

TEHNOLOGIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA I POPRAVAK OSOVINE ZA ISPITIVANJE BRODSKIH SUSTAVA

Palinić, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:679762>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Stručni prijediplomski studij Konstrukcijsko strojarstvo

JOSIP PALINIĆ

ZAVRŠNI RAD

**TEHNOLOGIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA I
POPRAVAK OSOVINE ZA ISPITIVANJE BRODSKIH
SUSTAVA**

Split, srpanj 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Stručni preddiplomski studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Proizvodni postupci 1

ZAVRŠNI RAD

Kandidat: Josip Palinić

Naslov rada: Tehnologija postupka zavarivanja i popravke osovine za ispitivanje brodskih sustava

Mentor: Slaven Šitić

Komentor:

Split, srpanj 2023.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Konstrukcijsko strojarstvo
Predmet: Proizvodni postupci 1
Nastavnik: Slaven Šitić, viši predavač

ZADATAK

Kandidat: Josip Palinić

Zadatak: Tehnologija postupka zavarivanja i popravke osovine za ispitivanje brodskih sustava

U radu je potrebno:

- Općenito o tehnologiji izrade brodskih osovina
- Opis standardnih spojeva sa prirubicama
- Uvid u postojeće stanje
- Definiranje tehnologije zavarivanja
- Toplinska obrada
- Završna kontrola
- Zaključak

Sažetak

U ovome radu opisan je postupak popravka osovine za ispitivanje brodskih sustava izrađene od čelika CK45 na kojoj je došlo do nastanka pukotine u samome zavaru prilikom procesa zavarivanja. Zbog nemogućnosti nabavke nove osovine u kratkome vremenskom roku, odlučeno je da će se pristupiti popravku oštećene osovine na način da stari zavareni spoj bude uklonjen i osovina ponovno zavarena.

Neadekvatnom toplinskom obradom prije, za vrijeme i poslije procesa zavarivanja postiže se spoj sklon nastajanju pukotina i tehnički neispravnog zavara.

Pravilnom pripremom procesa zavarivanja na dijelu osovine gdje će se vršiti proces zavarivanja i naknadnom toplinskom obradom, postići će se kvalitetan spoj koji će omogućiti daljnju upotrebu osovine za ispitivanje brodskih sustava.

Ključne riječi: toplinska obrada, tehnologija zavarivanja, ugljični čelik

Summary (Technology of the welding procedure and shaft repair for testing ship systems)

This paper describes the procedure for repairing a shaft for testing ship systems made of CK45 steel, on which a crack occurred in the weld itself during the welding process. Due to the impossibility of procuring a new axle in short period of time, it was decided that the damaged axle would be repaired by removing the old weld joint and reweld the axle.

Inadequate heat treatment before, during and after the weldnig process results in joint porne to cracks and technically defective weld.

By properly preparing the welding process on the part of the shaft where the welding process will be preformed and subsequent heat treatment, a quality join will be achived that will enable further use of the saft for testing ship systems.

Key words: heat treatment, welding tehnology, carbon steel

SADRŽAJ

Sažetak	ii
Summary	ii
Uvod.....	1
1. Općenito o tehnologiji izrade brodskih osovina	2
2. Standardni spojevi sa prirubicama	5
3. Postojeće stanje.....	7
3.1 Potencijalni uzrok pukotine	8
4. Tehnologija zavarivanja	12
4.1 Priprema za zavarivanje	12
4.2 Temperatura predgrijavanja	14
4.3 Postupak zavarivanja	21
4.4 MIG postupaka zavarivanja	21
4.5 Proces zavarivanja	24
5. Toplinska obrada i završna kontrola	27
5.1 Strojna obrada nakon toplinske obrade.....	28
6. Zaključak.....	29
Literatura.....	30

POPIS SLIKA

Slika 1.1- Proces slobodnoga kovanja osovine iz sirovca na hidrauličkoj presi [3]	3
Slika 1.2- Shema zavarivanja trenjem i prikaz karakterističnoga srha [4].....	4
Slika 2.1- Prirubna spojka s naslonom za centriranje i iskovanom prirubnicama [5].....	5
Slika 2.2- Vrste prirubnica [6].....	6
Slika 3.1- Prikaz osovine i prirubnice sa zonom utjecaja topline nakon uklanjanja zavara i pukotine ..	7
Slika 3.2- Uptonov dijagram- dijagram početka i završetka pretvorbe austenita u martenzit [8].....	8
Slika 3.3- utjecaj temperature pregrijavanja na brzinu hlađenja [4]	9
Slika 3.4- Promjena tvrdoće zavara [4].....	10
Slika 3.5- Prikaz nastanka hladnih pukotina u čeliku [4].....	11
Slika 3.6- Nastanak unutarnjeg naprezanja prilikom skupljanja čelika [4].....	11
Slika 4.1- Priprema za zavarivanje skošenjem rubova kutnoga zavara [4].....	13
Slika 4.2- Skica osovine i prirubnice nakon procesa rezanja i brušenja	14
Slika 4.3- Prikaz dovođenja i odvođenja topline u križnome spoju.....	17
Slika 4.4- TTT dijagram čelika CK45 [9].....	18
Slika 4.5- Izgradnja peći oko osovine i prirubnice.....	20
Slika 4.6- Zagrijavanje mjesta zavarivanja uz pomoć izgaranja plina.....	20
Slika 4.7- Osnovni dijelovi MIG procesa [4].....	21
Slika 4.8- Ovisnost struje o brzini dobave žice i promjeru žice [10].....	23
Slika 4.9- Statička karakteristika izvora struje [4].....	23
Slika 4.10- Zavareni spoj osovine i prirubnice sa prikazom broja i redoslijeda prolaza zavara	25
Slika 4.11- Temperaturni hodogram predgrijavanja i zavarivanja	26
Slika 5.1- Prikaz hodograma predgrijavanja, zavarivanja i popuštanja	27
Slika 5.2- Tok silnica naprezanja u kutnim zavarima a) izbočeni b) ravni c) zaobljeni.....	28

POPIS TABLICA

Tablica 4.1- Postotak ugljika i legirnih elemenata u čeliku CK45	15
Tablica 4.2 – Zavarljivost čelika ovisno o C_{ekv} i potreba za pregrijavanjem	15
Tablica 4.3- Kemijski sastav prirubnice	16
Tablica 4.4- Kemijski sastav dodatnoga materija	22

Uvod

Osovine u brodskom sustavu služe za prijenos rotacijskog gibanja od pogonskog uređaja prema propeleru koji će rotacijsko gibanje pretvoriti u translacijsko gibanje cijeloga broda.

