

Optimizacija tehnologije MAG-zavarivanja čelika Toolox 33

Grgurev Rumbak, Matej

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:235:882901>

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

Matej Grgurev Rumbak

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Matej Grgurev Rumbak

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svim djelatnicima Katedre za zavarene konstrukcije, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na predanom znanju togom studija te pomoći i strpljenju pri izradi Diplomskog rada, a pogotovo prof. dr. sc. Ivici Garašiću i višim asistentima mag. ing. Ivanu Juriću i dr. sc. Maji Jurici te laborantu Daliboru Denkoviću.

Najviše zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima, a pogotovo roditeljima Sanji i Petru te baki Jelki i dedi Štefu na pruženoj podršci u svim oblicima tijekom života i školovanja.

Matej Grgurev Rumbak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATEJ GRGUREV RUMBAK** Mat. br.: 0035212989

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija tehnologije MAG-zavarivanja čelika Toolox 33**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of MAG welding technology on Toolox 33 steel**

Opis zadatka:

U teorijskom djelu proučiti svojstva čelika Toolox 33 te posebno analizirati primjenu, zavarljivost i specifičnosti tehnologije zavarivanja. Dati pregled izračuna temperatura predgrijavanja i zahtjeva prema HRN EN ISO 13916 te obraditi problematiku pojave zone utjecaja topline kod toplinskog rezanja. Analizirati utjecaj trokomponentnih mješavina Ar/CO₂/O₂ na geometriju i svojstva zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu odabrati odgovarajuću debljinu čelika Toolox 33 te osmisliti plan pokusa kojim se može dokazati utjecaj temperature predgrijavanja, unosa topline i vrste zaštitnog plina na geometriju i svojstva spoja. Na uzorcima provesti odgovarajuća ispitivanja sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO 15614-1. Zaključno, odrediti primjenjivost trokomponentnih mješavina za MAG-zavarivanje čelika Toolox 33 te dati smjernice za način izračuna i provjere temperature predgrijavanja u realnim uvjetima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
20. siječnja 2022.

Rok predaje rada:
24. ožujka 2022.

Predvideni datum obrane:
28. ožujka do 1. travnja 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Iвица Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. TOOLOX.....	2
2.1. Toolox 33	2
2.2. Primjena Toolox čelika	4
2.3. Proizvodnja Toolox čelika	6
2.4. Zavarljivost	7
2.4.1. Priprema spoja	7
2.4.2. Oblik spoja	7
2.4.3. Redoslijed zavarivanja	8
2.4.4. Dodatni materijal	9
2.4.4.1. Nehrdajući dodatni materijal.....	9
2.4.4.2. Nelegirani i niskolegirani dodatni materijal	9
2.4.5. Zaštitni plin	10
2.4.6. Unos topline	11
2.4.7. Hladne pukotine	12
2.4.8. Temperatura predgrijavanja	14
2.4.9. Naknadna toplinska obrada (PWHT).....	17
2.4.10. Toolox prajmer.....	18
2.5. Toplinsko rezanje	18
2.5.1. Predgrijavanje	19
2.5.2. Naknadna toplinska obrada.....	20
2.5.3. Procjena procedure rezanja	20
2.5.4. Strojna obrada nakon plinskog rezanja	20
2.5.5. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom.....	20
3. MAG ZAVARIVANJE	21
3.1. Zaštitni plin	22
3.1.1. Trokomponentne plinske mješavine	24
3.2. MAG impulsno zavarivanje	25
4. EKSPERIMENTALNI RAD.....	26
4.1. Opis eksperimenta.....	26
4.1.1. Osnovni materijal.....	26
4.1.2. Dodatni materijal	27
4.1.3. Oprema za zavarivanje.....	28
4.1.3.1. Uređaj za MAG impulsno zavarivanje	28
4.1.3.2. „BUG-O Systems“ sustav za automatsko zavarivanje.....	29

4.1.4.	Oprema za ispitivanje	29
4.1.4.1.	Fotoaparati Cannon 1000D	29
4.1.4.2.	Uređaj za mjerenje tvrdoće	30
4.1.5.	Postupak ispitivanja	31
4.1.5.1.	Priprema uzoraka	31
4.1.5.2.	Priprema radnog mjesta za zavarivanje uzoraka.....	34
4.1.6.	Parametri zavarivanja.....	34
4.2.	Rezultati ispitivanja.....	36
5.	ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	47
5.1.	Analiza rasprskavanja kapljica metala.....	47
5.2.	Analiza oblika metala zavara	47
5.3.	Analiza iznosa penetracije	48
5.4.	Analiza tvrdoće	50
5.5.	Ispitivanje i analiza pojave zone utjecaja topline tijekom postupka plazma rezanja. 54	
6.	ZAKLJUČAK.....	56
	LITERATURA.....	58

POPIS SLIKA

Slika 1.	Mikrostruktura Toolox 33 čelika u isporučenom stanju; opći i detaljni prikaz [6].	3
Slika 2.	Zupčanici i zupčaste letve; držači alata; vodilice [3]	4
Slika 3.	Zatici; noževi; vratila [3]	4
Slika 4.	Alat za hladno oblikovanje; alat za probijanje [3]	4
Slika 5.	Kalup za lijevanje; ukovanj [3]	4
Slika 6.	Stezni sustav i jezgra trofaznog transformatora [8]	5
Slika 7.	Vlačna motka od Toolox čelika u postupku izrade	5
Slika 8.	Proizvodnja Toolox čelika [3]	6
Slika 9.	Asimetrični dvostruki-V spoj [13]	8
Slika 10.	Razmak limova ($b < 3$ mm) [13]	8
Slika 11.	Početak i završetak zavarana	8
Slika 12.	Dodatni materijali za zavarivanje Toolox čelika [4]	10
Slika 13.	Uvjeti za nastanak hladnih pukotina	12
Slika 14.	Minimalna temperatura predgrijavanja i međuprolaza za nelegirane i niskolegirane dodatne materijale [4]	15
Slika 15.	Minimalna temperatura predgrijavanja i međuprolaza za nehrđajuće dodatne materijale [4]	15
Slika 16.	Pozicije mjerenja temperature predgrijavanja sučeljenog spoja prema HRN EN ISO 13916:2017 [23]	16
Slika 17.	Pozicije mjerenja temperature predgrijavanja kutnog spoja prema HRN EN ISO 13916:2017 [23]	16
Slika 18.	Oprema i princip rada MAG postupka zavarivanja [29]	21
Slika 19.	Prikaz utjecaja zaštitnog plina na postupak zavarivanja [34]	23
Slika 20.	Struja u ovisnosti o vremenu kod impulsnog zavarivanja [37]	25
Slika 21.	Uređaj za MAG impulsno zavarivanje „DAIHEN VARSTROJ WB-P500L“	28
Slika 22.	Specifikacije „DAIHEN VARSTROJ WB-P500L“	28
Slika 23.	„BUG-O Systems“ sustav za automatsko zavarivanje	29
Slika 24.	Fotoaparat Cannon 1000D	30
Slika 25.	Uređaj za mjerenje tvrdoće „Reicherter Brivisor KL 2“	30
Slika 26.	Obrada površine pomoću tračne i kutne brusilice	32
Slika 27.	Stanje površine isporučenog lima (gornji lim) i očišćenog lima (donji lim)	32
Slika 28.	Skraćivanje uzoraka pomoću tračne pile	33
Slika 29.	Pripremljeni uzorak	33
Slika 30.	Pripremljeno radno mjesto za zavarivanje uzoraka	34
Slika 31.	Zavareni spojevi 1, 2, 3	36
Slika 32.	Zavareni spojevi 4, 5, 6	37
Slika 33.	Zavareni spojevi 7, 8, 9	37
Slika 34.	Zavareni spojevi 10, 11, 12	38
Slika 35.	Makroizbrusak uzorka	39
Slika 36.	Postupak mjerenja penetracije pomoću ImageJ programa	39
Slika 37.	Makroizbrusci 1-6	40
Slika 38.	Makroizbrusci 7-12	41
Slika 39.	Pozicije mjerenja tvrdoće	43
Slika 40.	Utjecaj plina na oblik metala zavarana	47
Slika 41.	Dijagram usporedbe penetracije na analiziranim uzorcima	48

Slika 42.	Dijagram usporedbe prosječne penetracije na analiziranim uzorcima	49
Slika 43.	Dijagram usporedbe penetracije p i srednje bočne penetracije $b_{\bar{x}}$ na analiziranim uzorcima	49
Slika 44.	Dijagram usporedbe prosječnih tvrdoća u ovisnosti o debljini uzoraka	50
Slika 45.	Dijagram usporedbe maksimalnih tvrdoća u ovisnosti o debljini uzoraka	51
Slika 46.	Dijagram usporedbe prosječnih tvrdoća u ovisnosti o utjecaju predgrijavanja.....	52
Slika 47.	Dijagram usporedbe maksimalnih tvrdoća u ovisnosti o utjecaju predgrijavanja.	52
Slika 48.	Dijagram usporedbe prosječnih tvrdoća u ovisnosti o zaštitnom plinu.....	53
Slika 49.	Dijagram usporedbe maksimalnih tvrdoća u ovisnosti o zaštitnom plinu.....	54
Slika 50.	Uzorak za ispitivanje pojave ZUT-a tijekom postupka plazma rezanja.....	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva Toolox 33 čelika [3]	3
Tablica 2. Kemijski sastav Toolox 33 čelika [5].....	3
Tablica 3. Preporuke dodatnih materijala s obzirom na udio vodika [4]	10
Tablica 4. Utjecaj različitih mješavina plina [4]	11
Tablica 5. Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka pojedinog postupka zavarivanja, k [16]	11
Tablica 6. Općeniti utjecaj unosa topline [4]	12
Tablica 7. Usporedba ekvivalenta ugljika Toolox čelika sa sličnim alatnim čelicima [4].....	13
Tablica 8. Preporuke za postupak naknadne toplinske obrade [4]	17
Tablica 9. Dozvoljene temperature predgrijavanja i naknadne toplinske obrade za Toolox [4]	19
Tablica 10. Prednosti i nedostaci MAG zavarivanja [30]	22
Tablica 11. Sastav trokomponentne plinske mješavine C6 X1 i C12 X2	24
Tablica 12. Mehanička svojstva isporučenog Toolox 33 čelika	26
Tablica 13. Kemijski sastav isporučenog Toolox 33 čelika	27
Tablica 14. Kemijski sastav isporučene MIG 75 žice	27
Tablica 15. Mehanička svojstva isporučene MIG 75 žice.....	28
Tablica 16. Plan eksperimenta.....	31
Tablica 17. Parametri zavarivanja	35
Tablica 18. Rezultati mjerenja penetracije	42
Tablica 19. Rezultati mjerenja bočne penetracije	42
Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10.....	43
Tablica 21. Tablica analize vrijednosti tvrdoća ovisno o debljini uzoraka	50
Tablica 22. Tablica analize vrijednosti tvrdoća ovisno o utjecaju predgrijavanja	51
Tablica 23. Tablica analize vrijednosti tvrdoća ovisno o zaštitnom plinu	53
Tablica 24. Rezultati mjerenja tvrdoće ruba odrezanog plazma postupkom	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost
Al	-	Aluminij
Ar	-	Argon
B	-	Bor
C	-	Ugljik
CET	%	Ekvivalent ugljika prema Thyssen-u
CEV	%	Ekvivalent ugljika prema IIW (Međunarodni institut zavarivanja)
CO ₂	-	Ugljikov dioksid
Cr	-	Krom
Cu	-	Bakar
d	mm	Debljina materijala
DC	-	Istosmjerna struja
EPP	-	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
H	-	Vodik
HB	HB	Tvrdoća po Brinellu
HD	ml/100 g	Količina difundiranog vodika
HV	HV	Tvrdoća po Vickersu
I	A	Jakost struje
MAG	-	Metal Active Gas
Mg	-	Magnezij
Mn	-	Mangan
Mo	-	Molibden
N	-	Dušik
Nb	-	Niobij
Ni	-	Nikal
O	-	Kisik
P	-	Fosfor
PA	-	Položaj zavarivanja
Q	kJ/mm	Unos topline
REL	-	Ručno elektrolučno zavarivanje
R _{p0,2}	MPa	Granica razvlačenja
R _m	MPa	Vlačna čvrstoća
S	-	Sumpor
SHIP	-	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
Si	-	Silicij
T	K[°C]	Temperatura

T_{pCET}	K[°C]	Temperatura predgrijavanja ovisna o sastavu osnovnog materijala
T_{pd}	K[°C]	Temperatura predgrijavanja ovisna o debljini materijala
T_{pHD}	K[°C]	Temperatura predgrijavanja ovisna o količini difundiranog ugljika
T_{pQ}	K[°C]	Temperatura predgrijavanja ovisna o unosu topline
Ti	-	Titan
TIG	-	Tungsten Inert Gas
U	V	Napon
V	-	Vanadij
v	mm/s	Brzina
ZUT	-	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

Teorijski dio diplomskog rada opisuje svojstva Toolox čelika, njegovu primjenu i proizvodnju. Detaljno je obrađena zavarljivost te specifičnost tehnologije zavarivanja i rezanja Toolox čelika. Kratko je opisan postupak MAG impulsnog zavarivanja te uloga zaštitnog plina, uz analizu utjecaja primjene trokomponentnih plinskih mješavina Ar/CO₂/O₂ na geometriju i svojstva zavarenog spoja.

Eksperimentalni rad sastoji se od pripreme uzoraka Toolox 33 čelika debljine 10 i 20 mm, izvođenja postupka MAG impulsnog zavarivanja korištenjem plinskih mješavina C18, C12 X2 i C6 X1, s i bez predgrijavanja na temperaturu 70 °C. Zavareni kutni spojevi podvrgnuti su vizualnoj kontroli zavara, izradi makroizbrusaka i mjerenju geometrije te ispitivanju tvrdoće. Analizom rezultata ispitivanja utvrđen je utjecaj plinskih mješavina na rasprskavanje kapljica metala tijekom zavarivanja, oblik metala zavara i penetraciju. Pokazano je da temperatura predgrijavanja i debljina materijala utječu na penetraciju i tvrdoću zavarenog spoja.

Mjerenjem tvrdoće ispitana je i analizirana pojava zone utjecaja topline tijekom postupka toplinskog rezanja.

Ključne riječi: Toolox, zavarljivost, trokomponentna plinska mješavina, temperatura predgrijavanja.

SUMMARY

The theoretical part of the thesis describes the properties of Toolox steel, its application and production. The weldability and specificity of welding and cutting technology for Toolox steel are discussed in detail. The MAG pulse welding process and the role of shielding gas are briefly described, with an analysis of the influence on the application of three-component Ar/CO₂/O₂ gas mixtures on the geometry and properties of the welded joint.

The experimental work consists of the preparation of Toolox 33 steel samples with a thickness of 10 and 20 mm, performing the MAG pulse welding procedure using gas mixtures C18, C12 X2 and C6 X1, with and without preheating at 70 °C. Fillet welds are subjected to visual inspection of weld beads, macro examinations with geometry measurements, and hardness testing. The analysis of the test results determined the influence of gas mixtures on the spatter of metal droplets during welding, the shape of the weld metal and penetration. The preheating temperature and the thickness of the material affect the penetration and hardness of the welded joint.

By measuring the hardness, the occurrence of the heat affected zone during the thermal cutting process was examined and analyzed.

Key words: Toolox, weldability, 3-part gas mixtures, preheat temperature.

1. UVOD

Toolox čelik jedan je od proizvoda modernih pogona za proizvodnju čelika koji omogućavaju proizvodnju kvalitetnijeg čelika s boljim mehaničkim svojstvima. Toolox čelik osim svojih mehaničkih svojstva kupcima nudi i dvije bitne prednosti u odnosu na konvencionalne čelike. Jedna je isporuka čelika u kaljenom i popuštenom stanju, što pruža mogućnost proizvođaču da garantira svojstva isporučenog čelika nakon toplinske obrade, a druga prednost je brzina proizvodnje gotovog proizvoda od trenutka narudžbe do isporuke [1].

Diplomski rad obrađuje tematiku zavarljivosti i specifičnosti tehnologije zavarivanja i rezanja Toolox 33 čelika te njegova svojstva, primjenu i proizvodnju. Obuhvaća i utjecaj trokomponentnih plinskih mješavina Ar/CO₂/O₂ na geometriju i svojstva zavarenog spoja.

Eksperimentalni dio rada obuhvaća ispitivanje utjecaja temperature predgrijavanja, zaštitnog plina i debljine materijala na geometriju i svojstva zavarenog spoja. Ispitivanje obuhvaća zavarivanje kutnog spoja čelika debljine 10 mm i 20 mm, s tri različite plinske mješavine: C18, C12 X2 i C6 X1, s i bez predgrijavanja na temperaturu 70 °C, izračunatu prema normi HRN EN ISO 1011-2. Ispitivanje zavarenih uzoraka sastoji se od vizualne kontrole zavara, izrade makroizbruska i mjerenja geometrije zavara te ispitivanja tvrdoće. Osim ispitivanja zavarenog spoja, ispitat će se i utjecaj toplinskog rezanja na pojavu zone utjecaja topline.

2. TOOLOX

Toolox čelik jedan je od proizvoda SSAB-a, švedske tvrtke specijalizirane za proizvodnju čelika visoke čvrstoće. Osim Toolox čelika SSAB stavlja na tržište i druge već prepoznate čelike kao što su Hardox, Strenx i ArmoX čelici. Navedeni čelici spadaju pod „SSAB Special Steels“, koji je najveći internacionalni proizvođač ove kategorije čelika. Proizvodni pogon u Oxelösund-u (Švedska) ima kapacitet od 1,5 milijuna tona sirovog željeza godišnje. A osim u Švedskoj proizvodni pogoni se nalaze još i u SAD-u i Finskoj [2].

Toolox čelici su proizvodi modernih pogona za proizvodnju čelika koji omogućavaju dobivanje kvalitetnijeg konačnog proizvoda s minimalnim brojem uključaka i minimalnom razinom segregacija. Tvrdoća Toolox čelika je u rasponu 300-450 HB. Toolox čelik je proizvod namijenjen za proizvodnju kalupa i alata za lijevanje i prešanje. Moguća je primjena na povišenim temperaturama do 590 °C. Usporedbom sa standardnim čelicima slične čvrstoće i tvrdoće osigurava znatno bolju strojnu obradivost, a s obzirom na to da se isporučuje u kaljenom i popuštenom stanju ima visoku dimenzijsku stabilnost. Navedena svojstva znatno poboljšavaju ekonomičnost izrade proizvoda od Toolox čelika, jer se pruža mogućnost brzog dobivanja kvalitetnog čelika dobre strojne obradivosti i bez potrebe za naknadnom toplinskom obradom. Toolox čelik je mikrolegiran niobijem radi kontroliranja veličine zrna austenita, čime se kontrolira i povećava udarna radnja loma čelika [1], [3].

Toolox čelici pružaju dvije ključne prednosti u odnosu na slične standardne čelike. Prva je isporuka čelika s poznatim mehaničkim svojstvima nakon toplinske obrade, što je moguće jer se kaljenje i popuštanje odvija u proizvodnom pogonu SSAB-a te se od strane proizvođača izdaje certifikat s mehaničkim svojstvima pojedinog lima. Druga ključna prednost je brzina proizvodnje konačnog proizvoda od primitka narudžbe do isporuke [1].

2.1. Toolox 33

Toolox 33 čelik isporučen je u kaljenom i popuštenom stanju s niskom razinom zaostalih naprezanja i visokom udarnom radnjom loma. Sadržaj ugljika i drugih legiranih elemenata je na niskoj razini što ga čini prikladnim za postupke zavarivanja i toplinskog rezanja. Čelik je dostupan u debljinama od 6 do 130 mm. Mehanička svojstva Toolox 33 čelika prikazana su tablicom 1, a kemijski sastav u tablici 2 [4].

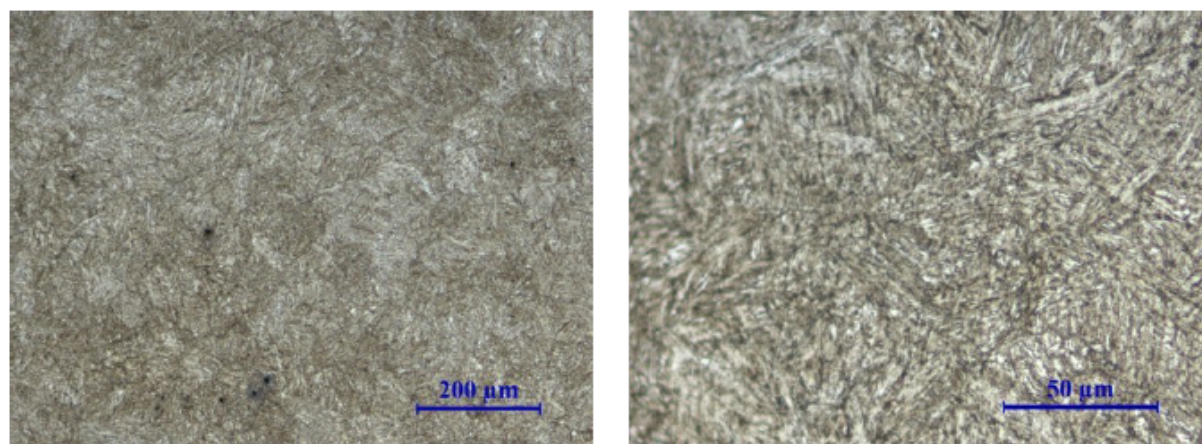
Tablica 1. Mehanička svojstva Toolox 33 čelika [3]

Debljina, mm	Tvrdoća, HB	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Istezanje A_5 , %	Udarni rad loma, Charpy V, J
6,0-130,0	275-325	min 700	min 800	min 10	100

Tablica 2. Kemijski sastav Toolox 33 čelika [5]

Kemijski sastav, %	Toolox 33
C	0,22-0,24
Si	0,6-1,1
Mn	0,8
P	max 0,010
S	max 0,002
Cr	1,0-1,2
Mo	0,30
V	0,10-0,11
Ni	max 1,0

Mikrostruktura Toolox 33 čelika u isporučenom stanju prikazana je na slici 1. Sastoji se od sitnozrnatog martenzita, bainita i zaostalog austenita [3], [6].

