



Univerza v Mariboru

Fakulteta za energetiko

Luka Perović

Navarjevanje jeklenih površin z uporabo robotskega varjenja

Diplomsko delo

Velenje, avgust 2023

Luka Perović

Navarjevanje jeklenih površin z uporabo robotskega varjenja

Diplomsko delo

Študent:	Luka Perović
Študijski program:	univerzitetni študijski program 1. stopnje Energetika
Mentor:	izr. prof. dr. Zdravko Praunseis
Somentor:	asistent Klemen Sredenšek
Lektorica:	Mojca Trauner, mag. prof. slov. jezika



ZAHVALA

Iskrena hvala izr. prof. dr. Zdravku Praunseisu za nesebično podporo, dragocene nasvete in neprecenljivo pomoč, ki mi jo je nudil med pisanjem diplomske naloge. Vaša strokovnost in predanost sta bili izjemni v celotnem procesu raziskovanja in pisanja, kar je vodilo do končnega uspeha. Zahvala gre tudi asistentoma Klemnu Sredenšku in Bojanu Stergarju za pomoč pri eksperimentalnem delu diplomske naloge. Njuna predanost in strokovnost sta mi omogočili, da sem se spoprijel z izzivi in pridobil dragocene izkušnje pri izvedbi raziskav.

Posebno priznanje tudi moji družini, ki mi je stala ob strani in nudila neprecenljivo podporo skozi celotno obdobje študija. Brez vaše ljubezni in spodbude bi bil ta dosežek nemogoč.

NAVARJEVANJE JEKLENIH POVRŠIN Z UPORABO ROBOTSKEGA VARJENJA

Ključne besede: spajanje materiala, varjenje, eksperimentalno preizkušanje, robotsko varjenje, kemična analiza

UDK: 621.791:007.52(043.2)

Povzetek

Varjenje je spajanje dveh ali več delov v eno, nerazdružljivo celoto, ki jo imenujemo zvarjenec. Z varjenjem je mogoče spojiti kovine, polimere, steklo, keramiko, karbide, kompozite itd. Lahko pa se med seboj varijo tudi kovine in nekovine. Pri varjenju kovinskih materialov poznamo v osnovi dva tipa varjenja. Prvi tip varjenja je varjenje pod pritiskom, drugi način pa je varjenje s taljenjem.

Ker svetovni trg vedno bolj teži k avtomatizaciji proizvodnih procesov, so se roboti do danes uveljavili v marsikaterem tehnološkem in proizvodnem procesu, saj so se izkazali za zelo učinkovite. Glavni razlog za avtomatizacijo so kakovost, nižji stroški in razbremenitev delavcev. Kljub temu, da se robotsko varjenje še vedno razvija, se uveljavlja v vedno podjetjih. Robotsko varjenje izvajajo izključno vnaprej programirani roboti, ki se odlikujejo predvsem po svoji zanesljivosti. Z uvajanjem robotov v proces

varjenja tako bistveno prispevamo k večji zanesljivosti in tudi kakovosti delovanja, saj so sposobni nemoteno delovati tudi po 24 ur in več. Podjetja s tem dosegajo večjo kakovost, produktivnost in tudi manjše stroške proizvodnje. Zato se robotsko varjenje splača predvsem ob večjih naročilih, saj je ponovljivost varjenja brez napak izjemno visoka; res pa je, da je potrebno robote v tem primeru ustrezno sprogramirati.

V nalogi so obravnavani enakovarni navari na ravnih ploščah, ki se v praksi pogosto uporabljajo za popravilo poškodovanih površin energetskih komponent in zvišanje mehanskih lastnosti osnovnega materiala.

S pomočjo razreza navarkov in izvedbo izvedbo metalografske preiskave prereza navarka bomo izvedli kontrolo kvalitete navarkov (var + toplotno vplivano področje).

WELDING OF STEEL SURFACES USING ROBOTIC WELDING

Key words: joining of materials, welding, experimental testing, robotic welding, chemical analysis

UDC: 621.791:007.52(043.2)

Abstract

Welding is the joining of two or more parts into one, inseparable whole, which is called a weldment. Metals, polymers, glasses, ceramics, carbides, composites, etc. can be joined by welding. Metals and non-metals can also be welded together. When welding metal materials, there are basically two types of welding. The first type of welding is pressure welding and the second method is fusion welding.

Since the world market is increasingly moving towards the automation of production processes, robots have established themselves in many technological and production processes to date, as they have proven to be very efficient. The main reason for automation is quality, lower costs and relief from workers. Despite the fact that robotic welding is still developing, it is increasingly established in more companies. Robotic welding is performed exclusively in the forward direction programmed robots that stand out above all for their reliability.

By introducing robots into the welding process, we significantly contribute to greater reliability and also the quality of operation, as they are capable of working uninterrupted even for 24 hours or more. Companies thereby achieve higher quality, productivity and lower production costs. Therefore, robotic welding is especially worthwhile for larger orders, as the reproducibility of welding without errors is extremely high, but it is true that the robots must be properly programmed in this case.

The task will deal with single-wave welds on flat plates, which are widely used in practice to repair damaged surfaces of energy components and increase the mechanical properties of the base material.

IZJAVA O AVTORSTVU



Fakulteta za energetiko
(ime članice UM)

IZJAVA O AVTORSTVU ZAKLJUČNEGA DELA

Ime in priimek študenta/-ke: Luka Perović

Študijski program: ENERGETIKA

Naslov zaključnega dela: Navarjevanje jeklenih površin z uporabo robotskega varjenja

Mentor/-ica: Zdravko Praunseis

Somentor/-ica: Klemen Sredenšek

Podpisani/-a študent/-ka Luka Perović

- izjavljam, da je zaključno delo rezultat mojega samostojnega dela, ki sem ga izdelal/-a ob pomoči mentorja/-ice oz. somentorja/-ice;
- izjavljam, da sem pridobil/-a vsa potrebna soglasja za uporabo podatkov in avtorskih del v zaključnem delu in jih v zaključnem delu jasno in ustrezno označil/-a;
- na Univerzo v Mariboru neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi zaključno delo javnosti na svetovnem spletu preko DKUM; sem seznanjen/-a, da bodo dela, deponirana/objavljena v DKUM, dostopna široki javnosti pod pogoji licence Creative Commons BY-NC-ND, kar vključuje tudi avtomatizirano indeksiranje preko spleta in obdelavo besedil za potrebe tekstovnega in podatkovnega rudarjenja in ekstrakcije znanja iz vsebin; uporabnikom se dovoli reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo;
- dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v zaključnem delu in tej izjavi, skupaj z objavo zaključnega dela.

Uveljavljam permissivnejšo obliko licence Creative Commons: _____
(navedite obliko)

Kraj in datum:
Velenje 4.08.2023

Podpis študenta/-ke:


IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA DELA



Fakulteta za energetiko
(ime članice UM)

IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA DELA

Ime in priimek študenta/-ke: Luka Perović

Študijski program: ENERGETIKA

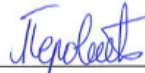
Naslov zaključnega dela: Navarjevanje jeklenih površin z uporabo robotskega varjenja

Mentor/-ica: Zdravko Praunseis

Somentor/-ica: Klemen Sredenšek

Podpisani/-a študent/-ka Luka Perović
izjavljam, da je tiskana oblika zaključnega dela istovetna elektronski obliki zaključnega dela, ki sem jo oddal/-a za objavo v DKUM.

Kraj in datum:
Velenje 4.08.2023

 Podpis študenta/-ke:

KAZALO VSEBINE

ZAHVALA	III
NAVARJEVANJE JEKLENIH POVRŠIN Z UPORABO ROBOTSKEGA VARJENJA	IV
WELDING OF STEEL SURFACES USING ROBOTIC WELDING	VI
IZJAVA O AVTORSTVU	VIII
IZJAVA O ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA DELA	IX
KAZALO VSEBINE	X
KAZALO SLIK	XII
KAZALO TABEL	XIV
UPORABLJENI SIMBOLI	XV
UPORABLJENE KRATICE	XVI
1 UVOD	1
2 TEORETIČNI DEL	3
2.1 NAVARJEVANJE JEKLENIH POVRŠIN	3
2.2 NASTANEK IN OBMOČJE ZVARA	5
2.3 PRIPRAVA ZVARNEGA ŽLEBA	6
2.4 PREDGREVANJE	6
2.5 TEORETIČNI IZRAČUN TEMPERATURE PREDGREVANJA	8
2.5.1 <i>Izračun temperature predgrevanja z upoštevanjem kemijske sestave, debeline osnovnega materiala in količino absorbiranega vodika v zvaru glede na vrsto dodatnega materiala</i>	<i>9</i>
2.6 EKSPERIMENTALNA DOLOČITEV TEMPERATURE PREDGREVANJA	10
2.7 DOLOČITEV OBČUTLJIVOSTI ZVARNEGA SPOJA NA POJAV RAZPOK V VROČEM (PRI OHLAJANJU, MED 900 IN 700 STOPINJAMI), PRI NERJAVNIH JEKLIH (AVSTENITNIH JEKLIH)	12
2.8 VNOS TOPLOTE	13
2.9 ČAS OHLAJANJA ZVARA MED 800 IN 500 °C	15

3 RAZLIČNI POSTOPKI NAVARJEVANJA	17
3.1 TALILNO VARJENJE.....	17
3.2 VARJENJE BREZ TALJENJA	17
3.3 LOTANJE.....	17
3.4 VARJENJE S TIG POSTOPKOM	18
3.5 VARJENJE Z MIG POSTOPKOM.....	20
3.6 VARJENJE Z MAG POSTOPKOM	22
4 EKSPERIMENTALNI DEL	24
4.1 PREDSTAVITEV ROBOTA Z VIRTUALNO ROBOTSKO CELICO	24
4.2 IZBIRA MATERIALA ZA NAVARJEVANJE IN ROBOTSKO VARJENJE.....	25
4.3 KEMIČNA ANALIZA Z UPORABO NAPRAVE NITON GOLD+	27
4.4 PREGLED NAVARKA Z OPTIČNIM MIKROSKOPOM IN MERJENJE MIKROTRDOTE	39
5 ZAKLJUČEK	46
VIRI IN LITERTURA	48

KAZALO SLIK

Slika 2.1: Prikaz spremembe mikrostrukture in žilavosti v varu in TVP [13]	4
Slika 2.2: Material zvara je sestavljen iz vara in TVP [10]	5
Slika 2.3: Sočelno varjenje jekla z 0,2 % ogljika in nastanek zvara [4]	6
Slika 2.4: Temperaturo predgrevanja merimo v skladu z navodili standarda, 100 mm od mesta vara [13]	7
Slika 2.5: Preizkušavec za izvedbo <i>Y – preizkusa</i> [10]	11
Slika 2.6: Prerez preizkušanca za <i>Y – preizkus</i> [10]	11
Slika 2.7: Diagram hladne razpokljivosti za dva različna jekla A in B [13]	12
Slika 2.8: Schaflerjev diagram [4]	13
Slika 2.9: Vpliv hitrosti varjenja na vneseno energijo [13]	15
Slika 2.10: Vpliv debeline in temperature predgrevanja na vneseno energijo pri varjenju sočelnih zvarnih spojev [5]	16
Slika 3.1: Shematski prikaz varjenja v zaščiti plina argona [1]	19
Slika 3.2: Postopek varjenja po MIG postopku [8]	22
Slika 4.1: Upravljalna prenosna enota robota [9]	25
Slika 4.2: Robotska celica in priprava materiala za varjenje - čiščenje [9]	25
Slika 4.3: Vpetje osnovnega materiala pred pričetkom varjenja [9]	26
Slika 4.4: Izvedba navarov na ravno ploščo [9]	26
Slika 4.5: Metalografsko rezanje jeklenege traka z navarom brez vpliva toplote-hladni rez [9]	26
Slika 4.6: Shematski prikaz spektralnega analizatorja NITON GOLD+ [6]	27
Slika 4.7: Funkcijski deli zgornjega dela naprave NITON GOLD+ [6]	28
Slika 4.8: Možni vhodi v merilno napravo NITON GOLD+ [6]	28
Slika 4.9: Praktična izvedba merjenja preko povezave z računalnikom [9]	29
Slika 4.10: Zaslonski prikaz rezultatov kemične analize vzorca [9]	30

Slika 4.11: Programska izvedba prikazanih rezultatov kemične analize.....	31
Slika 4.12: Priprava materiala za zalitje vzorcev in oblikovanje okroglih brusov	32
Slika 4.13: Uporabljeni materiali za zalivanje metalografskih vzorcev in izdelavo okroglih brusov [9].....	32
Slika 4.14: Priprava dvokomponentne mešanice za zalivanje vzorcev [9]	33
Slika 4.15: Hladno zalivanje vzorcev [9].....	33
Slika 4.16: Strjeni metalografski brus z navarkom po 24 h od hladnega zalivanja [9] .	34
Slika 4.17: Različne zrnatosti brusnih papirjev [9]	35
Slika 4.18: Avtomatski - revolverski način brušenja metalografskih brusov [9].....	35
Slika 4.19: Polirna tekočina za poliranje metalografskih brusov [9]	36
Slika 4.20: Diamantna polirna tekočina za poliranje metalografski brusov [9].....	36
Slika 4.21: Pričetek poliranja metalografskega obrusa [9]	37
Slika 4.22: Hkratno poliranje metalografskih brusov [9]	38
Slika 4.23: Finiširanje poliranja metalografskih vzorcev s polirno tekočino [9]	38
Slika 4.24: Postopek merjenja trdote po Vickersu [13]	40
Slika 4.25: Prikaz najmanjše debeline vzorca, najmanjše razdalje med robom vzorca in vtiskom, ter najmanjše razdalje med zaporednima vtiskoma [12]	41
Slika 4.26: Priprava metalografskega obrusa-vzorec A pred poliranjem, nejedkan (5X)	41
Slika 4.27: Vzorec A po izvedenem poliranju (50X) [9].....	42
Slika 4.28: Enovarkovni navarek - vzorec A (50X) [9]	42
Slika 4.29: Shematski prikaz naprave za merjenje trdote po Brinellu ali Vickersu [13] .	43
Slika 4.30: Merjenje mikrotrdote v smeri skozi var, zajeto področje OM, TVP in vara - vzorec A (100X) [9].....	43
Slika 4.31: Merjenje mikrotrdote v osnovnem materialu (50X) [9].....	44
Slika 4.32: Določitev mikrotrdote po Vickersu z pol avtomatsko merilno napravo Vilson (100X) [9]	44

KAZALO TABEL

Tabela 4.1: Rezultati kemične analize (Vzorec A)	30
Tabela 4.2: Rezultati kemične analize (Var – Vzorec B).....	31
Tabela 4.3: Izmerjena mikrotrdota po Vickersu v področju osnovnega materiala, toplotno vplivanega področja in vara	45

UPORABLJENI SIMBOLI

<i>Ar</i>	–	argon
<i>Al</i>	–	aluminij
<i>Cr</i>	–	krom
<i>CO₂</i>	–	ogljikov dioksid
<i>H</i>	–	vodik
<i>He</i>	–	helij
<i>Fe</i>	–	železo
<i>Mn</i>	–	mangan
<i>Cu</i>	–	baker
<i>Si</i>	–	silicij
<i>Cr</i>	–	krom
<i>Mo</i>	–	molibden
<i>Ti</i>	–	titan
<i>Bi</i>	–	bizmut
<i>Ni</i>	–	nikelj
<i>V</i>	–	vanadij
<i>S</i>	–	žveplo

UPORABLJENE KRATICE

NHO ₃	–	dušikova kislina
MIG	–	metal inert gas
MAG	–	metal active gas
TIG	–	tungsten inert gas
TVP	–	toplotno vplivano področje

1 UVOD

V zadnjih desetih letih se na trgu dela soočamo s pomanjkanjem kadra s strokovno izobrazbo za izvedbo varjenja. Ena od možnih rešitev nastalega problema je avtomatizacija varjenja z uporabo robotske celice za varjenje.