Osovina na brodu dio je pogonskog sklopa koji se nalazi između uređaja koji je izvor snage te daje rotacijsko gibanje (dizel motor, plinska turbina, nuklearna turbina...) i pogonskog uređaja koji pokreće brod.

Tema ovog završnog rada je popravak osovine za ispitivanje brodskih sustava kao što su ležajevi i utjecaj maziva na funkciju ležaja. Klasifikacijska društva ne dozvoljavaju bilo kakve dorade ili izmjene na brodskim sustavima ali u ovom slučaju se radi o osovini koja će se koristiti na sustavu za ispitivanje brodskih ležajeva. Osovina koja se popravljiva nije standardna osovina, već je izrađena od postojećih i dostupnih materijala odgovarajućom tehnologijom. Osovina koja je došla na popravak nije imala definiranu tehnologiju zavarivanja, a tijekom ispitivanja pojavila se pukotina između osovine i prirubnice. Osovina je izrađena od materijala CK45 koji spada u čelike sa udjelom ugljika između 0,42-0,5% ovisno o kemijskom sastavu, kaljene i popuštane čelik i prirubnice koja je izrađena od niskougljičnoga čelika.

Količina ugljika i prisustvo drugih legirnih elemenata može uzrokovati pojavu pukotina u zavarenom spoju ukoliko se ne pridržava tehnologije zavarivanja propisane od strane stručne osobe.

U ovome radu definirat će se pravilna priprema zavarenoga spoja kako bi se postigao kvalitetan zavar.

Na dostavljenoj osovini nalazili su se rotirajući ležajevi koji se koriste u fazi ispitivanja kliznih ležajeva radi preciznijeg rada te su omogućili zavarivanje u položenoj poziciji tj. zavarivanje uz rotaciju osovine.

1. Općenito o tehnologiji izrade brodskih osovina

Brodске osovine sastoје se od tri glavne komponente:

- Potisna osovina
- Međuvratilo
- Repna osovina

Osovine se obično izrađuju procesom kovanja materijala (slika 1.1) iz jednoga komada koji omogućuje povećanje čvrstoće materijala, veću rastezljivost i otpor habanju te su to ujedno i najvažnija svojstva materijala za izradu osovina.

Kovanje je proces oblikovanja metala korištenjem lokaliziranih tlačnih sila. Osnovni postupci kovanja su slobodno kovanje, kovanje u ukovnjima te isprešavanje. Kovanje sirovca treba vršiti u temperaturnom intervalu koje osigurava rekristalizaciju metala u procesu plastične obrade [1]. Slobodno kovanje se upotrebljava u proizvodnji osovina za brodske sustave. Nakon procesa kovanja slijedi proces strojne obrade radi postizanja potrebnih dimenzija. Za potrebe oblikovanja sirovca koriste se kovački čekići i prese, kovački alat i nakovnji.

Materijali od kojih se izrađuju brodske osovine moraju imati dobra antikorozivna svojstva, dobru čvrstoću, žilavost i otpornost na trošenje. Materijali koji se upotrebljavaju su ugljični čelik, nehrđajući čelik i duplex čelici [2].

U upotrebi ugljičnog čelika gdje osovina dolazi u kontakt s morskom vodom, osovina se zaštićuje epoxy premazom za zaštitu od vanjskog utjecaja morske vode.

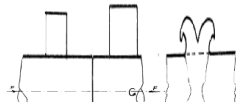


Slika 1.1- Proces slobodnoga kovanja osovine iz sirovca na hidrauličkoj presi [3]

Zavarivanje trenjem postiže se pritiskanjem nepomičnog dijela o rotirajući dio prikazanoj na slici 1.2. Dodirna površina se usred djelovanja trenja zagrije do ispod likvidus linije, u gnjecavo stanje. Nakon usijavanja nepomični se dio počne rotirati zajedno s rotirajućim dijelom i potom se utisnu jedan u drugi usred djelovanja sile koju daje uređaj za zavarivanje trenjem; time se postiže zavaren spoj. Utiskivanjem materijala nastaje karakterističan srh koji naknadnom strojnom obradom treba ukloniti.

Prednosti upotrebe zavarivanja trenjem su:

- Spajanje raznorodnih materijala
- Uska zona utjecaja topline
- Nema potrebe za zaštitnim plinom ili prahom i dodatnim materijalom
- Zbog malog unosa topline nema alotropskih modifikacija u osnovnome materijalu
- Moguće greške su svedene na minimum.
- Ostvaruje se sučeonu spoj



Slika 1.2- Shema zavarivanja trenjem i prikaz karakterističnoga srha [4]

2. Standardni spojevi sa prirubnicama

Prirubnica je strojni element za spajanje cijevi, ventila, pumpi i druge opreme u strojarskoj tehnici.

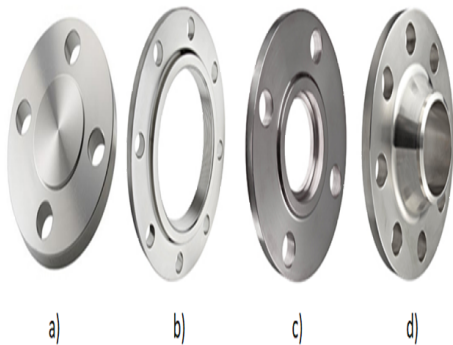
Prirubna spojka, kao što je prikazano na slici 2.1, vrsta je pogonske spojke koja se koristi za spajanje dvaju suosno poravnatih rotirajućih osovina [5]. Spada u krute spojke koje prenose okretni moment oblikom i/ili trenjem. Po jedna prirubnica postavljena je na kraj svake osovine, a dvije prirubnice spojene su vijčanim spojem. Centriranje se postiže naslonom za centriranje. Prirubnica, za razliku od kolutnih spojki, čini sastavni dio osovine ili vratila. Prirubnica se kod ovih spojki može izrađivati iskivanjem kraja vratila ili naknadnim zavarivanjem prirubnice za vratilo ili osovinu. Prirubna spojka može spadati i u sigurnosnu spojku gdje se brojem vijaka ili klasom vijaka osigurava maksimalni moment kojeg spojka može prenijeti prije popuštanja vijaka .

Slika 2.1- Prirubna spojka s naslonom za centriranje i iskovanom prirubnicama [5]

Prirubnice se obično izrađuju kovanjem te se strojno obrađuju na potrebnu mjeru, rijetko su proizvedene lijevanjem ili iz ploča.

