

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

**Primerjalna analiza litja in varjenja za izdelavo
varilnih konstrukcij in optimizacija postopka
varjenja za doseg večje konkurenčnosti zvarjencev**

Kandidat: Hajro Dulić

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor predavatelj: Dragan Gogić, mag. inž. metal. in mater.

Mentor v podjetju: Robert Fašnik, dipl. inž. str.

Lektor: mag. Aleksandra Žnuderl, prof. slov. in angl.

Maribor, 2024

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani/a Hajro Dulić sem avtor diplomskega dela z naslovom *Primerjalna analiza litja in varjenja za izdelavo varilnih konstrukcij in optimizacija postopka varjenja za dosego večje konkurenčnosti zvarjencev*, ki sem ga napisal pod mentorstvom Dragana Gogića, mag. inž. metal. in mater.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastne, kaznivo po Zakonu o avtorskih in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, avgust 2024

Podpis študenta:

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil mentorju Draganu Gogiću, mag. inž. metal. in mater., za strokovne napotke, vodenje in koristne ideje pri izdelavi diplomskega dela. Njegovo strokovno znanje in mentorstvo sta bila ključna pri uspešni izdelavi diplomske naloge.

Obenem bi se rad zahvalil tudi podjetju Mega Metal d.o.o., ki mi je omogočilo ta študij in me podpiralo tako pri osebnem razvoju v podjetju kot tudi pri izobrazbi.

POVZETEK

Diplomska naloga se osredotoča na primerjalno analizo dveh ključnih procesov v kovinsko-predelovalni industriji, litja in varjenja, z namenom izdelave varilnih konstrukcij. Glavni cilj raziskave je izboljšati konkurenčnost zvarjencev s poudarkom na optimizaciji postopka varjenja. V prvem delu naloge je podana podrobna primerjalna analiza litja in varjenja, ki zajema fizikalne, kemijske in mehanske lastnosti končnih izdelkov, pa tudi ekonomske vidike obeh procesov. Vse te analize pripomorejo k lažji izbiri tehnologij za različne zahteve izdelkov.

V drugem delu se osredotočamo na optimizacijo postopka varjenja za doseganje večje konkurenčnosti zvarjencev. Raziskava vključuje študijo različnih varilnih tehnik, uporabo naprednih materialov in uvajanje sodobnih tehnologij ter inovacij v postopek varjenja. Poseben poudarek je namenjen izboljšanju trdnosti, odpornosti proti koroziji in estetskemu videzu končnih varilnih konstrukcij.

S praktičnim primerom prikažemo način, kako se pride do iskanih rezultatov in tudi, na kakšen način se da optimizirati izdelek. S tem primerom tudi pokažemo, kako se enak izdelek naredi z različnimi tehnološkimi procesi in ima primerljive mehanske lastnosti. Na ta način želimo predstaviti strankam različni možnosti, ki sta cenovno in uporabno podobni, stranke pa se lahko v različnih okoliščinah odločajo za različne tehnologije.

V diplomski nalogi se dotaknemo tudi digitalnih tehnologij za izboljšanje procesov, od različnih programskih rešitev do uporabe sodobnih digitalnih tehnologij. To področje se najbolj razvija v sedanjem času in lahko največ doprinese k razvoju tehnologije izdelkov. Vsa podjetja v svojem razvoju pridejo do neizogibnega koraka optimizacije procesov skozi digitalizacijo. V diplomski nalogi je opisanih tudi več načinov, ki bi podjetjem v razvoju pomagali pri izbiri primernih metod za izboljšanje procesov in zagotovili konkurenčnost na trgu.

Rezultati raziskave bodo koristni za industrijske strokovnjake, inženirje in odločevalce pri izbiri optimalnega proizvodnega procesa za specifične aplikacije. Poleg tega bo optimizacija postopka varjenja pripomogla k povečanju konkurenčnosti proizvodov na trgu, kar je ključnega pomena za uspešnost podjetij v današnjem globalnem okolju.

Ključne besede: izboljšava, analiza, produktivnost, natančnost, optimizacija

ABSTRACT

Comparative Analysis of Casting and Welding for the Production of Welded Constructions and Optimization of the Welding Process for Increased Competitiveness of Welded Joints

The diploma thesis focuses on a comparative analysis of two crucial processes in the metal processing industry - casting and welding - for the production of welded constructions. The main aim of the research is to enhance the competitiveness of welded joints, with an emphasis on optimizing the welding process. The first part of the thesis provides a detailed comparison of casting and welding, including the physical, chemical, and mechanical properties of the end products, as well as the economic aspects of both processes.

In the second part, the focus is on optimizing the welding process to achieve greater competitiveness of welded joints. The research involves studying various welding techniques, using advanced materials, and incorporating modern technologies and innovations into the welding process. Special attention is given to improving the strength, corrosion resistance, and aesthetic appearance of the final welded constructions.

With a practical example, we show how to achieve the desired results and also how to optimize the product. With this example, we also show how the same product is made with different technological processes and has comparable mechanical properties. In this way, we want to present customers with different options, which are similar in terms of price and functionality, and in which they can choose different technologies in different circumstances.