Navarjevanje materialov je postopek združevanja dveh ali več kovinskih ali zlitinskih kosov z uporabo taljenja in dodajanja dodatnega materiala v obliki polnila ali žice. Ta postopek se uporablja za obnovo, popravilo ali izboljšanje lastnosti materialov.

Postopek navarjevanja se običajno izvaja z uporabo posebnih varilnih aparatov, ki ustvarjajo visoko temperaturo, ki talijo osnovni kos materiala in dodatni material. Dodatni material se lahko uporablja v obliki polnila, kar je pogosto potrebno pri obnovi izgubljenega materiala, ali v obliki žice, ki se uporablja za dodajanje dodatnega materiala pri popravilu ali izboljšanju [1-6].

Navarjevanje ima nekaj prednosti. Uporablja se lahko za obnovo poškodovanih ali obrabljenih delov, kar podaljšuje življenjsko dobo komponent. Prav tako se lahko uporablja za popravilo razpok, spojev ali drugih napak. Navarjevanje omogoča tudi združevanje različnih materialov za doseganje specifičnih lastnosti, kot so izboljšana odpornost proti koroziji ali povečana trdnost.

Obstaja več metod navarjevanja, vključno z MIG/MAG navarjevanjem, TIG navarjevanjem, navarjevanjem s prevlečeno elektrodo (FCAW), navarjevanjem s prekrito elektrodo (SMAW) in drugimi. Izbira ustrezne metode je odvisna od materiala, ki ga navarjujemo, velikosti in oblike spoja ter želenih lastnosti spoja. Pomembno je poudariti, da navarjevanje zahteva visok nivo strokovnega znanja in spretnosti, da se zgradi kakovosten navarek z vsemi predpisanimi mehanskimi lastnostmi. Zaradi tega je

treba pri bolj zapletenih ali kritičnih projektih poiskati nasvet strokovnjakov ali izkušenih varilnih tehnologov in varilcev, da se dosežejo najboljši rezultat izgradnje navarkov.

Varjenje se veliko uporablja v moderni strojogradnji. Ker gre za postopek spajanja materialov s pomočjo taljenja, je izdelava izdelkov izredno produktivna in stroškovno ugodna [7-13].

Praktični del naloge je bil izveden na Inštitutu za energetiko in je obsegal izdelavo različnih navarov z uporabo robotske celice z MAG varilnim postopkom. Iz navarov so se odvzeli metalografski vzorci za izdelavo metalografskih obrusov, ki so se pregledali pod optičnim mikroskopom za določitev nastalih mikrostruktur po varjenju. V celotnem področju osnovnega materiala, toplotno vplivanega področja in materiala vara so bile izmerjene mikrotredote po Vickersu. Narejena je bila ocena kakovosti izdelave navarkov glede na različne vnose energije pri varjenju.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 NAVARJEVANJE JEKLENIH POVRŠIN

Varjenje je postopek spajanja s toploto, ker stalimo in spojimo enake ali različne materiale v nerazstavljivo, trajno zvezo.

V inovativni industriji je robotsko varjenje nepogrešljivo, saj predstavlja pomemben člen konstruiranja izdelka in predstavlja avtomatizacijo izdelave izdelka, ekonomičnost in višjo raven kakovosti izdelka. Z varjenjem ne spajamo samo kovinskih materialov, ampak tudi nekovinske, kot so npr. polimeri [1].

Pri varjenju materialov moramo upoštevati pogoje varivosti materiala, ki vključuje:

- kemično sestavo materiala (ali je material primeren za varjenje);
- pojav možnih razpok, ki vodijo v krhki lom materiala;
- pregled mikrostrukture materiala in izogibanje pojavu trde martenzitne mikrostrukture.

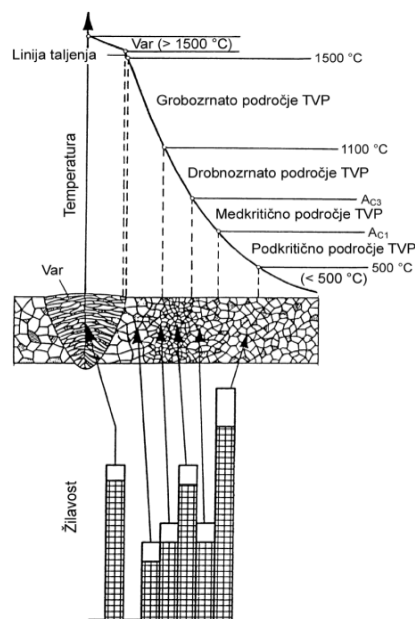
V tem primeru govorimo o dobri varivosti osnovnega in dodajnega materiala, pravilno izbranem postopku varjenja in pravilno predpisani tehnologiji varjenja. Pri varjenju je potrebno upoštevati debelino materiala, vpliv nečistoč v materialu, t. i. nekovinskih vključkov, in prevelik vnos plinov (kisik, dušik, vodik) pri varjenju preko dodajnega materiala (žic, elektrod, trakov itd).

Martenzitno mikrostrukturo, ki je izredno trda, povzroča ogljik. Zaradi navedenega je omejena vsebnost ogljika na 0,21–0,31 % in predstavlja mejno vrednost. Če želimo variti jekla z vsebnostjo ogljika nad 0,31 %, potem moramo takšna jekla obvezno predgrevati.

Drugi pogoj pa je ta, da moramo paziti na maksimalno dovoljeno prisotnost nečistoč v jeklu, ki ne smejo presegati 0,045 % fosforja in žvepla. Skupnih nečistoč v jeklu naj ne bi bilo več kot 0,11 %, limitirati pa je potrebno tudi skupno vsebnost neželenih plinov, predvsem vodika [2-5].

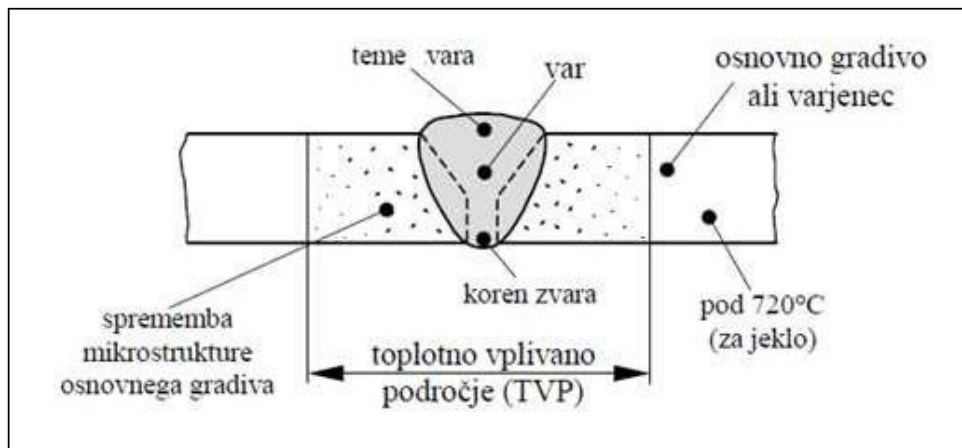
Z varjenjem trajno spojimo različne ali enake materiale v togo zvezo, ki ji pravimo zvarni spoj. Zvarni spoj je sestavljen iz materiala zvara in toplotno vplivanega področja (TVP). Materialu, ki ga varimo, pravimo osnovni material. Material zvara gradimo s taljenjem dodatnega materiala (žica, trak, elektroda itd.) Danes praktično lahko varimo vse materiale, saj z laboratorijsko tehniko lahko izdelamo prav vsak dodajni material. Najpogosteje varimo kompozite, jekla, polimere, barvne kovine itd. [5].

Kovinske materiale lahko varimo na način, da zvarni spoj nastane s taljenjem ali trenjem. Na sliki 2.1 je prikaz spremembe mikrostrukture in žilavosti v varu in TVP.



Slika 2.1: Prikaz spremembe mikrostrukture in žilavosti v varu in TVP [13]

Na Sliki 2.2 je prikazana sestava vara.

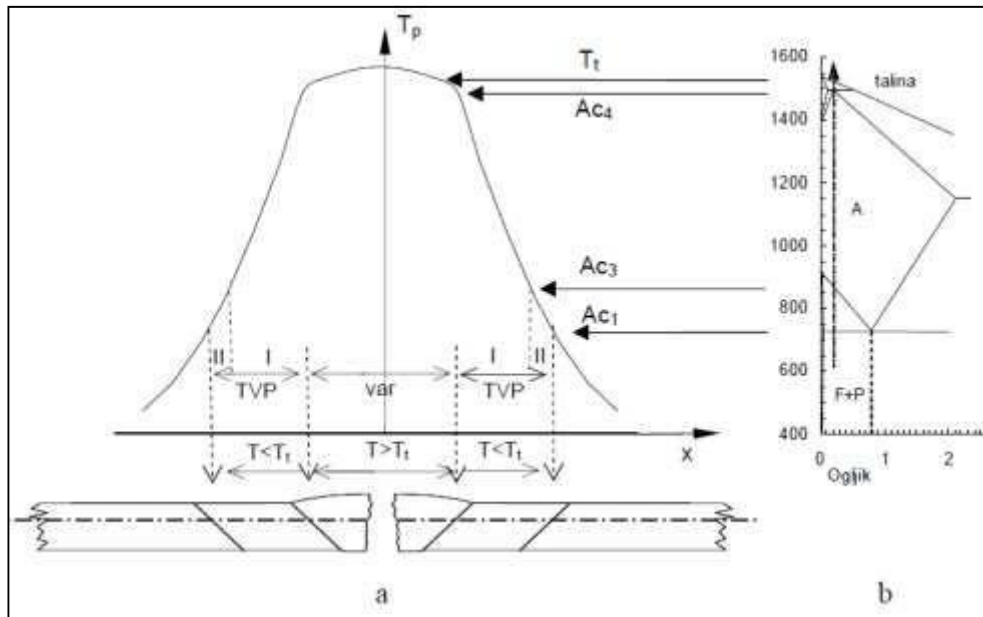


Slika 2.2: Material zvara je sestavljen iz vara in TVP [10]

2.2 NASTANEK IN OBMOČJE ZVARA

Pri varjenju stalimo dodajni material s pomočjo toplote ali trenjem. Pri tem postopku taljenja materiala ima nastala toplota izrazit vpliv na osnovni material. Osnovnemu materialu se v ozkem področju na meji z materialom zvara drastično spremeni mikrostruktura na način, da nastanejo ozka področja z izrazito visoko trdoto in nizko žilavostjo. Temu ozkemu področju s kritično mikrostrukturo pravimo toplotno vplivano področje (TVP). Velja pravilo, da večji vnos toplote v osnovni material pomeni širše toplotno vplivano področje in obratno. Večje je segrevanje materiala med varjenjem, tem bolj je izrazit vpliv varjenja na osnovni material in s tem na nastanek zvarnega spoja. Slika 2.3 a primer prikazuje segrevanje materiala med varjenjem, v odvisnosti od razdalje do linije zlitja. Pri tem nastane material zvara s pripadajočim toplotno vplivanim področjem, ki se širi v osnovni material. Pri tem je pomembna študija diagrama Fe-Fe₃C (Slika 2.3 b primer), saj s pomočjo diagrama lahko podrobno analiziramo različna temperaturna področja, ki nastanejo pri ohlajanju zvarnega spoja (materiala zvara in toplotno vplivanega področja) [9].

Na sliki 2.3 je prikazano sočelno varjenje jekla z 0,2 % ogljika in nastanek zvara.



Slika 2.3: Sočelno varjenje jekla z 0,2 % ogljika in nastanek zvara [4]

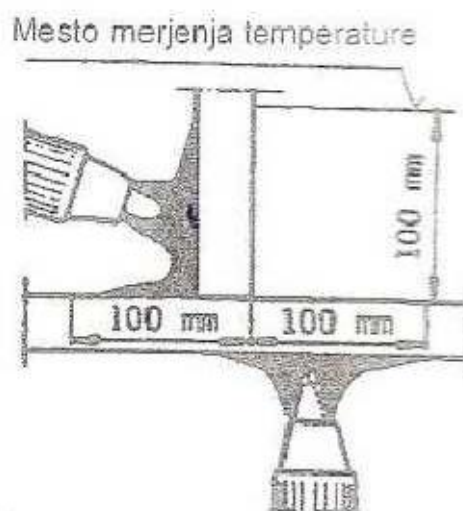
2.3 PRIPRAVA ZVARNEGA ŽLEBA

Večje debeline jekel spajamo med seboj s pripravo zvarnih žlebov. Zvarni žlebovi se izdelujejo po standardu DIN EN 29692, in sicer z mehanskim odrezavanjem s pomočjo rezkal in frezal, s plamenskimi rezanjem, laserskim rezanjem ali plazemskim rezanjem. Material zvara gradimo na način, da v zvarni žleb nalagamo vare. Zaradi tega načina odlaganja varov poznamo enovarkovne in večvarkovne zvarne spoje. Zvarni žlebovi so različnih oblik: npr. K zvarni spoj, X zvarni spoj, I zvarni spoj itd. Zvarni žlebovi so izredno pomembni za kvalitetno izdelavo zvarnih spojev z ustreznimi mehanskimi lastnostmi, ki bodo prenesli vse konstrukcijske obremenitve varjene konstrukcije. Izdelani morajo biti tako, da je površina gladka, brez prisotnih razpok in nečistoč (škaja, rja, olja itd.) v skladu s standardom DIN EN ISO 9013.