**Slika 1. Mikrostruktura Toolox 33 čelika u isporučenom stanju; opći i detaljni prikaz [6]**

2.2. Primjena Toolox čelika

Toolox čelik koristi se za izradu različitih strojnih dijelova te izradu kalupa i preša. Neki od strojnih dijelova su zupčanici, držači alata, vodilice (slika 2); zatici, noževi i vratila (slika 3). Alati za hladno oblikovanje i probijanje prikazani su na slici 4; te za lijevanje i kovanje na slici 5 [3].



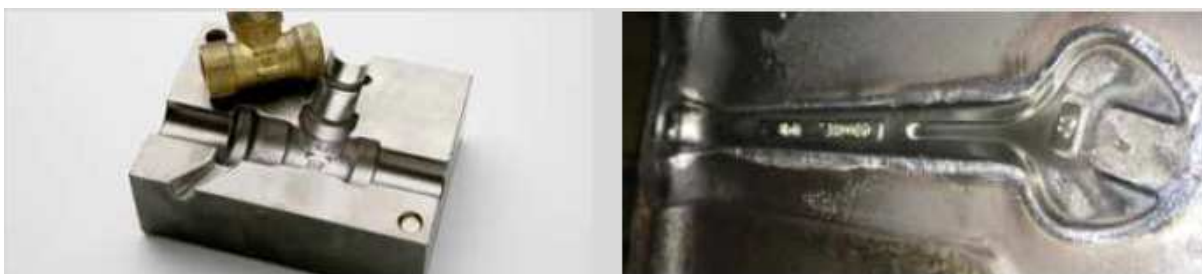
Slika 2. Zupčanici i zupčaste letve; držači alata; vodilice [3]



Slika 3. Zatici; noževi; vratila [3]



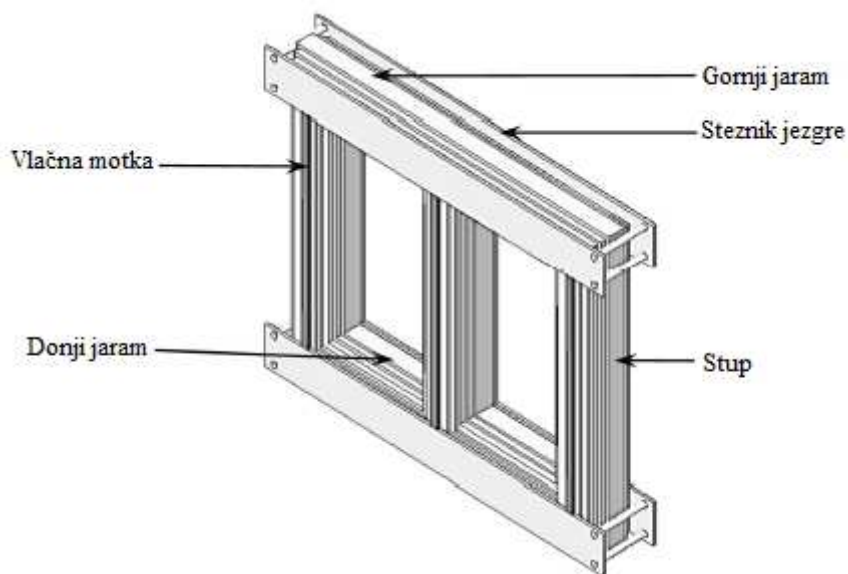
Slika 4. Alat za hladno oblikovanje; alat za probijanje [3]



Slika 5. Kalup za lijevanje; ukovanj [3]

Poduzeće Rotometal koristi Toolox 33 čelik za izradu vlačnih motki transformatora. Vlačne motke povezuju gornji i donji dio steznog sustava jezgre transformatora, shematski prikaz na slici 6. Vlačne motke imaju dvije uloge, jedna je opiranje aksijalnim silama kratkog

spoja, a druga osiguravanje prijenosa sile pri podizanju namotaja i jezgre s gornjeg na donji okvir steznog sustava. Vlačne motke se izrađuju od kvalitetnog čelika s visokom granicom razvlačenja kako bi mogle preuzeti opterećenje. Toolox čelik svojim karakteristikama zadovoljava potrebne kriterije za primjenu. Prikaz vlačne motke od Toolox 33 čelika tijekom postupka izrade u Rotometal-u dan je na slici 7 [7].



Slika 6. Stezni sustav i jezgra trofaznog transformatora [8]

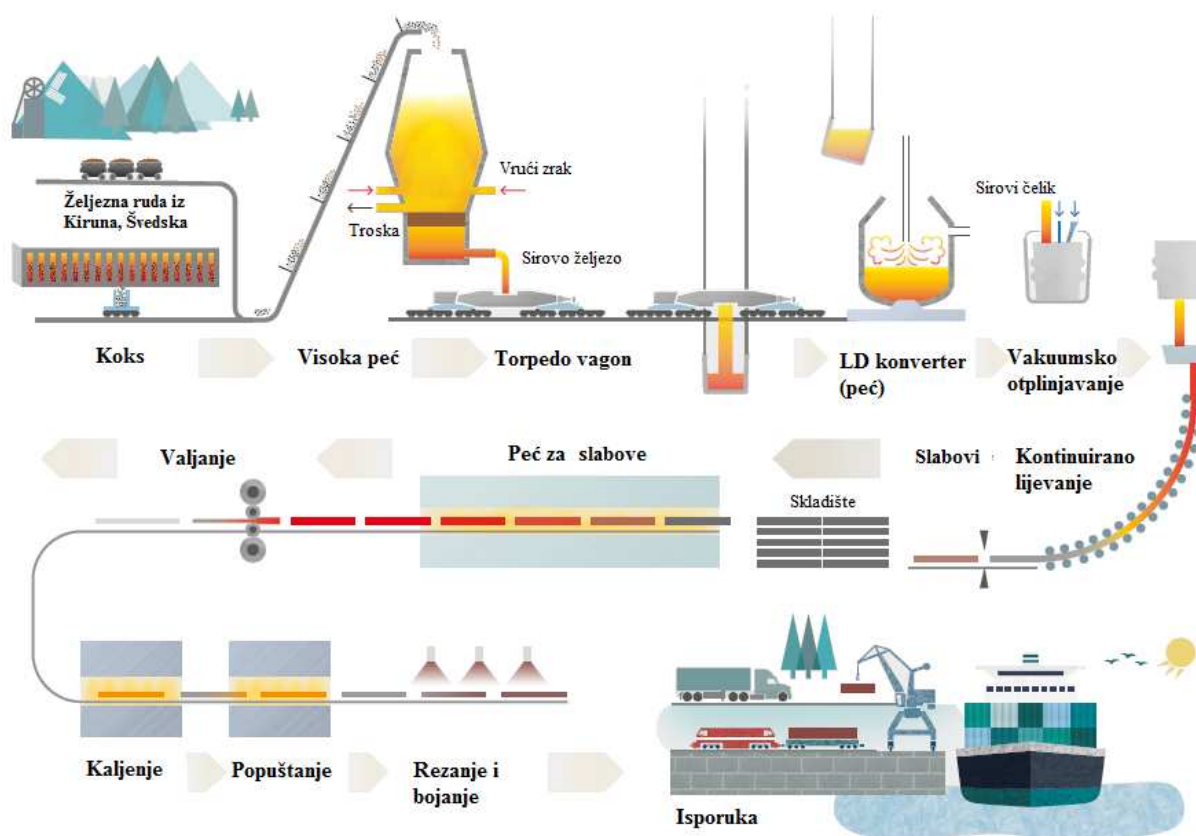


Slika 7. Vlačna motka od Toolox čelika u postupku izrade

2.3. Proizvodnja Toolox čelika

Proizvodnja Toolox čelika prikazana je na slici 8. Postupak započinje taljenjem čistog željeza. Čelik se vakuumski otplinjava i lijeva kontinuiranim postupkom pomoću specijaliziranog procesa CSR (Controlled Soft Reduction). CSR proces omogućava proizvodnju čelika s homogenom strukturom i niskim postotkom uključaka. Kvaliteta dobivenog čelika odgovara kvaliteti postignutoj postupkom električnog pretaljivanja pod zaštitom troske (ESR).

Po završetku lijevanja čelika slijedi valjanje na potrebnu debljinu i širinu radi pripreme za idući proces poboljšavanja u kojem se dobivaju konačna mehanička svojstva Toolox čelika [1], [3].



Slika 8. Proizvodnja Toolox čelika [3]

Primjenom modernog postupka kontinuiranog lijevanja dobiva se kvalitetniji čelik s veoma malim udjelom nečistoća. Čelik se isporučuje u kaljenom i popuštenom stanju što znači da se daljnja obrada čelika znatno ubrzava. Osim poboljšanja brzine proizvodnje proizvoda, proizvođač provjerava i garantira mehanička svojstva čelika nakon kaljenja i popuštanja, što inače nije moguće kada je čelik isporučen samo u meko žarenom stanju [3], [9].

2.4. Zavarljivost

Normom ISO/TR 581:2005 definirana je zavarljivost metalnih materijala. Metal, odnosno komponenta se smatra zavarljivom određenim postupkom kada je moguće ostvariti kontinuitet metala uz korištenje odgovarajuće procedure zavarivanja. Zavar osim navedenog mora zadovoljiti i određene kriterije metalurških i mehaničkih svojstva kao i utjecaj na cjelokupnu konstrukciju. Zavarljivost ovisi o materijalu, konstrukciji i tehnologiji [10].

Zavarivanje Toolox čelika moguće je svim standardnim postupcima zavarivanja uz pridržavanje preporuka od strane proizvođača. Pri izradi specifikacije zavarivanja (WPS-a) Toolox čelik se svrstava pod grupu materijala 3.2 prema normi ISO/TR 15608: 2000[4].

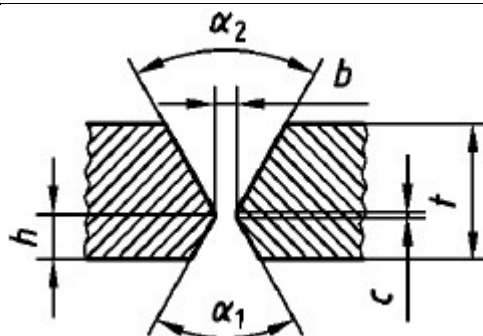
2.4.1. Priprema spoja

Priprema spoja Toolox čelika nema posebna ograničenja, moguća je primjena svih standardnih postupaka kao što su toplinsko rezanje, strojna obrada ili brušenje. Primjenom toplinskog rezanja dolazi do pojave tankog oksidnog ili nitridnog sloja debljine do 0,2 mm, kojeg je potrebno ukloniti brušenjem. Toplinsko rezanje detaljnije je obrađeno u zasebnom poglavlju. Mjesto zavarivanja je potrebno očistiti od vlage, korozije, masti i ulja prije svakog prolaza. Pripoji moraju biti barem 50 mm duljine [4].

2.4.2. Oblik spoja

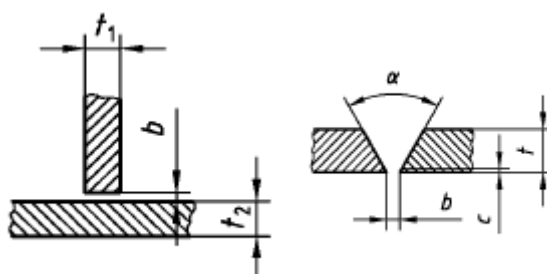
Odabir odgovarajućeg oblika spoja ovisi o: postupku zavarivanja, položaju zavarivanja, osnovnom materijalu, debljini osnovnog materijala, količini dodatnog materijala, žlijebljenju, mehaničkim svojstvima, metalurškom aspektu, normama, produktivnosti i cijeni [11], [12].

Preporuke oblika spoja kod zavarivanja Toolox čelika su simetrični i asimetrični spoj za limove debljine do 25 mm. Iznad 25 mm debljine preporučuje se asimetrični spoj. Razlog tome je što sredina debelih limova može sadržavati elemente koji pospješuju stvaranje hladnih pukotina, a korijenski prolaz je najosjetljiviji na njihovu pojavu. Prikaz asimetričnog spoja za debele limove prikazan je na slici 9, sredina spoja je spuštена približno 5 mm ispod sredine lima (t =debljina stijenke; $h=t/2-5$) [4].



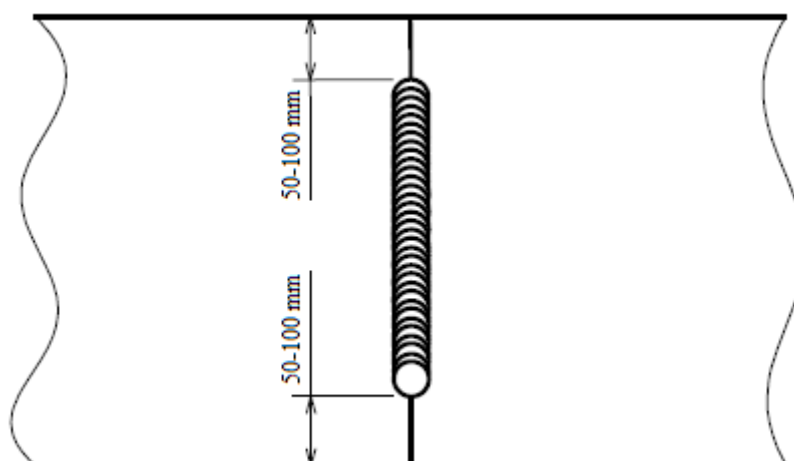
Slika 9. Asimetrični dvostruki-V spoj [13]

Razmak u korijenu zavora ne bi trebao biti veći od 3 mm. Preveliki razmak rezultira većim naprežanjem što pogoduje nastanku hladnih pukotina (slika 10) [4].

Slika 10. Razmak limova ($b < 3 \text{ mm}$) [13]

2.4.3. Redosljed zavarivanja

Početak i završetak zavarivanja preporučuje se na udaljenosti od približno 50-100 mm od rubova spoja radi smanjenja zaostalih naprežanja u spoju (slika 11) [4].



Slika 11. Početak i završetak zavora

2.4.4. *Dodatni materijal*

Dodatni materijal za zavarivanje Toolox čelika može biti nehrđajućeg, nelegiranog ili niskolegiranog tipa. Preporuka za zavarivanje konstrukcija podložnih umjerenom naprezanju je dodatni materijal nehrđajućeg tipa, a za konstrukcije koje su izložene visokom iznosu naprezanja najbolja svojstva se postižu s niskolegiranim dodatnim materijalom [4].

Preporuka za reparaturno zavarivanje je korištenje dodatnog materijala istog kemijskog sastava. Najjednostavniji način je primjena TIG postupka s dodatnim materijalom izrezanim iz viška Toolox čelika [14], [15].

2.4.4.1. *Nehrđajući dodatni materijal*

Mikrostruktura postignuta zavarivanjem s nehrđajućim dodatnim materijalom osigurava visoku tvrdoću uz granicu razvlačenja od 500 MPa. Snižavanjem granice razvlačenja dobiva se spoj manje čvrstoće ali povećane istezljivosti koja u određenoj primjeni kompenzira opterećenje. Primjena nije moguća kod visokonapregnutih spojeva. Osim toga osigurava i visoku otpornost na hladne pukotine te nema ograničenja na udio vodika.

Zavarivanjem Toolox 33 čelika nehrđajućim dodatnim materijalom eliminira se potreba za predgrijavanjem, dok je za Toolox 44 potrebno slijediti preporuke iz tablice sa slike 15.

Pružaju se i mogućnosti zavarivanja Toolox čelika s drugim tipovima čelika, ali i s nehrđajućim i manganskim čelicima, uz odgovarajuće uvjete za oba čelika.

Nedostaci korištenja nehrđajućeg dodatnog materijala su veća cijena u usporedbi s nelegiranim i niskolegiranim dodatnim materijalom te nemogućnost korištenja plinskog rezanja za pripremu spoja. Lasersko i plazma rezanje je dozvoljeno [4].

2.4.4.2. *Nelegirani i niskolegirani dodatni materijal*

Korištenjem nelegiranog i niskolegiranog dodatnog materijala mora se osigurati dostatna čvrstoća i udio vodika mora biti ispod dopuštene granice. Granica razvlačenja metala zavara u većini slučajeva iznosi do 930 MPa. Posebni slučajevi kada je potrebno dodatno smanjenje rizika od pojave hladnih pukotina i veća žilavost metala zavara, postižu se korištenjem dodatnog materijala s granicom razvlačenja oko 500 MPa.

Udio vodika u nelegiranom i niskolegiranom dodatnom materijalu ne smije iznositi više od 5 ml vodika/100 g metala zavara kako bi se izbjegla pojava hladnih pukotina. Postupci MAG, TIG i plazma zavarivanje s punom žicom kao dodatnim materijalom zadovoljavaju prethodno

navedeni kriterij. Potrebno je obratiti pažnju na dodatni materijal koji sadrži obloge i praškove, jer su oni dodatni izvor za prikupljanje vlage. Preporuke dodatnih materijala prikazane su u tablici 3. A slika 12 prikazuje tablicu dodatnih materijala ovisno o postupku i zahtijevanoj granici razvlačenja [4].

Tablica 3. Preporuke dodatnih materijala s obzirom na udio vodika [4]

Dodatni materijali za zavarivanje Toolox čelika s dovoljno niskim udjelom vodika.	
Nelegirani i niskolegirani dodatni materijali	Tip dodatnog materijala
Puna žica (MAG, TIG)	Svi tipovi
Praškom punjena žica (MAG)	Bazična i rutilna varijanta
Metalnim praškom punjena žica (MAG)	Određeni tipovi (tablica 12)
Elektroda za REL	Bazična
Dodatni materijal za EPP	Bazična kombinacija

$R_{p0.2}$, MPa	REL	EPP (puna žica-prašak kombinacija)	MAG (puna žica)	MAG (svi tipovi punjene žice)	TIG
900	EN ISO 18275 (-A) E 89X	EN ISO 26304 (-A) S 89X	EN ISO 16834 (-A) G 89X	EN ISO 18276 (-A) T 89X	EN ISO 16834 (-A) W 89X
800	EN ISO 18275 (-A) E 79X	EN ISO 26304 (-A) S 79X	EN ISO 16834 (-A) G 79X	EN ISO 18276 (-A) T 79X	EN ISO 16834 (-A) W 79X
700	EN ISO 18275 (-A) E 69X EN ISO 18275 (-A) E 62X	EN ISO 26304 (-A) S 69X EN ISO 26304 (-A) S 62X	EN ISO 16834 (-A) G 69X EN ISO 16834 (-A) G 62X	EN ISO 18276 (-A) T 69X EN ISO 18276 (-A) T 62X	EN ISO 16834 (-A) W 69X EN ISO 16834 (-A) W 62X
600	EN ISO 18275 (-A) E 55X EN ISO 2560 E 50X	EN ISO 26304 (-A) S 55X EN ISO 14171 (-A) S 50X	EN ISO 16834 (-A) G 55X EN ISO 14341 (-A) G 50X	EN ISO 18276 (-A) T 55X EN ISO 17632 (-A) T 50X	EN ISO 16834 (-A) W 55X EN ISO 636 (-A) W 50X
500	EN ISO 2560 E 46X EN ISO 2560 E 42X	EN ISO 14171 (-A) S 46X EN ISO 14171 (-A) S 42X	EN ISO 14341 (-A) G 46X EN ISO 14341 (-A) G 42X	EN ISO 17632 (-A) T 46X EN ISO 17632 (-A) T 42X	EN ISO 636 (-A) W 46X EN ISO 636 (-A) W 42X
400					

Slika 12. Dodatni materijali za zavarivanje Toolox čelika [4]

2.4.5. Zaštitni plin

Zavarivanje postupcima koji uključuju zaštitni plin, odabir odgovarajućeg plina ili plinske mješavine ovisi o uvjetima zavarivanja. Najčešće korišteni plinovi su mješavine argona i ugljikovog dioksida. Utjecaj udjela pojedinog plina u mješavini prikazan je u tablici 4.

Protok plina ovisi o određenim uvjetima zavarivanja kao što su položaj zavarivanja, mjesto zavarivanja, oblik i priprema spoja te drugim faktorima. Općenita preporuka za protok plina u L/min je iste vrijednosti kao i unutrašnji promjer sapnice pištolja za zavarivanje [4].