In the diploma thesis, we also touch on digital technologies for improving processes, from various software solutions to the use of modern digital technologies. This area is developing the most at the present time and can contribute the most in the development of product technology. All companies in their development reach the inevitable step of process optimization through digitization. The diploma thesis also describes several methods that would help developing companies to choose suitable methods for improving processes and ensure competitiveness on the market.

The results of the study will be beneficial for industry professionals, engineers, and decision-makers in choosing the optimal production process for specific applications. Furthermore, the optimization of the welding process will contribute to increasing the competitiveness of

products in the market, which is crucial for the success of companies in today's global environment.

Keywords: Improvement, analysis, productivity, accuracy, optimization

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	10
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	10
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	11
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	12
1.3.1	<i>Predpostavke</i>	12
1.3.2	<i>Omejitve</i>	12
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	13
2	VSEBINA	14
2.1	PREDSTAVITEV PODJETJA MEGA METAL D.O.O.....	14
2.2	PROIZVODNI PROGRAM	17
2.3	OPIS MOŽNOSTI OBSTOJEČIH TEHNOLOGIJ LITJA.....	18
2.4	OPIS OBSTOJEČIH TEHNOLOGIJ VARILNIH POSTOPKOV	19
2.5	PREDSTAVITEV PRISOTNE PROBLEMATIKE PRI IZVEDBI POSTOPKOV KONSTRUKCIJSKE ZASNOVE IN IZDELAVE IZDELKOV 20	
3	OPTIMIZACIJA PROCESOV ZA VEČJO KONKURENČNOST ZVARJENCA	23
3.1	PREDSTAVITEV IN OPIS RAZISKOVALNIH PROCESOV	23
3.1.1	<i>Litje</i>	23
3.1.2	<i>Varjenje</i>	28
3.2	PRIMERJAVA PROCESOV, PREDNOSTI IN SLABOSTI.....	43
3.2.1	<i>Prednosti litja v pesek</i>	44
3.2.2	<i>Prednosti varjenja</i>	45
3.2.3	<i>Slabosti varjenja proti ulivanju</i>	46
3.2.4	<i>Slabosti ulivanja proti varjenju</i>	46
3.3	PRIMERJAVA MATERIALOV PRI ULITKIH IN ZVARJENCIH	47
3.4	PRIMER PREDELAVE ZVARJENCA IZ ULITKA	48
3.5	OPIS CAD PROGRAMOV, KI SE UPORABLJAJO PRI RAZISKAVI	56
3.5.1	<i>Solid edge</i>	56
3.5.2	<i>Ansys</i>	57
3.6	UPORABA DIGITALNIH TEHNOLOGIJ ZA IZBOLJŠANJE PROCESA VARJENJA	58
3.7	ANALIZA STROŠKOV PRIMERLJIVIH TEHNOLOGIJ IZDELAVE.....	63
4	SKLEP	66
5	VIRI, LITERATURA.....	69

KAZALO SLIK

SLIKA 1: LOGOTIP PODJETJA MEGA-METAL D.O.O. VIR: (HTTPS://WWW.MEGA-METAL.SI/SL)	14
SLIKA 2: OSNOVNI PODATKI IN KAPACITETE PODJETJA VIR: (HTTPS://WWW.MEGA-METAL.SI/SL)	14
SLIKA 3: POTEK RAZVOJA PODJETJA VIR: (HTTPS://WWW.MEGA-METAL.SI/SL)	15
SLIKA 4: SATELITSKA SLIKA PROIZVODNE ENOTE MM1 VIR: (GOOGLE MAPS HTTPS://MAPS.GOOGLE.COM).....	16
SLIKA 5: SATELITSKA SLIKA PROIZVODNE ENOTE MM2 VIR: (GOOGLE MAPS HTTPS://MAPS.GOOGLE.COM).....	17
SLIKA 6: PRIMER ZVARJENCEV, NAREJENIH V PODJETJU VIR: (LASTNI VIR)	18
SLIKA 7: VARILNI ROBOT VIR: (HTTPS://WWW.MEGA-METAL.SI)	19
SLIKA 8: POTEK DELOVNEGA PROCESA V PODJETJU MEGA-METAL VIR: (LASTNI VIR)	21
SLIKA 9: PRIMER ODLITKA IZ MEZOPOTAMIJE VIR: (MERVIN LINDSAY - HTTPS://SLIDEPLAYER.COM/SLIDE/10508434/)	23
SLIKA 10: POSTOPEK IZDELAVE ODLITKA VIR: (HTTPS://STUDENTSKI.NET/GRADIVO/VIS_SCV_MEH_TPR_SNO_ULIVANJE_01)	24
SLIKA 11: POSTOPEK PRECIZIJSKEGA LITJA VIR: (HTTPS://WWW.INVESTMENTCASTINGPCI.COM/BLOG/WHAT-IS- INVESTMENT-CASTING/)	25
SLIKA 12: GRAVITACIJSKO LITJE VIR: (HTTPS://WWW.TOPGRID.CO/CASTING-PROCESS-A-BRIEF-GUIDE-BY- TOPGRID/)	26
SLIKA 13: TLAČNO LITJE VIR: (HTTPS://PRISMIER.COM/WHAT-IS-DIE-CASTING/)	26
SLIKA 14: CENTRIFUGALNO LITJE VIR: (HTTPS://WWW.METALTEK.COM/BLOG/CENTRIFUGAL-CASTING-PROCESS- ADVANTAGES-AND-LIMITATIONS/)	27
SLIKA 15: KONTINUIRANO LITJE VIR: (HTTPS://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:CONTINUOUS_CASTING_%28TUNDISH_AND_MOLD%29- 2_NT.PNG).....	28
SLIKA 16: ELEKTROOBLOČNO VARJENJE VIR: (HTTPS://SIJ.SUZ.SI/ASSETS/MAGAZINE-FILES/SIJ-09-011-WEB.PDF)	30
SLIKA 17: TIG VARJENJE VIR: (HTTPS://KLJUCAVNICARSTVO.EU/ROCNO_VARJENJE/).....	32
SLIKA 18: MIG VARJENJE VIR: (HTTPS://KLJUCAVNICARSTVO.EU/ROCNO_VARJENJE/).....	35
SLIKA 19: PLAZEMSKO VARJENJE VIR: (HTTP://DUSAN.STS.SI/VARJENJE-S-PLAZMO-V4/)	40
SLIKA 20: UPOROVNO VARJENJE VIR: (HTTP://DUSAN.STS.SI/TOCKOVNO-VARJENJE-V21-2/).....	41
SLIKA 21: VARJENJE S TRENJEM VIR: (HTTPS://STUDENTSKI.NET/GRADIVO/VIS_SCV_MEH_TPR_SNO_VARJENJE__VARJENJE_Z_MEHANSKO_ENERG IJO_01)	43
SLIKA 22: GRAFIČNI PRIKAZ REZULTATOV SIMULACIJE ZA LITINO VIR:(MEGA METAL D.O.O.)	54
SLIKA 23: GRAFIČNI PRIKAZ REZULTATOV SIMULACIJE ZA ZVARJENEC VIR: (MEGA METAL D.O.O.).....	54
SLIKA 24: PRIMER OPTIMIZACIJE TOPOLOGIJE VIR: (HTTPS://I.YTIMG.COM/VI/PMcP7mK1Zec/MAXRESDEFAULT.JPG)	58

