

Analiza nastanka toplih pukotina pri zavarivanju raznorodnih čelika

Bajs, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:235:789598>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Bajs

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Marko Bajs

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru doc. dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. na stručnom vođenju i potpori kroz izradu diplomskog rada, dr. sc. Matiji Bušiću, dipl. ing. na strpljenju i korisnim savjetima.

Također se zahvaljujem laborantima Zdenku Batiniću, Mati Šokičiću, Krešimiru Sukobljeviću, Ivanu Vovku i Dubravki Ulaga na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Marko Bajs



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Datum

Prilog

Klasa:

Ur.broj:

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

MARKO BAJŠ

Mat. br.: **0035169432**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**ANALIZA NASTANKA TOPLIH PUKOTINA PRI ZAVARIVANJU
RAZNORODNIH ČELIKA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**ANALYSIS OF HOT CRACKING APPEARANCE DURING
WELDING OF DISSIMILAR STEELS**

Opis zadatka:

Proučiti mehanizme nastanka toplih pukotina pri zavarivanju nelegiranih i visokolegiranih austenitnih čelika. Posebno pojasniti utjecaj zaostalih naprezanja, nečistoća poput sumpora, stupnja miješanja kao i udjela ferita u metalu zavara. Opisati metode ispitivanja osjetljivosti zavarenih spojeva na pojavu toplih pukotina. Dati pregled dodatnih materijala koji se mogu primijeniti za navedene materijale pri MAG zavarivanju.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za kombinaciju osnovnih materijala nelegiranog i visokolegiriranog čelika odabrati prikladnu metodu ispitivanja toplih pukotina te definirati parametre zavarivanja. Pri izradi plana eksperimenta potrebno je obuhvatiti više razina unosa topline, načina prijenosa metala u električnom luku kao i oblikovanja zavarenog spoja. Na temelju analize provedenih ispitivanja u konačnici definirati kritične vrijednosti varijabli obzirom na pojavu toplih pukotina.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.


Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

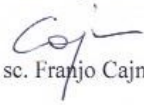
Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	3
2.1. Parametri MAG postupka zavarivanja	4
2.1.1. Napon električnog luka	4
2.1.2. Struja zavarivanja.....	5
2.1.3. Brzina zavarivanja.....	5
2.1.4. Duljina slobodnog kraja DM	6
2.1.5. Induktivitet	6
2.1.6. Položaj zavarivanja	7
2.1.7. Tehnika zavarivanja	7
2.1.8. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja	7
2.2. Prijenos metala u električnom luku kod MAG zavarivanja.....	8
2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima	9
2.2.2. Prijenos metala mješovitim lukom.....	9
2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom	10
2.2.4. Prijenos metala impulsnim lukom.....	11
2.2.5. Prijenos metala rotirajućim lukom.....	12
3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI.....	13
3.1. Nelegirani čelici	13
3.1.1. Zavarljivost nelegiranih čelika.....	14
3.2. Visokolegirani austenitni čelici.....	15
3.2.1. Zavarljivost visokolegiranih austenitnih čelika	16
4. TOPLE PUKOTINE.....	20
4.1. Kristalizacijske pukotine.....	22
4.2. Likvacijske pukotine	23
4.3. Utjecajni faktori na nastanak toplih pukotina	24
4.3.1. Utjecaj nečistoća na pojavu toplih pukotina	24
4.3.2. Utjecaj oblika i način polaganja zavara na pojavu toplih pukotina	26
4.3.3. Utjecaj predgrijavanja na pojavu toplih pukotina.....	28
4.3.4. Utjecaj zaostalih naprezanja na pojavu toplih pukotina.....	28
4.3.5. Utjecaj delta ferita na pojavu toplih pukotina.....	31

4.3.6.	Utjecaj odnosa Cr_{eq}/Ni_{eq} na pojavu toplih pukotina.....	32
4.4.	Metode ispitivanja osjetljivosti na tople pukotine	33
4.4.1.	Varestraint metoda	34
4.4.2.	Transvarestraint metoda.....	35
4.4.3.	Flat Tensile Test.....	36
4.4.4.	T – Joint weld cracking tests.....	37
5.	ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA	39
5.1.	Stupanj miješanja	40
5.2.	Dodatni materijal.....	41
6.	EKSPERIMENTALNI DIO	43
6.1.	Cilj istraživanja	43
6.2.	Općenito o opremi i osnovnim materijalima korištenim u eksperimentu	43
6.2.1.	Izvor struje i dodavač DM	43
6.2.2.	Osnovne informacije o osnovnim materijalima	44
6.2.2.1.	X5CrNi18-10	44
6.2.2.2.	S355J2.....	45
6.2.3.	Osnovne informacije o DM	45
6.2.4.	Strukturni dijagram	46
6.3.	Način ukrućenja	48
6.4.	Parametri zavarivanja.....	50
6.4.1.	Usporedba unosa topline kod svih uzoraka.....	50
6.5.	Kontrola zavarenih uzoraka	52
6.6.	Priprema uzoraka za ispitivanje	55
6.7.	Kemijska analiza metala zavara	56
6.8.	Mjerenje udjela ferita u metalu zavara.....	58
6.9.	Geometrija metala zavara.....	64
6.10.	Analiza pojave toplih pukotina	74
6.10.1.	Uzorak 1	74
6.10.2.	Uzorak 2	75
6.10.3.	Uzorak 3.....	76
6.10.4.	Uzorak 4.....	77
6.10.5.	Uzorak 5.....	78
6.10.6.	Uzorak 6.....	79
6.10.7.	Uzorak 7.....	80
6.10.8.	Uzorak 8.....	81
6.11.	Procjena kritičnih parametara za nastanak toplih pukotina	83
7.	ZAKLJUČAK.....	84
8.	LITERATURA	86
9.	PRILOZI.....	89

POPIS SLIKA

Slika 1.	Osnovni elementi zavarenog spoja [1]	1
Slika 2.	Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja, procesa teljenja, te osnovnih dijelova pištolja za zavarivanje [5].....	3
Slika 3.	Utjecaj napona el. luka na oblik, protaljivanje i širinu zavara (a - mali, b - srednji i c - veliki napon električnog luka) [6]	4
Slika 4.	„Ravna“ statička karakteristika istosmjernog izvora struje kod MAG postupka [5]	5
Slika 5.	Utjecaj jakosti struje na oblik, protaljivanje i širinu zavara (a - mala, b - srednja i c velika struja) [6]	5
Slika 6.	Utjecaj brzine zavarivanja na oblik, protaljivanje i širinu zavara (a - mala, b - srednja i c - velika brzina zavarivanja) [6]	5
Slika 7.	Karakteristični položaji slobodnog kraja DM i mlaznice za plin [8]	6
Slika 8.	Utjecaj duljine slobodnog kraja DM na oblik, protaljivanje i širinu zavara (a - mala, b - srednja, c - velika duljina slobodnog kraja DM) [6]	6
Slika 9.	Tehnike zavarivanja [8]	7
Slika 10.	Utjecaj različitih plinova i mješavina na penetraciju i oblik zavara [5]	8
Slika 11.	MAG prijenos metala kratkim spojevima [9, 10].....	9
Slika 12.	MAG prijenos metala prijelaznim lukom [5, 10].....	10
Slika 13.	MAG prijenos metala štrcajućim lukom [5, 10].....	10
Slika 14.	MAG prijenos metala impulsnim lukom [10, 11]	11
Slika 15.	MAG prijenos metala rotirajućim lukom [10, 12].....	12
Slika 16.	Feritno – perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika a) čelik s 0,1 %C; b) čelik s 0,25 %C [3].....	14
Slika 17.	Karakteristični izgled mikrostrukture VAČ [16].....	16
Slika 18.	Model nastanka i rasta sigma faze [17]	17
Slika 19.	Utjecaj σ -faze na udarni rad loma Fe-Cr-Ni legura pri sobnoj temperaturi [17]... ..	17
Slika 20.	Temperaturna područja nastajanja pukotina [19]	20
Slika 21.	Karakteristični izgled tople pukotine; A - površinska, B – kraterska, C- kod nanošenja sljedećeg prolaza, D - u korijenu zavara [20, 21]	21
Slika 23.	Shematski prikaz nastanka likvacijskih pukotina [24]	23
Slika 24.	Pukotina uzrokovana prevelikim sadržajem sumpora u OM [20].....	24
Slika 25.	Odnos Mn/S u zavisnosti o %C na pojavu toplih pukotina [14]	25
Slika 26.	Preveliki razmak između stranica žlijeba – pojava toplih pukotina [26].....	26
Slika 27.	Odnos oblika zavara na pojavu toplih pukotina [1, 19, 24]	26

Slika 28.	Utjecaj oblika zavara na pojavu toplih pukotina [24].....	27
Slika 29.	Utjecaj načina polaganja zavara na pojavu toplih pukotina [24].....	27
Slika 30.	Ovisnost sadržaja ugljika i temperature predgrijavanja [27]	28
Slika 31.	Pojednostavljeni prikaz mehanizma nastajanja zaostalih naprežanja i deformacije u zavarivanju kutnog spoja [28]	28
Slika 32.	Prikaz smjerova i vrsta stezanja tj. deformacija nakon stezanja [1].....	30
Slika 33.	Utjecaj zaostalih napetosti na pojavu toplih pukotina [24]	30
Slika 34.	Mikrostruktura visokolegiranih austenitnih čelika + delta ferit [15].....	31
Slika 35.	Odnos Cr _{eq} /Ni _{eq} – S+P na pojavu toplih pukotina [24].....	32
Slika 36.	Pojednostavljeni prikaz Varestraint metode [31]	35
Slika 37.	Pojednostavljeni prikaz Transvarestraint metode [31]	36
Slika 38.	Pojednostavljeni prikaz Flat Tensile testa [31].....	37
Slika 39.	T spoj – Tip A [32].....	37
Slika 40.	T spoj – Tip B [32]	38
Slika 41.	T spoj – Tip C [32]	38
Slika 42.	Površina presjeka zone taljenja [1].....	40
Slika 43.	Prikaz dodatnih materijala iz tablice 6. u Schäffler – ovom dijagramu [4].....	42
Slika 44.	Izvor struje Welbee P400 (a) i dodavač DM, CM-7402-D	43
Slika 45.	Prikaz procjene strukture metala zavara Schäffler – ovim dijagramom [45]	47
Slika 46.	Prikaz procjene strukture metala zavara WRC-1992 dijagramom [45].....	47
Slika 47.	Način ukrućenja ispitnih uzoraka	48
Slika 48.	Način ukrućenja za uzorak 6, 7 i 8	49
Slika 49.	Priprema uzoraka za ispitivanje.....	56
Slika 50.	Prikaz metala zavara u Schäffler – ovom dijagramu	57
Slika 51.	Uređaj za mjerenje postotka ferita Ferritgehaltmesser 1.054	58
Slika 52.	Utjecaj unosa topline na postotak δ F u metalu zavara	64
Slika 53.	Makroizbrusak uzorka 1 – MAG-P	65
Slika 54.	Makroizbrusak uzorka 2 - MAG-P	66
Slika 55.	Makroizbrusak uzorka 3 - MAG-S	67
Slika 56.	Makroizbrusak uzorka 4 - MAG-S	68
Slika 57.	Makroizbrusak uzorka 5 - MAG-S	69
Slika 58.	Makroizbrusak uzorka 6 - MAG-S	70
Slika 59.	Makroizbrusak uzorka 7 - MAG-P	71
Slika 60.	Makroizbrusak uzorka 8 – MAG-D.....	72
Slika 61.	Utjecaj unosa topline na dubinu penetracije.....	73
Slika 62.	Mikroizbrusak uzorka 1 uz povećanje od 7,88 puta.....	74

Slika 63.	Mikroizbrusak uzorka 2 uz povećanje od 12,5 puta	75
Slika 64.	Mikroizbrusak uzorka 3 uz povećanje od 12,5 puta	76
Slika 65.	Mikroizbrusak uzorka 4 uz povećanje od 12,5 puta	77
Slika 66.	Mikroizbrusak uzorka 5 uz povećanje od 12,5 puta	78
Slika 67.	Mikroizbrusak uzorka 6 uz povećanje od 12,5 puta	79
Slika 68.	Mikroizbrusak uzorka 7 uz povećanje od 12,5 puta	80
Slika 69.	Makroizbrusak uzorka 8 uz povećanje od 12,5 puta	81
Slika 70.	Utjecaj unosa topline na ukupnu duljinu toplih pukotina u metalu zavara	82

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Utjecaj pojedinih elemenata u VAČ [1]	18
Tablica 2.	Rastvorljivost pojedinih elemenata, eutektičke faze i temperatura tališta [1]... 23	
Tablica 3.	Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika [25]	25
Tablica 4.	Fizikalna svojstva ugljičnog čelika i VAČ [11]	39
Tablica 5.	Stupanj miješanja kod nekih postupaka zavarivanja [33].....	41
Tablica 6.	Pregled dodatnih materijala za zavarivanje VAČ s nelegiranim čelicima [38, 39, 40]	42
Tablica 7.	Osnovne informacije o izvoru struje Welbee P400	44
Tablica 8.	Osnovne informacije o dodavaču DM, CM-7402-D	44
Tablica 9.	Mehaničke karakteristike VAČ (X5CrNi18-10) [41].....	44
Tablica 10.	Kemijski sastav VAČ (X5CrNi18-10) [41, 42].....	45
Tablica 11.	Mehaničke karakteristike NČ (S355J2) [41]	45
Tablica 12.	Kemijski sastav NČ (S355J2) [41, 42]	45
Tablica 13.	Mehaničke karakteristike DM, MIG 309 LSi [43]	45
Tablica 14.	Kemijski sastav DM, MIG 309 LSi [43]	46
Tablica 15.	Cr_{eq} , Ni_{eq} i δF za Schäffler – ov i WRC – 1992 strukturni dijagram.....	46
Tablica 16.	Ulazni parametri za MAG zavarivanje kod svih ukruta i uzoraka	50
Tablica 17.	Parametri MAG zavarivanja kod svih ukruta	51
Tablica 18.	Parametri MAG zavarivanja kod svih uzoraka.....	51
Tablica 19.	Vizualna i penetrantska kontrola	52
Tablica 20.	Kemijski sastav metala zavara svih uzoraka	57
Tablica 21.	Očitani podaci udjela ferita iz Schäffler – ovog dijagrama	58
Tablica 22.	Mjesta mjerenja δF i očitani rezultati	59
Tablica 23.	Prikaz geometrije zavara uzorka 1	65
Tablica 24.	Prikaz geometrije zavara uzorka 2.....	66
Tablica 25.	Prikaz geometrije zavara uzorka 3.....	67
Tablica 26.	Prikaz geometrije zavara uzorka 4.....	68
Tablica 27.	Prikaz geometrije zavara uzorka 5.....	69
Tablica 28.	Prikaz geometrije zavara uzorka 6.....	70
Tablica 29.	Prikaz geometrije zavara uzorka 7.....	71
Tablica 30.	Prikaz geometrije zavara uzorka 8.....	72
Tablica 31.	Kritične vrijednosti varijabli na pojavu toplih pukotina.....	83

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
2UO	Dvije ukrute s donje strane na horizontalnu ploču (S355J2)
4UO	Četiri ukrute s donje strane na horizontalnu ploču (S355J2)
A	Austenit
BP	Broj prolaza
DM	Dodatni materijal u obliku žice
F	Ferit
IKK	Interkristalna korozija
MAG	eng. Metal active gas
MAGC	eng. Metal active gas (zaštitni plin: CO ₂)
MAG-D	eng. Metal active gas – kratki luk
MAG-G	eng. Metal active gas – mješoviti luk
MAGM	eng. Metal active gas (zaštitni plin: mješavine)
MAG-P	eng. Metal active gas – impulsni luk
MAG-S	eng. Metal active gas – štrcajući luk
MZ	Metal zavara
NČ	Nelegirani čelik
OM	Osnovni materijal
RB	Redni broj
VAČ	Visokolegirani austenitni čelik
Z	Zavar s druge strane po cijeloj duljini
ZS	Zavareni spoj
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline
δ F	Delta ferit

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezanje
a	mm	Visina zavara
a_1	mm	Stvarna visina zavara
b	mm	Širina zavara
c	mm	Nadvišenje zavara
d	mm	Promjer dodatnog materijala
d	mm	Dubina
h	mm	Visina
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
I	A	Jakost struje
K	J	Udarni rad loma
l_{tp}	mm	Duljina toplih pukotina
m	kg	Masa
p	mm	Penetracija (a1-a)
q	l/min	Protok zaštitnog plina
Q	kJ/mm	Unos topline
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Granica razvlačenja
\check{s}	mm	Širina
t	mm	Debljina osnovnog materijala
U	V	Napon
v_{zav}	cm/min	Brzina zavarivanja
$v_{\check{z}}$	m/min	Brzina dovođenja DM
Z	%	Kontrakcija
α	10 ⁻⁶ K ⁻¹	Koeficijent linearnog istezanja
ϑ	°C	Temperatura
λ	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti
ρ	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Specifični električni otpor

SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je: „Analiza nastanka toplih pukotina pri zavarivanju raznorodnih čelika“. Sastoji se od dva dijela, teoretskog i praktičnog.

U prvom dijelu rada prikazane su opće značajke MAG zavarivanja poput parametara te načina prijenosa metala. Analizirani su nelegirani i visokolegirani čelici, mehanizmi nastanka toplih pukotina te su opisane metode ispitivanja osjetljivosti zavarenih spojeva na pojavu toplih pukotina. Objašnjen je utjecaj zaostalih napreznja, nečistoća poput sumpora, stupnja miješanja kao i udio ferita u metalu zavara.

U eksperimentalnom dijelu rada za kombinaciju osnovnih materijala nelegiranog i visokolegiranog čelika odabrana je prikladna metoda ispitivanja toplih pukotina te su definirani parametri zavarivanja. Prilikom izvođenja eksperimenta obuhvaćeno je više razina unosa topline, načina prijenosa metala u električnom luku i oblikovanje zavarenog spoja. Na temelju analize provedenih ispitivanja definirane su kritične vrijednosti varijabli obzirom na pojavu toplih pukotina.

Ključne riječi: tople pukotine, udio ferita, raznorodni čelici, MAG zavarivanje

SUMMARY

The theme of this diploma thesis is: "The analysis of the occurrence of hot cracks in welding dissimilar steels." It consists of two parts, theoretical and practical.

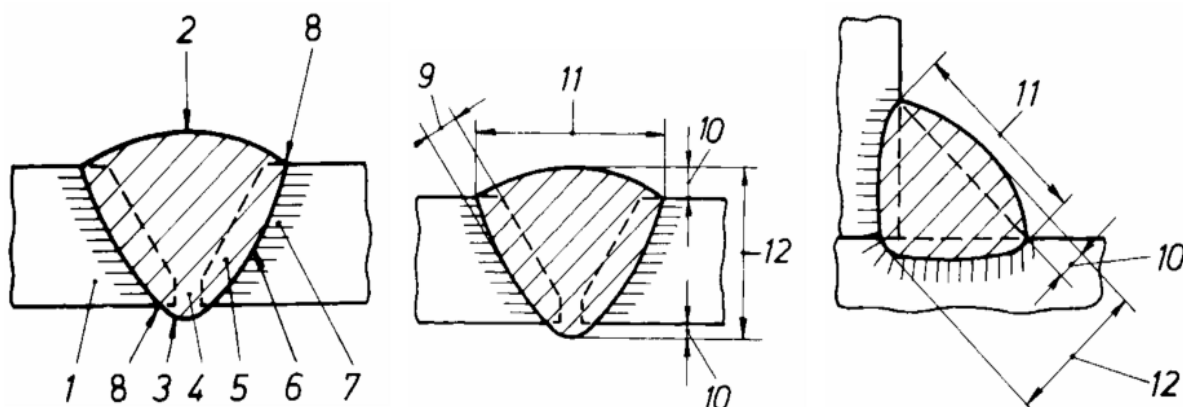
The first part shows the general characteristics of MAG welding parameters as well as methods of metal transfer. In this thesis unalloyed and high alloyed steels and mechanisms of hot cracks are analyzed and welds sensitivity testing methods to examine the occurrence of hot cracks are described. The influence of residual stresses, impurities such as sulfur, dilution as well as the proportion of ferrite in the weld metal are also explained.

In experimental section of this thesis for combination of basic non-alloy and high alloy steel materials appropriate hot cracks test method is selected and welding parameters are defined. Experiment included several levels of heat input, their transmission metal in an electric arc and weld design. Based on the analysis of the tests performed, critical values of the variables for the occurrence of hot cracks are defined.

Key words: hot cracks, ferrite content, dissimilar steels, MAG welding

1. UVOD

Zavarivanje igra veliku ulogu u današnjoj tehnologiji, može se konstatirati da je bez zavarivanja nemoguće spajanje nekih materijala bilo metalnih ili nemetalnih u gotove proizvode (brodovi, automobili, kotlovi, nosive konstrukcije, mostovi, cjevovodi za vodu i plin...). Kod izrade zavarenih konstrukcija postavljaju se različiti kriteriji kao što su: sigurnost zavarenih spojeva, minimizirani troškovi u pogledu osnovnog i dodatnog materijala kao i minimalan utrošak energije, te se mora voditi briga o čistoći čovjekove okoline. Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodatnog materijala u cilju dobivanja homogenog spoja zadovoljavajuće kvalitete. Na slici 1. prikazani su presjeci kutnog i sučeljenog spoja sa osnovnim elementima zavarenog spoja dobivenog u jednom prolazu.



Slika 1.

Osnovni elementi zavarenog spoja [1]

- | | |
|----------------------------|--|
| 1 – Osnovni materijal (OM) | 7 – Zona utjecaja topline (ZUT) |
| 2 – Lice zavara | 8 – Rub zavara |
| 3 – Naličje zavara | 9 – Dubina penetracije |
| 4 – Korijen zavara | 10 – Nadvišenje lica i korijena zavara |
| 5 – Granica taljenja | 11 – Širina zavara |
| 6 – Zona taljenja (ZT) | 12 – Stvarna debljina zavara |

Zavareni spoj sastoji se od zone taljenja (ZT) i zone utjecaja topline (ZUT). Zona taljenja je dio zavarenog spoja koji je tijekom zavarivanja bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i skrućivanja. U ovoj zoni odvijaju se procesi slični kao pri proizvodnji metala u

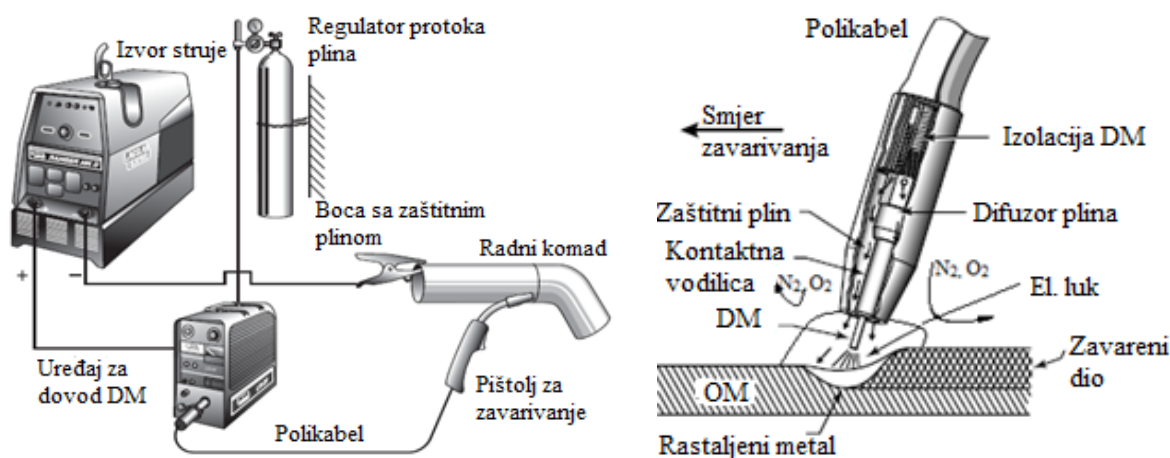
pećima (međusobno djelovanje rastaljenog metala, troske i okoline). Zona taljenja može se sastojati od osnovnog materijala ili mješavine osnovnog i dodatnog materijala. Zona utjecaja topline dio je osnovnog materijala koji se nalazi neposredno uz rastaljenu zonu, gdje dolazi do promjene kristalne strukture. Širina ZUT – a ovisi o unosu topline i najčešće je od 2 do 8 mm. [2]

U ovom radu analizirati će se nastanak toplih pukotina pri zavarivanju raznorodnih čelika, uzroci koji dovode do pojave toplih pukotina te kako ih pokušati spriječiti. Pukotine se smatraju jako opasnim u zavarenim spojevima te su prema normi HRN EN ISO 5817 [34] samo uvjetno dopuštene. Eksperimentalni dio će pokazati u kojoj će se mjeri pojaviti tople pukotine kod MAG postupka zavarivanja visokolegiranog austenitnog i nelegiranog čelika sa dodatnim materijalom u obliku žice MIG 309 LSi, pri različitim parametrima zavarivanja.

Kod zavarivanja raznorodnih čelika javljaju se određeni problemi koji nepovoljno djeluju na zavareni spoj, pa tako i u konačnici na cijelu konstrukciju. Radi se o difuziji ugljika, krhkosti, pukotinama, toplinskim napreznjima što rezultira oslabljenim mehaničkim svojstvima, a to dovodi do smanjenja sigurnosti zavarenog spoja tj. cjelokupne konstrukcije.

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

Potreba za produktivnijom i kvalitetnijom izradom zavarenih konstrukcija zahtjeva primjenu visokoučinskih postupaka zavarivanja. Jedan od takvih postupaka je i MAG zavarivanje koji je pogodan za mehanizaciju, automatizaciju i robotizaciju. MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivim dodatnim materijalom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina CO₂ (MAGC postupak) ili mješavini (MAGM postupak). MAG postupak zavarivanja primjenjuje se od 1953. godine, a nastao je u bivšem SSSR – u, na temeljima već postojećeg MIG zavarivanja, prema HRN EN ISO 4063 [35] oznaka mu je 135. Primjenjuje se za zavarivanje nelegiranih, niskolegiranih i pod određenim uvjetima i za visokolegirane čelike. [3, 4] Na slici 2. prikazan je shematski prikaz MAG postupka zavarivanja, proces taljenja, te osnovni dijelovi pištolja za zavarivanje. Uređaj za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne struje sa „ravnom“ statičkom karakteristikom, polikabel, uređaj za dovod DM, boce sa zaštitnim plinom, pištolja za zavarivanje te regulatora protoka zaštitnog plina.



Slika 2. Shematski prikaz MAG postupka zavarivanja, procesa taljenja, te osnovnih dijelova pištolja za zavarivanje [5]

To je produktivan postupak zavarivanja najčešće korišten u industriji, te je univerzalan, koji omogućava zavarivanje različitih tankih i debelih materijala. MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak kod kojeg se toplina električnog luka koristi za taljenje osnovnog i dodatnog materijala u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (CO₂) ili njegovih mješavina (CO₂+Ar+H₂, CO₂+Ar, Ar+O₂, CO₂+Ar+O₂). Električni luk uspostavlja se između dodatnog

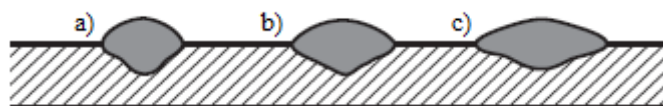
materijala (spojen na „+“ pol izvora istosmjerne struje) i osnovnog materijala. Električni luk je usmjerenom kretanje elektrona kroz ionizirani prostor između dviju elektroda termoemisijom i emisijom električnog polja za kojeg ne vrijedi Ohmov zakon, te on mora biti konstantne duljine, a njegovo gibanje mora biti jednoliko da bi se ostvarila jednolika kvaliteta zavara. Taljenje dodatnog materijala i njegov prijenos u talinu praćen je pojavom sila, kao što su elektromagnetska i gravitacijska, sile od strujanja i eksplozije plinova, sile od pritiska plazme, te sila od površinske napetosti. [3, 4]

2.1. Parametri MAG postupka zavarivanja

Ograničenja kod MAG postupka zavarivanja mogu biti: pojava poroznosti, pukotina, naljepljivanja, štrcanja uslijed neodgovarajuće tehnike rada i pogrešnog izbora parametara za zavarivanje. Na kvalitetu zavarenog spoja upravo ti parametri imaju veliki utjecaj koji se biraju obzirom na vrstu i debljinu OM, oblik spoja i položaj zavarivanja. Kada se govori o parametrima zavarivanja misli se na: napon električnog luka, struju zavarivanja, brzinu dovođenja DM, brzinu zavarivanja, duljinu slobodnog kraja DM, induktivitet, položaj zavarivanja, tehniku zavarivanja, vrstu i protok zaštitnog plina.

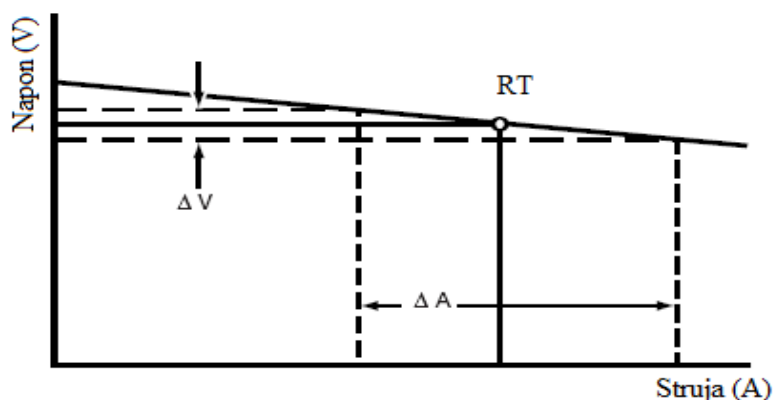
2.1.1. Napon električnog luka

O naponu električnog luka ovisna je duljina električnog luka (veći napon → veći luk → širi i nizak zavar), utječe na način prijenosa metala, protaljšivanje, širinu i izgled zavara. [3] Na slici 3. prikazan je utjecaj napona električnog luka na oblik, protaljšivanje i širinu zavara pri konstantnim ostalim promjenjivim parametrima.



Slika 3. Utjecaj napona el. luka na oblik, protaljšivanje i širinu zavara (a - mali, b - srednji i c - veliki napon električnog luka) [6]

Kod MAG postupka zavarivanja izvor struje posjeduje „ravnu“ statičku karakteristiku što znači da ima svojstvo samoregulacije dužine električnog luka tj. da se primicanjem prema ili odmicanjem pištolja od radnog komada osigurava konstantna dužina električnog luka tj. napon je konstantan (CV – karakteristika izvora) (slika 4.).



Slika 4. „Ravna“ statička karakteristika istosmjernog izvora struje kod MAG postupka [5]

2.1.2. Struja zavarivanja

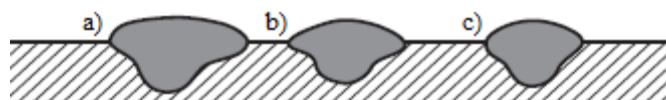
Ovisi o debljini, vrsti materijala i položaju zavarivanja, definirana je brzinom dovođenja DM (veća brzina → veća jakost struje) i promjerom DM (veći promjer → širi zavar), utječe na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena, dubinu protaljivanja, te na količinu unesene topline. [3] Na slici 5. prikazan je utjecaj jakosti struje na oblik, protaljivanje i širinu zavara pri konstantnim ostalim promjenjivim parametrima.



Slika 5. Utjecaj jakosti struje na oblik, protaljivanje i širinu zavara (a - mala, b - srednja i c - velika struja) [6]

2.1.3. Brzina zavarivanja

Potrebno ju je uskladiti sa količinom taline jer može doći do naljepljivanja uslijed prevelike brzine zavarivanja i male količine taline i obrnuto, utječe na produktivnost i bira se u zavisnosti od jakosti struje i položaja zavarivanja. [3] Na slici 6. prikazan je utjecaj brzine zavarivanja na oblik, protaljivanje i širinu zavara pri konstantnim ostalim promjenjivim parametrima.

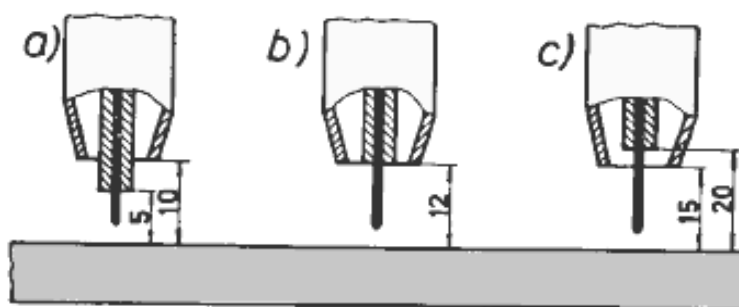


Slika 6. Utjecaj brzine zavarivanja na oblik, protaljivanje i širinu zavara (a - mala, b - srednja i c - velika brzina zavarivanja) [6]

2.1.4. Duljina slobodnog kraja DM

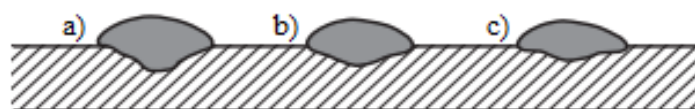
U zavisnosti od jačine struje razlikuju se tri međusobno zavisna položaja slobodnog kraja DM i mlaznice za zaštitni plin:

1. slobodni kraj DM manji od odstojanja mlaznice, za struje od 50 do 170 A (sl. 7a),
2. slobodni kraj DM jednak odstojanju mlaznice, za struje od 170 do 350 A (sl. 7b) i
3. slobodni kraj DM veći od odstojanja mlaznice, za struje iznad 350 A (sl. 7c). [3]



Slika 7. Karakteristični položaji slobodnog kraja DM i mlaznice za plin [8]

Na slici 8. prikazan je utjecaj duljine slobodnog kraja DM na oblik, protaljivanje i širinu zavara pri konstantnim ostalim parametrima. Osim za jakost struje gdje se ona smanjuje kako se povećava duljina slobodnog kraja.



