

Ispitivanje mehaničkih svojstva zavarenog spoja na tankom limu od nehrđajućeg čelika

Neuhold, Astrid

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:176211>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ
STROJARSTVA

Astrid Neuhold

**ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTVA ZAVARENOG
SPOJA NA TANKOM LIMU OD NEHRĐAJUĆEG ČELIKA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2017. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
SPECIJALISTIČKI DIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ
STROJARSTVA

Astrid Neuhold

**ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTVA ZAVARENOG
SPOJA NA TANKOM LIMU OD NEHRĐAJUĆEG ČELIKA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Nikola Šimunić, mag.ing.stroj.

Karlovac, 2017. Godina



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Trg J.J.Strossmayera 9
HR-47000, Karlovac, Croatia
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni / **specijalistički studij**: Strojarsva
(označiti)

Usmjerenje: Proizvodno strojarstvo

Karlovac, 31.05.2017.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Astrid Neuhold**

Matični broj: 0111415038

Naslov: **ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA NA TANKOM LIMU OD NEHRĐAJUĆEG ČELIKA**

Opis zadatka:

Tema završnog zadatka je zavarljivost nehrđajućih čelika. U uvodnom dijelu potrebno je napraviti analizu zavarljivosti nehrđajućih čelika, te detaljnije obraditi TIG postupak zavarivanja sa svim komponentama uređaja. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je zavariti tanki nehrđajući čelik X20Cr13, debljine 0,8 mm koristeći automatizirani TIG postupak zavarivanja bez dodavanja dodatnog materijala u zaštitnoj atmosferi inetrnog plina Argona. Potrebno je provesti kvalitativnu i kvantitativnu analizu dobivenih vrijednosti mehaničkih svojstava ispitanih statično vlačnim pokusom. Na temelju provedene analize potrebno je donijeti konaču ocjenu zavarljivosti čelika X20Cr13 u navedenim uvjetima eksperimenta.

Zadatak izraditi i opremiti sukladno Pravilniku o završnom radu VUK-a.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:
obrane:

Predviđeni datum

31.05.2017.

31.08.2017.

08.09.2017.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Nikola Šimunić Mag.ing.st., pred.

Marijan Brozović, dipl.ing., v.p

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradila samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Zahvaljujem se mentoru mag. ing. stroj. Nikoli Šimuniću i profesorici dr. sc. Tanji Tomić na ukazanoj pomoći tijekom izrade završnog rada.

ISPITIVANJE MEHANIČKIH SVOJSTVA ZAVARENOG SPOJA NA TANKOM LIMU OD NEHRĐAJUĆEG ČELIKA

SAŽETAK

Ovaj rad sastoji se od teoretskog i eksperimentalnog dijela.

U teoretskom dijelu rada opisani su nehrđajući čelici i njihova zavarljivost, TIG postupak zavarivanja i statički vlačni pokus.

U eksperimentalnom dijelu rada donesena je ocjena zavarljivosti čelika X20Cr13 analizom vrijednosti dobivenih statičkim vlačnim pokusom na uzorcima zavarenim automatskim TIG zavarivanjem.

TESTING MECHANICAL PROPERTIES OF A WELDED JOINT ON A THIN STAINLESS STEEL SHEET

SUMMARY

This paper consists of theoretical and experimental part.

In theoretical part of the paper, stainless steels and their weldability, as well as the TIG welding process and static tensile test are described.

In experimental part of the paper, an evaluation of weldability for steel X20Cr13 has been given by analyzing data obtained through static tensile test carried out on the samples that are welded together using an automatic TIG welding process.

Sadržaj

1.	UVOD	1
2.	NEHRĐAJUĆI ČELICI.....	2
2.1.	Općenito o martenzitnim nehrđajućim čelicima.....	4
2.2.	Općenito o feritnim nehrđajućim čelicima	5
2.3.	Općenito o austenitnim nehrđajućim čelicima.....	6
2.4.	Općenito o dupleks nehrđajućim čelicima.....	7
2.5.	Zavarivanje nehrđajućih čelika.....	8
2.5.1.	Utjecaj afiniteta kroma prema kisiku i ugljiku.....	8
2.5.2.	Odabir dodatnog materijala, Schaefflerov dijagram	8
2.5.3.	Zavarivanje martenzitnih čelika	11
2.5.4.	Zavarivanje feritnih čelika.....	12
2.5.5.	Zavarivanje austenitnih čelika	14
2.5.6.	Zavarivanje dupleks čelika	16
3.	TIG ZAVARIVANJE	17
3.1.	Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja	18
3.2.	Parametri zavarivanja	18
3.3.	Uređaj za zavarivanje TIG postupkom.....	20
3.3.1.	Izvor struje za zavarivanje.....	21
3.3.2.	Komandni ormarić (Upravljački uređaj)	22
3.3.3.	Rashladni sustav.....	22
3.3.4.	Boca sa zaštitnim plinom.....	23
3.3.5.	Pištalj za zavarivanje.....	25
3.3.6.	Elektrode.....	27
3.4.	Princip rada TIG zavarivanja prema stupnju automatizacije	29

3.4.1.	Ručno TIG zavarivanje.....	29
3.4.2.	Poluautomatizirano TIG zavarivanje	31
3.4.3.	Automatizirano TIG zavarivanje	31
4.	STATIČKI VLAČNI POKUS.....	32
4.1.	Ispitni uzorci.....	32
4.1.1.	Standardni ispitni uzorci	32
4.1.2.	Tehnički ispitni uzorci	34
4.2.	Tijek ispitivanja	35
4.2.1.	Dijagram naprezanje - istežanje.....	37
4.2.2.	Granica razvlačenja (tečenja).....	39
4.2.3.	Vlačna čvrstoća.....	40
4.2.4.	Konvencionalna granica razvlačenja	41
4.2.5.	Istezljivost.....	42
4.2.6.	Kontrakcija	42
4.2.7.	Statički vlačni pokus na povišenim temperaturama.....	43
4.2.8.	Statički vlačni pokus pri sniženim temperaturama.....	44
4.2.9.	Utjecaj utora	45
5.	EKSPERIMENTALNI DIO	46
5.1.	Zavarivanje epruveta zadanim parametrima.....	46
5.2.	Statički vlačni pokus zavarenih uzoraka	48
5.2.1.	Opis kidalice Shimadzu AG X-plus.....	48
5.2.2.	Rezultati ispitivanja	49
5.2.3.	Analiza rezultata ispitivanja	50
6.	ZAKLJUČAK.....	51
7.	Literatura	52

Popis oznaka i kratica

TIG	engl. Tungsten Inert Gas
Cr	krom
C	ugljik
Mo	molibden
Ni	nikal
Ti	titan
Nb	niobij
Ta	tantal
N	dušik
W	volfram
Cu	bakar
PVC	poli(vinil-klorid)
MIG	engl. Metal Inert Gas
Al	aluminij
V	vanadij
Si	silicij
P	fosfor
S	sumpor
σ	sigma
δ	delta
Mg	magnezij
Ar	argon
He	helij
Mn	mangan

Popis slika

Slika 1.	Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [5].....	2
Slika 2.	Helixov most u Singapuru izrađen od nehrđajućeg čelika [6].....	3
Slika 3.	Schaefflerov dijagram sa ucrtanim područjima u kojima dolazi do neželjenih transformacija [2] ..	9
Slika 4.	Grafičko određivanje položaja metala šava na Schaefflerovom dijagramu pri zavarivanju austenitnog i feritnog materijala, austenitno-feritnim dodatnim materijalom [2]	10
Slika 6.	Mikrostruktura austenitnog čelika koji sadrži delta ferit [7]	14
Slika 5.	Interkristalna korozija zavara [15]	15
Slika 7.	Shematski prikaz TIG zavarivanja [20].....	17
Slika 8.	Utjecaj oblika spoja na učinak zaštite plina [19].....	20
Slika 9.	Oblik električnog luka i izgled zavara prilikom zavarivanja zaštitnim plinom helijem, odnosno argonom [25]	23
Slika 10.	Shema TIG pištolja za zavarivanje [26].....	25
Slika 11.	Volfram elektrode za zavarivanje [31]	28
Slika 12.	Lijeva slika: ručno TIG zavarivanje; desna slika: položaj pištolja i žice kod ručnog TIG zavarivanja [32, 19]	29
Slika 13.	Tehnika rada u dodavanju žice u talinu kod ručnog TIG zavarivanja: a) kod kretanja pištolja naprijed izmaknuti žicu, b) povući pištolj malo unazat, a žicu dodati u rub taline itd.(proces se ponavlja) [19]	30
Slika 14.	Uređaj za TIG zavarivanje cijevi [33]	31
Slika 15.	Prikaz djelovanja sile kod statičkog vlačnog pokusa [36]	32
Slika 16.	Dijelovi ispitnog uzorka za statički vlačni pokus [35]	33
Slika 17.	Hookeov dijagram [34]	35
Slika 18.	Karakteristične točke na dijagramu sila (F) – produljenje (Δl) [34]	36
Slika 19.	Konvencionalni dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ε) [35].....	37
Slika 20.	Dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ε) za različite materijale[35]	38
Slika 21.	Dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ε) za različite materijale [35]	39
Slika 22.	Granica razvlačenja [34].....	40
Slika 23.	Konvencionalna granica razvlačenja za plastične deformacije 0,01 i 0,2% [34]	41
Slika 24.	Istezljivost epruvete [35].....	42
Slika 25.	Utjecaj povišene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa[38]	43
Slika 26.	Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa[38]	44
Slika 27.	Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja; a-legirani čelik, b-ugljični čelik, c-čisti nikal [34]	44
Slika 28.	Raspodjela naprezanja u ispitnom uzorku s utorom [34]	45

Slika 29.	Utjecaj utora na dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ε) [34].....	45
Slika 30.	Mikrostruktura čelika X20Cr13 [39].....	47
Slika 31.	Kidalice Shimadzu AG-Xplus [40].....	48

Popis tablica

Tablica 1.	Određivanje promjera torirane elektrode prema debljini materijala [19].....	19
Tablica 2.	Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [23].....	21
Tablica 3.	Karakteristike zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova[22].....	24
Tablica 4.	Prikaz nekih izvedbi pištolja za TIG zavarivanje.....	26
Tablica 5.	Označavanje volframovih elektroda [23].....	27
Tablica 6.	Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [22].....	30
Tablica 7.	Tipovi ispitnih uzoraka [34].....	34
Tablica 8.	Kemijski sastav osnovnog materijala.....	46
Tablica 9.	Mehanička svojstva osnovnog materijala	47
Tablica 10.	Rezultati ispitivanja statičkim vlačnim pokusom zavarenih epruveta.....	49

1. UVOD

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogen zavareni spoj (zavareni spoj bez grešaka sa zahtijevanim mehaničkim i ostalim svojstvima).^[1] Zavarljivost je suštinska osobina čelika u funkciji kemijskog sastava i metalurških osobina, a također ovisi i o debljini materijala.^[2]

Nehrđajući čelici mogu se zavarivati svim postupcima taljenja i pritiskom, a među najšire primijenjene postupke zavarivanja spada TIG postupak koji je obrađen u ovom radu. Smatra ih se materijalima sa dobrom zavarljivošću. Pritom je potrebno poznavati problematiku koja je vezana uz zavarivanje ovih čelika da bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta zavarenog spoja.^[2]

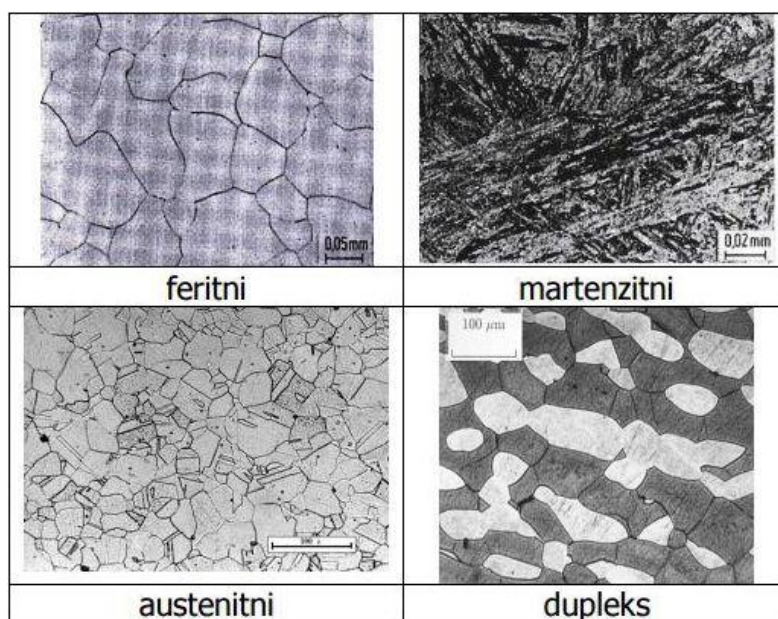
Teoretski dio ovog rada obuhvaća opis nehrđajućih čelika, sa naglaskom na njihovo zavarivanje, postupak TIG zavarivanja sa naglaskom na zavarivanju nehrđajućih čelika i statički vlačni pokus. U eksperimentalnom dijelu rada na temelju parametara izmjerenih statičkim vlačnim pokusom donesene su ocjene zavara na uzorcima od martenzitnog nehrđajućeg čelika X20Cr13 zavarenog automatskim TIG zavarivanjem.

2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

Nehrđajući čelici su visokolegirani čelici koji svoju otpornost prema korozivnim medijima i oksidaciji postižu pomoću kroma kao osnovnog legirnog elementa. Ta otpornost bazira se na afinitetu kroma prema kisiku.^[2,3] Kod najmanje 12% kroma stvara se oksidni sloj (kromovih oksida) na površini čelika koji djeluje pasivizirajuće na površinu i sprečava daljnje korozijsko djelovanje. Sadržaj kroma preko 12% daje dobru otpornost prema oksidirajućim kiselinama (dušičnoj i njoj sličnim kiselinama), ali ne i prema reducirajućim kiselinama, npr. solnoj i sumpornoj kiselini, jer one djeluju reducirajuće na kromov oksid. Stoga je potrebno da bi se povećala otpornost prema nagrizanju reducirajućih kiselina dodatno legirati nehrđajući čelik elementima niklom, molibdenom i dr.^[3] Krom doprinosi i vatrootpornosti čelika, npr. neke legure s visokim udjelom kroma (25 do 30 %) mogu se primijeniti na temperaturi višoj od 1000 °C.^[3, 4]

Osim visokog udjela kroma, uvjet korozijske postojanosti je i monofazna mikrostruktura čelika, gdje su iznimka dupleks nehrđajući čelici koji imaju dvofaznu strukturu.^[4]

Prema strukturi nehrđajući čelici dijele se na: feritne, austenitne, martenzitne i dupleks (austenitno-feritne) nehrđajuće čelike.^[4] (Slika 1.)



Slika 1. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika [5]

Intenzivan razvoj nehrđajućih čelika počeo je početkom 20. st. u Francuskoj i Njemačkoj. Između 1904. i 1909. razvijen je 13% Cr martenzitni i 17% Cr feritni nehrđajući čelik. Objavljena je prva studija o krom-niklovim čelicima koji su preteče današnjih austenitnih čelika. Prvi komercijalni ingot od nehrđajućeg čelika izliven je 1913. godine u Sheffieldu, u Engleskoj. ^[4] Od tada pa do danas, razvilo se mnogo različitih vrsta nehrđajućih čelika sa širokim rasponom mehaničkih, korozivskih i drugih svojstava, što im omogućuje široko područje primjene, a neka od njih su: ^[4, 6]

- kemijska industrija
- petrokemijska industrija
- industrija papira
- postrojenja za preradu mlijeka i mliječnih proizvoda
- farmaceutska industrija
- postrojenja za preradu hrane
- različiti komercijalni proizvodi poput kućanskih uređaja, dijelova automobila i slično
- arhitektura i građevinarstvo itd.



Slika 2. Helixov most u Singapuru izrađen od nehrđajućeg čelika [6]

2.1. Općenito o martenzitnim nehrđajućim čelicima

Martenzitni nehrđajući čelici sadrže 0,2-1,0% C, 13-18% Cr, a od drugih legirnih elemenata mogu sadržavati Mo, Ni itd. ^[7] Zbog nižeg sadržaja kroma i drugih legirnih elemenata jeftiniji su od ostalih nehrđajućih čelika. ^[8]

Mogu se podijeliti u dvije podskupine: ^[7]

- 1) konstrukcijske čelike (sadrže do $\approx 0,25\%$ C, posebna pažnja se usmjerava prema korozivnoj postojanosti) i
- 2) alatne čelike (sadrže $>0,3\%$ C, postavlja se dodatni zahtjev prema otpornosti na abrazivno trošenje te radi toga imaju dvofaznu mikrostrukturu koja se sastoji od martenzita i karbida čija je korozivna postojanost niža od jednofazne martenzitne mikrostrukture).

Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika su: ^[8, 5]

- visoka tvrdoća i dobra otpornost na abrazivno trošenje
- feromagnetičnost
- dobra korozivna postojanost, ali slabija u usporedbi s drugim nehrđajućim čelicima (uzrok je niži % Cr i viši % C nego kod drugih čelika)
- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti (posebno u sulfidnim okolišima)
- primjena do temperatura $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog pada mehaničkih svojstava i korozivne postojanosti
- loša otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura
- najlošija zavarljivost od svih nehrđajućih čelika (pri hlađenju nakon zavarivanja u mikrostrukturi ostaje nepopušteni martenzit)
- široki raspon vrijednosti za čvrstoću i granicu razvlačenja, granica razvlačenja može biti od 275 N/mm^2 u žarenom stanju, do 1900 N/mm^2 u gašenom i popuštenom stanju (za visokouglične vrste).

Primjenjuju se u uvjetima kad se od materijala traži visoka čvrstoća i tvrdoća uz blaže zahtjeve glede korozivne postojanosti, kao npr. za lopatice parnih, plinskih i mlaznih turbina na relativno niskim radnim temperaturama, za parne cjevovode, vodne turbine, brane u kanalima sa slatkom vodom, cijevi i ventile u rafinerijama nafte, za izradu kotrljajućih elemenata kugličnih ležajeva, oštrica noževa itd. ^[8, 5]

2.2. Općenito o feritnim nehrđajućim čelicima

Feritni nehrđajući čelici sadrže 13-17% Cr i manje od 0,1% C, a mogu biti legirani i sa Mo, Ni, Ti, Nb itd. Imaju feritnu mikrostrukturu bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja zrna. Usitnjenje zrna je u nekim slučajevima moguće pomoću hladne deformacije te rekristalizacijskim žarenjem. ^[7]

Svojstva feritnih nehrđajućih čelika su: ^[9, 7, 4]

- dobra otpornost na napetosnu, rupičastu i koroziju u procijepu (osobito u medijima koji sadrže kloride), imaju bolju korozijsku otpornost od austenitnih i martenzitnih čelika
- relativna mekoća
- dobra obradivost odvajanjem čestica (bolja od austenitnih)
- feromagnetičnost
- teže se zavaruju, osobito vrste sa srednjim i visokim sadržajem kroma
- primjena do temperature 400°C zbog nastanka krhkih faza
- slaba deformabilnost
- sklonost lomu pri niskim temperaturama.

Primjenjuju se na mjestima gdje je otpornost na koroziju važnija od mehaničkih svojstava (čvrstoće, žilavosti i istežljivosti), kao npr. za izradu dijelova uređaja u mljekarama i pivovarama, pribora za jelo (osim oštrice noža), dijelove kućanskih aparata, auto-dijelova, okvira prozora, prevlaka hladnjaka, kvaka, okvira retrovizora, u proizvodnji boja i sapuna, za dijelove opreme u proizvodnji octa i prerade voća, u petrokemijskoj industriji, za obradu odvajanjem čestica na automatima (vijke, matice, zakovice, male zupčanike, male osovine) itd. ^[9, 4]

2.3. Općenito o austenitnim nehrđajućim čelicima

Austenitni nehrđajući čelici uglavnom sadrže 0,02-0,15% C, 15-20% Cr, 7-20% Ni uz mogućnost dodavanja određene količine Mo, Ti, Nb, Ta, N i dr. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika je monofazno austenitna ili austenitno-feritna s malim udjelom delta ferita. Iako delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj preradi (valjanje, kovanje), nužan je radi otežavanja pojave toplih pukotina. ^[7]

Svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su: ^[10, 7]

- korozijska postojanost u puno različitih medija
- u određenim uvjetima prerade i primjene mogu postati osjetljivi na interkristalnu, rupičastu, napetosnu, koroziju u procijepu i dr.
- dobra zavarljivost
- dobra duktilnost, žilavost i istežljivost
- nemagnetičnost
- dobra svojstva pri vrlo niskim temperaturama
- primjena do temperature 760 °C zbog smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju
- visoka deformabilnost
- visok odnos čvrstoća/masa
- mogućnost prelaska u martenzitno stanje "dubokim" hlađenjem ili hladnom deformacijom.

Austenitni čelici su skuplji od martenzitnih i feritnih čelika (s nižim i srednjim % Cr) zbog visokog udjela legirnih elemenata. Usprkos tome, zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre obradivosti, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava te estetskih karakteristika su najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije. Neka od područja primjene su uređaji u mljekarama i pivovarama, uređaji u industriji celuloze, boja, tekstila, tlačne posude povišene postojanosti na koroziju itd. Zbog osjetljivosti na napetosnu koroziju ne preporuča se 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. ^[10, 5, 7]

2.4. Općenito o dupleks nehrđajućim čelicima

Dupleks nehrđajući čelici sadrže 22-24% Cr i 6-8% Ni, a važni legirni elementi su također N, Mo, W i Cu. Mikrostruktura im se sastoji od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima (40-60% ferita). Feritna faza doprinosi njihovoj povišenoj vlačnoj čvrstoći i otpornosti na napetosnu koroziju a austenitna faza osigurava duktilnost i visoku korozijsku postojanost. [7, 11, 12]

Svojstva dupleks čelika su: [11]

- visoka čvrstoća
- dobra istezljivost, žilavost i duktilnost
- viša tvrdoća a time i otpornost na abrazijsko trošenje
- visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju (bolji izbor od austenitnih čelika)
- temperaturno područje primjene od -40°C do 315°C
- puno viša granica razvlačenja (oko 425 N/mm^2) u odnosu na austenitne čelike (oko 210 N/mm^2)
- viša toplinska vodljivost i niža toplinska rastezljivost od austenitnih čelika
- feromagnetičnost.

Dupleks čelici primjenjuju se još od 1930. godine ali zbog problema sa zavarivanjem, korozijskom postojanošću i krhkošću nisu bili u široj primjeni do 80-ih godina prošlog stoljeća. Nakon rješavanja tih problema (uglavnom dodavanjem dušika), počeo je nagli razvoj i primjena dupleks čelika. Danas se dupleks čelici primjenjuju na mnogim mjestima zbog svojih superiornih korozijskih i vrlo dobrih mehaničkih svojstva, kao npr. u industriji nafte i plina (cjevovodi, pumpe, destilatori), u brodogradnji (osovine propelera, kormila), transportu (cisterne), petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, izmjenjivači topline), kemijsko-procesnoj industriji (u proizvodnji kiselina, sapnica), industriji papira (ventili, osovine mješača). [11, 7]

2.5. Zavarivanje nehrđajućih čelika

2.5.1. Utjecaj afiniteta kroma prema kisiku i ugljiku

Kod nehrđajućih čelika, koji sadrže visok postotak kroma, probleme prilikom zavarivanja može prouzročiti jak afinitet kroma prema.^[3]

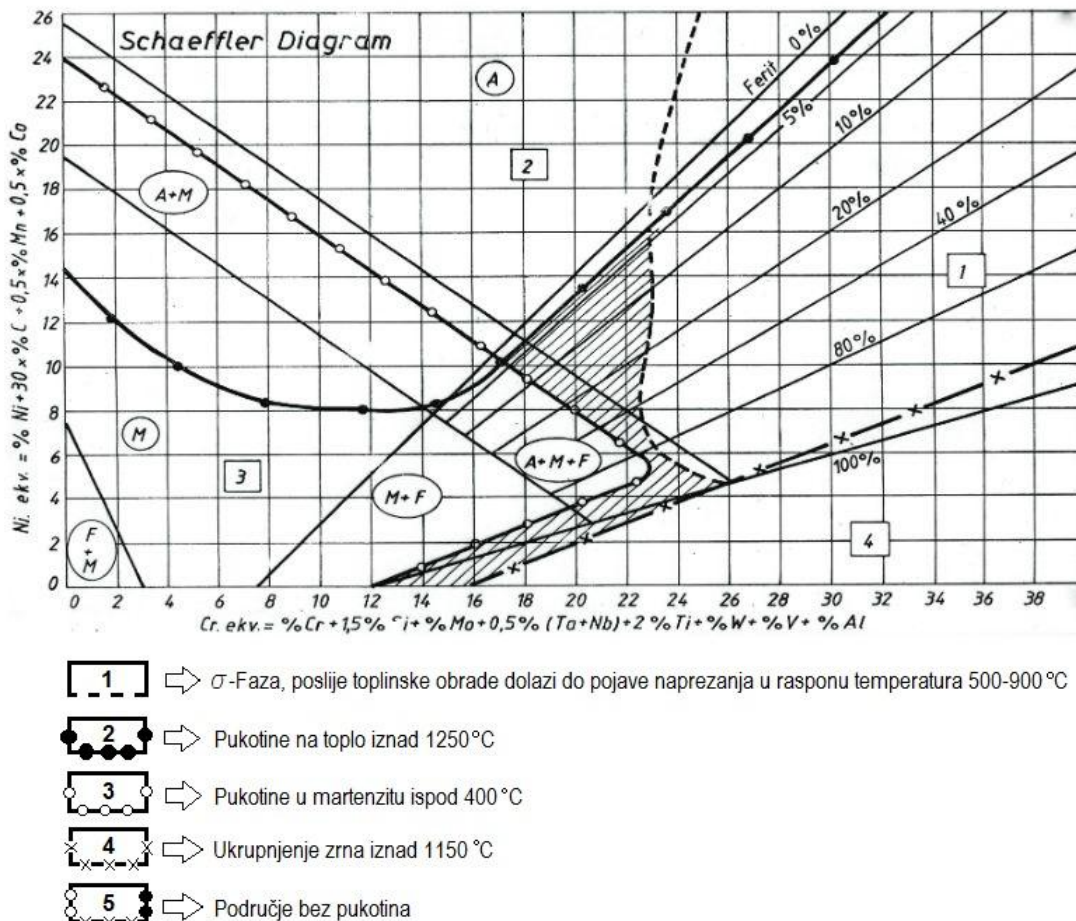
- a) KISIKU – uzrokuje stvaranje debelih oksidnih slojeva (kromovih oksida) sa visokom točkom taljenja na kupki zavara prilikom zavarivanja što je uzrok smanjenja njegove kvalitete. Zbog toga je potrebno odabrati metodu i tehniku zavarivanja tako da je kupka zavara (kod elektrolučnog zavarivanja, također i električni luk) dobro zaštićena od zraka.
- b) UGLJIKU – ukoliko ugljik dođe u rastopljeni metal ili se nađe u atmosferi luka uzrokuje stvaranje nepoželjnih karbida prilikom zavarivanja. Kod najvećeg broja nehrđajućih čelika, poželjno je da je sadržaj ugljika što niži. Potrebno je kod svih postupaka zavarivanja odstraniti ulje, mast i slične supstance s površine žlijeba, jer i one mogu uzrokovati karbonizaciju. Na pojavu nepoželjnih kromovih karbida može se utjecati stabilizacijom čelika, koja predstavlja dodavanje elemenata u čelik (npr. Ti i Nb) koji imaju veći afinitet prema ugljiku od kroma i tvore karbide koji ne predstavljaju problem pri zavarivanju.

2.5.2. Odabir dodatnog materijala, Schaefflerov dijagram

Schaefflerov fazni dijagram ima praktičnu primjenu pri odabiru dodatnih materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika.^[2]

Na njegovoj apscisi prikazani su feritizatori, a na ordinati austenitizatori. Feritizatori su legirajući elementi koji proširuju područje ferita (α -faze), a austenitizatori legirajući elementi koji proširuju austenitno područje (γ -fazu). Utjecaj α -genih elemenata izražen je ekvivalentom kroma, a γ -genih elemenata ekvivalentom nikla. Ekvivalenti kroma i nikla se izračunavaju pomoću jednadžbi, a postotni sadržaj pojedinih elemenata razlikuje se u literaturi. Te jednadžbe služe i za određivanje točaka osnovnih materijala u dijagramu. Kod osnovnog materijala na veličinu ekvivalenta Cr i Ni, pored kemijskog sastava imaju utjecaja i režim toplinske obrade i način proizvodnje, tako da postoji razlika u postocima pojedinih

elemenata u formulama. Slika br. 3 prikazuje Schaefflerov dijagram sa ucrtanim graničnim linijama koje obilježavaju područja označena brojevima od 1-4. Na slici 3. su također dana i objašnjenja o područjima. [2]



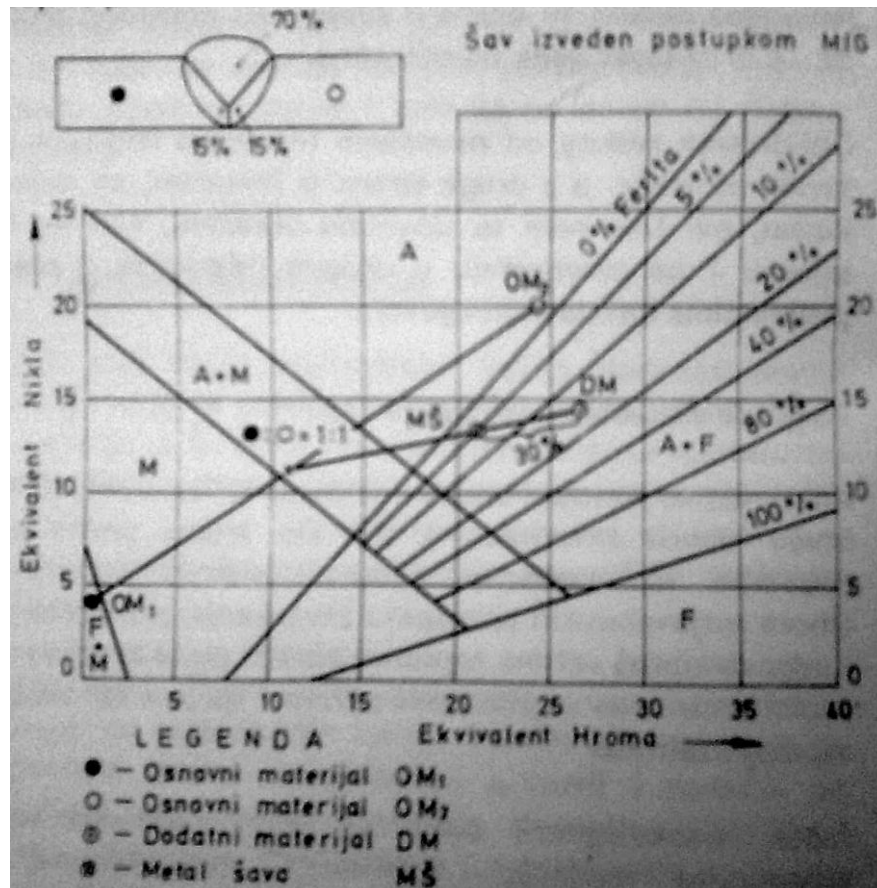
Slika 3. Schaefflerov dijagram sa ucrtanim područjima u kojima dolazi do neželjenih transformacija [2]

Područja 2 i 3 se preklapaju na dijagramu, tako da se na tom dijelu mogu pojaviti problemi navedeni pod oba područja. [2]

Šrafirano područje je bez pukotina stoga ukoliko nisu zadani neki posebni uvjeti dodatni materijal treba birati tako da poslije zavarivanja, odnosno miješanja osnovnog i dodatnog materijala, metal zavara bude u šrafiranom području. Iz tog razloga dodatni materijali se proizvode tako da im se točke u Schaefflerovom dijagramu nalaze u šrafiranom području oko linije s 10% ferita. Na taj način se znatno smanjuje mogućnost pojave pukotina, a s druge strane je korozivna otpornost zadovoljavajuća. Postoje i dodatni materijali sa preko 50% ferita koji se koriste pri zavarivanju čistih austenitnih materijala sklonih nastanku pukotina. [2]

Položaj točke strukture zavara u Schaefflerovom dijagramu zavisi također i o postupku zavarivanja tj. postotku miješanja osnovnog i dodatnog materijala (kod TIG i MIG zavarivanja je oko 20-40%). [2]

Primjer grafičkog određivanja položaja metala šava na Schaefflerovom dijagramu dan je na slici 4.