SLIKA 25: VARILNI ROBOT VIR: (HTTPS://WWW.MEGA-METAL.SI)	59
SLIKA 26: PRIMER SIMULACIJE OBREMENITEV NA ZVARJENEC VIR: (HTTPS://SIMULATEMORE.MSCSOFTWARE.COM/MULTI-PHASE-SIMULATIONS-WITH-MARC-AND-SIMUFACT/)	61
SLIKA 27: INTERNET OF THINGS VIR: (HTTPS://MAGELLANX.CO/INDUSTRIAL-IOT-SOLUTIONS-EXAMPLES/)	62
SLIKA 28: VIRTUAL/AUGMENTED REALITY V INDUSTRIJI VIR: (HTTPS://WWW.LINKEDIN.COM/PULSE/VR-WELDING-SIMULATOR-VS-AR-WHICH-BETTER-SIMBOTT-94Y1F/)	63

KAZALO TABEL

TABELA 1: PRIMERJAVA LITEGA IZDELKOV IZ LITEGA ŽELEZA IN KONSTRUKCIJSKEGA JEKLA	49
TABELA 2: TOLERANCE PO ISO 13920	52
TABELA 3 REZULTATI ANALIZE KONČNIH ELEMENTOV	53
TABELA 4: LASTNOSTI UPORABLJENIH MATERIALOV	55

1 UVOD

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Področje:

Litje in proizvodnja varilnih konstrukcij v sodobni industriji predstavljata kompleksno in ključno področje, ki zahteva nenehno izboljševanje procesov in uporabo optimalnih tehnologij. Na tem področju se soočamo z izzivi, povezanimi z izbiro primernega proizvodnega postopka, ki bo zagotovil visokokakovostne in konkurenčne konstrukcije. Litje in proizvodnja varilnih konstrukcij imata veliko različnih tehnologij, ki jih je treba podrobno spoznati, da se inženirji lažje odločijo za uspešno planiranje projektov.

Opredelitev problema:

Ključna vprašanja, ki jih naslavlja ta raziskava, segajo od primerjalne analize dveh osnovnih proizvodnih postopkov, litja in varjenja, do vprašanja optimizacije postopka varjenja z namenom doseganja večje konkurenčnosti zvarjenih spojev. Litje in varjenje sta klasična pristopa pri proizvodnji konstrukcij, vendar se postavlja vprašanje, kateri od njiju je primernejši za doseganje visokih standardov trdnosti, natančnosti in ekonomske učinkovitosti v specifičnih aplikacijah.

Raziskava bo usmerjena v razumevanje fizikalnih, kemijskih in mehanskih lastnosti končnih izdelkov, izdelanih s pomočjo obeh postopkov, ter analizo njihove učinkovitosti v različnih kontekstih, hkrati pa se bo osredotočila na vprašanje, kako z optimizacijo postopka varjenja povečati konkurenčnost zvarjenih spojev, s poudarkom na produktivnosti, natančnosti in stroškovni učinkovitosti.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Namen diplomske naloge je raziskati in primerjati dve glavni metodi izdelave kovinskih izdelkov, litje in varjenje. Treba je še ugotoviti prednosti, omejitve in uporabo vsake od teh metod v različnih industrijskih sektorjih in razumeti vpliv teh metod na končno kakovost, trdnost in trajnost izdelkov.