Slika 8. Utjecaj duljine slobodnog kraja DM na oblik, protaljivanje i širinu zavara (a - mala, b - srednja, c - velika duljina slobodnog kraja DM) [6]

2.1.5. Induktivitet

Induktivitetom se regulira brzina promjene struje pri kratkim spojevima tj. kontrolira se brzina porasta struje. Dodavanjem indukcijske zavojnice sa otporom u strujni krug, brzina porasta struje je duža što ima za posljedicu glatko odvajanje kapljice sa vrha DM i onda ne dolazi do prskanja naokolo.

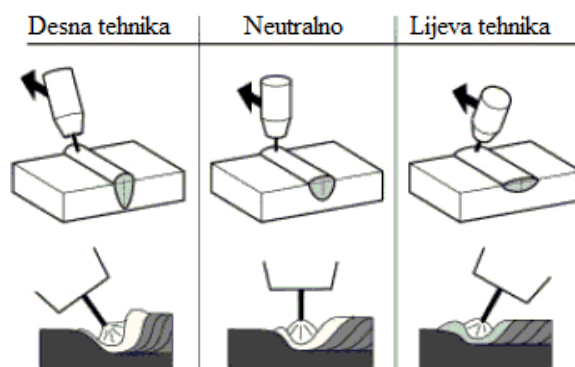
2.1.6. Položaj zavarivanja

Ovisno o položaju zavarivanja primjenjuju se i različiti prijenosi metala. Kod horizontalnog i vodoravnog položaja to su štrcajući i mješoviti (kojeg treba izbjegavati), dok se kod svih ostalih položaja primjenjuju kratki i impulsni prijenos metala. Kod prisilnih položaja koristi se dodatni materijal manjih promjera.

2.1.7. Tehnika zavarivanja

Postoje tri osnovne tehnike zavarivanja a to su (slika 9.):

1. Desna tehnika - uži zavar i veća penetracija, koristi se za deblje materijale,
2. Neutralna (okomito) - širi zavar i srednja penetracija,
3. Lijeva tehnika - širi zavar i manja penetracija, koristi se za tanje materijale.

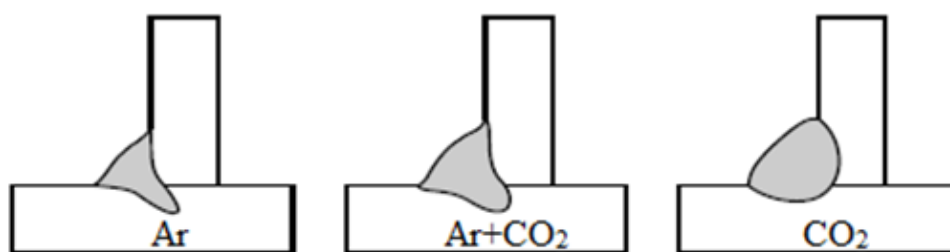


Slika 9. Tehnike zavarivanja [8]

2.1.8. Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja

Zaštitni plin igra veliku ulogu u kvaliteti zavarenog spoja, zato je potreban pravilan izbor odgovarajućeg plina u ovisnosti o materijalu koji se zavaruje, kolika je željena penetracija, širina, izgled i oblik zavara. On ne samo da štiti talinu od atmosferskih utjecaja, on također osigurava stvaranje plazme tj. postaje provodnik električne struje pri čemu se zagrijava, predaje toplinu DM i OM koji se onda tale, te kontrolira vrstu prijenosa metala u električnom luku. Plinovi koji se koriste kod MAG zavarivanja prikazani su u normi HRN EN ISO 14175 [36]. Zaštitni plin ima ulogu zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja plinova iz atmosfere i ionizacijom osigurava vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Zaštitni plin na mjesto zavarivanja dovodi se kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne vodilice (slika 2.). [3]

Količina zaštitnog plina ovisi o jakosti struje zavarivanja, promjeru DM (veći promjer → veća količina zaštitnog plina), obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Povećana potrošnja zaštitnog plina javlja se na otvorenom prostoru kao i pri zavarivanju kutnih spojeva sa vanjske strane. Mora se voditi računa o tome da se ne zavaruje sa premalom a ni sa prevelikom količinom zaštitnog plina jer može doći do pojave poroznosti i oksidacije. Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na: električno fizikalna svojstva električnog luka (oblik jezgre, geometrija električnog luka, potrebna energija za ionizaciju plinova), metalurške procese u talini zavara (oksidirajuće, reducirajuće, neutralne), tehnološke parametre (dubina penetracije, širina zavara). [4] Na slici 10. prikazan je utjecaj različitih plinova na izgled i dubinu penetracije.



Slika 10. Utjecaj različitih plinova i mješavina na penetraciju i oblik zavara [5]

Najbolja svojstva zaštitnih plinova postižu se njihovim miješanjem u određenim omjerima, jer se na taj način poboljšava način prijenosa metala kao i kvaliteta zavarenog spoja. Kod MAG zavarivanja čelika najčešće mješavine su Ar+CO₂ i Ar+O₂.

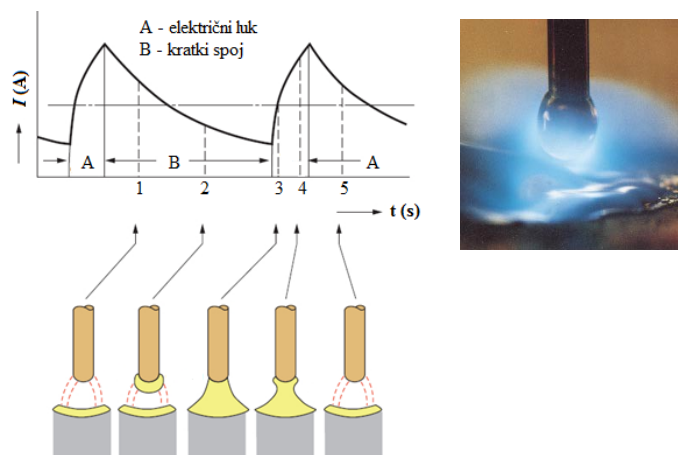
Mješavine Ar+(2.5 %CO₂) i Ar + (1 do 3 %O₂) prema HRN EN ISO 14175 [36] (oznake M12 i M13) imaju mogućnost rada u svim režimima prijenosa metala, pri većim strujama (većim brzinama DM) daju stabilan električni luk bez prskanja sa širom i manjom penetracijom, te poboljšavaju taljenje rubova zavara sa povećanom tečnošću taline.

2.2. Prijenos metala u električnom luku kod MAG zavarivanja

Kod MAG zavarivanja prijenos metala odvija se slobodnim letom ili premoščivanjem. Odvija se u tri faze: 1. taljenje vrha DM i odvajanje kapljice, 2. slobodni let kapljice kroz električni luk, 3. sjedinjenje kapljice sa talinom u zavarenom spoju. Postoje četiri osnovna prijenosa metala u električnom luku kod MAG zavarivanja a to su: kratki spoj (MAG-D), mješoviti luk (MAG-G), štrcajući luk (MAG-S) te impulsni luk (MAG-P). Odabir vrste prijenosa metala u električnom luku odabire se na temelju debljine i vrste OM, položaju i tehnici zavarivanja.

2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Kod prijenosa metala kratkim spojevima koriste se male struje zavarivanja od 50 do 170 A, niske napone električnog luka od 13 do 21 V. Pogodan je za spajanje tankih materijala debljine do 5 mm, zbog male količine rastaljenog metala, malenog unosa topline, jer se luk stalno pali i gasi, malih deformacija za korijenske prolaze te je moguće raditi u svim položajima. Kod zavarivanja materijala debljih od 5 mm nije pogodan jer ne dolazi do protaljivanja nego naljepljivanja. Najpogodniji DM za rad u kratkom spoju su promjera 0,6, 0,8 i 1 mm, zbog toga što uređaj još uvijek ima mogućnost reagiranja na promjene duljine luka (efekt samoregulacije) i brzine dovođenja DM imaju širi opseg korištenja, dok je to sa DM većeg promjera malo problematično. Duljina slobodnog kraja DM kreće se u rasponu od 6 do 10 mm, a slobodni kraj DM je manji ili jednak odstojanju mlaznice. Za rad u kratkom spoju pogodni je zaštitni plin CO_2 ili njegove mješavine npr. (CO_2+Ar , $\text{CO}_2+\text{Ar}+\text{O}_2$) sa protokom od 6 do 10 l/min u zavisnosti o promjeru DM. Na slici 11. prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala kratkim spojevima.

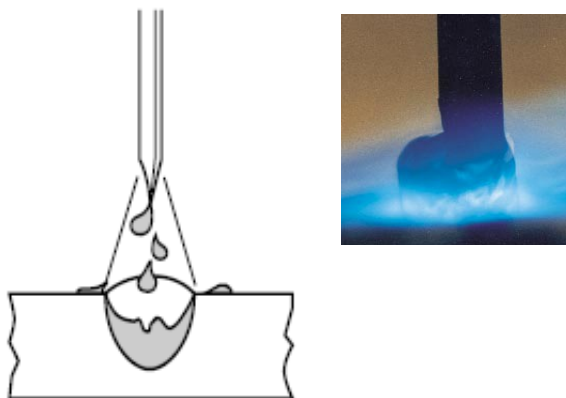


Slika 11. MAG prijenos metala kratkim spojevima [9, 10]

2.2.2. Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg luka i u manjoj mjeri dolazi do pojave kratkih spojeva. Koriste se struje (od 170 do 240 A) i naponi (od 22 do 25 V) veće su nego je slučaj kod prijenosa kratkim spojevima, što uzrokuje stvaranje većih kapljica koje se nepravilno odvajaju i padaju s vrha DM što ima za posljedicu pojavu prskanja, nemogućnost zavarivanja u svim položajima i lošiji izgled zavara. [3] Za ovaj način prijenosa metala moglo bi se reći da je nekakav štetan nusprodukt u kojeg se dođe ili korištenjem CO_2 zaštitnog plina

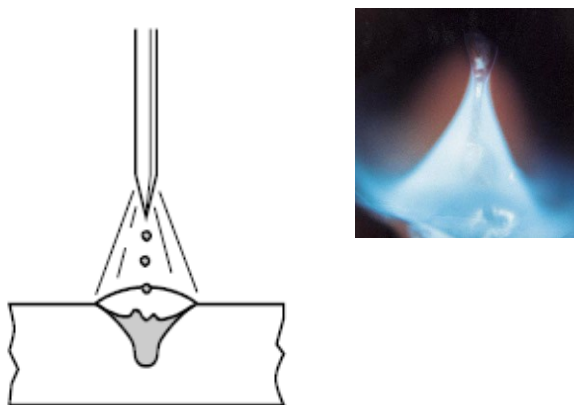
pokušavajući raditi u štrcajućem načinu prijenosa, ili pogrešno namještenih parametara što onda ima za posljedicu dodatno brušenje mjesta zavarivanja, naljepljivanje na radni komad, kontaktnu i plinsku sapnicu. Na slici 12. prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom.



Slika 12. MAG prijenos metala prijelaznim lukom [5, 10]

2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom karakteristično je da se metal sa vrha DM slobodnim letom sitih kapljica prenosi kroz atmosferu luka i pritom DM ne dolazi u kontakt sa osnovnim materijalom. Pogodan za zavarivanje debljina preko 5 mm zbog jačih struja (od 200 do 450 A) i viših napona (od 25 do 35 V) i to u zaštiti sa maksimalno 18 %CO₂, jer ako je veći postotak CO₂ ne može se doći do područja štrcajućeg luka, nego se radi u području prijelaznog luka, mogućnost zavarivanja u položenom i horizontalnom položaju uz velike brzine depozita materijala, malog prskanja, velike penetracije i lijepog izgleda zavara. [4] Na slici 13. prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom.

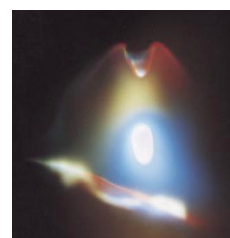
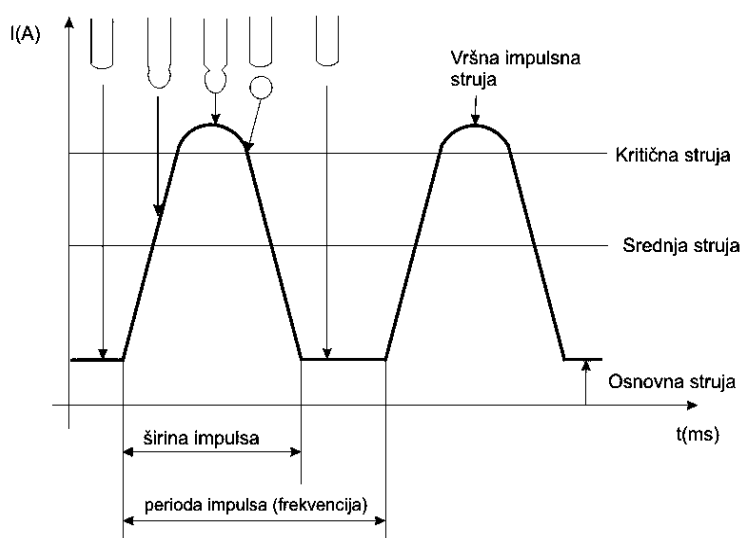


Slika 13. MAG prijenos metala štrcajućim lukom [5, 10]

Duljina slobodnog kraja DM kreće se u rasponu od 12 do 20 mm, a slobodni kraj DM je veći od odstojanja mlaznice. Za rad sa štrcajućim lukom pogodne su mješavine npr. CO₂+Ar koja se i najčešće koristi sa protokom zaštitnog plina od 14 do 24 l/min u zavisnosti od promjera DM koji se kreće od 1 do 1,6 mm, s time da bi kod ručnog zavarivanja optimalni DM bio promjera 1 ili 1,2 mm zbog lakše kontrole nad talinom. Prilikom podizanja parametara zavarivanja u odnosu na kratki spoj dolazi do povećanog unosa topline zbog čega dolazi do deformacija koje bi trebalo izbjegavati pravilnim redoslijedom zavarivanja.

2.2.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Kod prijenosa metala impulsnim lukom kapljica metala ostvaruje se primjenom izvora koji daje impulsnu struju frekvencije od 20 do 300 Hz. „Računalo“ izvora struje kontrolira svaku kapljicu pojedinačno, pri tome se kontrolira kolika je njezina veličina i brzina tj. koliko vremena treba da se sljedeća kapljica odvoji sa DM. Primjena impulsa je važna kod zavarivanja visokolegiranih nehrđajućih čelika jer kod velikih unosa topline dolazi do deformacija pri čemu može doći do smanjenja svojstava korozijske otpornosti, pri čemu je zavar čvršći i lijepog je izgleda (bez prskotina). Na slici 14. prikazan je grafički prikaz impulsnog postupka i način otkidanja kapljice. Krivulja prikazana na slici 14. može biti i drugačijeg oblika zbog toga što proizvođači opreme teže postizanju boljih svojstava zavara pa je ukošavaju, zaobljuju, režu, zavrću... [4]



Slika 14. MAG prijenos metala impulsnim lukom [10, 11]

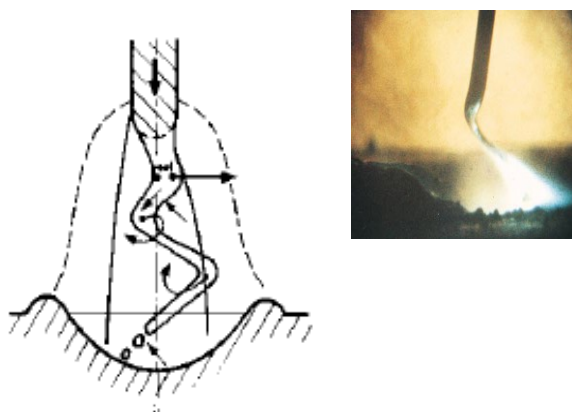
Osnovni parametri kod ovog načina prijenosa metala su:

- vršna impulsna struja koja se kreće u rasponu od 250 do 650 A, a određuje se ovisno o vrsti osnovnog materijala, promjeru dodatnog materijala (žice) i vrsti zaštitnog plina
- osnovna struja (od 20 do 50 A), ima zadatak održavati električni luk,
- širina impulsa (od 1 – 3 ms), vrijeme potrebno za odvajanje jedne kapljice,
- frekvencija (od 20 do 300 Hz), pomoću nje se određuje broj kapljica u sekundi,
- brzina dodatnog materijala (žice) (od 2 do 15 m/min). [4]

Zavarivač prije zavarivanja podesi protok zaštitnog plina, brzinu, vrstu i promjer dodatnog materijala, a programska jedinica stroja podesi ostale parametre.

2.2.5. *Prijenos metala rotirajućim lukom*

Prijenos metala rotirajućim lukom pojavljuje se pri povećanim parametrima i to jakosti struje preko 450 A i napona iznad 35 V, gdje se zbog tih povećanih parametara događa da luk počinje rotirati. Moglo bi se reći da je to jedna vrsta štrcajućeg prijenosa metala kod kojeg duljina slobodnog kraja DM iznosi preko 20 pa čak i do 40 mm. Koriste se mješavine Ar+CO₂ ili Ar+O₂. Za ovaj način prijenosa mogu se upotrebljavati žice većih promjera ili čak plosnate žice zbog olakšanja dodavaču DM da ne mora neprekidno raditi na maksimumu što mu onda smanjuje vijek trajanja. Na slici 15. prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom.



Slika 15. MAG prijenos metala rotirajućim lukom [10, 12]

3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Kao što i sam naziv govori, ovi se čelici primjenjuju za tipične konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju – prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremaju i transportiraju tekućine ili plinove, zatvaraju, spajaju elemente konstrukcija itd. To su osovine, vratila, zupčanici, nosači, opruge, vijci, zatici, poklopci, kućišta, ventili... Na temelju mnogostrukih zahtjeva koji se postavljaju na ove dijelove, od konstrukcijskih čelika traže se sljedeća svojstva:

- mehanička svojstva,
- otpornost na trošenje,
- otpornost na koroziju,
- tehnološka svojstva. [13]

Pojedine skupine konstrukcijskih čelika upravo posjeduju neka od gore navedenih istaknutih svojstava ili njihovu kombinaciju. Dublje poznavanje svojstava karakterističnih skupina čelika preduvjet je za njihovu pravilnu primjenu. [13]

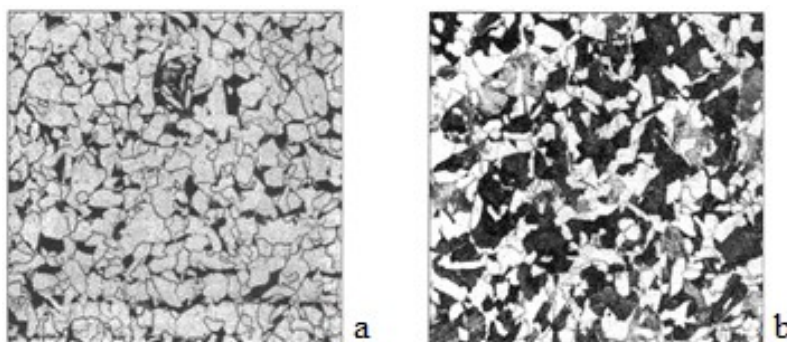
U ovom radu pažnja će se prvenstveno posvetiti općim konstrukcijskim čelicima za nosive konstrukcije (nelegirani čelici) i korozijski postojanim (VAČ) čelicima. Najviši udjeli elemenata koji odjeljuju nelegirane od legiranih čelika prikazani su u normi HRN EN 10020 [37]. U slučaju prelaska vrijednosti masenog udjela jednog ili više elemenata čelik je legiran.

3.1. Nelegirani čelici

Najvažniji prateći element kod nelegiranih konstrukcijskih čelika je ugljik čiji je sadržaj od 0,1 do 0,6 %. Sadržaj ostalih elemenata za ovu skupinu čelika kreće se približno do: 0,55 %Si, 1,65 %Mn, 0,3 %Al, 0,1 %Ti, 0,035 %S, 0,035 %P, 0,4%Cu. [1]

Povećanjem sadržaja ugljika raste tvrdoća, granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, ali se smanjuje istezljivost, suženje poprečnog presjeka, udarni rad loma te opada sposobnost čelika za plastičnu deformaciju i zavarljivost, a raste zakaljivost. [13]

Nelegirani konstrukcijski čelici imaju feritno – perlitnu strukturu, a zrno će biti sitnije ako je čelik nakon toplog oblikovanja normaliziran. Ova sitnozrnatost još se poboljšava posebnim smirivanjem uz dodatak aluminija koji se spaja s dušikom u aluminijev nitrid (AlN) i tako osigurava usitnjenje zrna, odnosno sprečava novi njegov rast pri idućim ugrijavanjima, npr. pri zavarivanju. [13] Na slici 16. prikazana je feritno – perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika sa različitim sadržajem ugljika.



Slika 16. Feritno – perlitna mikrostruktura nelegiranog konstrukcijskog čelika a) čelik s 0,1 %C; b) čelik s 0,25 %C [3]

Kemijski sastav nije propisan, ali su zato zajamčena mehanička svojstva. Zbog nezajamčenog kemijskog sastava i višeg masenog udjela nečistoća nego u ostalih čelika, kao i nehomogenosti u mikrostrukturi, nisu predviđeni za toplinsku obradu. [13]

3.1.1. Zavarljivost nelegiranih čelika

Od tehnoloških svojstva naročito je važna zavarljivost. Preduvjet dobre zavarljivosti je što manja vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_{ekv} . Znači da će zavarljivost biti tim bolja što je manji %C i što je manji stupanj legiranosti, jer legiranost povisuje prokaljivost, tj. opasnost od spontanog zakaljivanja. Prihvatljiva vrijednost je $C_{ekv} < 0,4$. Jedna od najčešće korištenih formula za C_{ekv} glasi:

$$C_{ekv} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10} \quad (1)$$

Čelici sa većim sadržajem C_{ekv} zahtijevaju predgrijavanje, čime se postiže sporije ohlađivanje nakon zavarivanja u cilju smanjenja mogućnosti nastanka hladnih pukotina, nastanka tvrdih faza te smanjenje zaostalih napetosti. [13, 14]

Osim C_{ekv} jako bitan čimbenik koji utječe na zavarljivost čelika je i način njegove proizvodnje. Nelegirani konstrukcijski čelici se mogu proizvesti kao:

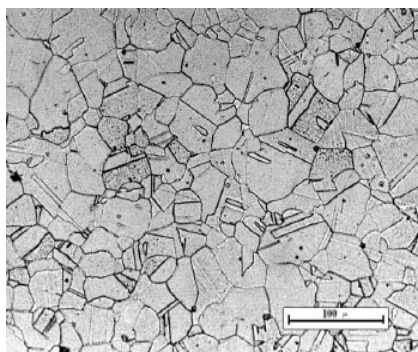
- Neumireni čelici su najpovoljniji na tržištu, bez dezoksidacije, imaju sklonost pojavi pukotina, poroznosti, starenja, krhkosti te su lošije zavarljivi. Nemaju jednoličnu mikrostrukturu po presjeku, sadrže plinske mjehuriće te su im izražene segregacije. Nije ih preporučljivo koristiti za zahtjevnije zavarene konstrukcije.
- Umireni čelici u toku proizvodnje tretirani su dezoksidantima (Si, Mn), imaju homogenu mikrostrukturu, bolja mehanička svojstva i zavarljivost, ne sadrže plinske mjehuriće i nije izražena segregacija.
- Posebno umireni čelici u procesu dezoksidacije osim silicijem i manganom tretirani su i siliko-kalcijem (CaSi) i aluminijem koji veže preostali kisik u Al_2O_3 i dušik u AlN. Rezultat je čelik s vrlo niskim masenim udjelom nečistoća, velike žilavosti i male osjetljivosti na krhki lom. Sitne čestice AlN povisuju čvrstoću i žilavost, a omogućuju postizanje sitnog zrna. [13]

Neke od mjera koje su potrebne za kvalitetno zavarivanje nelegiranih konstrukcijskih čelika su: predgrijavanje, zavarivanje s većim unosom topline, zavarivanje odgovarajućim dodatnim materijalom kao i odabir osnovnog materijala sa što manjim udjelom sumpora i ostalih nečistoća, jer je sumpor glavni začetnik pojave toplih pukotina, optimalno oblikovanje konstrukcije, te popuštanje zaostalih napetosti. [1, 2]

3.2. Visokolegirani austenitni čelici

Visokolegirani austenitni čelici su na prvom mjestu po ukupnoj proizvodnji i po broju različitih vrsta. Korozijski su postojani u puno različitih medija. Minimalna granica razvlačenja na sobnoj temperaturi iznosi oko 210 N/mm^2 , što je jedan od velikih nedostataka VAČ i u tom pogledu može se usporediti sa nelegiranim čelicima. Ne mogu se toplinski očvrnuti. Zadržavaju dobra svojstva na vrlo niskim temperaturama. Maksimalna temperatura primjene je oko $760 \text{ }^\circ\text{C}$, do koje ne dolazi do smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju. Mogu se (značajno) očvrnuti hladnom deformacijom, pri čemu dolazi do smanjenja duktilnosti. Primjenjuju se u uvjetima kad se traži dobra postojanost na atmosfersku koroziju i koroziju na povišenoj temperaturi. Zavarljivost im je dobra. Legiraju se elementima koji osiguravaju formiranje austenitne mikrostrukture. Ukupni maseni udio gamagenih legiranih elemenata uglavnom prelazi 8 %. Ugljik, iako nije legirni element također promiče austenitnu

mikrostrukturu, a dodaje se i zato što povisuje otpornost na puzanje. Dušik, osim što promiče austenitnu strukturu, povisuje čvrstoću na sobnoj i niskim temperaturama. [15] Maseni sastav kreće se u granicama (0,02 - 0,15 %C, 12 - 25 %Cr, 8 - 25 %Ni, a po potrebi može sadržavati i ostale elemente, posebno one koji proširuju područje austenita. [14] Na slici 17. prikazan je karakterističan izgled mikrostrukture visokolegiranog austenitnog čelika.



Slika 17. Karakteristični izgled mikrostrukture VAČ [16]

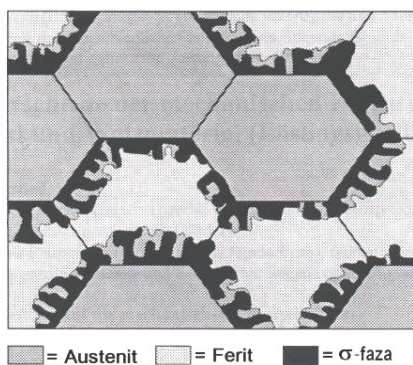
VAČ imaju široko područje primjene od arhitekture, medicine, umjetnosti, nosivih konstrukcija pa sve do kuhinjskih uređaja i pomagala. Osjetljivi su na napetosnu koroziju pa se ne preporuča njihova primjena u okruženju s morskom vodom ili mediju koji sadrži kloride te u jako korozivnim medijima. Opasnost od ovog tipa korozije povećana je ako je konstrukcija izvedena zavarivanjem. Odabir pojedine vrste visokolegiranog austenitnog čelika, tj. kvalitete VAČ treba pažljivo odabrati. [15, 16]

3.2.1. Zavarljivost visokolegiranih austenitnih čelika

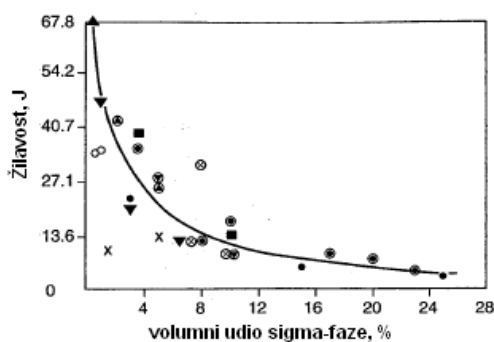
Prilikom zavarivanja VAČ dolazi do razaranja pasivnog filma koje jamči korozijsku otpornost, što ima za posljedicu pojavu korozijskih procesa. Stoga je važno držati se pravilnog odabira odgovarajuće vrste čelika ovisno o primjeni kao i ispravnog provođenja tehnologije zavarivanja. Kao posljedica zavarivanja osim strukturnih promjena koji nastaju u zavaru, ZUT-u i OM na površini čelika dolazi do nastanka područja obojenosti što negativno utječe na spontano formiranje oksidnog filma. [16]

Problemi koji se pojavljuju kod zavarivanja VAČ kao posljedica nepoštivanja tehnologije zavarivanja, neprimjerenih uvjeta njihove primjene mogu se svesti u tri skupine: korozijske pukotine, izlučivanja sigma faze i pojava toplih pukotina. Unatoč tome što imaju dobru

korozijsku postojanost područje oko zavarenog spoja može postati osjetljivo na interkristalnu, rupičastu, naponsku, koroziju u procjepu i ostale oblike korozije (kavitacijska, erozijska). Osjetljivost ovih čelika na IKK posljedica je duže izloženosti zavarenog spoja u kritičnom području od 450 do 850 °C (najjače na 650 °C), gdje na granicama zrna precipitiraju Cr_{23}C_6 karbidi (94,3 %Cr). Budući da u blizini granice zrna dolazi do potrošnje kroma ($\text{Cr} < 12$) zbog stvaranja Cr_{23}C_6 karbida, stvaraju se uvjeti u slučaju prisustva agresivnih medija u eksploataciji za nastanak IKK. Izlučivanje karbida može se spriječiti legiranjem elementima koji tvore stabilne karbide (Nb, Ti, Ta), smanjenjem sadržaja ugljika ispod 0,03 %, gašenjem te malim unosom topline. [1, 2, 4] Sigma faza je tvrda, krhka, nemagnetična intermetalna faza koja nastaje pri povišenim i visokim temperaturama, te uzrokuje smanjenje istežljivosti i žilavosti. Postoji oko 50-ak vrsta σ -faza, ali je najpoznatija FeCr σ -faza s oko 48 %Cr. U VAČ koji u mikrostrukturi imaju delta ferita nastaje jako brzo i što je udio delta ferita veći, σ -faza nastaje brže i u većoj količini. Korozijska postojanost opada jer nastanak kromom bogate σ -faze dovodi do osiromašenja Cr u okolnom području. Na slici 18. prikazan je model nastanka i rasta σ -faze, a na slici 19. utjecaj σ -faze na udarni rad loma. Sigma faza nastaje na granici ferit-austenit i dalje se širi u ferit. [7]



Slika 18. Model nastanka i rasta sigma faze [17]



Slika 19. Utjecaj σ -faze na udarni rad loma Fe-Cr-Ni legura pri sobnoj temperaturi [17]

U tablici 1. prikazan je utjecaj pojedinih elemenata u visokolegiranim austenitnim čelicima.

Tablica 1. Utjecaj pojedinih elemenata u VAČ [1]

Element	Tvori strukturu	Katakteristike
C	A (austenit)	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Može stvarati $Cr_{23}C_6$ i uzrokovati IKK.
Cr	F (ferit)	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji.
Ni	A	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost.
N	A	30 puta jače djeluje na stvaranje austenita nego Ni. Povišuje čvrstoću i pomaže stvaranju ferita.
Nb		Dodaje se čeliku $\min Nb \geq 8 \times \%C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac finog zrna.
Mn	A	Sprečava vruće pukotine stvaranjem MnS.
Mo	F	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama. Poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija.
P, S, Se		Olakšava OOC, ali pogoršava zavarljivost i antikorozivnost.
Si	F	Poboljšava vatrootpornost (otpor oksidaciji). Dodaje se uvijek zbog dezoksidacije.
Ti		Dodaje se čeliku $Ti \geq 5 \times \%C$ da bi se vezao za ugljik i spriječio IKK. Tvorac sitnog zrna.

Zahtjevi koji se preporučuju pri određivanju tehnologije i zavarivanja visokolegiranih austenitnih čelika su:

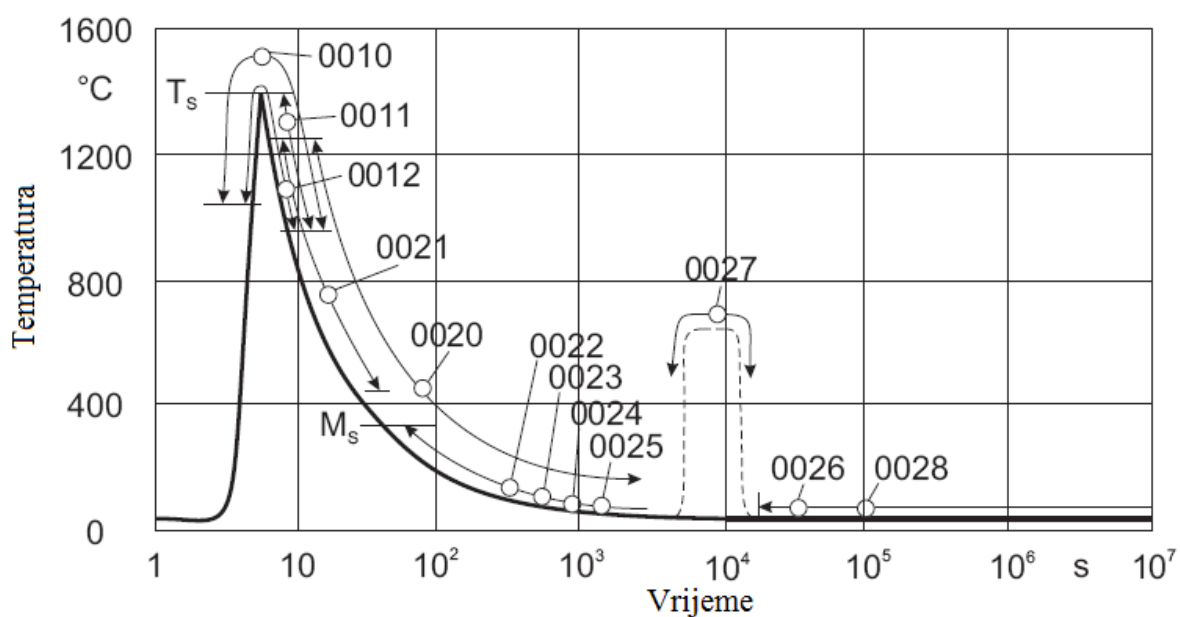
- Izborom dodatnog materijala osigurati sadržaj delta ferita u rasponu od 3 do 10 %. Na taj se način praktički otklanja opasnost od nastanka toplih pukotina. Koristiti strukturne dijagrame.
- Prije zavarivanja se sve površine moraju očistiti – odmastiti.
- Električni luk držati što kraćim
- Voditi brigu o pravilnom izboru zaštitnog plina.
- Predgrijavanje nije potrebno.