Slika 4. Grafičko određivanje položaja metala šava na Schaefflerovom dijagramu pri zavarivanju austenitnog i feritnog materijala, austenitno-feritnim dodatnim materijalom [2]

Schaefflerov dijagram ne uzima u obzir parametre zavarivanja: jačinu struje, dužinu ili napon električnog luka, brzinu zavarivanja i dr., a navedeni parametri bitno utječu na strukturu metala zavara (najviše dužina ili napon električnog luka). Promjene uzrokovane tim parametrima utječu na pomicanje točke metala šava u Schaefflerovom dijagramu, što znači da on nije u potpunosti precizan za određivanje konačne strukture. Iz tog razloga razvijene su različite metode mjerenja, a postoje i analitičke metode koje su nešto preciznije. [2]

2.5.3. Zavarivanje martenzitnih čelika

Zavarljivost martenzitnih čelika je najlošija od svih nehrđajućih čelika, jer je veoma teško izbjeći zakaljivanje prelazne zone. Zbog vrlo male kritične brzine hlađenja, martenzit se stvara i na debelim presjecima, čak i ako se hlađenje odvija na zraku. Ugljik utječe na tvrdoću martenzita. Kod čelika s niskim sadržajem ugljika, martenzit je relativno rastezljiv i ima relativno nisku tvrdoću, tako da takvi čelici nisu skloni stvaranju napuklinama kao oni s višim sadržajem ugljika. Za izradu zavarenih konstrukcija rabe se čelici s manje od 0,15% C. Pri zavarivanju se moraju primijeniti posebne mjere opreza osobito za čelike s više od 0,1 % C. [8,3,5]

Glavni problem kod zavarivanja martenzitnih kromovih čelika je: ^[13, 3]

- STVARANJE PUKOTINA U ŠAVU (posebno u zoni utjecaja topline), a na ovu pojavu se može utjecati:
 - 1) Legiranjem sa malom količinom Ti – sprečava pojavu hladnih pukotina u tom području tako što omogućuje dobivanje sitnozrnate strukture.
 - 2) Predgrijavanjem – smanjuje napetosti, a time i stvaranje hladnih napuklina; odvija se na temperaturama 200-300°C, a temperatura ovisi o sadržaju C i Cr u čeliku.

Ti čelici, u zavisnosti o uvjetima eksploatacije i zahtjeva koji se postavljaju pred zavareni spoj, imaju dvije vrste šavova: ^[13, 14]

1. Šav i osnovni materijal imaju slična svojstva – za postizanje određene čvrstoće, dinamičke izdržljivosti i ako se boja zavara ne smije razlikovati od osnovnog materijala koriste se dodatni materijali koji omogućuju da sastav i svojstva šava budu slična osnovnom materijalu. Prilikom korištenja takvih dodatnih materijala potrebno je izvršiti toplinsku obradu popuštanjem na 700 – 750°.
2. Šav i osnovni materijal nemaju slična svojstva – koriste se dodatni materijali koji daju šav sa austenitnom strukturom, a toplinska obrada nakon zavarivanja nije potrebna. Prilikom naknadne toplinske obrade može doći do pojave krhkosti zavarenog spoja. Čvrstoća zavarenog spoja manja je kod ove vrste šava, te se zbog toga ovakav postupak zavarivanja ne koristi pri izradi konstrukcija izloženih znatnim opterećenjima u toku eksploatacije.

2.5.4. Zavarivanje feritnih čelika

Zavarljivost feritnih nehrđajućih čelika smatra se slabom zbog njihove najveće mane koja se javlja prilikom zavarivanja, a koja je sklonost porastu zrna. [7, 3]

Prilikom zavarivanja feritni čelici sklone su sljedećim problemima: [13]

a) PORASTU ZRNA

Do ove pojave dolazi pri temperaturama 1150°C. Povećanje zrna se odvija veoma brzo. Budući da kod ovih čelika ne dolazi do faznih transformacija nije moguće naknadnom toplinskom obradom ostvariti normalnu sitnozrnatu strukturu. Ukupnjavanje zrna uzrokuje snižavanje plastičnosti i pojavu krhkosti ovih čelika. Na sprečavanje ove pojave može se utjecati:

- 1) Smanjenim unosom topline u osnovni materijal i njegovim brzim hlađenjem – postiže se odabirom režima zavarivanja sa malom pogonskom energijom, te izvođenjem kratkih šavova malih poprečnih presjeka
- 2) Korištenjem elektroda koje sadrže modifikatore Ti i Al – to dovodi do usitnjavanja zrna u šavu

b) POVEĆANJU KRHKOSTI

Do povećanja krhkosti dolazi ako se šav i zona utjecaja topline dugo zadržavaju na visokim temperaturama. Poznata su dva uzroka povećanja krhkosti:

- 1) Zadržavanje čelika u temperaturnom području od 350-500°C dovodi do pojave toplinske krhkosti koja se naziva „krhkost 475“ – doprinose joj Cr, V, Si, Nb, a u manjem dijelu Ti i Al. Sama priroda ove pojave nije još dovoljno ispitana.
- 2) Izlučivanje sekundarnih karbida kroma po granicama zrna dovodi do sniženja plastičnosti – može se spriječiti predgrijavanjem osnovnog materijala na 150-180°C.

c) INTERKRISTALNOJ KOROZIJI

Odvija se po granicama zrna kod dijelova osnovnog materijala koji se nalaze neposredno uz šav.

Nastaje stvaranjem karbida kroma i snižavanjem sadržaja ugljika u čeliku. Feritni čelici se promatraju kao troelektrodni sustav koji se sastoji od zrna ferita, karbida kroma i zrna osiromašenih kromom. Negativan potencijal zrna ferita (koja sadrže veliku količinu kroma) i karbidi kroma stječu pod utjecajem kisika iz okoline, zbog kojeg dobivaju površinsku opnu oksida, dok zrna osiromašena kromom stječu pozitivan potencijal iz razloga što ne mogu dobiti površinsku opnu oksida. Zbog toga dolazi do stvaranja mikrogalvanskih parova prema troelektrodnoj shemi. Zrna ferita i karbidi su katode, dok su anode zrna osiromašena kromom. Kad korozivna struja dosegne znatnu veličinu, zbog njenog djelovanja počinje se razvijati interkristalna korozija. Postojanost prema interkristalnoj koroziji povećava se:

- legiranjem ovih čelika Ti i Nb – otežava se stvaranje karbida kroma
- snižavanjem % C u čeliku.

Zavarivanje feritnih kromovih čelika izvodi se na dva načina: ^[13]

- 1) Korištenjem dodatnog materijala kojim se postiže dobivanje šava sličnih svojstava kao osnovni materijal – potrebno je predgrijavanje osnovnog materijala do 150-180°C i toplinska obrada nakon zavarivanja zagrijavanjem čelika do 870-900°C u trajanju najmanje 10h, te brzim hlađenjem u vodi (dobiva se zavareni spoj povećane plastičnosti i manje osjetljivosti prema pojavi hladnih pukotina).
- 2) Korištenjem dodatnog materijal koji daje šav sa austenitnom strukturom.

2.5.5. Zavarivanje austenitnih čelika

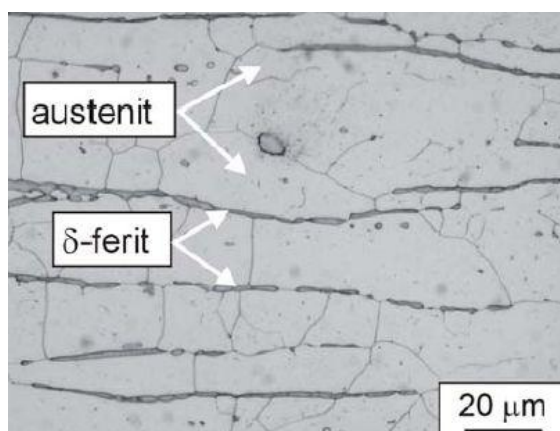
Austenitni nehrđajući čelici imaju vrlo dobru zavarljivost. Tanke materijale nije potrebno predgrijavati prije zavarivanja. Najveći problem predstavlja mogućnost senzibilizacije na stvaranje kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425-850°C što može dovesti do pojave interkristalne korozije. [10, 16, 5]

Pri zavarivanju austenitnih čelika javljaju se sljedeći problemi: [13, 3, 5]

a) TOPLE PUKOTINE

Javljaju se ukoliko čelik sadrži kritičnu količinu nečistoća u materijalu (P, S, Si ili Nb) zbog kojih dolazi do stvaranja legura s niskom točkom taljenja koje se rašire oko kristala u obliku tekućeg sloja za vrijeme skrućivanja. Temperatura skrućivanja ovog sloja je niža nego kod austenitnih zrna. Zbog toga u procesu hlađenja, zajedno sa snažnim skupljanjem čelika može doći do međukristalnih napuklina u zadnjem stadiju skrućivanja. Drugi razlog nastanka toplih pukotina je izražena sklonost deformacijama odnosno zaostalim naprezanjima. Problem je danas uglavnom riješen:

- 1) Pravilnim odabirom dodatnih materijala (4-12% delta ferita) – prilikom stvaranja delta ferita površina granica kristala se povećava tako da sloj lako topljivog eutektikuma postaje isprekidan; 3-8% delta ferita u šavu daje dovoljnu otpornost prema stvaranju toplih pukotina, a više od toga dovodi do izdvajanja krhke σ -faze po granicama austenitnih zrna; pomoću Schaefflerovog dijagrama može se odrediti primarna struktura šava kao i mogućnost pojave pukotina u njemu.

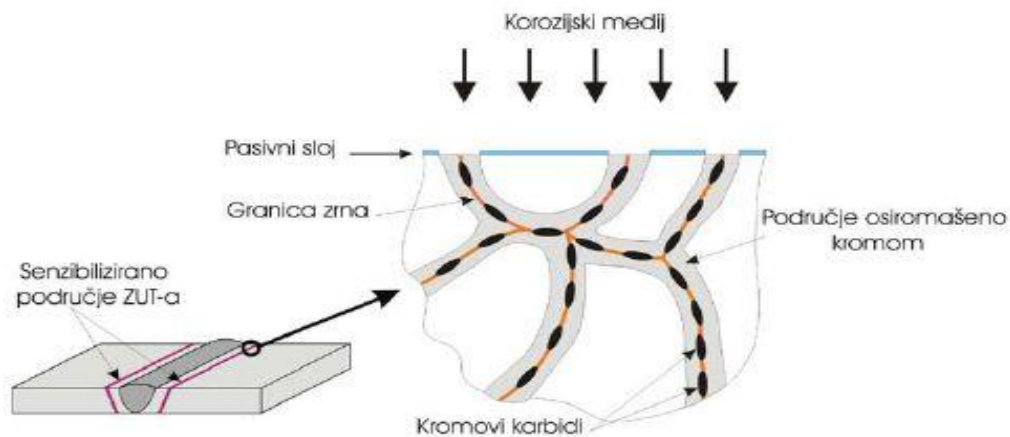


Slika 5. Mikrostruktura austenitnog čelika koji sadrži delta ferit [7]

- 2) Samom tehnikom kao i ostalim uvjetima zavarivanja.

b) INTERKRISTALNA KOROZIJA

Pri zadržavanju na temperaturama između 450-850°C dolazi do izlučivanja karbida kroma koji približno odgovara karbidu Cr_4C . Izlučivanje karbida kroma događa se po granicama austenitnih zrna te pritom dolazi do osiromašenja kromom dijelova koji se nalaze neposredno uz područja izlučivanja. Ukoliko dođe do utjecaja korozivne atmosfere, materijal će korodirati uzduž granica kristala, tj. na mjestima gdje je nizak sadržaj kroma (manji od 12%).



Slika 6. Interkristalna korozija zavara [15]

Izlučivanje karbida ovisi o temperaturi i vremenu. Najmanje vrijeme zadržavanja, koje je potrebno da čelik postane osjetljiv na interkristalnu koroziju naziva se kritično vrijeme (t_{krit}). Povišenje postojanosti ovih čelika prema interkristalnoj koroziji postiže se:

- 1) Stabilizacijom čelika, odnosno legiranjem elementima koji imaju veći afinitet prema ugljiku od kroma (Ti i Nb) i tvore karbide fino raspršene u zrnima austenita, na taj način se povećava kritično vrijeme.
- 2) Snižavanjem sadržaja ugljika u čeliku (treba biti najviše 0,03% C). Snižavanje sadržaja ugljika također povećava kritično vrijeme. Glavni nedostatak austenitnih čelika s niskim sadržajem ugljika predstavlja sniženje granice razvlačenja zbog manjeg udjela ugljika.
- 3) Zagrijavanjem cijelog radnog komada na oko 1100°C postiže se rastvaranje karbida u austenitu, a naglim gašenjem suzbija se izlučivanje karbida.
- 4) Dodatnim materijalom sa 2,5-3% molibdena koji povećava korozivnu postojanost ovih čelika.

2.5.6. Zavarivanje dupleks čelika

Dupleks čelici otporni su (za razliku od austenitnih čelika) na stvaranje toplih pukotina zbog velikog udjela ferita. Predgrijavanje se provodi samo kod čelika s niskim udjelom nikla i malih debljina. Prilikom zavarivanja dupleks čelika najviše pažnje se posvećuje očuvanju jednakih udjela austenitne i feritne strukture. Najveći problem prilikom zavarivanja dupleks čelika je:

- FERITIZACIJA

Zavarivanjem dupleks čelika mijenjaju se odnosi pojedinih strukturnih faza te dolazi do povišenja udjela ferita. Osamdeset i više posto ferita dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura u tom području, do smanjenja korozijske postojanosti itd. Upravo zbog toga je jedan od glavnih ciljeva prilikom zavarivanja dupleks čelika održavanje dovoljno visokog udjela austenita, a to se postiže:

- 1) dodatnim materijalom s dovoljnom količinom nikla (~ 9 %) – u metalu zavara i zoni utjecaja topline postići će se odgovarajuća količina austenita i ferita i neće se pojaviti neželjeni uključci
- 2) zaštitnim plinom s dodatkom dušika ^[17, 12, 5]

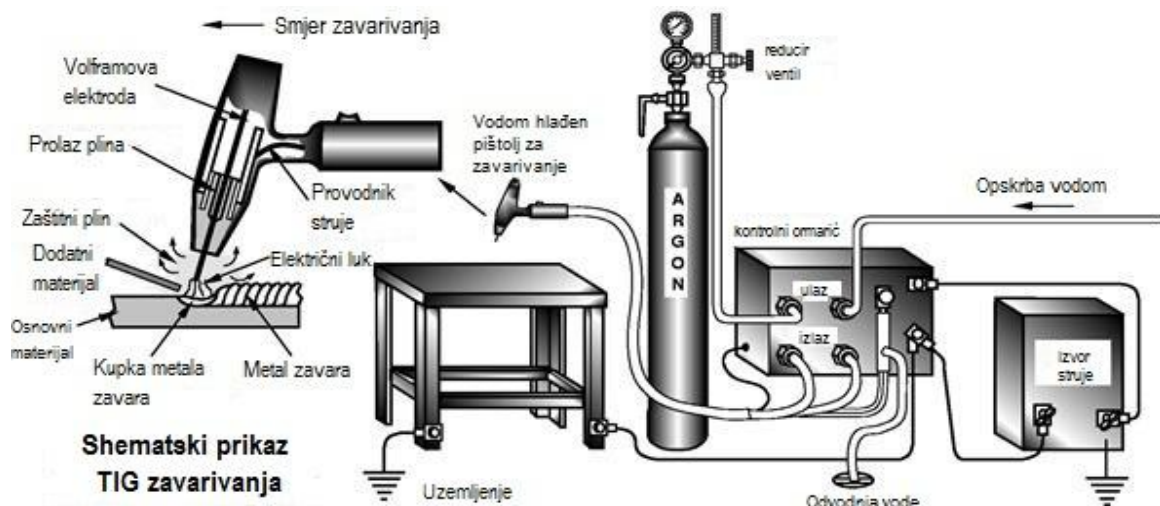
Zavarivanje je nužno izvoditi kontroliranim uvjetima što se odnosi na unos topline i parametre zavarivanja. ^[5]

Problemi kod zavarivanja dupleks čelika (npr. gubitak otpornosti na koroziju, smanjenje čvrstoće ili hladne pukotine), najčešće se javljaju u zoni utjecaja topline. Da bi se izbjegli ovi problemi, potrebno je prilikom zavarivanja minimizirati ili izbjeći temperaturna područja 300 – 550 °C i 600 – 1300 °C. ^[17]

Naknadna toplinska obradba provodi se samo kod plinskog zavarivanja ili kod zavarivanja s dodatnim materijalom u kome nema dovoljno nikla. Sastoji se od zagrijavanja na temperaturu od 1050-1100 °C, zadržavanja na toj temperaturi kroz određeno vrijeme i naglog hlađenja (najčešće u vodi). Grijanje i naglo hlađenje omogućuje podjednaku količinu austenita i ferita u mikrostrukturi zavara i sprečava nastanak štetnih faza. ^[17]

3. TIG ZAVARIVANJE

TIG (Tungsten inert gas) postupak zavarivanja je postupak kod kojeg se osnovni i po potrebi dodatni metal tale toplinskom energijom električnog luka, koji se održava između radnog komada i netaljive volframove elektrode u zaštitnoj atmosferi neaktivnog plina. Poznat je još pod nazivom WIG (Wolfram inert gas).^[18,19]



Slika 7. Shematski prikaz TIG zavarivanja [20]

Razvoj TIG-a započeo je 1941. godine u avionskoj industriji za zavarivanje lakih metala, te se ubrzo proširio u izradi posuda za kemijsku i procesnu industriji gdje se zavaruju nehrđajući čelici, aluminij i bakar.^[19]

Prema stupnju mehanizacije ovaj postupak može biti ručni, poluautomatizirani i automatizirani. Zaštitni plin štiti talinu zavara od štetnih utjecaja okolne atmosfere. Kao dodatni materijal se upotrebljavaju žice (šipke) koje se inače upotrebljavaju za plinsko zavarivanje. Volframova elektroda nalazi se u pištolju za TIG zavarivanje, kroz koji prolazi i zaštitni plin koji štiti vrući metal. Ovisno o namjeni, postoje različite veličine i oblici TIG pištolja za zavarivanje.^[19, 18]

Primjena TIG zavarivanja vrlo je raširena u zavarivanju nehrđajućih čelika, Al i Al-legura, Cu i Cu-legura, Ti-legura, Ni i Ni-legura. Budući da je zaštitni plin razmjerno skup, a postupak jedan od najsporijih, primjenjuje se najviše za zavarivanje manjih debljina (limova, cijevi, raznih posuda) koje se teže zavaruju ostalim postupcima zavarivanja. Međutim, često se primjenjuje i za zavarivanje korijena zavara čak i na debljim materijalima.^[19]

3.1. Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja

Prednosti TIG zavarivanja: ^[19]

- 1) Primjenjiv je za zavarivanje svih metala
- 2) Zavarivanje je moguće u svim položajima i za sve oblike radnog komada
- 3) Nema rasprskavanja kapljica metala
- 4) Nema čišćenja troske
- 5) Nema dima ni štetnih plinova
- 6) Ispravno izvedeni zavareni spojevi TIG postupkom spadaju u najkvalitetnije zavarene spojeve; zavar je vrlo lijep, gladak i čist.