2.4 PREDGREVANJE

Eden od največjih problemov pri gradnji visoko kvalitetnih zvarnih spojev za zahtevne varjene konstrukcije je nenaden pojav razpok, ki nastanejo v zvarnem spoju takoj po

varjenju ali čez nekaj časa. Razpoke lahko nastanejo pri ohlajanju zvarnega spoja pod 250 °C. V tem primeru nastane trda martenzitna mikrostruktura in govorimo o nastanku t. i. hladnih razpok. Poznamo pa tudi nastajanje razpok pri višjih temperaturah ohlajanja zvarnega spoja npr. pri 800 °C. Takrat govorimo o nastanku t. i. vročih razpok. Tako hladni kakor tudi vroči razpokljivosti zvarnega spoja po varjenju se lahko uspešno izognemo z ustreznim predgrevanjem osnovnega materiala. S pregrevanjem zvišamo nivo vnesene toplote in posledično podaljšamo čas ohlajanja zvarnega spoja med 800 °C in 500 °C. Temu času ohlajanja pravimo čas $t_{8/5}$. Definirati je potrebno tudi medvarkovno temperaturo varjenja, ki predstavlja temperaturo, ki jo doseže predhodni varek, preden nadaljujemo z varjenjem naslednjega varka. Na pojav hladnih razpok po varjenju odločilno vpliva vsebnost plina vodika v zvarnem spoju. Vodik eliminiramo iz zvarnega spoja s sušenjem elektrod in samim predgrevanjem osnovnega materiala. Z ustreznim predgrevanjem osnovnega materiala znižamo nastale notranje napetosti v materialu zvara, ki nastanejo po ohladitvi zvarnega spoja, torej po zaključenem varjenju [10]. Temperaturo predgrevanja osnovnega materiala določamo v skladu s standardom DIN EN ISO 13916 [3]. Eksperimentalno merjenje temperature predgrevanja izvajamo z digitalnimi termometri (Slika 2.4).



Slika 2.4: Temperaturo predgrevanja merimo v skladu z navodili standarda, 100 mm od mesta vara [13]

Predgrevalo z visoko visokokaloričnim gorilnim plinom, ki ne presega dovoljene vsebnosti vodika. Temperaturo pregrevanja osnovnega materiala določamo v sklopu določanja tehnologije varjenja za izdelavo kakovostnega zvarnega spoja brez prisotnih mikrorazpok ali drugih napak nastalih med ali po varjenju. Temperaturo predgrevanja osnovnega materiala moramo določiti zelo natančno, saj vsaka stopinja več pomeni velik ekonomski strošek, ki nastane zaradi porabe dragega plina pri segrevanju osnovnega materiala [10]. Temperaturo predgrevanja lahko določimo s teoretičnim izračunom ali praktično z izvedbo t. i. varilnega preizkusa v laboratoriju. Velja pravilo, da teoretični izračun temperature predgrevanja osnovnega materiala vedno potrdimo z eksperimentalno določitvijo temperature predgrevanja osnovnega materiala. Na temperaturo predgrevanja odločilno vpliva debelina materiala, kemična sestava jekla in višina vnosa energije, ki je potrebna za taljenje dodatnega materiala.

2.5 TEORETIČNI IZRAČUN TEMPERATURE PREDGREVANJA

Izračun ogljikovega ekvivalenta - C_{ekv} za določitev temperature predgrevanja po standardu EN 1011-2.

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} [\%] [11] \quad (2.1)$$

$C_{ekv} = do 0,4$brez predgrevanja ni potrebno

$C_{ekv} = do 0,4 do 0,6$ temperaturno predgrevati na 100–200 °C

$C_{ekv} = do 0,6$temperaturno predgrevati na 200–350 °C

Temperatura predgrevanja: izračun ogljikovega ekvivalenta z upoštevanjem debeline jekla po Sefferianu.

$$T_p = 350 \times \sqrt{C_{ekv} - 0,25} (\text{°C}) \quad (2.2)$$

$$C_{ekv} = C_h + C_s \quad (2.3)$$

$$C_h = C + \frac{40(Mn + Cr)}{360} + \frac{20Ni}{360} + \frac{25Mo}{360} [\%] \quad (2.4)$$

$$C_s = 0,005 \times s \times C_h, \quad (2.5)$$

kjer je:

T_p - temperatura predgrevanja,

C_{ekv} - ogljikov ekvivalent,

C_h - ogljikov ekvivalent, ki upošteva kemično sestavo jekla,

C_s - ogljikov ekvivalent, ki upošteva debelino materiala,

s - debelina materiala v mm.

2.5.1 Izračun temperature predgrevanja z upoštevanjem kemijske sestave, debeline osnovnega materiala in količino absorbiranega vodika v zvaru glede na vrsto dodajnega materiala

$$T_p = 1440 \times K - 392 (\text{°C}) \quad (2.6)$$

$$K = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + \frac{H}{60} + \frac{s}{600} + 5B [\%], \quad (2.7)$$

kjer je:

H - vodik (ml/100g),

s - debelina materiala v mm.

Primer izračuna temperature predgrevanja jekla S460 in 18NiMoCr3-6 debeline 10 mm po Sefferianu:

S460:

$$T_p = 350 \times \sqrt{C_{ekv} - 0,25} = 350 \times \sqrt{0,2884 - 0,25} \approx \mathbf{69\text{ }^\circ\text{C}}$$

$$C_{ekv} = C_h + C_s = 0,2747 + 0,0137 = 0,2884$$

$$C_h = C + \frac{40(Mn + Cr)}{360} + \frac{20Ni}{360} + \frac{25Mo}{360}$$

$$C_h = 0,09 + \frac{40(1,58 + 0,05)}{360} + \frac{20 \times 0,06}{360} + \frac{25 \times 0,004}{360}$$

$$C_h = 0,2747$$

$$C_s = 0,005 \times s \times C_h = 0,005 \times 10 \times 0,2747 = 0,0137$$

18NiMoCr3-6:

$$T_p = 350 \times \sqrt{C_{ekv} - 0,25} = 350 \times \sqrt{-(0,1090 - 0,25)} \approx \mathbf{131\text{ }^\circ\text{C}}$$

$$C_{ekv} = C_h + C_s = 0,1038 + 0,0052 = 0,1090$$

$$C_h = C + \frac{40(Mn + Cr)}{360} + \frac{20Ni}{360} + \frac{25Mo}{360}$$

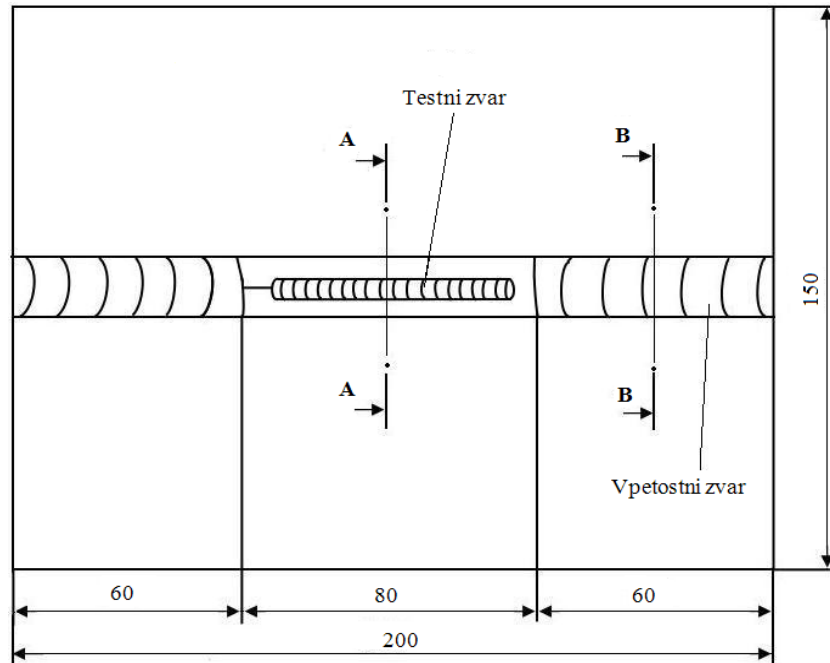
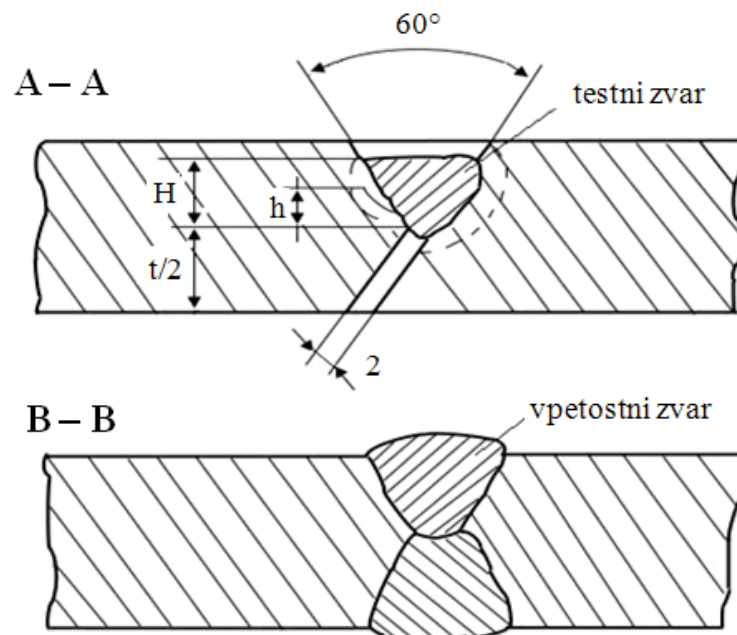
$$= 0,18 + \frac{40(1 + 0,62)}{360} + \frac{20 \times 0,71}{360} + \frac{25 \times 0,46}{360}$$

$$C_h = 0,1038$$

$$C_s = 0,005 \times s \times C_h = 0,005 \times 10 \times 0,1038 = 0,0052$$

2.6 EKSPERIMENTALNA DOLOČITEV TEMPERATURE PREDGREVANJA

Y-preizkus je standardiziran varivostni preizkus in se izvede praktično v laboratoriju z namenom natančne določitve temperature pregrevanja osnovnega materiala jekla, z namenom, da po končanem varjenju ne pride do pojava razpok v hladnem [5]. Na Sliki 2.5 je prikazan preizkušanelec za izvedbo Y – preizkusa, na Sliki 2.6 pa njegov prerez.

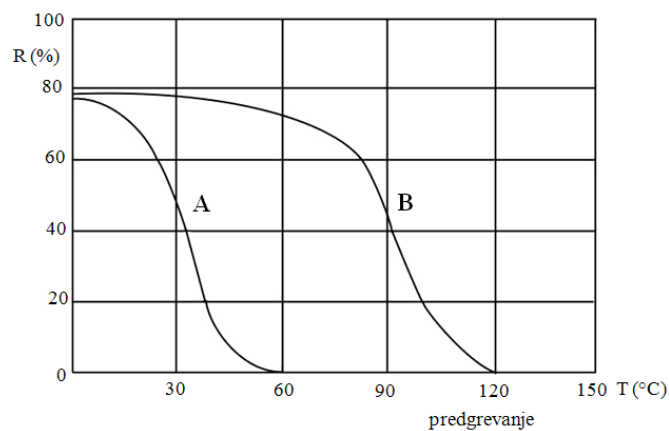
Slika 2.5: Preizkušavec za izvedbo *Y* – preizkusa [10]Slika 2.6: Prerez preizkušanca za *Y* – preizkus [10]

Poliranje, jedkanje in pregled vzorcev pod mikroskopom izvedemo zaradi natančne določitve višine hladne razpoke h oz. preizkus ponavljamo tako dolgo, da se hladne razpoke ne pojavljajo več.

Hladno razpokljivost računamo po formuli:

$$R = -\frac{h}{H} * 100 (\%) \quad (2.8)$$

Rezultate vnašamo v diagram (Slika 2.7). Pri višini razpoke $h = 0$ dobimo 0 % razpokljivosti, kar ustreza iskani temperaturi predgrevanja osnovnega materiala, kjer se razpoke več ne pojavljajo.