Prirubnice se izrađuju od ugljičnih čelika, nehrđajućeg čelika, legiranih čelika i duplex legura. Uobičajeni način klasificiranja prirubnica je njihov način povezivanja za cijev. Standardi po kojima se proizvode prirubnice su standard Europske unije EN (European Norm), Njemački standard DIN (Deutsches Institut für Normung), sjevernoamerički standard ASME (American Society of Mechanical Engineers), Američki standard API (American Petroleum Institute), ...

Na slici 2.2 prikazane su neke vrste prirubnica.



Slika 2.2- Vrste prirubnica [6]

Promatrajući s lijeva prema desno, prikazano je:

- a) slijepa prirubnica koja se upotrebljava na mjestima gdje se cjevovod, ventili, i različita oprema moraju povremeno rastavljati radi održavanja.
- b) navojna prirubnica upotrebljava se na mjestima koja su vrlo zapaljiva, eksplozivna ili gdje zavarivanje nije opcija.
- c) „slip on“ prirubnica obično se upotrebljava za spajanje cijevi s niskim tlakom ili s malim rizikom curenja.
- d) prirubnica s grlom koriste se za sustave sa velikim temperaturama i velikim tlakom.

3. Postojeće stanje

Pregledom zavarenog spoja uočena je pukotina po cijelom obodu, u sredini zavora. Prema slici 3.1 vidljivo je da je sama zona utjecaja topline vrlo uska, svega nekoliko milimetara, što ukazuje da nije proveden proces predgrijavanja.



Slika 3.1- Prikaz osovine i prirubnice sa zonom utjecaja topline nakon uklanjanja zavora i pukotine

Zavarljivost je sposobnost stvaranja zavarenoga spoja koji će zadovoljiti svoju namjenu ili mogućnost izrade spoja prihvatljive kvalitete [4].

Budući da se radi o čeliku, CK45, koji spada u srednje ugljične čelike koji se naknadno obrađuju uglavnom kovanjem i posebnom toplinskom obradom, proizvođači [7] ne preporučuju zavarivanje ove vrste čelika zbog svog problematičnog kemijskog sastava i grupe čelika kojoj pripada.

Čelik CK45 spada u lošije zavarljive čelike što znači da je potrebno pridržavati se vrlo uskih tolerancija postupka zavarivanja za postizanje kvalitetnog spoja.

3.1 Potencijalni uzrok pukotine

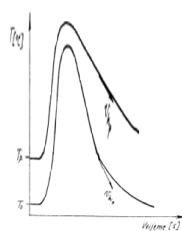
Kako se radi o materijalu sklonom stvaranju martenzitne strukture u zoni utjecaja topline, treba se provesti predgrijavanje kako bi se izbjeglo zakaljivanje uz zavar i u samome zavaru. Stvaranje zaostalih napreznja i difuzija vodika dovele su do nastajanja hladne pukotine.

Zavarivanje je proces spajanja dva materijala uz unos topline koji tali rubove osnovnoga materijala. Moguće je zavarivati bez dodatnog materijala, ali najčešće se koristi proces s dodatnim materijal. Nastala talina popunjava žlijeb između presjeka dva komada koji se spajaju. Odmicanjem izvora topline nastupa skrućivanje taline. Pod zavar spada i zona smještena neposredno uz samo mjesto zavarivanja te se proteže od područja taljenja do temperature postignute u osnovnome materijalu pri kojoj nije došlo do promjene svojstava. Ova zona naziva se zona utjecaja topline (ZUT). Bilo kakve greške nastale u zoni utjecaja topline smatraju se greškom tehnologije izrade zavarenoga spoja.

Do strukturnih promjena dolazi ovisno o postignutoj maksimalnoj temperaturi i o brzini hlađenja. Kako se u slučaju ovoga rada radilo o elektrolučnom zavarivanju, unos topline bio je veći od temperature taljenja, a u pravilu zna biti i po nekoliko stotina stupnjeva viši od temperature taljenja. Prikazano na slici 3.2. temperatura pretvorbe austenita u martenzit za materijal CK 45 kojem se udio ugljika kreće 0,42-0,45% C , je između 280-300 °C. Došlo je do zagrijavanja iznad temperature austenitizacije u zoni utjecaja topline koja se, zbog neadekvatne pripreme i toplinske obrade naglim hlađenjem, zakalila i prešla u martenzitnu strukturu.

Slika 3.2- Uptonov dijagram- dijagram početka i završetka pretvorbe austenita u martenzit [8]

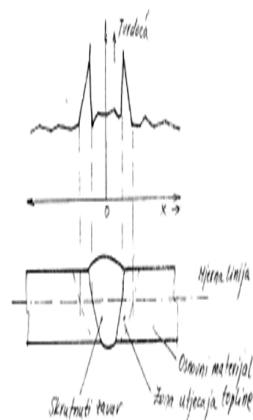
Kupka se u zavarenom spoju hladi odvođenjem topline velikim dijelom u osnovni materijal. U većini slučajeva u potpunosti se zanemaruje odvođenje topline s površine zavara. Širina zone utjecaja topline i brzina hlađenja ovise o gubitku topline iz zavara u osnovni materijal. Brzina hlađenja bitno ovisi o debljini materijala koji se zavaruje i količini unesene topline procesom zavarivanja. Kako se u ovom slučaju radi o osovini debljoj od 25mm, spada u debele materijale koji brzo odvođuju toplinu i ponašaju se kao toplinski ponor. Na slici 3.3 vidi se da ukoliko se materijal ne pregrijava, brzina odvođenja topline je velika što dovodi do stvaranja martenzitne strukture iz austenita u zoni utjecaja topline.



Slika 3.3- utjecaj temperature pregrijavanja na brzinu hlađenja [4]

Tvrdoća u pravilu poraste u zoni utjecaja topline do maksimuma u području uz samu granicu taljenja što se vidi na slici 3.4. Pojavom martenzitne strukture, u zoni utjecaja topline raste tvrdoća, ali opada žilavost.

Ugljični čelici, u koje spada i CK45, pokazuju drastičan pad žilavosti u zoni utjecaja topline što pogoduje stvaranju hladnih pukotina na mjestima koncentracije naprezanja. Martenzitna pretvorba i skokovito povećanje tvrdoće predstavlja mjesto koncentracije naprezanja.



Slika 3.4- Promjena tvrdoće zavora [4]

Neprovođenjem predgrijavanja osovine prije procesa zavarivanja omogućeno je stvaranje hladnih pukotina.

Hladne pukotine ili vodikove pukotine nastaju satima, danima, pa i tjednima nakon obavljenoga procesa zavarivanja, stoga ih se još naziva i odgođenim pukotinama u anglosaksonskom govornom području. Najčešće se pukotine razviju unutar dva dana. Nastaju zajedničkim djelovanjem zaostalih naprezanja i difuzije vodika u mikrošupljinu krhke strukture.

