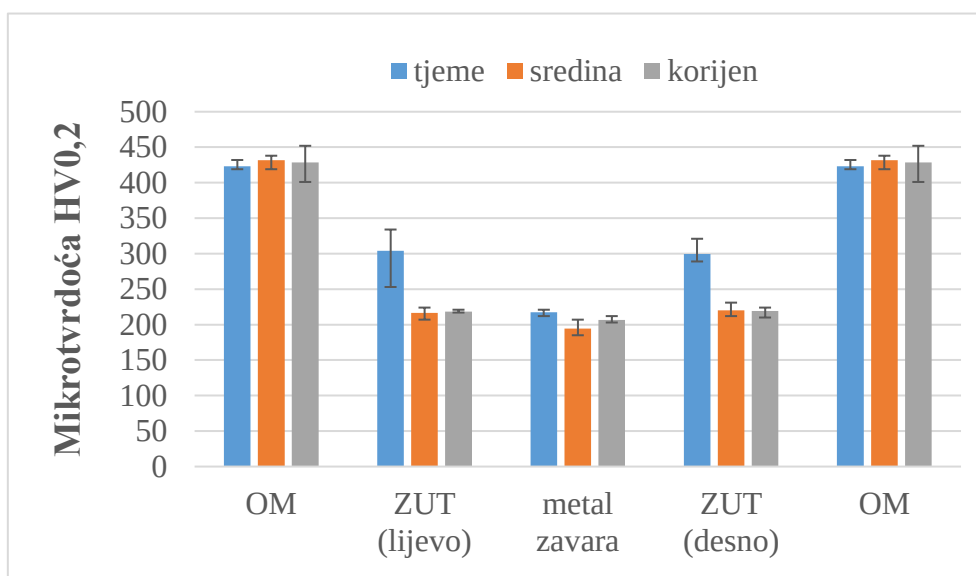
Slika 8.43 Srednje vrijednosti tvrdće HV10 u tjemenu i korijenu zavarenog spoja

S obzirom na mikrostrukturne promjene nastale tijekom zavarivanja dobiveni rezultati pri mjerenju tvrdće HV10 i HV0,2 su očekivani. Osnovni materijal sadrži oko 0,2 % ugljika, isporučen je u kaljenom stanju i ima martenzitnu mikrostrukturu. Prema Burnsovom dijagramu očekivana tvrdća čelika s navedenom količinom ugljika nakon kaljenja iznosi oko 400 HV što se podudara s dobivenim rezultatima. Zbog velikom unosa topline pri zavarivanju narušena je polazna mikrostruktura što je utjecalo na smanjenje tvrdće u zoni utjecaja topline. Maseni udio

ugljika u dodatnom materijalu iznosio je oko 0,1 % pa je njegova tvrdoća, unatoč ljevačkom dendritnom tipu mikrostrukture znatno niža od tvrdoće u drugim područjima.



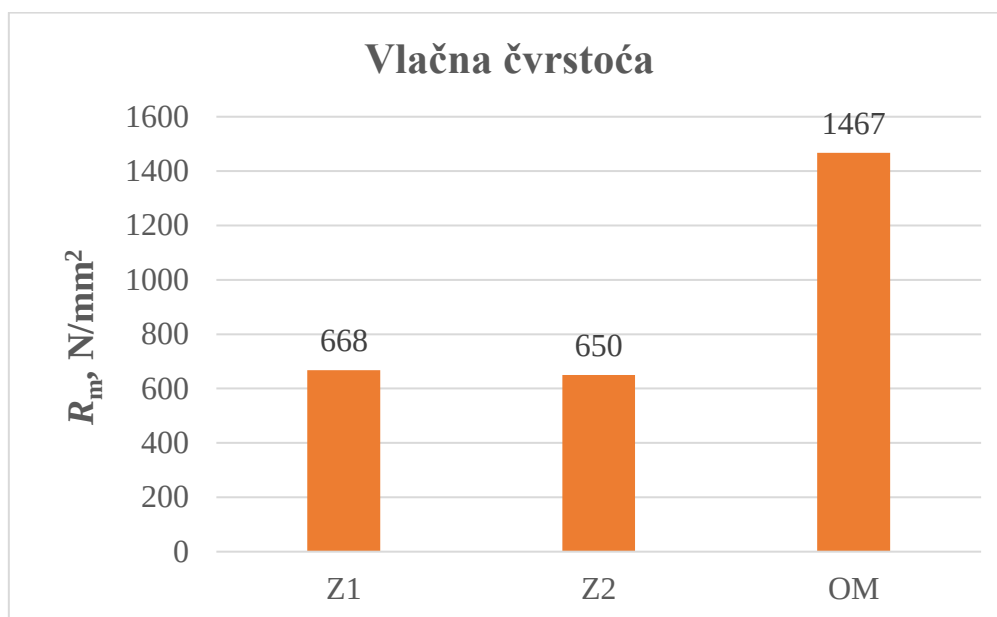
Slika 8.44 Srednje vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 za različita područja zavarenog spoja



Slika 8.45 Srednje vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u tjemenu, sredini i korijenu zavarenog spoja

8.5.4. Osvrt na rezultate ispitivanja vlačne čvrstoće

Na slici 8.46 prikazane su vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene pri ispitivanju epruvete izrezane iz osnovnog materijala i iz zavarenog spoja. Osnovni materijal ima znatno višu vrijednost vlačne čvrstoće. Obje ispitne epruvete uzete iz zavarenog spoja imaju podjednake vrijednosti vlačne čvrstoće.