Slika 2.7: Diagram hladne razpokljivosti za dva različna jekla A in B [13]

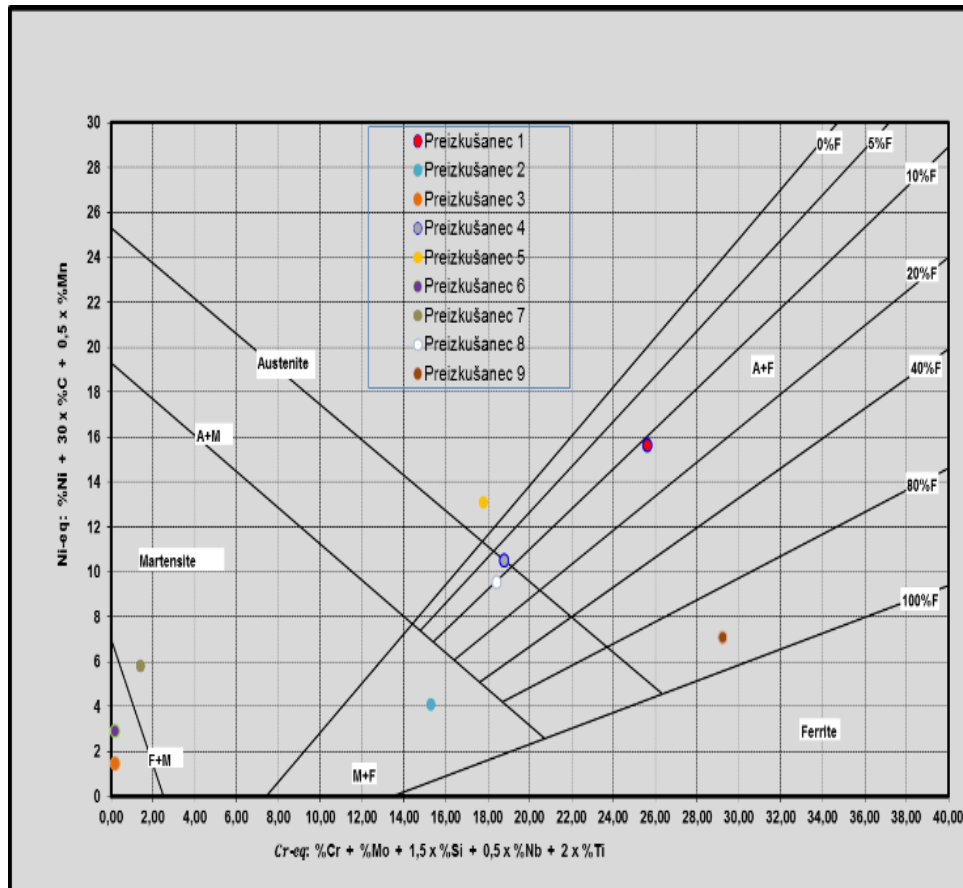
2.7 DOLOČITEV OBČUTLJIVOSTI ZVARNEGA SPOJA NA POJAV RAZPOK V VROČEM (PRI OHLAJANJU, MED 900 IN 700 STOPINJAMI), PRI NERJAVNIH JEKLIH (AVSTENITNIH JEKLIH)

Teoretična določitev:

Schaflerjev diagram (Slika 2.8) uporabljamo pri feritno-avstenitnih jeklih (vmesno področje med rjavno-magnetnimi in nerjavnimi) za teoretični izračun prisotne feritne faze, ki povzroča razpokljivost v vročem.

Teoretično izračunamo Ni ekvivalent po formuli na y-osi in Cr ekvivalent na X-osi. Presečišče nam poda orientacijsko točko za potencialno prisotnost ferita. Pravilo je, da

je lahko prisotno največ med 7-10 % feritne faze, da še lahko govorimo o tem, da ni nevarnosti za pojav razpok v vročem.



Slika 2.8: Schaflerjev diagram [4]

Praktična določitev z meritvijo: eksperimentalno izmerimo prisotnost ferita s posebno napravo, tako imenovanim delta ferit metrom.

2.8 VNOS TOPLOTE

Energijo za taljenje dodatnega materiala (žice, elektrode, traka itd.) lahko vnašamo v material s pomočjo električnega oblaka, plamena ali trenja. Pri elektroobločnem postopku varjenja materialov se tali dodatni material s pomočjo električnega oblaka. Vzpostavitev električnega oblaka nam omogoči določeno količino vnesene toplote, ki stali osnovni in dodatni material [13]. Nastane var. Vnos toplote lahko definiramo kot

potrebno količino toplote za taljenje materiala na enoto dolžine vara. Vnesena energija vpliva na nastanek toplotno vplivanega področja. Velja pravilo, da večja vnesena energija, pomeni širše TVP in obratno. Težimo k temu, da vnesemo čim manj energije v zvarni spoj, da dobimo čim ožje TVP, ker TVP predstavlja najbolj kritični del zvarnega spoja z najtršimi mikrostrukturami, ki privedejo do pojava razpok in končnemu zlomu zvarnega spoja.

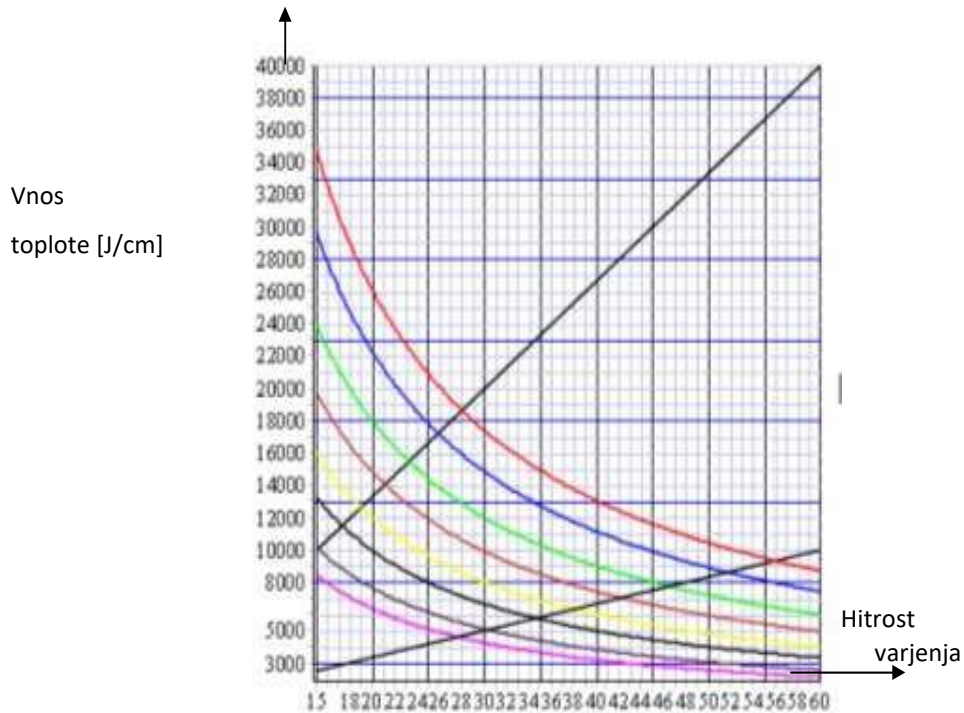
Vnosa toplote ne moremo meriti med varjenjem, lahko pa ga izračunamo, če poznamo varilno napetost, varilni tok, varilno hitrost in izkoristek postopka varjenja. Naslednja enačba natančno izračuna vneseno energijo:

$$E = \frac{U \times I}{v} \times \eta \times 60 \text{ [3]}, \quad (2.9)$$

kjer je:

- E - vnos toplote [J/cm],
- U - varilna napetost [V],
- I - varilni tok [A],
- v - hitrost varjenja [cm/min],
- η - izkoristek dovedene energije v oblok.

Na sliki 2.9 območje med črnima premicama ter vijolično in rdečo krivuljo predstavlja dovoljene vrednosti za vnos toplote pri določeni hitrost varjenja po MAG postopku, pri polni žici \varnothing 1,2 mm in zaščitnem plinu M21 (Ar/CO₂). Vnos toplote pri določeni hitrosti varjenja naj ne presega omenjenega območja vrednosti v diagramu. Na x-osi so podatki za hitrost varjenja v cm/min, na y-osi pa vnos toplote v J/cm.



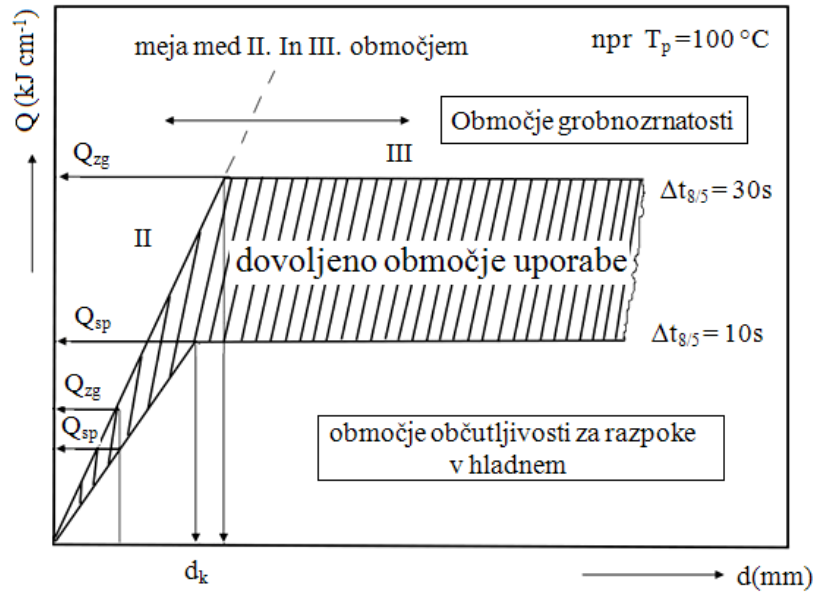
Slika 2.9: Vpliv hitrosti varjenja na vneseno energijo [13]

2.9 ČAS OHLAJANJA ZVARA MED 800 IN 500 °C

Zvarni spoj se tekom varjenja ohlaja. Med varjenjem lahko s potopnim bimetalnim termometrom uspešno in natančno izmerimo čas ohlajanja zvara med 800 °C in 500 °C, ki ga označimo kot $t_{8/5}$ in predstavlja standardno veličino pri določitvi ustrezne tehnologije varjenja za izdelavo visoko kakovostnih zvarnih spojev. Čas ohlajanja $t_{8/5}$ odločilno vpliva na izoblikovanje mikrostruktur v TVP in s tem na širino TVP. Velja pravilo, da zvarne spoje poskušamo variti s čim krajšimi časi ohlajanja $t_{8/5}$. Čas ohlajanja $t_{8/5}$ drastično in fatalno vpliva na pojav krhkih mikrostruktur v TVP zvarnega spoja in s tem na pojav mikrorazpok. Lahko rečemo, da krajši čas ohlajanja $t_{8/5}$ vodi k višji žilavosti TVP zvarnega spoja in obratno. Ohlajanje zvara v tem temperaturnem območju vpliva na lastnosti novo nastalih mikrostruktur v toplotno vplivanem območju. Čim krajši je čas ohlajanja $t_{8/5}$, tem višja je žilavost v TVO-ju. Nevarnost tega pravila je v tem, da pri varjenju zahtevnih in modernih jekel lahko ob prehitrem ohlajanju ne dosežemo dovolj visoke žilavosti materiala, ki zagotavlja varno obratovanje varjene konstrukcije.

Pri hitrem ohlajanju zvarnega spoja lahko dobimo v zvarnem spoju martenzit in bainit, pri počasnejšem ohlajanju lahko v mikrostrukturi dobimo še perlit in ferit [13].

Na Sliki 2.10 je prikazan vpliv debeline in temperature predgrevanja na vneseno energijo pri varjenju sočelnih zvarnih spojev.



Slika 2.10: Vpliv debeline in temperature predgrevanja na vneseno energijo pri varjenju sočelnih zvarnih spojev [5]

3 RAZLIČNI POSTOPKI NAVARJEVANJA

3.1 TALILNO VARJENJE

Kadar stalimo vse dele, ki jih želimo spojiti, in jih potem v tekočem stanju združimo v kovinski talini, ki kristalizira, govorimo o talilnem varjenju [3]. Pri talilnem varjenju lahko uporabimo tudi dodajni material ali pa varimo brez njega, kar je ena od prednosti varilnega postopka.

3.2 VARJENJE BREZ TALJENJA

Kadar gradimo zvarni spoj s pomočjo trenja med dvema osnovnima materialoma, uporabljamo postopek varjenja brez taljenja. Varjenje brez taljenja je lahko izvedeno tudi s postopkom eksplozije. Na ta način s pomočjo eksploziva, ki ga postavimo pod ploščo enega osnovnega materiala, povzročimo velike hitrosti osnovnega materiala in na ta način izvedemo izredno hiter in velik udarec na površino drugega osnovnega materiala in tako spojimo oba dela v nerazdružljivo celoto. Prednost varjenja brez taljenja je v tem, da praktično toplotno vplivanega področja ni, kar pomeni, da tudi kritične mikrostrukture z izrazito nizko lomno žilavostjo ne obstajajo v zvarnem spoju [3].

3.3 LOTANJE

Postopka lotanja ne smemo enačiti s postopkom varjenja. Lotanje je postopek spajanja materialov, kjer površini obeh osnovnih materialov segrejemo pod tališče materiala in nato s tekočim lotom zapolnimo ozko špranjo med obema površinama osnovnih materialov. Lotni spoj povezuje obe površini materialov s pomočjo adhezijskih sil, kar pomeni, da morata biti obe površini osnovnih materialov izredno čisti in ravni. Poznamo

mehke in trde lote. Mehke lote segrevamo do tališča materiala, do približno 400 °C, trde lote pa nekje do približno 800 °C. Zelo poznan med mehкими loti je cinkov lot, pri trdih lotih pa srebrni lot.

3.4 VARJENJE S TIG POSTOPKOM

Kratica TIG izhaja iz nemščine in pomeni Tugsten Inert Gas, kar prevedemo v slovenščino kot elektroobločno varjenje z netaljivo volframovo elektrodo v zaščitni atmosferi žlahtnega plina, argona [4]. Za zaščitno atmosfero lahko uporabljamo tudi mešanico plina argona in helija. S tem postopkom varjenja lahko varimo ročno ali robotsko, z dodatnim materialom ali brez njega. S TIG varjenjem varimo izredno kvalitetne zvarne spoje kovin in barvnih kovin. Postopek TIG omogoča varjenje z enosmernim tokom z elektrodo na minus ali plus polu. Tako dobimo izredno čiste in kvalitetne zvarne spoje brez varilnih napak. Na ta način varimo aluminijeve in magnezije zlitine. Volframova elektroda je izredno draga, zato si velja zapomniti, da dosežemo manjšo obrabo volframove elektrode, če varimo z negativnim polom na elektrodi.