Pojava hladnih pukotina kombinacija je izlučivanja difuznog vodika u mikrošupljine u materijalu, niske žilavosti i zaostalih naprezanja. Nastale molekule vodika uslijed naglog hlađenja se spajaju te povećavaju tlak u mikrošupljinama zavora, što sa zaostalim naprezanjima u krhkoj strukturi izaziva pojavu pukotine. Inicijalne pukotine se zatim spajaju i postaju veće pukotine, sve do golim okom vidljivih većih pukotina. Kako austenitizirana zona brzim hlađenjem doživljava pretvorbu u martenzitnu strukturu, a ujedno sadrži i velike količine vodika, upravo u tome području dolazi do pojave pukotine kao što je vidljivo na slici 3.5.



Slika 3.5- Prikaz nastanka hladnih pukotina u čeliku [4]

Molekula vodika disocira u eklektičnom luku u atomima vodika i ulazi u rastaljenu kupku, a odatle u austenitirani dio zone utjecaja topline. Stvaranje vodikovih pukotina potpomognuto je i zaostalim napreznjima uslijed stezanja materijala koje ubrzava izlučivanje vodika i nastajanje pukotina.

Slika 3.6- Nastanak unutarnjeg napreznja prilikom skupljanja čelika [4]

Kako nije provedeno pregrijavanje, vodik nije ispario u atmosferu, komad se nije kontrolirano hladio kako bi se izbjeglo zakaljivanje i martenzitna pretvorba, te nije provedena toplinska obrada nakon procesa zavarivanja kako bi se uklonila unutarnja napreznja prikazanoj na slici 3.6. Došlo je do stvaranja pukotine uz sami rub zavora po cijelome obodu.

4. Tehnologija zavarivanja

4.1 Priprema za zavarivanje

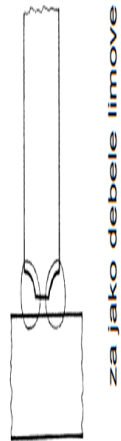
Prije samoga procesa zavarivanja potrebno je ukloniti stari, loš zavar procesom rezanja i brušenja. Rezanje spada u proces obrade metala u kojoj se dio materijala u potpunosti ili djelomično odvaja od cjeline .

Na tokarskom stroju se uklanja stari postojeći zavar s prirubnice. Prilikom samoga procesa rezanja obraća se pažnja na parametre rezanja, jer će se nakon završetka procesa popravka osovine zavarivanjem i toplinske obrade osovina ponovo strojno obraditi. Ukoliko se uoči prilikom rezanja da je područje koje se obrađuje tvrdo (velike sile u procesu rezanja i intenzivno trošenje noža od brzoreznog čelika), možemo zaključiti da se zavar ponovo zakalio.

Prosječna tvrdoća martenzita kreće se između 800-900 HV, stoga se radi o jako tvrdoj fazi i potrebno je izabrati adekvatan nož za strojnu obradu kako bi se ona uspješno uklonila. Noževi sa zaštitnim slojem na bazi kobalta, nitrirani noževi, karbida i titanovih karbida se preporučuju kao i keramičke pločice za uklanjanje ovako tvrdih faza (obrada prirubnice – uklanjanje starog zavara).

Nakon strojne obrade rezanja pristupa se postupku brušenja kako bi se uklonilo materijal na osovini koji može sadržavati mikro pukotine te otklonila bilo kakva mogućnost stvaranja pukotine uzrokovane zaostalim naprezanjima ili mikro pukotinama iz staroga zavara.

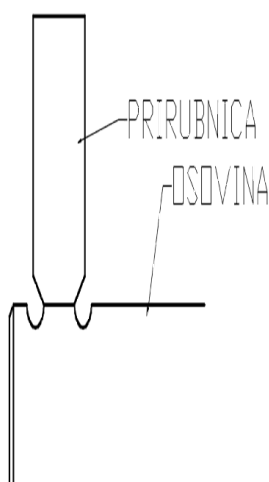
Na osnovu podataka iz literature [4] za jako debele limove preporuča se priprema zavara prikazana na slici 4.1 te se vrši priprema za zavarivanje kutnoga zavara.



Slika 4.1- Priprema za zavarivanje skošenjem rubova kutnoga zavara [4]

Izradom skošenja na prirubnici koja se zavaruju dobivamo veću površinu na osnovnom materijalu i time se omogućuje bolja penetracija zavara u osnovni materijal te veća kvaliteta i površina zavarenoga spoja.

Nakon procesa rezanja i brušenja osovina na sebi ima ukopani kanal do meke faze, kao što se može vidjeti na slici 4.2 koja prikazuje skicu stanja nakon strojne obrade osovine i prirubnice.



Slika 4.2- Skica osovine i prirubnice nakon procesa rezanja i brušenja

4.2 Temperatura predgrijavanja

C_{ekv} je veličina koja predstavlja opću orijentacijsku vrijednost osjetljivosti materijala na stvaranje pukotina, te ukazuje na zavarljivost čelika i sposobnost stvaranja kvalitetnog zavara. Također ukazuje je li potrebno provesti proces predgrijavanja.

Sadržaj ugljika je glavni faktor koji određuje čvrstoću i zavarljivost u ugljičnim čelicima. S povećanjem sadržaja ugljika, tendencija kaljenja se povećava, a plastičnost smanjuje te se povećava mogućnost stvaranja pukotina. Povećanjem zakaljivosti opada zavarljivost. Glavni utjecajni element za zakaljivanje čelika prilikom procesa zavarivanja je ugljik.

Iako postotak ugljika može biti ispod granice do koje nije potrebno predgrijavati materijal (ona iznosi 0,45), može doći do zakaljivanja čelika u zoni utjecaja topline zbog utjecaja drugih legiranih elemenata. Utjecaj pojedinih legiranih elemenata ne može se promatrati odvojeno s obzirom na to da njihove kombinacije mogu različito utjecati na zakaljivost čelika. Svaki pojedini legirani element dijeli se faktorom većim od 1, koji pokazuje koliko puta je manji utjecaj legiranog elementa od utjecaja ugljika na zakaljivost.

Način određivanja C_{ekv} definiran je po standardu zavarivačkih udruženja kao što su BWRA, IIW, AWS i uputama brojnih proizvođača pojedinih vrsta čelika.