- Međuslojna temperatura do maksimalno 150 °C.
- Primijeniti sekundarnu zaštitu u slučaju onemogućenog kasnijeg pristupa npr. kod zavarivanja potpunog provara cijevi.
- Osigurati takve uvijete zavarivanja kod kojih je miješanje sa osnovnim materijalom manje od 35 %.
- Primjenjivati dodatne materijale za zavarivanje sa sniženim sadržajem ugljika.
- Zbog deformacija koje se javljaju kao posljedica zavarivanja preporučljivo je koristiti odgovarajuće načine pripajanja, redosljed zavarivanja.
- Ne preporučuje se ravnanje sa plinskim plamenom, zbog opasnosti od pojave korozije.
- Koristiti alate i stezne elemente od isključivo visokolegiranih austenitnih čelika. [18]

4. TOPLE PUKOTINE

Pojava pukotina u zavarenom spoju smatra se jako opasnom pogreškom i u pravilu pukotine nisu dopuštene. Male pukotine pod djelovanjem naprezanja s vremenom mogu narasti, a pošto su one jaki koncentratori naprezanja mogu uzrokovati smanjenje nosivog presjeka zavarenog spoja i u konačnici dovesti do otkaza konstrukcije. Prema uzroku nastajanja pukotine mogu biti: tople i hladne. Mogu se javiti kao uzdužne, poprečne, zvjezdaste, razgranate, pukotine u odvojenim skupinama u ZUT-u, metalu zavara i OM, kao i kraterske koje mogu biti uzdužne, poprečne ili zvjezdastog oblika.

Na slici 20. prikazano je temperaturno područje nastajanja pukotina, gdje grupa 0010 označava tople, a grupa 0020 hladne pukotine.



0010 područje toplih pukotina

0023 područje vodikovih pukotina

0011 područje pukotina uslijed skrućivanja

0024 područje pukotina zbog zakaljivanja

0012 područje pukotina uslijed pretaljivanja

0025 područje pukotina cijepanja

0020 područje hladnih pukotina

0026 područje pukotina zbog starenja

0021 područje pukotina krhkog loma

0027 područje pukotina precipitacijskog očvrnuća

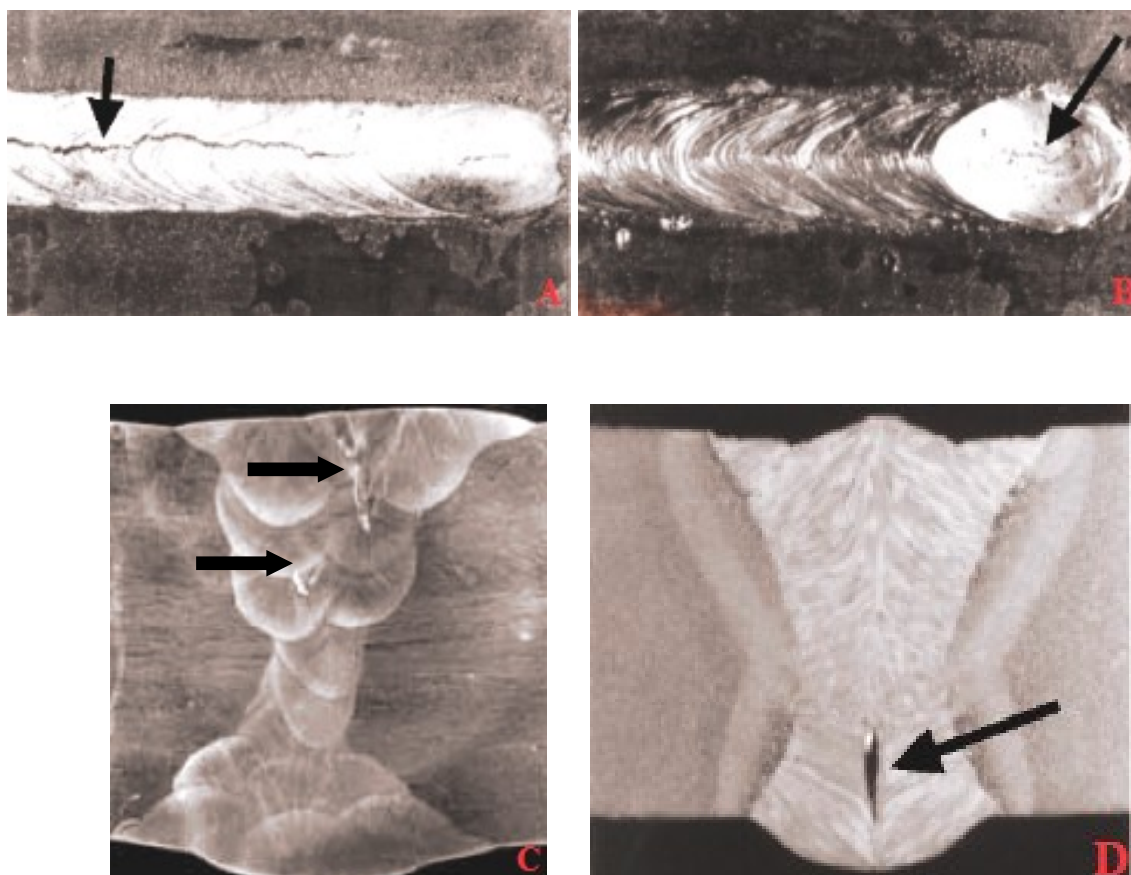
0022 područje pukotina uslijed stezanja

0028 područje lametarnih pukotina

Slika 20. Temperaturno područje nastajanja pukotina [19]

Tople pukotine kod zavarivanja kao što je vidljivo sa slike 20. nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja od tekućeg do čvrstog stanja, a naročitu sklonost prema njima pokazuju visokolegirani austenitni čelici. Niskolegirani konstrukcijski čelici obično su skloniji pojavi hladnih pukotina, ali kod velikih unosa topline, velike količine taline ili nepovoljnih oblika žlijeba, mogućnost prema toplim pukotinama također je prisutna. Tople pukotine se prostiru po granicama zrna materijala, najčešće po dužini sredine zvara, a moguće su i u zoni utjecaja topline. Prijelomna površina im je tamne boje zbog oksidacije površine pukotine pri visokim temperaturama. Pojava toplih pukotina čvrsto je povezana s nečistoćama u materijalu poput sumpora i fosfora, ali i ostali parametri poput oblika žlijeba, dodatnog materijala, zavarivačkih parametara kao i udjeli pojedinih legiranih elemenata igraju bitnu ulogu u smislu pojave toplih pukotina. Tople pukotine koje nastaju u području metala zvara nazivaju se kristalizacijske, a one koje su nastale u području ZUT-a likvacijske. [1, 22]

Na slici 21. prikazane su karakteristične tople pukotine kod zavarivanja; A - površinska, B - kraterska, C - kod nanošenja sljedećeg prolaza, D - pukotina u korijenu zvara.



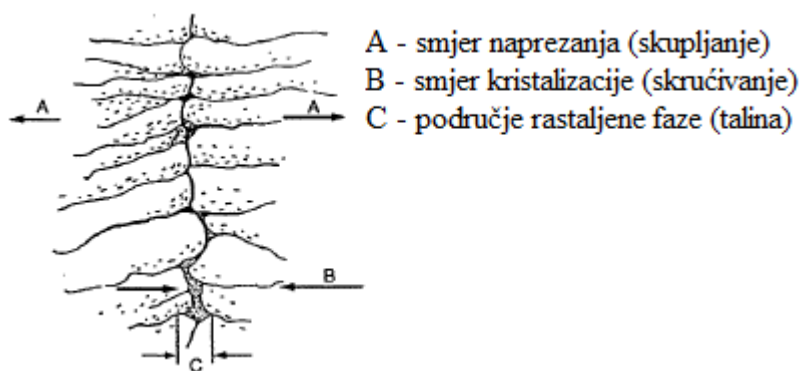
Slika 21. Karakteristični izgled tople pukotine; A - površinska, B – kraterska, C- kod nanošenja sljedećeg prolaza, D - u korijenu zvara [20, 21]

4.1. Kristalizacijske pukotine

Kristalizacijske pukotine nastaju prilikom kristalizacije u zoni taljenja, kada je između dendritnih kristala prisutna i rastaljena faza. Glavni uzrok pojave kristalizacijskih pukotina je prisutnost filma s nisko taljivim fazama na granicama kristala tijekom primarne kristalizacije. Pri stezanju kod hlađenja zavara javljaju se mikro-pukotine na granici kristala a koje se tijekom daljnjeg hlađenja šire u makro-pukotine. Naravno, širenje pukotine ovisi o stanju naprezanja i svojstvima materijala uz vrh početne pukotine. Sama krutost zavarenog spoja uzrokuje vlačna reakcijska naprezanja koja pri stezanju premašuju lomnu čvrstoću materijala pri visokim temperaturama zbog kojih metal zavara može izgubiti sposobnost da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja pri visokim temperaturama. [23]

Pojednostavljeni prikaz nastanka toplih pukotina može se opisati na sljedeći način (slika 22.):

- skrućivanje zavara počinje od hladnih stranica žlijeba prema sredini zavara, a rastaljena faza popunjava razdvojeni dio (B);
- u završnoj fazi skrućivanja preostaje tanki film rastaljene faze između zrna skrućenog materijala (C);
- područje skrućenog materijala skuplja se u smjeru suprotnom od pravca skrućivanja stvarajući velika naprezanja (A);
- ako u procesu između skupljanja i skrućivanja, nadvlada skupljanje, ostat će zrna materijala razdvojena, u toplom stanju – toplja pukotina (E). [22]

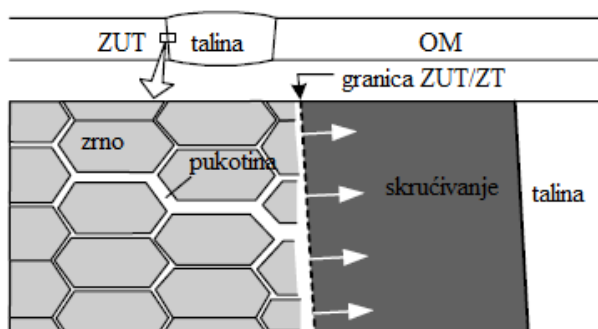


Slika 22. Shematski prikaz nastajanja kristalizacijskih pukotina [22]

Nastajanje ovih kristalizacijskih pukotina pospješuju segregacije nisko taljivih faza, neke od njih prikazane su u tablici 2.

4.2. Likvacijske pukotine

Likvacijske pukotine najčešće nastaju u ZUT – u, a mogu biti uzdužne i poprečne na smjer metala zavara. Mogu se pojaviti i u zoni taljena kod zavarivanja u više prolaza, kada zona taljena postaje ZUT prilikom nanošenja sljedećeg prolaza. Uzrok nastajanja su nečistoće koje su raspoređene po granicama zrna osnovnog materijala u zoni utjecaja topline. Prilikom hlađenja metala zavara, a zbog djelovanja naprezanja dolazi to nastanka likvacijskih pukotina na onim mjestima gdje su raspoređene nečistoće. U ZUT-u ne dolazi do taljenja OM, ali su se nečistoće zbog utjecaja topline prilikom zavarivanja djelomično ili potpuno rastalile tvoreći tanki sloj filma prilikom čega dolazi do pada čvrstoće po granicama zrna tj. dolazi do pojave toplih pukotina likvacijskog tipa. Na slici 23. prikazan je pojednostavljeni mehanizam nastajanja likvacijskih pukotina, gdje likvacijske pukotine nastaju u ZUT-u, prije toga tvoreći tanki film nečistoća koji je nastao uz granice zrna pod djelovanjem topline iz taline, da bi se kasnije kada talina počine kristalizirati uslijed naprezanja pojavile pukotine. [1, 24, 29]



Slika 23. Shematski prikaz nastanka likvacijskih pukotina [24]

Tablica 2. Rastvorljivost pojedinih elemenata, eutektičke faze i temperatura tališta [1]

Element	Rastvorljivost (°C)		Fazu koju tvori	Temperatura tališta (°C)
	U austenitu	U feritu		
S	0,05 % pri 1365	0,14 % pri 1366	Fe-FeS	998
			Ni-NiS	630
P	0,2 % pri 1250	1,6 % pri 1250	Fe-Fe ₃ P	1048
			Ni-Ni ₃ P	875
B	0,005 % pri 1381	0,5% pri 1381	Fe-Fe ₂ B	1177
Nb	1,0 % pri 1300	4,1 % pri 1300	Fe-Fe ₂ Nb	370
Ti	0,36 % pri 1300	8,1 % pri 1300	Fe-Fe ₂ Ti	1290
Si	10,5 pri 1300	10,5 pri 1300	Fe-Fe ₂ Si	1212

4.3. Utjecajni faktori na nastanak toplih pukotina

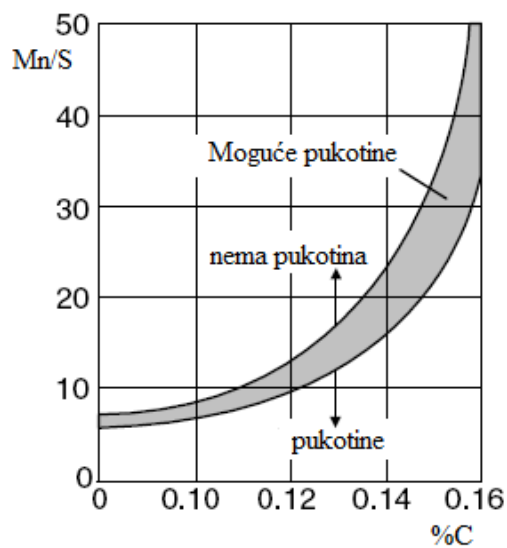
4.3.1. Utjecaj nečistoća na pojavu toplih pukotina

Pojava nečistoća u metalu zavara usko je povezana sa samom proizvodnjom čelika kao i izborom dodatnog materijala koji se koristi prilikom zavarivanja. Nečistoće su najčešći uzrok pojavi toplih pukotina, a posebice tu dolazi do izražaja sumpor i fosfor. Prisutne su u svakom čeliku, a njihove masene udjele treba svesti na što je moguće manju mjeru, jer pogoršavaju svojstva čelika. Nisko taljivi spojevi eutektika smanjuju čvrstoću kristalita po granicama zrna u posljednjoj fazi skrućivanja, pri čemu uslijed napreznja može doći do toplih pukotina. Nečistoće imaju niže talište od tališta čistog metala. [1, 14] Na slici 24. prikazana je pukotina uzrokovana prevelikim sadržajem sumpora.



Slika 24. Pukotina uzrokovana prevelikim sadržajem sumpora u OM [20]

Da bi se spriječio nastanak toplih pukotina preporučljivo je smanjiti što više udio sadržaja sumpora, a ostali dio vezati u faze sa što višim talištem. Sadržaj S iznad 0,04 % smanjuje granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i žilavost. Pogoršava zavarljivost jer ima sklonost segregacijama koje povećavaju sklonost prema nastajanju toplih pukotina. Primjerice mangan se spaja sa sumporom u MnS kojem je talište na 1620 °C u odnosu na eutektik Fe-FeS kojem je talište na 998 °C, a pošto MnS ima više talište od Fe počinje prvi sa skrućivanjem i služi kao klica kristalizacije. Fosfor isto kao i sumpor stvara nisko taljive eutektike sa niklom Ni-Ni₃P kojem je talište na 875 °C. Pojava tih nečistoća uzrokom je pojave segregacija zbog čega u posljednjem stadiju skrućivanja uslijed napreznja mogu izazvati pojavu toplih pukotina. [1, 13] Na slici 26. prikazan je odnos mangana i sumpora u zavisnosti o sadržaju ugljika. Sa slike je vidljivo da pri većem sadržaju sumpora i ugljika, a manjem sadržaju mangana sklonost pojavi toplih pukotina se povećava. U tablici 3. prikazana je ovisnost sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika.



Slika 25. Odnos Mn/S u zavisnosti o %C na pojavu toplih pukotina [14]

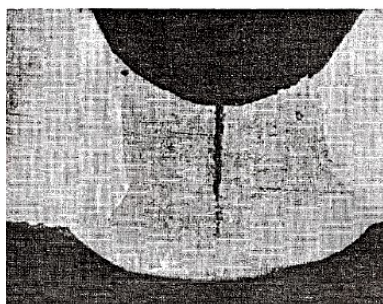
Povećavanjem sadržaja P smanjuje se udarna žilavost i izduženje, a povećava se krhkost. Fosfor ima sklonost prema segregacijama koje se nalaze u čeliku i pri zavarivanju mogu prijeći u ZT. [18]

Tablica 3. Utjecaj sadržaja fosfora na mehanička svojstva čelika [25]

Sadržaj fosfora (%)	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	Tvrdoća (HB)	Kontrakcija (%)	Udarni rad loma (J)
0	280	340	1000	30	340
0,2	360	410	1250	30	200
0,4	440	480	1550	25	0

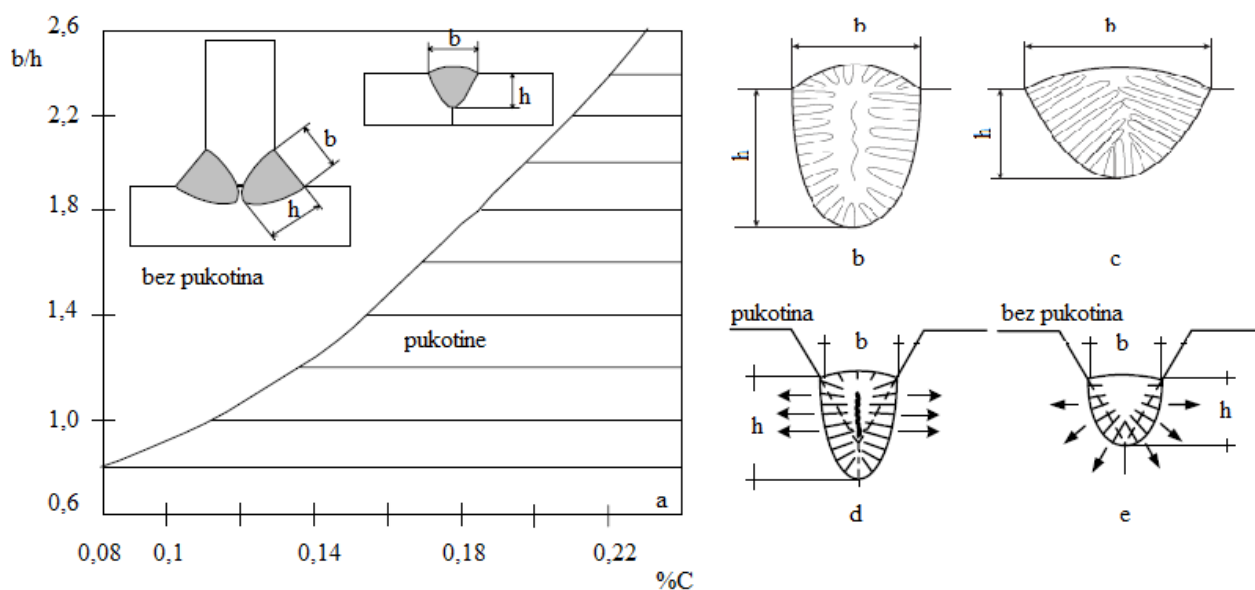
4.3.2. Utjecaj oblika i način polaganja zavara na pojavu toplih pukotina

Na pojavu toplih pukotina utječe i oblik zavara koji ako je nepovoljnog oblika kao što je prikazan na slici 26. može dovesti do pojave toplih pukotina, to je vidljivo i na slici 27. gdje kod prevelikog odnosa b/h također može doći do pojave toplih pukotina.



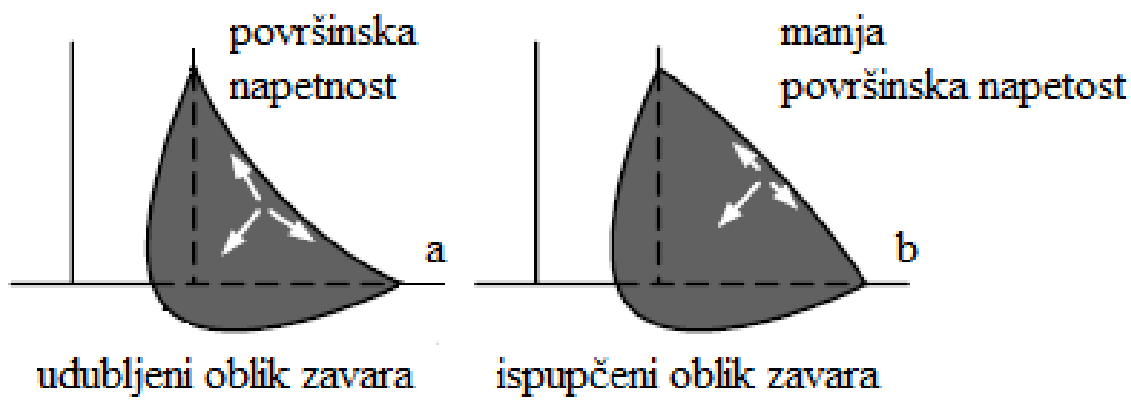
Slika 26. Preveliki razmak između stranica žlijeba – pojava toplih pukotina [26]

Na slici 27a prikazan je odnos između širine (b) i dubine (h) u ovisnosti o sadržaju ugljika pri kojem dolazi/ne dolazi do pojave toplih pukotina. Prikazan je i smjer rasta kristala te naprezanja pri odnosu $b/h < 1$ gdje kristali rastu okomito na rubove (slika 27b i d). Pošto se sredina zadnja skrućuje, a u slučaju postojanja nečistoća povećava se sklonost pojavi toplih pukotina. Na slici 27c i e gdje je $b/h > 1$, prikazan je povoljan smjer rasta kristala jer ne dolazi do međusobnog sudara u sredini zavara, te se smanjuje sklonost pojavi toplih pukotina, a i naprezanja su pravilnije raspoređena. [1, 18, 24]



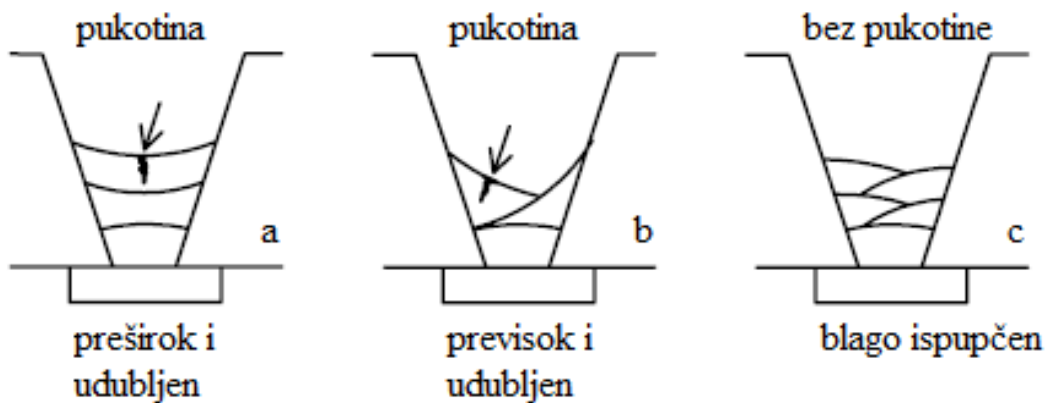
Slika 27. Odnos oblika zavara na pojavu toplih pukotina [1, 19, 24]

Oblik lica zavora također može utjecati na pojavu toplih pukotina. Zbog manjih površinskih napetosti koje nastaju tokom hlađenja blago ispupčeni oblik zavora ima manju sklonost nastajanja toplih pukotina od udubljenog oblika zavora. Na slici 28. prikazan je udubljeni (a) i ispupčeni (b) oblik zavora te silnice površinskih sila naprezanja.



Slika 28. Utjecaj oblika zavora na pojavu toplih pukotina [24]

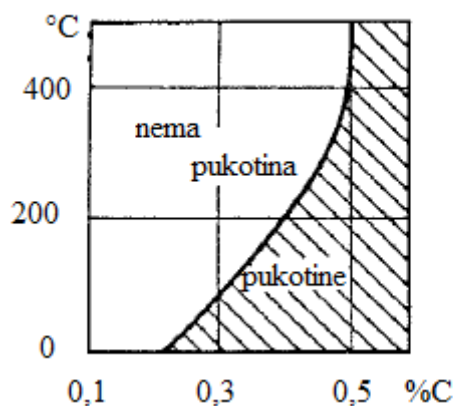
Na slici 29. prikazani su načini polaganja završnih slojeva, te preporuke kako ih napraviti da ne dođe do nastanka toplih pukotina.



Slika 29. Utjecaj načina polaganja zavora na pojavu toplih pukotina [24]

4.3.3. Utjecaj predgrijavanja na pojavu toplih pukotina

Visokolegirani austenitni čelici se ne predgrijavaju, ali nelegirani kojima je $C_{ekv} > 0,4$, ili sadržaj ugljika prelazi više od 0,25 % predgrijavaju se i time im se smanjuje brzina hlađenja ZUT-a i ZT te zaostala naprezanja, koja mogu uzrokovati pojavu pukotina. Na slici 30. prikazan je grafički prikaz ovisnosti sadržaja ugljika i temperature predgrijavanja.

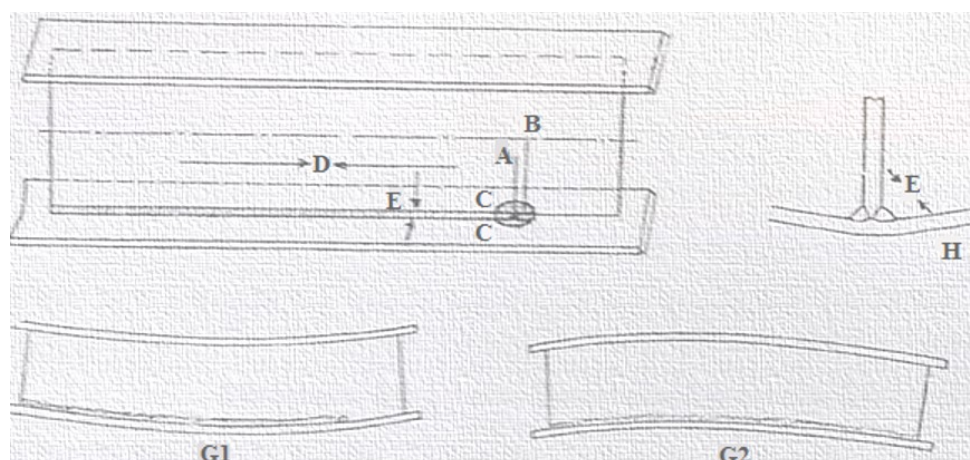


Slika 30. Ovisnost sadržaja ugljika i temperature predgrijavanja [27]

4.3.4. Utjecaj zaostalih naprezanja na pojavu toplih pukotina

Unosom topline prilikom zavarivanja dolazi do taljenja osnovnog materijala i do zagrijavanja zone utjecaja topline prilikom čega nastaju zaostala naprezanja i trajne deformacije u području zavarenog spoja.

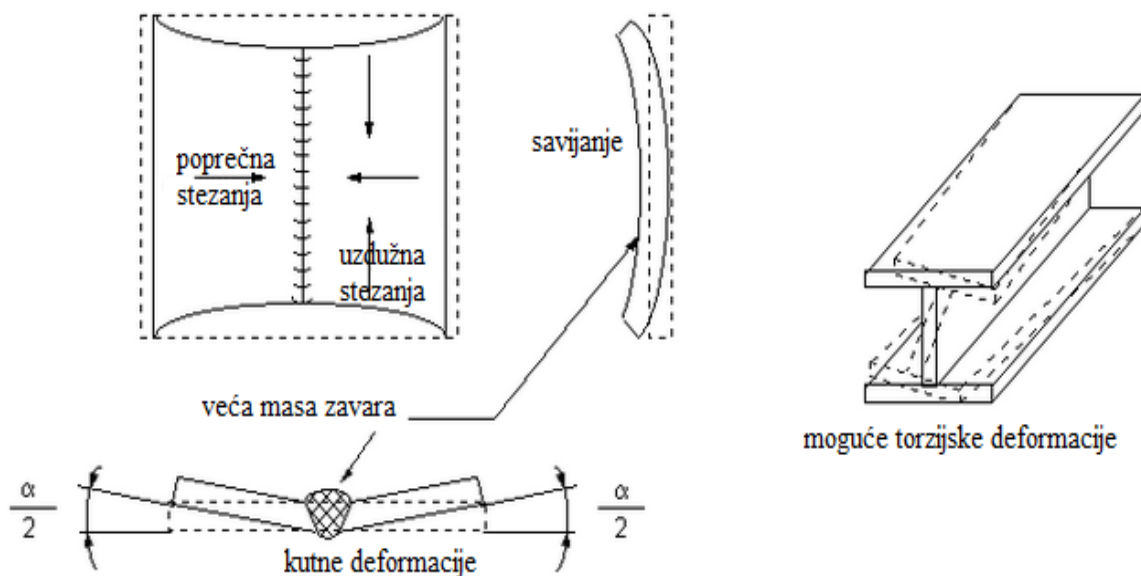
Pojednostavljeni prikaz mehanizma nastajanja zaostalih naprezanja i deformacije u zavarivanju kutnog spoja (slika 31.):



Slika 31. Pojednostavljeni prikaz mehanizma nastajanja zaostalih naprezanja i deformacije u zavarivanju kutnog spoja [28]

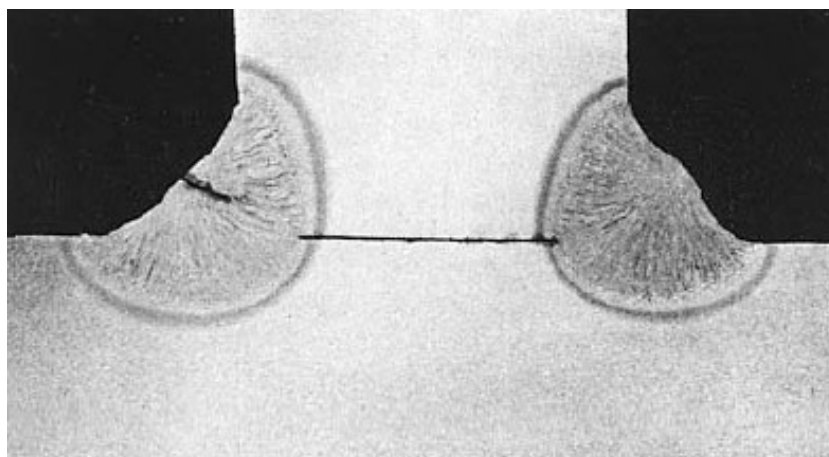
- Unosom topline kod zavarivanja tali se metal u zoni zavara (A) i istodobno zagrijava OM uz mjesto taljenja u zoni (B)
- Pod utjecajem topline OM neposredno uz zavar u zoni (B) zagrijava se, isteže i produžuje. Okolni nezagrijani materijal u zoni (C) ne dopušta ovo širenje.
- Tako u materijalu, u zonama (B i C) nastaju velika toplinska naprezanja. Sile kod ovih naprezanja su velike te „sabijaju“ i skraćuju u plastično stanje doveden materijal u zoni (B). To se događa trenutačno, u svakoj točki zagrijavanja napredovanjem u zavarivanju. Koliko će „sabijanje“ i skraćivanje biti, to ovisi o količini unosa topline i veličini opiranja okolne zone, odnosno o krutosti radnog komada.
- Budući da se različito, ali ipak zagrijava materijal zona A, B, C, ovo cijelo područje nastoji se produžiti, za razliku od druge strane radnog komada koja je hladna i koja se ne produžuje. Zbog tog produžavanja dolazi do iskrivljenja ili privremene deformacije u toplom stanju (G1). Ako je radni komad toliko krut da ga sile toplinskog naprezanja ne mogu savinuti neće doći do ovakve privremene deformacije.
- Ugrijani metal zavara (A) i ugrijani te „sabijeni“ materijal u zoni (B), hlađenjem se skupljaju – stežu i nastoje skratiti (D). Okolni materijal zone (C), koji nije promijenjen, ne dopušta ovo skraćivanje. U hladnom stanju nastaju velika naprezanja u zavarenom spoju. Ako su ove sile naprezanja veće od čvrstoće i krutosti onog dijela materijala radnog komada koji im se opire, radni komad će se savinuti na stranu zavara (G2), gdje je došlo do skraćivanja. Tako nastaje zaostala deformacija izvijanja (G2).
- Istodobno, kako se metal zavara i zone uz zavar nastoji skratiti po dužini (D), nastoji se skratiti – suziti i po širini (E), poprečno na zavareni spoj, pa s obzirom na oblik zavara (dolje uži, gore širi), dolazi do promjene oblika koji se i naziva kutna deformacija (H). Kod kutnog spoja ona je uvijek ovakva (slika 31.) s manjim ili većim kutom.
- Ako je radni komad toliko krut da ga sile naprezanja u ZS ne mogu savinuti, neće doći do deformacije. Metal zavarenog spoja, koji je sklon opisanom skupljanju i skraćivanju, ostat će „nategnut“ poput opruge (vlačna naprezanja), koja istodobno „tlači“ okolni materijal (tlačna naprezanja). Ta, istodobna vlačna i tlačna naprezanja u ZS, nazivaju se zaostala naprezanja. [28]

Zaostala naprezanja i deformacije su usko povezane. Zaostala naprezanja tim su veća što materijal ima veći otpor prema deformaciji odnosno zaostala naprezanja su manja ako postoji mogućnost deformacije. Izuzetno su opasne, te mogu dovesti do pojave pukotina. Zaostale deformacije koje se mogu javiti kod zavarenih spojeva su: uzdužna, poprečna, kutna, savijanje po dužini te torzijske deformacije (slika 32.).