Pri TIG varjenju je omogočena visoka tokovna obremenitev volframove elektrode, zaradi tega je globlji uvar. Pri elektrodi na pozitivnem polu je že pri nižjih tokovih ta preobremenjena in se prične taliti, vendar je prisoten "čistilni" učinek. Aluminij, magnezij in njihove zlitine so prevlečeni z oksidi, ki imajo znatno višje tališče kot kovina (tališče Al je pri 660 °C, tališče Al_2O_3 pa pri 2000 °C) in jih je treba odstraniti, ker pri varjenju povzročajo zlepljena mesta in poroznost [4]. Pri elektrodi na pozitivnem polu pospešeni pozitivni ioni udarjajo na oksidno plast na negativnem polu, s čimer se na osnovi njihove kinetične energije odstranjuje oksidna plast. Pri tem pomagajo še elektroni, ki zgoščeni izhajajo z negativnega pola.

Zaradi navedenega je bolj v uporabi varjenje z obremenitvijo elektrode na negativnem polu. Tako pride do manjše porabe volframove elektrode, kot pa če je priključena

elektroda na pozitivni pol in enosmerni tok (vročo ali čistilno fazo predstavlja elektroda na pozitivnem polu, hladilno fazo pa elektroda na negativnem polu) [3].

Varjenje po TIG postopku je prikazano na Sliki 3.1.



Slika 3.1: Shematski prikaz varjenja v zaščiti plina argona [1]

Postopek TIG varjenja omogoča tudi varjenje materialov z izmeničnim tokom. Pri tem postopku varjenja s frekvenco 50 Hz stalimo oksidne kožice materialov, ki imajo visoko tališče in hkrati izvajamo čiščenje taline, kar vodi do popolnih in kvalitetnih zvarnih spojev brez prisotnih razpok in varilnih napak.

Sam začetek varjenja je možen na kratkostični način z uporabo visokofrekvenčne napetosti. Lahko pa začnemo variti po postopku TIG tudi na impulzen način ali s pilotnim oblokom brez dotika.

S povišanjem delovne napetosti in z rekombinacijo H^+ dobimo dodatno toploto za povečanje globine uvara in hitrosti varjenja pri znižani površinski napetosti taline. Ko uporabljamo zaščitni plin He ali mešanice Ar-He, je vprašanje stroškov za nabavo He. Ker ima Ar nižjo ionizacijsko energijo kot He, ima zato tudi lažjo vzpostavitev obloka. Višja ionizacijska energija He omogoča širši in globlji uvar kot pa Ar. Dodatni materiali za varjenje TIG, kot so palice in žice za varjenje nelegiranih in drobno legiranih jekel, so podane v standardu EN 1668, za visokotrnostna jekla po EN 12534, za jekla, odporna proti lezenju, po EN 12070 in za nerjavna jekla po EN 12072.

3.5 VARJENJE Z MIG POSTOPKOM

Kratice MIG izhaja iz angleščine Metal Inert Gas in pomeni v slovenščini varjenje s postopkom v zaščitni atmosferi inertnega plina. Omenjeni postopek je prav tako elektroobločen postopek varjenja, kjer lahko uporabljamo kot zaščitni plin Ar, He ali mešanice obeh plinov. Oblok vzpostavimo s taljivo elektrodo, ki je ponavadi brezkončna žica, navita na kolut. Zaradi tega je postopek varjenja zelo produktiven, saj ni potrebno menjati elektrod in čistiti žilindre. Zaradi tega je sam postopek izredno uporaben za robotsko varjenje.

Z MIG postopkom varjenja lahko varimo visokolegirana jekla, predvsem nerjavna jekla, baker in njegove zlitine, nikelj in njegove zlitine ter molibdenove zlitine. Konstantno dolžino obloka pri tem postopku varjenja kontroliramo s tako imenovano notranjo regulacijo varilnega stroja [3].

Na kvaliteto varjenja vpliva celotna varilna naprava, tj. poleg vira toka še gorilnik, vodenje gorilnika, cevni paket, naprava za dovajanje varilne žice, ki mora omogočati pomikanje žice brez zatikanja tudi pri večjih oddaljenostih gorilnika od vira, in podajalne naprave.

Prehod materiala v obloku lahko poteka s prostimi kapljicami, ki so grobe in fine. Nadalje je možen tudi kratkostični prehod materiala. Če varjenje izvajamo z elektrodo na pozitivnem polu, poteka drobno kapljičasti prehod materiala v obloku, posledica le tega pa je globlji uvar. To si lahko razlagamo z dejstvom, da je tok ionov, ki ga povzroči potencial obloka, usmerjen v smeri katode, kar je odločilno za velikost kapljic in vrsto prehoda kapljice. Ko je elektroda na pozitivnem polu, imata prehod materiala in tok ionov enako usmeritev in bolj ali manj fine kapljice se enakomerno pomikajo skozi steber obloka [8]. Ko pa je elektroda na negativnem polu, je tok ionov usmerjen nasprotno od smeri prehoda kapljic. Večji ali manjši uvar je odvisen od spremembe načina prehoda materiala v obloku.

Posebno pomembna je dobra plinska zaščita obloka, ki mora preprečevati oksidacijo ali tvorbo nitridov. Težave nastopijo pri varjenju aluminija (Al) in kroma (Cr), ker bi lahko nastopili visokotaljivi oksidi [1]. Za popolno preprečitev dostopa zraka uporabljamo plinsko zaščito Ar, občasno He za neželezne kovine in visokolegirana jekla.

Fizikalne lastnosti zaščitnih plinov, kot so zmožnost ionizacije, disociacije, toplotna prevodnost, gostota in vpliv na viskoznost taline, bistveno vplivajo na izgradnjo zvarnega spoja in prav tako na njegove mehanske lastnosti.

Zmožnost ionizacije plina vpliva na električno prevodnost pri visokih temperaturah. Pri nizki ionizacijski energiji plina se v obločnem prostoru ustvari veliko število nosilcev naboja, kar omogoča stabilni tok. Vžig obloka je lahek s stabilnim in mirnim gorenjem.

Dodajni materiali so normirani po standardih EN 440, EN 12534, EN 12070 za polne žice in po EN 758, EN 12535, EN 121071/12073 za polnjene strženske žice. Uporabljamo polne in polnjene strženske žice, navite v kolut [13].

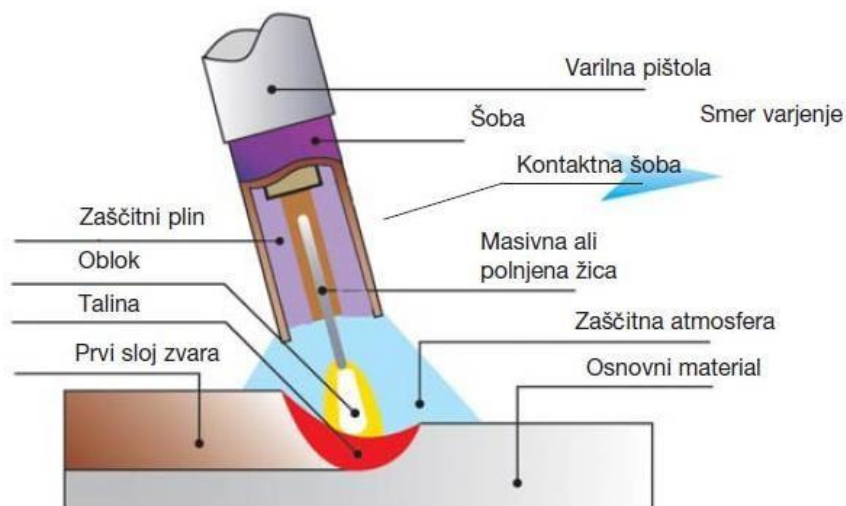
Impulzno varjenje MIG: Tako kot pri varjenju TIG impulzno varjenje izvajamo z osnovnim tokom (enosmerni), ki je potreben za vzdrževanje električnega obloka. Temu sledijo impulzni tokovi, ki omogočajo krmiljen tok kapljic. Poleg osnovnega toka so nastavljive veličine: višina, frekvenca in oblika impulza. Običajne frekvence so 25-100 Hz. Postopek je primeren za varjenje v prisilnih legah na visoko legiranih jeklih, lahkih zlitinah, bakru in njegovih zlitinah.

Varjenje plazma MIG: Pri tem načinu varjenja se uporablja hibridni gorilnik, v katerem je vgrajen gorilnik za varjenje MIG z bočno nameščeno volframovo elektrodo za vzdrževanje plazemskega obloka [13].

Varjenje je možno:

- z volframovo elektrodo na negativnem polu - varilna žica ni tokovno obremenjena,
- z volframovo elektrodo na negativnem polu - varilna žica je tokovno obremenjena,
- z volframovo elektrodo na pozitivnem polu - varilna žica ni tokovno obremenjena,
- z volframovo elektrodo na pozitivnem polu - varilna žica je tokovno obremenjena.

Varjenje izvajamo v zaščiti plinov Ar/He in Ar/CO₂. Slika 3.2 prikazuje postopek varjenja po MIG postopku.



Slika 3.2: Postopek varjenja po MIG postopku [8]

3.6 VARJENJE Z MAG POSTOPKOM

Pri tem postopku varjenja kratica MAG pomeni v angleščini Metal Activ gas, kar prevedemo v slovenščino kot elektroobločni postopek varjenja v zaščitni atmosferi aktivnega plina. Najpogosteje se kot aktivni plin uporablja CO₂ oziroma njegove mešanice z Ar in CO₂ [3]. Najpogosteje varimo s tem postopkom varjenja nelegirana jekla, nizkolegirana jekla in visokotrnostna mikrolegirana jekla.

MAG varjenje lahko izvajamo z enosmernim ali izmeničnim tokom. Najpogosteje uporabljamo varilne stroje, predvsem usmernike z vodoravno statično ali rahlo padajočo karakteristiko (1V/100A).

Pri uporabi čistega CO₂ se doseže, v primerjavi z drugimi plinskimi mešanicami, najbolj koncentriran oblok in tako najgloblji uvar.

Na mikrostrukturo v strnjenem zvaru vpliva aktivnost kisika v zaščitnem plinu, hkrati pa se ta prekriva z vplivom sestave in ohlajevalne hitrosti. Klasični postopek varjenja MAG je običajno uporabljen pri soležnih zvarnih spojih v vodoravni legi ter kotnih zvarnih spojih z lego v žlebu [7].

4 EKSPERIMENTALNI DEL

4.1 PREDSTAVITEV ROBOTA Z VIRTUALNO ROBOTSKO CELICO

Glavni sestavni deli robota so robotska roka, varilni izvor in krmilnik s pretvornikom.

Daihen FD-B6 je robotski sistem, ki se uporablja za avtomatsko varjenje z MAG postopkom varjenja. Daihen je japonsko podjetje, znano po proizvodnji industrijskih robotov in opreme za varjenje. FD-B6 je eden od njihovih modelov, ki se uporabljajo v različnih industrijskih aplikacijah.

Značilnosti in možnosti uporabe robota Daihen FD-B6 so naslednje:

1. Natančnost varjenja: Robot Daihen FD-B6 je opremljen z visoko kakovostnimi senzorji in sistemi za nadzor, ki omogočajo natančno varjenje. To je še posebej pomembno v industrijskih okoljih, kjer je potrebna visoka ponovljivost in kakovost varjenja.
2. Več konfiguracij: Robot Daihen FD-B6 se lahko konfigurira v različna delovna območja in nastavitve glede na potrebe proizvodnje. Lahko se integrira z različnimi vrstami varjenja, kot so MIG/MAG varjenje, TIG varjenje ali elektroobločno varjenje.
3. Fleksibilnost in hitrost: Ta robotski sistem omogoča visoko stopnjo fleksibilnosti in hitrosti pri izvajanju varjenja. Lahko se programira za izvajanje različnih nalog, spreminjanje položajev ali variacije v procesu varjenja.
4. Varnost in zanesljivost: Daihen FD-B6 je opremljen z naprednimi sistemi za varnost, ki varujejo operaterje in okolico. To vključuje senzorje za zaznavanje ovir, sisteme za zaustavitev v primeru nujnih situacij in funkcije omejevanje dostopa.

- Intuitivno programiranje: Robot Daihen FD-B6 ima uporabniku prijazen vmesnik, ki olajšuje programiranje in nadzor sistema. To omogoča operaterjem, da hitro in enostavno nastavijo in prilagodijo naloge varjenja.



Slika 4.1: Upravljalna prenosna enota robota [9]

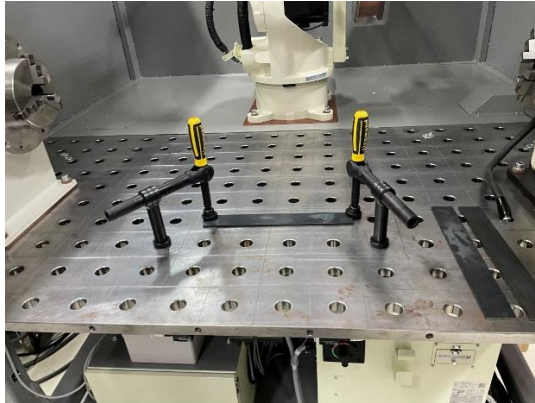
4.2 IZBIRA MATERIALA ZA NAVARJEVANJE IN ROBOTSKO VARJENJE

Za navarjevanje je bilo izbrano konstrukcijsko jeklo S460, z mejo plastičnosti 460 MPa in debeline pločevine 10 mm. Na jeklene trakove širine 100 mm je bil navarjen z MAG varilnim postopkom varek s pomočjo dodatnega materiala - varilne žice Böhler EMK8, $\varnothing 1$ mm. Slika 4.2 prikazuje Robotsko celico in pripravo materiala za varjenje – čiščenje.



Slika 4.2: Robotska celica in priprava materiala za varjenje - čiščenje [9]

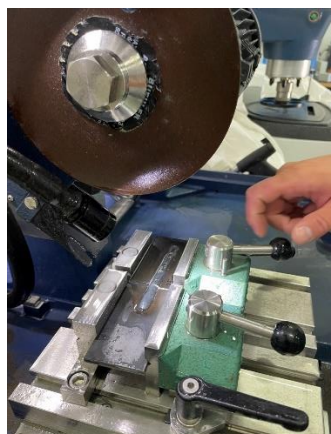
Na Slikah od 4.3 do 4.5 je prikazano vpetje osnovnega materiala, izvedba navarov ter metalografsko rezanje jeklenega traku z navarom brez vpliva toplote - hladni rez.