Tablica 4. Utjecaj različitih mješavina plina [4]

Utjecaj različitih mješavina plina		
<ul style="list-style-type: none"> • Smanjeno rasprskavanje kapljica • Lakše uspostavljanje električnog luka • Niska količina oksida 		<ul style="list-style-type: none"> • Niski porozitet • Stabilan električni luk • Velika penetracija • Veliko rasprskavanje kapljica

2.4.6. Unos topline

Proizvođač materijala ne navodi posebna ograničenja s obzirom na iznos unosa topline no daje smjernice prikazane u tablici 6. Formula za izračun unosa topline navedena je u nastavku.

$$Q = \frac{k \times U \times I}{v} \times \frac{1}{1000}, \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \quad (1)$$

Q – unesena topline, kJ/mm

k – koeficijent iskoristivosti topline električnog luka postupka zavarivanja (tablica 5);

U – napon zavarivanja, V

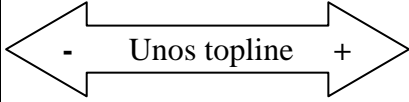
I – struja zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, mm/s

Tablica 5. Koeficijent iskoristivosti topline električnog luka pojedinog postupka zavarivanja, k [16]

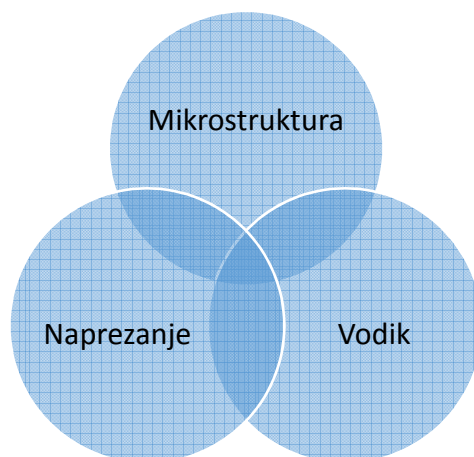
Oznaka postupka prema HRN EN ISO 4063	Postupak zavarivanja	k
111	REL	0,8
135	MAG	0,8
141	TIG	0,6
121	EPP	1,0

Tablica 6. Općeniti utjecaj unosa topline [4]

Općeniti utjecaj unosa topline		
<ul style="list-style-type: none"> • Veća čvrstoća • Mala zaostala naprezanja • Veća žilavost • Uži ZUT • Manje deformacije 		<ul style="list-style-type: none"> • Veća produktivnost

2.4.7. Hladne pukotine

Rizik od nastanka hladnih pukotina je uobičajen kod čelika visoke čvrstoće. Problematika nastanka hladnih pukotina je što do njihove pojave dolazi pri spuštanju temperature zavarenog obratka ispod 300 °C, što znači da do njihovog nastanka može proći i nekoliko sati nakon zavarivanja. To dodatno otežava proizvodnju jer iziskuje određeno vrijeme čekanja i skladištenja zavarenih proizvoda. Ukoliko se zahtjeva provedba nerazornih ispitivanja vrijeme čekanja iznosi između 24 i 48 h [11]. Pojava hladnih pukotina javlja se u određenim uvjetima prikazanim na slici 13.



Slika 13. Uvjeti za nastanak hladnih pukotina

Veći udio legirnih elemenata pospješuje mogućnost njihovog nastanka te je bitno poznavanje kemijskog sastava čelika za određivanje opasnosti od pojave hladnih pukotina. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na hladne pukotine određuje se pomoću ekvivalenta ugljika (CEV ili CET). Razlika u izračunu CEV i CET ekvivalenta ugljika prikazana je u tablici 7. Čelik s manjim ekvivalentom ugljika ima veću otpornost na pojavu hladnih pukotina [4]. Glavni faktor za određivanje minimalne temperature predgrijavanja za sprječavanje nastanka hladnih pukotina je ekvivalent ugljika, no osim njega na nju utječu i debljina osnovnog

materijala, stanje osnovnog materijala, dodatni materijal, atmosferski uvjeti i određena ograničenja za materijal [17].

Toolox čelik ima znatno manji ekvivalent ugljika u usporedbi s čelicima slične tvrdoće te je njegova zavarljivost bolja u usporedbi s drugim čelicima sličnih svojstva. Usporedba ekvivalenta ugljika Toolox čelika sa sličnim alatnim čelicima i formula za izračun ekvivalenta ugljika CET i CEV prikazana je u tablici 7 [4].

Tablica 7. Usporedba ekvivalenta ugljika Toolox čelika sa sličnim alatnim čelicima [4]

Ekvivalent ugljika Toolox 33 čelika u usporedbi s alatnim čelicima približne tvrdoće		
Čelik	CET, % Uobičajene vrijednosti	CEV, % Uobičajene vrijednosti
Toolox 33	0,38-0,42	0,63-0,71
AISI: 4140/EN: 42CrMo4	1,13	1,27
AISI: 4340/EN: 34CrNiMo6	0,58	0,85
AISI: 1045/EN: C45	0,52	0,57
Ekvivalent ugljika Toolox 44 čelika u usporedbi s alatnim čelicima približne tvrdoće		
Čelik	CET, % Uobičajene vrijednosti	CEV, % Uobičajene vrijednosti
Toolox 44	0,57	0,96
AISI: H13/EN: 1.2344	0,83	1,98
$\text{CET} = \text{C} + \frac{(\text{Mn} + \text{Mo})}{10} + \frac{(\text{Cr} + \text{Cu})}{20} + \frac{\text{Ni}}{40} \text{ [%]}$		$\text{CEV} = \text{C} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{(\text{Mo} + \text{Cr} + \text{V})}{5} + \frac{(\text{Ni} + \text{Cu})}{15} \text{ [%]}$

Hladne pukotine se smatraju glavnim krivcem za povećane troškove popravaka zavarenih spojeva [18]. Njihova pojava se može izbjeći pridržavajući se određenih pravila. Ukloniti vodik iz spoja te osigurati minimalna naprezanja u spoju i oko njega. Na razinu vodika u spoju utječe se odgovarajućom temperaturom predgrijavanja i međuprolaza, naknadnom toplinskom obradom, korištenjem odgovarajućeg dodatnog materijala s niskim udjelom vodika i uklanjanjem nečistoća iz zone zavarivanja. Naprezanje u spoju smanjuje se pravilnim redoslijedom zavarivanja, korištenjem manjeg razmaka u spoju i izbjegavanjem korištenja dodatnog materijala veće čvrstoće od potrebne [4], [19]. Proces zavarivanja i dodatni materijal imaju značajan učinak u pojavi hladnih pukotina kod kaljenih i popuštenih čelika [18].

2.4.8. *Temperatura predgrijavanja*

Predgrijavanje se provodi sa svrhom utjecanja na hlađenje nakon postupka zavarivanja, smanjuju se naprezanja i brzina hlađenja je manja [17]. Smanjenjem brzine hlađenja udio martenzita se smanjuje, uz porast bainita i zaostalog austenita, rezultat je manja tvrdoća uz veću žilavost [20]. Uloga predgrijavanja raste s povećanjem debljine osnovnog materijala zbog mogućnosti samozakaljivanja. Generalno uz višu temperaturu predgrijavanja i što manji unos topline postiže se bolja kvaliteta zavarenog spoja [17].

Predgrijavanje se koristi kako bi se umanjio rizik od nastajanja hladnih pukotina, tako što se na brz način uklanja vodik iz spoja [4]. Difuzija vodika u metalu ovisi o koncentraciji vodika na površini metala, ali i o mjestima zadržavanja vodika, a to su različite greške materijala, primjerice praznine, uključci, otopljeni atomi i precipitati prisutni u materijalu [21].

Nužno je praćenje odgovarajuće procedure tijekom predgrijavanja i postizanje potrebne temperature. Predgrijavanje je nužno i prije pripajanja.

Predgrijavanje je obavezno [4]:

- pri zavarivanju limova različitih debljina, pri čemu se za minimalnu temperaturu predgrijavanja uzima vrijednost debljeg lima,
- pri zavarivanju Toolox materijala s nekim drugim čelikom te se uzima vrijednost veće najmanje propisane temperature predgrijavanja.

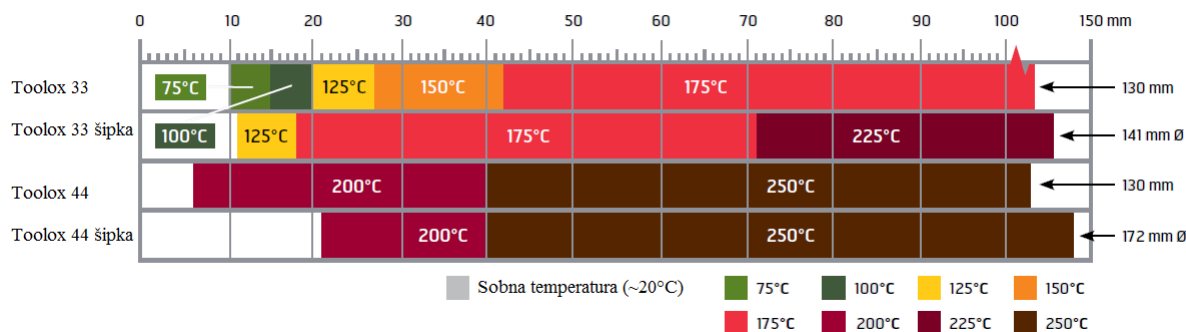
Posebne situacije navedene u nastavku, nalažu da se minimalna temperatura predgrijavanja povisi za 25 °C:

- temperatura okoline manja od 5 °C,
- spojevi s visokom razinom ograničenja,
- zavarivanje u veoma vlažnim uvjetima.

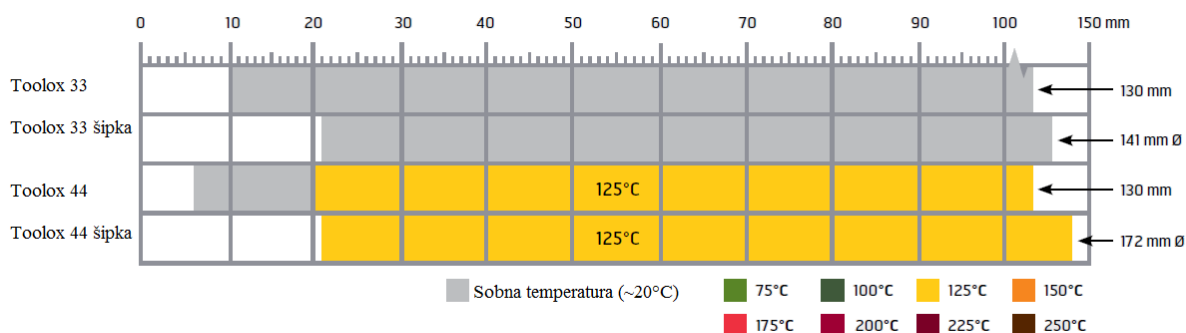
Temperature predgrijavanja za unos topline manji od 1,0 kJ/mm se mogu izračunati pomoću WeldCalc softvera razvijenog od SSAB-a.

Temperatura predgrijavanja za Toolox materijal ne smije prijeći 580 °C radi očuvanja mehaničkih svojstva. To vrijedi za sve Toolox materijale i uvjete zavarivanja.

Temperature predgrijavanja su navedene u tablicama na slikama 14 i 15. Iskazane vrijednosti vrijede samo za unos topline veći od 1,7 kJ/mm.



Slika 14. Minimalna temperatura predgrijavanja i međuprolaza za nelegirane i niskolegirane dodatne materijale [4]



Slika 15. Minimalna temperatura predgrijavanja i međuprolaza za nehrđajuće dodatne materijale [4]

Određivanje temperature predgrijavanja moguće je i pomoću norme HRN EN ISO 1011-2, prema kojoj se za grupu materijala 3.2 pod koju se Toolox svrstava, koristi metoda B za izbjegavanje hladnih pukotina. Prema navedenoj normi i metodi, na nastanak hladnih pukotina utječe kemijski sastav osnovnog materijala, debljina lima, udio vodika u metalu zavara, unos topline te razina naprezanja. Metodom B za izračun temperature predgrijavanja su obuhvaćeni svi faktori osim razine naprezanja jer njihova međusobna ovisnost nije sasvim poznata. Spomenuta temperatura predgrijavanja određuje se prema formuli (2) [22]:

$$\begin{aligned}
 T_p &= T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \\
 &= 697 \times CET + 160 \times \tanh\left(\frac{d}{35}\right) + 62 \times HD^{0,35} \\
 &\quad + (53 \times CET - 32) \times Q - 328, ^\circ C
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

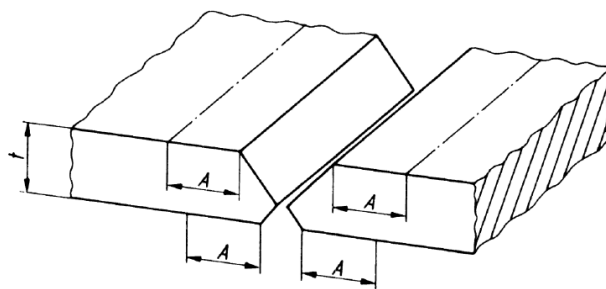
Temperatura predgrijavanja vrijedi za sljedeće uvjete [22]:

$$\begin{aligned}
 CET &= 0,2 \% - 0,5 \% \\
 d &= 10 \text{ mm} - 90 \text{ mm} \\
 HD &= 1 \text{ ml}/100 \text{ g} - 20 \text{ ml}/100 \text{ g} \\
 Q &= 0,5 \text{ kJ}/\text{mm} - 4,0 \text{ kJ}/\text{mm}
 \end{aligned}$$

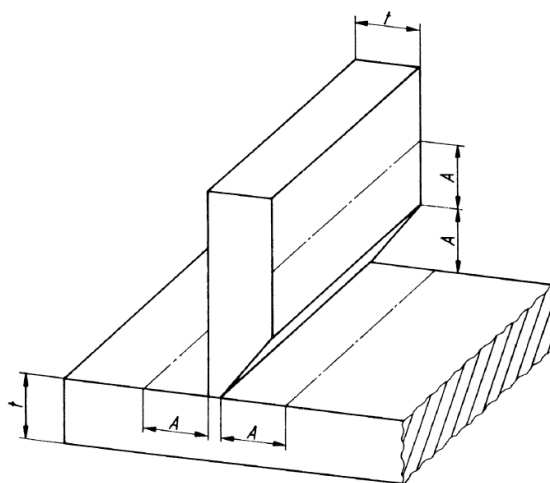
Najbolji način za postizanje temperature predgrijavanja je pomoću peći ili električnih elemenata za predgrijavanje, zato što omogućavaju jednoliko zagrijavanje određenog područja [4].

Provođenje mjerenja temperature predgrijavanja i međuprolazne temperature definirano je normom HRN EN ISO 13916:2017. Pozicija mjerenja se uglavnom nalazi na površini usmjerenoj prema zavarivaču, na udaljenosti $A = 4 \times t$ od ruba spoja (A – max 50 mm, vrijedi za debljine materijala do 50 mm). Shematski prikaz dan na slici 16 i 17. Za debljine materijala iznad 50 mm, temperatura predgrijavanja mjeri se na udaljenosti 75 mm od ruba spoja. Mjerenje temperature predgrijavanja obavlja se na strani suprotnoj od unosa topline ako to uvjeti dozvoljavaju. U suprotnom, mjerenje se obavlja nakon uklanjanja izvora topline istekom određenog vremena potrebnog da se temperatura ustali, to vrijeme iznosi 2 min/25 mm debljine materijala. Upotrebom fiksnih grijača uz onemogućen pristup suprotnoj strani, mjerenje se obavlja na osnovnom materijalu u neposrednoj blizini spoja.

Temperatura međuprolaza mjeri se na metalu zavara ili u njegovoj neposrednoj blizini prije izvođenja prolaza [23].



Slika 16. Pozicije mjerenja temperature predgrijavanja sučeljenog spoja prema HRN EN ISO 13916:2017 [23]



Slika 17. Pozicije mjerenja temperature predgrijavanja kutnog spoja prema HRN EN ISO 13916:2017 [23]

Oprema za mjerenje temperature mora biti navedena u specifikaciji postupka zavarivanja [23]:

- kontaktni termometar (CT),
- optički ili električni uređaji za beskontaktno mjerenje (TB),
- temperaturno osjetljivi materijali, kreda ili boje (TS),
- termoparom (TE).

Primjer označavanja izmjerene temperature u specifikaciji postupka zavarivanja iz norme HRN EN ISO 13916: Temperature ISO 13916:2017 T_p 155 – CT [23].

2.4.9. Naknadna toplinska obrada (PWHT)

Zavarivanje karakterizira neujednačeno zagrijavanje i hlađenje metala zavara i osnovnog materijala, što dovodi do povećanja tvrdoće ZUT-a, veću opasnost od hladnih pukotina i pojavu zaostalih naprezanja [17]. Provođenje naknadne toplinske obrade provodi se s ciljem smanjivanja zaostalih naprezanja i rizika nastanka hladnih pukotina. Ujednačenim zagrijavanjem čelika na dovoljno visoku temperaturu, ali ispod granice strukturnih promjena te zatim ujednačenim hlađenjem dolazi do popuštanja zaostalih naprezanja. Hladne pukotine nastaju pri hlađenju čelika ispod 300 °C, a provedbom zagrijavanja odmah nakon zavarivanja produljuje se vrijeme difundiranja vodika iz područja zavarenog spoja u okolni materijal. Potrebna temperatura za sprječavanje hladnih pukotina je niža od one kod zagrijavanja za redukciju zaostalih naprezanja, što smanjuje nepotrebne troškove zagrijavanja.

Toolox čelik zbog svojih generalnih svojstva strukture zavara u većini slučajeva ne zahtijeva provedbu naknadne toplinske obrade. No ako čelik ide na strojnu obradu, uklanjanjem materijala dolazi do redistribucije naprezanja, što dovodi do dimenzijskih pomaka. Taj problem se rješava uklanjanjem zaostalih naprezanja prije strojne obrade. Preporuke za provođenje postupka naknadne toplinske obrade su dane u tablici 8 [4], [11], [19].

Tablica 8. Preporuke za postupak naknadne toplinske obrade [4]

Čelik	Temperatura držanja, °C	Brzina zagrijavanja i hlađenja, °C/h	Vrijeme držanja, min/mm*	Prikladno vrijeme na temperaturi držanja, h
Toolox 33	550-590	100	2	1-6
Toolox 44	540-580	100	2	1-6

*debljina jednog lima ili min/mm promjera

2.4.10. Toolox prajmer

Toolox čelik može biti isporučen s nanesenim prajmerom za zaštitu od korozije. Prajmer sadrži mali udio cinka i zbog toga je moguće provoditi zavarivanje bez njegovog uklanjanja uz blago povećanu poroznost zavara. Korištenjem REL postupka zavarivanja ili MAG postupka s bazičnim praškom punjenom žicom dobiva se zavar s najmanjim porozitetom. Prajmer se jednostavno može ukloniti okolo mjesta zavarivanja četkanjem ili brušenjem. Prostor predviđen za zavarivanja Toolox čelika s prajmerom mora biti dobro ventiliran radi zaštite zavarivača [4].

2.5. Toplinsko rezanje

Toolox čelik zbog svoje male količine legiranih elemenata ima poželjna svojstva za toplinsko rezanje, kao što je otpornost na hladne pukotine tijekom rezanja. Utjecaj legiranih elemenata je sličan između zavarivanja i rezanja. Niski ekvivalent ugljika govori o povećanoj otpornosti Toolox čelika na toplinsko rezanje. Dodatna prednost Toolox čelika je njegova visoka žilavost, što dodatno smanjuje rizik od pojave pogreška tijekom toplinskog rezanja [4]. Toplinsko rezanje Toolox čelika moguće je izvoditi svim postupcima, uz istu proceduru i parametre kao i za meki čelik, uz iznimke [4]:

- Za plinsko i plazma rezanje potrebno je uzeti u obzir mjere za sprječavanje nastanka hladnih pukotina. Plin korišten za plazma rezanja mora biti kisik radi postizanja najbolje kvalitete ruba. Korištenje sekundarnog plina nema posebna ograničenja. Zrak i čisti kisik su prikladni za sve uobičajene tipove čelika.
- Naknadna toplinska obrada ruba se preporučuje radi povećanja strojne obradivosti ruba i sprječavanja nastanka hladnih pukotina. Naknadna toplinska obrada nije potrebna za plazma i laserska rezanja, ali je poželjna nakon plinskog rezanja.

Princip nastajanja hladnih pukotina pri toplinskom rezanju isti je kao i kod zavarivanja, što znači da je potrebno ostvariti tri uvjeta istovremeno kako bi došlo do njihove pojave. A to su:

- prisutnost vodika u čeliku,
- prevelika zaostala naprezanja,
- krhka mikrostruktura.

Mjere potrebne za izbjegavanje nastanka hladnih pukotina i poboljšanja strojne obradivosti čelika [4]:

1. predgrijavanje mjesta rezanja,
2. toplinsko rezanje,
3. naknadna toplinska obrada ruba,
4. hlađenje na zraku do temperature okoline,
5. procjena procedure rezanja.

Rezultat ovih mjera je preseljenje vodika iz ZUT-a u okolni osnovni materijal.