Slika 8.46 Usporedba rezultata vlačne čvrstoće zavarenog spoja i osnovnog materijala

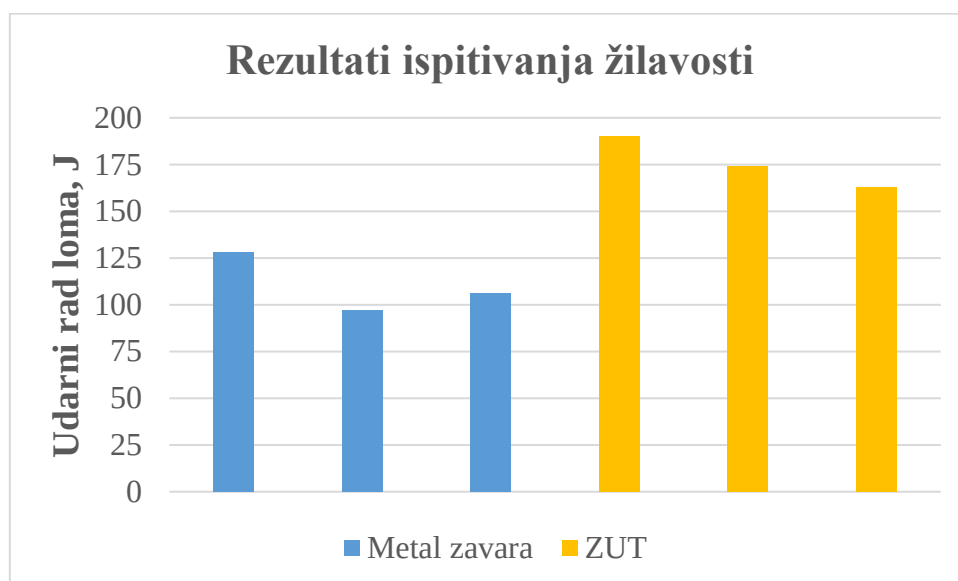
Vlačna čvrstoća zavarenog spoja predstavlja 45 % vrijednosti vlačne čvrstoće osnovnog materijala.

8.5.5. Osvrt na rezultate savojnog ispitivanja

Pri bočnom savojnom ispitivanju za kut od 180°, na ispitnim epruvetama nisu se pojavile pukotine što znači da je zavar prihvatljiv.

8.5.6. Osvrt na rezultate ispitivanja žilavosti

Analiza rezultata ispitivanja žilavosti pokazuje da zona utjecaja topline ima veću žilavost od metala zavora, slika 8.47. Rasipanja rezultata su relativno velika za obadva ispitivana područja.



Slika 8.47 Usporedba rezultata ispitivanja žilavosti

9. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja, analize i usporedbe rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Analizirani čelik Hardox 450 sadrži oko 0,2 % ugljika i pripada skupini niskougljičnih čelika. Udjeli nečistoća su unutar dozvoljenih vrijednosti, a udjeli ostalih elemenata, osobito jakih karbidotvoraca, odgovaraju podacima navedenim od strane proizvođača.
- Mikrostruktura osnovnog materijala je martenzitna i relativno sitnozrnata uz homogeno izlučene sitne precipitate karbida. Metal zavara ima tipičnu dentritnu ljevačku mikrostrukturu. Linija staljivanja jasno je izražena. U zoni utjecaja topline došlo je do narušavanja martenzitne mikrostrukture i do formiranja krupnih feritnih zrna.
- Zbog nastalih mikrostrukturnih promjena došlo je do promjene tvrdoće u zavarenom spoju. U odnosu na osnovni materijal čija je tvrdoća oko 430 HV_{0,2}, tvrdoća u zoni utjecaja topline je niža i iznosi oko 250 HV_{0,2}. Tvrdoća u metalu zavara je najniža i iznosi oko 206 HV_{0,2}. Vrijednosti mikrotvrdoće HV_{0,2} više su od vrijednosti tvrdoće HV₁₀ u svim područjima zavarenog spoja. Uočena je razlika u tvrdoći između tjemena, sredine i korijena zavara. U pravilu, više vrijednosti tvrdoće HV_{0,2} i HV₁₀ izmjerene su u tjemenu.
- Vlačna čvrstoća epruveta iz zavarenog spoja znatno je niža u odnosu na čvrstoću osnovnog materijala. Kod ispitivanja vlačne čvrstoće epruveta iz zavarenog spoja do loma je došlo u području metala zavara.
- Pri savojnom bočnom ispitivanju nisu se pojavile nikakve pukotine pri kutu savijanja od 180°.
- Kod ispitivanja udarnog rada loma veća žilavost izmjerena je u zoni utjecaja topline nego u metalu zavara, a za obadva područja rasipanje rezultata je relativno veliko.