Nedostaci TIG zavarivanja: ^[19]

- 1) Neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala (iznad 6 mm)
- 2) Otežan rad na otvorenom kod većih strujanja zraka
- 3) Skup zaštitni plin
- 4) Zahtjevi za veliku točnost i čistoću u pripremi spoja.

3.2. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja kod TIG zavarivanja su: ^[21]

- jakost struje zavarivanja [A],
- brzina zavarivanja [mm/min],
- promjer elektrode [mm],
- promjer dodatnog materijala [mm],
- vrsta i
- protok zaštitnog plina [Q].

Jakost struje zavarivanja bira se prema vrsti i debljini materijala, obliku i dimenzijama spoja te položaju zavarivanja. Kod ručnog TIG zavarivanja nehrđajućih čelika, sučeljeni spoj, vodoravni položaj, približna jakost struje iznosi 30 A po mm debljine lima. Ovo se odnosi na tanke limove (do 6 mm) i optimalne brzine zavarivanja. Jakost struje kod zavarivanja u prisilnim položajima je za 25 % manja. Jakost struje zavarivanja u pravilu se određuje na probnim uzorcima. Kod

strojnog TIG zavarivanja jakost struje je veća nego kod ručnog zavarivanja onoliko za koliko se mogu povećati brzine zavarivanja.^[19]

Brzina zavarivanja utječe na dubinu protaljivanja i na izgled površine zavara. Kod ručnog TIG postupka iznosi 10-15 m/h. Najpovoljnija je kada je dužina kupke taline dva do tri puta veća od promjera volframove elektrode. Kod prisilnih položaja znatno je manja, toliko da se talina ne cijedi pod utjecajem gravitacijske sile. Kod strojnog zavarivanja veće su brzine, uz veće jakosti struje zavarivanja.^[19]

Odabir promjera elektrode je prema debljini materijala odnosno vrsti i jakosti struje zavarivanja.^[19] (Tablica 1.)

Tablica 1. Određivanje promjera torirane elektrode prema debljini materijala[19]

NEHRĐAJUĆI ČELICI				
Debljina lima [mm]	1,5	3	5	6
Promjer torirane elektrode [mm]	1,6	2	2,4 ili 3,2	3,2

Za ručno TIG zavarivanje proizvode se ravne žice (šipke) dužine 1000 mm, promjera 2.0, 2.5 i 3.0 mm.^[19]

Vrste zaštitnog plina mogu biti argon i helij, te njihove mješavine uz mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine, npr. vodika i dušika.^[22]

Izbor količine zaštitnog plina ovisi o:^[19]

- jakosti struje zavarivanja,
- vrsti metala kojeg se zavaruje,
- vrsti zaštitnog plina,
- položaju zavarivanja i
- obliku spoja.

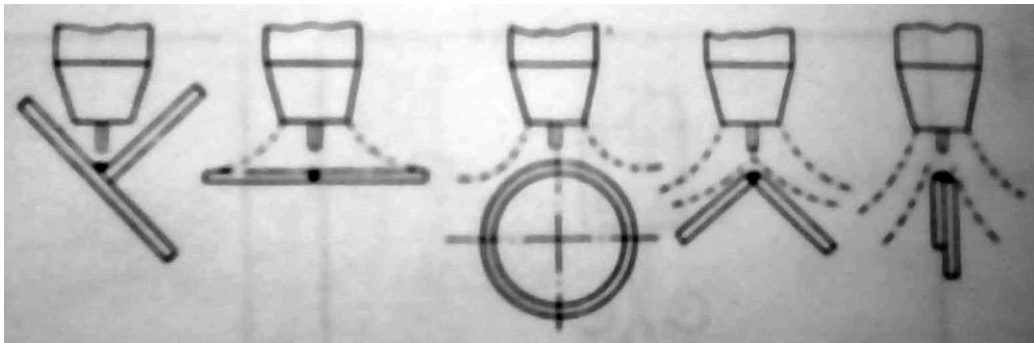
Prevelika količina plina, osim neekonomičnosti, štetna je jer stvara prejakom struju izlaženja i vrtloženje plina, što smanjuje zaštitu taline. Dolazi do uvlačenja

zraka u takav nemiran (turbulentan) plin. Premala količina zaštitnog plina ne istjeruje dovoljno zrak s mjesta zavarivanja. ^[19]

Kod zavarivanja nehrđajućih čelika količina zaštitnog plina je približno četiri puta manja nego pri zavarivanju aluminija. ^[19]

Kod zavarivanja u prisilnim položajima (npr. nad glavom), količinu argona valja povećati jer je teži od zraka pa skreće na dolje. Plin helij, koji je lakši od zraka, bolje zaštićuje zavarivanje u nadglavnom nego u vodoravnom položaju. ^[19]

Kod zavarivanja različitih oblika spoja, količina zaštitnog plina treba se povećati a može se i smanjiti. Tamo gdje je oblik spoja takav da se plin razilazi (npr. kod zavarivanja u kut), količina zaštitnog plina je manja i obrnuto. ^[19] (sl. 8)



Slika 8. Utjecaj oblika spoja na učinak zaštite plina [19]

Protok plina ovisi i o uvjetima zavarivanja, tj. da li se zavaruje unutar pogona ili na otvorenom. ^[23]

3.3. Uređaj za zavarivanje TIG postupkom

Osnovni dijelovi uređaja: ^[18]

- 1) Izvor struje za zavarivanje
- 2) Komadni ormarić
- 3) Rashladni sustav
- 4) Boca sa zaštitnim plinom
- 5) Pištolj za zavarivanje
- 6) Volframova elektoda.

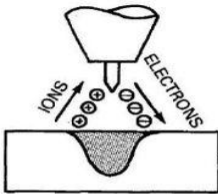
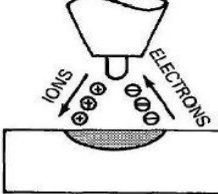
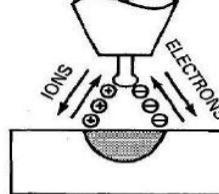



3.3.1. Izvor struje za zavarivanje

Izbor izvora struje za zavarivanje ovisi o vrsti osnovnog materijala kojeg zavarujemo TIG postupkom. Izvor struje za zavarivanje mora imati padajuću karakteristiku.^[18]

Nehrđajući čelici zavaruju se sa istosmjernom strujom s elektrodom na minus polu, a kao izvor struje može se koristiti ispravljač-pretvarač. Električni luk može se uspostaviti dodiranjem vrha volframove elektrode sa radnim komadom. Drugi način uspostave luka koji se u pravilu koristi je bez dodira volframove elektrode sa radnim komadom uz pomoć uređaja visokofrekventne struje. Nedostatak uspostavljanja električnog luka dodiranjem je oštećivanje vrha elektrode što utječe na stabilnost luka i onečišćavanje zavara volframom. Taj način se koristi na aparaturi gdje nije ugrađen uređaj visokofrekventne električne struje. Visokofrekventna struja koristi se kod uspostavljanja električnog luka, a potom se isključuje.^[19]

Istosmjernom strujom sa elektrodom na minus polu se zavaruju svi metali, osim lakih metala (Al i legure, Mg i legure) kod kojih je potrebno čišćenje teško topljivih površinskih oksida. Oni se zavaruju izmjeničnom strujom, a kao izvor struje za ovaj uređaj služi transformator. Kod zavarivanja izmjeničnom strujom električni luk je nestabilan te je zato obavezan i uređaj za proizvodnju visokofrekventne električne struje jer on u ovom slučaju osim za uspostavu luka služi i za održavanje njegove stabilnosti. Zavarivanje istosmjernom strujom s elektrodom na plus polu se ne preporučuje.^[19, 18]

Tablica 2. Primjeri karakteristika TIG zavarivanja ovisno o vrsti struje i polaritetu [23]

Vrsta struje	DCEN	DCEP	AC
Polaritet elektrode	Negativan	Pozitivan	
Tok elektrona i iona			
Penetracija			
Čišćenje oksida	NE	DA	DA – pola ciklusa
Omjer topline el. luka	70% na O.M. 30% na elektrodi	30% na O.M. 70% na elektrodi	50% na O.M. 50% na elektrodi
Penetracija	duboka, uska	plitka, široka	srednja
Kapacitet elektrode	Odličan 3.2mm – 400A	Loš 6.4mm – 120A	Dobar 3.2mm – 225A

Uređaj za proizvodnju visokofrekventne struje može biti smješten u izvoru struje ili izvan izvora u komandnom ormariću. ^[19]

U principu za aparature TIG zavarivanja grade se posebni izvori struje zavarivanja koji mogu biti kombinirani, tj. koristiti se kao ispravljajući i kao transformatori, što se ostvaruje prebacivanjem sklopke na izvoru. Suvremeni izvori struje grade se s takvim karakteristikama da je s njima moguće obaviti impulsno TIG zavarivanje kod kojeg se periodično mijenja jakost struje. ^[19]

3.3.2. Komandni ormarić (Upravljački uređaj)

Sve komande smještene su u komandni ormarić koji sadrži upravljačke funkcije uređaja za zavarivanje. ^[19]

Kod ručnog TIG zavarivanja to su uglavnom: ^[19]

- magnetski ventili za vodu i plin s vremenskim regulatorima protoka,
- priključci za struju zavarivanja s preklopkom ukapčanja i iskapčanja procesa.

Komandni ormarići za automatizirano vođenje procesa sadrže gotovo sve komande kao ukapčanje i iskapčanje procesa, regulaciju brzine zavarivanja, regulaciju brzine dovoda žice itd. ^[19]

Komandni ormarić može biti posebna jedinica ili ugrađen u kućište izvora struje zavarivanja. ^[19]

3.3.3. Rashladni sustav

Rashladni sustav je potreban na uređaju za TIG zavarivanje koji se primjenjuje za veće jakosti struje zavarivanja (iznad 150-200 A). Njegova uloga je hlađenje pištolja i provodnika na pištolj. Hlađenje se odvija rashladnom tekućinom (vodom ili antifrizom) koja se u pištolj dovodi crijevima. Odvodno crijevo je šire od dovodnog. U njemu se obično nalazi provodnik električne struje za zavarivanje, tako da rashladna tekućina kod izlaska hladi provodnik. ^[19]

Postoje tri vrste rashladnih sustava: ^[19]

- 1) Otvoreni – crijevo se priključuje direktno na vodu.
- 2) Zatvoreni centralni – sastoji se od velikog spremnika za vodu i crpke koja pogoni vodu da kruži i posluhuje više aparatura.

3) Zatvoreni pojedinačni – sastoji se od malog spremnika, hladnjaka, elektromotora i crpke. Ugrađeni su u jednom posebnom sklopu kod svake aparature za TIG zavarivanje. Suvremeni uređaju imaju ovu vrstu rashladnog sustava.

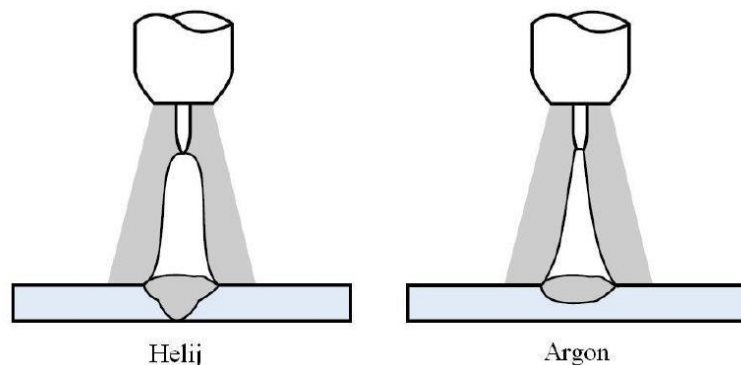
Uređaj je tako namješten da ukoliko nema rashladne tekućine ne može se uspostaviti električni luk niti izvršiti zavarivanje. ^[19]

3.3.4. Boca sa zaštitnim plinom

Zaštitni plin nalazi se u čeličnoj boci na kojoj se nalazi reducir ventil sa mjeracem potrošnje plina. ^[19]

Kod TIG postupka, kao zaštitni plin najčešće se koristi argon. Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja. Čistoća argona treba biti minimalno 99,95 %, iznimno 99,997 %. To je plin bez boje, mirisa i okusa, teži od zraka. U zatvorenoj prostoriji, gdje se obavlja intenzivno zavarivanje kao i na mjestu izvođenja montažnih vodova, nužna je ventilacija prostorija objekata na najnižim mjestima. ^[22, 18]

Helij se također koristi kao zaštitni plin kod TIG zavarivanja. On je plin bez boje, okusa i mirisa, lakši od zraka. U usporedbi sa argonom je približno deset puta lakši, ima veću toplinsku vodljivost, te veću dubinu protaljivanja kod iste jakosti i vrste električne struje zavarivanja, ali i manje stabilan električni luk nego argon. ^[22, 24, 19] (Slika 9.)



Slika 9. Oblik električnog luka i izgled zavara prilikom zavarivanja zaštitnim plinom helijem, odnosno argonom [25]

Osim čistog inertnog plina argona i helija, često se primjenjuju i njihove mješavine u različitim omjerima. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava obje vrste plina, a primjeri karakteristika zavarivanja spomenutim plinovima dana je u tablici 3. ^[22]

Tablica 3. Karakteristike zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova[22]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	smanjena	veća nego kod 100% Ar	veća
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100% Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro	sličnije kao kod 100% Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100% He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100% He	niža kod manjih struja
Oblik luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	širi
Napon luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100% Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego 100% Ar	veća nego 100% Ar

Osim spomenutih kombinacija plinova i mješavina, postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine kao npr. vodika koji ima vrlo dobru toplinsku vodljivost i povećava penetraciju dok se mješavine s dodatkom dušika upotrebljavaju uglavnom kod zavarivanja materijala s austenitnom strukturom. ^[22]

3.3.5. Pištolj za zavarivanje

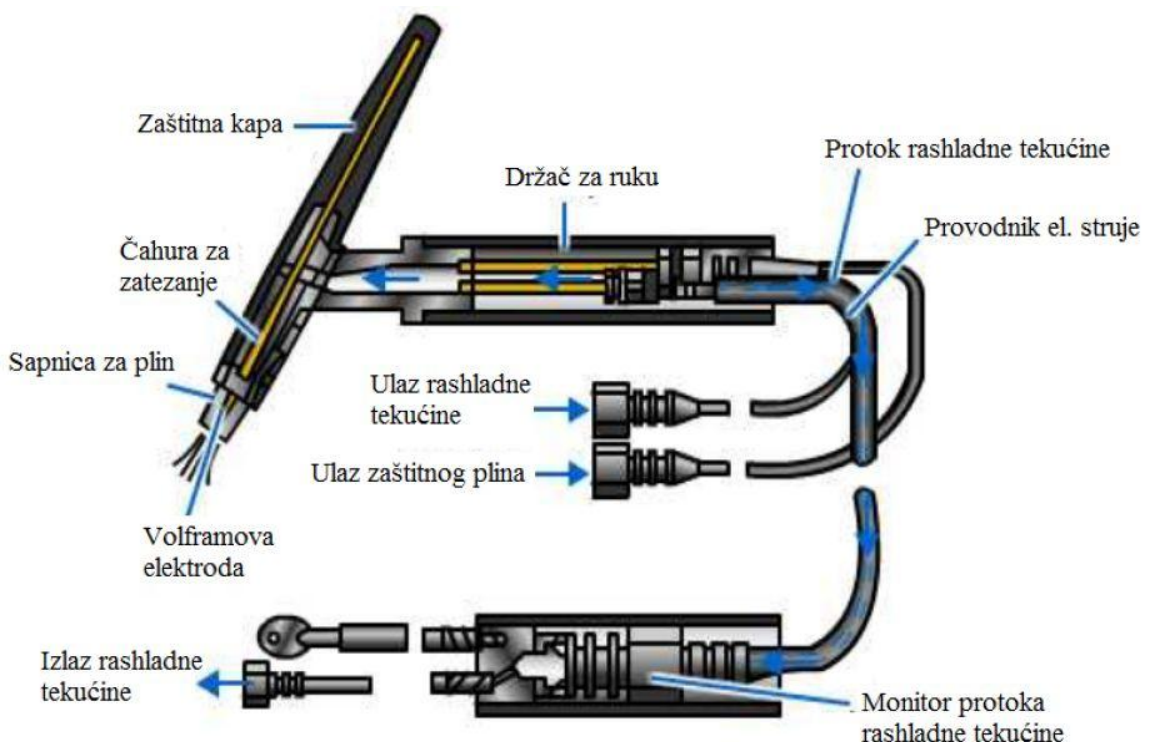
Pištolj za zavarivanje sadrži volfram elektrodu koja dovodi električnu struju za uspostavljanje električnog luka te usmjerava zaštitni plin.