Slika 32. Prikaz smjerova i vrsta stezanja tj. deformacija nakon stezanja [1]

Na slici 33. prikazan je utjecaj zaostalih naprezanja na primjeru kutnog spoja, gdje je vidljivo da kod zavara koji je prvi napravljen (desni), nema pukotina, dok je kod zavara koji je napravljen poslije njega (lijevi) došlo do pojave pukotina.

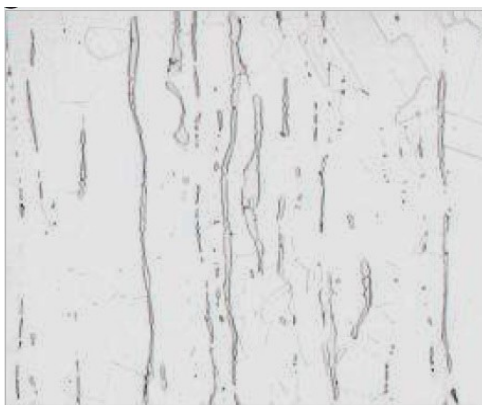


Slika 33. Utjecaj zaostalih napetosti na pojavu toplih pukotina [24]

4.3.5. Utjecaj delta ferita na pojavu toplih pukotina

Visokolegirani austenitni čelici sa potpunom austenitnom strukturom skloni su pojavi toplih pukotina, štetan utjecaj jednofazne strukture može se smanjiti ako se ostvare uvjeti koji pospješuju stvaranje druge faze po granicama kristala austenita – delta ferita. Kod skrućivanja jednofazne austenitne strukture granice kristala su glatke i ravne te lakše u kontaktu sa nisko taljivim fazama (S, P) uslijed malih naprezanja izazovu tople pukotine. Neki od razloga zbog kojih bi se trebala osigurati dvofazna (slika 34.) austenitno – feritna struktura tj. zašto je takva struktura povoljna u pogledu otpornosti na pojavu toplih pukotina je:

- Granice kristala su učvršćene i nepravilne što rezultira otežanim širenjem pukotine, pa čak i njenim sprečavanjem.
- Delta ferit ima veću sposobnost apsorpcije štetnih elemenata, pa se zbog toga u posljednjem stadiju skrućivanja smanjuje količina nisko taljivih faza i na taj način se povećava otpornost na tople pukotine.
- Snižena energija između granica ferit/austenit sprečava mogućnost dodira s nečistoćama tekuće faze i tako one djeluju kao čvrste veze unutar austenitnih kristala pri čemu sprečavaju međukristalno razdvajanje. [13]

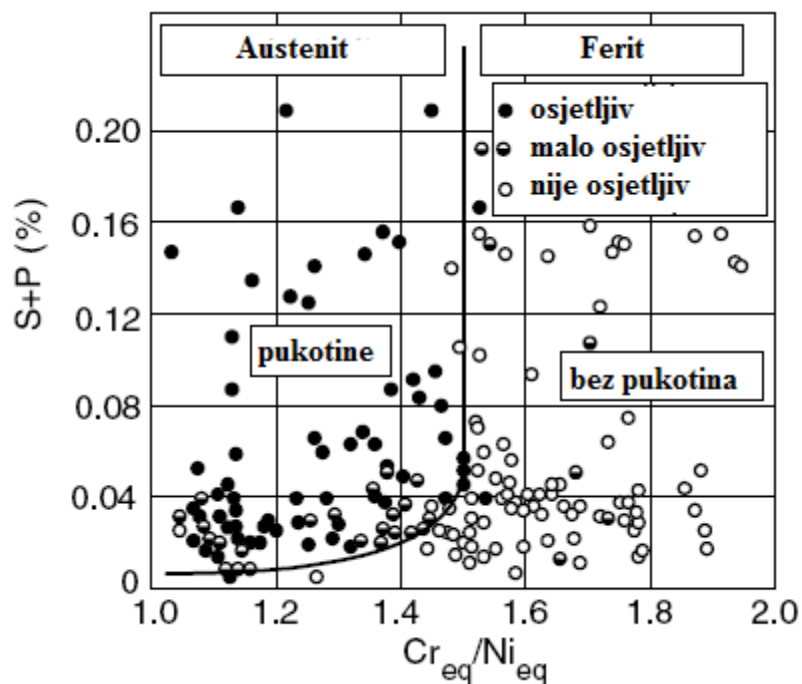


Slika 34. Mikrostruktura visokolegiranog austenitnog čelika + delta ferit [15]

Da bi se osigurala otpornost prema pojavi toplih pukotina u zavarenom spoju mora se osigurati povoljan sadržaj delta ferita koji bi se u metalu zavara trebao kretati u granicama od 3 do 10 %. Dok sa jedne strane sprečava pojavu toplih pukotina s druge strane ako ga ima previše olakšava nastanak sigma faze pri povišenim temperaturama. Stoga u slučaju ako se proizvod u danjoj eksploataciji koristi na temperaturama većim od 500 °C, treba ograničiti sadržaj delta ferita ispod 5 %.

4.3.6. Utjecaj odnosa Cr_{eq}/Ni_{eq} na pojavu toplih pukotina

Na slici 35. prikazan je odnos Cr_{eq}/Ni_{eq} u ovisnosti o nečistoćama (S i P) na sklonost pojavi toplih pukotina.



Slika 35. Odnos Cr_{eq}/Ni_{eq} – S+P na pojavu toplih pukotina [24]

Granična vrijednost Cr_{eq}/Ni_{eq} je 1,5 gdje ona razdvaja područja osjetljivosti. Ukupni sadržaj sumpora i fosfora ako je ili niži od 0,01 metal zavara je neosjetljiv na pojavu toplih pukotina bez obzira na odnos Cr_{eq}/Ni_{eq} .

4.4. Metode ispitivanja osjetljivosti na tople pukotine

Pojava toplih pukotina u zavarenim spojevima pogotovo kod visokolegiranih austenitnih čelika zahtjeva ocjenu osjetljivosti na tople pukotine. Metode ispitivanja osjetljivosti na tople pukotine mogu biti:

- indirektne i
- direktne.

Kod indirektnih metoda ispitivanja osjetljivosti na tople pukotine koriste se formule koje u obzir uzimaju kemijski sastav, ali ne i druge parametre poput količine štetnih primjesa, parametre zavarivanja i dr. Indirektne metode mogu poslužiti samo kao orijentir iz razloga što one ne mogu dati stvarnu procjenu osjetljivosti materijala na pojavu toplih pukotina. Jedna takva orijentacijska formula je [29]:

$$HCS = \frac{C * \left(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) * 10^3}{3 * Mn + Cr + Mo + V} \quad (2)$$

Prema parametru HCS kriteriji su:

- ako je $HCS < 4$, za čelike sa $R_m < 700 \text{ N/mm}^2$ – metal zavara je otporan na tople pukotine
- ako je $HCS < 2$, za čelike sa $R_m > 700 \text{ N/mm}^2$ – metal zavara je otporan na tople pukotine [29]

Na temelju Schäßler - ovog dijagrama također se može procijeniti da li će doći ili neće do toplih pukotina kod kojeg se u obzir uzima kemijski sastav pomoću Cr_{eq} i Ni_{eq} .

Tople pukotine mogu biti uzdužne i poprečne u metalu zavara ili u ZUT-u tako postoje i direktne metode koje se koriste za ispitivanje sklonosti pojavi prema određenom tipu toplih pukotina. To su eksperimentalno – razorne metode ispitivanja, a kriterij osjetljivosti obavlja se:

- kvalitativno – gdje se promatra da li je ili nije došlo do toplih pukotina bez utjecaja vanjske sile.
- kvantitativno – gdje se osim promatranja da li je ili nije došlo do toplih pukotina gleda pri kojim naprezanjima dolazi do pojave toplih pukotina.

Eksperimentalno razorne metode ispitivanja na tople pukotine mogu se podijeliti na:

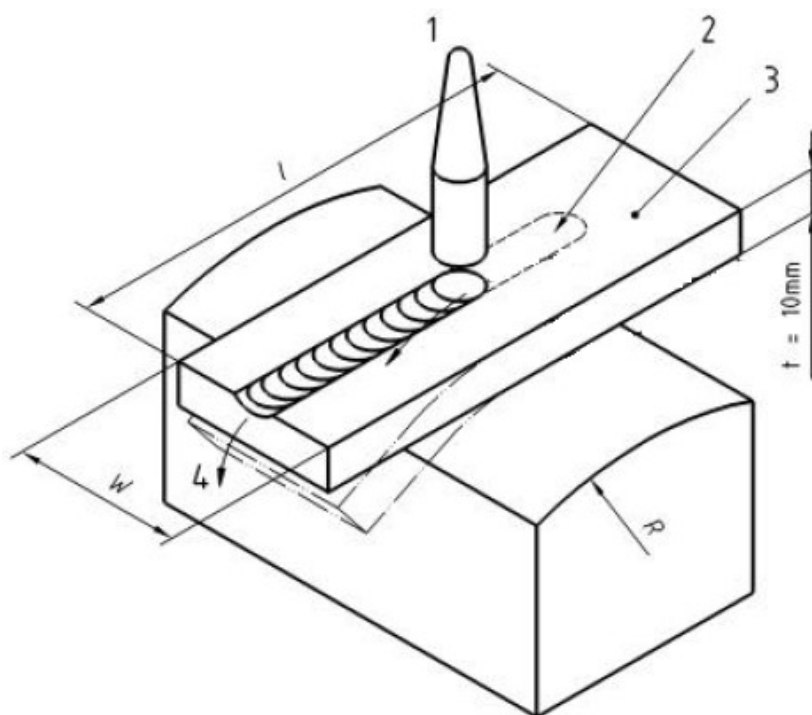
- Sa reguliranim naprežanjem
 - Vareststraint
 - Transvareststraint
 - Flat tensile test (PVR test)
 - Hot Tensile Test
- Ukružene
 - T-Joint Weld Cracking Test
 - Weld Metal Tensile Tests
 - Longitudinal Bend Test [30]

4.4.1. *Vareststraint metoda*

Kod ove metode najčešće se koriste dimenzije uzoraka koje se kreću u rasponu: duljine (l) od 80 do 300 mm, a širine (w) od 40 do 100 mm, dok debljina nije ograničena osim u slučaju da stroj koji obavlja savijanje nije to u stanju napraviti. Radijus zakrivljenosti gornje plohe donjeg bloka se može mijenjati, te na taj način mijenjati i veličinu deformacije gornjih slojeva zavara/navara. Može se izračunati prema izrazu $\varepsilon = t / 2R * 100$, gdje je t – debljina materijala, a R – radijus savijanja (mm). Vareststraint metoda služi za ispitivanje osjetljivosti na tople pukotine u smjeru okomitom na smjer zavarivanja.

Metoda ispitivanja izvodi se na sljedeći način (slika 36.):

- Desna strana (3) ispitnog uzorka se učvrsti u nepomični oslonac, dok je lijeva strana slobodna.
- Zavar ili navar izvodi se s lijeva na desno do točke 1.
- Kada električni luk prođe kroz točku 1 počinje se sa naglim savijanjem uzorka prema dolje pod djelovanjem sile (4) prilagođavajući se radijusu zakrivljenosti (R).
- Električni luk ne staje u točki 1 nego se sinkronizirano giba kako se obavlja savijanje do točke 2.



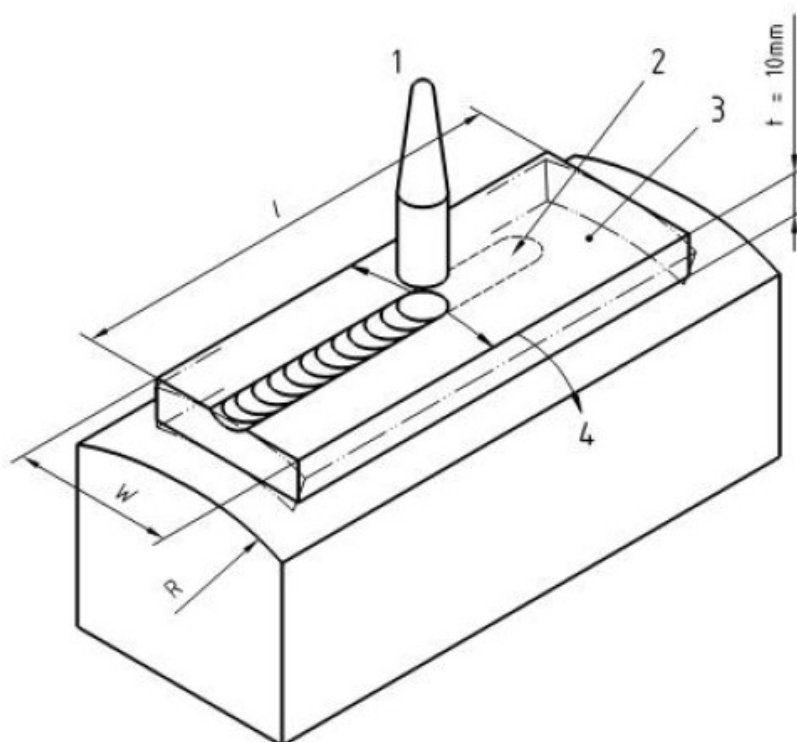
Slika 36. Pojednostavljeni prikaz Varestraint metode [31]

4.4.2. *Transvarestraint metoda*

Kod ove metode najčešće dimenzije ispitnih uzoraka su: duljine (l) 100 mm, širine (w) 40 mm, debljine (t) 10 mm, ali se po potrebi mogu mijenjati. Može se reći da je to modificirana verzija Varestraint testa, kod kojeg se savijanje (4) ispitnog uzorka (3) obavlja okomito na smjer zavarivanja, a ispituju se tople pukotine nastale u smjeru zavarivanja.

Metoda ispitivanja izvodi se na sljedeći način (slika 37.):

- Ispitni uzorak (3) učvršćuje se sa strane na kojoj se obavlja savijanje (4).
- Zavar ili navar izvodi se po dužini ispitnog uzorka do točke 1.
- Kada električni luk prođe točku 1 počinje se sa naglim savijanjem uzorka prema dolje pod djelovanjem vanjske sile (4) prilagođavajući se radijusu zakrivljenosti (R) koji se može mijenjati isto kao i kod Varestraint testa.
- Električni luk ne staje u točki 1 nego se sinkronizirano giba do točke 2 kako se obavlja savijanje.



Slika 37. Pojednostavljeni prikaz Transvarestraint metode [31]

4.4.3. Flat Tensile Test

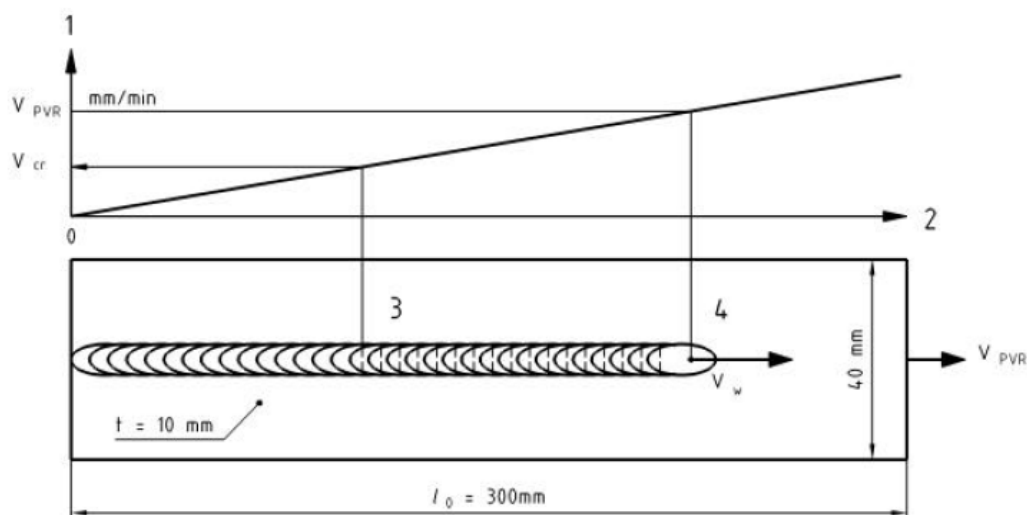
Kod ove metode ispitivanja najčešće dimenzije ispitnih uzoraka su duljine (l_0) 300 mm, širine 40 mm, debljine (t) 10 mm a minimalni stupanj hrapavosti površine je $6,3 \mu\text{m}$. Brzina zavarivanja mora biti konstantna, a može se zavarivati sa ili bez dodatnog materijala.

Metoda ispitivanja izvodi se na sljedeći način (slika 38.):

- Ispitni uzorak učvršćen je sa lijeve strane od kuda se i započinje sa zavarivanjem.
- Kako se odvija zavarivanje tako dolazi i do linearnog ubrzanja od 0 do 70 mm/min, te se nakon toga prekida proces.
- Po završetku ispitivanja može se otkriti kritične brzine naprezanja za prvu, a i ostale pukotine u metalu zavara.

Gdje je:

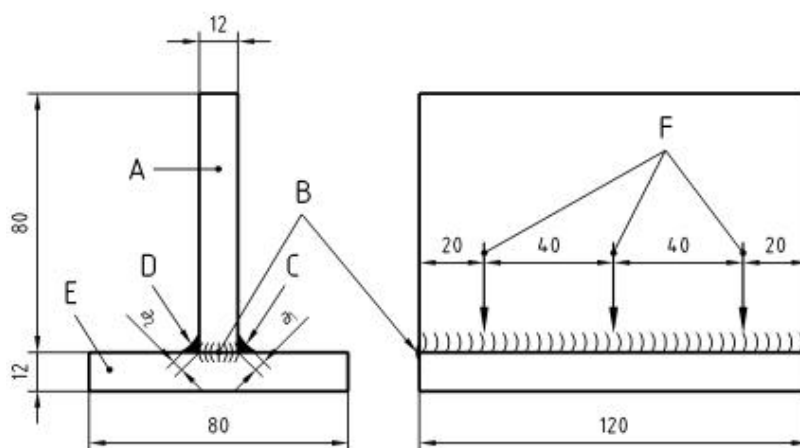
Točka 1 - linearno povećanje brzine naprezanja (v_{PVR}), 2 – vrijeme (s), 3 - pojava prve pukotine (v_{CF}), 4 – smjer zavarivanja.



Slika 38. Pojednostvaljeni prikaz Flat Tensile testa [31]

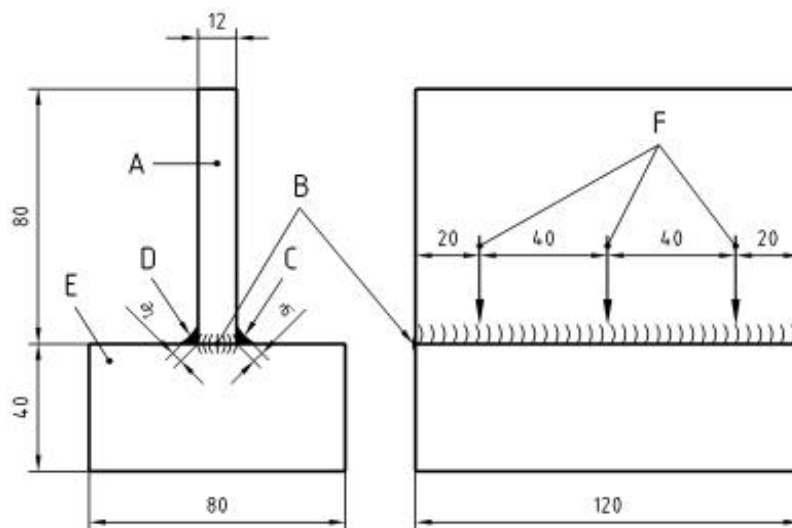
4.4.4. T – Joint weld cracking tests

Kod ovog načina postoje tri različita tipa ispitivanja (A, B i C). Tip A (slika 39.) je standardni način, dok su Tip B (slika 40.) i C (slika 41.) više ukručeni i koriste se za simuliranje strožih uvjeta. Najčešće korištene dimenzije za ispitne uzorke prikazani su na slikama, kao i način zavarivanja. Dimenzije ispitnih uzoraka kao i način zavarivanja nisu strogo regulirani, te se mogu mijenjati. Ispitni uzorci tj. vertikalni uzorak bi trebao cijelom površinom nalijegati na horizontalni uzorak, očišćen od masnoća i oksida zbog moguće kontaminacije metala zavara, pogotovo ako se radi o raznorodnim materijalima. Ukruta a_1 na svim tipovima mora biti minimalno 5 mm. Ispitni uzorci se nakon zavarivanja vizualno pregledavaju, te se po potrebi napravi i ispitivanje sa penetrantima. Nakon toga ispitivanje se provodi metalografskom analizom i ocjenjuje se da li je ili nije i pod kojim uvjetima došlo do pojave toplih pukotina.



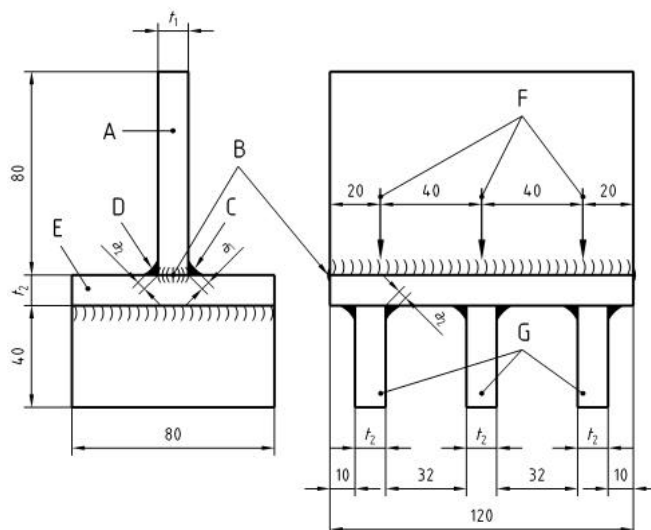
Slika 39. T spoj – Tip A [32]

Gdje je: A – vertikalna ploča, B – mjesto pripoja, C – ukruta (a1), D – zavareni spoj koji se ispituje, E – horizontalna ploča, F – mjerne točke (mjerjenje visine zavara).



Slika 40. T spoj – Tip B [32]

Gdje je: A – vertikalna ploča, B – mjesta mjesto pripoja, C – ukruta (a1), D – zavareni spoj koji se ispituje, E – horizontalna ploča, F – mjerne točke (mjerjenje visine zavara).



Slika 41. T spoj – Tip C [32]

Gdje je: A – vertikalna ploča, B – mjesta pripoja, C – ukruta (a1), D – zavareni spoj koji se ispituje, E – horizontalna ploča, F – mjerne točke (mjerjenje visine zavara), G – ukrute sa donje strane horizontalne ploče.

5. ZAVARIVANJE RAZNORODNIH ČELIKA

Zavarivanje raznorodnih čelika javlja se u tri slučaja, a to su:

- Zavarivanje različitih čelika,
- Navarivanje nelegiranog zaštitnim slojem nehrđajućeg čelika, te
- Zavarivanje istorodnih OM, ali uz primjenu različitog DM različitog kemijskog sastava. [2]

Postoje značajne razlike između nelegiranih i VAČ u koeficijentu toplinskog širenja, toplinskoj vodljivosti i električnom otporu (vodljivosti), o čemu treba voditi računa prilikom konstruiranja sklopova i zavarivanja.

Tablica 4. Fizikalna svojstva ugljičnog čelika i VAČ [11]

		Ugljični čelik	Austenitni čelik
Tipična boja	-	sivi – crna	srebrno - siva
Linearni koef. topl. širenja kod 20 - 800 °C	$\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$	13	20
Toplinska vodljivost kod 20-100 °C	W/m °K	47	16
Električni otpor kod 20 °C	$\text{mm}^2\Omega/\text{m}$	150	700
Magnetičnost	-	da	ne

Iz ovih podataka se može zaključiti sljedeće:

- ❖ Koeficijent toplinske dilatacije je za oko 50 % veći kod VAČ, što znači da kod zagrijavanja nastaju veća unutarnja naprezanja i laka krivljenja.
- ❖ Koeficijent toplinske vodljivosti je oko 3 puta manji kod VAČ, što znači da toplina dulje ostaje u zavarenom spoju i što može prouzročiti daljnje probleme, poput pojave toplih pukotina.
- ❖ Električni otpor kod VAČ je preko 4 puta veći, što znači materijal više zagrijava i kod prolaza električne struje, a preneseno na dodatni materijal to znači da se žice i elektrode mogu manje strujno opteretiti za isti promjer. [11]

5.1. Stupanj miješanja

Kod zavarenih spojeva zona taljenja treba, ako je to moguće, ležati u području izvan zone martenzita zbog izbjegavanja nastanka hladnih pukotina i krhkosti, ali i izvan zone 100 % austenita gdje postoji mogućnost pojave toplih pukotina. Da bi se izbjegla pojava toplih pukotina preporučuje se 3 do 10 % delta ferita u metalu zavara, sa što manjim stupnjem miješanja. Stupanj miješanja kod zavarivanja raznorodnih čelika je jedan od važnih parametara koje treba procijeniti. Čim je stupanj miješanja veći to je i veći udio osnovnog materijala u metalu zavara, tj. nejednolikost kemijskog sastava je veća. [1] Stupanj miješanja OM i DM u ZT može se odrediti iz sljedećih formula:

$$a = \frac{A_{M1}}{A_{ZT}} * 100\% \quad \text{Iznos rastaljenog OM M1 u zoni taljenja} \quad (3)$$

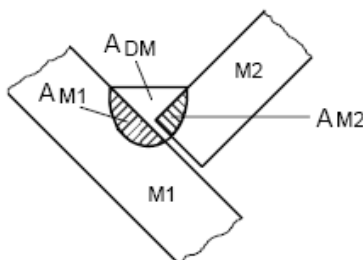
$$b = \frac{A_{M2}}{A_{ZT}} * 100\% \quad \text{Iznos rastaljenog OM M2 u zoni taljenja} \quad (4)$$

$$c = \frac{A_{DM}}{A_{ZT}} * 100\% \quad \text{Iznos rastaljenog DM u zoni taljenja} \quad (5)$$

$$A_{ZT} = A_{M1} + A_{M2} + A_{DM} \quad \text{Površina presjeka zone taljenja (slika 42.)} \quad (6)$$

Stupanj miješanja (d) određuje se kao udio OM u metalu zavara:

$$d = \frac{A_{M1} + A_{M2}}{A_{ZT}} \quad (7)$$



Slika 42. Površina presjeka zone taljenja [1]

Kod izbora postupka zavarivanja raznorodnih čelika, potrebno je odabrati takav postupak koji osigurava mali stupanj miješanja rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim materijalom na

strani raznorodnog spoja. To je potrebno osigurati kako bi se spriječio nastanak krhkih struktura i posljedičnih pukotina u prijelaznom sloju posebno ako je riječ o zavarivanju VAČ s nelegiranim čelikom. [33]

Tablica 5. Stupanj miješanja kod nekih postupaka zavarivanja [33]

Postupak zavarivanja	Stupanj miješanja (%)
EPP zavarivanje trakom / TIG s toplom žicom	8 – 20
TIG	15 – 100
REL s rutilnom žicom	15 – 25
REL s bazičnom žicom	20 – 30
MAG	20 – 40
MAG impulsno	10 – 30
EPP zavarivanje s žicom	30 - 50

5.2. Dodatni materijal

Svojstva zavarenog spoja kod raznorodnih čelika u velikoj mjeri ovise o izboru dodatnog materijala. Svojstva osnovnih materijala se znatno razlikuju što otežava izbor dodatnog materijala. U ovisnosti o vrsti čelika koji se zavaruje kao i o uvjetima rada, dodatni materijal može po svom kemijskom sastavu biti blizak niže odnosno više legiranom osnovnom materijalu ili se može razlikovati od oba. Najvažnije je osigurati zadovoljavajuću čvrstoću zavara koja ne bi smjela biti niža od čvrstoće niže legiranog čelika. Pravilan izbor dodatnog materijala treba osigurati minimalno ili potpuno isključenje pojave difuzijskih spojeva krhkih struktura kao i mogućnost pukotina. Za zavarivanje VAČ s nelegiranim čelicima preporučuje se primjena austenitnog dodatnog materijala. Primjenom tog tipa DM postižu se zadovoljavajuća mehanička i strukturna svojstva zavara. Njegova uporaba s porastom legirajućih elemenata snižava stupanj miješanja. Bez obzira na potrebu kontrole stupnja miješanja neki drugi čimbenici bitni za ovu posebnost mogu također utjecati na izbor metala zavara. Primjerice ako su tališta čelika koji se zavaruju vrlo različita, temperatura skrućivanja metala zavara treba biti u osnovi bliža onoj od čelika s nižom temperaturom taljenja. U protivnom, ako temperatura skrućivanja metala zavara bitno premašuje temperaturu skrućivanja jedne komponente, moguća je pojava toplih pukotina u ZUT-u materijala koja se posljednja skrućuje. [33]

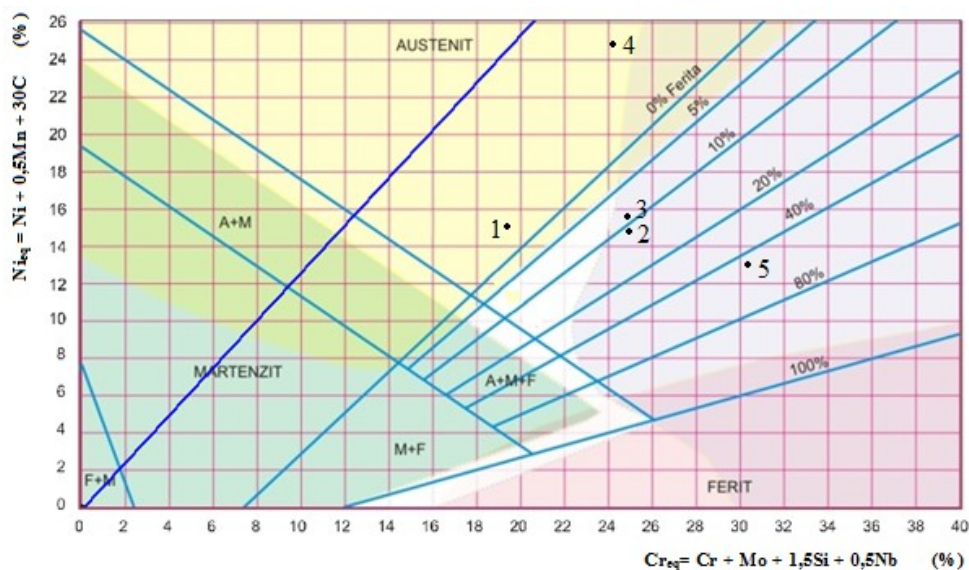
U tablici 6. dat je pregled dodatnih materijala koji se mogu primijeniti za zavarivanje VAC s nelegiranim čelicima MAG postupkom zavarivanja, a na slici 43. prikazani su u Schäffler - ovom dijagramu.

Tablica 6. Pregled dodatnih materijala za zavarivanje VAC s nelegiranim čelicima [38, 39, 40]

RB	Oznake		Maseni udio elemenata (%)								Schäffler	
			EN	USA	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
1	G 18 8 MnSi	307 Si	0,12	6,5	0,8	18,5	8,5	0,025	0,025	-	19,71	15,35
2	G 23 12 LSi	309 LSi	0,03	2	0,9	24	13	-	-	-	25,35	14,9
3	G 23 12 2	309 MoL	0,015	1,5	0,5	22	14,5	-	-	2,6	25,35	15,7
4	G 25 20	310	0,1	1,7	0,4	23,6	21	-	-	-	24,2	24,95
5	G 299	312	0,1	1,9	0,5	30,5	9,2	-	-	-	31,25	13,15

Gdje su:

- Alfageni elementi: Cr, Mo, Si i Nb oni proširuju područje ferita, a smanjuju područje austenita.
- Gamageni elementi: Ni, Mn, C oni proširuju područje austenita, a smanjuju područje ferita.



Slika 43. Prikaz dodatnih materijala iz tablice 6. u Schäffler – ovom dijagramu [4]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada u cijelosti je napravljen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u laboratorijima za:

- zavarivanje,
- materijalografiju i
- zaštitu materijala.

6.1. Cilj istraživanja

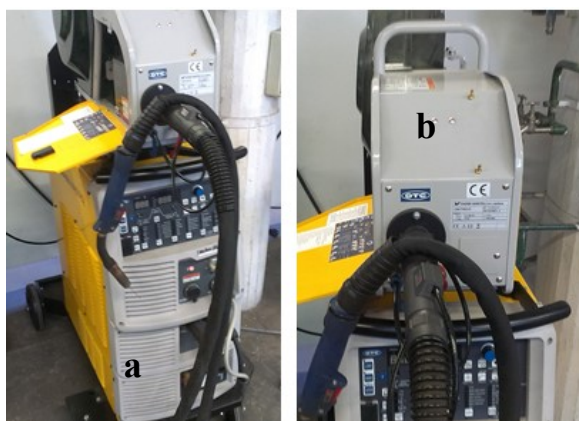
U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada bilo je potrebno:

- Za kombinaciju osnovnih materijala X5CrNi18-10 i S355J2 definirati parametre zavarivanja kutnog spoja.
- Prilikom zavarivanja obuhvatiti više razina unosa topline te različite načine prijenosa metala u električnom luku.
- Odabrati odgovarajuću metodu ispitivanja osjetljivosti na tople pukotine.
- Definirati kritične vrijednosti varijabli s obzirom na pojavu toplih pukotina.