Cilji diplomske naloge so analiza procesov litja in varjenja, primerjalna analiza lastnosti materialov in primerjalna analiza oblike in oblikovanja.

Hipoteze so naslednje:

H1 - Zvarjenci se lahko izdelajo hitreje kot ulitki.

H2 - Pri zvarjencu lahko zmanjšamo količino odpadkov.

H3 - Pri zvarjencu so manjši začetni stroški izdelave.

H4 - Digitalizacija omogoča avtomatizacijo varilnih procesov, ki lahko pripomore k povečanju ekonomske učinkovitosti.

1.3 Predpostavke in omejitve

1.3.1 Predpostavke

- Materiali za litje in varjenje so visoke kakovosti in ustrezajo določenim standardom.
- Uporabljene so sodobne tehnologije tako pri litju kot pri varjenju.
- Delovna sila je ustrezno usposobljena za izvajanje postopkov litja in varjenja.
- Procesi se primerjajo v enakem ekonomskem območju in ni nepričakovanih sprememb v cenah surovin ali delovne sile.

1.3.2 Omejitve

- Za primerjavo metod izdelave bom podal ugotovitve na praktičnem primeru.
- Zaradi omejenega dostopa do finančnih podatkov projektov bom podal grobo oceno za ugotovitve, ki izhajajo iz primerjave.
- Omejitve pri dostopu do naprednih tehnologij izdelave lahko vplivajo na natančnost primerjave procesov.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

Analiza literature: Pregled znanstvenih člankov, knjig in literarnih virov za pridobivanje teoretičnega znanja o postopkih litja in varjenja

Ankete in intervjuji: Pridobivanje mnenj strokovnjakov, inženirjev, delavcev in drugih udeležencev v industriji o uporabi litja in varjenja, prednostih in slabostih teh postopkov ter morebitnih izboljšavah

Ekonomska analiza: Študija stroškov in koristi litja in varjenja, vključno s stroški materialov, delovne sile in opreme

Simulacije in modeliranje: Uporaba računalniških simulacij za modeliranje postopkov litja in varjenja ter analiza njihovih rezultatov pred dejanskim izvajanjem

2 VSEBINA

2.1 Predstavitev podjetja MEGA METAL d.o.o.

- **Mega-Metal d.o.o.** je srednje veliko družinsko podjetje, ki se uspešno razvija in raste od ustanovitve leta 1994, logotip le-tega pa prikazuje slika 1,



Slika 1: Logotip podjetja Mega-Metal d.o.o.

Vir: (<https://www.mega-metal.si/sl>)

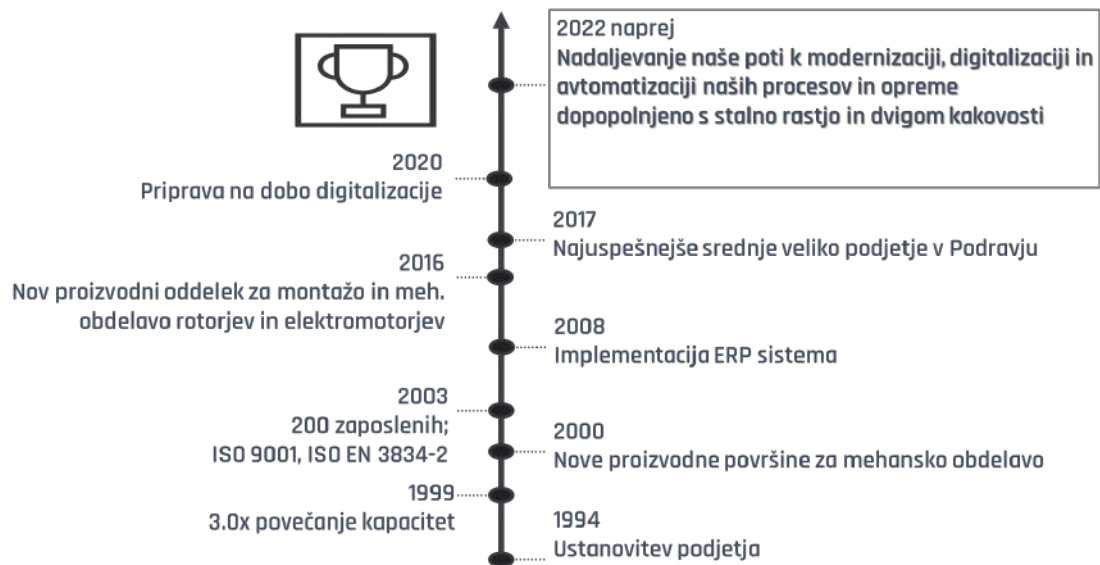
- Zrasli smo v podjetje z več kot 250 kvalificiranimi delavci, z več kot 13.500 m² proizvodnih površin, razporejenih v pripravo, montažo, varjenje, žarjenje, peskanje, barvanje, mehansko obdelavo in končno kontrolo.
- Naši izdelki segajo od preprostih 100 kilogramov kosov do kompleksnih kosov z več sto pozicijami, z maksimalnimi dimenzijami 3,0 x 3,5 x 20,0 m in težo 20 ton.
- Nabor osnovnih podatkov, ki karakterizirajo glavno sliko podjetja, nam predstavlja slika 2.