Ekvivalent ugljika određuje se prema formuli:

$$C_{ekv} = \%C + \text{Suma}(\%L_i/m_i) \quad (3.1)$$

gdje je:

%C- sadržaj ugljika u čeliku

%Li- sadržaj pojedinog legiranog elementa

m_i - faktor utjecaja legiranog elementa

Po formuli koju preporučuju autori [8] odredit će se C_{ekv} za čelik CK45 iz njegovoga kemijskoga sastava prikazanog u tablici 4.1. Kako su vrijednost ugljika i mangana dani u rasponu nekoliko posto, za potrebe proračuna uzet će se njihova srednja vrijednost.

Fosfor i sumpor ne utječu na C_{ekv} pa se nisu uzimali u proračun.

Tablica 4.1- Postotak ugljika i legiranih elemenata u čeliku CK45

Materijal	C	Mn	P	S	Si
CK45	0,42-0,45	0,5-0,8	0,035	0,03	0,4

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Si - 0,5}{5} = 0,545 \quad (3.2)$$

Proračunom je utvrđen C_{ekv} koji iznosi 0,545 te će se iznos dobiven proračunom usporediti sa tablicom zavarljivosti ugljičnih čelika prikazanoj u tablici 4.2.

Tablica 4.2 – Zavarljivost čelika ovisno o C_{ekv} i potreba za pregrijavanjem

Uobičajena klasifikacija vrijednosti C_{ekv}		
Ekvivalent ugljika	Zavarljivost	Pregrijavanje
Do 0.35	Odlična	Nije potrebno
0.36-0.40	Vrlo dobra	Nije potrebno
0.41-0.45	Dobra	Potrebno
0.46-0.50	Zadovoljavajuća	Potrebno
Preko 0.5	Loša	Potrebno

Usporedbom proračunom dobivene vrijednosti C_{ekv} i usporedbom s tablicom zavarljivosti, dolazi se do zaključka da je čelik CK45 loše zavarljiv te da je potrebno provesti uske tolerancije procesa zavarivanja. Prijedlogom tablice i literature potrebno je provesti pregrijavanje prije procesa zavarivanja kako bi se izbjeglo nastajanje hladnih pukotina u zoni utjecaja topline.

Rezultati dobiveni proračunom odgovaraju i prijedlozima iz priručnika koji ne preporučuju zavarivanje čelika CK45 (u priručniku se opisuje da ima slična svojstva sa čelikom C45), te ukoliko se pristupa zavarivanju, potrebno je provesti toplinsku obradu prije i poslije procesa zavarivanja i držati se uske tolerancije procesa zavarivanja. Po mogućnosti treba izbjegavati zavarivanje kod kojih se rub tali.

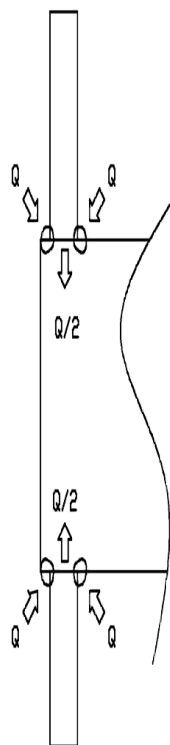
Kako bi se izbjeglo nastajanje hladnih pukotina i ostvario kvalitetan spoj, potrebno je vršiti kvalitetnu toplinsku obradu u vidu predgrijavanja prije samoga procesa zavarivanja.

Spoj je ostvaren između prirubnice i osovine, prirubnica je izrađena od niskougličnog čelika (kemijskog sastava prikazanog u tablici 3) koji je prema tablici 4.2. odlično zavarljiv, ali budući da se radi o dva raznorodna materijala, potrebno je odabrati materijal koji neće povećati mogućnost nastajanja martenzitne strukture .

Tablica 4.3- Kemijski sastav prirubnice

Materijal	C	Mn	P	S	N
St 37-2	0,17-0,20		0,05	0,05	0,009

Kako se zavaruje osovina koja je deblja od 25 mm, a 25 mm predstavlja granicu tankoga debljeg materijala u procesu zavarivanja [4], potrebno je vršiti predgrijavanje jer osovina zbog svoje dimenzije i mase predstavlja toplinski ponor. Zbog načela da se toplina u velikoj mjeri odvodi u o deblji materijal, a zbog dimenzija materijala i vrste spoja koja je prikazana na slici 4.3. odvođenje topline iz zone utjecaja topline je jako brza i uzrokuje probleme u vidu zakaljivanja komada. Toplina se zbog vrste spoja uglavnom odvodi u osovinu, a odvedena toplina u prirubnicu se zanemaruje radi male dimenzije i mase.



Slika 4.3- Prikaz dovođenja i odvođenja topline u križnome spoju

Zakaljivanjem komada i brzim odvođenjem topline stvaraju se unutarnja naprezanja i pad žilavosti koji pogoduju nastajanju hladnih pukotina opisanih u poglavlju potencijalni uzrok nastanak pukotine. Predgrijavanje omogućava eliminaciju i isplinjene vodika iz zavarenoga spoja što osigurava kvalitetno izveden zavareni spoj.

Predgrijavanje je proces toplinske obrade zagrijavanja komada bilo u cijelosti ili samo jednoga dijela u kojem će se vršiti proces zavarivanja. Predgrijavanje se odvija dok materijal ne dođe do određene temperature koja će osigurati kvalitetnu provedbu procesa zavarivanja. U pravilu se predgrijavaju materijali sa C_{ekv} većim od 0,45 te debljinom većom od 25mm ili 1" po anglosaksonskim mjerama. Kod tanjih materijala predgrijavanje se obavlja jer može narušiti svojstva materijala.

Predgrijavanje se vrši prije samoga procesa zavarivanja i po potrebi, ako temperatura pada, za vrijeme samoga procesa zavarivanja. Izvor topline za proces predgrijavanja su smjese plinova i zraka, nije potrebna visoka temperatura plamena, elektrootpornim grijačima s gipkim spiralama, induktivnim grijačima s cjevastim vodenim hlađenim induktorima i u pećima.

Prednosti radi kojih se vrši proces predgrijavanja su:

- Smanjenjem brzine odvođenja topline iz zone utjecaja topline postiže se žilavija struktura s većim otporom stvaranju pukotina
- Smanjenje brzine hlađenja omogućuje vodik da isplini iz spoja i ne uzrokuje pukotinu
- Povećava temperaturu poviše temperature nastajanja krutih faza u procesu obrade
- Smanjenje zaostalih toplinskih naprezanja i izvitoperene strukture

Temperatura potrebna za predgrijavanje određenoga čelika uzima se iz TTT (time, temperature and transformation) dijagrama toga čelika.