6.2. Općenito o opremi i osnovnim materijalima korištenim u eksperimentu

6.2.1. Izvor struje i dodavač DM

Na slici 44. prikazan je izvor struje Welbee P400 (a) koji je korišten za zavarivanje, kao i dodavač DM, CM-7402-D (b).



Slika 44. Izvor struje Welbee P400 (a) i dodavač DM, CM-7402-D

U tablici 7. prikazane su osnovne informacije o izvoru struje Welbee P400, a u tablici 8. o dodavaču DM, CM-7402-D.

Tablica 7. Osnovne informacije o izvoru struje Welbee P400

Ulazni napon	V	400±15% (za 50 i 60Hz)
Broj faza	-	3
Iskoristivost	%	400A/50%
		283A/100%
Raspon struje	A	30 – 400
Raspon napona	V	12 – 34
Napon praznog hoda	V	80
Dimenzije (šxdxv)	mm	395x710x640
Masa	kg	62

Tablica 8. Osnovne informacije o dodavaču DM, CM-7402-D

Promjer DM	mm	(0,8), 0,9, 1, 1,2, (1,6)
DM	-	Puni i praškom punjeni
Brzina dodavanja DM	m/min	22 (maksimalno)
Dimenzije (šxdxv)	mm	214x805x429
Masa	kg	17

6.2.2. Osnovne informacije o osnovnim materijalima

6.2.2.1. X5CrNi18-10

U tablici 9. prikazane su mehaničke karakteristike VAČ (X5CrNi18-10), a u tablici 10. kemijski sastav.

Tablica 9. Mehaničke karakteristike VAČ (X5CrNi18-10) [41]

R_{p0,2} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A (%)	Udarni rad loma (J)
195	600	40	60 (20 °C)

Tablica 10. Kemijski sastav VAC (X5CrNi18-10) [41, 42]

Kemijski element	C max	Si	V	Mn	Ni	P max	S max	Cr	N max	Cu	Mo
Udio (%)	0,07	0,35	0,13	1,47	7,83	0,045	0,015	18,04	0,11	0,44	0,3

6.2.2.2. S355J2

U tablici 11. prikazane su mehaničke karakteristike NČ S355J2, a u tablici 12. kemijski sastav.

Tablica 11. Mehaničke karakteristike NČ (S355J2) [41]

R_{p0,2} (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A (%)	Udarni rad loma (J)
345	500	22	27 (20 °C)

Tablica 12. Kemijski sastav NČ (S355J2) [41, 42]

Kemijski element	C max	Si	Mn	P max	S max	Cu max
Udio (%)	0,2	0,27	1,28	0,03	0,03	0,55

6.2.3. Osnovne informacije o DM

Prilikom zavarivanja NČ i VAC korišten je DM od tvrtke Lincoln Electric MIG 309LSi, u tablici 13. prikazane su mehaničke karakteristike, a u tablici 14. kemijski sastav.

Tablica 13. Mehaničke karakteristike DM, MIG 309 LSi [43]

Zaštitni plin (-)	Promjer DM (mm)	R_e (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A (%)	Udarni rad loma (J)
M12 (Ar+2,5CO ₂)	1,2	430	565	35	96 (-20°C)

Tablica 14. Kemijski sastav DM, MIG 309 LSi [43]

Kemijski element	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
Udio (%)	0,01	1,8	0,8	23,3	13,8	0,14

MIG 309 LSi je visokolegirani austenitni DM za MIG/MAG zavarivanje koji se koristi za zavarivanje raznorodnih čelika, pri čemu se dobiva metal zavara koji je duktilan i otporan na nastanak toplih pukotina.

6.2.4. Strukturni dijagram

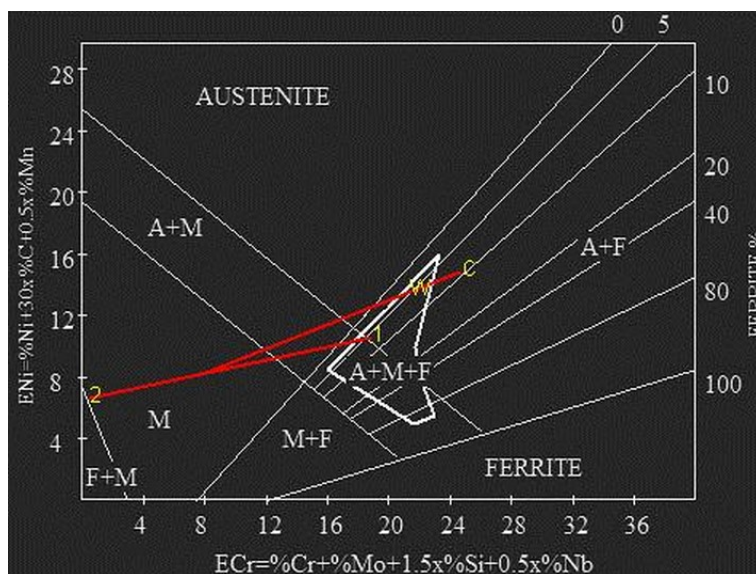
U tablici 15. prikazani su odnosi Cr_{eq} i Ni_{eq} za Schäßler – ov i WRC – 1992 strukturni dijagram na temelju kojih se može procijeniti udio ferita u metalu zavara. U Schäßler – ovom dijagramu očitava se postotak ferita, a kod WRC – 1992 očitava se feritni broj koji nije u potpunosti jednak postotku ferita, a računa se prema sljedećoj formuli [44]:

$$\%F = \frac{FN * 100}{(-0,025813 * (Fe)^2 + 5,408679 * (Fe) - 102,3902)} \quad (8)$$

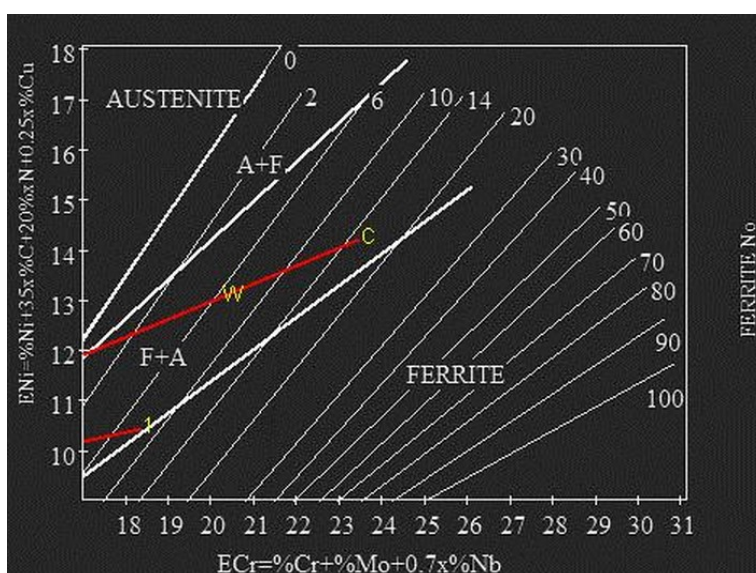
Tablica 15. Cr_{eq} , Ni_{eq} i δF za Schäßler – ov i WRC – 1992 strukturni dijagram

	Oznaka	Schäßler			δF (%)	WRC - 1992			δF (broj)
		Cr_{eq}	Ni_{eq}	Cr_{eq}/Ni_{eq}		Cr_{eq}	Ni_{eq}	Cr_{eq}/Ni_{eq}	
	-	Cr_{eq}	Ni_{eq}	Cr_{eq}/Ni_{eq}	-	Cr_{eq}	Ni_{eq}	Cr_{eq}/Ni_{eq}	-
X5CrNi18-10	1	18,87	10,67	1,77	-	18,34	12,59	1,46	-
S355J2	2	0,41	6,64	-	-	0	7,14	-	-
309 LSi	C	24,64	15	1,62	-	23,44	14,15	1,66	-
Metal zavara	W	22,02	13,85	1,59	7	20,5	13,1	1,56	7
Stupanj miješanja za MAG postupak zavarivanja: 20 %									

Ovisno o udjelu Cr i Ni ekvivalenta u Schäßler – ovom i WRC - 1992 dijagramu određuje se koja je vrsta a time i mikrostruktura metala zavara. Na slici 45. prikazan je Schäßler – ov, a na slici 46. WRC – 1992 strukturni dijagram na temelju kojih se može procijeniti udio ferita u metalu zavara.



Slika 45. Prikaz procjene strukture metala zavara Schäffler – ovim dijagramom [45]



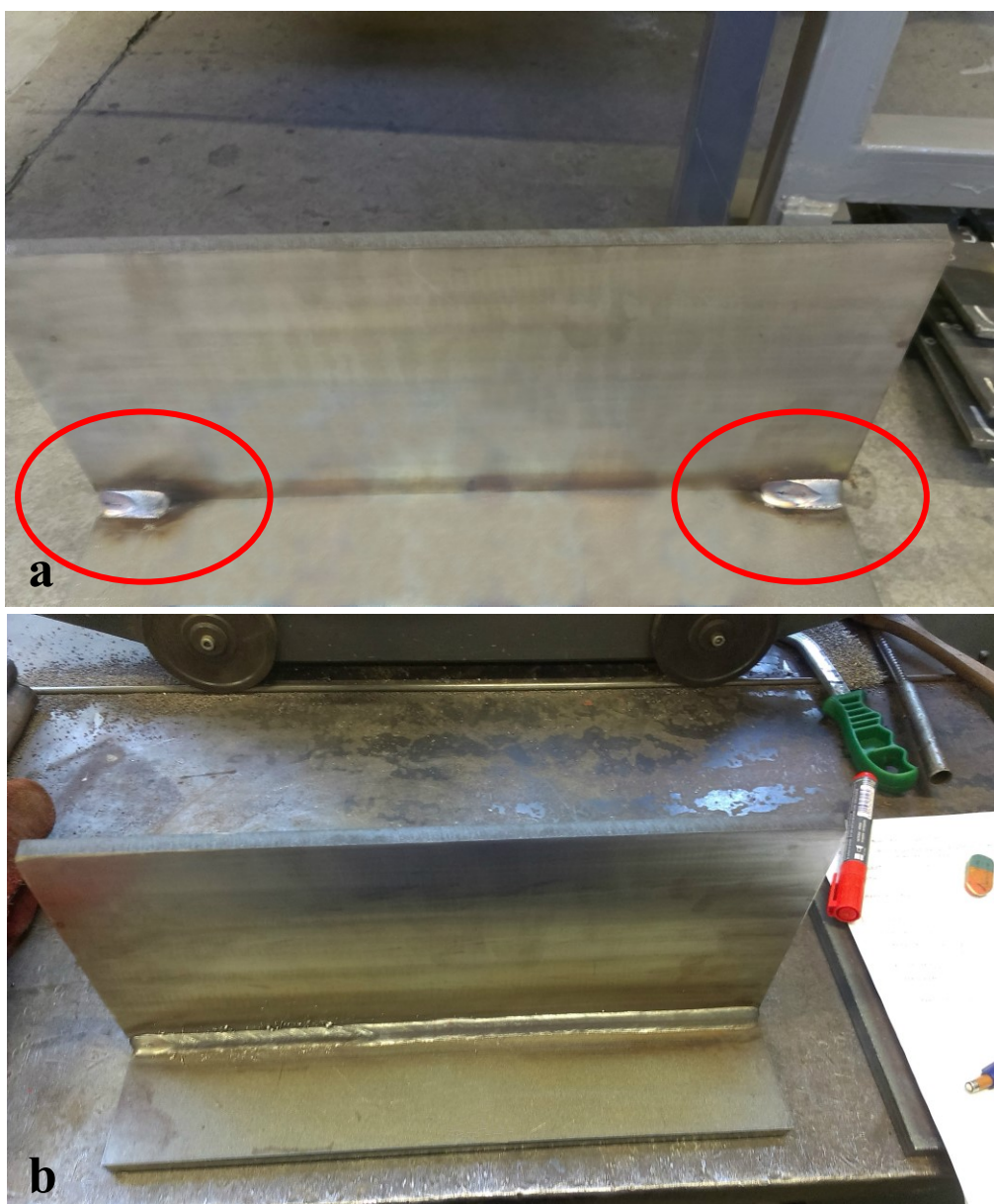
Slika 46. Prikaz procjene strukture metala zavara WRC-1992 dijagramom [45]

Podaci koji su očitani sa Schäffler – ovog i WRC – 1992 strukturnog dijagrama prikazani su u tablici 15, a očitane vrijednosti su u granicama preporučenih. Kod računanja postotka ferita kod WRC – 1992 strukturnog dijagrama uzeta je aritmetička sredina udjela Fe (koji je dobiven kemijskom analizom metala zavara [42]) od svih osam uzoraka metala zavara koji iznosi 70 %Fe, a dobiveni postotak delta ferita je 4,67 %.

6.3. Način ukrućenja

Za kombinaciju OM S355J2 i X5CrNi18-10 dimenzija 350x150x10 mm odabrana je „T – Joint weld cracking tests“ metoda ispitivanja toplih pukotina. Kod te metode kao što je objašnjeno u poglavlju 4.4.4. postoje tri tipa testa, jedan blaži i dva koja simuliraju strože uvjete. U eksperimentalnom dijelu ovoga rada napravljeno je pet uzoraka Tip-a A, te tri uzorka modificiranog Tip-a C.

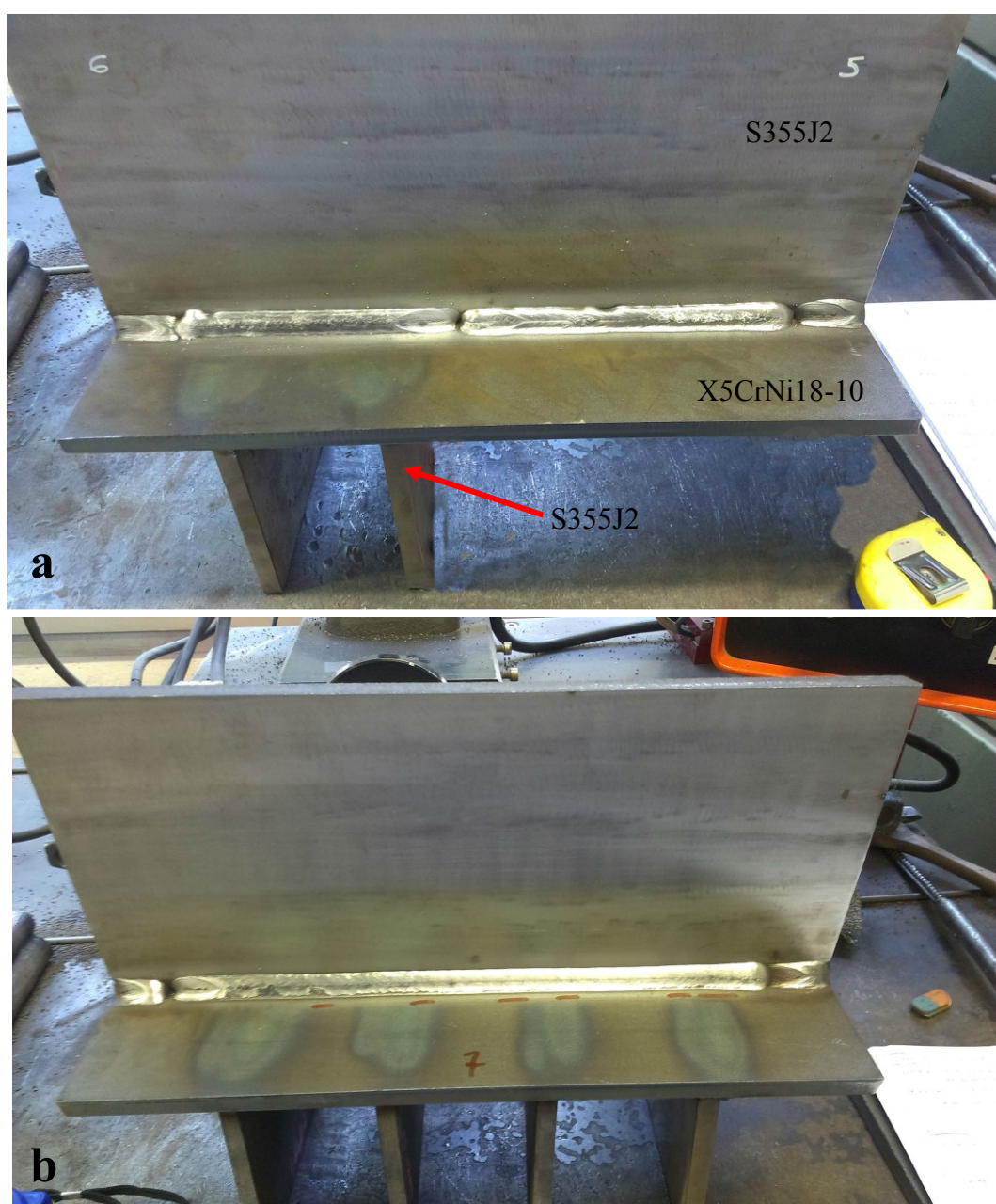
T spojevi napravljeni su na način da se s jedne strane na kojoj će se raditi ispitivanje na tople pukotine napravila ukruta za ukrutu na duljini od 25 mm sa lijeve i desne strane (slika 47a), a s druge strane ukruta (slika 47b.) po cijeloj duljini od 350 mm.



Slika 47. Način ukrućenja ispitnih uzoraka

MAG postupkom zavareno je pet T spojeva, od čega su na prva tri napravljena po dva uzorka (ukupno 6) duljine zavora od 140 mm, a na posljednja dva T spoja duljina zavora je po cijeloj duljini u iznosu od 300 mm, svi uzorci zavarivani su različitim parametrima.

Kod posljednja tri uzorka osim ukrućenja kakvo je prikazano na slici 47. napravilo se je i ukrućenje s donje strane na horizontalnu ploču (S355J2). Na slici 48. prikazan je način ukrućenja za uzorak 6 (a - lijevo), gdje je razmak između ukruta 45 mm, te za uzorke 7 i 8 (b), gdje je razmak ukruta jednak i iznosi 70 mm. Ukrute (S355J2) su dimenzija 120x120x10 mm.



Slika 48. Način ukrućenja za uzorak 6, 7 i 8

6.4. Parametri zavarivanja

Postupak zavarivanja kod svih uzoraka radio se automatskim vođenjem pištolja u PB položaju, zavarivao se T spoj sa obje strane, gdje je na jednoj strani napravljena ukruta, a sa druge strane se je zavarivalo kako bi se mogle definirati kritične varijable s obzirom na pojavu toplih pukotina. Osnovni materijali su S355J2 (horizontalno) i X5CrNi18-10 (vertikalno), a DM je MIG 309 LSi tvrtke Lincoln Electric. U tablici 16. prikazani su ulazni parametri koji su se koristili za zavarivanje svih ukruta i uzoraka.

Tablica 16 Ulazni parametri za MAG zavarivanje kod svih ukruta i uzoraka

Promjer DM (mm)	Osnovni materijal (-)	Debljina OM (mm)	Položaj pištolja (-)
1,2	X5CrNi18-10 i S355J2	10	pod kutem od 45°
Zaštitni plin (%)	Protok zaštitnog plina (l/min)	Tehnika zavarivanja (-)	Način zavarivanja (-)
Ar+2,5CO ₂	18	Desna	Automatski
Položaj zavarivanja (-)	Duljina slobodnog kraja DM (mm)	Prije početka zavarivanja uzorci su očišćeni, pobrušeni i napravljeni su pripoji.	
PB (kutni spoj)	10		

6.4.1. Usporedba unosa topline kod svih uzoraka

Unos topline izračunava se prema sljedećoj formuli [22]:

$$Q = \frac{I * U * 60}{v_{zav} * 100} * \eta \quad (9)$$

Gdje je:

Q – unos topline (kJ/cm)

I – jakost struje (A)

U – napon električnog luka (V)

v_{zav} – brzina zavarivanja (cm/min)

η – koeficijent iskoristivosti električnog luka kod MAG postupka zavarivanja 0,8

Unos topline kod zavarivanja ima veoma važnu ulogu jer ako je premali povećava se sklonost pojavi hladnih pukotina, a kod prevelikog unosa topline dolazi do pogrubljenja zrna, smanjenja žilavosti i pojave toplih pukotina pogotovo ako se zavaruju VAČ koji su osjetljivi na preveliki unos topline. U ovom radu nije bilo cilj napraviti zavarene spojeve koji će biti optimalni, nego upravo suprotno, cilj je bio napraviti zavareni spoj i definirati kritične varijable pri kojima će doći do pojave toplih pukotina. Osim unosa topline sklonost nastajanju toplih pukotina povećava se čim je konstrukcija više ukrućena, što se je i postiglo korištenjem modificiranog C tipa načina ukrućenja, prema normi EN ISO 17641-2 [32]. U tablici 17. prikazani su parametri zavarivanja kod svih ukruta, a u tablici 18. parametri zavarivanja svih uzoraka kao i unos topline.

Tablica 17. Parametri MAG zavarivanja kod svih ukruta

Postupak (-)	Jakost struje (A)	Brzina dovođenja DM (m/min)	Brzina zavarivanja cm/min	Napon (V)	Unos topline kJ/cm
MAG-P	250	9,8	30	27,5	11,69

Tablica 18. Parametri MAG zavarivanja kod svih uzoraka

	Ukruta (-)	Postupak (-)	BP (-)	I (A)	v_z (m/min)	v_{zav} cm/min	U (V)	Q (kJ/mm)
Uzorak 1	Z	MAG-P	1	250	9,8	30	27,5	1,10
Uzorak 2	Z	MAG-P	1	300	9,8	30	27,5	1,32
Uzorak 3	Z	MAG-S	1	300	14	25	27	1,56
Uzorak 4	Z	MAG-S	1	300	14	35	28	1,15
Uzorak 5	Z	MAG-S	1	300	14	35	26	1,07
Uzorak 6	Z+2UO	MAG-S	1	300	14	35	27,5	1,13
Uzorak 7	Z+4UO	MAG-P	1	250	9,8	30	28	1,12
Uzorak 8	Z+4UO	MAG-D	1	160	6,6	25	20	0,61
			2 i 3	160	6,6	30	21	0,54

6.5. Kontrola zavarenih uzoraka

Nakon zavarivanja uzoraka napravljena je vizualna i penetrantska kontrola gdje je na uzorcima 1, 2, 3, 4, 5 i 6 duljina zavara 140 mm, a na uzorcima 7 i 8 po 300 mm.

Postupak nanošenja penetranta je sljedeći:

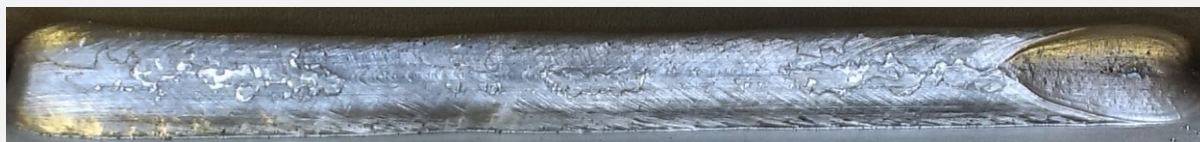
- na dobro očišćenu i odmašćenu površinu nanešen je tanak sloj penetranta,
- vrijeme penetriranja je oko 15 minuta,
- pod laganim mlazom vode ispire se višak penetranta,
- kada se površina osušila na nju se naštrcava razvijlač,
- vrijeme razvijanja je oko 15 minuta.

Nakon vremena razvijanja površina je spremna za pregled. U slučaju da ima pukotina na razvijlaču će se prikazati crvena boja zbog toga jer je on upio penetrant koji je zapunio pukotine. U tablici 19. prikazan je osvrt na napravljenu vizualnu i penetrantsku kontrolu.

Tablica 19. Vizualna i penetrantska kontrola

Vizualna kontrola uzorka 1

Pukotine po duljini zavara nisu vidljive, osim kraterske pukotine duljine 10 mm.



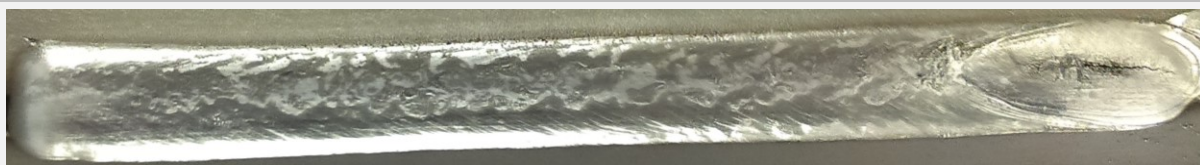
Penetrantska kontrola uzorka 1

Osim u krateru, penetrant pokazuje sitne indikacije duljine 5 mm.



Vizualna kontrola uzorka 2

Pukotine po duljini zavara nisu vidljive, osim kraterske pukotine duljine 15 mm.

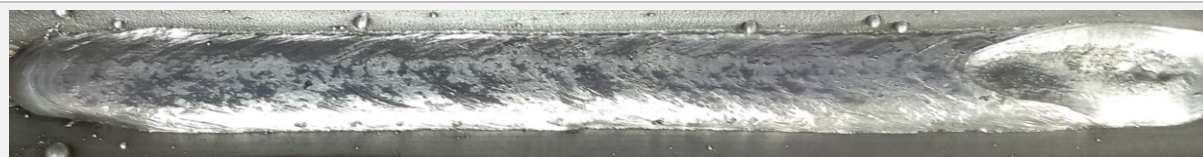


Penetrantska kontrola uzorka 2

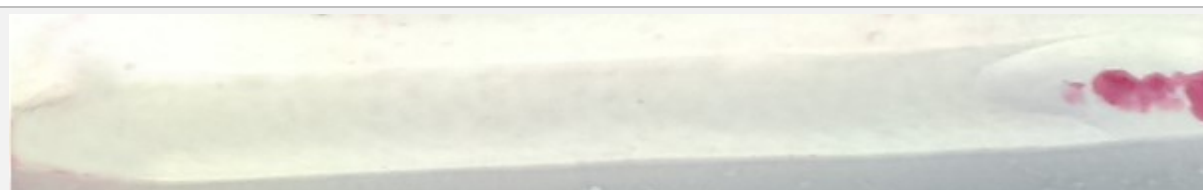
Osim u krateru pukotine po duljini zavara nisu vidljive.

**Vizualna kontrola uzorka 3**

Pukotine po duljini zavara nisu vidljive, osim kraterske pukotine duljine 10 mm.

**Penetrantska kontrola uzorka 3**

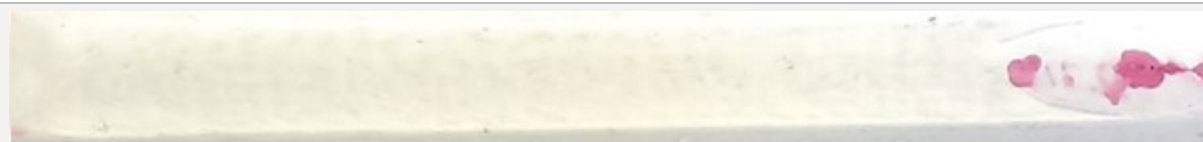
Osim u krateru pukotine po duljini zavara nisu vidljive

**Vizualna kontrola uzorka 4**

Pukotine po duljini zavara nisu vidljive, osim kraterske pukotine duljine 20 mm.

**Penetrantska kontrola uzorka 4**

Osim u krateru pukotine po duljini zavara nisu vidljive.

**Vizualna kontrola uzorka 5**

Pukotine po duljini zavara nisu vidljive, osim kraterske pukotine duljine 5 mm.



Penetrantska kontrola uzorka 5

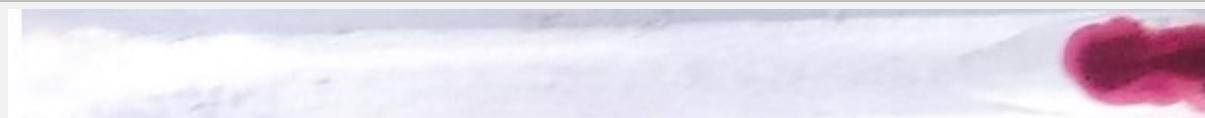
Osim u krateru gdje je duljina pukotine 20 mm, penetrant pokazuje indicacije po duljini zavara u iznosu od 10 mm.

**Vizualna kontrola uzorka 6**

Pukotine po duljini zavara nisu vidljive, osim kraterske pukotine duljine 15 mm.

**Penetrantska kontrola uzorka 6**

Osim u krateru pukotine po duljini zavara nisu vidljive.

**Vizualna kontrola uzorka 7**

Osim kraterske pukotine koja je duljine 10 mm, po duljini zavara vidljive su pukotine ukupne duljine 70 mm.

**Penetrantska kontrola uzorka 7**

Osim u krateru gdje je duljina pukotine 10 mm, penetrant pokazuje indicacije po duljini zavara u iznosu od 80 mm.

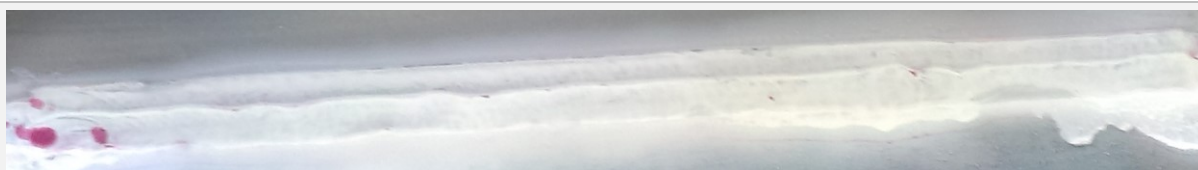
**Vizualna kontrola uzorka 8**

Pukotine po duljini zavara nisu vidljive.



Penetrantska kontrola uzorka 8

Penetrant pokazuje indikacije na ukupnoj duljini od 10 mm.



Kraterske pukotine pojavile su se na svim uzorcima zbog naglog prekida električnog luka. Da bi se spriječila pojava kraterskih pukotina tj. da bi se krater popunio pojedini MIG/MAG uređaji za zavarivanje posjeduju mogućnost da se električni luk postepeno gasi te pri tome popuni krater. Postoji također mogućnost da se na početku i na kraju postave tzv. produžene pločice na kojima se uspostavlja i prekida postupak zavarivanja a one se kasnije odrežu. U ovom radu svi uzorci su rađeni automatskim vođenjem pištolja tako da nije bilo mogućnosti vraćanja pištolja unazad, što bi također spriječilo nastanak kraterskih pukotina. Na temelju provedene vizualne i penetrantske kontrole može se zaključiti da je do pojava pukotina najviše došlo na uzorku 7 zbog pojačanog načina ukrućenja (modificirani Tip C).

6.6. Priprema uzoraka za ispitivanje

Da bi se mogli ispitati geometrija, oblik, penetracija i pojava toplih pukotina, uzorke treba pripremiti. Priprema se odvija na sljedeći način:

- Rezanje uzoraka za kružnoj pili (slika 49a).
- Brušenje na grubo s granulacijama brusnih ploča: A120 i A220.
- Brušenje/poliranje na fino s granulacijama brusnog papira (SiC – silikon karbid) od: A320, A500, A1200, A2000 i A400, brušenje se obavljalo pomoću vode koja hladi, a ujedno i ispire pobrušeni dio dok se stroj rotira 300 o/min (slika 49b).
- Polirani se uzorci nakon toga elektrolitski nagrizzaju u 10 % - tnoj oksalnoj kiselini pod naponom od 10 V i jakosti struje 5 A u trajanju od 3 minute.
- Kemijska analiza metala zavara [42], (slika 49c).
- Mjerenje udjela ferita u metalu zavara.
- Slikanje makro i mikro.



Slika 49. Priprema uzoraka za ispitivanje

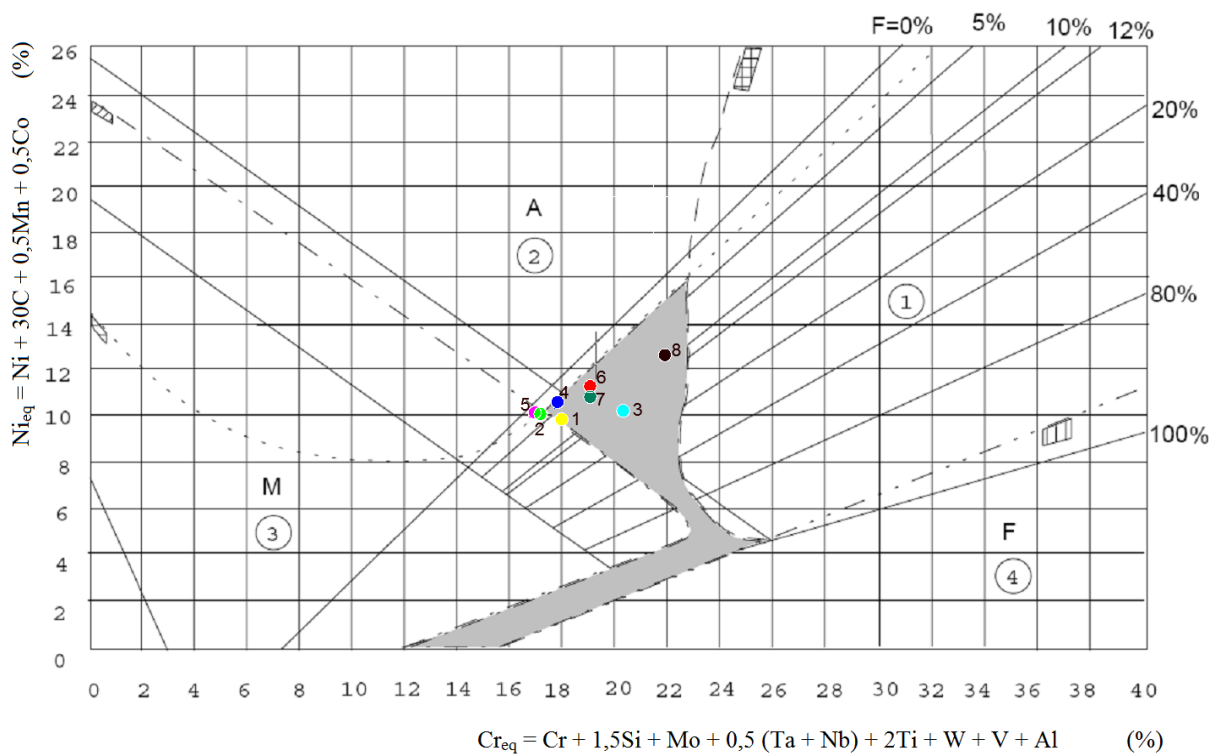
Pomoću uređaja koji je prikazan na slici 49c (Olympus Innov-X Systems) izmjeren je kemijski sastav metala zavara kako bi se na temelju njega mogao proračunati Cr_{eq} i Ni_{eq} te nacrtati u strukturnom dijagramu i vidjeti da li će struktura metala zavara biti u povoljnom području ili u području gdje je povećana sklonost prema nastajanju toplih pukotina.