Slika 4.3: Vpetje osnovnega materiala pred pričetkom varjenja [9]



Slika 4.4: Izvedba navarov na ravno ploščo [9]



Slika 4.5: Metalografsko rezanje jeklenega traku z navarom brez vpliva toplote - hladni rez [9]

4.3 KEMIČNA ANALIZA Z UPORABO NAPRAVE NITON GOLD+

Za natančno določitev kemične sestave osnovnih materialov, zvarov in toplotno vplivanega področja se uporablja prenosna naprava - spektralni analizator NITON Gold+. Naprava deluje na principu rentgenske analize različnih spektrov kemijskih elementov in je izredno hitra in natančna ter rezultate ovrednoti v okviru standardne deviacije. Naprava je v obliki pištrole, ima LCD zaslon na dotik ter upravljalno ploščo (Slika 4.6).



Slika 4.6: Shematski prikaz spektralnega analizatorja NITON GOLD+ [6]

Upravljalna plošča je sestavljena iz štirih smernih tipk, srednjega potrdilnega ter dveh nadzornih gumbov. Gumbi se nahajajo takoj pod zaslonom, s pomočjo katerih se pomikamo po meniju naprave (Slika 4.7). Z gumbom vklop, napravo vklopimo z držanjem tipke vsaj 3 s, prav tako z držanjem 10 s v katerem koli menijskem sistemu napravo izklopimo. Z enim samim pritiskom na gumb vklop, ko je naprava vklopljena, se vrnemo v glavni meni. Tipka za brisanje/vnos nas pri brskanju po meniju z enim pritiskom vrne za eno stanje nazaj. Za pomikanje po meniju lahko tudi uporabljamo zaslon na dotik, ki ga ne moremo ločiti od analizatorja, lahko pa mu prilagajamo nagibni kot. S prilagajanjem nagibnega kota nam analizator olajša ogled informacij ter izvajanje meritev. Opravljanje preko zaslona lahko izvajamo s pomočjo namenskega pisala, ki je priloženo ali pa direktno s prstom. Z ekranom na dotik lahko enako upravljamo z

analizatorjem kot s štirismernim gumbom. Na ekranu se enostavno dotaknemo ikone in se pomikamo po meniju, za vračanje nazaj se dotaknemo tipke return.



Slika 4.7: Funkcijski deli zgornjega dela naprave NITON GOLD+ [6]

Preko sprožilca, ki je oranžne barve, začnemo z izvajamo meritve toliko časa, kot želimo. Naprava je opremljena s štirimi LED lučkami, ki nas med izvajanjem meritev opozarjajo na delovanje. Spodaj na napravi se nahaja leča v velikosti 8 mm. S strani so na napravi z vsake strani vidne zareze, ki nam označujejo sredino leče. Analizator ima vgrajeno tudi kamero, ki nam kaže položaj leče in tako lahko natančneje postavimo analizator na želeno lokacijo. Leča mora biti med izvajanjem meritev naslonjena na merjencu, saj se x-žarki izsevajo preko rentgenske cevi na površino. Preko USB vhoda na napravi lahko napravo preko USB kabla priključimo na računalnik (Slika 4.8).



Slika 4.8: Možni vhodi v merilno napravo NITON GOLD+ [6]

S posebnim programom lahko na računalniku v celoti upravljamo z napravo (Slika 4.9). Na računalniku se nam v živo prikazuje trenutno stanje na LCD zaslonu naprave; z miško lahko klikamo na ikone ter se pomikamo po meniju. Za pomikanje po meniju oziroma upravljanje naprave lahko uporabljamo tudi tipke, ki so prav tako izrisane in lahko preprosto klikamo na njih. Preko računalnika lahko poženemo tudi meritve ter jo izvajamo toliko časa, kot želimo. Ta funkcija nam pride predvsem v pomoč, če za elementarno analizo uporabljamo nosilec in naprave ne držimo v rokah. Z drugim programom, ki je prav tako priložen analizatorju, lahko prenesemo meritve na računalnik. Podatke lahko nato na računalniku preko programa pregledujemo, urejamo ter izdelamo poročilo. Analizator se napaja preko Li-Ion baterije, ki zadostuje za veliko meritev. V primeru, da se nam baterija izprazni, pa je v kompletu priložena še ena, ki jo lahko preprosto zamenjamo v času polnjenja druge.



Slika 4.9: Praktična izvedba merjenja preko povezave z računalnikom [9]

V času merjenja ne smemo analizatorja nikoli usmeriti na sebe ali koga drugega (Slika 4.10). Pri izvajanju meritve ne uporabljamo lesene podlaga oziroma ne usmerimo analizatorja na les, saj les ne absorbira x-žarkov in jih v celoti odbije v okolico. Pri merjenju okroglih površin najprej zagotovimo fiksno, da se nam v času izvajanja meritve merjenec ne premika. Majhne vzorce lahko pri meritvi postavimo na leče ter

analizator držimo v višini oči. Pred analizo katerekoli površine, le to najprej očistimo, saj nam to zagotovi natančnejše rezultate. Z velikostjo merjenca dobimo tudi natančnost. Če je merjenec čez celotno površino leče velikosti 8 mm, so meritve natančnejše, saj se več žarkov odbije od merjene površine. Lečo ščiti 2-mikronska folija, ki se npr. pri uporabi opilkov lahko prebode. Posledično lahko tujek zaide v notranjost ter poškoduje analizator. Zato jo je potrebno v takšnih primerih redno pregledovati in jo v primeru poškodbe takoj zamenjati.



Slika 4.10: Zaslonski prikaz rezultatov kemične analize vzorca [9]

V Tabeli 4.1 so prikazani rezultati kemične analize vzorca A.

Tabela 4.1: Rezultati kemične analize (Vzorec A)

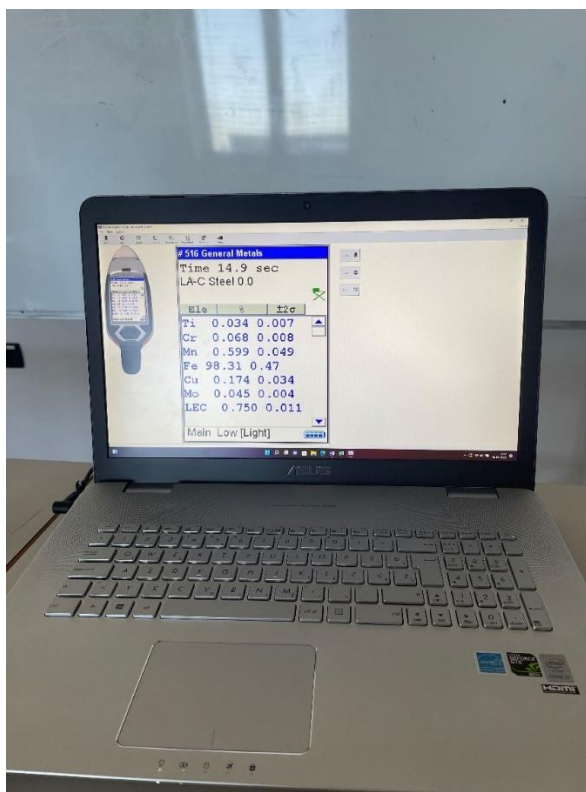
Št. meritve	#516	#517	#518	/
Ime elementa	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3 [%]	Povprečna vrednost [%]
Fe	98.220	98.160	98.160	98.180
LEC	0.750	0.750	0.750	0.750
Mn	0.598	0.569	0.564	0.577
Cu	0.174	0.210	0.184	0.189
Si	0.068	0.048	0.057	0.058
Cr	0.068	0.067	0.066	0.067
Mo	0.044	0.046	0.043	0.044
Ti	0.034	0.026	0.025	0.028
Bi	0.018	0.000	0.000	0.006
Ni	0.000	0.094	0.084	0.059
V	0.000	0.013	0.016	0.010

V Tabeli 4.2 so prikazani rezultati kemične analize vzorca B.

Tabela 4.2: Rezultati kemične analize (Var – Vzorec B)

Št. meritve	#519	#520	#521	/
Ime elementa	Meritev 1	Meritev 2	Meritev 3 [%]	Povprečna vrednost [%]
Fe*	96.790	96.990	96.950	96.910
Al*	0.853	0.696	0.649	0.733
Mn	0.776	0.772	0.810	0.786
LEC	0.750	0.750	0.750	0.750
Si	0.342	0.349	0.376	0.356
Cu	0.325	0.279	0.297	0.300
Ni	0.104	0.110	0.098	0.104
Mo	0.029	0.034	0.028	0.030
S	0.010	0.000	0.015	0.008
Bi	0.000	0.009	0.010	0.006

Slika 4.11 prikazuje Programsko izvedbo prikazanih rezultatov kemične analize vzorca.



Slika 4.11: Programsko izvedba prikazanih rezultatov kemične analize vzorca [9]

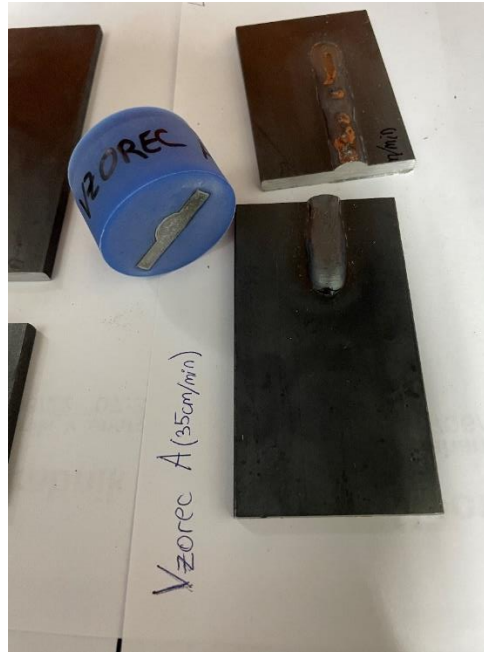


Slika 4.14: Priprava dvokomponentne mešanice za zalivanje vzorcev [9]



Slika 4.15: Hladno zalivanje vzorcev [9]

Poznamo vroče in hladno zalivanje vzorcev v umetne mase. Potrebna je pravilna izbira snovi in postopka za zalivanje. Snov za zalivanje se mora pri preparaciji vzorca obnašati podobno kot raziskovani material. Snov za zalivanje prav tako ne sme reagirati z vzorcem, kalupom za vlaganje ali jedkalom. Če preiskujemo temperaturno občutljiv ali mehki vzorec, potem se moramo vsekakor odločiti za hladno vlaganje. Pri vročem vlaganju so prisotne temperature 140–220 °C in tlak 20–50 Mpa.



Slika 4.16: Strjeni metalografski obrus z navarkom po 24 h od hladnega zalivanja [9]

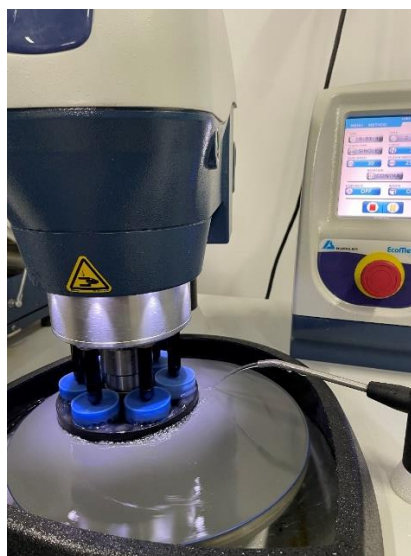
Z brušenjem metalografskih vzorcev se začne mehanski pripravljalni postopek, ki je potreben za odstranitev predhodno nastale grobe hrapavosti pri jemanju vzorca. Pri tem ravnamo in gladimo površino z uporabo abrazivnih snovi, ki so na različnih podlagah. Nekatere podlage so primerne tudi za uporabo past in suspenzij. Pri brušenju se material vzorca z rezilnim delovanjem posameznega abrazivnega delca posnema v tankih plasteh v obliki odrezkov.

Abrazivna sredstva morajo imeti bistveno večjo trdoto kot raziskovani material. Za pripravo kovinskih vzorcev se večinoma uporabljaja SiC (silicijev karbid), redkeje pa Cr_2O_3 , MgO, Al_2O_3 in diamant. Za pripravo keramičnih vzorcev je primeren le diamant. Večina brusnih papirjev je vodoodporna, kar omogoča, da voda med brušenjem odnaša odstranjenih delcev, hkrati pa vzorec tudi hladi in preprečuje segrevanje. Brusni papirji so označeni s številkami, ki predstavljajo granulacijo brusnega papirja. Velikost abrazivnih sredstev je obratno sorazmerna številki brusnega papirja. Slednje je razvidno iz naslednje slike, kjer je podanih nekaj številk brusnih papirjev (Slika 4.17).



Slika 4.17: Različne zrnatosti brusnih papirjev [9]

Brušenju sledi poliranje. Poliranje je podoben mehanizem posnemanja materialov kot pri brušenju, razlika je le v tem, da poteka na drobnejših stopnjah kot brušenje. S poliranjem odstranimo hrapavost nastalo pri brušenju, s čimer postopoma dosežemo bleščečo in optično gladko površino. Pri brušenju znaša pri srednje trdem jeklu globina hrapavosti približno $1 \mu\text{m}$, globina deformirane plasti pa $46 \mu\text{m}$. To plast je potrebno odstraniti s poliranjem. Poznamo več vrst poliranja: mehansko, kemijsko-mehansko in elektrolizno. V nadaljevanju bo opisano mehansko poliranje; ta postopek bomo uporabili tudi za pripravo naših vzorcev. Na Sliki 4.18 je prikazan avtomatski način brušenja, na Slikah 4.19 in 4.20 pa polirni tekočini.



Slika 4.18: Avtomatski - revolverski način brušenja metalografskih brusov [9]



Slika 4.19: Polirna tekočina za poliranje metalografskih obrusov [9]



Slika 4.20: Diamantna polirna tekočina za poliranje metalografski obrusov [9]

Polirna sredstva izvajajo poleg rezilnega še močno drgnjenje, ki povzroči poglobitev »zamazanega« območja, ki je pri mehanskem poliranju še bolj prisotno kot pri brušenju. Da se to pojavi v čim manjši meri, je pomembno, da z brušenjem dosežemo čim manjšo in enakomerno stopnjo hrapavosti. Če se »zamazana« območja, imenovana tudi Beilby-plast (poimenovana po raziskovalcu G. Beilby), pojavijo v veliki meri, ni druge rešitve kot ponavljanje brušenja na finejših stopnjah 15–3 μm in v nekaterih primerih uporaba abrazivnih sredstev z boljšo rezilno sposobnostjo (npr. diamant). Priporočeno je tudi poliranje v več stopnjah z uporabo polirnih sredstev z različno zrnatostjo, kar tudi

pripomore k prvotno nastali moteni coni.