U slučaju ovoga radi se o čeliku CK45 i njegov TTT dijagram se nalazi na slici 4.4 iz koje će se očitati na kojoj temperaturi nastaje martenzitna transformacija koja nepovoljno utječe na zavarljivost.

Slika 4.4- TTT dijagram čelika CK45 [9]

Prema dijagramu sa slike 4.4, čelik CK 45 ima visoku temperaturu martenzit start pretvorbe koja počinje na 340°C. Kako se radi o debelom komadu čelika, toplina dovedena u procesu zavarivanja brzo se odvodi u osnovni materijali, što pogoduje stvaranju krutih martenzitnih struktura koje su u prvome procesu zavarivanja uzrokovale pojavu pukotina.

Temperatura predgrijavanja mora biti veća od temperature martenzit start pretvorbe kako bi se spriječilo stvaranje martenzitne strukture u zoni utjecaja topline.

Svi ovi parametri, visoka temperatura nastajanja martenzita, te široki komad osovine ukazuju da se radi o jako problematičnom materijalu za zavarivanje. Proizvođači [7] klasificiraju čelik [CK 45] u materijale koji se zavaruju trenjem, uz praćenje parametara unosa topline i naknadnom toplinskom obradom. Pristupu zavarivanju i popravcima osovine mora se pristupiti s točno definiranim parametrima predgrijavanja, tehnologije zavarivanja i završnoj toplinskoj obradi.

Temperatura predgrijavanja treba biti minimalno 350 °C, ne treba pretjerivati s procesom predgrijavanja, te se odmah nakon procesa predgrijavanja kreće s procesom zavarivanja. Nakon svakoga prolaska zavara temperatura će se kontrolirati i ako se primijeti pad ispod 350 °C, pristupit će se dodatnome dogrijavanju osovine na zadanu temperaturu predgrijavanja.

Kako se zavarivanje vrši samo na jednome dijelu osovine, nije potrebno da se cijeli komad zagrije. Na dijelu gdje će se vršiti zavarivanje osovine i prirubnice bit će izrađena peć, koja će omogućiti predgrijavanje komada i zadržavanje topline. Prirubnica će se grijati skupa s osovinom, iako po kemijskom sastavu nije potrebno predgrijavanje, postupak predgrijavanja provest će se sa prirubnicom na osovini.

Prirubnica je izrađena za odgovarajući promjer osovine, zagrijavanjem osovine dolazi do proširenja iste, te može biti problematično montiranje prirubnice na osovinu uslijed toplinskoga širenja osovine. Također prirubnicu se zagrijava skupa s osovinom kako bi se izbjegla temperaturna razlika između osovine i prirubnice što u konačnici može dovesti do rastvaranja vodika i zaostalih naprezanja u zoni utjecaja topline koji mogu dovesti do stvaranja pukotine.

Na slici 4.5 prikazano je oblaganje dijela na komu će se vršiti zavarivanje s izolacijskim materijalom u ovom slučaju šamotnom opekom koja je ujedno i izolator.



Slika 4.5- Izgradnja peći oko osovine i priubnice

Prirubnica i osovina zagrijavaju se smjesom propan-butan plina koji je izvor topline potreban za proces predgrijavanja osovine kao što se može vidjeti na slici 4.6.

Slika 4.6- Zagrijavanje mjesta zavarivanja uz pomoć izgaranja plina.

Osovina će se zagrijavati postepeno, nije potrebno da temperatura plamena bude prevelika, proces zagrijavanja će trajati 1 sat.

4.3 Postupak zavarivanja

Za zavarivanje srednje ugljičnih čelika pogodni su TIG, MIG i REL [14] postupci zavarivanja. Kako se radi o srednje ugljičnom čeliku sa sklonosti stvaranju krtih faza, izbor tehnologije zavarivanja je jako bitan kako bi se osigurao kvalitetan zavar.

Najbolji postupak zavarivanja između ova tri dostupna procesa za zavarivanje ove vrste čelika je MIG postupak, te je on upravo i odabran kao postupak kojim će se vršiti proces zavarivanja prirubnice i osovine.

4.4 MIG postupaka zavarivanja

MIG postupak je elektrolučan postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. U MIG procesu zaštitni plin je inertni plin argon ili njegove mješavine s kisikom, CO₂ i helijem. Ime potječe od početnih slova engleskog naziva Metal inert gas. Zavaruje se istosmjernom strujom s „+“ polom na elektrodi. Električni luk održava se između kontinuiranog dobavljanja žice koja je ujedno dodatni materijal koji se deponira u zavareni spoj.

Glavni dijelovi, prikazani na slici 4.7, su zaštitni plin, kolut sa žicom, pogonski mehanizam, izvor struje, pištolj s polietilenskim kabelom i „masa“.

Slika 4.7- Osnovni dijelovi MIG procesa [4]

Elektrodnu žicu kroz kabel gura pogonski elektromotor pomoću nazubljenih kotačića. Za tanke žice, koje mogu zapeti u kabelu, postoje izvedbe s vučnim motorom u drški pištolja. Kabel inače ne prelazi 5 m, ali postoje posebne izvedbe do 15 metara.

Prednosti MIG postupka su:

- Velika učinkovitost zavarivanja radi automatske dobave dopunskog materijala
- U usporedbi sa TIG i REL postupkom, MIG proces daje kvalitetniji zavar u manjem vremenskome roku
- Proces može spajati raznorodne materijale
- Proces nudi širok raspon parametra zavarivanja i način prijenosa metala

Nedostaci MIG postupka:

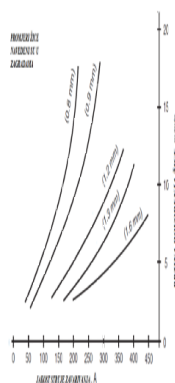
- Otežana zaštita na terenu
- Mogući problemi kod dobave žice
- Kompleksnija oprema u usporedbi sa REL postupkom

Dodatni materijal u MIG postupku nalazi se na kolutu i pogonskim uređajem se gura kroz kabel do pištolja gdje se onda preko pištolja deponira taljenjem u zavar. Dopunski materijal, u procesu zavarivanja CK45 čelika, je pobakrena čelična žica VAC60 promjera $\Phi 1,2$ mm. Bakreni sloj štiti žicu od oksidacije i omogućava bolji provod struje kroz žicu. Kemijski sastav žice vidljiv je u tablici 4. Mangan je glavni legirani element dodatnog materijala koji ima funkciju smanjenja krhosti zavara.