Pištolji za ručno TIG zavarivanje različitih su oblika i veličina, a mogu se podijeliti na dvije osnovne grupe: ^[19, 13]

- 1) Pištolje koji se hlade zrakom – primjenjuju se kod manjih jakosti struja zavarivanja od 150-200 A i kraća vremenska opterećenja.
- 2) Pištolje koji se hlade rashladnom tekućinom – koriste se kod većih raspona struja od 200 – 500 A.

Pištolj za zavarivanje sastoji se od: ^[18]

- 1) prekidača za ukapčanje i iskapčanje struje za zavarivanje, argona, vode i visoke frekvencije,
- 2) držača pištolja, kroz kojeg prolaze kablovi (struja, argon, voda),
- 3) volframove elektrode i
- 4) sapnice za plin (keramička, staklena, metalna). Veličina sapnice zavisi o uvjetima za zavarivanje i promjeru volframove ekektrode.



Slika 10. Shema TIG pištolja za zavarivanje [26]

Za zavarivanje na teško pristupačnim mjestima koriste se pištolji posebnih oblika i veličina ^[19], kao npr. pištolji za TIG zavarivanje iz tablice 4 pod brojem 3) i 4).

Tablica 4. Prikaz nekih izvedbi pištolja za TIG zavarivanje

 <p>1) Tipičan pištolj za ručno TIG zavarivanje ^[27]</p>	 <p>2) Pištolj za poluautomatsko TIG zavarivanje ^[28]</p>
 <p>3) TIG pištolj u obliku olovke ^[29]</p>	 <p>4) Savitljivi TIG pištolji ^[30]</p>

3.3.6. Elektrode








Volframova elektroda je provodnik električne struje s pištolja na radni komad. Točka taljenja volframa je 3 387°C, tako da je elektroda praktički netaljiva. ^[19, 18]

Prema sastavu elektrode mogu biti: ^[23]

- 1) Čiste volfram elektrode (W) – sadrže minimalno 99.5% volframa bez dodataka legiranih elemenata, koriste se kod nižih struja zavarivanja nego legirane i pretežno se koriste za rad sa izmjeničnom električnom strujom.
- 2) Elektrode legirane s torijem – mogu biti legirane s 1% (EWTh-1) ili s 2% (EWTh-2) torijevog oksida ThO_2 , te provoditi 20% jaču električnu struju nego čiste volfram elektrode; lakše je paljenje luka, luk je stabilniji, a koriste se za rad s istosmjernom strujom.
- 3) Elektrode legirane s cerijevim oksidom (CeO_2) i s lantanovim oksidom (La_2O_3) – pojavile su se '80-ih godina u SAD-u jer za razliku od torija nisu radioaktivne; EWCe-2 sadrži 2% cerijevog oksida dok EWLa-1 sadrži 1% lantanovog oksida. Obje se koriste za rad s istosmjernom i izmjeničnom strujom.
- 4) Elektrode legirane s cirkonijevim oksidom (ZrO_2) – po svojstvima su između čistih i elektroda legiranih s torijevim oksidom.

Volframove elektrode izrađuju se u promjerima 0.5, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0, 6.4 i 8.0 mm, a dužina 50, 75, 150 i 175 mm. Označavanje volframovih elektroda je prema sastavu materijala elektrode, u slovnoj, brojčanoj i oznaci u boji. ^[19]

Tablica 5. Označavanje volframovih elektroda [23]

ISO OZNAKA	AWS KLASIFIKACIJA	BOJA	LEGIRNI ELEMENT	LEGIRNI OKSID
W	EWG	Zelena 	/	/
WT 40	EWCe-2	Narančasta 	Cerij	CeO_2
WL 10	EWLa-1	Crna 	Lantan	La_2O_3
WT 10	EWTh-1	Žuta 	Torij	ThO_2
WT 20	EWTh-2	Crvena 	Torij	ThO_2
WZ 4	EWZr-1	Smeđa 	Cirkonij	ZrO_2
WC 20	EWG	Siva 	Nije određeno	/



Slika 11. Volfram elektrode za zavarivanje [31]

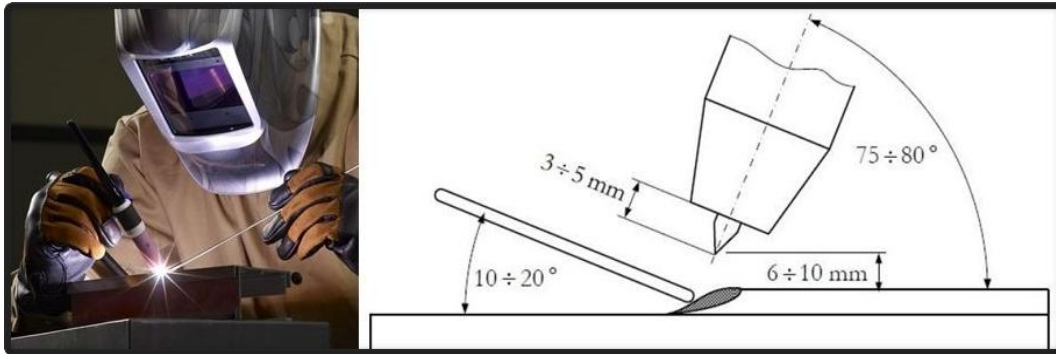
Oblik vrha volframove elektrode ovisi o tome koji se metal zavaruje, odnosno kojom vrstom električne struje se zavaruje, a može biti šiljastog i zaobljenog oblika. Zaobljeni oblik vrha volframove elektrode imaju laki metali (aluminij, magnezij ili njihove legure) koji se zavaruju izmjeničnom električnom strujom. Svi ostali metali (uključujući i nehrđajuće čelike) zavaruju se istosmjernom strujom sa elektrodom na minus polu te imaju šiljasti oblik vrha elektrode. Prednosti šiljastog vrha elektrode su koncentrirani električni luk koji utječe na dublje protalijvanje i stabilniji luk (naročito kod malih jakosti struje zavarivanja).^[19]

Pravilno opterećivanje volframove elektrode jakosti električne struje daje joj duži vijek trajanja i smanjuje onečišćenje zavarenog spoja volframom. Kod ispravno opterećene volframove elektrode na oštrm vrhu formira se mala kapljica taline volframa u obliku kuglice kroz koju se održava stabilan električni luk. Kod zaobljenog vrha elektrode ne stvara se takva kapljica nego vrh ostaje zaobljen. Kod zavarivanja je samo krajnji vrh volframove elektrode vidljivo zagrijan.^[19]

Tijekom zavarivanja može doći do onečišćenja i oštećenja vrha volframove elektrode uslijed preopterećenja elektrode strujom zavarivanja, slabe zaštite vrha elektrode zaštitnim plinom, doticanjem vrha elektrode s osnovnim materijalom ili talinom ili dodatnim metalom. Ukoliko dođe samo do onečišćenja vrha elektrode stranim metalom (pogotovo u manjim količinama), vrh elektrode može se očistiti uspostavljanjem električnog luka na pomoćnoj pločici kratko vrijeme dok strani metal ne ispari. Preopterećenu elektrodu koja se prepoznaje po tamnom vrhu elektrode bez sjaja, potrebno je zamijeniti elektrodom većeg promjera. U slučaju da je vrh elektrode plav, plavo-crven, znači da nema dobru zaštitu plinom. Za zaštitu vrha elektrode zaštitni plin mora još neko vrijeme izlaziti nakon prekidanja luka, računa se jednu sekundu za svakih 10 A jakosti struje kojom je izvršeno zavarivanje. Oštećeni vrh elektrode treba se ponovno obrusiti.^[19]

3.4. Princip rada TIG zavarivanja prema stupnju automatizacije

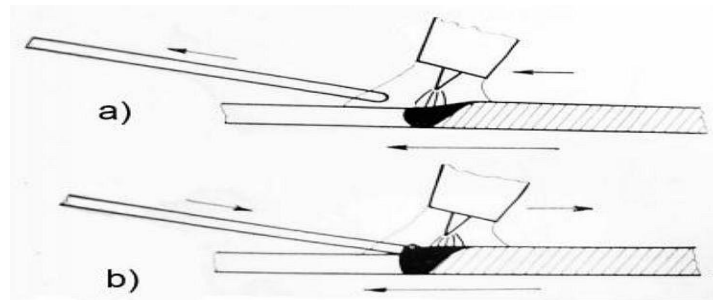
3.4.1. Ručno TIG zavarivanje



Slika 12. Lijeva slika: ručno TIG zavarivanje; desna slika: položaj pištolja i žice kod ručnog TIG zavarivanja [32, 19]

Električna struja koja dolazi iz izvora struje zavarivanja priključenog na električnu mrežu uključuje se u rad preklopom na izvoru. Jednim provodnikom dolazi na radni komad, a drugim na pištolj u kojem prelazi na volframovu elektrodu. Visokofrekventna električna struja dolazi iz posebnog uređaja provodnikom na radni komad i provodnikom na pištolj, odnosno volframovu elektrodu. Zaštitni plin iz čelične boce dovodi se kroz gumeno crijevo preko magnetskog ventila na pištolj i u sapnicu u proces zavarivanja. Tekućina za hlađenje (voda ili antifriz) nalazi se u posebnom hladnjaku, prolazi kroz gumeno crijevo, preko magnetskog ventila u pištolj i iz pištolja nazad u hladnjak na kojem se nalazi crpka za cirkuliranje. Električna struja za komande dovodi se posebnim provodnikom u pištolj. Svi ovi provodnici na pištolj povezani su u jedan „snop“ koji je pričvršćen na komandni ormarić na priključnom dijelu „snopa“. Zavarivač u jednoj ruci drži pištolj a u drugoj dodatni materijal – žicu (desnoruki zavarivač drži pištolj u desnoj ruci, a dodatni materijal u lijevoj ruci, ljevoruki obrnuto). Pritiskom na dugme na pištolju, počinje teći plin i cirkulirati rashladna tekućina. Zatim se pištolj primakne mjestu zavarivanja na određeni razmak. (sl.12) S vrha volframove elektrode počinju preskakati iskre na radni komad, odnosno struja visoke frekvencije koja stvara uvjete da se brzo uspostavi električni luk, koji tali osnovni metal. U ovu talinu, pod električni luk (ali ne u električni luk), radnik povremeno

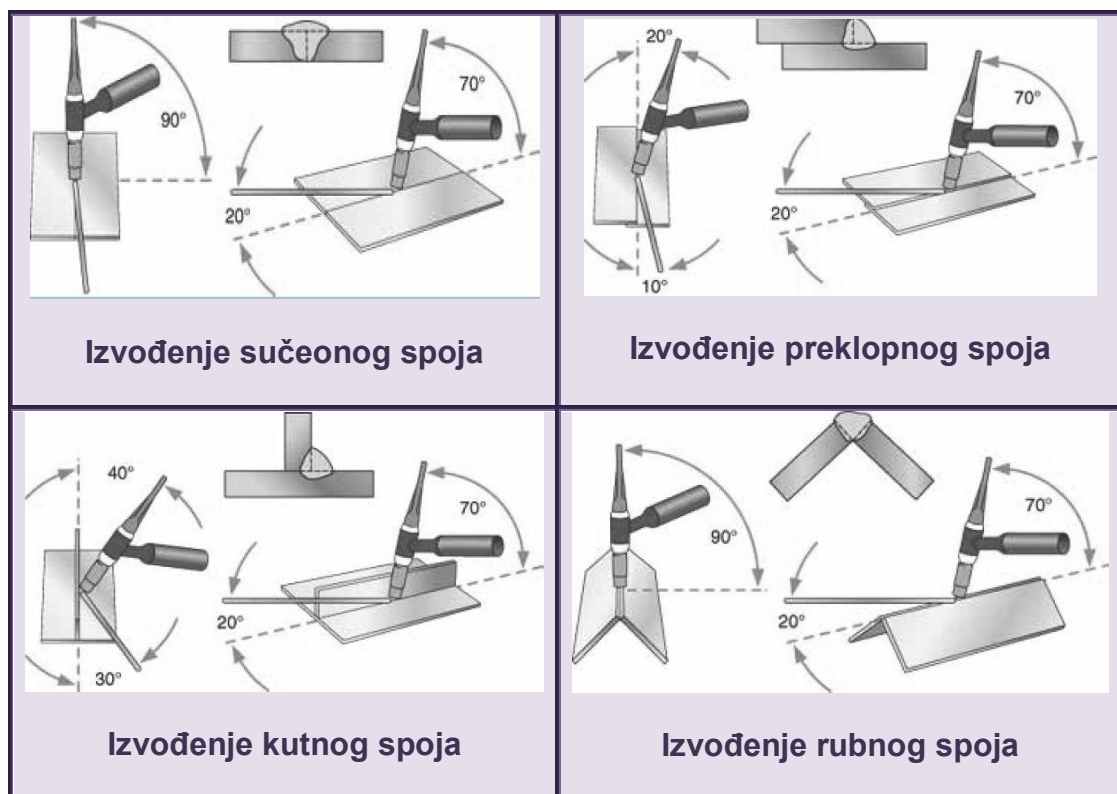
odaje žicu koja se tali u prednjem rubu taline osnovnog metala i zajedno s talinom osnovnog metala sjedinjuje u zavareni spoj. ^[19] (sl.13)



Slika 13. Tehnika rada u dodavanju žice u talinu kod ručnog TIG zavarivanja:
a) kod kretanja pištolja naprijed izmaknuti žicu, b) povući pištolj malo unazat, a žicu dodati u rub taline itd. (proces se ponavlja) [19]

U nekim slučajevima ne dodaje se dodatni metal (npr. kod zavarivanja lima debljine 1 – 1,5 mm) nego se osnovni metal pretaljuje i čini zavar. Tijekom zavarivanja radnik pomiče pištolj i dodatni metal određenom brzinom po pripremljenom spoju i uz određenu tehniku rada zavaruje. ^[19] (tablica 6)

Tablica 6. Tehnike izvođenja TIG zavarivanja [22]



Prestankom pritiska na dugme pištolja, prekida se električni luk a zaštitni plin još neko vrijeme istječe i štiti hlađenje taline i vrha elektrode. Za to vrijeme radnik ne odmiče pištolj s mjesta zavarivanja. Jakost struje zavarivanja regulira se na regulatoru koji se nalazi na izvoru struje. ^[19]

3.4.2. Poluautomatizirano TIG zavarivanje

Princip rada poluautomatiziranog TIG zavarivanja gotovo je isti kao ručni postupak s time da se pritiskom na dugme na pištolju, osim opisanog procesa uključuje i elektromotor sustava za dovod žice koji se nalazi na komandnom ormariću. Žica za zavarivanje, određenom brzinom, koja se da regulirati, dolazi pod električni luk gdje se tali zajedno sa zajedno s osnovnim materijalom u zavareni spoj. ^[19]

Budući da je dovod žice mehaniziran, postupak se naziva poluautomatizirani. ^[19]

3.4.3. Automatizirano TIG zavarivanje

Primjenjuje se u masovnom zavarivanju, posebno u serijskoj proizvodnji. Princip rada automatiziranog TIG zavarivanja je vrlo raznolik, već samo po tome za koje operacije rada je prilagođen uređaj. ^[19]

Takvi uređaji su mogu biti: ^[19]

- a) Jednostavni – radnik postavlja parametre i prati rad mijenjajući pravac i parametre zavarivanja
- b) vrlo složeni – rad uređaja je programiran.

Primjer uređaja za automatsko TIG zavarivanje dan je na slici 14.