LITERATURA

- [1] Basu B. Friction and Wear Behavior. 2017. doi: 10.1007/978-981-10-3059-8_7
- [2] Bensaid K, Dhiflaoui H, Bouzaïene H, Yahyaoui H, Nabil &, Fredj B. Effects of the cooling mode on the integrity and the multi-pass micro-scratching wear resistance of Hardox 500 ground surfaces. 2021. doi: 10.1007/s00170-021-06719-x
- [3] Jinaga R, Kolekar S, Jagadeesha T. Tribology of Intelligent Magnetorheological Materials. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-47451-5_7
- [4] Grilec K, Jakovljević S. Tribologija - autorizirana predavanja. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [5] Ratia V. Behavior of Martensitic Wear Resistant Steels in Abrasion and Impact Wear Testing Conditions. Sv. 1, Festia Building, Auditorium Pieni Sali. 2015.
- [6] Hardox 450 - The most popular structural wear plate - SSAB [Internet]. (pristupljeno: 1.11.2022.). Dostupno na: <https://www.ssab.com/en/products/brands/hardox/products/hardox-450?accordion=downloads>
- [7] Raex® 450 - Raex [Internet]. (pristupljeno: 1.11.2022.). Dostupno na: <https://www.raexsteel.com/en/product-portfolio/raex-450>
- [8] Xar 450 [Internet]. (pristupljeno: 1.11.2022.). Dostupno na: <https://www.thyssenkrupp-materials.fr/en/products/carbon-flat-steels/plate-and-slab-carbon-steels/wear-and-shocks-resistant-steels/wear-resistant-steel>
- [9] Brinar 450 [Internet]. (pristupljeno: 1.11.2022.). Dostupno na: <https://www.ilsenburger-grobblech.de/de/portfolio/produktmarken/brinarsupsup.html>
- [10] DILLIDUR 450 [Internet]. (pristupljeno: 1.11.2022.). Dostupno na: <https://www.dillinger.de/d/en/products/proprietary-steels/dillidur/>
- [11] Ren X, Zhu J. The effect of substitutional alloying elements on the impact wear rate of medium carbon steels related to delamination and quasi-nanometer wear mechanisms. Materials Science and Engineering A. 2011; 528(22–23):7020–3. doi: 10.1016/j.msea.2011.05.082
- [12] Xar 450 datasheet [Internet]. (pristupljeno: 1.11.2022.). Dostupno na: <https://www.flinkenberg.fi/wp-content/uploads/DATASHEET-XAR450.pdf>
- [13] Wang Z, Wu X, Liu D, Zuo X. Correlation Between Microstructure and Fracture Behavior in Thick HARDOX 450 Wear-Resistant Steel With TiN Inclusions. Front Mater. 2021; 8. doi: 10.3389/fmats.2021.691551
- [14] Konat Ł, Zemlik M, Jasiński R, Grygier D. Austenite grain growth analysis in a welded joint of high-strength martensitic abrasion-resistant steel hardox 450. Materials. 2021; 14(11). doi: 10.3390/ma14112850
- [15] Konat, Jasiński R, Białobrzaska B, Szczepański. Analysis of the static and dynamic properties of wear-resistant Hardox 600 steel in the context of its application in working elements. Materials Science- Poland. 202; 39(1):86–102. doi: 10.2478/msp-2021-0007
- [16] What is the difference between an excavator and a backhoe? [Internet]. (pristupljeno: 7.9.2022.). Dostupno na: <https://www.topmarkfunding.com/what-is-the-difference-between-an-excavator-and-a-backhoe/>
- [17] Hardox on site - Underground mine [Internet]. (pristupljeno: 14.10.2022.). Dostupno na: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/hardox/032-en-hardox-on-site-underground-mine.pdf?m=20150923130720>

- [18] Hardox on site - Recycling [Internet]. (pristupljeno: 15.10.2022.). Dostupno na: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/hardox/119-en-hardox-on-site-recycling.pdf?m=20150923130720>
- [19] Dump Truck Course - OnPoint TRAC | Training, Rail, Arboriculture, Construction [Internet]. (pristupljeno: 15.10.2022.). Dostupno na: <https://onpointtrac.co.uk/dump-truck-course/>
- [20] Hardox on site - Cement [Internet]. (pristupljeno: 16.10.2022). Dostupno na: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/hardox/hardox-on-site-cement.pdf?m=20160811120043>
- [21] Welding of Hardox [Internet]. (pristupljeno: 20.10.2022). Dostupno na: <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/hardox/welding-guide-for-welding-hardox-wear-plate-103en-v2-2020.pdf?m=20210113073630>
- [22] Tomić T. Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80 [Internet]. 2012. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:759053>
- [23] Materijali I - CROSBİ [Internet]. (pristupljeno: 21.10.2022). Dostupno na: <https://www.bib.irb.hr/665498>