Mehansko poliranje lahko izvajamo ročno ali strojno. Ročno poliranje ima prednost pred strojnim pri poliranju vzorcev večjih in različnih oblik, za katere nimamo ustreznih vpenjalnih priprav. Za poliranje pridejo v poštev vsa sredstva, ki smo jih že omenili v poglavju, vendar v veliko finejši zrnatosti in v obliki prahu ali paste, ki se suspenzira z vodo ali drugim medijem. Izbiramo lahko med polirnimi sredstvi z velikostjo premera abrazivnih zrn: 15, 9, 5, 3, 1, 0,25 in 0,06 μm . Najbolj univerzalno sredstvo za poliranje jekel je Al_2O_3 – glinica.

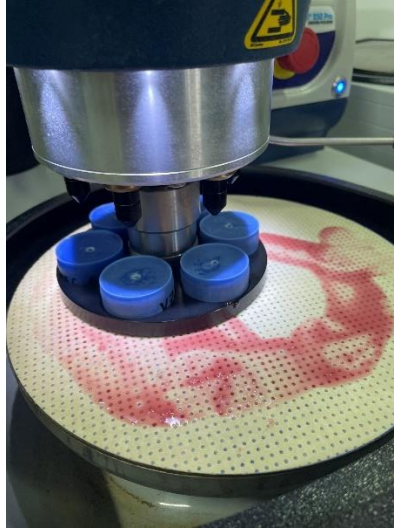
Previdni moramo biti pri izbiri podlage za poliranje. Praviloma so to pletenine iz različnih materialov, kot so klobučevina, volna, umetne snovi (najlon), svila, žamet ali usnje. Ustrezna podlaga mora preprečevati pogrezanje polirnega sredstva; biti mora elastična, trpežna, mehka in odporna proti polirnim sredstvom ter sredstvom za čiščenje. Kvaliteta podlage vpliva tudi na hrapavost površine, ki je tem manjša, čim bolj elastična je podlaga. Medtem ko premehka podlaga povzroča zaobljenost robov na vzorcu.

Na trgu so na voljo specializirane naprave za poliranje in brušenje. Nameščene imajo magnetne diske, ki omogočajo enostavno menjanje različnih podlag.

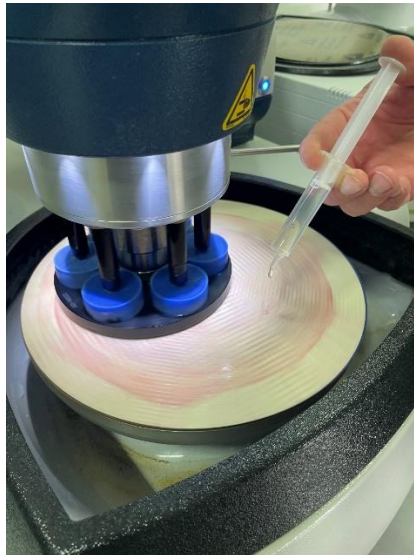
Na Slikah od 4.21 do 4.23 so prikazane faze poliranja.



Slika 4.21: Pričetek poliranja metalografskega obrusa [9]



Slika 4.22: Hkratno poliranje metalografskih brusov [9]



Slika 4.23: Finiširanje poliranja metalografskih vzorcev s polirno tekočino [9]

Po poliranju je površina vzorcev optično gladka in opazimo le bleščečo površino, mikrostrukture praviloma ne vidimo. Potrebna je naslednja in hkrati zadnja faza priprave vzorcev – jedkanje. Jedkanje je selektivna korozija, ko se odkrijejo posamezne mikrostrukturne sestavine. Jedkanje je še toliko bolj potrebno pri vzorcih, ki so vzeti iz zvarnih spojev, da lahko vidimo vsa območja zvara. Poznamo kemično, elektrolizno, polirno, ionsko in termično jedkanje. Za našo preiskavo zvarnih spojev uporabimo kemično poliranje, zato podrobneje obravnavamo ta postopek jedkanja.

Pri jedkanju enofaznih materialov se jedkanje obnese brez posebnih problemov. Bolj zahtevno je jedkanje večfaznih kovinskih gradiv, kjer se težje doseže zadovoljiv učinek, saj imajo posamezne faze lahko različen kemični potencial.

4.4 PREGLED NAVARKA Z OPTIČNIM MIKROSKOPOM IN MERJENJE MIKROTRDOTE

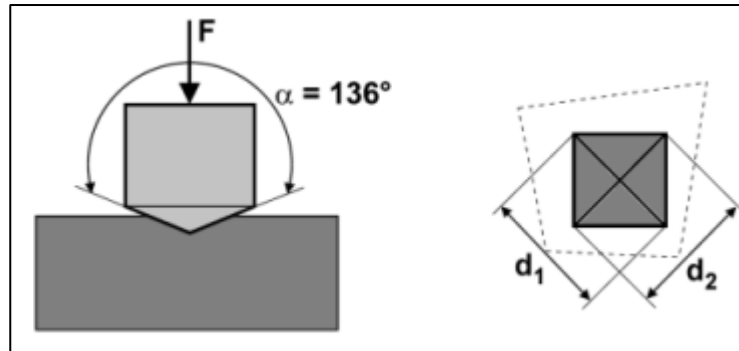
Trdoto materiala lahko definiramo na več načinov. Po osnovni definiciji je trdota odpornost materiala proti vdiranju tujega telesa skozi njegovo površino. Za kovinske materiale pa je bolj primerna definicija: Trdota je odpornost materiala proti lokalni plastični deformaciji [12]. Za merjenje trdote na kovinskih materialih so uporabne različne metode: Brinell, Vickers, Rockwell. Za merjenje trdote na zvarnih spojih konstrukcijskih jekel pa je najbolj primerna metoda po Vickersu. Ta metoda je zato podrobneje predstavljena v nadaljevanju. S to metodo smo prav tako merili trdoto na naših vzorcih.

Merjenje trdote po Vickersu (po angleškem podjetju Vickers) sta leta 1925 razvila Smith in Sandland. Ugotovila sta, da lahko z metodo po Brinellu (Slika 4.29) merita trdoto materialov le do približno 450 HB. Pri večjih trdotah se jeklena kroglica sama preveč deformira. Danes, ko je na voljo kroglica iz karbidne trdine, se Vickersova metoda uporablja, ko je trdota materiala večja kot 650 HB oz. na zvarnih spojih [13].

Merjena površina vzorca mora biti gladka, brez maziv, oksidov ali tujkov. Kadar merimo trdoto na zvarnih spojih, mora biti površina vzorca tudi jedkana. Jedkana zato, da lahko opazimo strukturne meje med varom oz. varki, toplotno vplivanem območju in osnovnim materialom.

Po Vickersu (Slika 4.24) se kot vtiskalno telo uporablja pravilna štiristrana piramida z vršnim kotom 136° . Piramida je narejena iz diamanta. Pri vtiskanju piramide v material z določeno silo F nastane vtisek, katerega projicirana površina ima obliko kvadrata. Po

razbremenitvi izmerimo dolžino obeh diagonal d_1 in d_2 . Iz njune povprečne vrednosti izračunamo trdoto po Vickersu [8].



Slika 4.24: Postopek merjenja trdote po Vickersu [13]

Postopek izračuna trdote materiala po Vickersu je prikazan v nadaljevanju.

Enačba 1: Izračun srednje vrednosti izmerjenih diagonal d_1 in d_2

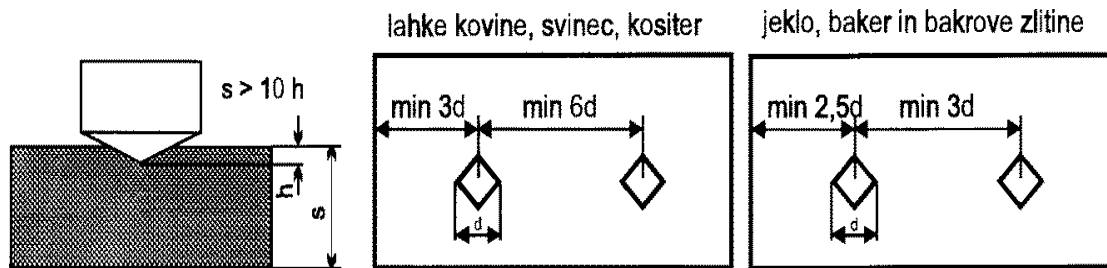
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4.1)$$

Enačba 2: Izračun trdote

$$HV = \frac{1}{g} \times \frac{2 \times F \times \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = \frac{1}{9,80665} \times \frac{2 \times F \times \sin(68^\circ)}{d^2} \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (4.2)$$

Pred preskusom moramo izbrati obremenitev F . Na izbiro sile vpliva debelina preskušanca s . Debelina vzorca mora za 1,5 krat presegati dolžino diagonale vtiska d ali desetkratno globino vtiska h , da se na nasprotni strani vzorca ne pojavijo sledovi preoblikovanja [13].

Na Sliki 4.25 je prikaz najmanjše debeline vzorca, najmanjše razdalje med robom vzorca in vtiskom ter najmanjše razdalje med zaporednima vtiskoma.



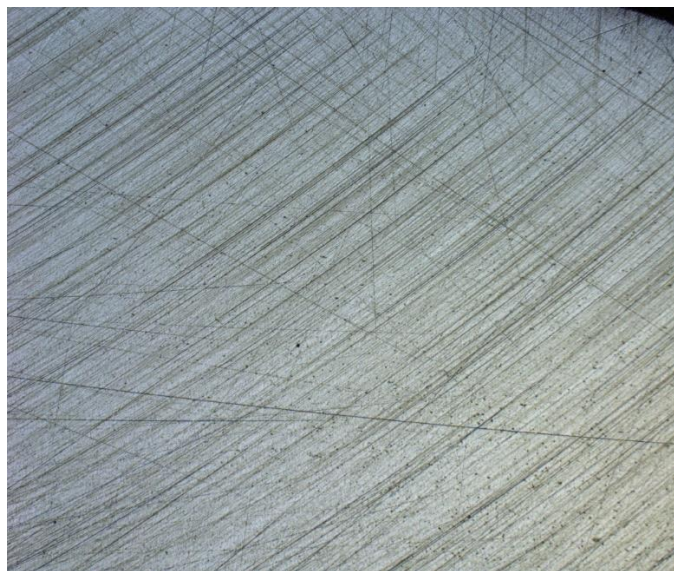
Slika 4.25: Prikaz najmanjše debeline vzorca, najmanjše razdalje med robom vzorca in vtiskom, ter najmanjše razdalje med zaporednima vtiskoma [12]

Običajen čas preizkušanja t pri konstantni imenski napetosti je od 10 do 15 sekund. Rezultate meritve zapisujemo na naslednji način:

300 HV 10 - zapisan rezultat pomeni trdoto materiala, ki znaša 300 enot po Vickersu s konstantno silo obremenitve $10 \times 9,80665 \text{ N} = 98,07 \text{ N}$.

500 HV 50/30 - zapisan rezultat pomeni trdoto materiala, ki znaša 500 enot po Vickersu s konstantno silo obremenitve $50 \times 9,80665 \text{ N} = 490,3 \text{ N}$. Čas vtiskanja piramide v material je bil 30 sekund.

Slike 4.26, 4.27 in 4.28 prikazujejo vzorec pred, med in po poliranju.

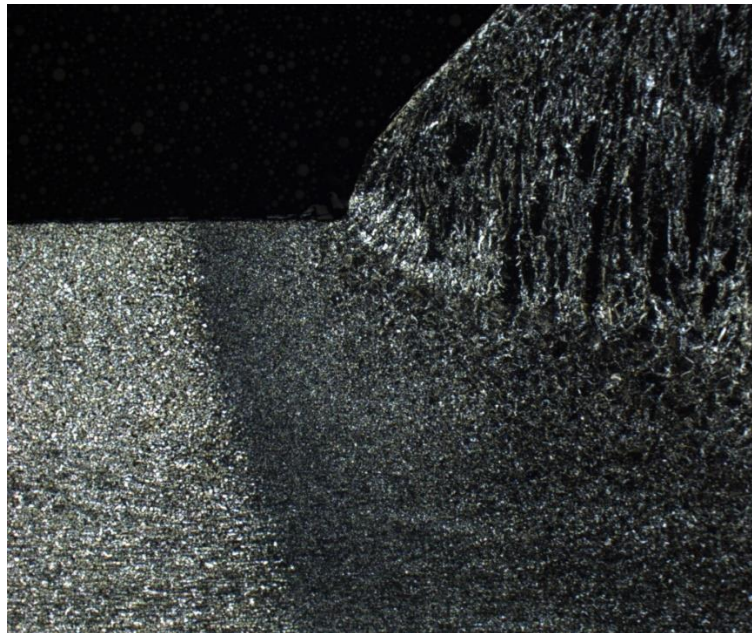


Slika 4.26: Priprava metalografskega obrusa-vzorec A pred poliranjem, nejedkan (5X)

[9]