Tablica 4.4- Kemijski sastav dodatnoga materijala

Dodatni materijal	C	Mn	P	S	Si
VAC60	0,08	1,5	0,035	0,025	0,9

Najvažniji parametar MIG zavarivanja je jakost struje koja utječe na način prijenosa metala u električnome luku. O jakosti struje procesa zavarivanja ovisi penetracija luka, količina taline te brzina zavarivanja. Odabir jakosti struje ovisi o promjeru žice i brzini dobave žice. Na slici 4.8 prikazan je ovisnost struje zavarivanja o promjeru i brzini dovođenja žice.



Slika 4.8- Ovisnost struje o brzini dobave žice i promjeru žice [10]

Kako se zavarivanje odvija sa žicom promjera $\phi 1,2$ mm i brzina dobave žice je 4m/min, s dijagrama se očita jakost struje od 150A.

MIG proces ima položenu statičku karakteristiku izvora struje što omogućava brzu regulaciju duljine luka uz konstantnu dobavu žice. Duljina luka se stabilizira kada se izjednače brzine dobave i taljenja žice. Karakteristika izvora struje može se vidjeti na slici 4.9.

Slika 4.9- Statička karakteristika izvora struje [4]

Zaštitni plin štiti područje zavarivanja od reakcije s okolnom atmosferom te utječe na oblik zavara, brzinu zavarivanja i stabilnost električnoga luka [4].

Zaštitni plin koji se koristio u procesu zavarivanja prirubnice na osovinu je mješavina argona i 2%-tnog kisika. Kisik utječe pozitivno na fluidnost taline i deponiranoga materijala u zavar.

4.5 Proces zavarivanja

Nakon odrađenoga procesa predgrijavanja i kontrole temperature osovine koja treba postići 350°C kako bi se izbjeglo pojava zakaljene struktura u zoni utjecaja topline i hladne pukotine, pristupa se MIG procesu zavarivanja prirubnice na osovinu.

Prilikom procesa zavarivanja izvršit će se sveukupno 6 prolaza bez prekida, sa svake strane prirubnice po 3 puta po cijelome obodu osovine. Prolazi osiguravaju potrebno nadvišenje zavora kako bi se nakon završetka toplinske obrade mogla vršiti strojna obrada zavora radi smanjenja koncentracije naprezanja i osigurati nosivost samoga zavora. Višeslojni prolazi postižu da svaki novi prolaz odžaruje prethodni prolaz i time poboljšava mehanička svojstva zavora. Parametri zavarivanja definirani su u opisu MIG procesa, a parametri su struja jakosti 150 A i napon 16V, brzina dobave žice od 4 m/min i zaštitni plin koji je mješavina argona i 2% kisika protoka 10 litara u minuti. Na slici 4.10 mogu se uočiti numerirani prolazi zavora po obodu osovine. Prikaz izračunavanja deponiranog materijala prikazano je u formuli 4.1.

Površina zavora smatrati će se kao jednakokrani trokut s katetama od 8mm. Navariti će se veća površina zavora, kako bi ostvarili dovoljno nadvišenje za strojnu obradu. Površina tog trokuta izračunata je u formuli 4.1.

$$A = a^2 = 8^2 = 64 \text{ mm}^2 \quad (4.1)$$

Volumen(4.3) se dobije umnoškom površine (4.1) i opsega kružnog vijenca(4.2).

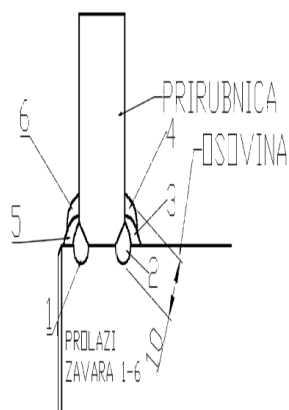
$$O = \pi \times d = \pi \times 240 \text{ mm} = 753,6 \text{ mm} \quad (4.2)$$

$$V = A \times O = 64 \text{ mm} \times 753,6 \text{ mm}^2 = 48\,230,4 \text{ mm}^3 \quad (4.3)$$

Gustoća (ρ) dodatnoga materijal je 7800 kg/m³. Masu deponiranog materijala dobijemo množenjem gustoće i volumena V.

$$m = V \times \rho = 48\,230,4 \times 10^{-9} \times 7800 = 0,38 \text{ kg} \quad (4.4)$$

Deponirano je u procesu zavarivanja 0,38 kg dopunskog materijala.

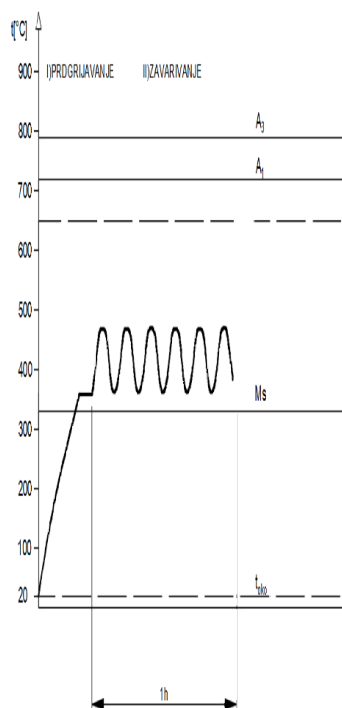


Slika 4.10- Zavareni spoj osovine i prirubnice sa prikazom broja i redoslijeda prolaza zavara

Redoslijed prolaza zavara odgovara numeričkom označavanju na slici 4.10.

1. prolaz nalazi se sa vanjske strane prirubnice
2. prolaz unutarnje strane prirubnice prema osovini
3. i 4. prolaz unutarnje strane prema prirubnici
5. i 6. prolaz vanjske strane prema osovini

Nakon svakoga prolaza vrši se vizualna kontrola samoga zavara i zone utjecaja topline. Pozornost je posvećena pojavi pukotina i širini zone utjecaja topline. Ako se primijete bilo kakve nepravilnosti, u vidu pukotina, pucketanja ili pojave mjehurića na površini zavara zbog loše zaštite plina, proces zavarivanja bit će prekinut. Također, nakon svakoga prolaza vršit će se kontrola temperature osovine i po potrebi dogrijavanje. Temperature za vrijeme samoga procesa zavarivanja mogu prikazane su u hodogramu toplinske obrade na slici 4.11.



Slika 4.11- Temperaturni hodogram predgrijavanja i zavarivanja

Na temperaturnom dijagramu (slika 4.11) primjećuje se temperaturna oscilacija za vrijeme procesa zavarivanja koji je trajao 1 sat. Može se primijetiti kako je vršeno 6 prolaza za vrijeme procesa te da temperatura nije pala ispod M_s (martenzit start) linije.