Lasersko rezanje se odvija bez predgrijavanja, jer nije potrebno za izbjegavanje hladnih pukotina, i u suprotnom dolazi do pogoršanja kvalitete ruba [4].

2.5.1. Predgrijavanje

Predgrijavanje služi samo za izbjegavanje nastanka hladnih pukotina. Predgrijavanje se može izvoditi pomoću peći, plamenika ili električnih elemenata za predgrijavanje. Dozvoljene temperature za predgrijavanje vidljive su u tablici 9.

Korištenjem plamenika za predgrijavanje potrebno je obratiti pozornost da se kontinuirano pomiču kako se ne bi prekoračila maksimalna dozvoljena temperatura čelika zbog neujednačenog zagrijavanja. Predgrijavanjem u peći ostvaruje se ujednačeno zagrijavanje cijelog radnog komada te je to i najbolja metoda za predgrijavanje.

Minimalna temperatura držanja definirana je vremenom potrebnim da suprotna strana čelika dosegne potrebnu temperaturu. Praksa pronalazi rješenje u izvođenju grijanja preko noći radi priprema čelika za zavarivanje i rezanje idući dan [4].

Tablica 9. Dozvoljene temperature predgrijavanja i naknadne toplinske obrade za Toolox [4]

	Predgrijavanje		Naknadna toplinska obrada
Čelik	Min. temperatura predgrijavanja/ međuprolaza, °C	Max. temperatura predgrijavanja/ međuprolaza, °C	Temperaturni interval za naknadnu toplinsku obradu, °C
Toolox 33	150	580	560-580
Toolox 44	225	580	560-580

2.5.2. Naknadna toplinska obrada

Naknadna toplinska obrada obavlja se u što kraćem roku nakon rezanja. Izvodi se iz istog razloga kao i predgrijavanje, pomaže u preseljenju vodika iz ZUT-a u okolini osnovni materijal. Vrijeme za početak izvođenja naknadne toplinske obrade ne smije biti veće od 60 min nakon rezanja. Potrebna temperatura dana je u tablici 9, uz preporuku korištenja peći radi jednostavnijeg održavanja ujednačene temperature obratka.

Vrijeme držanja se određuje prema debljini materijala, 5 min/mm, ili barem 60 min. Početak mjerenja kreće kada obradak postigne potrebnu temperaturu iz tablice 9. Uobičajeno je dovoljno držanje do 2 h [4].

2.5.3. Procjena procedure rezanja

Kontroliranje postupka obavlja se mjerenjem tvrdoće osnovnog materijala i ZUT-a. Tvrdoća ZUT-a mora biti ista ili približno odgovarati tvrdoći osnovnog materijala. U slučaju prevelikog odstupanja, korigirati naknadnu toplinsku obradu [4].

2.5.4. Strojna obrada nakon plinskog rezanja

Strojnom obradom nakon plinskog rezanja smanjuje se rizik nastanka hladnih pukotina i uklanjaju se zaostala naprezanja. Dubina strojne obrade iznosi barem koliko i dubina ZUT-a, odnosno mora biti dostatna da se dođe do osnovnog materijala. To znači uklanjanje barem 10 mm čelika od ruba. Obradu je potrebno izvesti u što kraćem roku nakon rezanja. Naknadna strojna obrada poskupljuje troškove i produljuje vrijeme pripreme spoja [4], [24].

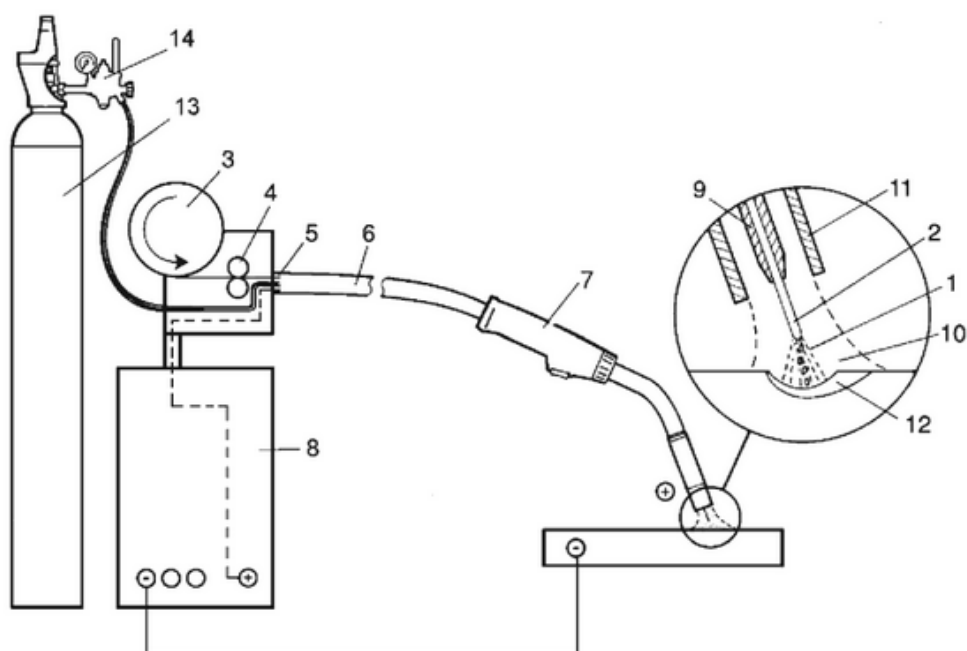
2.5.5. Rezanje abrazivnim vodenim mlazom

Osim toplinskog rezanja nudi se i mogućnost rezanja abrazivnim vodenim mlazom. Vodeni mlaz pomiješan s abrazivnim česticama odvaja materijal. Korištenjem ovog postupka eliminira se zona utjecaja topline i samim time rizik za nastanak hladnih pukotina je znatno manji. Potreba za predgrijavanjem i naknadnom toplinskom obradom se eliminira. Posljedica je specifična tekstura površine pri rezanju debelih materijala. Nema negativan utjecaj na okoliš. Za rezanje Toolox čelika koriste se isti parametri kao i za meki čelik. [4], [25].

3. MAG ZAVARIVANJE

MAG postupak zavarivanja svrstava se pod elektrolučne postupke zavarivanja s taljivom metalnom elektrodom pod zaštitom plina. Električni luk se uspostavlja između taljive metalne elektrode tj. žice i osnovnog materijala te se zajedno tale i čine zavareni spoj. MAG postupak zavarivanja koristi aktivni zaštitni plin (Metal Active Gas), tj. ugljični dioksid ili mješavine s većinskim udjelom ugljičnog dioksida. Dodatni materijal je u obliku žice koja je puna ili praškom punjena [26], [27]. MAG postupak zavarivanja jedan je od češće upotrebljivanih postupaka u zavarivanju, navarivanju i reparaturnom zavarivanju većine materijala ponajviše zahvaljujući svojoj fleksibilnosti i niskoj cijeni [28].

Oprema potrebna za MAG zavarivanja i princip rada postupka prikazani su slikom 18. Električni luk (1) uspostavlja se između metalne elektrode tj. žice (2) i osnovnog materijala. Dodatni materijal se konstantno dovodi od namotaja žice (3), pomoću pogonskih kotačića (4) kroz fleksibilnu vodilicu (5) unutar polikabela (6) do pištolja za zavarivanje (7). Izvor za zavarivanje (8) provodi struju do kontaktne sapnice (9) preko koje se zatvara strujni krug između dodatnog (+ pol) i osnovnog materijala (- pol). Zaštitni plin (10) izlazi kroz sapnicu za plin (11) koja okružuje kontaktnu sapnicu i štiti proces zavarivanja, odnosno električni luk i talinu. Zaštitni plin se dovodi iz boce (13) pomoću crijeva određenim protokom reguliranim ventilom s mjerачem protoka (14) [26], [29].



Slika 18. Oprema i princip rada MAG postupka zavarivanja [29]

Parametri zavarivanja [29]:

- struja,
- napon,
- brzina zavarivanja,
- brzina žice (proporcionalna jakosti struje),
- slobodni kraj žice,
- zaštitni plin,
- protok zaštitnog plina,
- induktivitet,
- tehnika rada: lijeva i desna.

Prednosti i nedostaci MAG postupka zavarivanja navedeni su u tablici 10.

Tablica 10. Prednosti i nedostaci MAG zavarivanja [30]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
<ul style="list-style-type: none"> - sve vrste materijala, - sve debljine materijala, - nema ograničenja položaja zavarivanja, - zavarivanje u radionici i na terenu, - široki izbor parametara i načina prijenosa metala, - sinergijski uređaji, - različite plinske mješavine, - primjena praškom punjene žice, - mogućnost automatizacije, - visoka učinkovitost i produktivnost, - mogućnost lemljenja. 	<ul style="list-style-type: none"> - složeni uređaji, - problemi kod dovodenja žice, - rad na terenu otežan zbog vanjskih uvjeta što dovodi do slabe zaštite (vjetar), - veća mogućnost pogreške zbog neodgovarajuće tehnike rada i izbora parametara, - rasprskavanje kod zavarivanja kratkim spojevima.

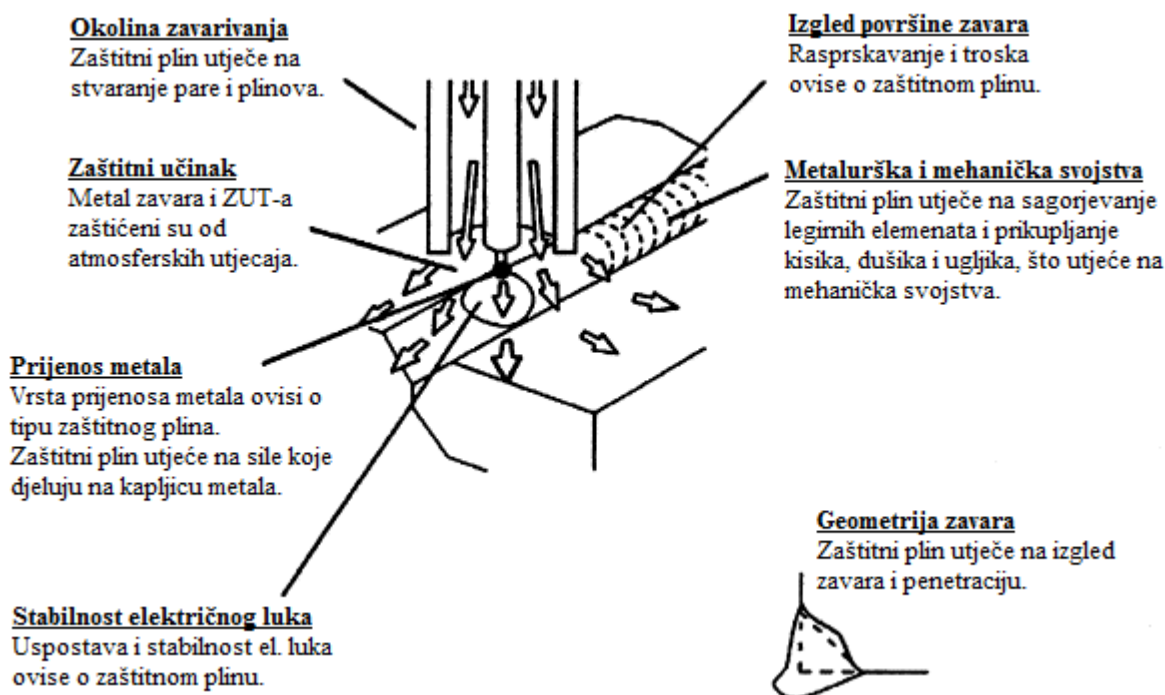
3.1. Zaštitni plin

Zaštitni plin kod MAG postupka zavarivanja predstavlja parametar koji ima ulogu ostvarivanja zaštitne atmosfere u prijenosu metala od elektrode do zavara, aktivno sudjeluje u

kemijskim reakcijama koje se odvijaju u talini te utječe na konačni izgled zavora [31]. Sve funkcije i utjecaji zaštitnog plina na postupak zavarivanja nabrojane su u nastavku i shematski prikazane na slici 19.

Korištenje zaštitnog plina pri zavarivanju ima nekoliko funkcija [32], [33]:

- zaštita taline od atmosferskog utjecaja,
- kontroliranje razine rasprskavanja kapljica metala,
- definiranje geometrije zavora,
- definiranje penetracije zavora,
- određivanje količine depozita dodatnog materijala,
- određivanje načina prijenosa metala,
- određivanje viskoziteta i kvašenje taline,
- definiranje mehaničkih svojstva zavora,
- određivanje kemijskog sastava zavora,
- određivanje količine pare pri zavarivanju,
- zaštitni plin - esencijalna varijabla kod certifikacije postupka zavarivanja.



Slika 19. Prikaz utjecaja zaštitnog plina na postupak zavarivanja [34]

3.1.1. Trokomponentne plinske mješavine

Plinske mješavine objedinjuju prednosti pojedinih plinova. Korištenje plinskih mješavina omogućava kvalitetnije izvođenja procesa zavarivanja i postizanje kvalitetnijeg zavarenog spoja. Dvokomponentne mješavine primjerice C18, mješavina argona (82 %) i ugljikovog dioksida (18 %) su raširene i njihove prednosti su već dosta poznate u industriji, a jednako tako raste i primjena trokomponentnih mješavina [32].

Eksperimentalni dio uključuje ispitivanje utjecaja dva trokomponentna plina C6 X1 i C12 X2 (tablica 11) na zavarljivost Toolox 33 čelika. Plinska mješavina C6 X1 u usporedbi s C18 mješavinom minimalizira rasprskavanje i prskotine su manje mase, kritična struja je manjeg iznosa, nastanak troske je smanjen te se postižu bolja mehanička svojstva. C12 X2 plinska mješavina osigurava manju količinu i masu prskotina, kritičnu struju te stabilan luk i bolju penetraciju [32]. Karakteristike pojedinih plinova iz mješavine navedene su u nastavku poglavlja.

Tablica 11. Sastav trokomponentne plinske mješavine C6 X1 i C12 X2

Zaštitni plin	Ar	CO ₂	O ₂	Grupa plinova prema HRN EN ISO 14175
C6 X1	93 %	6 %	1 %	M24
C12 X2	86 %	12 %	2 %	M24

Argon je inertan plin, velike gustoće i molekularne težine. Plinovi veće gustoće pružaju bolju zaštitu od atmosferskih utjecaja. Niske ionizacijske energije i toplinske vodljivosti. Toplinska vodljivost utječe na oblik jezgre i geometriju električnog luka, što je dalje povezano s oblikom penetracije. Električni luk je nestabilan i penetracija je lošeg oblika zbog uske zone luka. Dobiva se iz zraka gdje se nalazi u udjelu od 0,94 % te je dobre dostupnosti i relativno jeftin.

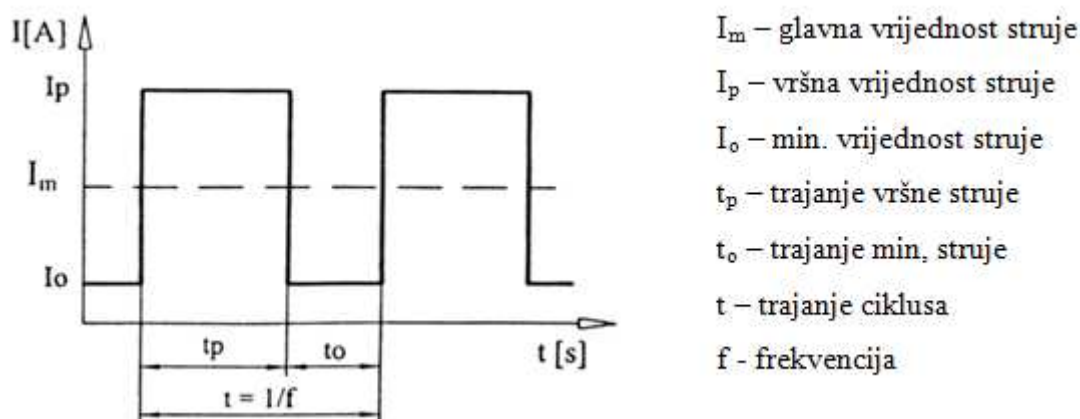
Ugljikov dioksid je oksidirajući plin s visokim naponom električnog luka, velike gustoće s dobrim zaštitnim učinkom i toplinskom vodljivošću. Električni luk je nestabilan, ali je moguća stabilizacija s argonom i helijem te se metal prenosi kapljicama velikog volumena što rezultira rasprskavanjem. Čisti CO₂ ne podržava štrcajući električni luk, kao ni impulsno zavarivanje, rješenje je korištenje mješavina. Dobiva se ekstrakcijom iz različitih kemijskih procesa i para iz energetske postrojenja, dobre je dobavljalivosti i jeftin.

Kisik je oksidirajući plin korišten kao dodatak plinske mješavine u malim količinama. Ionizacijska energija mu je niska kao i toplinska vodljivost. Ostvaruje prijenos metala sitnim

kapljicama smanjenjem površinskih napetosti, snižava prijelaznu struju, poboljšava kvašenje i dobiva se zaglađeniji zavar. Stabilizira električni luk s argonom, jeftin je, a dobiva se separacijom iz zraka [27], [32], [35].

3.2. MAG impulsno zavarivanje

Najbolji prijenos metala ostvaruje se štrcajućim električnim lukom, no on se ostvaruje na strujama iznad 240 A. Tako visoke struje unose puno topline u materijal i nije moguće zavarivanje tankih materijala zbog mogućnosti propaljivanja. Tanki materijali zavaruju se nižim strujama u prijenosu metala kratkim spojevima što rezultira povećanim rasprskavanjem zbog posljedice naglog gašenja električnog luka. Razvoj impulsnog zavarivanja omogućava kontrolirani prijenos metala slobodnim letom pri niskim i visokim strujama zavarivanja. To je moguće zbog elektromagnetske sile na vrhu žice koja se javlja pri vršnoj struji te otkida kapljicu i usmjerava je prema talini [27], [36].



Slika 20. Struja u ovisnosti o vremenu kod impulsnog zavarivanja [37]

Ovisnost struje o vremenu kod impulsnog zavarivanja prikazan je na slici 20. Glavna prednost impulsnog zavarivanja je u veoma malom unosu topline zbog hlađenja zavara između impulsa, uz prednosti štrcajućeg električnog luka. Primjenjiv je u svim položajima zavarivanja, ostvaruje se dobar izgled zavara zbog prijenosa metala ujednačenim sitnim kapljicama bez rasprskavanja. Dobivanje zavara dobre kvalitete je moguće i s manje vještim zavarivačima, sinergijski uređaji za zavarivanje omogućavaju korištenje tvornički provjerenih modela za dobivanje optimalnih rezultata [36], [38].

4. EKSPERIMENTALNI RAD

4.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je s ciljem utvrđivanja utjecaja temperature predgrijavanja i plinske mješavine na zavarljivost Toolox 33 čelika. Eksperimentalni rad proveden je u laboratoriju Katedre za zavarene konstrukcije, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Zavarivanje Toolox 33 čelika izvedeno je MAG postupkom zavarivanja impulsnim strujama, uz vođenje pištolja pomoću sustava za automatsko zavarivanje.

Uzorci Toolox 33 čelika, debljina 10 mm i 20 mm, izrezani su postupkom plazma rezanja te dodatno tračnom pilom na konačnu dimenziju 175x150 mm. Uzorci su očišćeni od korozije pomoću tračne i kutne brusilice te očišćeni od SHIP-a pomoću alkohola.

Zavarivanje ukupno 12 uzoraka u dvije debljine izvedeno je s tri različite plinske mješavine: C18, C12 X2 i C6 X1 te s i bez predgrijavanja na temperaturu 70 °C u peći. Unos topline održavan je konstantnim tijekom zavarivanja svih uzoraka.

Analiza utjecaja plina i temperature predgrijavanja provedena je izradom makroizbrusaka i ispitivanjem tvrdoće.

4.1.1. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je Toolox 33 čelik. Mehanička svojstva isporučenog čelika prikazana su u tablici 12, a kemijski sastav u tablici 13. Čelik je isporučen u debljinama 10 i 20 mm te su izrezane ploče dimenzija 175x150 mm od kojih se izradilo 12 uzoraka za zavarivanje.

Tablica 12. Mehanička svojstva isporučenog Toolox 33 čelika

Debljina, mm	Tvrdoća, HB	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Istezanje A_5 , %	Udarni rad loma, Charpy V, J
10	305	832	920	11	83-92 (7,5x10)
20	300	824	918	12	121-137 (10x10)

Tablica 13. Kemijski sastav isporučenog Toolox 33 čelika

Kemijski sastav, %	Toolox 33: 10 mm	Toolox 33: 20 mm
C	0,22	0,22
Si	1,08	1,07
Mn	0,80	0,78
P	0,009	0,009
S	0,001	0,001
Cr	1,07	1,04
Ni	0,06	0,05
Mo	0,200	0,201
V	0,104	0,098
Ti	0,014	0,014
Cu	0,01	0,01
Al	0,011	0,009
Nb	0,018	0,018
B	0,002	0,002
N	0,003	0,003

4.1.2. Dodatni materijal

Dodatni materijal korišten pri zavarivanju uzoraka MAG postupkom je puna žica MIG 75 promjera 1,2 mm. MIG 75 žica koristi se za zavarivanje čelika povišene čvrstoće, a proizvodi je Elektroda Jesenice. Kemijski sastav isporučene MIG 75 žice prikazan je u tablici 14, a mehanička svojstva u tablici 15.