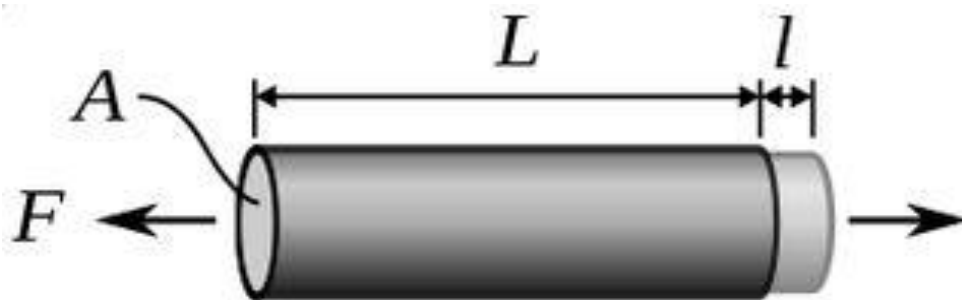


Slika 14. Uređaj za TIG zavarivanje cijevi [33]

4. STATIČKI VLAČNI POKUS

Statički vlačni pokus koristi se za utvrđivanje osnovnih mehaničkih svojstava materijala: granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, istežljivosti, suženja itd. Te veličine karakteriziraju otpornost i deformabilnost materijala. Taj pokus ujedno daje uvid u ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičkog vlačnog naprezanja.^[34]

Kako bi se dobiveni rezultati mehaničkih svojstava mogli međusobno uspoređivati potrebno je ispitivanje provoditi prema važećim standardima.^[35]



Slika 15. Prikaz djelovanja sile kod statičkog vlačnog pokusa [36]

4.1. Ispitni uzorci

Ispitni uzorci na kojima se provodi statički vlačni pokus mogu biti:^[34]

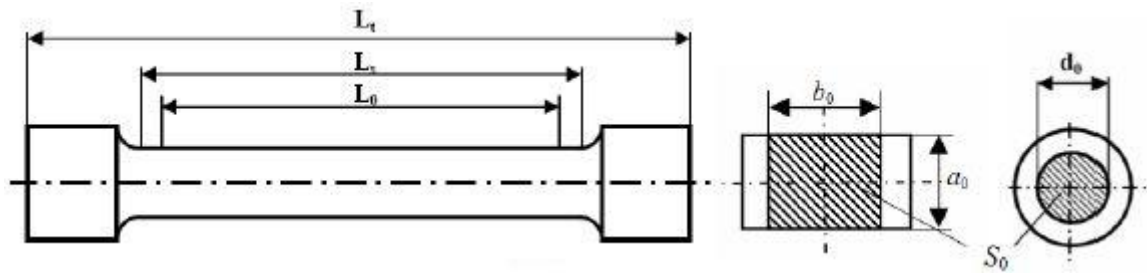
- standardni i
- tehnički.

4.1.1. Standardni ispitni uzorci

Statički vlačni pokus provodi na ispitnim uzorcima čiji poprečni presjek može biti:^[34]

- okrugli ili
- pravokutni.

Oblik poprečnog presjeka ovisi o obliku poluproizvoda, odnosno debljini stjenke.^[34]



Slika 16. Dijelovi ispitnog uzorka za statički vlačni pokus [35]

Slika 16 prikazuje dijelove uzorka za statički vlačni pokus, a oznake sa slike predstavljaju: [35]

- d_0 [mm] – početni promjer ispitnog uzorka;
- a_0 [mm] – početna debljina plosnatog ispitnog uzorka;
- b_0 [mm] – početna širina plosnatog ispitnog uzorka;
- L_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog uzorka;
- h [mm] – duljina „glave“ ispitnog uzorka;
- L_t [mm] – ukupna duljina ispitnog uzorka;
- S_0 [mm²] – ploština početnog presjeka ispitnog uzorka.

Svi ispitni uzorci sastoje se od: [34]

- mjernog (L_0),
- prijelaznog i
- steznog (h) dijela.

Na mjernom (srednjem) dijelu ispitnog uzorka (L_0) prate se i mjere deformacije i kidanja, te provjeravaju važnije mjere ispitnog uzorka prije i nakon ispitivanja. [34]

Standardni ispitni uzorci imaju standardom propisane oblike i dimenzije, a razlikujemo dva osnovna tipa: normalne ili proporcionalne. [35]

Tablica 7. Tipovi ispitnih uzoraka [34]

Tip ispitnog uzorka	Dimenzije presjeka d_0 ili $a \times b$, mm	Početni presjek S_0 , mm ²	Mjerna duljina L_0 , mm
Normalni	$d_0=20$	314	200
Proporcionalni, dugi	d_0	S_0	10 d_0
Proporcionalni, kratki	d_0	S_0	5 d_0
Plosnati proporcionalni, dugi	a_0, b_0	S_0	$11.3\sqrt{S_0}$
Plosnati proporcionalni, kratki	a_0, b_0	S_0	$5.65\sqrt{S_0}$

4.1.2. Tehnički ispitni uzorci

Pod tehničke ispitne uzorke spadaju žice, čelične užadi, cijevi, limovi, lanci, betonski čelik, gotovi strojni elementi i sl. koji se mogu ispitivati neobrađeni tj. u stanju u kakvom se dobivljaju. [34, 37]

Svi ti ispitni uzorci ispituju se u određenim i slobodnim mjernim duljinama. [34]

4.2. Tijek ispitivanja

Ispitivanje statičkim vlačnim pokusom provodi se na uređaju koji se naziva kidalica na način da se ispitni uzorak postavi u čeljusti kidalice i kontinuirano vlačno optereti dok ne dođe do njegovog loma. [34,35]

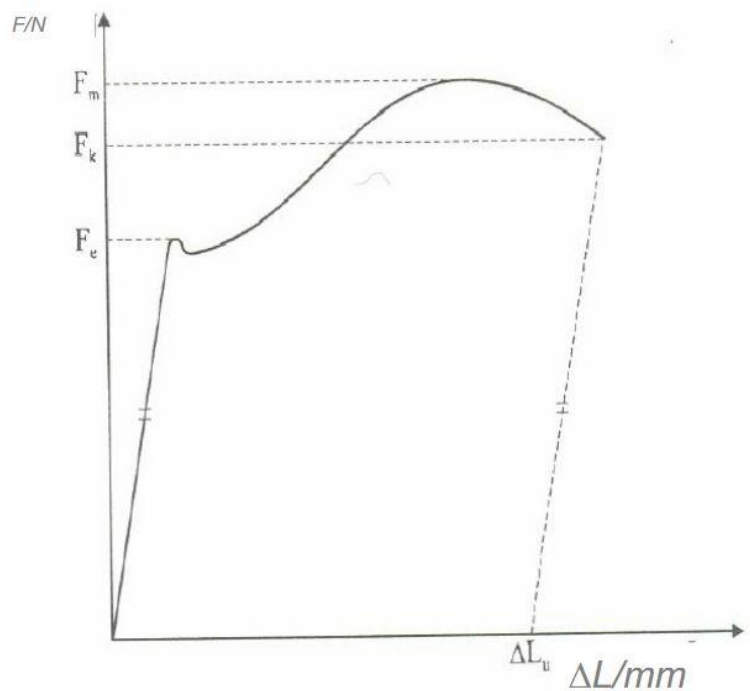
Prilikom ispitivanja kontinuirano se mjere sila i produljenje ispitnog uzorka. Pisačem se grafički registrira dijagram „sila – produljenje“, tzv. dijagram kidanja. [34]

Tijekom statičkog vlačnog pokusa na kidalici, očitavaju se vrijednosti karakterističnih sila, a koje su: [34]

F_e – sila na granici razvlačenja,

F_m – maksimalna sila i

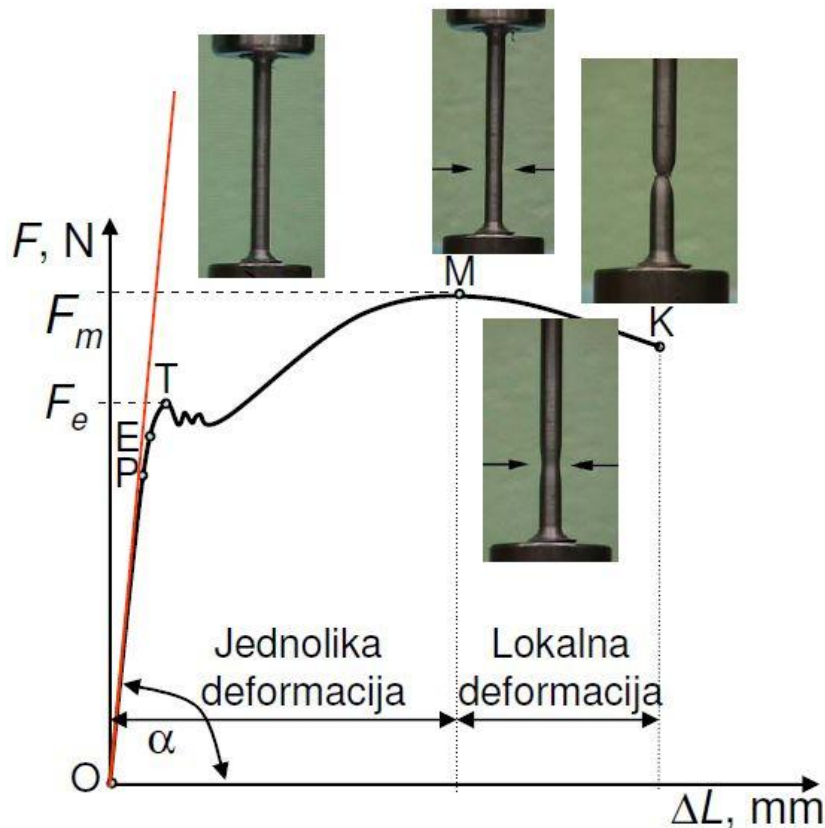
F_k – konačna sila.



Slika 17. Hookeov dijagram [34]

Nakon dostizanja sile na granici razvlačenja ispitni uzorak se nastavlja produljivati uz čak mali pad sile. Za daljnje rastezanje materijala potrebno je daljnje povećanje sile. Opterećenje se povećava sve do maksimalne sile (F_m), nakon koje se ispitni uzorak nastavlja produljivati uz sve manju silu. Sila koja je potrebna za deformiranje ispitnog uzorka smanjuje se zbog lokaliziranog

smanjenja ploštine poprečnog presjeka. Pri vrijednosti konačne sile (F_k), nastupa lom ispitnog uzorka. [34]



Slika 18. Karakteristične točke na dijagramu sila (F) – produljenje (Δl) [34]

Na slici 18 prikazane su karakteristične točke na dijagramu sila (F) – produljenje (Δl). Na dijagramu se vidi: [34]

- OP – područje elastičnih deformacija na kojem vrijedi Hookeov zakon (koristi se za strojarske konstrukcije);
- EM – područje trajnih deformacija, odnosno razvlačenja, popuštanja – tečenja i očvršćivanja materijala (značajno je kod plastične obradbe materijala);
- MK – područje deformacija s nastankom vrata na ispitnom uzorku i mikropukotina u materijalu, uz istovremeno opadanje sile kod konvencionalnog dijagrama (značajno je kod obradbe materijala rezanjem i odvajanjem čestica);
- K – lom ispitnog uzorka.

4.2.1. Dijagram naprezanje - istezanje

Da bi se dobio pravi uvid u mehaničku otpornost materijala potrebno je uzeti u obzir ploštinu poprečnog presjeka ispitnog uzorka na način da se umjesto sile (F) uvede naprezanje (σ). [34]

Iznos naprezanja se računa se pomoću formule: [34]

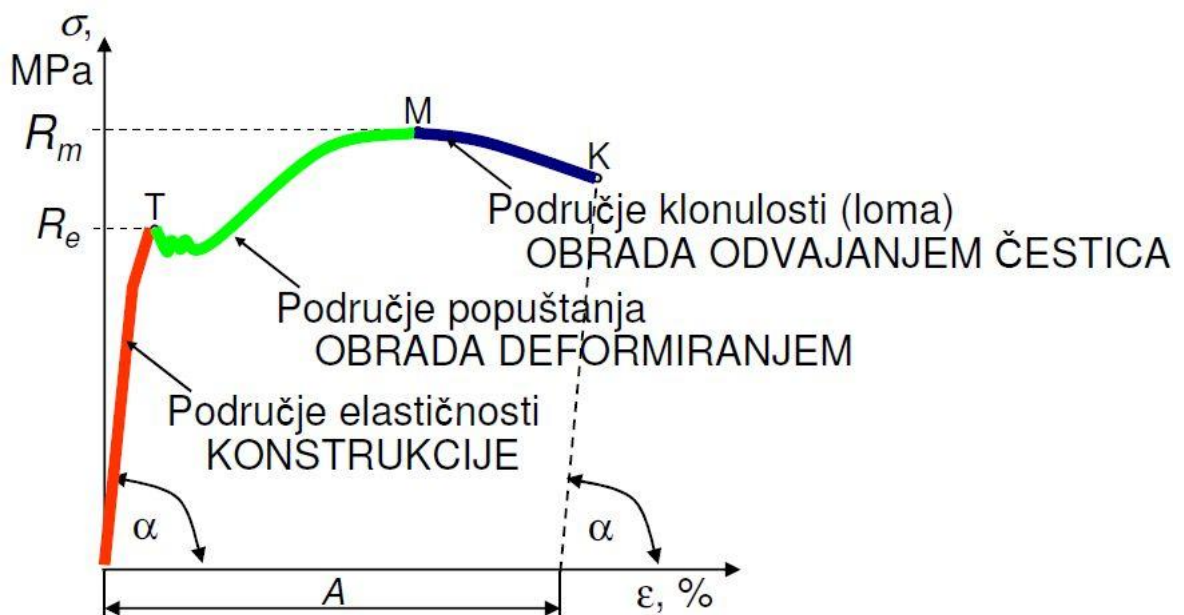
$$\sigma = \frac{F}{S_0},$$

u kojoj je:

σ [MPa] – naprezanje,

F [N] – sila i

S_0 [mm²] – ploština početnog poprečnog presjeka ispitnog uzorka.

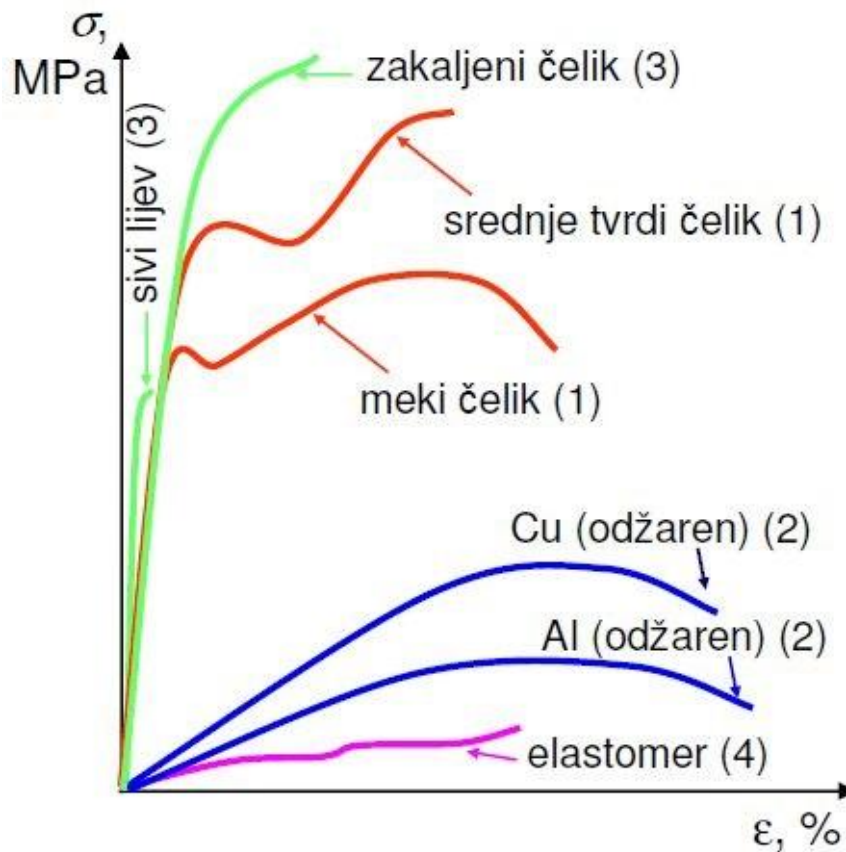


Slika 19. Konvencionalni dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ϵ) [35]

Veličine na dijagramu sa slike 19 su:

R_e - granica razvlačenja i

R_m - vlačna čvrstoća.