Slika 2: Osnovni podatki in kapacitete podjetja

Vir: (<https://www.mega-metal.si/sl>)

Razvojno pot podjetja od začetkov nastanka do danes z osnovnimi indikatorji sprememb nam prikazuje slika 3.



Slika 3: Potek razvoja podjetja

Vir: (<https://www.mega-metal.si/sl>)

- Podjetje je razdeljeno na dve proizvodni enoti. Prvo enoto predstavlja podjetje MM I – Proizvodnja zvarjencev, katerega panoramski prikaz vidimo na sliki 4, medtem ko je druga enota MM II – Mehanska obdelava, prikazana na panoramski sliki 5.

MM I – PROIZVODNJA ZVARJENCEV:

- 1 - KONSTRUIRANJE
- 2 - PRIPRAVA
- 3 - IZDELAVA ROTORJEV
- 4 - SESTAVA
- 5 - VARJENJE
- 6 - ŽARJENJE
- 7 - PESKANJE
- 8 - BRUŠENJE
- 9 - KONTROLA ZVARJENCEV
- 10 - LAKIRANJE



Slika 4: Satelitska slika proizvodne enote MM1

Vir: (Google Maps <https://maps.google.com>)

MM II – MEHANSKA OBDELAVA:

11 - PROGRAMIRANJE

12 - ORODJARNA

13 - REZKANJE

14 - STRUŽENJE

15 - KARUSELI

16 - KONTROLA PO MEH. OBDELAVI



Slika 5: Satelitska slika proizvodne enote MM2

Vir: (Google Maps <https://maps.google.com>)

2.2 Proizvodni program

Proizvodnja je razdeljena na elektro in strojni program s premijsko bazo strank, pretežno iz zahodne Evrope. Večina strank prihaja iz avtomobilske, energetske, kovinske industrije. Del proizvodnega programa nam prikazuje slika 6, izdelujemo pa tudi veliko več komponent in izdelkov, kot so:

- komponente za elektromotorje,

- ohišja elektromotorjev,
- ohišja ležajev,
- jeklene komponente za vetrnice,
- konstrukcije za obdelovalne centre,
- komponente za stroje,
- rotorje,
- dvigala ipd.



Slika 6: Primer zvarjencev, narejenih v podjetju

Vir: (Lastni vir)

2.3 Opis možnosti obstoječih tehnologij litja

Podjetje Mega Metal ne izdeluje ulitkov. V preteklosti smo izdelali zvarjence na osnovi izmerjenih ulitkov, naredili zvarjence na osnovi 3D modela ulitka in mehansko obdelovali odlitke. Podjetju je cilj ponujati prototipe zvarjencev kot alternativo ulitkom.

2.4 Opis obstoječih tehnologij varilnih postopkov

Za uspešno izdelavo izdelkov za elektro in strojno industrijo imamo usposobljeno in certificirano ekipo varilnih tehnologov, tehnikov in varilcev.

Uporabljamo različne vrste varjenja, da zagotovimo kvalitetne izdelke:

- REO je varjenje z oplaščeno elektrodo, pri kateri oblok gori med elektrodo in varjencem.
- TIG je postopek obločnega varjenja v zaščitenem okolju, za kar se uporabljajo nevtralni plini, kot sta argon ali helij, in netaljiva volframova elektroda, ki se ne izrablja.
- MIG je vrsta obločnega varjenja v zaščitnem plinu (argon ali helij), zaradi katerega je preprečena oksidacija zvara. Vari se s pomočjo varilne žice, navite na kolut.
- MAG je zelo podoben MIG načinu varjenja. Razlika je le pri vrsti zaščitnega plina. Uporablja se CO₂, ki kemijsko reagira z varjencem.

Poleg ročnega načina varjenja uporabljamo tudi 6 robotskih CNC celic za serijsko proizvodnjo varjencev (slika 7). Imajo boljšo hitrost in kakovost pri serijski proizvodnji, pri posameznih izdelkih in izdelkih, kjer je težka dostopnost zvarov, pa je ročno varjenje bolj praktično.



Slika 7: Varilni robot

Vir: (<https://www.mega-metal.si>)

2.5 Predstavitev prisotne problematike pri izvedbi postopkov konstrukcijske zasnove in izdelave izdelkov

Pri zasnovi in izdelavi izdelka je veliko zaporednih korakov in procesov, ki morajo biti vnaprej določeni in skrbno planirani. S tem preprečimo napake med izdelavo izdelkov.

Pri konstruiranju so glavni koraki:

- **Opredelitev ciljev in zahtev**

Določitev jasnih ciljev projekta in zahtev, ki jih je treba izpolniti.

- **Načrtovanje in oblikovanje**

Razvoj konceptov, skic, načrtov in modelov za izdelek ali konstrukcijo.

- **Izbor materialov in komponent**

Izbor ustrezne vrste materialov in komponent, ki bodo izpolnjevali tehnične zahteve in funkcionalnost.

- **Izdelava tehničnih načrtov**

Razvoj tehničnih risb, diagramov in načrtov, ki vsebujejo natančne mere in specifikacije materialov.