Tablica 14. Kemijski sastav isporučene MIG 75 žice

Kemijski sastav, %	EN ISO	Si	Cr	Ni	Mo
MIG 75	16834-A	0,60	0,25	1,50	0,30

Tablica 15. Mehanička svojstva isporučene MIG 75 žice

Dodatni materijal	EN ISO	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Istezanje A_5 , %
MIG 75	16834-A	>690	770-940	>17

4.1.3. Oprema za zavarivanje

4.1.3.1. Uređaj za MAG impulsno zavarivanje

Zavarivanje uzoraka izvedeno je uređajem za zavarivanje „DAIHEN VARSTROJ WB-P500L“ prikazanim na slici 21. Specifikacije uređaja prikazane su na slici 22.



Slika 21. Uređaj za MAG impulsno zavarivanje „DAIHEN VARSTROJ WB-P500L“

DAIHEN VARSTROJ d.d., SLO - Lendava		DAIHEN VARSTROJ	
WB-P500L		N° 1039231	
3~		EN 60974-1	
		30 A / 15.5 V - 500 A / 39.0 V	
S	U ₀ 80 V	X	60% 100%
		I ₂	500 A 388 A
		U ₂	39.0 V 33.4 V
 3 - 50Hz	U ₁ = 3 x 400 V	I _{1,max} = 36.0 A	I _{1,eff} = 27.9 A
IP23S	CE		

Slika 22. Specifikacije „DAIHEN VARSTROJ WB-P500L“

4.1.3.2. „BUG-O Systems“ sustav za automatsko zavarivanje

Sustav za automatsko zavarivanje omogućava konstantno pravocrtno kretanje pri zavarivanju uz ponovljivost na svih 12 uzoraka. Moguće je podešavanje brzine i položaja MAG pištolja za zavarivanje. Na slici 23 prikazan je postavljeni BUG-O sustav u Laboratoriju za zavarivanje.



Slika 23. „BUG-O Systems“ sustav za automatsko zavarivanje

4.1.4. Oprema za ispitivanje

4.1.4.1. Fotoaparati Cannon 1000D

Mjerenje i analiza makroizbrusaka uzoraka zavara odrađeno je pomoću fotografija uslikanih fotoaparatom Cannon 1000D prikazanim na slici 24.



Slika 24. Fotoaparar Cannon 1000D

4.1.4.2. Uređaj za mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je izmjerena po Vickersu na uređaju „Reicherter Brivisor KL 2“ (slika 25). Tvrdoća je izmjerena na makroizbruscima u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara.



Slika 25. Uređaj za mjerenje tvrdoće „Reicherter Brivisor KL 2“

4.1.5. Postupak ispitivanja

Ispitivanju je prethodila analiza i planiranje izvođenja eksperimenta. Utvrđeno je da je potrebno ukupno 12 uzoraka za provedbu ispitivanja te su numerirani sukladno planu eksperimenta prema tablici 16.

Tablica 16. Plan eksperimenta

Oznaka uzoraka	Debljina	Plinska mješavina	Predgrijavanje
1	10 mm	C18	/
2	10 mm	C12 X2	/
3	10 mm	C6 X1	/
4	10 mm	C18	70 °C
5	10 mm	C12 X2	70 °C
6	10 mm	C6 X1	70 °C
7	20 mm	C18	/
8	20 mm	C12 X2	/
9	20 mm	C6 X1	/
10	20 mm	C18	70 °C
11	20 mm	C12 X2	70 °C
12	20 mm	C6 X1	70 °C

4.1.5.1. Priprema uzoraka

Površina isporučenih limova bila je pod utjecajem korozijskog procesa te prvi korak u pripremi uzoraka bilo je odstranjivanje produkata korozije pomoću tračne i kutne brusilice (slika 26). Usporedba isporučenog i očišćenog lima prikazana je na slici 27. Priprema uzoraka je uključivala skraćivanje plazmom izrezanih uzoraka lima s dimenzije 350x150 mm pomoću tračne pile prikazane na slici 28, na dimenziju lima 175x150 mm.



Slika 26. Obrada površine pomoću tračne i kutne brusilice

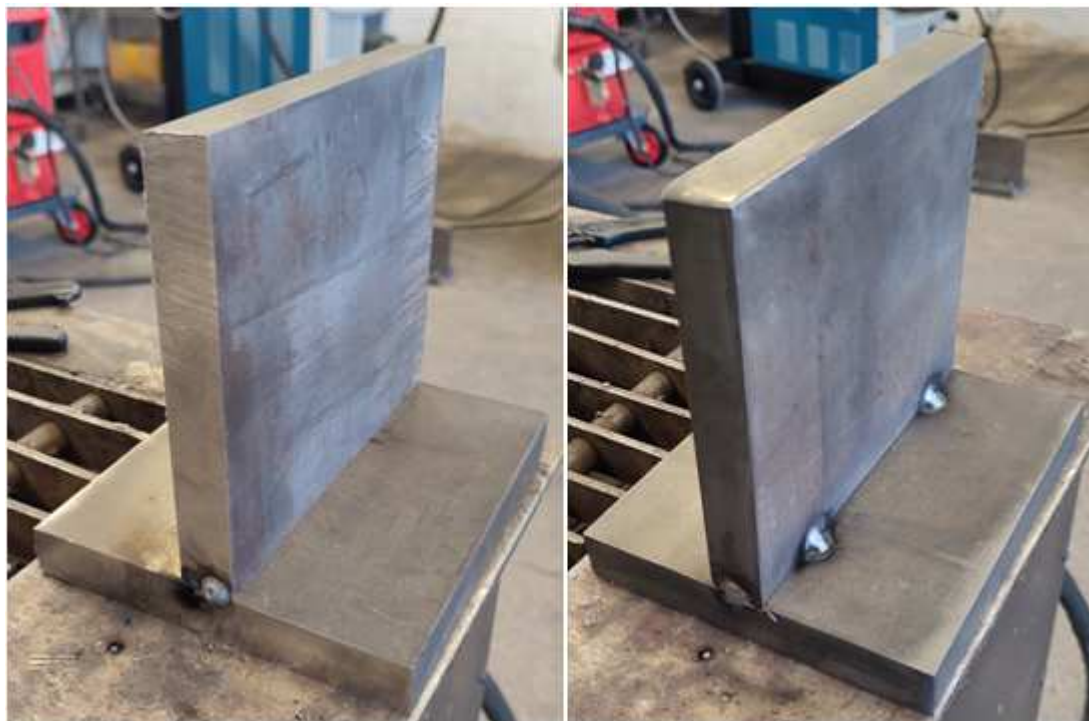


Slika 27. Stanje površine isporučenog lima (gornji lim) i očišćenog lima (donji lim)



Slika 28. Skraćivanje uzoraka pomoću tračne pile

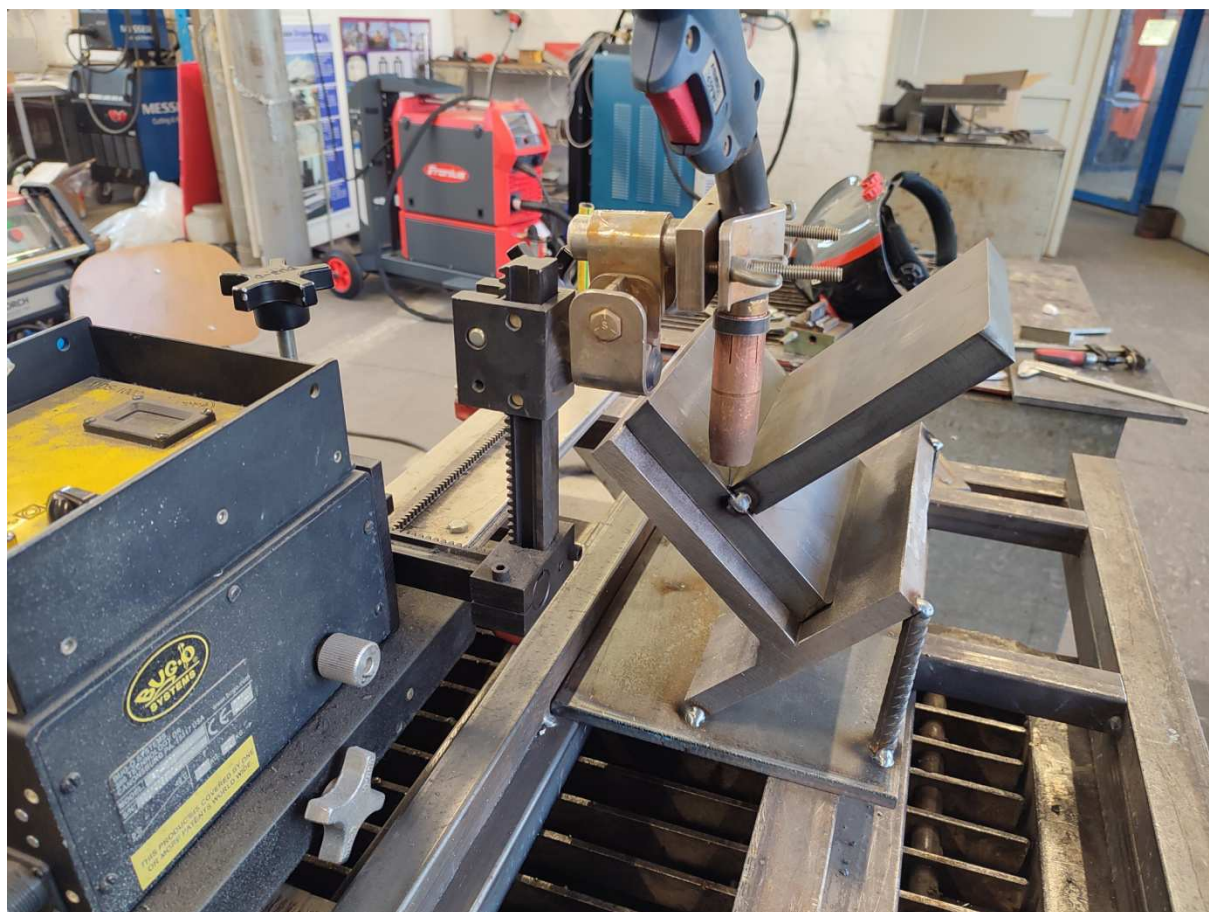
Skraćeni limovi, ukupno 24 komada, očišćeni su od SHIP-a pomoću alkohola, nakon čega je slijedilo pripajanje limova. Pripojeni limovi prikazani su na slici 29. Prvo su izvedeni pripoji s bočne strane lima radi postizanja okomitosti T-spoja, a zatim dva pripoja na strani suprotnoj od izvedbe zavara kako bi se smanjile deformacije limova. Pripremljeni uzorci označeni su prema tablici 16.



Slika 29. Pripojeni uzorak

4.1.5.2. Priprema radnog mjesta za zavarivanje uzoraka

Uzorci su zavareni u PA položaju, što definira i pripremu radnog mjesta. Priprema je uključivala izradu konstrukcije pomoću koje se osigurava pravilno pozicioniranje uzoraka, montažu sustava za automatsko zavarivanje „BUG-O Systems“ te pričvršćivanje MAG pištolja na navedeni sustav. Pripremljeno radno mjesto prikazano je na slici 30.



Slika 30. Pripremljeno radno mjesto za zavarivanje uzoraka

4.1.6. Parametri zavarivanja

Tijekom cijelog ispitivanja parametri navedeni u tablici 17 su konstantni kako bi se mogao analizirati utjecaj plinske mješavine temperature predgrijavanja i debljine uzorka.

Tablica 17. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja	Postavljene vrijednosti	Stvarne vrijednosti
Struja zavarivanja	220 A	217-224 A
Napon zavarivanja	25,8 V	25,6-27,1 V
Brzina zavarivanja	25 cm/min	25 cm/min
Unos topline	1,09 kJ/mm	1,07-1,17 kJ/mm
Vrsta struje	DC Pulse	DC Pulse
Promjer žice	1,2 mm	1,2 mm
Brzina žice	7,5 m/min	7,4-7,7 m/min
Slobodni kraj žice	15 mm	15 mm
Protok plina	20 L/min	20 L/min
Nagib elektrode	90°	90°
Položaj zavarivanja	PA	PA

Temperatura predgrijavanja određena je prema normi HRN EN ISO 1011-2. Temperatura predgrijavanja izračunata je prema izrazu (2), unos topline prema izrazu (1), a CET prema izrazu (3), izračun prikazan u nastavku:

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

$$Q = k \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000} = 0,8 \times \frac{25,8 \times 220}{25} \times \frac{60}{1000} = 10,898 \frac{kJ}{cm} = 1,0898 \frac{kJ}{mm}$$

$$\begin{aligned} T_{p10} &= T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \\ &= 697 \times 0,3755 + 160 \times \tanh\left(\frac{10}{35}\right) + 62 \times 1^{0,35} + (53 \times 0,3755 - 32) \times 1,0898 \\ &\quad - 328 \\ &= 27,05 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$CET_{10} = 0,22 + \frac{(0,8 + 0,2)}{10} + \frac{(1,07 + 0,01)}{20} + \frac{0,06}{40} = 0,3755 \%$$

$$HD = 1 \text{ ml/100 g}$$

$$d = 10 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
 T_{p20} &= T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \\
 &= 697 \times 0,3719 + 160 \times \tanh\left(\frac{20}{35}\right) + 62 \times 1^{0,35} + (53 \times 0,3719 - 32) \times 1,0898 \\
 &\quad - 328 \\
 &= 62,45 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$CET_{20} = 0,22 + \frac{(0,78 + 0,201)}{10} + \frac{(1,04 + 0,01)}{20} + \frac{0,05}{40} = 0,3719 \%$$

$$HD = 1 \text{ ml/100 g}$$

$$d = 20 \text{ mm}$$

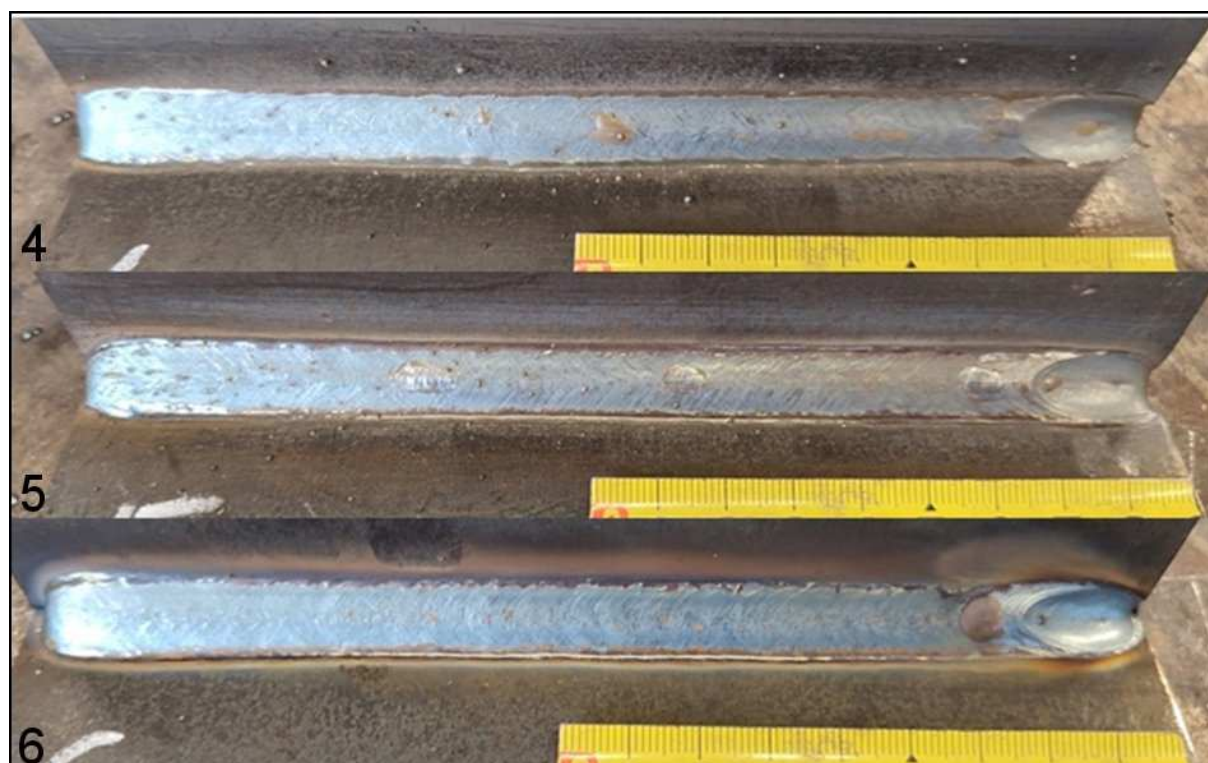
Određena je temperatura predgrijavanja na 70 °C za debljine 10 mm i 20 mm. Razlog tome je što izračunata temperatura predgrijavanja za lim debljine 10 mm graniči s temperaturom okoline i ne bi se dobio značajan rezultat za analizu. Izračunate temperature se nalaze ispod granične temperature predgrijavanja za Toolox čelik, a ona iznosi 580 °C.

4.2. Rezultati ispitivanja

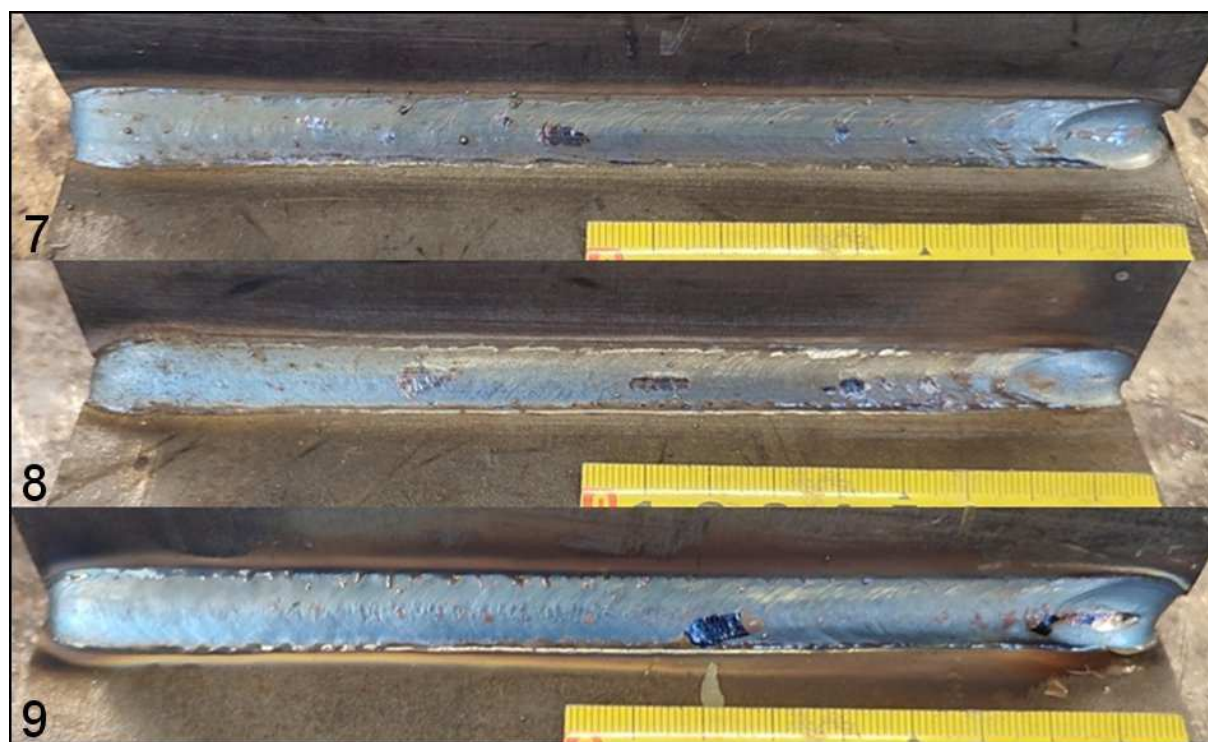
Izgled zavara prikazan je na slikama 31, 32, 33 i 34.