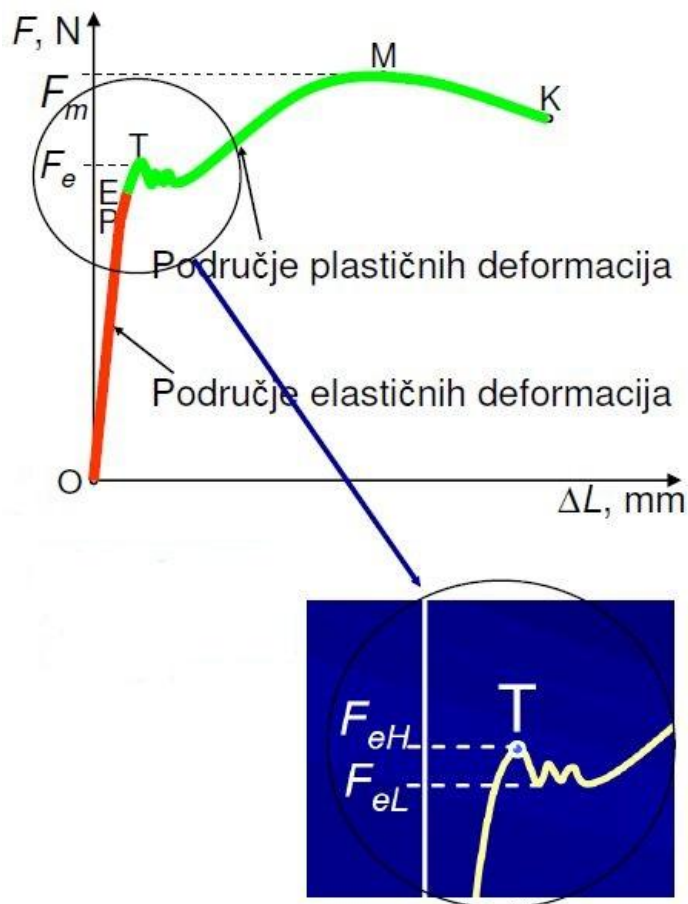
Slika 20. Dijagram naprežanje (σ) – istežanje (ϵ) za različite materijale^[35]

Dijagrami različitih materijala mogu se podijeliti u četiri osnovna oblika:^[35]

- 1) s izraženom granicom razvlačenja (npr. meki i srednje tvrdi čelici)
- 2) s kontinuiranim prijelazom iz elastičnog u elastično/plastično područje deformacija (npr. bakar i aluminij).
- 3) bez područja elastično/plastičnih deformacija (krhki materijali koji se lome gotovo bez plastične deformacije, npr. sivi ljev ili zakaljeni čelik)
- 4) s entropijskom elastičnom deformacijom, npr. neki organski materijali i polimeri tipa elastomera.

4.2.2. Granica razvlačenja (tečenja)

Granica razvlačenja (R_e) je ono najniže naprezanje pri vlačnom opterećenju koje izaziva znatno istezanje ispitnog uzorka bez povišenja sile i koje odvaja područje elastičnih od plastičnih deformacija. Određuje se iz dijagrama sila – produljenje. ^[34,35]



Slika 21. Dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ε) za različite materijale [35]

Formula za granicu razvlačenja je: ^[34]

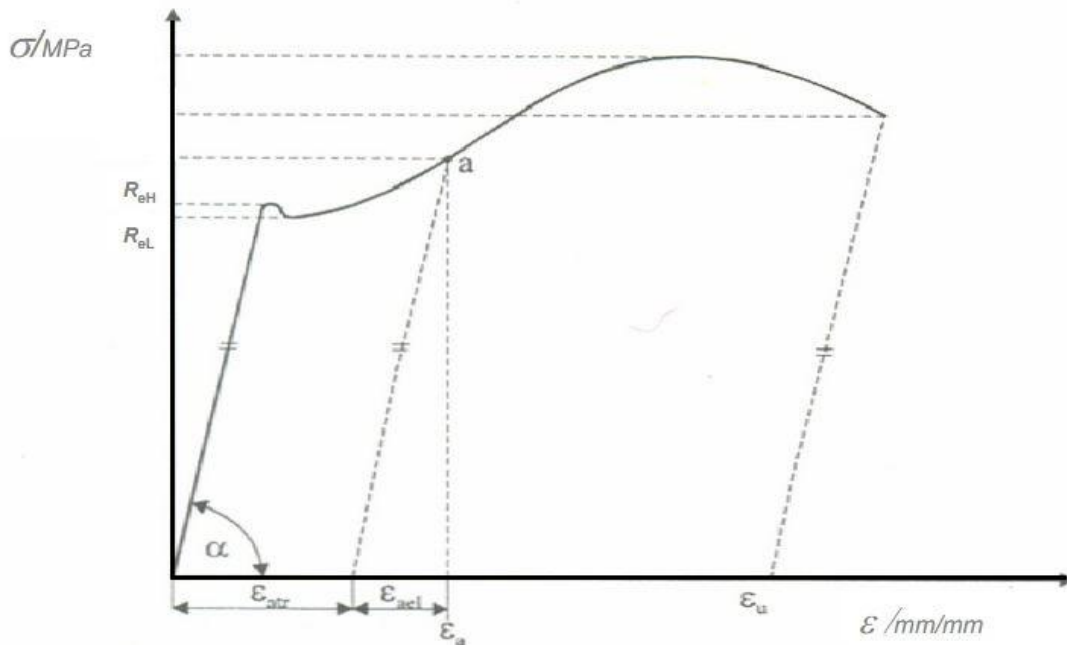
$$R_e = \frac{F_e}{S_0},$$

gdje je:

R_e [N/mm² ili MPa] – granica razvlačenja,

F_e [N]- sila na granici razvlačenja, a

S_0 [mm²] – ploština početnog presjeka ispitnog uzorka.



Slika 22. Granica razvlačenja [34]

Granicu razvlačenja karakteriziraju dvije vrijednosti: [34]

- 1) gornja granica razvlačenja (R_{eh})
- 2) donja granica razvlačenja (R_{el}).

Vrijednosti granice razvlačenja koje su propisane u tehničkim uvjetima isporuke materijala (obično kao minimalne vrijednosti), odnose se na gornju granicu razvlačenja R_{eH} . [35]

4.2.3. Vlačna čvrstoća

Vlačna ili rastezna čvrstoća (R_m) je osnovno mehaničko svojstvo uz granicu razvlačenja na temelju kojeg se materijali vrednuju prema njihovoj mehaničkoj otpornosti, a utvrđuje se izrazom: [34]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0},$$

gdje je:

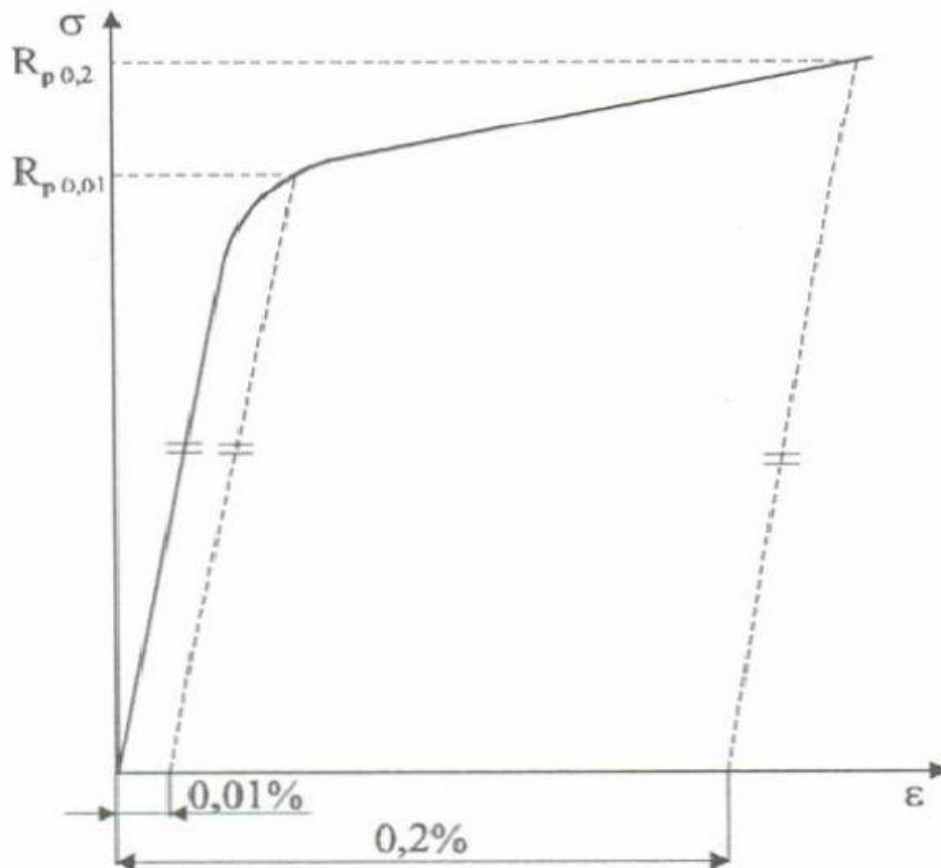
R_m [N/mm² ili MPa] – vlačna čvrstoća,

F_m [N] - maksimalna sila postignuta pri statičkom vlačnom pokusu, a

S_0 [mm²] - ploština početnog presjeka ispitnog uzorka.

4.2.4. Konvencionalna granica razvlačenja

Kod ostalih materijala koji imaju kontinuiran prijelaz iz područja elastičnih u područje plastičnih deformacija utvrđuje se konvencionalna granica razvlačenja (R_p) tj. ono naprezanje koje će nakon rasterećenja ostaviti u materijalu određenu plastičnu deformaciju (obično 0,2%).^[34]



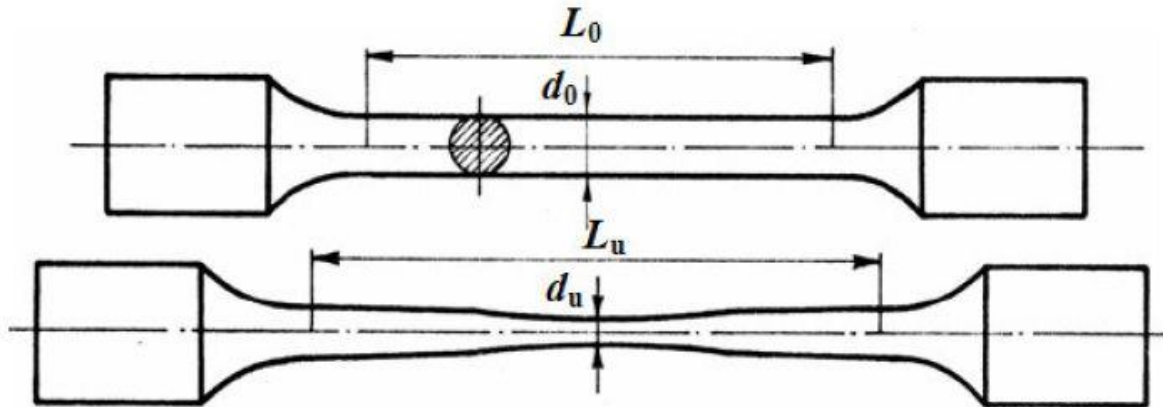
Slika 23. Konvencionalna granica razvlačenja za plastične deformacije 0,01 i 0,2% [34]

Značenje veličina iz dijagrama sa slike 23: ^[34]

- $R_{p0,01}$ – ostaje u materijalu plastična deformacija 0,01 % (tehnička granica elastičnosti)
- $R_{p0,2}$ – ostaje u materijalu plastična deformacija 0,2 %

4.2.5. Istezljivost

Istezljivost (A) je konačno relativno produljenje ili konačno istežanje u aksijalnom smjeru u odnosu na početnu mjernu duljinu L_0 .^[34,35]



Slika 24. Istezljivost epruvete [35]

Istezljivost (A) definirana je izrazom:^[34]

$$A = \frac{L_k - L_0}{L_0} \cdot 100,$$

pri čemu je:

A [%] – istežanje,

L_k [mm] – produljenje nakon kidanja i

L_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog uzorka.

Na osnovi iznosa istežljivosti (A), materijali se međusobno uspoređuju u pogledu deformabilnosti, ali valja napomenuti da iznos istežljivosti daje samo informaciju o deformabilnosti materijala u uzdužnom smjeru ispitnog uzorka.^[34]

4.2.6. Kontrakcija

Relativno smanjenje površine poprečnog presjeka ispitnog uzorka u odnosu na početnu površinu naziva se kontrakcija ili suženje.^[34]

Kontrakcija (Z) je definirana izrazom:^[34]

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100,$$

pri čemu je:

Z [%] – kontrakcija,

S_k [mm²] – ploština presjeka ispitnog uzorka na mjestu loma i

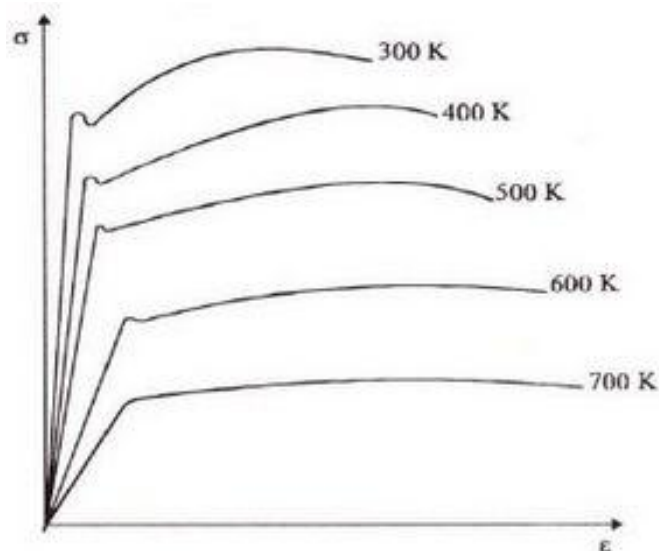
S_0 [mm²] – početna ploština presjeka ispitnog uzorka.

Istezljivost (A) i kontrakcija (Z) mehanička su svojstva koja se prvenstveno koriste za ispitivanje materijala pri obradbi deformiranjem. ^[34]

4.2.7. Statički vlačni pokus na povišenim temperaturama

Statički vlačni pokus na povišenim temperaturama koristi se za utvrđivanje ponašanja materijala na povišenim temperaturama. Primjena mu je za materijale koji će u eksploataciji biti izloženi povišenoj temperaturi (npr. kotlogradnja, energetska postrojenja itd.). Provodi se na ispitnim uzorcima koji se tijekom ispitivanja zagrijevaju na zadanu temperaturu. ^[38, 34]

Povišenje temperature dovodi do smanjenja granice razvlačenja (R_e) i vlačne čvrstoće (R_m), slabije izražene granice razvlačenja (R_e), povećanja istežanja (A) i smanjenja modula elastičnosti (E). ^[34]

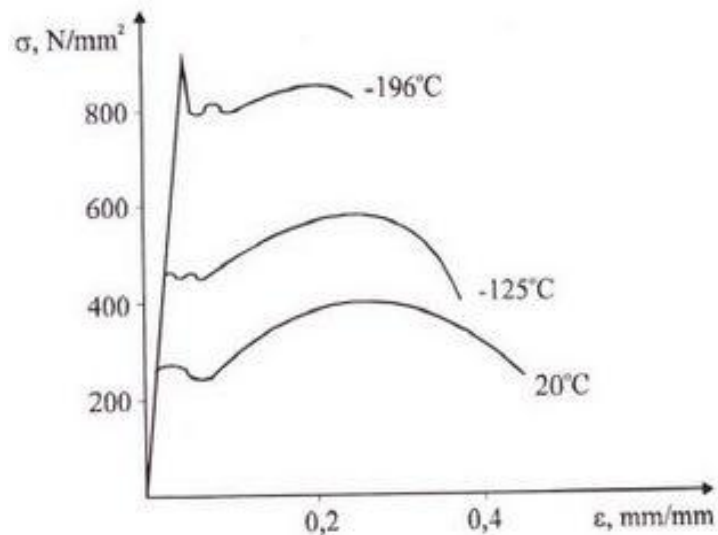


Slika 25. Utjecaj povišene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa[38]

Budući da je to kratkotrajno ispitivanje ono ne daje pravi uvid u ponašanje materijala kod povišenih temperatura (puzanje nastaje kod dugotrajnog statičkog naprezanja). ^[34]

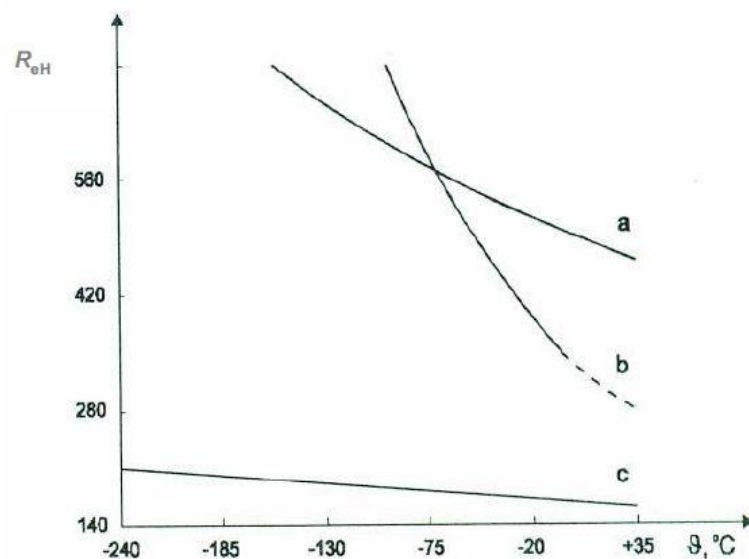
4.2.8. Statički vlačni pokus pri sniženim temperaturama