6.7. Kemijska analiza metala zavara

Kemijska analiza metala zavara napravljena je u laboratoriju za zaštitu materijala na uređaju Olympus Innov-X Systems (slika 49c). U tablici 20. prikazani su dobiveni rezultati, na slici 50. prikazan je njihov smještaj u Schäffler – ovom dijagramu koji je dopunjen DeLongom i Bystramom s prikazom područja mogućih problema, a u prilogu 1. prikazana su mjesta mjerenja. Uređaj nema sposobnost mjerenja sadržaja ugljika, a Cr i Ni ekvivalent računati su po formuli koja je prikazana na slici 50.

Tablica 20. Kemijski sastav metala zavara svih uzoraka

	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Mo	Cr _{eq}	Ni _{eq}	Cr _{eq} /Ni _{eq}
Uzorak 1 (%)	0,51	0,1	17,01	1,51	71,6	9,01	0,17	0,099	17,98	9,77	1,84
Uzorak 2 (%)	0,42	0,07	16,44	1,59	72,22	9,20	-	0,066	17,21	9,99	1,72
Uzorak 3 (%)	0,58	-	19,44	1,75	66,76	11,26	0,16	0,063	20,37	12,14	1,68
Uzorak 4 (%)	0,48	0,07	16,95	1,53	71,17	9,44	0,25	0,108	17,85	10,51	1,69
Uzorak 5 (%)	0,58	0,08	16,14	1,58	72,10	9,27	0,15	0,097	17,04	10,06	1,69
Uzorak 6 (%)	0,49	0,08	18,16	1,58	69,15	10,22	0,19	0,124	19,10	11,01	1,73
Uzorak 7 (%)	0,50	0,09	18,15	1,55	69,45	10,14	-	0,115	19,11	10,92	1,75
Uzorak 8 (%)	0,57	-	19,56	1,77	66,37	11,68	-	0,044	21,96	12,57	1,74



Slika 50. Prikaz metala zavara u Schäffler – ovom dijagramu

Područja mogućih problema prikazani su na slici 50. i to redom:

- 1 – područje povećane krhkosti i moguće izlučivanje sigma faze (500 – 900 °C),
- 2 – područje povećane sklonosti pojavi toplih pukotina,
- 3 – područje povećane sklonosti pojavi hladnih pukotina, obavezno predgrijavanje,
- 4 – područje povećane sklonosti pogrubljenja zrna i smanjenja žilavosti.

Na temelju provedene kemijske analize, izračunavanja Cr i Ni ekvivalenta, njihovog odnosa i ucrtavanja njihovih veličina u Schäßler – ov dijagram može se doći do zaključka da se svi uzorci nalaze u području dobre zavarljivosti. U tablici 21. prikazani su udjeli ferita u pojedinom metalu zavara koji je očitano iz dijagrama.

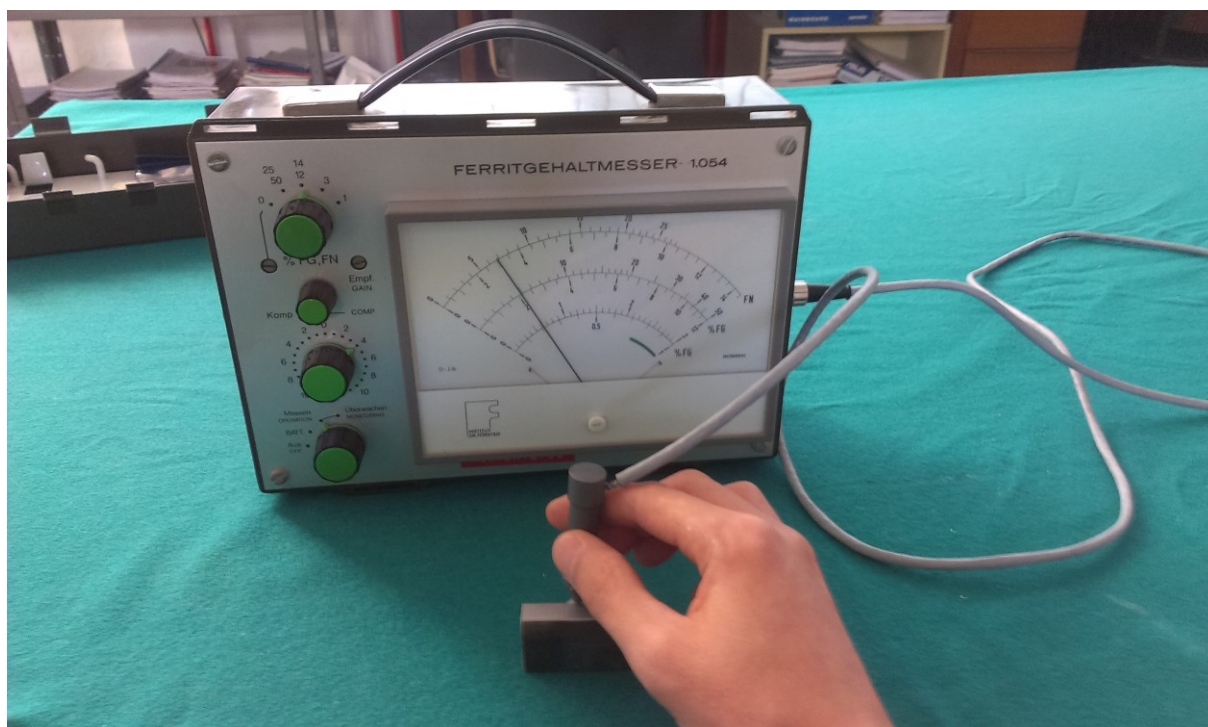
Tablica 21. Očitani podaci udjela ferita iz Schäßler – ovog dijagrama

	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6	Uzorak 7	Uzorak 8
δF (%)	8	3	15	3	3	6	7	10

Na temelju očitanih vrijednosti može se reći da je uzorak 3 izvan preporučenih vrijednosti udjela ferita u metalu zavara, a uzorci 2, 4, 5 i 10 su na granici.

6.8. Mjerenje udjela ferita u metalu zavara

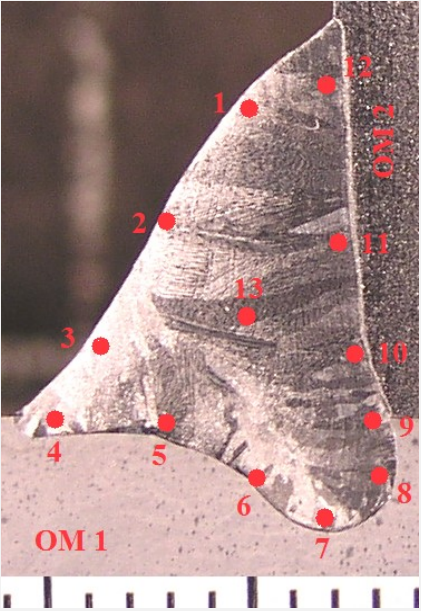
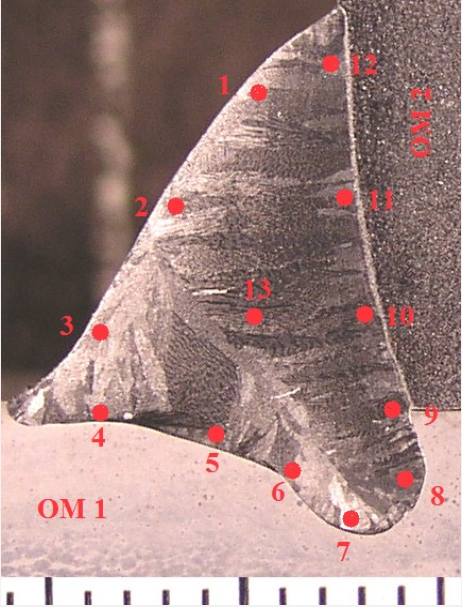
Mjerenje udjela ferita u metalu zavara napravljeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala na uređaju (slika 51.) Ferritgehaltmesser 1.054. Uređaj ima ticalo koje prislanjanjem na željenu poziciju očitava postotak ferita.



Slika 51. Uređaj za mjerenje postotka ferita Ferritgehaltmesser 1.054

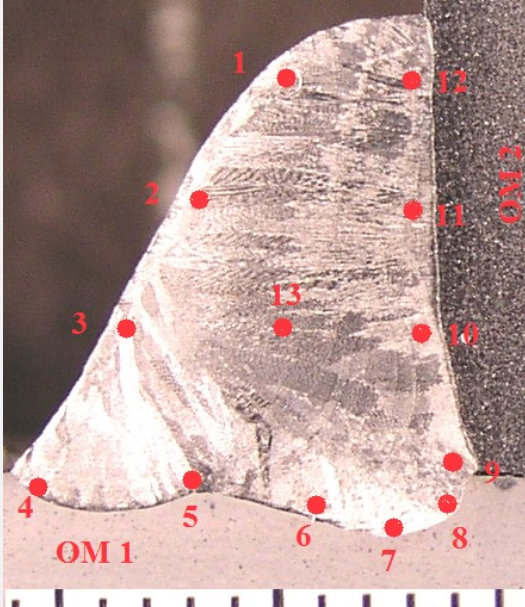
U tablici 22. prikazana su mjesta mjerenja na svakom pojedinom uzorku i dobiveni rezultati.

Tablica 22. Mjesta mjerenja δF i očitani rezultati

Uzorak 1													
RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% δF	0	0	0	3	4	6	10	6	2	0,2	0,1	0	0
 <p>OM 1 – S355J2 OM 2 – X5CrNi18-10</p> <p>Uzorak 1 zavarivan je MAG-P postupkom s unosom topline od 1,10 kJ/mm s najvećim postotkom δF u točki 7 u iznosu od 10 %.</p>													
Uzorak 2													
RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% δF	0	0	0	4	5	6	8	6	1,5	0,2	0,1	0	0
 <p>OM 1 – S355J2 OM 2 – X5CrNi18-10</p> <p>Uzorak 2 zavarivan je MAG-P postupkom s unosom topline od 1,32 kJ/mm s najvećim postotkom δF u točki 7 u iznosu od 8 %.</p>													

Uzorak 3

RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% δF	0	0	0	3	4	4	5	4	1,5	0,5	0,1	0	0

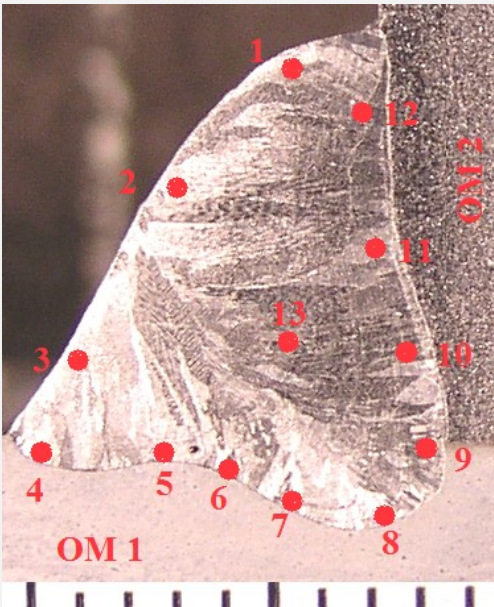


OM 1 – S355J2
 OM 2 – X5CrNi18-10

Uzorak 3 zavarivan je MAG-S postupkom s unosom topline od 1,56 kJ/mm s najvećim postotkom δF u točki 7 u iznosu od 5 %.

Uzorak 4

RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% δF	0	0	0	5	6	7	9	9	2	0,1	0	0	0

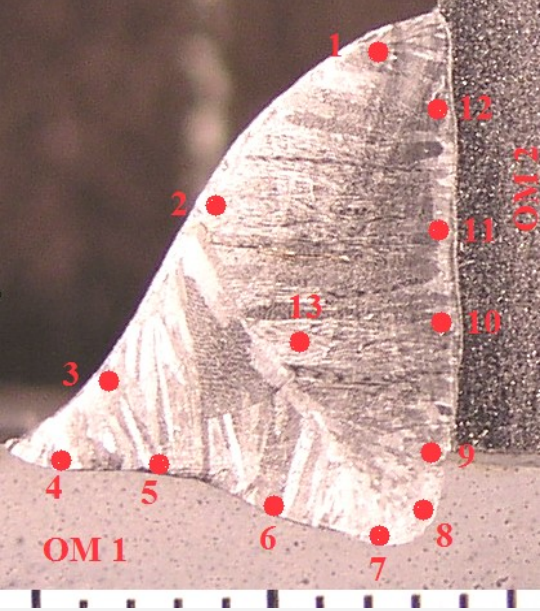


OM 1 – S355J2
 OM 2 – X5CrNi18-10

Uzorak 4 zavarivan je MAG-S postupkom s unosom topline od 1,15 kJ/mm s najvećim udjelom δF u točkama 7 i 8 u iznosu od 9 %.

Uzorak 5

RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% δF	0	0	0	3	4	6	8	3	2	0	0	0	0

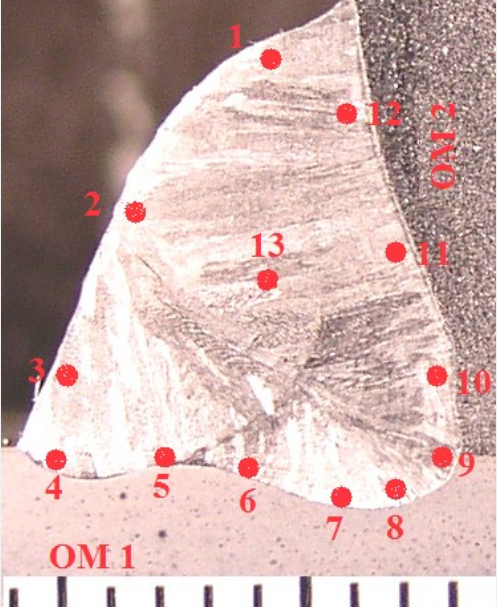


OM 1 – S355J2
OM 2 – X5CrNi18-10

Uzorak 5 zavarivan je MAG-S postupkom s unosom topline od 1,07 kJ/mm s najvećim udjelom δF u točki 7 u iznosu od 8 %.

Uzorak 6

RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% δF	0	0	0	7	7	8	9	9	2	1	1	1	0



OM 1 – S355J2
OM 2 – X5CrNi18-10

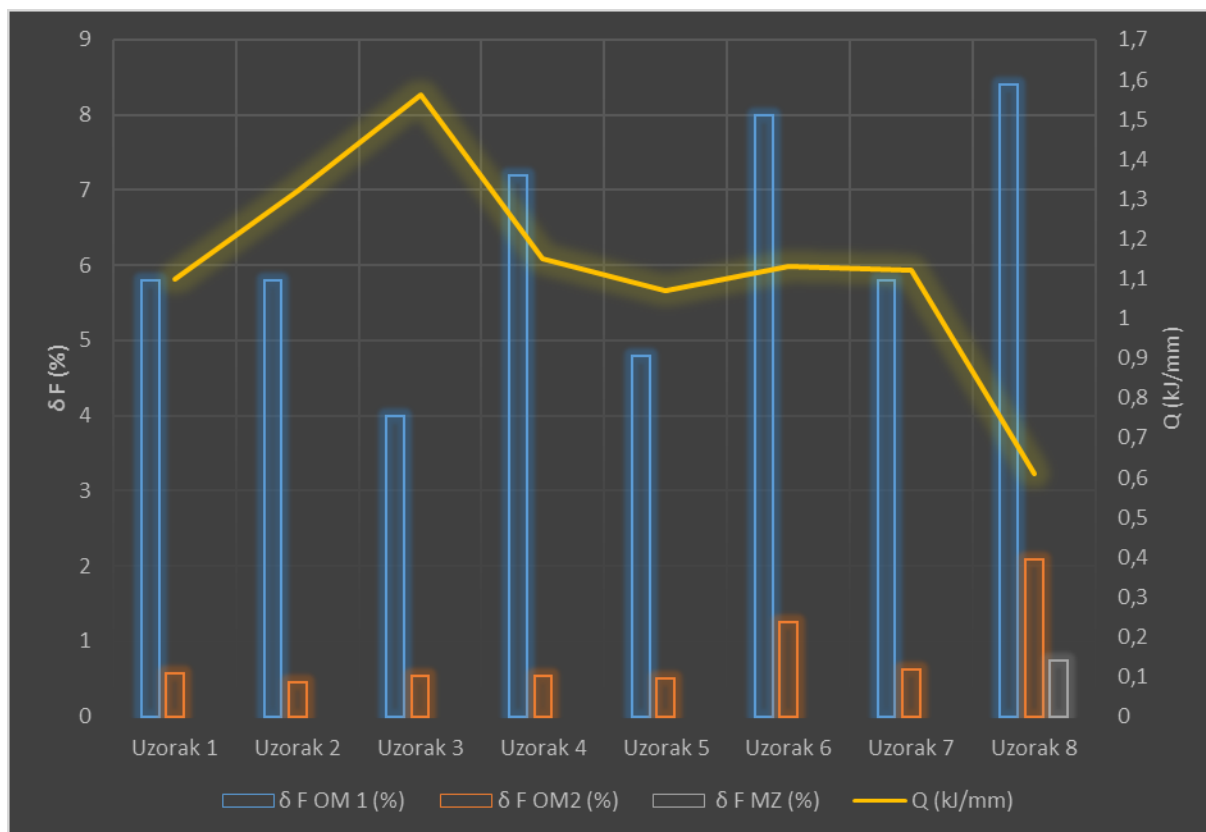
Uzorak 6 zavarivan je MAG-S postupkom s unosom topline od 1,13 kJ/mm s najvećim udjelom δF u točkama 7 i 8 u iznosu od 9 %.

Uzorak 7															
RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
% δF	0	0	0	4	6	6	6	7	2	0,5	0	0	0		
 <p>OM 1 – S355J2 OM 2 – X5CrNi18-10</p> <p>Uzorak 7 zavarivan je MAG-P postupkom s unosom topline od 1,12 kJ/mm s najvećim udjelom δF u točki 8 u iznosu od 7 %.</p>															
Uzorak 8															
RB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
% δF	2,5	3	2	7	8	8	9	10	2	0	0	1	2	3	0
 <p>OM 1 – S355J2 OM 2 – X5CrNi18-10</p> <p>Uzorak 8 zavarivan je MAG-D postupkom u tri prolaza s unosom topline kod prvog prolaza s 0,61 kJ/mm, a kod drugog (dolje) i trećeg (gore) s 0,54 kJ/mm s najvećim udjelom δF u točki 8 u iznosu od 10 %.</p>															

Na temelju napravljenih mjerenja postotka δF u metalu zavara može se zaključiti sljedeće:

- Na strani OM 1 (S355J2) postotak δF je maksimalan i kreće se u granicama od 3 do 10 % što je u granicama preporučenog. U obzir su uzete točke 4, 5, 6, 7 i 8 kod svih uzorka, a do tih iznosa došlo je zbog velikog udjela ferita u OM 1 koji iznosi preko 50 % te zbog miješanja OM 1 s DM.
- Na strani OM 2 (X5CrNi18-10) postotak δF je minimalan i kreće se u granicama od 0 do 2 % zbog smanjenog udjela ferita u OM 2 koji iznosi 1,5 do 2 % i zbog manjeg miješanja i penetracije OM 2 s DM. U obzir su uzete točke 9, 10, 11 i 12 kod svih uzoraka, te postotak δF nije u granicama preporučenog.
- U metalu zavara po sredini i po licu zavara postotak δF je 0 osim kod uzorka 8 kod kojeg se δF kreće u granicama od 0 do 3 %. Relativno velika razlika uzorka 8 u odnosu na ostale uzorke može se objasniti činjenicom da se kod uzorka 8 zavarivalo u tri prolaza, pa je zbog toga došlo do pojačanog miješanja. U obzir su uzete točke 1, 2, 3 i 13 kod svih uzoraka, te još 14 i 15 kod uzorka 8, postotak δF nije u granicama preporučenog.
- Dodatni materijal MIG 309 LSi trebao bi osigurati postotak δF u metalu zavara od 3 do 10 % što je on i ostvario ali tamo gdje je bilo i za očekivati da će ga biti najviše. U metalu zavara po sredini i po licu zavara gotovo da ga i nema osim kod uzorka 8, a upravo zbog tog „manjka“ δF na tim mjestima će doći do pojave toplih pukotina, što će biti prikazano u poglavlju 6.10.

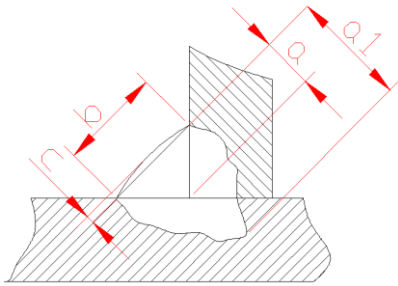
Na slici 52. prikazan je grafički prikaz kod kojeg je uzeta srednja vrijednost δF na strani OM 1, OM 2 i u metalu zavara kod svih uzoraka iz kojeg je vidljivo da je na strani OM 1 postotak δF u granicama od dok je na strani OM 2 i u metalu zavara postotak δF ispod granice preporučenog. Bez obzira kojim se je postupkom zavarivalo (MAG-P, MAG-S ili MAG-D) i koji je bio unos topline u metalu zavara nije došlo do dovoljnog miješanja da bi se ostvarila preporučena količina δF koja se kreće u granicama od 3 do 10 %.

Slika 52. Utjecaj unosa topline na postotak δF u metalu zavara

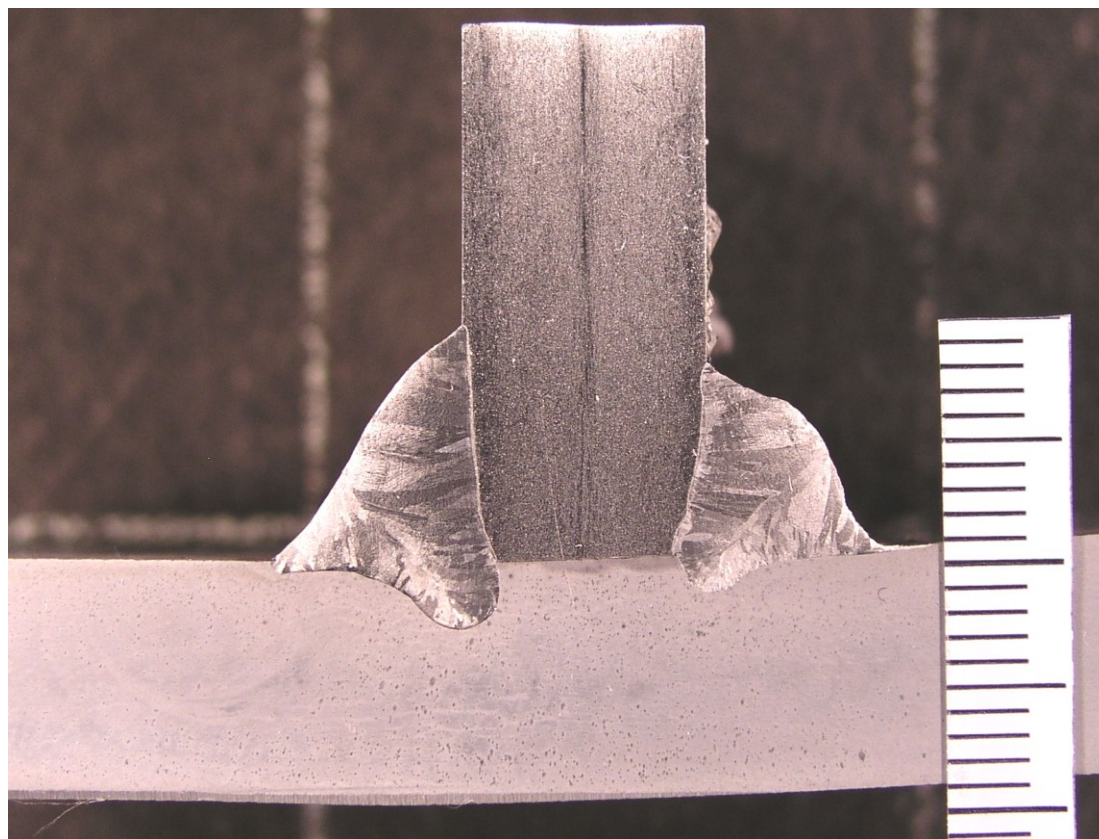
6.9. Geometrija metala zavara

Pod geometrijom zavara podrazumijeva se visina, širina, oblik, nadvišenje zavara te penetracija. Kako bi se mogla napraviti analiza geometrije zavara u laboratoriju za materijalografiju nakon što su uzorci pobrušeni i nagriženi napravljene su makro snimke svakog uzorka na temelju kojih je napravljena analiza geometrije zavara. Sva potrebna mjerenja napravljena su u AutoCad-u, u tablicama od 23. do 30. prikazani su shematski presjeci metala zavara kao i izmjerene vrijednosti, a na slikama od 53. do 60. pravi presjeci metala zavara od svih uzoraka. Na svim uzorcima ispitivani metal zavara je sa lijeve strane dok je sa desne strane ukruta. Osnovni materijal OM 1 (S355J2) nalazi se u horizontalnom položaju dok je OM 2 (X5CrNi18-10) u vertikalnom položaju.

Tablica 23. Prikaz geometrije zavora uzorka 1

Uzorak 1		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-P	6,2	8,5
p (mm)	b (mm)	c (mm)
2,3	11,1	0,5

Na slici 53. prikazan je makroizbrusak uzorka 1 koji je zavaren MAG-P postupkom gdje je vidljivo kako nadvišenje po čitavom licu zavora nije jednoliko. Prilikom zavarivanja došlo je do pojave deformacija i do značajno manjeg protaljivanja OM 2 u usporedbi sa OM 1.

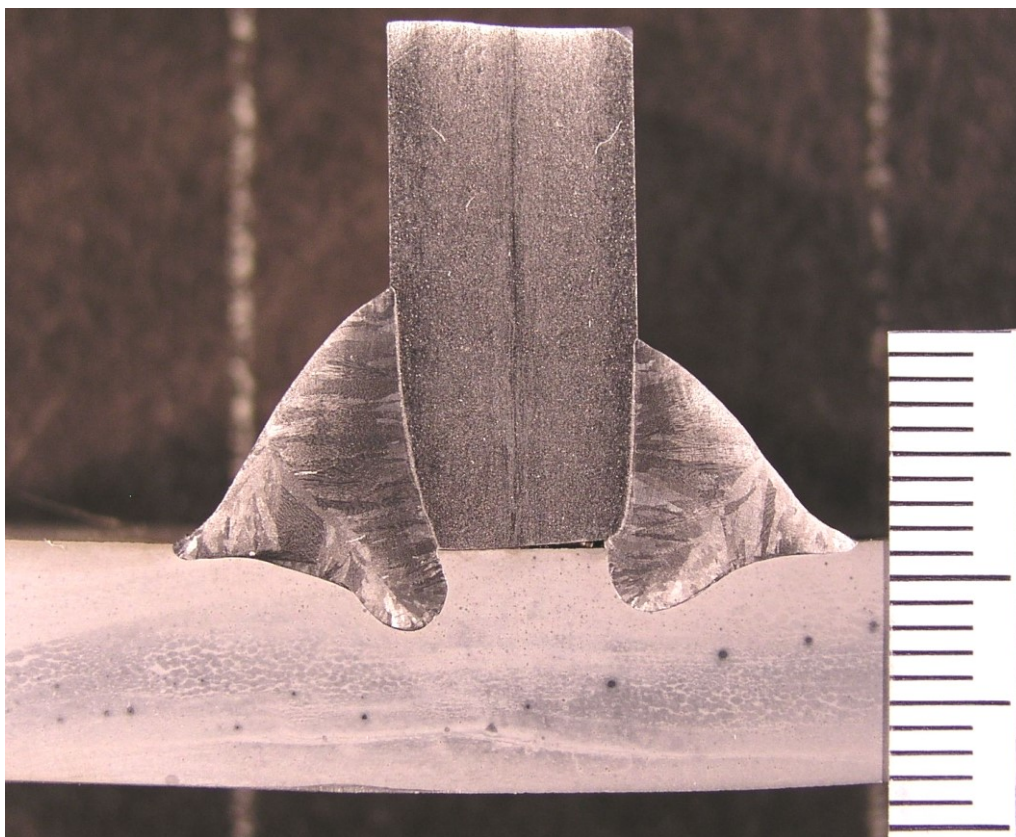


Slika 53. Makroizbrusak uzorka 1 – MAG-P

Tablica 24. Prikaz geometrije zavora uzorka 2

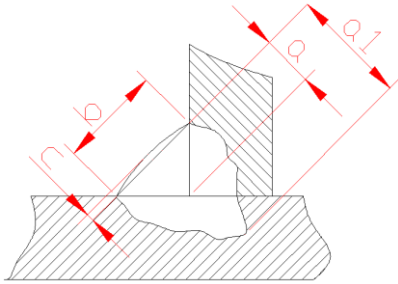
Uzorak 2		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-P	6,6	9,4
p (mm)	b (mm)	c (mm)
2,8	12,6	0,5

Na slici 54. prikazan je makroizbrusak uzorka 2 koji je zavaren MAG-P postupkom, gdje je vidljivo kako nadvišenje nije jednoliko po čitavom licu zavora. Prilikom zavarivanja došlo je do pojave deformacije kao i do povećeg protaljivanja u OM 2 u odnosu na OM 1.

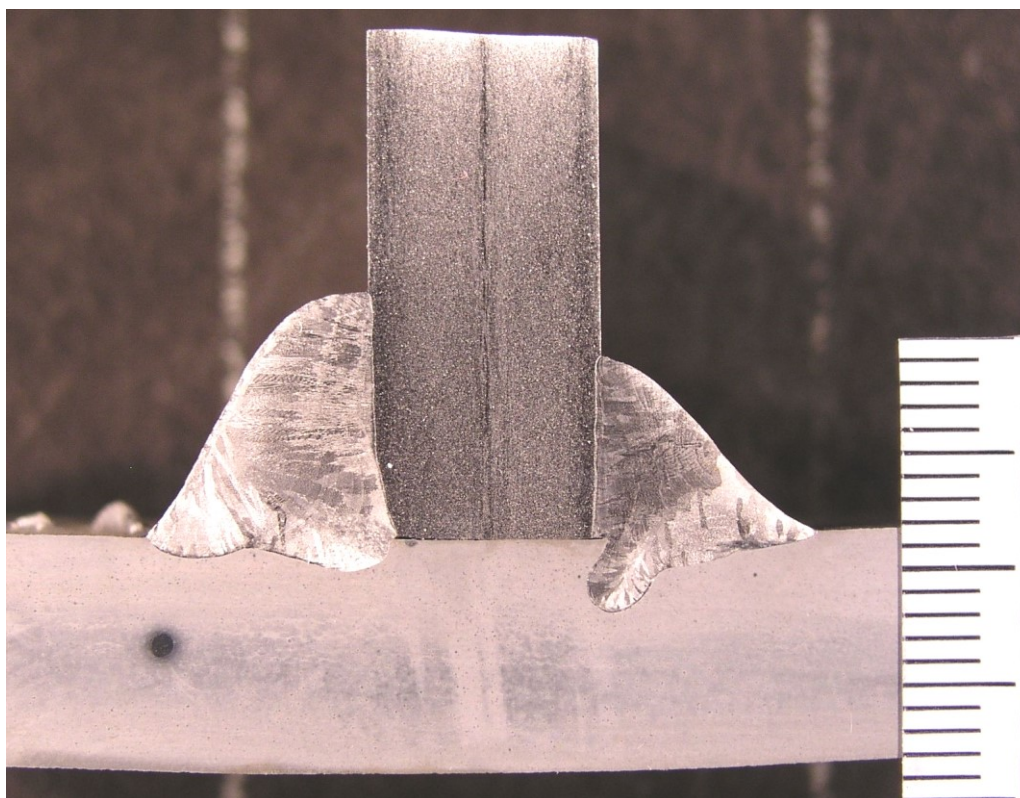


Slika 54. Makroizbrusak uzorka 2 - MAG-P

Tablica 25. Prikaz geometrije zavora uzorka 3

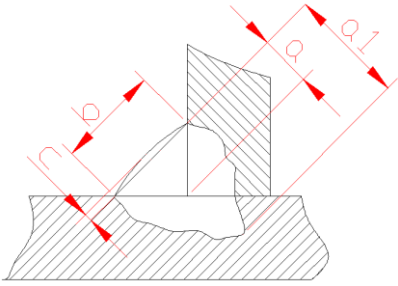
Uzorak 3		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-S	8	9,2
p (mm)	b (mm)	c (mm)
1,2	13,6	1,2

Na slici 55. prikazan je makroizbrusak uzorka 3 koji je zavararen MAG-S postupkom gdje je jako izraženo nadvišenje koje nije jednoliko po čitavom licu zavora. Prilikom zavarivanja došlo je do pojave deformacija kao i do izrazito slabog protaljivanja u OM 2 (moglo bi se zaključiti da je došlo do najljepljivanja).