Slika 31. Zavareni spojevi 1, 2, 3



Slika 32. Zavareni spojevi 4, 5, 6

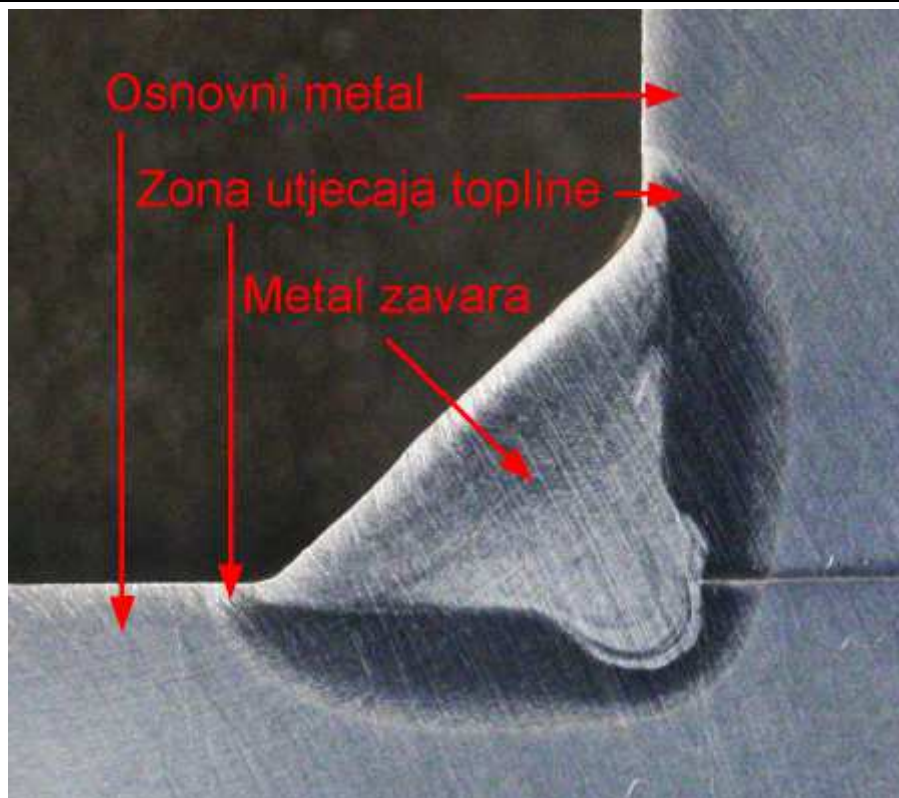


Slika 33. Zavareni spojevi 7, 8, 9



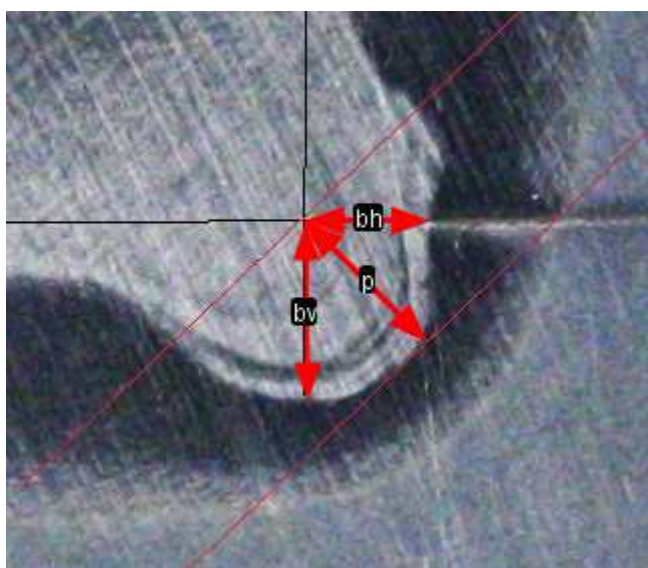
Slika 34. Zavareni spojevi 10, 11, 12

Sljedeći korak ispitivanja je izrada makroizbrusaka. Uzorci su odrezani na tračnoj pili, izbrušeni i ispolirani. Zatim su nagrizeni kako bi se jasno razlikovale granice osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala zavara (slika 35). Nagrizanje uzoraka se odvijalo u 3 postotnom nitalu, odnosno otopini dušične kiseline u etanolu. Postupku nagrizanja je prethodilo čišćenje u alkoholu, nakon čega se 3 sekunde uronila ispolirana površina u otopinu nitala te nakon toga slijedilo je umakanje u alkohol te ispiranje s toplom vodom.

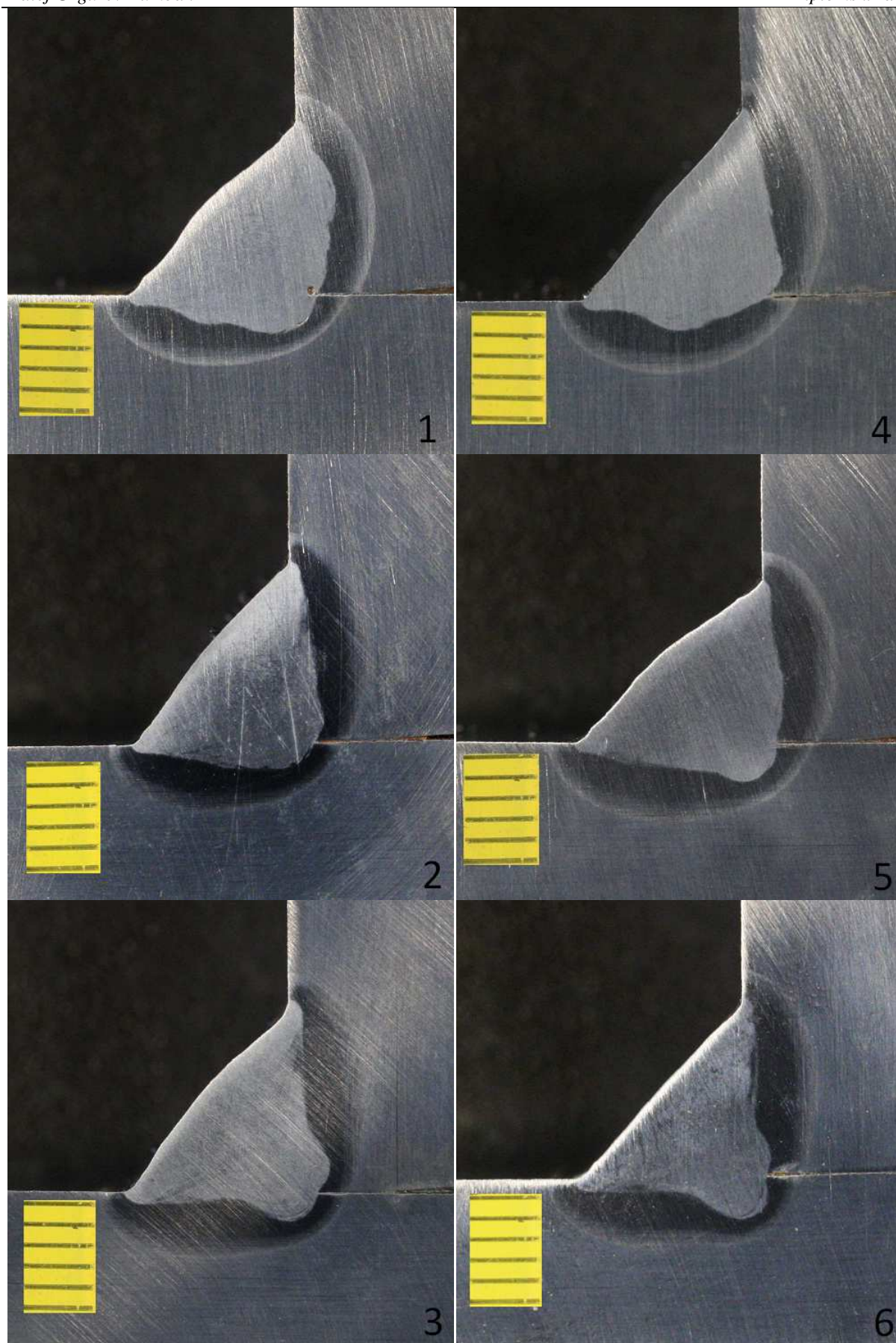


Slika 35. Makroizbrusak uzorka

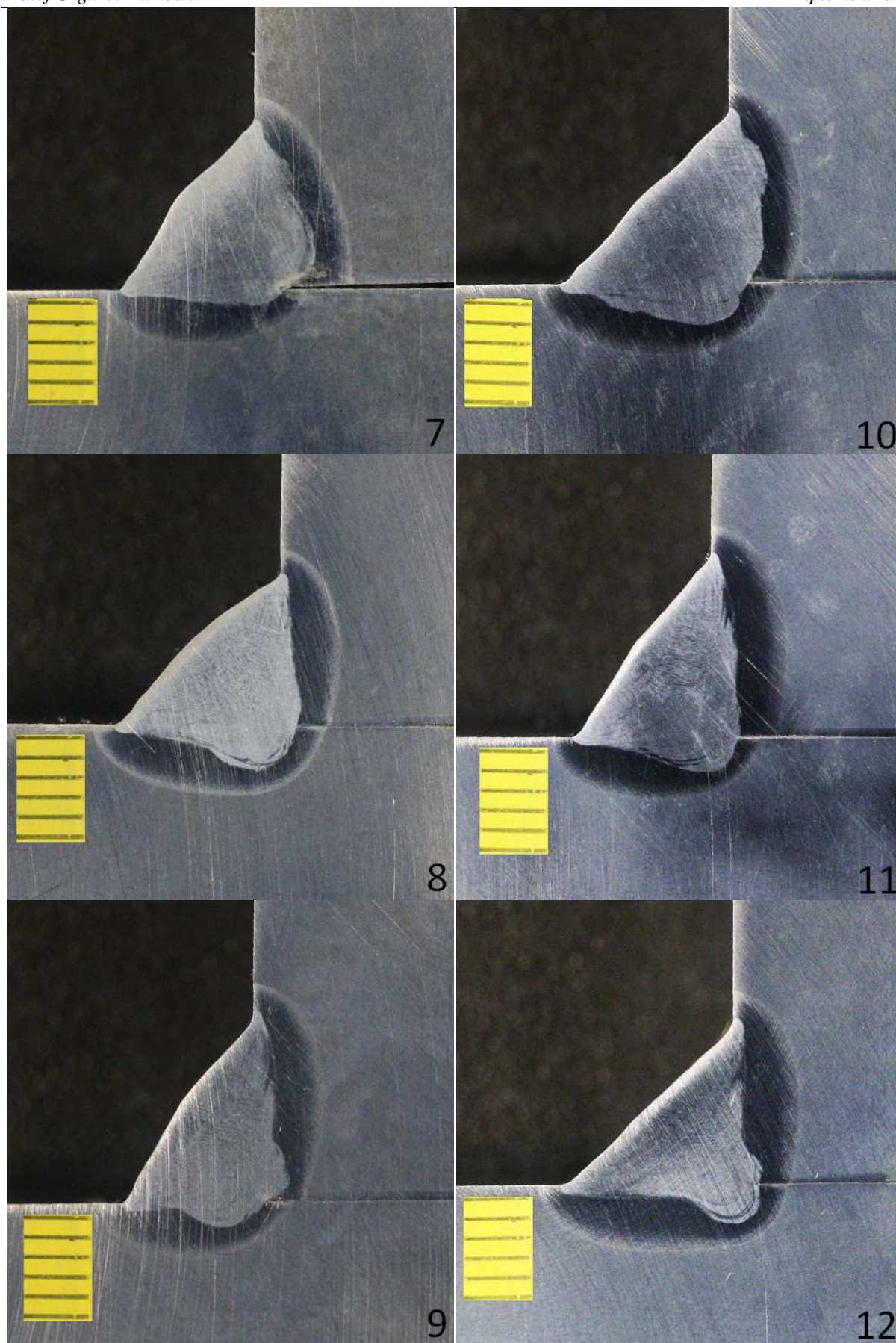
Makroizbrusak nakon postupka nagrizanja pokazuje jasno vidljiv oblik zavara i zone utjecaja topline te je moguće izmjeriti geometrijske karakteristike zavara. Za analizu je korišten fotoapararat Cannon 1000D prikazan na slici 24 te su dobivene slike pomoću kojih se u programu ImageJ mogu točno izmjeriti geometrijske značajke zavara. Makroizbrusci uzoraka prikazani su na slikama 37 i 38, postupak mjerenja pomoću ImageJ programa na slici 36, a rezultati mjerenja u tablici 18 i 19.



Slika 36. Postupak mjerenja penetracije pomoću ImageJ programa



Slika 37. Makroizbrusci 1-6



Slika 38. Makroizbrusci 7-12

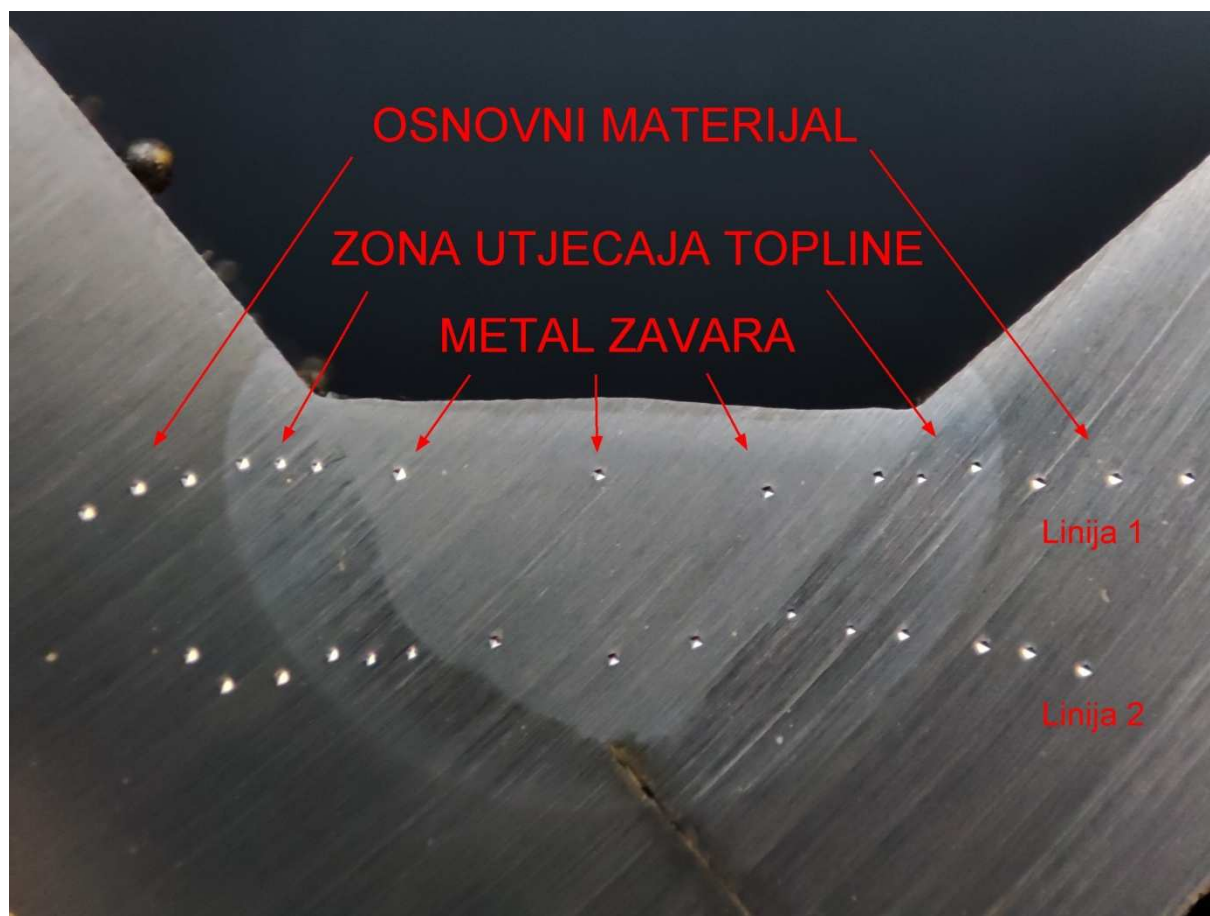
Tablica 18. Rezultati mjerenja penetracije

	Uzorak	Penetracija, p	Uzorak	Penetracija, p
Debljina	Bez predgrijavanja		Predgrijavanje na 70 °C	
10 mm	1	1,22 mm	4	0,69 mm
	2	1,06 mm	5	1,09 mm
	3	1,35 mm	6	1,81 mm
20 mm	7	1,78 mm	10	1,34 mm
	8	1,34 mm	11	1,63 mm
	9	1,12 mm	12	1,92 mm

Tablica 19. Rezultati mjerenja bočne penetracije

Debljina	Bez predgrijavanja				Predgrijavanje na 70 °C			
	Uzorak	Penetracija, mm			Uzorak	Penetracija, mm		
		b_h	b_v	$b_{\bar{x}}$		b_h	b_v	$b_{\bar{x}}$
10 mm	1	0,99	1,50	1,25	4	0,80	0,39	0,60
	2	1,25	1,10	1,18	5	0,69	1,41	1,05
	3	1,44	1,37	1,41	6	1,16	2,08	1,45
20 mm	7	1,77	0,90	1,34	10	1,10	1,79	1,45
	8	0,93	1,73	1,33	11	1,59	1,73	1,66
	9	0,79	0,73	0,76	12	1,42	1,98	1,70

Makroizbrusci podvrgnuti su ispitivanju tvrdoće na uređaju za mjerenje tvrdoće „Reicherter Brivisor KL 2“ (slika 25). Ispitivanje tvrdoće provedeno je prema Vickers-ovoj metodi u dvije linije s tri mjerenja prema navedenom redosljed: osnovni materijal, zona utjecaja topline, metal zavara, zona utjecaja topline te osnovni materijal. Jednim mjerenjem u zoni utjecaja topline ciljana je zona pretaljivanja, tj. granica između metala zavara i zone utjecaja topline gdje se očekuju najveći iznosi tvrdoće. Zbog uskog područja granice pretaljivanja moguća je greška pozicioniranja te je izmjerena tvrdoća metala zavar umjesto zone utjecaja topline. Ispitani makroizbrusak s odgovarajućim oznakama prikazana je na slici 39. Rezultati mjerenja zapisani su u tablici 20.



Slika 39. Pozicije mjerenja tvrdoće

Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10

Uzorak	Linija	Osnovni materijal	Zona utjecaja topline	Metal zavara	Zona utjecaja topline	Osnovni materijal
1	1	314	380	309	281	309
		312	468	297	464	312
		317	459	302	468	306
	2	304	390	294	289	302
		319	464	292	478	314
		306	493	281	421	306
2	1	314	366	302	464	317
		309	488	304	478	322
		314	483	297	493	306

		327	405	302	464	292
	2	322	493	297	473	325
		302	493	283	429	317
3	1	312	363	302	327	314
		325	464	309	473	306
		317	478	297	429	314
	2	322	450	299	473	283
		327	483	294	468	309
		299	493	299	380	327
4	1	322	373	289	292	322
		325	473	281	459	317
		319	459	285	366	304
	2	319	373	297	473	314
		312	478	276	488	319
		306	473	281	366	330
5	1	312	370	299	309	304
		314	473	292	459	309
		319	464	281	464	297
	2	312	409	285	433	312
		302	464	279	464	309
		289	464	272	351	292
6	1	292	425	294	446	306
		289	446	302	433	312
		292	442	306	429	304
	2	302	455	297	437	289
		297	464	292	450	309
		281	473	285	390	306
7	1	289	394	363	464	289
		306	498	348	483	312

		283	468	360	488	299
	2	292	429	383	488	294
		304	483	333	493	304
		302	498	339	493	297
8	1	281	498	366	468	299
		289	488	342	473	297
		287	488	317	401	287
	2	287	322	339	488	297
		287	421	333	483	292
		299	488	325	478	304
9	1	287	394	363	464	289
		287	498	348	483	312
		297	468	360	488	299
	2	283	429	383	488	294
		294	483	333	493	304
		292	498	339	493	297
10	1	294	483	317	483	299
		317	488	325	488	297
		302	488	304	401	289
	2	297	363	317	483	294
		289	478	319	478	302
		302	488	299	468	294
11	1	297	354	333	488	299
		289	478	325	429	283
		302	483	330	417	285
	2	289	478	376	455	274
		306	464	314	473	287
		294	483	330	478	287
12	1	289	464	325	478	297

		299	488	342	468	292
		292	483	336	437	289
	2	285	376	325	333	294
		299	442	345	473	297
		299	483	336	488	292

5. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

5.1. Analiza rasprskavanja kapljica metala

Vizualnom inspekcijom zavarenog spoja jasno je vidljiva razlika u rasprskavanju prilikom zavarivanja različitim plinovima. Uzorci 1, 4, 7 i 10, izvedeni C18 plinskom mješavinom imaju vidljivo najviše kapljica metala na površini osnovnog materijala i metala zavara. Volumen kapljica metala znatno je veći nego na uzorcima zavarenim trokomponentnom plinskom mješavinom. Uzorci 2, 5, 8, i 11, izvedeni C12 X2 plinskom mješavinom u manjoj razini su prekriveni rasprskanim kapljicama metala, a volumen kapljica je manji. Uzorci 3, 6, 9 i 12, izvedeni C6 X1 plinskom mješavinom pokazuju minimalno rasprskavanje te je isto skoro potpuno eliminirano. Razlika u utjecaju plinske mješavine u velikoj mjeri je bila vidljiva tijekom samog postupka zavarivanja. Zavarivanje uzoraka C18 plinskom mješavinom popraćeno je nestabilnim električnim lukom i znatno velikom količinom rasprskavanja, zbog čega je bilo potrebno udaljiti se od mjesta zavarivanja. Zavarivanje C12 X2 plinskom mješavinom rezultiralo je stabilnijim električnim lukom i manjom količinom rasprskavanja te se postupak zavarivanja mogao promatrati s kraće udaljenosti. Zavarivanje C6 X1 plinskom mješavinom pokazivalo je najstabilnije izvođenje procesa, s gotovo potpuno eliminiranim rasprskavanjem.