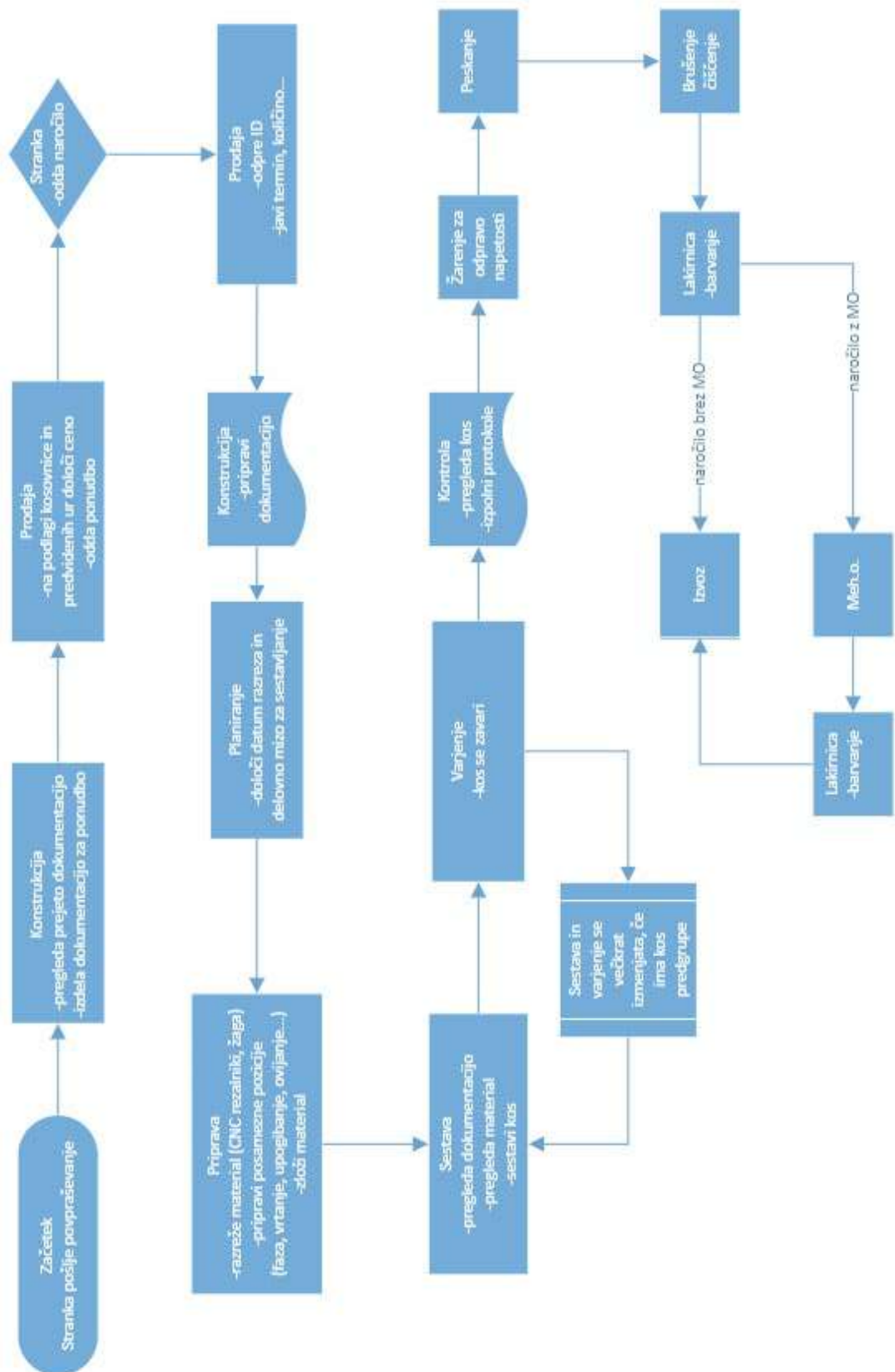
- **Razvoj podrobnih načrtov**

Izdelava podrobnih načrtov, ki vsebujejo vse tehnične specifikacije in postopke izdelave.

- **Dokumentacija in sledljivost**

Dokumentiranje vseh korakov in postopkov za sledljivost.

Potek delovnega procesa od povpraševanja do zaključne faze projekta nam prikazuje slika 8.



Slika 8: Potek delovnega procesa v podjetju Mega-Metal d.o.o.

Vir: (Lastni vir)

Če se pri konstrukcijski zasnovi ali pri izdelavi tehnične dokumentacije napačno definira postopek izdelave ali pride do napak pri tehničnih risbah, to lahko negativno vpliva tako na kvaliteto in končno ceno kot tudi na rok izdelave izdelka, kar so ključni faktorji za uspešno izpeljan projekt.

Poleg tega, da mora dokumentacija biti jasna in dovolj specificirana, moramo imeti sposoben kader v proizvodnji, ki bo zmožen po tej dokumentaciji narediti izdelek. Za to je treba izvajati delavnice in usposabljanja.

Zelo je pomembno, da se pri izdelavi in branju dokumentacije upoštevajo enaki standardi tehničnega risanja, izdelave, toleranc in kakovosti.

Do največ napak pri izdelavi pride tako zaradi pomanjkljive ali ne dovolj jasne dokumentacije, nepoznavanja zahtev in standardov v proizvodnji kot tudi zaradi neupoštevanja navodil.

Da bi se temu izognili, je treba redno izvajati kontrolo in nastaviti procese tako, da ni možnosti napak.