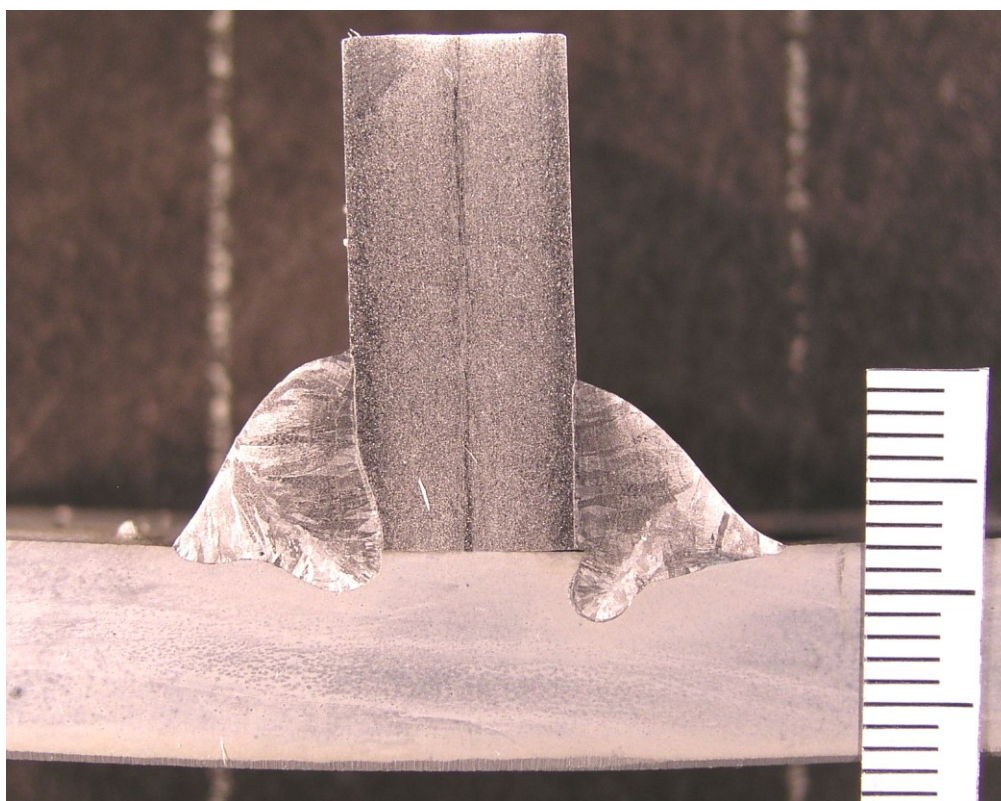


Slika 55. Makroizbrusak uzorka 3 - MAG-S

Tablica 26. Prikaz geometrije zavora uzorka 4

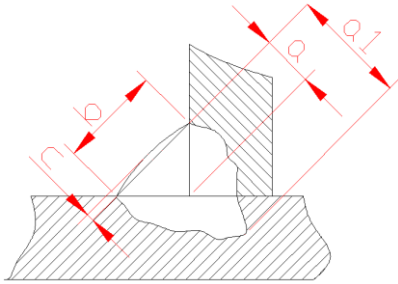
Uzorak 4		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-S	6,5	8,2
p (mm)	b (mm)	c (mm)
1,7	10,8	1,1

Na slici 56. prikazan je makroizbrusak uzorka 4 koji je zavaren MAG-S postupkom, gdje je kao i kod uzorka 3 došlo povećeg nadvišenja po čitavom licu zavora. Prilikom zavarivanja došlo je do pojave deformacija, ali i do malo većeg protaljivanja u OM 2 nego što je to kod uzorka 3.

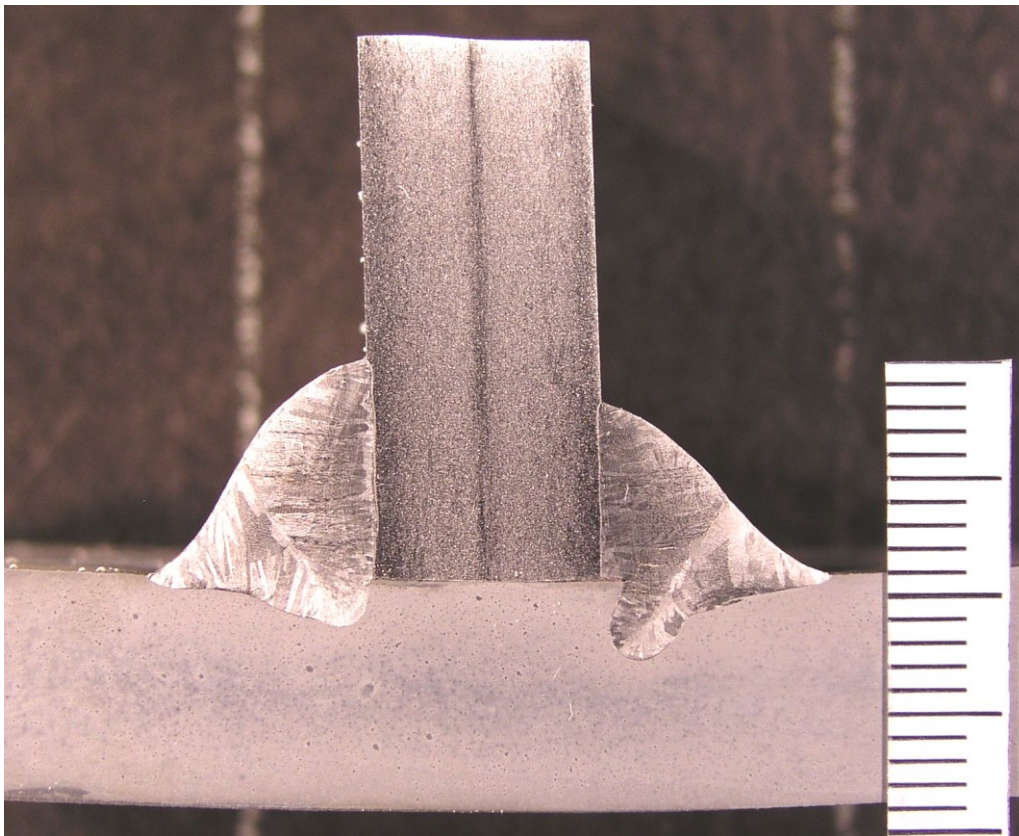


Slika 56. Makroizbrusak uzorka 4 - MAG-S

Tablica 27. Prikaz geometrije zavora uzorka 5

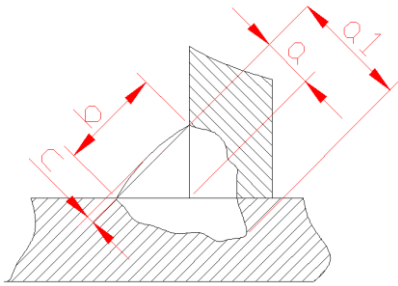
Uzorak 5		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-S	7	7,8
p (mm)	b (mm)	c (mm)
0,8	12,4	0,9

Na slici 57. prikazan je makroizbrusak uzorka 5 koji je zavaren MAG-S postupkom, gdje je vidljivo da nadvišenje nije jednoliko po čitavom licu zavora, kao i da je došlo do pojave deformacija prilikom zavarivanja i izrazito slabog protaljivanja na strani OM 2.

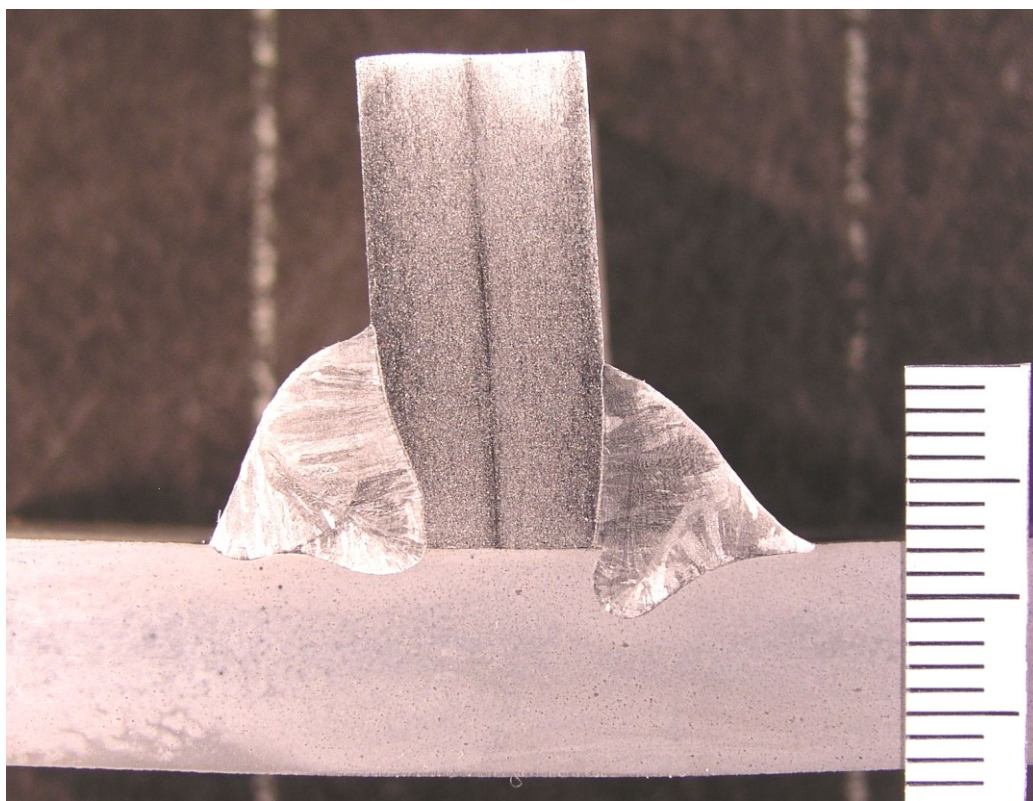


Slika 57. Makroizbrusak uzorka 5 - MAG-S

Tablica 28. Prikaz geometrije zavora uzorka 6

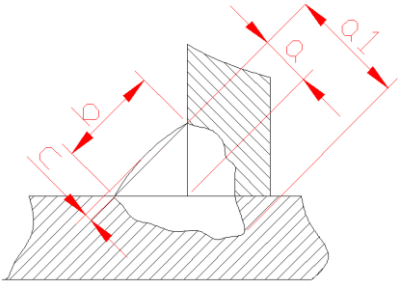
Uzorak 6		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-S	6,6	8
p (mm)	b (mm)	c (mm)
1,4	11,1	1,2

Na slici 58. prikazan je makroizbrusak uzorka 6 koji je zavaren MAG-S postupkom, gdje je vidljivo kako je došlo kao i na prethodnim uzorcima zavarenim MAG-S postupkom do povećanog i neravnomjernog nadvišenja po čitavom licu zavora kao i do pojave znatnije pojave deformacije i slabog protaljivanja na strani OM 2.

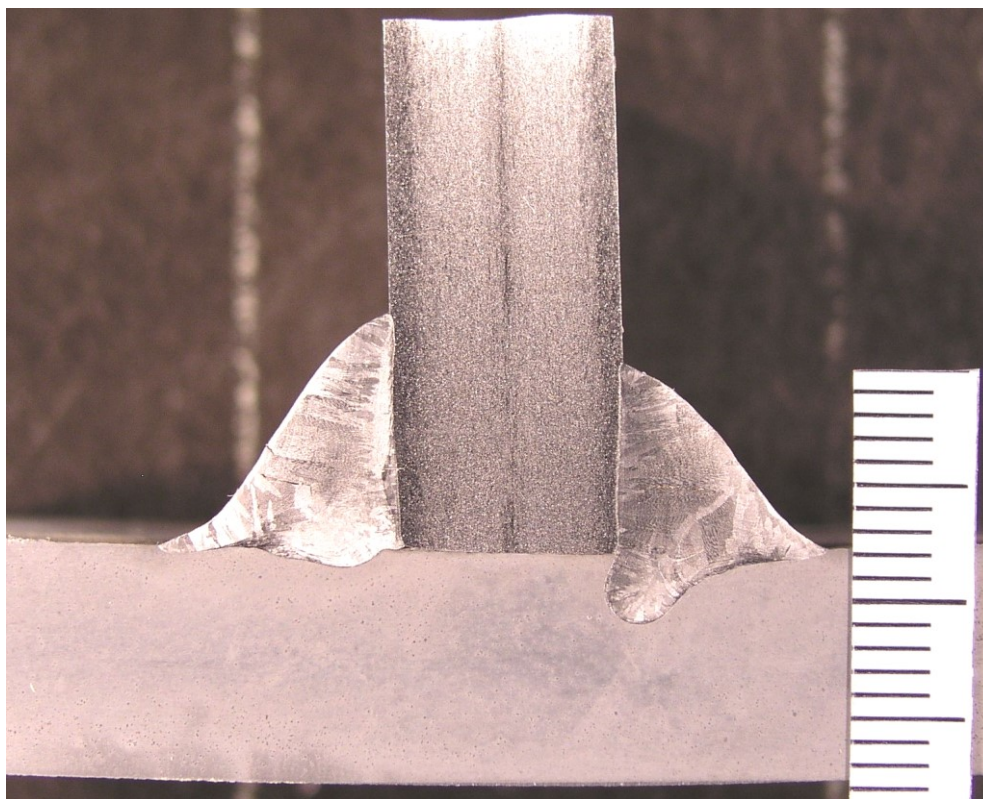


Slika 58. Makroizbrusak uzorka 6 - MAG-S

Tablica 29. Prikaz geometrije zavora uzorka 7

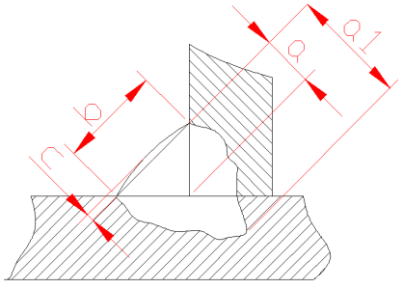
Uzorak 7		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-P	6,2	7
p (mm)	b (mm)	c (mm)
0,8	13,4	0,4

Na slici 59. prikazan je makroizbrusak uzorka 7 koji je zavaren MAG-P postupkom zavarivanja, gdje je vidljivo kako nadvišenje nije jednoliko po čitavom licu zavora. Prilikom zavarivanja došlo je do pojave deformacija kao i do smanjenog protaljivanja na strani OM 1 a još manjeg na strani OM 2.

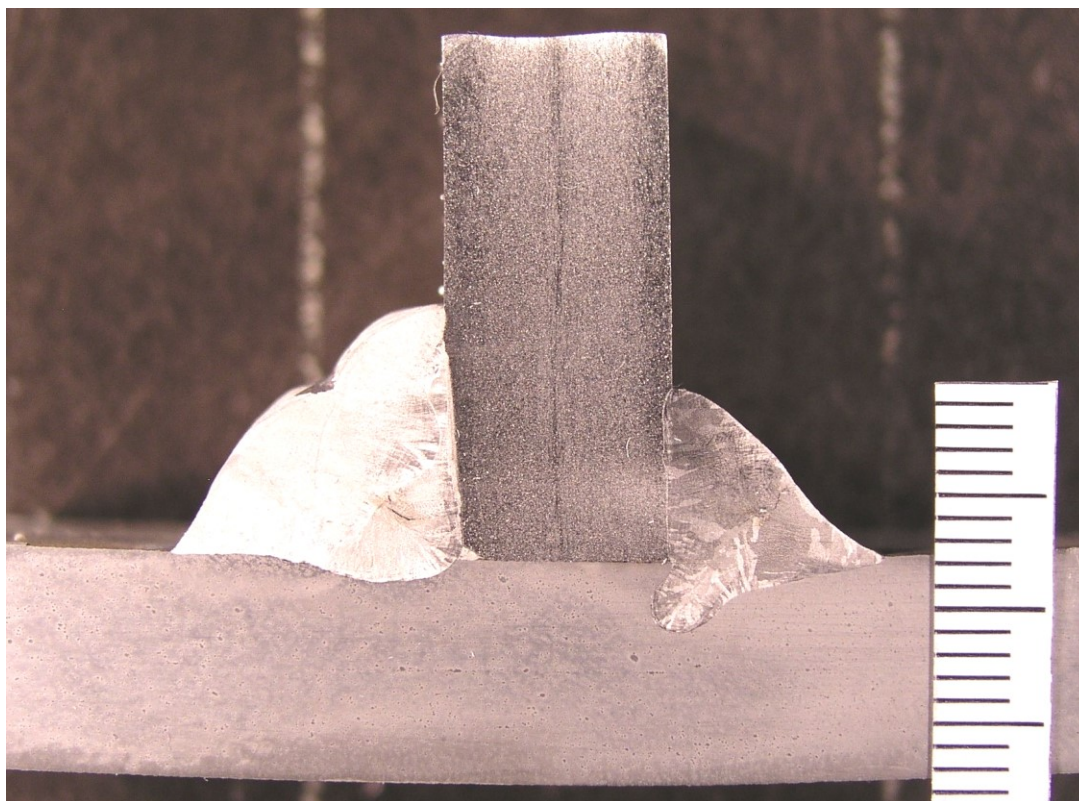


Slika 59. Makroizbrusak uzorka 7 - MAG-P

Tablica 30. Prikaz geometrije zavora uzorka 8

Uzorak 8		
Postupak	a (mm)	a1 (mm)
MAG-D	9	10
p (mm)	b (mm)	c (mm)
1	15	1,5

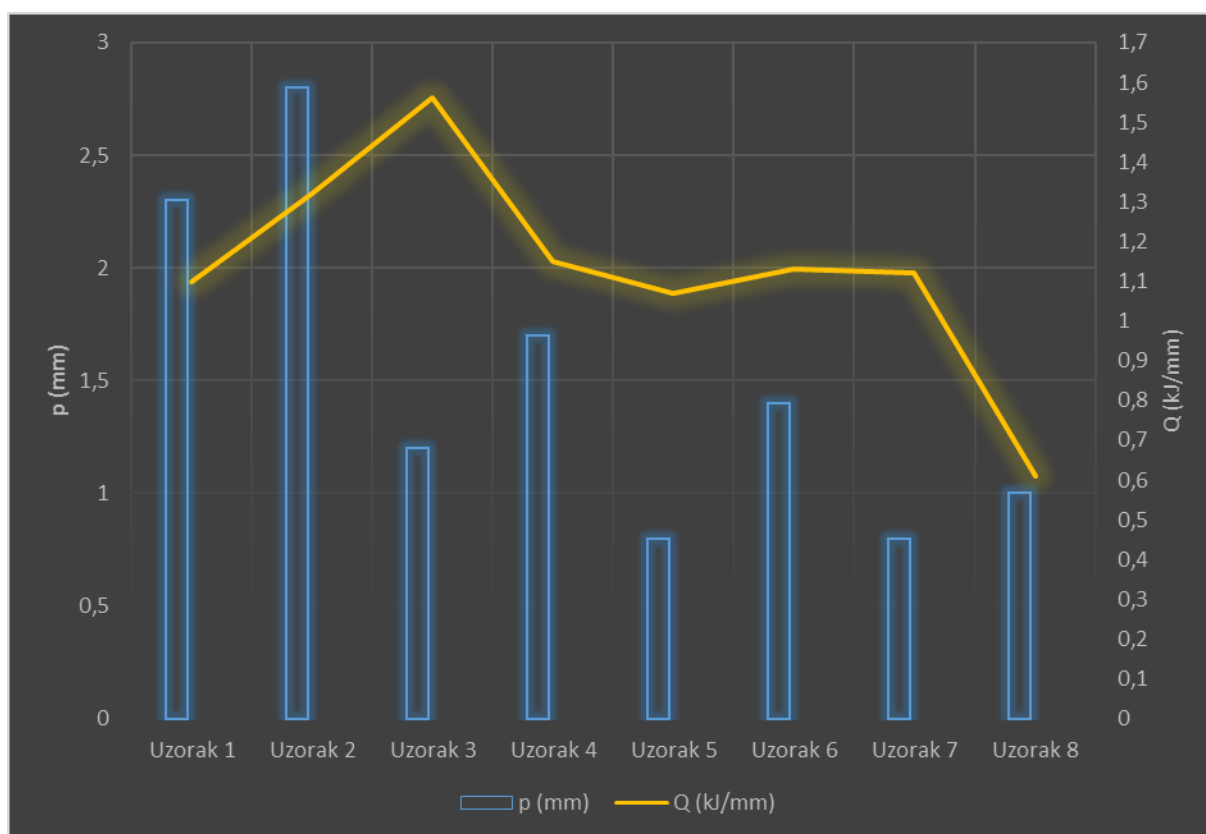
Na slici 60. prikazan je makroizbrusak uzorka 8 zavaren MAG-D postupkom u tri prolaza gdje je vidljivo kako je došlo do povećanog i neravnomjernog nadvišenja po čitavom licu zavora. Prilikom zavarivanja došlo je do pojave deformacija kao i do slabog protaljivanja u OM 2.



Slika 60. Makroizbrusak uzorka 8 – MAG-D

Na temelju napravljene analize na makroizbruscima može se zaključiti sljedeće:

- Uzorci koji su zavarivani MAG-P postupkom imaju pravilniji oblik, kao i samo nadvišenje zavara. Deformacije su manje izražene, te nije došlo do nagomilavanja metala zavara.
- Uzorci koji su zavarivani MAG-S postupkom imaju izraženo nadvišenje zavara, deformacije su izraženije nego kod MAG-P postupka i uslijed brzine DM od 14 m/min došlo je do nagomilavanja metala zavara, povećanog štrcanja i do slabije penetracije.
- Uzorak koji je zavarivan MAG-D postupkom ima nepravilno i izraženo nadvišenje zavara, deformacije u odnosu na MAG-S postupak nisu ni primjetne jer se zavarivalo sa manjim unosom topline, a zbog zavarivanja u tri prolaza došlo je do nagomilavanja metala zavara i do slabije penetracije jer se prvi, a i sljedeća dva prolaza zavarivala sa jakosti struje od 160 A.



Slika 61. Utjecaj unosa topline na dubinu penetracije

6.10. Analiza pojave toplih pukotina

U ovom poglavlju analizirat će se pojava toplih pukotina kod svih uzoraka te kod kojih parametara zavarivanja je došlo do njih. Na slikama od 62. do 69. bit će prikazan metal zavara svakog pojedinog uzorka uz povećanje od 7,88 i 12,5 puta. Slikanje i pregled uzorka napravljeno je u laboratoriju za zaštitu materijala, a mjerenje duljina pukotina u AutoCad – u.

6.10.1. Uzorak 1

Vizualna kontrola nije dala nikakve naznake da je došlo do pojave toplih pukotina, osim u krateru (10 mm) dok je kod penetrantske kontrole došlo do pojave sitnih indikacija duljine 5 mm po sredini zavara (tablica 19.). Kod pregleda uzorka 1 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta nije bilo vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina. Na slici 62. prikazan je mikroizbrusak metala zavara uzorka 1 uz povećanje od 7,88 puta.

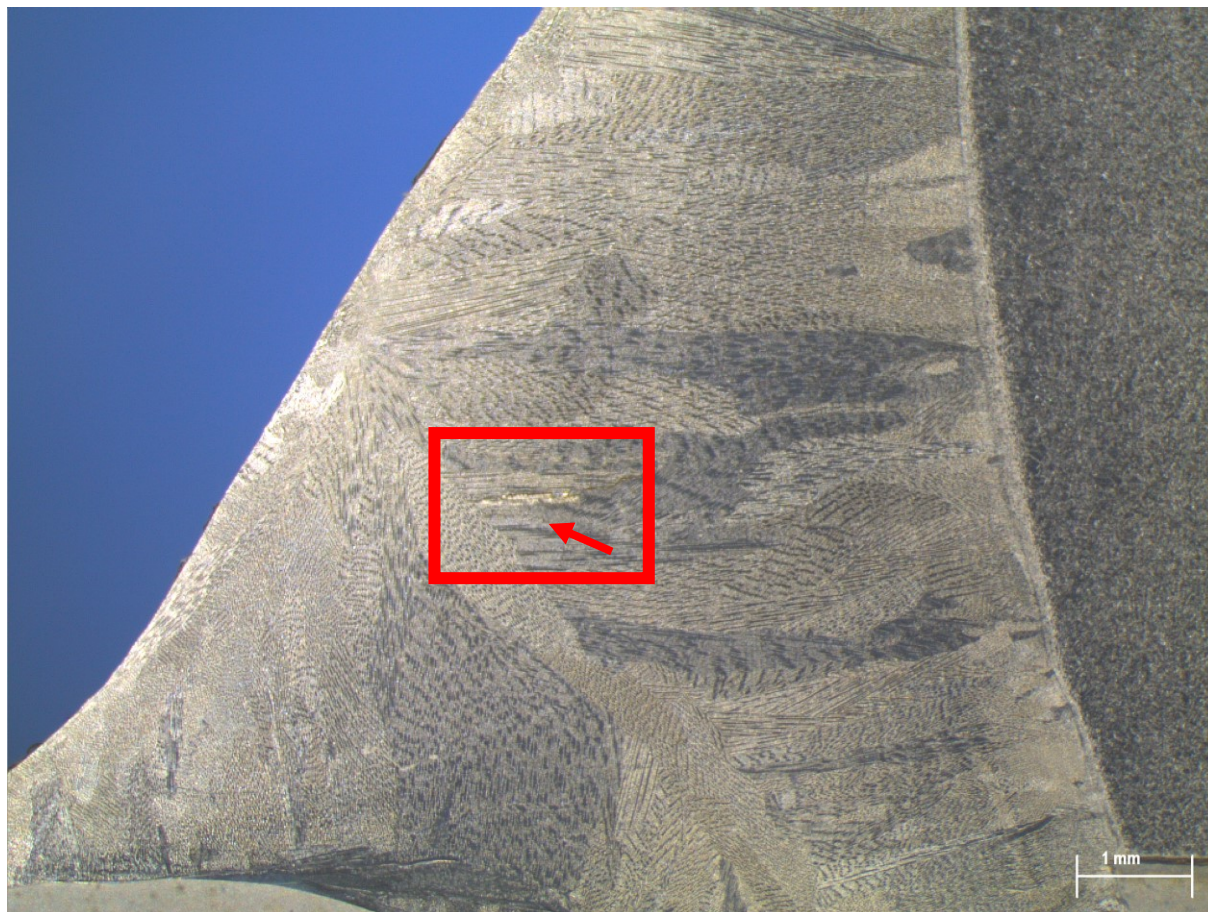


Slika 62. Mikroizbrusak uzorka 1 uz povećanje od 7,88 puta

Način ukrućenja uzorka 1 prikaz je na slici 47., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrotu, a u tablici 18. za uzorak 1.

6.10.2. Uzorak 2

Vizualna kontrola nije dala nikakve naznake da je došlo do pojave toplih pukotina, osim u krateru (15 mm), a penetrantska je to i potvrdila. Kod pregleda uzorka 2 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta bilo je vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina u metalu zavora. Na slici 63. prikazan je mikroizbrusak metala zavora uzorka 2 uz povećanje od 12,5 puta.



Slika 63. Mikroizbrusak uzorka 2 uz povećanje od 12,5 puta

Način ukrućenja uzorka 2 prikaz je na slici 47., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrutu, a u tablici 18. za uzorak 2. U crvenom pravokutniku za slici 63. prikazana je topla pukotina koja je detektirana u metalu zavora, duljina tople pukotine je 0,9 mm, a širina 0,05 mm.

6.10.3. Uzorak 3

Vizualna kontrola nije pokazala nikakve naznake da je došlo do pojave toplih pukotina, osim onih u krateru koje su duljine 10 mm (tablica 19.), a penetrantska je to i potvrdila. Kod pregleda uzorka 3 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta bilo je vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina u metalu zavara. Na slici 64. prikazan je mikroizbrusak metala zavara uzorka 3 uz povećanje od 12,5 puta.

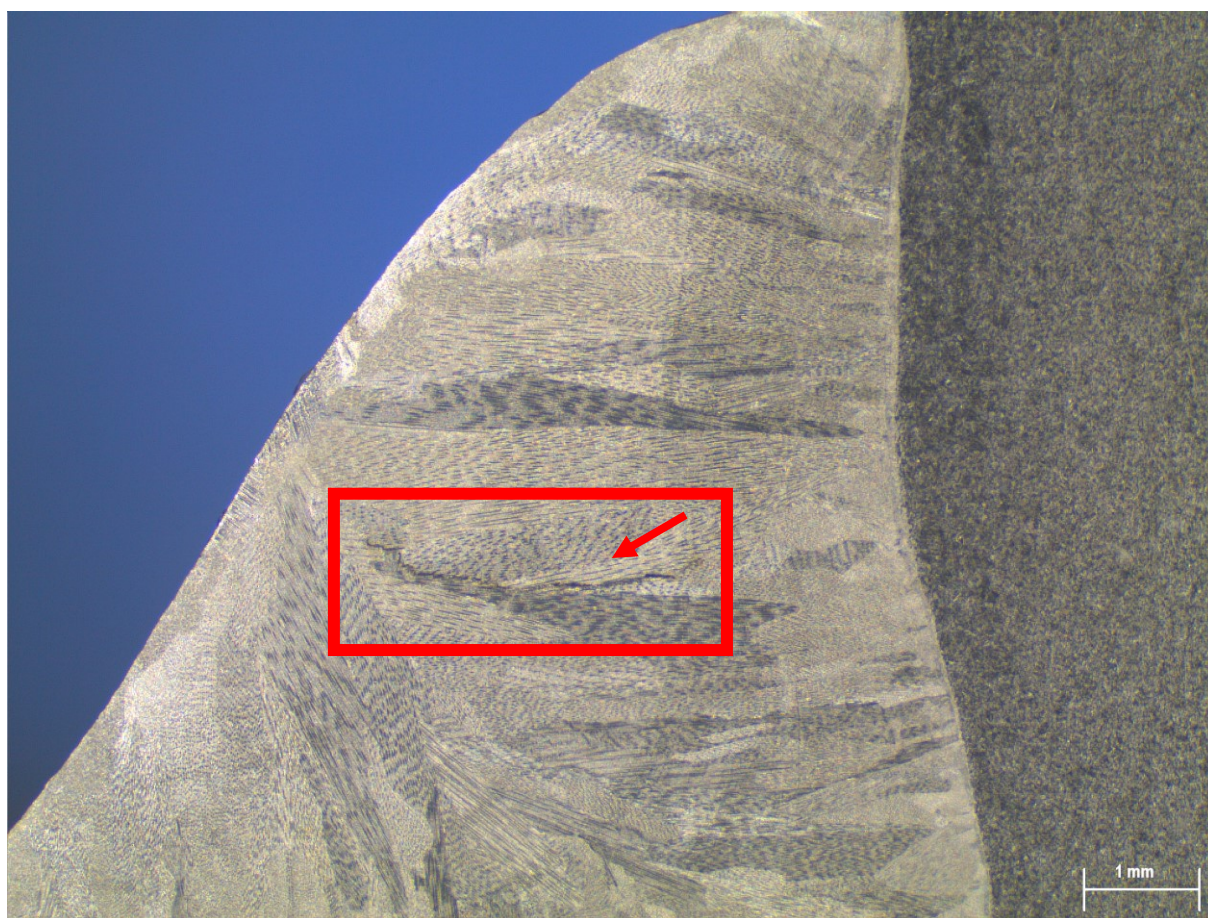


Slika 64. Mikroizbrusak uzorka 3 uz povećanje od 12,5 puta

Način ukrúčenja uzorka 3 prikaz je na slici 47., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrutu, a u tablici 18. za uzorak 3. U crvenom pravokutniku za slici 64. prikazana je topla pukotina koja je detektirana u metalu zavara, duljina tople pukotine je 1,2 mm, a širina 0,05 mm.

6.10.4. Uzorak 4

Vizualna kontrola nije dala nikakve naznake da je došlo do pojave toplih pukotina, osim u krateru gdje je duljina pukotine iznosila 20 mm, a penetrantska je to i potvrdila. Kod pregleda uzorka 4 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta bilo je vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina u metalu zavara. Na slici 65. prikazan je mikroizbrusak metala zavara uzorka 4 uz povećanje od 12,5 puta.