5.2. Analiza oblika metala zavara

Uzorci zavareni C6 X1 plinskom mješavinom imaju znatno izražen prstasti oblik metala zavara. Uzorci zavareni C12 X2 plinskom mješavinom imaju trokutasti oblik metala zavara pravilnih stranica. Uzorci zavareni C18 plinskom mješavinom pokazuju zaobljeni oblik metala zavara nepravilnih linija (slika 40).



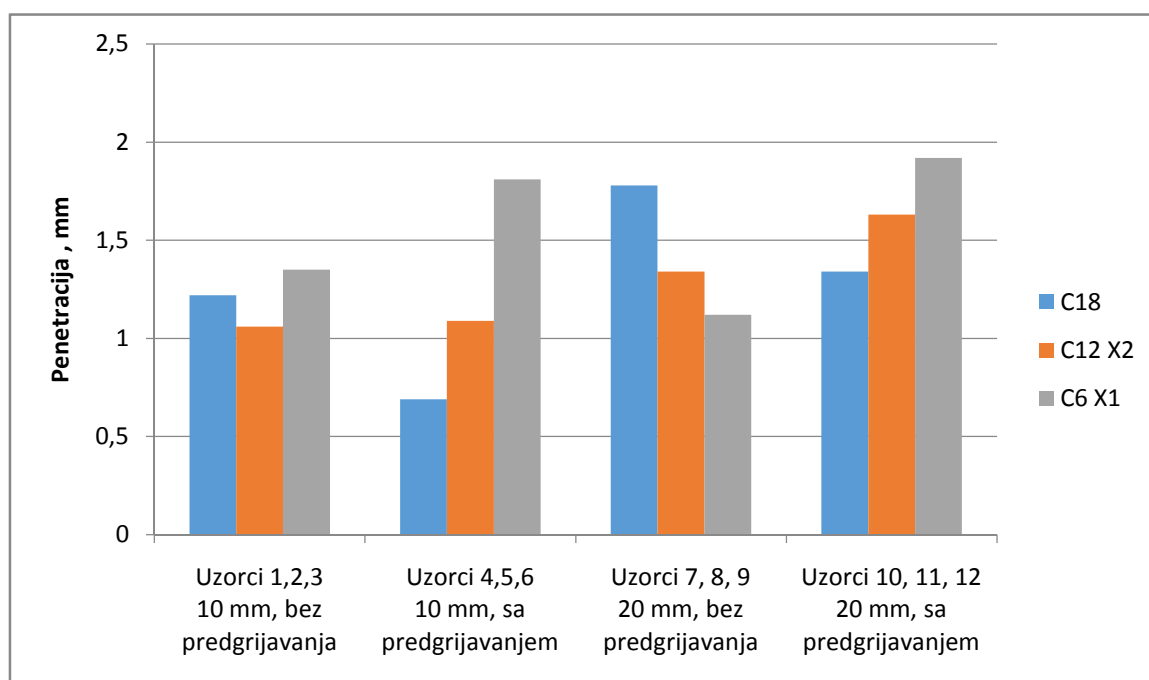
Slika 40. Utjecaj plina na oblik metala zavara

5.3. Analiza iznosa penetracije

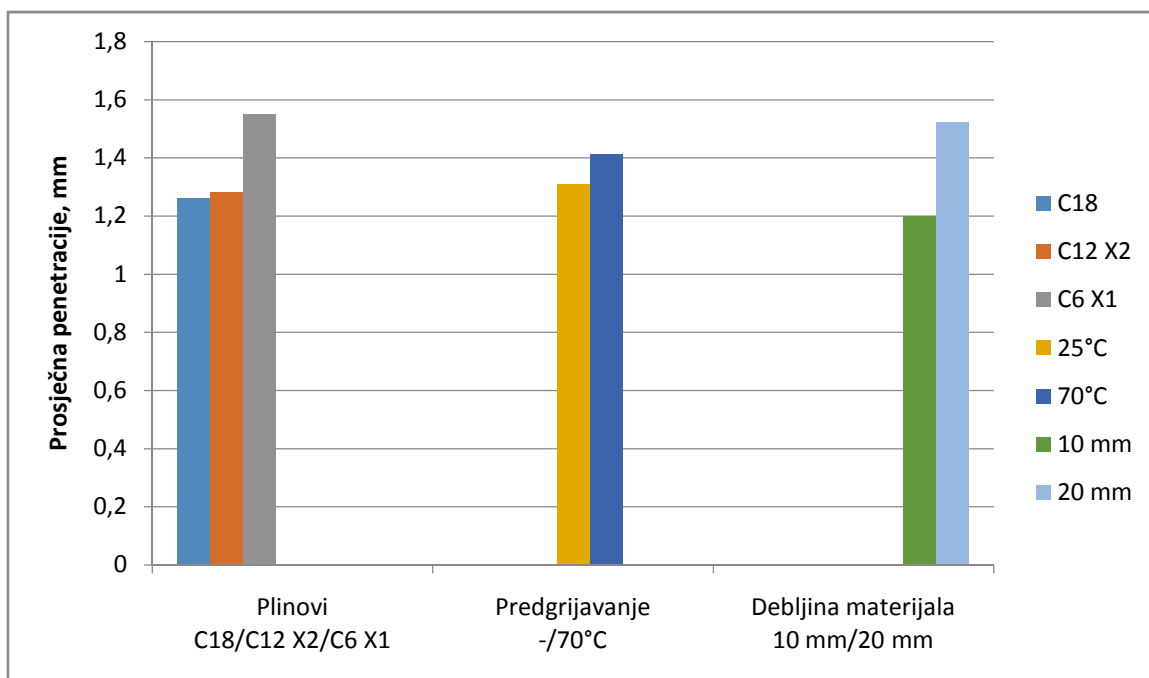
Izmjereni iznos penetracije prikazan je dijagramom na slici 41. Predgrijavanje uzoraka zavarenih C12 X2 i C6 X1 plinskom mješavinom rezultiralo je povećanjem penetracije, najznačajnija razlika je vidljiva kod C6 X1 plinske mješavine, no predgrijavanje uzoraka zavarenih C18 plinskom mješavinom dovelo je do smanjenja penetracije.

Najveći iznosi penetracije postignuti su kod uzoraka zavarenih C6 X1 plinskom mješavinom, a maksimalan iznos penetracije je postignut na uzorku 12 i iznosi 1,92 mm. Serije uzoraka s predgrijavanjem pokazuju rastuću penetraciju od najmanje, zavarene s C18 plinskom mješavinom do najveće, zavarene C6 X1 plinskom mješavinom. Minimalni iznos penetracije postignut je na uzorku 4. Raspon između najveće i najmanje penetracije iznosi 1,23 mm. Vrijednosti postignute penetracije za sve uzorke osim uzorka 4, su iznad 1 mm do maksimalni 1,92 mm.

Prosječne vrijednosti penetracije za pojedini analizirani parametar prikazane su u dijagramu na slici 42. Dijagramom je prikazano da penetracija postiže veće iznose s predgrijavanjem i na većoj debljini čelika. Zavari izvedeni s C18 plinskom mješavinom imaju najnižu prosječnu vrijednost penetracije, a zavari izvedeni s C6 X1 plinskom mješavinom postižu najveći iznos prosječne penetracije.

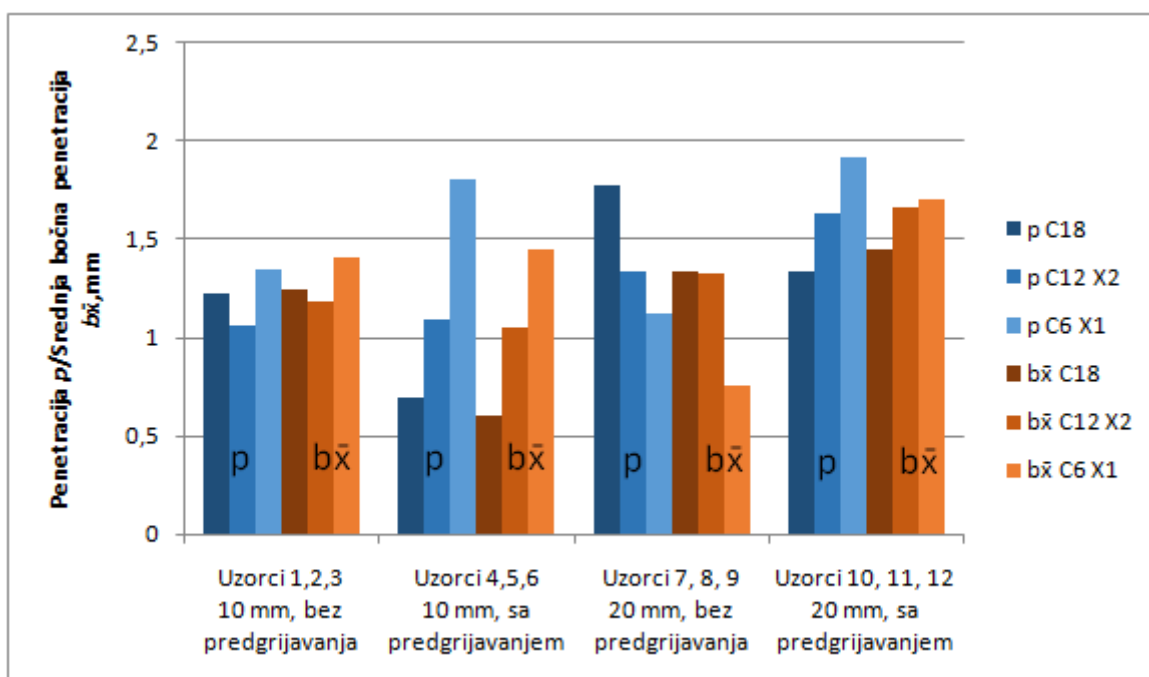


Slika 41. Dijagram usporedbe penetracije na analiziranim uzorcima



Slika 42. Dijagram usporedbe prosječne penetracije na analiziranim uzorcima

Analizom rezultata mjerenja srednje bočne penetracije prikazane tablicom 19, utvrđene su gotovo jednake kretnje iznosa kao i kod uobičajene penetracije, što je vidljivo iz dijagrama na slici 43.



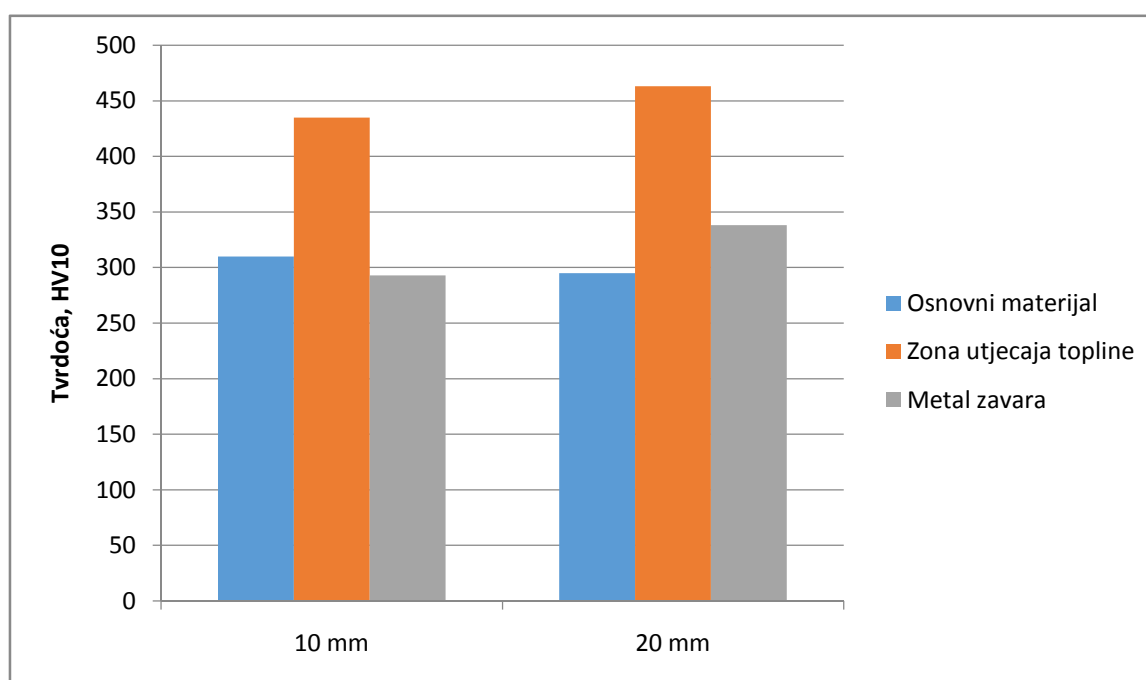
Slika 43. Dijagram usporedbe penetracije p i srednje bočne penetracije b_x na analiziranim uzorcima

5.4. Analiza tvrdoće

Analiza podataka dobivenih ispitivanjem tvrdoće navedena je u tablicama 21, 22 i 23, uz dijagramske prikaze na slikama.

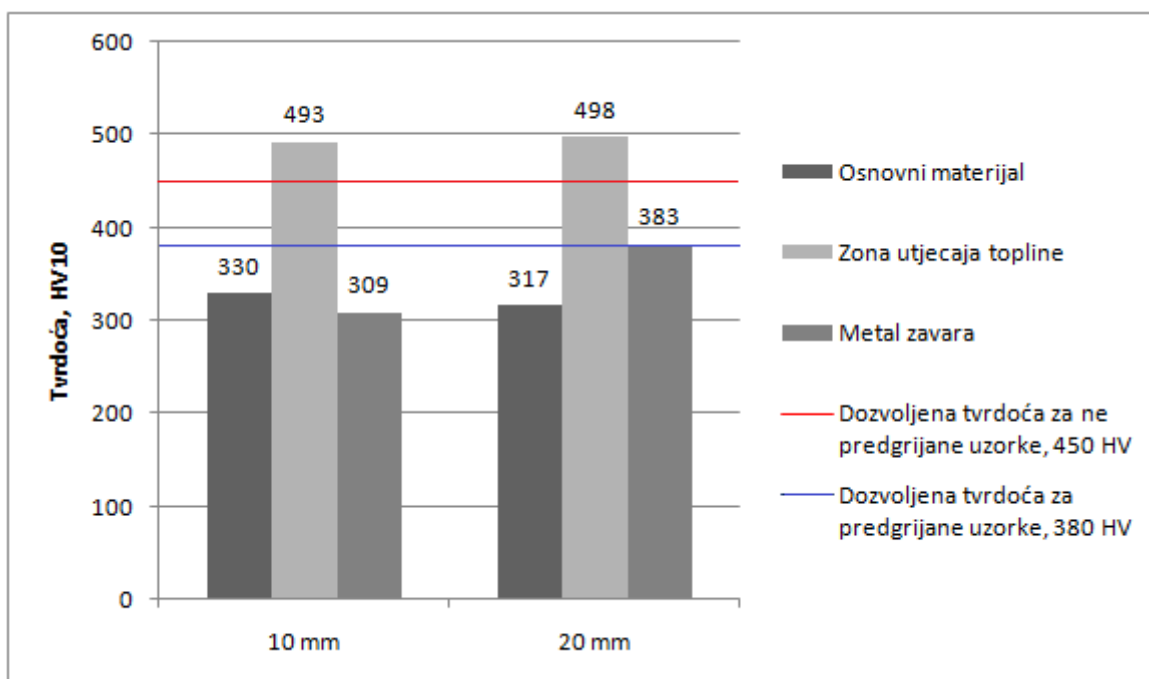
Tablica 21. Tablica analize vrijednosti tvrdoća ovisno o debljini uzoraka

Debljina	10 mm			20 mm		
	Osnovni materijal	Zona utjecaja topline	Metal zavara	Osnovni materijal	Zona utjecaja topline	Metal zavara
Prosječna	310	435	293	295	463	338
Minimalna	281	281	272	274	322	299
Maksimalna	330	493	309	317	498	383



Slika 44. Dijagram usporedbe prosječnih tvrdoća u ovisnosti o debljini uzoraka

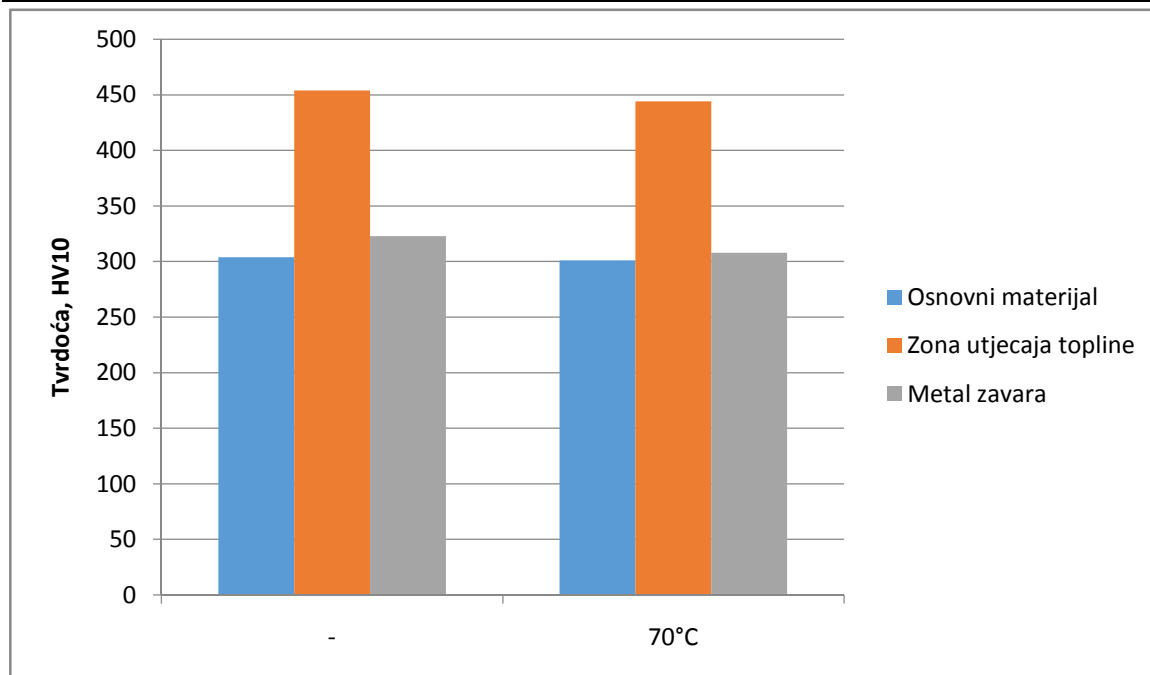
Ispitivanjem tvrdoće na uzorcima debljine 20 mm, utvrđene su veće vrijednosti prosječne tvrdoće, vidljivo u dijagramu na slici 44 te znatno veća vrijednost maksimalne tvrdoće metala zavara, dijagramski prikaz na slici 45. Tvrdoća metala zavara kod uzoraka debljine 10 mm manja je od tvrdoće osnovnog materijala, dok je kod uzoraka debljine 20 mm obrnuto.