Statički vlačni pokus pri sniženim temperaturama koristi se za utvrđivanje utjecaja snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa. (slika 26) Provodi se na ispitnim uzorcima koji se tijekom ispitivanja kontinuirano hlade u odgovarajućoj komori. [38]



Slika 26. Utjecaj snižene temperature na rezultate statičkog vlačnog pokusa [38]

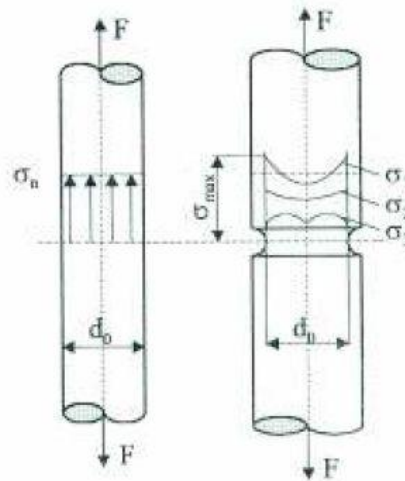
Snižavanje temperature dovodi do rasta granice razvlačenja (R_e) i vlačne čvrstoće (R_m), jače izražene granice razvlačenja i smanjenja istežanja (A). [34]



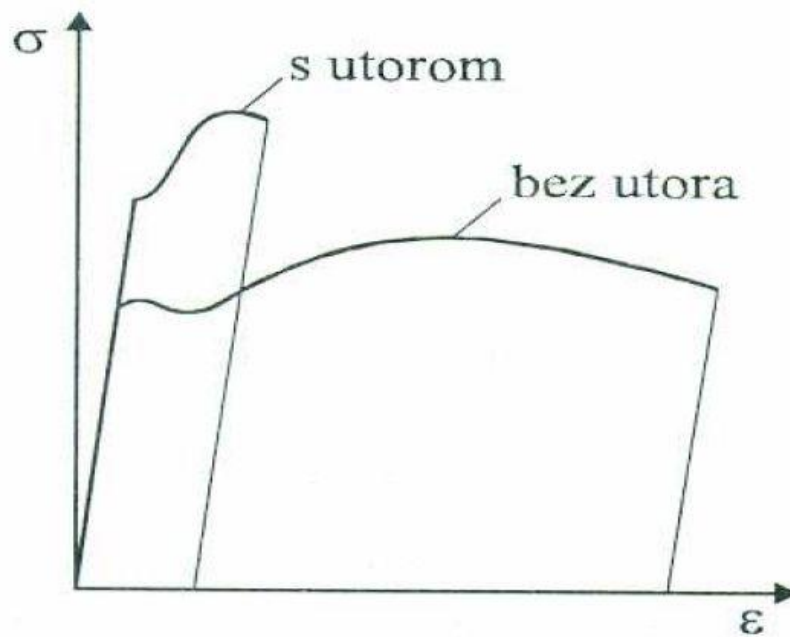
Slika 27. Utjecaj snižene temperature na granicu razvlačenja; a-legirani čelik, b-ugljični čelik, c-čisti nikel [34]

4.2.9. Utjecaj utora

U slučaju da se pokus provodi na ispitnim uzorcima koji imaju utor na radnom dijelu ili neko drugo oštećenje mijenja se intenzitet naprezanja, a time i rezultati pokusa. ^[34]



Slika 28. Raspodjela naprezanja u ispitnom uzorku s utorom [34]



Slika 29. Utjecaj utora na dijagram naprezanje (σ) – istezanje (ϵ) [34]

Kod ispitnih uzoraka s utorom granica razvlačenja (R_e) i vlačna čvrstoća (R_m) rastu, a istezanje (A) se smanjuje. ^[34]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu prevedeno je ispitivanje mehaničkih svojstava statičkim vlačnim pokusom martenzitnog nehrđajućeg čelika zavarenog TIG postupkom zavarivanja, na limu debljine 0,8 mm u zaštitnoj atmosferi čistog Argona.

5.1. Zavarivanje epruveta zadanim parametrima

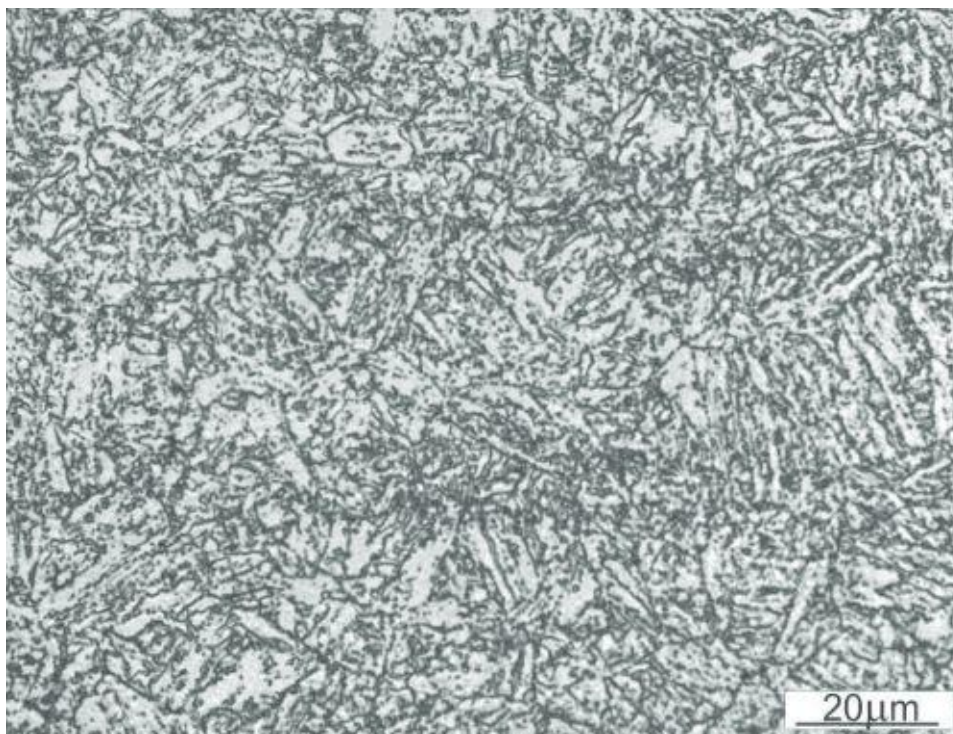
Uzorci su zavareni automatskim TIG postupkom zavarivanja, istosmjernom strujom (DC) iznosa oko 50 A, pri protoku plina 9 l/min u zaštitnoj atmosferi čistog argona bez korištenja dodatnog materijala. Vrsta osnovnog materijala je martenzitni nehrđajući čelik X20Cr13. Kemijski sastav tog čelika prema atestu materijala prikazan je u tablici 8, a mehanička svojstva u tablici 9.

Tablica 8. Kemijski sastav osnovnog materijala

KEMIJSKI SASTAV ČELIKA X20Cr13 [%]	
C	0,20
Si	0,47
Mn	0,62
P	0,0023
S	0,001
Cr	13,45
Mo	0,02
Ni	0,13

Tablica 9. Mehanička svojstva osnovnog materijala

MEHANIČKA SVOJSTVA ČELIKA	
$R_{p0,2}$ [N/mm²]	394
$R_{p0,1}$ [N/mm²]	436
R_m [N/mm²]	624
A [%]	18,6

*Slika 30. Mikrostruktura čelika X20Cr13 [39]*

5.2. Statički vlačni pokus zavarenih uzoraka

Mehaničko ispitivanje materijala statičkim vlačnim pokusom pri sobnoj temperaturi provedeno je u Laboratoriju za ispitivanje materijala, na Veleučilištu u Karlovcu, na kidalici Shimadzu AG-Xplus, prema normi HRN EN ISO 6892-1.

Ispitivanje je provedeno na tri epruvete koje su zavarene prema navedenim parametrima zavarivanja.

5.2.1. Opis kidalice Shimadzu AG X-plus

Ispitivanje uzoraka statičkim vlačnim pokusom izvršeno je kidalicom Shimadzu AG-X plus sa mjernim područjem do 100 kN. To je računalom upravljana kidalica koja omogućava provođenje ispitivanja i zapisivanja rezultata u elektronskom obliku kao i dobivanje Hookov-a dijagrama na temelju dobivenih rezultata ispitivanja materijala.

Specifikacije kidalice Shimadzu AG-X plus su:

- mjerno područje do 100 kN,
- ispitivanje na vlak, tlak i savijanje,
- mogućnost ispitivanja plosnih epruveta 0-21 mm (100/50 kN),
- mogućnost ispitivanja okruglih epruveta D4-D24 (100/50kN).



Slika 31. Kidalica Shimadzu AG-Xplus [40]

5.2.2. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja zavarenih epruveta nalaze se u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja statičkim vlačnim pokusom zavarenih epruveta

REZULTATI ISPITIVANJA			
Epruveta	1	2	3
Dimenzije epruvete	0,8x210	0,8x210	0,8x210
Granica razvlačenja, R_e [N/mm²]	361,220	335,313	365,822
Vlačna čvrstoća, R_m [N/mm²]	606,336	433,150	608,118
Istezanje, A [%]	18,897	3,392	19,635
Napomena:			
Na epruveti 2 zabilježeno je pucanje epruvete na mjestu metala zavara.			

5.2.3. Analiza rezultata ispitivanja

Usporedbom vlačne čvrstoće dobivenih rezultata s vrijednostima na osnovnom materijalu, te time što je lom nastao u osnovnom materijalu, može se zaključiti da je vlačna čvrstoća metala zavara veća od osnovnog materijala, stoga se zavar može ocijeniti kao dobar.

Epruveta 2 koja je prilikom ispitivanja pukla kao staklo može ukazivati na potpuno odsustvo zaštitnog plina što je vrlo značajan podatak za daljnje ispitivanje.

6. ZAKLJUČAK

Nehrđajući čelici se zahvaljujući širokom rasponu mehaničkih, korozivskih i drugih svojstava primjenjuju u mnogim granama industrije, kao npr. u kemijskoj i petrokemijskoj industriji, građevini, medicini, automobilskoj industriji itd.

Iako se smatraju čelicima sa dobrom zavarljivošću može doći do problema prilikom njihovog zavarivanja, neki od tih problema kao i pripadajuća rješenja navedeni su u ovom radu. Nehrđajući čelici mogu se zavarivati svim postupcima taljenja i pritiskom, a TIG postupak spada u najčešće primjenjivane postupke zavarivanja ove vrste čelika.

TIG postupkom zavarivanja najčešće se zavaruju tanki dijelovi (limovi, cijevi, razne posude) koji se teže zavaruju drugim postupcima zavarivanja.

U ovom radu donesene su procjene zavara na temelju izvršenog ispitivanja statičkim vlačnim pokusom na tri epruvete zavarene automatskim TIG postupkom zavarivanja čiji je materijal nehrđajući martenzitni čelik X20Cr13. Usporedbom vrijednosti vlačne čvrstoće dobivene ispitivanjem i vlačne čvrstoće osnovnog materijala, te time što je do puknuća epruveta došlo na mjestu osnovnog materijala donesen je zaključak da je zavar na prvoj i trećoj epruveti ispao dobar. Druga epruveta je prilikom ispitivanja pukla poput stakla na mjestu zavara, što može ukazivati na potpuno odsustvo zaštitnog plina te je taj podatak vrlo značajan za daljnja ispitivanja.

7. Literatura

1. Samardžić, I.; Klarić, Š.; Despotović, B.; Topić, V.; Kožul, A.: „ANALIZA TEHNOLOGIČNOSTI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA – digitalni udžbenik“, s Interneta, http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/sto_zavar.html, dostupno 5 lipnja 2017
2. Delić, B.: „Classification and properties of high alloy steels – application in welding“, Collection of papers – International symposium, Weldability of high alloy steels and welding of equipment and structures of the same materials, March, 14 – 16 1979 - Belgrad
3. Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, A. Baggerud: „Metalurgija zavarivanja“, Zagreb, 1987.
4. dr.sc. Vera Rede, izv. prof.: Nehrđajući čelici; Zavod za materijale, s Interneta, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1385548905-0-i_predavanje_13.pdf, dostupno 10 lipnja 2017
5. prof.dr.sc. Ivan Juraga, Vinko Šimunović, dipl. ing., Ivan Stojanović, dipl. ing. Fakultet strojarstva i brodogradnje: „ZAVARIVANJE Cr-Ni ČELIKA, KOROZIJSKA POSTOJANOST, RUKOVANJE“; 4. SEMINAR, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), 24 svibnja 2007, Pula
6. <http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/stainless-steel-architecture.php>, s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
7. Kožuh, S.: Specijalni čelici – skripta, Metalurški fakultet, Sisak, 2010
8. „MARTENZITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI“, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1383571615-0-ssnc_3i4_pred_tekst.pdf, s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
9. „FERITNI KOROZIJSKI POSTOJANI ČELICI“, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1385038346-0-ssnc_5i6_pred_tekst.pdf, s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
10. „AUSTENITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI“, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1354629739-0-ssnc_7i8_pred_tekst.pdf, s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
11. „DUPEKS NEHRĐAJUĆI ČELICI“, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf, s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
12. <http://beta.bib.irb.hr/87928>, s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
13. Palić, V.: „ZAVARIVANJE 1 – drugo izdanje“, Novi Sad, 1983.
14. Juraga, I.: Zavarivanje čelika otpornih na koroziju u: Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje 37, Zagreb, 1994.
15. „SPECIJALNI KONSTRUKCIJSKI ČELICI“, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1331628650-0-speckonstrcelici.pdf, s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
16. Juraga, I., et al.: Zavarivanje visokolegiranih čelika - zbornik radova
17. Babić, N.: „A-TIG ZAVARIVANJE DUPLEX ČELIKA“, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
18. Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, I. Grgurina: „Zavarivanje cijevi“, Zagreb, 1986.
19. Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, M. Živčić: „TIG zavarivanje“, Zagreb, 1986

20. <https://www.safaribooksonline.com/library/view/manufacturing-process-selection/9780080993607/xhtml/CHP011.html> , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
21. „The Procedure Handbook of Arc Welding, twelfth edition“, Lincoln Electric, Cleveland-Ohio, lipanj 1973
22. M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: „TEORIJSKE I PRAKTIČNE OSNOVE TIG POSTUPKA ZAVARIVANJA“, stručni članak, Technical journal 8, 4(2014), 426-432
23. O'Brien R. L.: „Welding Handbook, Welding processes, eighth edition, vol.2“, Miami, 1991.
24. <http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/he/index.html> , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
25. Miller: Guidelines For Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), 2013, 9-21 str.
26. http://navybm.com/study%20material/14250a/14250A_ch9.pdf , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
27. <https://dir.indiamart.com/impcat/tig-welding-torch.html> , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
28. <http://mafatin.com/wiring/with-wire-feed-tig-torches.php> , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
29. <http://www.airgas.com/product/Welding-Products/Welding-Support-Equipment/TIG-Torches/p/WCPWP-20P-12> , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
30. https://www.alibaba.com/product-detail/Flexible-Tig-welding-Torch-Head-in_151154631.html , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
31. <http://wolfram-industrie.de/en/products/electrodes/> , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
32. <https://www.pinterest.com/pin/442619469607838453/> , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
33. https://www.alibaba.com/product-detail/IGBT-inverter-automatic-Stainless-Steel-pipe_480963734.html , s Interneta, dostupno 25 lipnja 2017
34. doc.dr.sc. Stoja Rešković: „ISPITIVANJE MATERIJALA“; Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu; s Interneta, <https://www.scribd.com/doc/22051398/PREDAVANJA> , dostupno 7 srpnja 2017
35. Prof.dr.sc. Ivica Kladarić: „MATERIJALI 1 – MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA – Statički vlačni pokus“; s Interneta, <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Vlacni%20pokus.pdf> , dostupno 7 srpnja 2017
36. <http://www.wikiwand.com/hr/Naprezanje> , s Interneta, dostupno 7 srpnja 2017
37. Bojan Kraut: „STROJARSKI PRIRUČNIK“; Sedmo potpuno prerađeno i dopunjeno hrvatsko ili srpsko izdanje; Tehnička knjiga, Zagreb, 1982.
38. Tihana Kostadin, mag.ing.stroj.: „KOLEGIJ: ISPITIVANJE MATERIJALA – Interna skripta“; Sveučilište u Karlovcu, Studij strojarstva, ak. godina 2013./2014. – V semestar
39. https://www.researchgate.net/profile/Bogdan_Pawtowski/publication/233425375_The_analysis_of_forging_of_X20Cr13_steel_in_austenite-ferrite_transformation_temperature_range/links/02bfe511a0d5380226000000/The-analysis-of-forging-of-X20Cr13-steel-in-austenite-ferrite-transformation-temperature-range.pdf , s Interneta, dostupno 7 srpnja 2017
40. <http://www.shimadzu.com/an/test/universal/ag-xplus/ag-xplus3.html> , s Interneta, dostupno 7 srpnja 2017