Nakon završetka procesa zavarivanja ponovno se postavlja peć kako bi se mogla izvršiti toplinska obrada popuštanja.

5. Toplinska obrada i završna kontrola

Nakon završetka prolaza zadnjeg zavora, komad u peći se ponovno zagrijava, bez da temperatura padne ispod 350°C, i zagrijava se na temperaturu od 650°C kako bi se izvršilo visokotemperaturno popuštanje.

Popuštanje je vrsta toplinske obrade koja se vrši nakon zavarivanja čelika sklonih stvaranju tvrdih faza i procesa kaljenja zagrijavanjem čelika na neku temperaturu ispod A_1 te izotermnim držanjem na toj temperaturi.

Popuštanjem se postiže:

- Povećanje žilavosti eliminacijom martenzita koji ima loša rastezljiva svojstva
- Eliminacija zaostalih napreznja
- Smanjenje tvrdoće i krhkosti

Procesom popuštanja smanjuje se tvrdoća i čvrstoća, a žilavost i rastezljivost se povećavaju. Proces popuštanja čelika CK45 vrši se unutar peći na temperaturi od 650°C na kojoj se osovina skupa s prirubnicom izotermno drži 2 sata, što se može vidjeti na slici 5.1. Popuštanjem se tvrde faze omekšavaju. Držanjem 2 sata na temperaturi od 650°C i laganim hlađenjem izbjegava se nastanak zaostalih napreznja.

Slika 5.1- Prikaz hodograma predgrijavanja, zavarivanja i popuštanja.

Nakon završetka toplinske obrade prestaje se dovoditi toplina unutar improvizirane peći, te se pušta da se komad ohladi unutar peći. Komad se hladi brzinom hlađenja od 100°C/h. Nakon što se komad ohladi, izvršit će se vizualna provjera zavarenoga spoja. Nakon toplinske obrade i zavarivanja mora ostati dovoljno nadvišenja zavara kako bi se pristupilo strojnoj obradi za smanjenje koncentracije naprezanja.

5.1 Strojna obrada nakon toplinske obrade

Prilikom strojne obrade vrši se kontrola parametara rezanja, koji su ujedno i kontrola tvrdoće zavara, kako bi se utvrdilo je li došlo do pojave tvrdih martenzitnih faza unutar zavara. Parametri na koje se obraća pažnja su nagli udari noža unutar zavara i porast sila u procesu strojne obrade.

Na mjestima naglih prijelaza (ugarnih utora) dolazi do koncentracije naprezanja. Koncentracija naprezanja je lokalno povećanje naprezanja koje može biti nekoliko puta veća od same nosivosti materijala, zbog čega treba izvoditi prijelaz sa što blažim skretanjima silnica unutar materijala sa užeg dijela na širi dio izratka.

Nepravilna površina zavarenoga spoja smanjuje dinamičku nosivost zavara, te se ona eliminira kako na površini ne bi bilo nikakvih nepravilnosti koje mogu biti uzrok nastanka inicijalne pukotine i utjecati na dinamička svojstva zavarenoga spoja. Konkavnim zaobljenjem zavara postiže se blago skretanje silnica i smanjuje se koncentracija naprezanja. Primjer zaobljenja zavara, radi smanjena koncentracije naprezanja može se vidjeti na slici 5.2.

Slika 5.2- Tok silnica naprezanja u kutnim zavarima a) izbočeni b) ravni c) zaobljeni

6. Zaključak

Kvalitetan zavar koji odgovara svrsi moguće je postići uz adekvatno poznavanje tehnologije zavarivanja. U praksi se često koriste različiti tipovi materijala i vrste materijala, a neka od njih mogu imati lošija svojstva zavarljivosti ili pak spadaju u kategoriju materijala koja se ne zavaruju. Poznavanjem o kojoj vrsti materijala se radi i njegovom kemijskom sastavu, moguće je odabrati takvu tehnologiju zavarivanja da i materijali sa lošim svojstvom zavarivanja mogu ostvariti kvalitetan zavareni spoj. Izrada kvalitetnog zavarenog spoja proces je koji ne uključuje samo proces zavarivanja, nego i samu pripremu i naknadnu toplinsku obradu koja će omogućiti tehnički ispravan zavar koji će zadovoljiti svoju funkciju u eksploataciji. U ovome radu prikazano je kako se praćenjem vrlo uskih parametara i dobrom pripremom zavarivanja postiže kvalitetan spoj. Izrada zavara ne uključuje samo pripremu vrste spoja, već i odabir odgovarajuće tehnologije zavarivanja. Praćenje procesa zavarivanja pravilnom tehnologijom zavarivanja može omogućiti u konačnici kvalitetan zavareni spoj.

Literatura

Knjige:

- [1] Sveučilište u Splitu, SOSS, Šitić S, Proizvodni postupci 2, Dostupno na: https://moodle.oss.unist.hr/pluginfile.php/24846/mod_resource/content/2/Deformiranje_1_dio.pdf dana 28.7.2023.
- [2] BT Marine, dostupno na: <http://www.btmarinepropellers.co.uk/propeller-shafts.html> dana 27.7.2023.
- [3] Slika preuzeta sa Flickr: dostupno na <https://www.flickr.com/photos/unitedsteelworkers/8230380119> dana 27.7.2023.
- [4] Šitić S: Skripta zavarivanja, Split, 2002.
- [5] Sveučilište u Splitu, SOSS, Vulić N. Jerčić I. Šuljić I: Elementi strojeva 2. Dostupno na: https://moodle.oss.unist.hr/pluginfile.php/5954/mod_resource/content/17/P05%20Elementi%20strojeva%20%2C%20Spojke%20krute%20i%20kompenzacijske%202022-23.pdf dana 27.7.2023
- [6] OMW Indoil, dostupno na: <https://www.omv-indoil.hr/prirubnice> dana 27.7.2023
- [7] Železarna Ravne: Čelici za poboljšavanje, Slovenske Železarne, Ravne na koroškem 1111/84, 1984.
- [8] Gabrić I. Šitić S: Materijali 2, Split 2015. Dostupno na: https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Materijali%20II%20-%20Igor%20Gabri%C4%87%2C%20Slaven%20%C5%A0iti%C4%87.pdf dana 29.7.2023.
- [9] ResarchGate (2016), dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/CCT-diagram-of-steel-Ck45-MAT-II-austenitized-at-880-C-for-5-min-23_fig3_299654365 dana 27.7.2023
- [10] Parametri MAG zavarivanja, Slika preuzeta sa Scribd: <https://www.scribd.com/document/351880524/Parametri-MAG-Zavarivanja> dana 29.7.2023.