3 OPTIMIZACIJA PROCESOV ZA VEČJO KONKURENČNOST ZVARJENCA

3.1 *Predstavitev in opis raziskovalnih procesov*

3.1.1 *Litje*

Litje je proizvodni postopek, pri katerem se staljeni material, kot je kovina ali plastika, vlije v kalup, pusti, da se v kalupu strdi, nato pa se izvrže ali razbije ven, da se naredi izdelan del. Z ulivanjem izdelujemo dele zahtevnih oblik, ki bi jih bilo težko ali negospodarno izdelati z drugimi metodami (npr. izrezovanje iz trdnega materiala). (Casting, 2020)

Uporablja se več kot 5000 let za izdelavo različnih izdelkov. Najstarejši najdeni odlitek izvira iz 3200 pr. n. št. iz Mezopotamije (slika 9). Med najstarejše ohranjene predmete spadajo še orožja in verski objekti iz bakra, ki so najdeni na Bližnjem Vzhodu in v Indiji. Na Kitajskem so obvladali taljenje železa že od leta 500 pr. n. št., 2000 let pred Evropejci. Nova izkopavanja so dokazala, da jim je po razvoju litja železa uspela množična proizvodnja orodja in kmetijske opreme s pomočjo litja.



Slika 9: Primer odlitka iz Mezopotamije

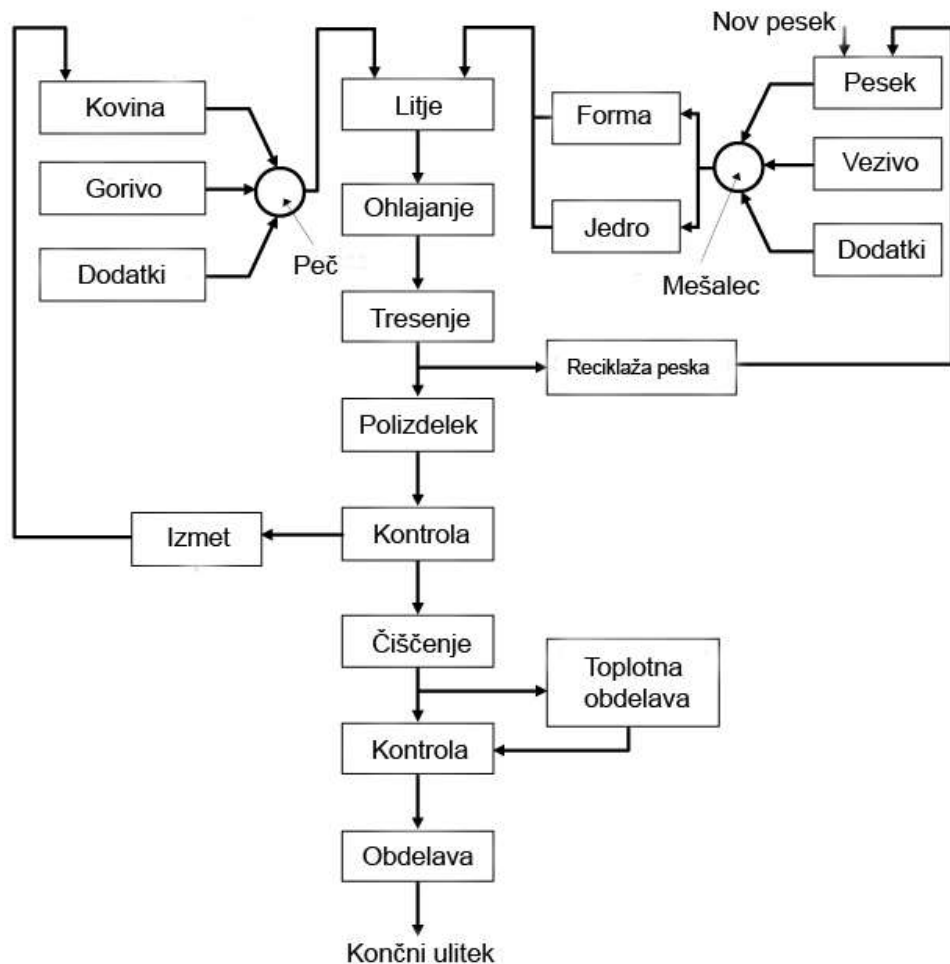
Vir: (Mervin Lindsay - <https://slideplayer.com/slide/10508434/>)

Razvoj novih tehnologij in povečano povpraševanje po litih delih sta v drugi polovici 18. stoletja dala industriji kovinskega litja ogromen zagon.

S povečanjem zahtev v različnih panogah se je povečalo tudi povpraševanje po kompleksnih in visokokakovostnih izdelkih, zato so se razvile različne vrste postopkov litja, s katerimi se lahko zadovoljijo potrebe po kompleksnejših, cenejših in natančnih izdelkih za različne aplikacije in potrebe uporabnikov. Vsaka od teh vrst ima prednosti in slabosti, odvisne od zahtev trga.