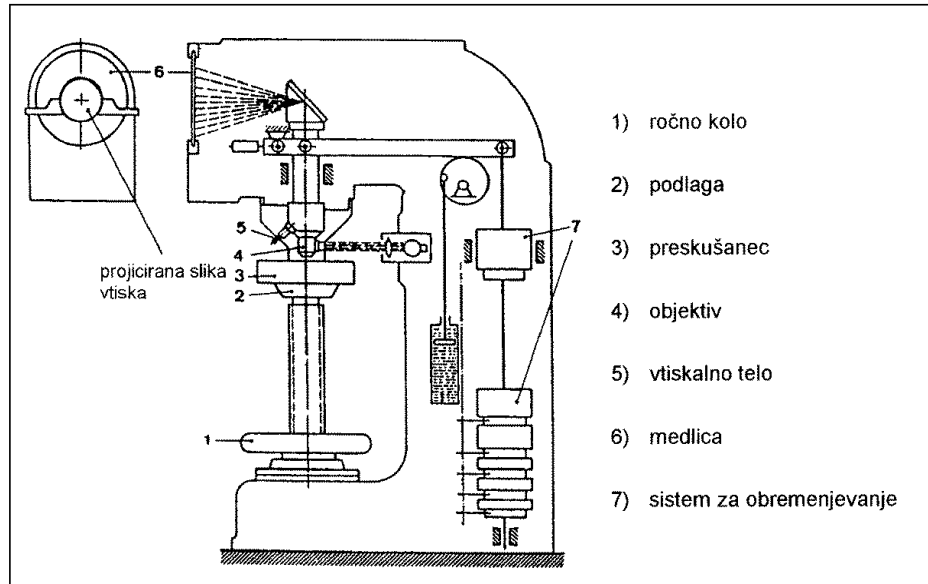
Slika 4.27: Vzorec A po izvedenem poliranju (50X) [9]



Slika 4.28: Enovarkovni navarek - vzorec A (50X) [9]

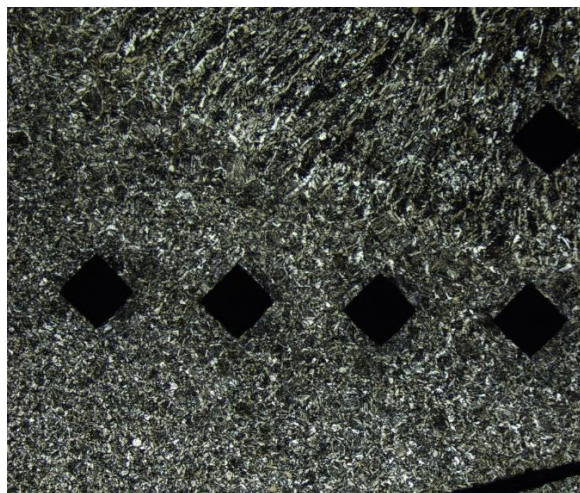
Merilnik trdote mora zagotoviti izbiro standardne obremenitve. Zahteva se, da poteka obremenjevanje vzorca do imenske obremenitve enakomerno brez sunkov in udarcev. Sila mora delovati preko vtiskalnega telesa pravokotno na preskušane. Podlaga, na katero se postavi vzorec, mora biti ravna, brez rje in oksidov, maziv in umazanije. V

merilno napravo trdote je vgrajen optični sistem, ki projicira ustrezno povečan vtisek na medlico, kjer lahko s primernim merilnim sistemom izmerimo dolžino obeh diagonal vtiska.

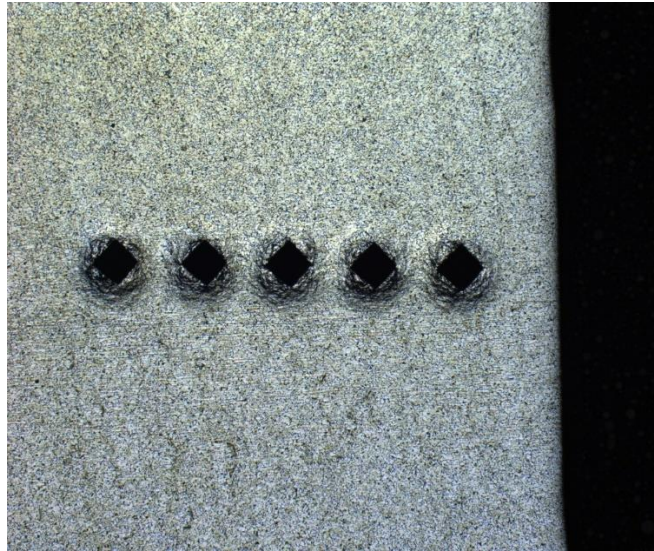


Slika 4.29: Shematski prikaz naprave za merjenje trdote po Brinellu ali Vickersu [13]

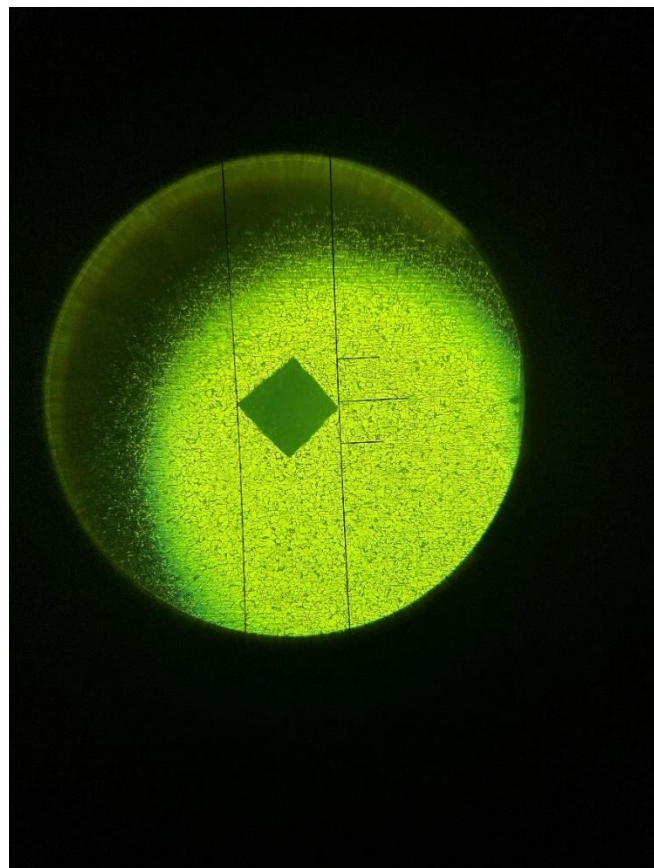
Slike 4.30 do 4.32 prikazujejo merjenje mikrotrdote skozi var, v osnovnem materialu ter določitev mikrotrdote po Vickersu.



Slika 4.30: Merjenje mikrotrdote v smeri skozi var, zajeto področje OM, TVP in vara - vzorec A (100X) [9]



Slika 4.31: Merjenje mikrotrdote v osnovnem materialu (50X) [9]



Slika 4.32: Določitev mikrotrdote po Vickersu z pol avtomatsko merilno napravo Vilson (100X) [9]

V Tabeli 4.3 so prikazani izmerjeni podatki o mikrotrdoti po Vickersu.

Tabela 4.3: Izmerjena mikrotrdota po Vickersu v področju osnovnega materiala, toplotno vplivanega področja in vara

Vzorec A					
Področje	meritev 1	meritev 2	meritev 3	meritev 4	meritev 5
Os. Mat.	135,1	135,9	134,8	133,3	134,2
Var	153,9	153,1	160,7	157,2	158,1
TVP	165,3	162,7	169,4	161,6	208,9

Vzorec B					
Področje	merit1	merit 2	merit 3	merit 4	merit 5
Os. Mat.	129,5	133,9	134,7	135,8	141,3
Var	158,1	163,2	163,1	160	157,6
TVP	165,7	163,6	165,2	167,4	177,5

Vzorec C					
Področje	merit1	merit 2	merit 3	merit 4	merit 5
Os. Mat.	138,8	141,8	137,5	140,2	138,1
Var	154,4	159,8	160,6	159,9	157,1
TVP	168,2	173,8	173,9	171,2	179,5

Merjenje mikrotrdote je bilo izvedeno na vseh metalografskih vzorcih prečno na smer TVP, kot prikazuje Slika 4.32, in sicer na način, da je bilo zajeto področje osnovnega materiala, TVP in vara. Maksimalne trdote so bile izmerjene na vseh navarkih v ozkem TVP, in sicer v grobo zrnatem toplotno vplivanem področju.

Mikrotrdote materiala vara so bile višje kakor mikrotrdote osnovnega materiala, kar kaže na to, da gre za gradnjo visokotrdnostnega vara, ki je v praksi najbolj zaželen in tudi največkrat uporabljen. V primeru natezne obremenitve navara in možne prisotne razpoke ostane material vara še v elastičnem področju, medtem ko se ostali osnovni material že prične plastično deformirati, kar je s stališča varnosti varjene konstrukcije zelo sprejemljivo, saj se prisotna razpoka v varu ne prične širiti, ampak ostane ujeta v elastičnem področju. Tako grajeni navari podaljšujejo življenjsko dobo energetske komponente oziroma celotne varjene konstrukcije. Zaradi tega so visokotrdnostni navari uporabni predvsem pri reparaturnem varjenju oziroma popravilu energetskih komponent.

5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo se osredotočili na uporabo robota z MAG postopkom navarjevanja jeklenih ravnih površin. Cilj raziskave je bil raziskati in preučiti učinkovitost in prednosti robotiziranega navarjevanja v primerjavi s klasičnimi metodami navarjevanja.

Raziskava je pokazala, da uporaba robota pri navarjevanju jeklenih ravnih površin prinese številne prednosti. Roboti omogočajo visoko stopnjo natančnosti in ponovljivosti pri izvajanju navarjevalnih postopkov varjenja, kar vodi k visoki kakovosti navarkov. Prav tako so roboti sposobni delati v zahtevnih okoljih in opravljati naloge na težko dostopnih mestih, kar je lahko ključnega pomena pri navarjevanju jeklenih konstrukcij, ki so se poškodovale.

Za izdelavo kvalitetnih navarkov se je preučil vpliv parametrov navarjevalnega procesa, kot so varilna hitrost, varilni tok in varilna napetost v odvisnosti od debeline jeklene plošče. Ugotovili smo, da pravilno nastavljeni parametri navarjevalnega procesa v kombinaciji s programiranjem robotske roke, omogočajo doseganje zelenih mehanskih lastnosti navarjevalnega spoja, kot so trdnost, žilavost, odpornost proti koroziji in estetski videz brez prisotnih razpok in varilnih napak v navarku. Našteti kombinaciji vplivnih faktorjev pravimo tehnologija varjenja, ki jo uporabljamo pri klasičnem varjenju ali pri izdelavi navarjevalnih slojev-varkov. Navarjevanje jeklenih površin izvajamo v praksi z namenom izboljšanja mehanskih lastnosti površinskega sloja glede na osnovni material, ki je ponavadi slabše kvalitete. Na ta način prihranimo čas in denar.

V raziskavi smo ugotovili, da je izrednega pomena pravilna in natančna priprava jeklenih plošč - površin pred navarjevanjem, kar pomeni pravočasno odstranjevanje rje, maščob

in drugih nečistoč. Pravilna priprava površin je ključnega pomena za doseg trdnega in zanesljivega navarjenega sloja - spoja.

Mikrotrdote materiala vara so bile višje kakor mikrotrdote osnovnega materiala, kar kaže na to, da gre za gradnjo visokotrdnostnega vara, ki je v praksi najbolj zaželen in tudi največkrat uporabljen. Tako grajeni navari podaljšujejo življensko dobo energetske komponente oziroma celotne varjene konstrukcije. Zaradi tega so visokotrdnostni navari uporabni predvsem pri reparaturnem varjenju oziroma popravilu energetskih komponent in dosegajo še višjo kvaliteto z uporabo robotskega varjenja.

Robotizirano navarjevanje jeklenih površin je moderen pristop, ki izboljša učinkovitost postopka, produktivnost in kakovost samega izdelka. V industrijskem okolju se roboti vse pogosteje uporabljajo za avtomatizacijo navarjevalnih procesov, saj omogočajo večje hitrosti izdelave izdelka, večjo natančnost in zmanjšanje nastanka varilnih napak.

Pomembno je poudariti, da je za uspešno uporabo robotov pri navarjevanju potrebno visoko strokovno znanje in praktične izkušnje. V našem primeru to pomeni izredno dobro poznavanje tehnologije varjenja nelegiranih in legiranih jekel za zahtevne namene v energetiki. Pravilno programiranje robotske roke, izbira ustrezne opreme, določitev pravilne tehnologije varjenja in strokovni nadzor nad postopkom navarjevanja so ključnega pomena za doseg želenih rezultatov.

VIRI IN LITERTURA

- [1] V. Gliha, *Fizikalno-metalurške osnove varjenja*: učbenik/Vladimir Gliha. Maribor: Fakulteta za strojništvo, 2007.
- [2] D. Čretnik, *Tehnologija spajanja in preoblikovanja Darja Čretnik*; 2. natis. Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 2002.
- [3] B. Kraut, *Krautov strojniški priročnik*, Ljubljana: Tehniška založba Slovenije 1998.
- [4] Z. Praunseis, *Vpliv znižane trdnosti na lomne lastnosti zvarnih spojev*, Doktorska disertacija, Univerza v Maribor, Fakulteta za strojništvo, 1998.
- [5] Z. Praunseis, *Gradniki v energetiki, univerzitetni učbenik*, Krško: Fakulteta za energetiko, 2012.
- [6] Thermo Fisher Scientific. Navodila za uporabo. 2011.
- [7] A. Umek, *Mehanika deformabilnih teles*. Ljubljana: Didakta, 1998
- [8] V. Gliha, B. Pučko, *Postopki spajanja: Skripta*. Maribor: Univerza v Mariboru Fakulteta za strojništvo, 2006.
- [9] L. Perović, *Zbirka fotografskih in metalografskih slik in diagramov od diplomskega dela*, Inštitut za energetiko, Krško, 2023.
- [10] Z. Praunseis, *Določitev krških mikrostruktur v visokotrnostnem jeklu, izvedbeni projekt*, Železarna Jesenice, 2012.
- [11] Z. Praunseis, *Pomembnost priprave vzorcev pri ocenitvi mikrostruktur v zvarnih spojih*, študija za Železarno Ravne na Koroškem, 2013.
- [12] Z. Praunseis, I. Rak, *Trdnostna neenakost visokotrnostnih zvarnih spojev z manjšo trdnostjo zvara, Varilna tehnika*, Zveza društev za varilno tehniko Slovenije, 48. letnik, št. 2, 2008.

- [13] Z. Praunseis, *Optimizacija tehnologije varjenja jeklenih zvarnih spojev, Predavanje, Projektni dan podjetja Skiti, Inštitut za energetiko, Krško, 2021.*