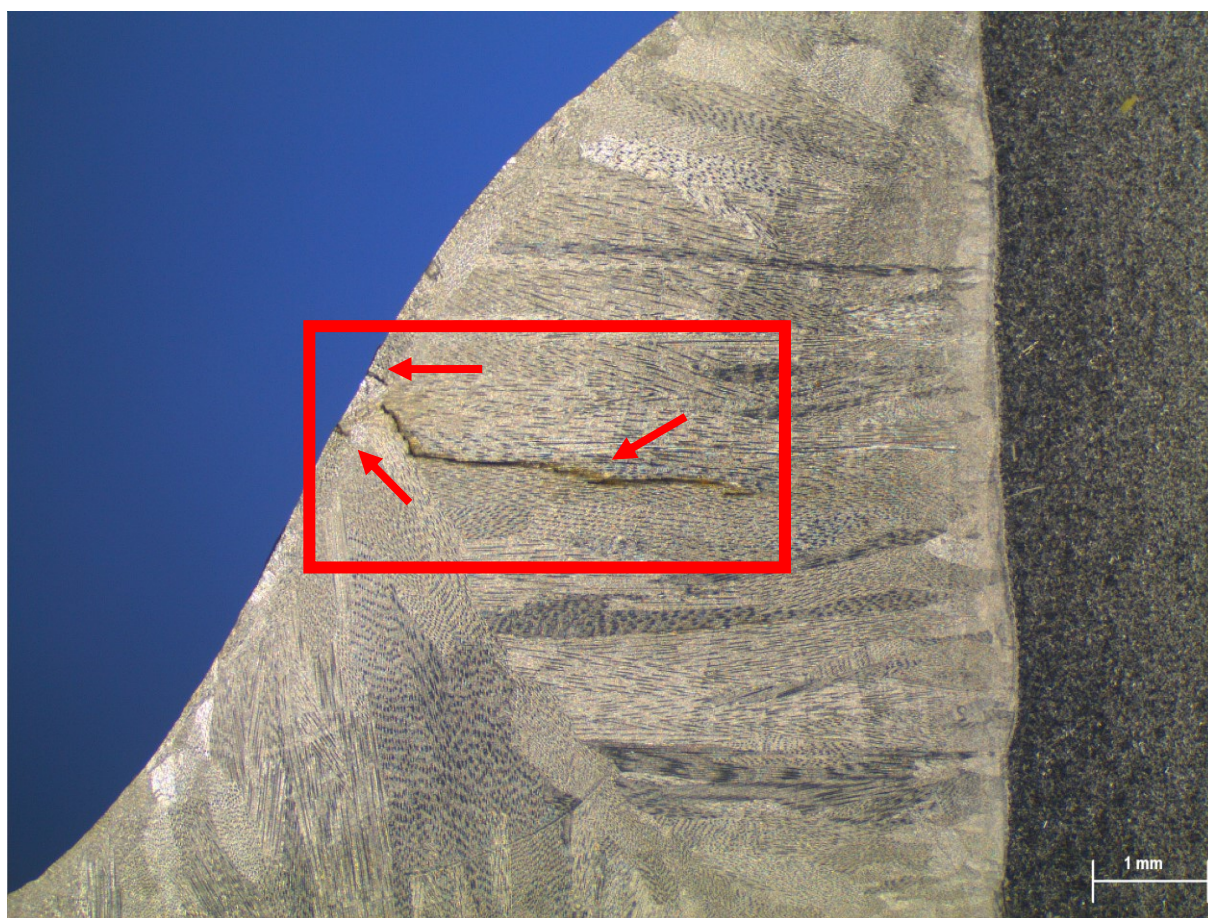


Slika 65. Mikroizbrusak uzorka 4 uz povećanje od 12,5 puta

Način ukrucenja uzorka 4 prikaz je na slici 47., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrutu, a u tablici 18. za uzorak 4. U crvenom pravokutniku za slici 65. prikazana je topla pukotina koja je detektirana u metalu zavara, duljina tople pukotine je 3 mm, a širina 0,05 mm.

6.10.5. Uzorak 5

Vizualna kontrola nije dala nikakve naznake da je došlo do pojave toplih pukotina, osim u krateru (5 mm) dok je kod penetrantske kontrole došlo do pojave indikacija duljine 10 mm po sredini zavara i kraterska je 20 mm (tablica 19.) . Kod pregleda uzorka 5 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta bilo je vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina. Na slici 66. prikazan je mikroizbrusak metala zavara uzorka 5 uz povećanje od 12,5 puta.

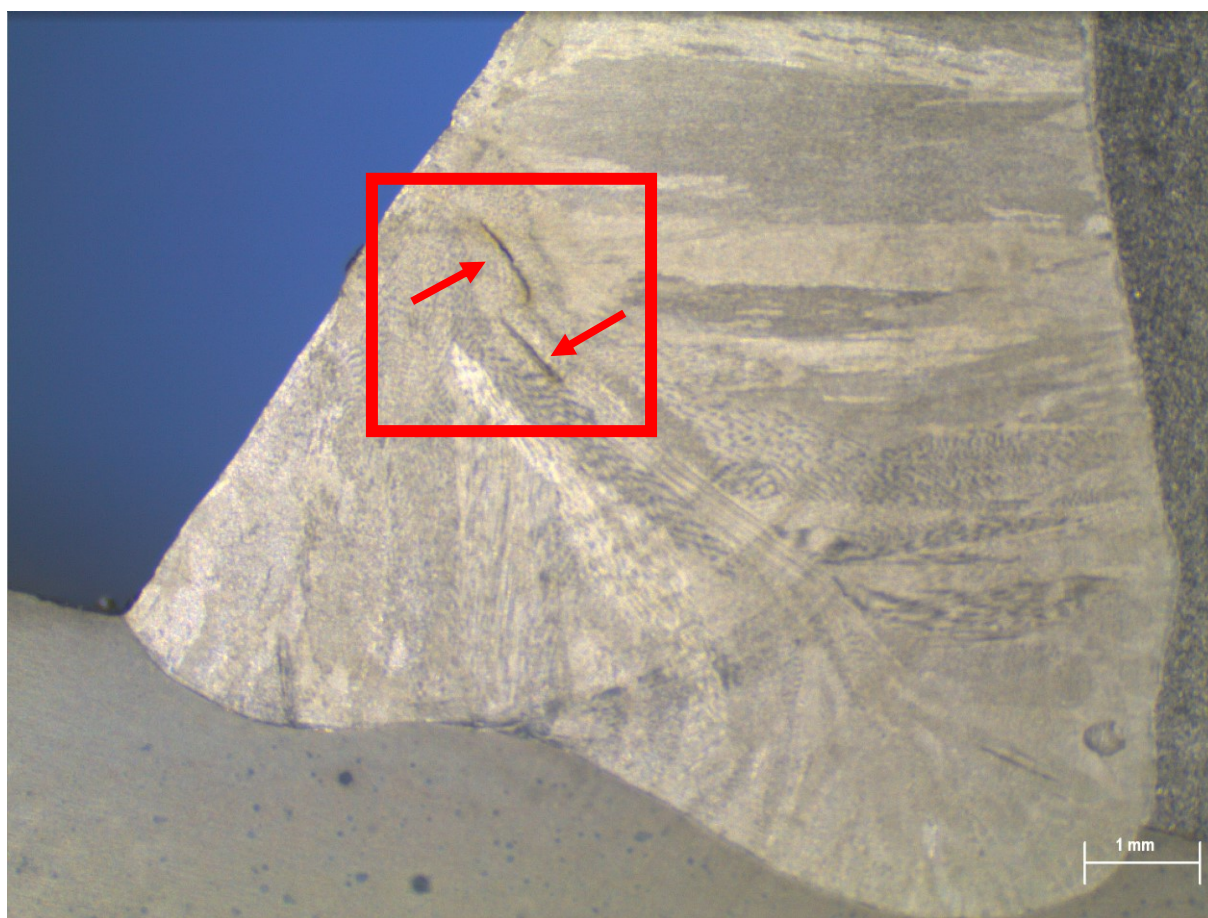


Slika 66. Mikroizbrusak uzorka 5 uz povećanje od 12,5 puta

Način ukrućenja uzorka 5 prikaz je na slici 47., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrutu, a u tablici 18. za uzorak 5. U crvenom pravokutniku za slici 66. prikazane su tri tople pukotine koje su detektirane u metalu zavara, a ukupna duljina toplih pukotina je 4 mm, a širina 0,1 mm.

6.10.6. Uzorak 6

Vizualna kontrola nije dala nikakve naznake da je došlo do pojave toplih pukotina, osim u krateru gdje je duljina pukotine iznosila 15 mm, a penetrantska je to i potvrdila. Kod pregleda uzorka 6 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta bilo je vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina u metalu zavara. Na slici 67. prikazan je mikroizbrusak metala zavara uzorka 6 uz povećanje od 12,5 puta.

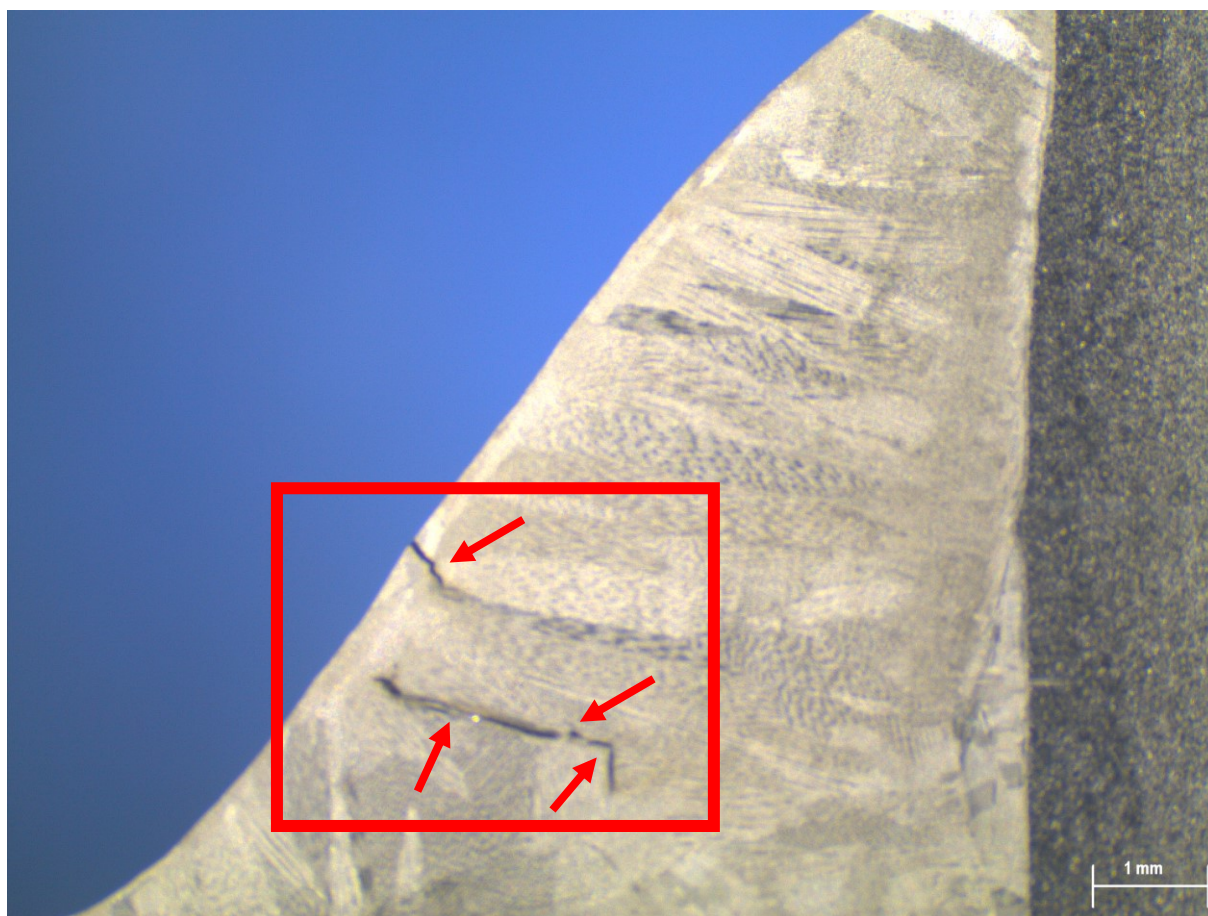


Slika 67. Mikroizbrusak uzorka 6 uz povećanje od 12,5 puta

Način ukrućenja uzorka 6 prikaz je na slici 48a., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrotu, a u tablici 18. za uzorak 6. U crvenom pravokutniku za slici 67. prikazane su dvije tople pukotine koje su detektirane u metalu zavara, a ukupna duljina toplih pukotina je 1,65 mm, a širina 0,08 mm.

6.10.7. Uzorak 7

Vizualna kontrola pokazala je velike naznake da je došlo do pojave toplih pukotina i to ukupne duljine od 70 mm po sredini metala zavara i to bez kraterskih pukotina koje su iznosile 10 mm. (tablica 19.), penetrantska kontrola je to i potvrdila gdje su se pokazale indikacije ukupne duljine od 90 mm. (tablica 19.) Kod pregleda uzorka 7 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta bilo je vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina u metalu zavara. Na slici 68. prikazan je mikroizbrusak metala zavara uzorka 7 uz povećanje od 12,5 puta.

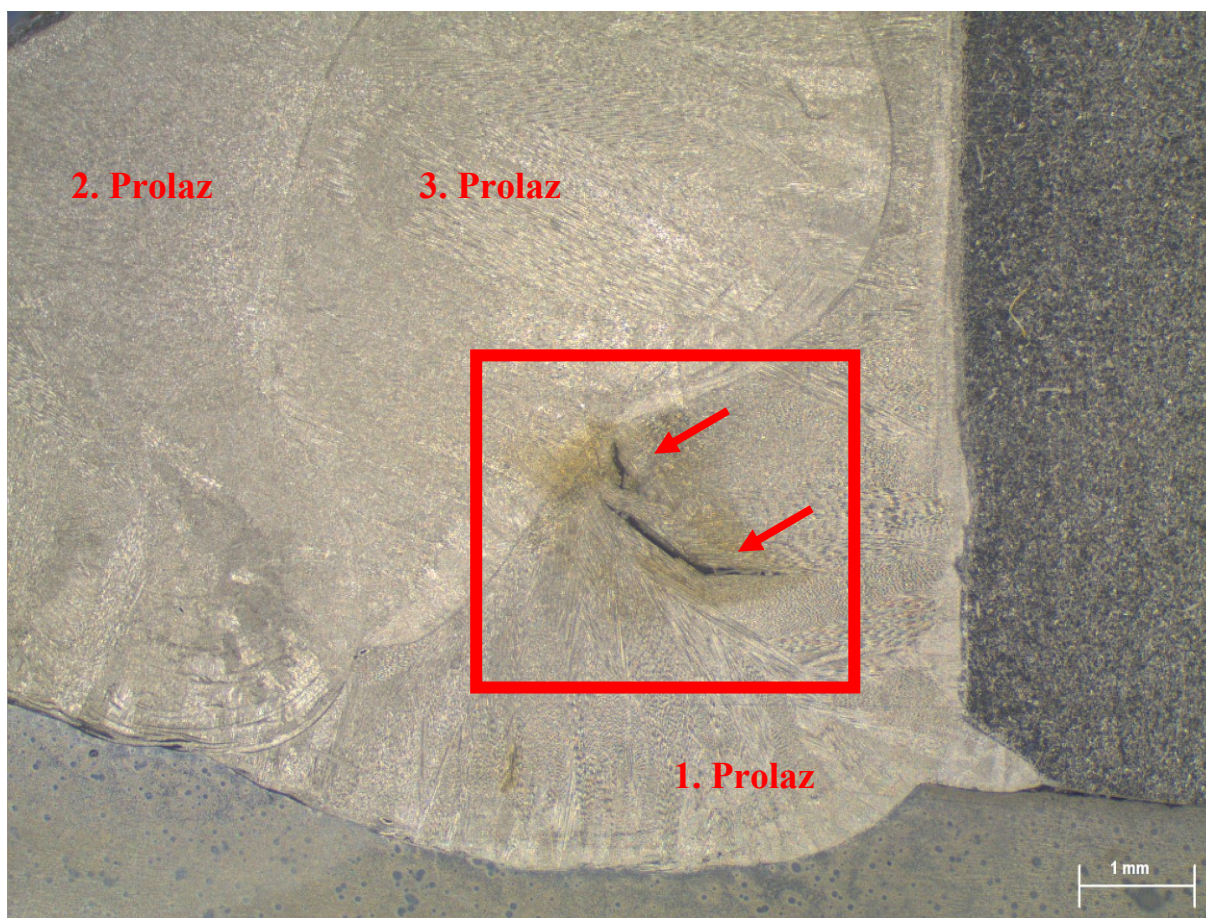


Slika 68. Mikroizbrusak uzorka 7 uz povećanje od 12,5 puta

Način ukrućenja uzorka 7 prikaz je na slici 48b., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrotu, a u tablici 18. za uzorak 7. U crvenom pravokutniku za slici 68. prikazane su četiri tople pukotine koje su detektirane u metalu zavara, a ukupna duljina toplih pukotina je 3,1 mm, a širina 0,13 mm.

6.10.8. Uzorak 8

Vizualna kontrola nije dala nikakve naznake da je došlo do pojave toplih pukotina, čak nije bila vidljiva ni kraterska pukotina, a penetrantska kontrola je pokazala indicaciju u ukupnoj duljini od 10 mm (tablica 19.). Kod pregleda uzorka 8 pod mikroskopom uz povećanje od 50 puta bilo je vidljivo da je došlo do pojave toplih pukotina u metalu zavora. Na slici 69. prikazan je mikroizbrusak metala zavora uzorka 8 uz povećanje od 12,5 puta.

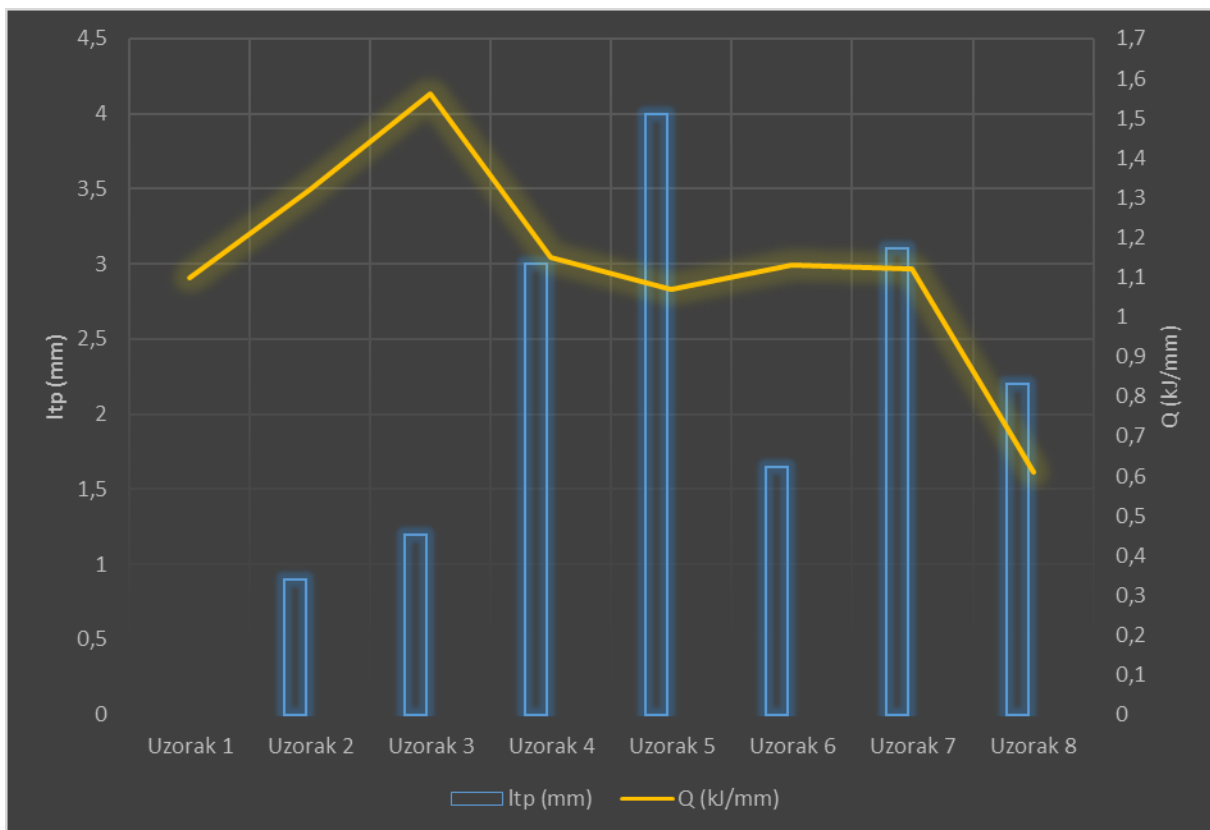


Slika 69. Makroizbrusak uzorka 8 uz povećanje od 12,5 puta

Način ukrucenja uzorka 8 prikaz je na slici 48b., a parametri zavarivanja prikazani su u tablici 17. za ukrutu, a u tablici 18. za uzorak 8. U crvenom pravokutniku za slici 69. prikazane su dvije tople pukotine koje su detektirane u metalu zavora, a ukupna duljina toplih pukotina je 2,2 mm, a širina 0,15 mm.

Na temelju napravljene analize na mikroizbruscima može se zaključiti sljedeće:

- Kod svih uzoraka izuzev uzorka 1 zabilježena je pojava toplih pukotina.
- Uzorci koji su zavarivani MAG-P postupkom imaju manje duljine toplih pukotina u odnosu na MAG-S postupak, izuzev uzorka 7.
- Makar je kod uzoraka 7 i 8 zavarivano sa manjim unosom topline svejedno je došlo do pojave toplih pukotina zbog veće krutosti spoja.



Slika 70. Utjecaj unosa topline na ukupnu duljinu toplih pukotina u metalu zavora

6.11. Procjena kritičnih parametara za nastanak toplih pukotina

U eksperimentalnom dijelu napravljeno je osam uzoraka u različitim uvjetima (tablica 18.), kod kojih je prvih pet uzoraka bilo ukrućeno prema normi EN ISO 17641-2 [32] Tip a dok su posljednja tri bila ukrućena prema Tip-u C. Unos topline kao što je vidljivo u tablici 31. kod zavarivanja svih uzoraka nije bio preveliki uzme li se u obzir debljina OM od 10 mm, kao i sam način ukrućenja koji nije bio ništa drugačiji nego bi bio i kod zavarivanja pravih konstrukcija.

Tablica 31. Kritične vrijednosti varijabli na pojavu toplih pukotina

	U 1	U 2	U 3	U 4	U 5	U 6	U 7	U 8
Postupak	MAG-P	MAG-P	MAG-S	MAG-S	MAG-S	MAG-S	MAG-P	MAG-D
Q (kJ/mm)	1,1	1,32	1,56	1,15	1,07	1,13	1,12	0,61
$\delta F_{OM 1}$ (%)	5,8	5,8	4	7,2	4,8	8	5,8	8,4
$\delta F_{OM 2}$ (%)	0,58	0,45	0,53	0,53	0,5	1,25	0,63	2,08
δF_{MZ} (%)	0	0	0	0	0	0	0	0,75
I_p (mm)	0	0,9	1,2	3	4	1,65	3,1	2,2
Stupanj miješanja za MAG postupak zavarivanja: 20 %								

Postotak δF kao što je vidljivo u tablici 31. podijeljen je na tri dijela i to na onaj na strani OM 1, OM 2 i u metalu zavara (lice i sredina) na temelju izračunate srednje vrijednosti (tablica 21.), gdje jedino dio na strani OM 1 ima udio ferita koji je u granicama preporučenog što je i za očekivati, dok je u dijelu metala zavara sa udjelom δF od 0 % došlo do pojave toplih pukotina kod svih uzoraka izuzev uzorka 1 zbog nedovoljno velikog postotka δF . Kod uzorka 5 zabilježena je najveća ukupna duljina tople pukotine kod kojeg je način ukrućenja bio Tip-A, a unos topline 1,07 kJ/mm ali se je prije početka zavarivanja površina kontaminirala sumporom što je rezultiralo pojavom tople pukotine od 4 mm.

Nakon napravljenih analiza može se zaključiti da da je kod svih uzoraka došlo do pojave toplih pukotina pri čemu unosi toplina kod nijednog postupka nisu bili preveliki, a DM MIG 309 LSi koji se je koristio nije ispunio očekivanja i dao postotak δF od 3 do 10 %, što je i jedan od glavnih uzroka nastajanja toplih pukotina u metalu zavara na ispitivanim uzorcima.

7. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada cilj je bio definirati kritične vrijednosti varijabli na pojavu toplih pukotina kod zavarivanja raznorodnih čelika. Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Kod svih uzoraka došlo je do pojave toplih pukotina, čak i kod uzorka 1 kod kojeg je penetrantska kontrola pokazala indikacije po sredini metala zavara. Parametri zavarivanja a s time i unos topline koji se je kretao od 0,6 do 1,56 kJ/mm kao i vrste ukrućenja nisu bili toliko radikalni, jer se je ipak radio o debljinama osnovnih materijala od 10 mm. Visine zavara kretale su se od 6,2 do 6,6 mm za uzorke 1, 2, 4, 5 i 7 dok je kod uzoraka 3, 5 i 8 visina zavara iznosila 7, 8 i 9 mm.
- Osnovni materijali koji su korišteni u eksperimentu su: VAČ – X5CrNi18-10 i NČ – S355J2 uz dodatni materijal MIG 309 LSi tvrtke Lincoln Electric koji bi trebao dati metal zavara sa 10 % delta ferita. Na temelju napravljene analize prije početka zavarivanja pomoću strukturnih dijagrama sa stupnjem miješanja od 20 % za MAG postupak zavarivanja očitane su vrijednosti od 7 % delta ferita u Schäffler – ovom dijagramu i od 4,67 % delta ferita u WRC – 1992 dijagramu. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je postotak delta ferita u granicama preporučenog i da u metalu zavara ne bi trebalo doći do pojave toplih pukotina jer se metal zavara nalazi u području dobre zavarljivosti.
- Metoda koja je odabrana za ispitivanje osjetljivosti na pojavu toplih pukotina je T – Joint weld cracking tests kod koje je način ukrućenja sam zavar Tip A i Tip C kod kojeg je osim zavara dodatno ukrućenje u obliku dodatnih ploča zavarenih s donje strane. Čim je ukrućenje veće to je i veća mogućnost nastanka toplih pukotina zbog zaostalih napetosti koje se javljaju u metalu zavara. Prvih pet uzoraka napravljeno je s načinom ukrućenja Tip-a A dok su posljednja tri napravljena s načinom ukrućenja Tip-a C.
- Kod svih uzoraka došlo je do pojave kraterskih pukotina (objašnjeno u poglavlju 6.5., str. 55) osim kod uzorka 8 gdje je ona vjerovatno sakrivena ispod drugog i trećeg sloja.

- Kemijskom analizom metala zavara nakon zavarivanja i ucrtavanja u Schäßfler – ov dijagram utvrđeno je da uzorak 3 ima prevelik postotak delta ferita (15 %) dok su uzorci 2, 4, 5 i 10 na granici (3 %), (tablica 20., 21. i slika 52.).
- Postotak delta ferita koji se je mjerio na uređaju Ferritegehaltmesser 1.054 pokazao je najveće udjele delta ferita kod svih uzoraka na onom dijelu gdje je došlo do najvećeg miješanja što je u ovom slučaju bio OM1 (tablica 22.).
- Najveća penetracija zabilježena je kod zavarivanja MAG-P postupkom kod uzorka 2 (2,8 mm) kod kojeg je i geometrija zavara pravilnog oblika za razliku od geometrije zavara koja je zavarivana MAG-S postupkom kod koje je došlo do nagomilavanja zavara i slabije penetracije. Kod zavarivanja raznorodnih čelika penetracija bi i trebala biti slabija, jer onda ne dolazi do prevelikog miješanja osnovnih materijala što u ovom slučaju i uz malo miješanje nije postignuto nego je došlo do pojave toplih pukotina.

Kod MAG zavarivanja raznorodnih čelika najbolji način prijenosa metala u električnom luku je zavarivanje primjenom impulsa, posebice kada je riječ o zavarivanju osnovnih materijala koji imaju različite kemijske sastave i fizikalne karakteristike. U tom načinu prijenosa metala unos topline je manji nego kod primjerice MAG-S postupka, a time su manje deformacije koje nepovoljno djeluju na zavareni spoj, zavar je pravilnijeg oblika i ne dolazi do štrcanja. Stupanj miješanja manji je nego kod MAG-S postupka zavarivanja i kreće se od 10 do 30%.

Kao što je već rečeno kod svih uzoraka koji su zavarivani različitim unosima topline došlo je do pojave toplih pukotina pri čemu je korišten DM MIG 309 LSi stoga bi bilo poželjno pokušati zavarivati i s drugim dodatnim materijalima poput 307 Si, 309 MoL, 310 ili 312 i usporediti dobivene rezultate te u kojoj je mjeri došlo do pojave toplih pukotina s obzirom na postotak δF u metalu zavara. Daljnja istraživanja također se mogu kretati prema zavarivanju sa smanjenim unosom topline i zavarivanju u više prolaza gdje se osim zaštitnog plina koji je korišten u ovom eksperimentu može upotrebljavati i neki drugi poput M13 sa 2 % O₂. Načini ukrucenja se također mogu postrožiti te umjesto korištenih Tip-a A i Tip-a C mogu se izvesti na način da se uzorci totalno ukrute pomoću steznih naprava zbog kojih će se povećati mogućnost nastajanja toplih pukotina.

8. LITERATURA

- [1] Lukačević, Z.: *Zavarivanje*, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 1998.
- [2] Gojić, M.: *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, Metalurški fakultet Sisak, 2008.
- [3] Bajs, M.: Završni rad: *Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka*, FSB Zagreb, 2013.
- [4] Bajs, M.: Projekt PI: *MIG zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika*, FSB Zagreb, 2014.
- [5] Lincoln Electric: *Gas Metal Arc Welding*,
http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWires-SuperArc-SuperArcL-50/c4200.pdf, 05.05.2015.
- [6] *MAG Welding with Solid Wire – Methods and Equipment*,
<http://www.austwelding.com.au/Technical%20pages/magwelding.pdf>, 05.05.2015.
- [7] Milić, M.: *Priručnik za zavarivače*, SFD, Doboj, 2008.
- [8] Weman, K., Linden, G.: *MIG welding guide*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2006.
- [9] KOBELCO: *Fundamentals of MAG WELDING (CO₂ Arc Welding)*,
<http://www.kobelco-welding.jp/education-center/Fundamentals/Fundamentals02.html>, 05.05.2015.
- [10] Linde: *Shielding Gases*, http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases_.pdf, 05.05.2015.
- [11] Marijan Rudan, *Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom*, 4. Seminar, Čelici otporni na koroziju, Pula, 2007.
- [12] Dzelnitzki, D.: *Advantages of heavy-duty MAG welding*, EWM, Mündersbach, 2000.
- [13] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala*, FSB, Zagreb, 2011.
- [14] Novosel, M., Krumes, D.: *Posebni čelici*, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 1998
- [15] *Austenitni nehrđajući čelici*, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf, 05.05.2015.
- [16] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I.: *Zavarivanje Cr – Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje*, DTZI, Pula 2007.
- [17] Kožuh, S., Gojić, M.: *Mikrostruktura austenitnih i duplex nehrđajućih čelika nakon zavarivanja*, *Zavarivanje* 49(2006)5, str. 177-185
- [18] Juraga, I.: *Zavarivanje visokolegiranih čelika*, str. 143-165, Zbornik radova, HDTZ, Opatija, 1993.

- [19] *Welding Technology – part II*, ISF, Aachen, 2002.
- [20] Kobelco: *Weld Imperfections and Preventive Measures*, Kobe Steel, Tokyo, 2015.
- [21] The Avesta Welding Manual, : *Practice and products for stainless steel welding*, Sweden, 2004.
- [22] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M.: *Pogreške u zavarenim spojevima*, HDTZ, Zagreb, 2007.
- [23] Mateša. B., Samardžić. I., Dunder. M.: *Uporabljivost WRC 1992 strukturnog dijagrama pri zavarivanju raznorodnih čelika*, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 2015.
- [24] Sindo, K.: *Welding metalurgy – 2nd ed*, John Wiley & Sons, Hoboken, N. Jersey, 2003.
- [25] Kožuh, S.: *Specijalni čelici – skripta*, Sisak, 2010.
- [26] Seferijan, D.: *Metalurgija zavarivanja*, Građevinska knjiga Beograd, 1969.
- [27] Kudumović, Dž.: *Zavarivanje i termička obrada*, Mašinski fakultet, Tuzla, 2001.
- [28] Živčić, M.: Deformacije: nastajanje, sprečavanje, ravnanje, *Zavarivanje* 43 (2000) 1/2, str. 33-35.
- [29] Mandjuka, A., Čorić, A.: *Skлонost visokočvrstog čelika S 960QL na pojavu toplih i lamelarnih pukotina*, Neum, 2015.
- [30] prEN ISO 17641-1:2003: *Destructive tests on welds in metallic materials — Hot cracking tests for weldments - Arc welding processes — Part 1: General*
- [31] CEN ISO/TR 17641-3:2003: *Destructive tests on welds in metallic materials — Hot cracking tests for weldments - Arc welding processes — Part 3: Externally loaded test*
- [32] prEN ISO 17641-2:2003: *Destructive tests on welds in metallic materials - Hot cracking tests for weldments — Arc welding processes — Part 2: Self-restraint tests*
- [33] Mateša, B., Samardžić, I., Dunder, M.: *Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler – ovog dijagrama*, SBZ, Slavonski Brod, 2011.
- [34] HRN EN ISO 5817:2008: *Zavarivanje -- Zavareni spojevi nastali taljenjem u čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (osim zavarivanja elektronskim snopom i laserom) -- Razine kvalitete s obzirom na nepravilnosti*
- [35] HRN EN ISO 4063:2012: *Zavarivanje i srodni postupci -- Nomenklatura postupaka i referentni brojevi*
- [36] HRN EN ISO 14175:2008: *Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke*
- [37] HRN EN 10020:2008: *Definicija i razredba vrsta čelika*
- [38] <http://www.certilas.nl/en/content/catalogue-0>, 05.05.2015.

- [39] <http://www.boehler-welding.com/>, 05.05.2015.
- [40] <http://www.refit.co.rs/>, 05.05.2015.
- [41] <http://www.steelnumber.com/>, 05.05.2015.
- [42] Olympus Innov-X Systems: *Kemijska analiza na katedri za zaštitu materijala*
- [43] <http://www.lincolnelectric.com/>, 05.05.2015.
- [44] <http://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=51147>, 05.05.2015.
- [45] <http://costcalculator.esab.com/Schaeffler/Analysis.aspx>, 05.05.2015.

9. PRILOZI

- I. Prikaz mjesta mjerenja kemijskog sastava metala zavara
- II. CD-R disc - pdf verzija diplomskog rada

Prilog I. Prikaz mjesta mjerenja kemijskog sastava metala zavara

Uzorak 1



Uzorak 2



Uzorak 3



Uzorak 4



Uzorak 5



Uzorak 6



Uzorak 7



Uzorak 8



Prilog II. CD-R disc - pdf verzija diplomskog rada