Slika 45. Dijagram usporedbe maksimalnih tvrdoća u ovisnosti o debljini uzoraka

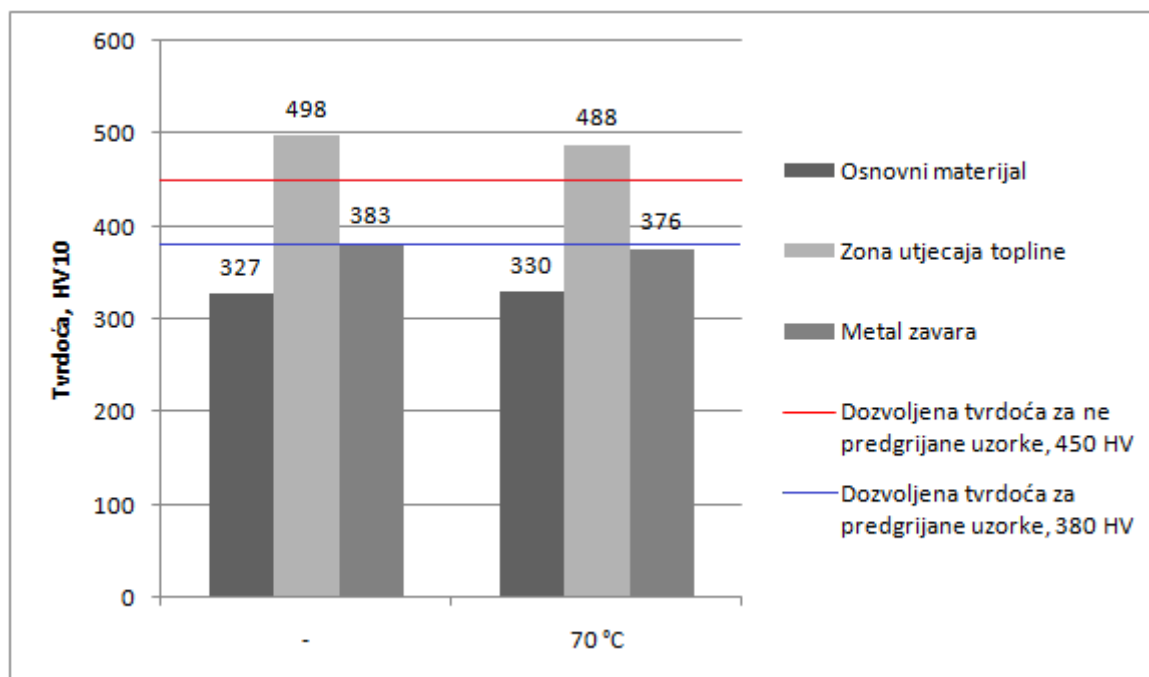
Tablica 22. Tablica analize vrijednosti tvrdoća ovisno o utjecaju predgrijavanja

Predgrijavanje	-			70 °C		
	Osnovni materijal	Zona utjecaja topline	Metal zavara	Osnovni materijal	Zona utjecaja topline	Metal zavara
Prosječna	304	454	323	301	444	308
Minimalna	281	281	281	274	292	272
Maksimalna	327	498	383	330	488	376



Slika 46. Dijagram usporedbe prosječnih tvrdoća u ovisnosti o utjecaju predgrijavanja

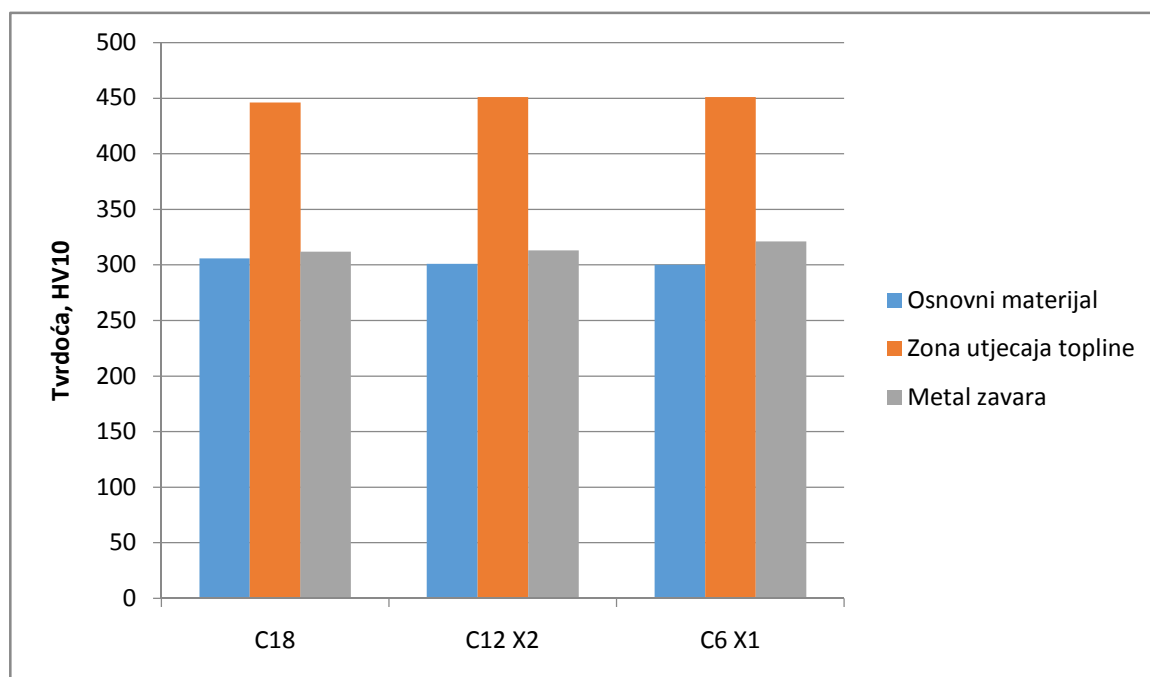
Ispitivanjem tvrdoće na uzorcima predgrijanim na temperaturu od 70 °C utvrđene su niže vrijednosti prosječnih tvrdoća, dijagramski prikaz na slici 46, kao i niže vrijednosti maksimalne tvrdoće, dijagramski prikaz na slici 47.



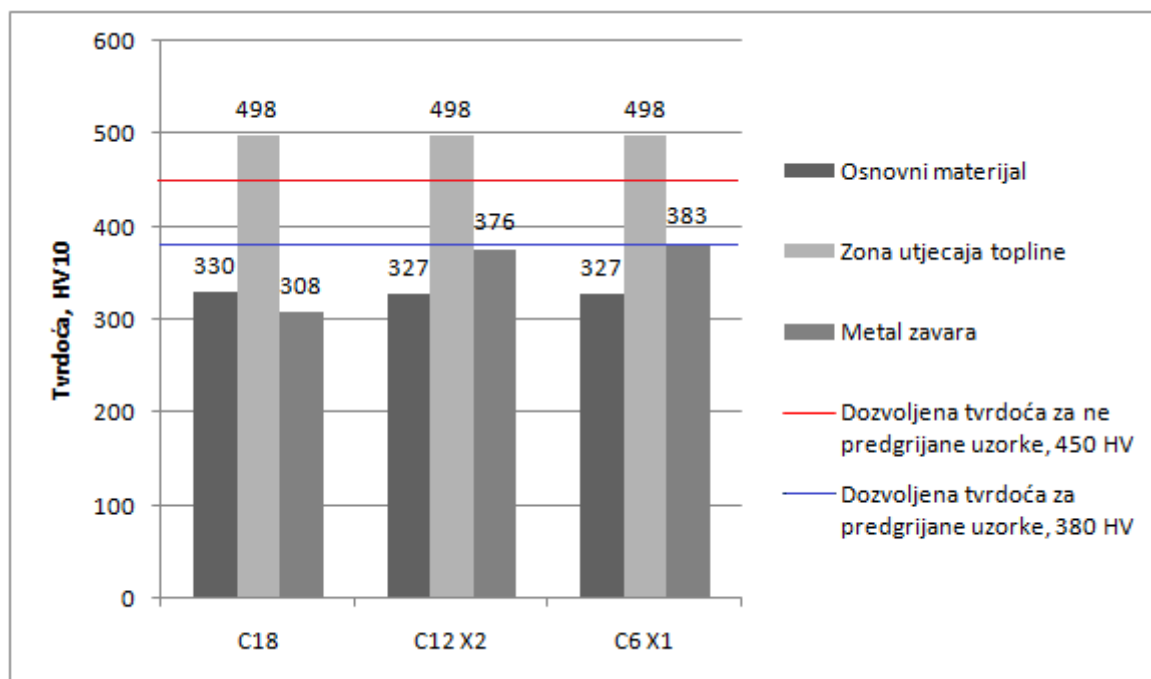
Slika 47. Dijagram usporedbe maksimalnih tvrdoća u ovisnosti o utjecaju predgrijavanja

Tablica 23. Tablica analize vrijednosti tvrdoća ovisno o zaštitnom plinu

Zaštitni plin	C18			C12 X2			C6 X1		
Tvrdoća	OM	ZUT	MZ	OM	ZUT	MZ	OM	ZUT	MZ
Prosječna	306	446	312	301	451	313	300	451	321
Minimalna	283	281	276	274	309	272	281	327	285
Maksimalna	330	498	308	498	498	376	327	498	383

**Slika 48. Dijagram usporedbe prosječnih tvrdoća u ovisnosti o zaštitnom plinu**

Utjecaj plinskih mješavina na prosječnu tvrdoću je zanemariv prema dijagramu na slici 48, ali upotrebom trokomponentnih plinskih mješavina, maksimalna vrijednost tvrdoće znatno je viša u metalu zavara, vidljivo iz dijagramskog prikaza na slici 49. Najveća postignuta vrijednost u metalu zavara je na uzorku zavarenom plinskom mješavinom C6 X1.



Slika 49. Dijagram usporedbe maksimalnih tvrdoća u ovisnosti o zaštitnom plinu

Na dijagramima usporedbe maksimalnih tvrdoća označene su i maksimalne dozvoljene vrijednosti tvrdoće za predgrijane i ne predgrijane uzorke prema normi HRN EN ISO 15614-1. Vrijednosti tvrdoća izmjerenih u zoni utjecaja topline znatno premašuje dopuštene vrijednosti.

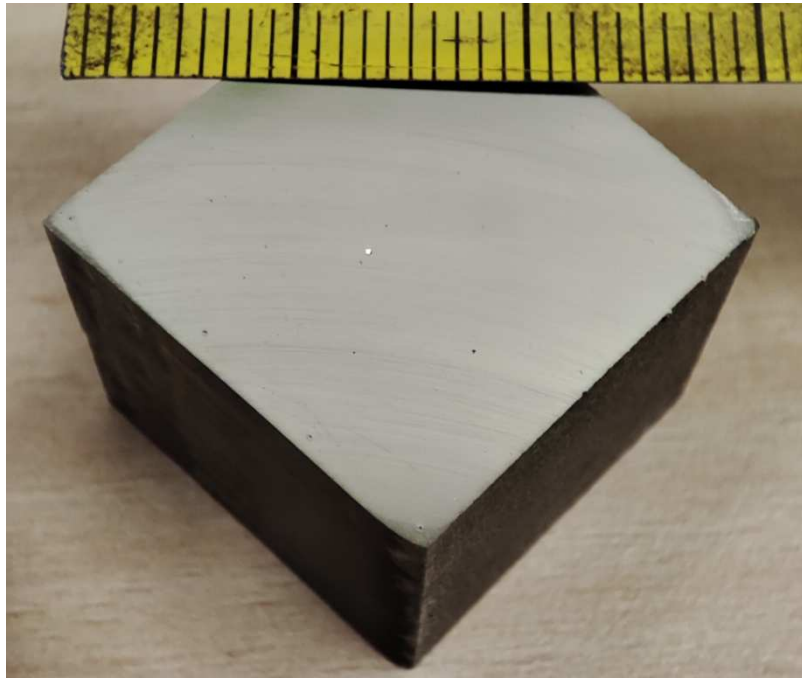
5.5. Ispitivanje i analiza pojave zone utjecaja topline tijekom postupka plazma rezanja

Za ispitivanje pojave zone utjecaja topline izrezan je uzorak iz lima Toolox 33 čelika debljine 20 mm, dimenzije 20x20 mm. Uzorak je izbrušen te su izmjerene tvrdoće pomoću tvrdomjera prikazanog na slici 25. Prikaz uzorka s vidljivim pozicijama ispitivanja tvrdoće dan je na slici 50. Izmjerene tvrdoće prikazane su u tablici 24.

Tablica 24. Rezultati mjerenja tvrdoće ruba odrezanog plazma postupkom

Mjesto mjerenja tvrdoće	Tvrdoća HV10
Osnovni materijal	279
Zona utjecaja topline	325, 285, 279, 317

Analizom rezultata mjerenja tvrdoće ruba odrezanog plazma postupkom utvrđena je pojava zone utjecaja topline. Izmjerene tvrdoće u neposrednoj blizini odrezanog ruba većih su vrijednosti u usporedbi s osnovnim materijalom. Najveća izmjerena tvrdoća iznosi 325 HV što je za 46 HV više od osnovnog materijala.



Slika 50. Uzorak za ispitivanje pojave ZUT-a tijekom postupka plazma rezanja

6. ZAKLJUČAK

Eksperimentalnim radom istraživao se utjecaj plinskih mješavina C18, C12 X2 i C6 X1 te temperature predgrijavanja od 70 °C na zavarljivost Toolox 33 limova debljine 10 mm i 20 mm. Analizom rezultata utvrđeno je:

1. Korištenjem trokomponentnih plinskih mješavina znatno se smanjuje rasprskavanje kapljica metala tijekom zavarivanja. Povećanjem udjela argona u zaštitnom plinu, kao i dodatak kisika znatno smanjuje rasprskavanje, kapljice metala su manjeg volumena i vođenje električnog luka je stabilnije. Kod plinske mješavine C6 X1 rasprskavanje je skoro potpuno eliminirano i moguća je primjena kod spojeva gdje nije moguće naknadno čišćenje.
2. Smanjenje udjela ugljikovog dioksida uz povećanje udjela argona u plinskoj mješavini povoljno utječe na oblik metala zavara. Najpovoljniji oblik penetracije, tj. prstasti oblik postignut je s C6 X1 plinskom mješavinom.
3. Najveći iznosi prosječne penetracije postignuti su s C6 X1 plinskom mješavinom, kao i iznos maksimalne penetracije. No na uzorcima 7, 8 i 9 je silazni trend penetracije te se ne može donijeti zaključak temeljem ovog eksperimenta da korištenjem C6 X1 plinske mješavine uvijek rezultira najvećom penetracijom.

Predgrijavanjem na temperaturu 70 °C kod trokomponentnih plinskih mješavina dolazi do povećanja penetracije, dok kod C18 plinske mješavine dolazi do njenog smanjenja.

Iznos penetracije na debljim uzorcima postiže veće iznose u usporedbi s tanjim debljinama.

4. Deblji limovi brže odvođe toplinu te je stoga mogućnost pojave tvrdih mikrostrukturnih faza veća, što je vidljivo većim izmjerenim vrijednostima tvrdoće. Vrijednosti tvrdoće u metalu zavara znatno su veće na uzorcima debljine 20 mm. Tvrdoća metala zavara na uzorcima debljine 10 mm niža je od osnovnog materijala, ali i dalje iznad minimalne granice tvrdoće Toolox 33 čelika. Na uzorcima debljine 20 mm tvrdoća metala zavara zbog bržeg odvođenja topline ima tvrdoću višu od osnovnog materijala, i to iznad maksimalne granice tvrdoće Toolox 33 čelika.

Predgrijavanjem na 70 °C postignute su niže vrijednosti tvrdoće u metalu zavara i u zoni utjecaja topline, no razlika nije značajna. Vrijednosti maksimalnih tvrdoća su iznad dopuštene granice prema normi HRN EN ISO 15614-1, i za predgrijane i ne predgrijane uzorke.

Utjecaj ispitanih plinskih mješavina na prosječnu tvrdoću zavara nije vidljiv iz rezultata ispitivanja, za razliku od maksimalne tvrdoće metala zavara. Uzorci zavareni s C18 plinskom mješavinom imaju znatno nižu vrijednost maksimalne tvrdoće u metalu zavara u usporedbi s uzorcima zavarenim trokomponentnom plinskom mješavinom.

5. Plazma postupkom rezanja vidljiva je razlika u izmjerenoj tvrdoći zone utjecaja topline. Vrijednosti nisu znatno veće od tvrdoće osnovnog materijala te ne premašuju maksimalnu tvrdoću osnovnog materijala garantiranom od strane proizvođača materijala.

Prijedlog za nastavak istraživanja je povećati temperaturu predgrijavanja radi smanjenja tvrdoće zone utjecaja topline ispod dopuštene granice prema normi HRN EN ISO 15614-1. Obratiti pažnju na centriranje položaja pištolja tijekom cijele linije zavara kako bi se postigli simetrični zavari radi točnijeg mjerenja i analize podataka. Provesti ispitivanje penetracije s istim parametrima navarivanjem na lim Toolox čelika čime bi se pojednostavilo izvođenje ispitivanja te mjerenje i analiza rezultata.

Primjenom trokomponentnih plinskih mješavina na MAG postupak zavarivanja Toolox 33 čelika ostvareni su povoljniji rezultati u pogledu rasprskavanja, oblika metala zavara te penetracije. Uvođenje trokomponentnih plinskih mješavina kao zamjenu za C18 pokazalo se opravdanim.

Izračunata temperatura predgrijavanja prema normi HRN EN ISO 1011-2 pokazala se nedovoljnom za dobivanje značajnije razlike te je potrebno provesti daljnja ispitivanja na višim vrijednostima temperature predgrijavanja.

LITERATURA

- [1] Hansson, P.: Modern pre-harden tool steels, SSAB Special Steels, Oxelösund, Sweden, 2018.
- [2] <https://www.ssab.com/company/about-ssab/our-business/ssab-special-steels>, pristupljeno 22.2.2022.
- [3] SSAB: „Once Toolox always Toolox“ – full product presentation, <https://www.ssab.com/brands-and-products/toolox/downloads>, pristupljeno 3.1.2022.
- [4] SSAB: Welding and cutting recommendations for Toolox, <https://www.ssab.com/brands-and-products/toolox/welding-and-cutting>, pristupljeno 3.1.2022.
- [5] SMS: Toolox Engineering & Tool Steel – Ready To Use, <http://swedishmesteeel.com/toolox.html>, pristupljeno 3.1.2022.
- [6] Pešlová, F., Janeková, M., Krum, S.: Structural changes of selected materials for glass industry after thermal loading, MATEC Web of Conferences 157, 07011, 2018.
- [7] Franklin, A. C., Franklin J. S. C.: J&P Transformer handbook, 11th ed., Butterworth Heinemann, 1995.
- [8] Van Jaarsveld, B. J.: Wide band modelling of an air-core power transformer winding, Department of Electrical & Electronic Engineering, December, 2013.
- [9] Hansson, P.: TOOLOX-Pre-hardened Tool Steels Aimed for Die-casting Applications Enabling Faster Mould Manufacturing, SSAB, SAE International, 2009.
- [10] ISO/TR 581:2005
- [11] Juraga, I., Ljubić, K., Živičić, M., Garašić, I.: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [12] Jeffus, L.: Welding and Metal Fabrication, Delmar, Cengage Learning, 2012.
- [13] HRN EN ISO 9692-1:2003.
- [14] Hansson, P: Control of weldability, Research leading to the development of two new quenched and tempered tool steels, PhD dissertation, Department of Production Engineering, Stockholm, 2004.
- [15] Best Practice Welding of Toolox, SSAB, 2009, http://swedishmesteeel.com/files/toolox/Toolox_WS_welding.pdf, pristupljeno 23.2.2022.

- [16] Garašić, I.: Predavanja iz kolegija Osiguranje kvalitete zavarenih konstrukcija, Katedra za zavarene konstrukcije, FSB, 2021.
- [17] Srivastava, Bipin Kumar, S. P. Tewari, and Jyoti Prakash. "A review on effect of preheating and/or post weld heat treatment (PWHT) on mechanical behavior of ferrous metals." *International Journal of Engineering Science and Technology* 2.4: 625-631, 2010.
- [18] Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V., Madhusudhan Reddy, G.: Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched and tempered steel weldments, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 33, Issue 7, 2008.
- [19] Funderburk, R. Scott: Key Concepts in Welding Engineering, *Welding Innovation* Vol. XV, No. 2, 1998.
- [20] Han, Y. D., Jing, H. Y., Xu, L. Y.: Welding heat input effect on the hydrogen permeation in the X80 steel welded joints, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 132, Issue 1, Pages 216-222, 2012.
- [21] Kim, W. K., Koh, S. U., Yang, B. Y., Kim, K. Y.: Effect of environmental and metallurgical factors on hydrogen induced cracking of HSLA steels, *Corrosion Science* 50, 3336-3342, 2008.
- [22] HRN EN ISO 1011-2: 2002.
- [23] HRN EN ISO 13916: 1997.
- [24] Tingaev, A. K., Gubaydulin, R. G., Ilin, I. A.: Study of the Effect of Thermal Cutting on the Microstructure and Chemical Composition of the Edges of Workpieces Made of Steel Brands S345, S390, ICIE, *Procedia Engineering*, Volume 150, Pages 1783-179, 2016.
- [25] Kovacevic, R.: Surface Texture in Abrasive Waterjet Cutting, *University of Kentucky, Journal of Manufacturing Systems*, Volume 10, Issue 1, Pages 32-40, 1991.
- [26] Živičić, M.: Elektrolučno MIG/MAG zavarivanje, *Zavarivanje* 27, broj 3, str.321-329, 1984.
- [27] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Priručnik zavarivački i srodni postupci, FSB, Zagreb, 2015.
- [28] Klarić, Š., Samardžić, I., Kladarić, I.: MAG WELDING PROCESS – ANALYSIS OF WELDING PARAMETER INFLUENCE ON JOINT GEOMETRY, *Mechanical Engineering Faculty Slavonski Brod, TMT, Istanbul, Turkey*, 2008.
- [29] Weman, K.: *Welding processes handbook*, Second edition, Woodhead publishing in materials, 2012.

- [30] Garašić, I.: Predavanja iz kolegija Zavarivanje, Katedra za zavarene konstrukcije, FSB, 2018.
- [31] Greš, M., Viňáš, J., Mulidrán, P., Sleziak, T., Brezina, J.: Analysis of shielding welding gas composition effects on the final microhardness of the fillet joints made with use of MAG technology, Technical University of Košice, Slovakia, 2018.
- [32] Garašić, I.: Zaštitni plinovi, Trokomponentne mješavine za MAG zavarivanje, Odabir plina kod zavarivanja Cr-Ni čelika, Seminar Messer Croatia plin 2016.
- [33] W.F. Garth Stapon, K. Lyttle: 7 effects of shielding gas, January 9, 2007., <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/arcwelding/7-effects-of-shielding-gas>, pristupljeno 2.2.2022.
- [34] M. Suban, J. Tušek: Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used, Journal of Materials Processing Technology, Volume 119, Issues 1–3, Pages 185-192, 2001.
- [35] Kah, P., Martikainen, J.: Influence of shielding gases in the welding of metals, The international Journal of Advanced Manufacturing Technology 64, 1411-1421, 2013.
- [36] Garašić, I.: Predavanja iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, Dinamička karakteristika, 2020.
- [37] N. Šakić, N. Štefanić: Methods of optimization of welding processes: state of the art and future trends, EUROJOIN 4, Cavtat-Dubrovnik, 2001.
- [38] Palani, P. K., Murugan, N.: Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding, Journal of Materials Processing technology 172, 1-10, 2006.