Spodaj so našteje najbolj razširjene metode litja:

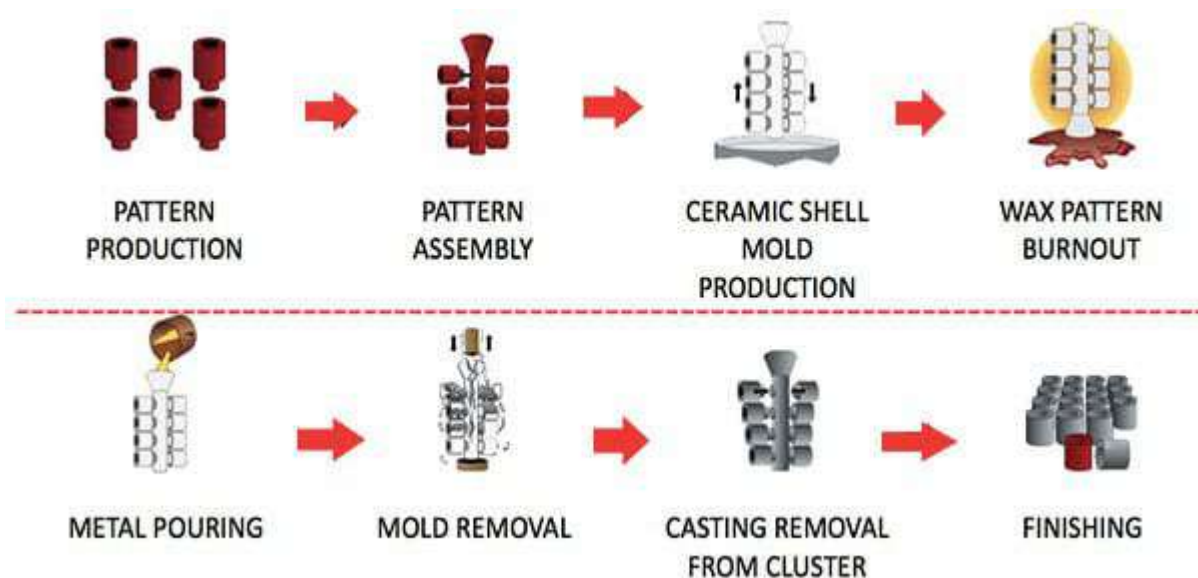
1. Litje v pesek (slika 10) je prilagodljiv proces litja, ki se lahko uporablja za katerekoli zlitine železa ali neželeznih kovin. Talina se uliva v forme, ki so narejene iz livarskega peska. Izdelavo form imenujemo formanje. Peščena forma je enkratna, le-to jo razbijemo, ko je ulitek ohlajen, pesek pa lahko recikliramo za izdelavo novih form. Večinoma se uporablja v masovni avtomobilski industriji za izdelavo blokov motorjev, glav cilindrov, ročičnih gredi itd.



Slika 10: Postopek izdelave odlitka

Vir: (https://studentski.net/gradivo/vis_scv_meh_tpr_sno_ulivanje_01)

2. Precizijsko litje (slika 11) je še en postopek, ki ima enkratni kalup. Pri tem postopku so uporabljeni enodelni modeli, ki so oblikovani iz voska in smol. Modeli so za enkratno uporabo, narejeni so s pomočjo matric, ki imajo negativno obliko modela in se dajo razstaviti. Zaporedje korakov pri procesu je:



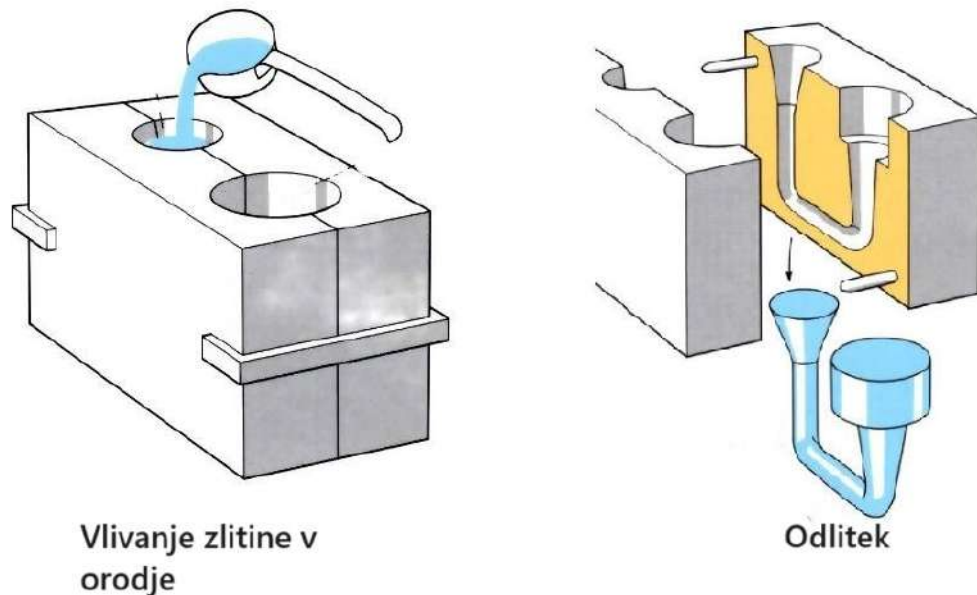
Slika 11: Postopek precizijskega litja

Vir: (<https://www.investmentcastingpci.com/blog/what-is-investment-casting/>)

1. Izdelava modela iz voska
 2. Izdelava kalupa iz več voščenih modelov
 3. Izdelava keramične lupine kalupa
 4. Zažiganje voščenega sklopa modelov
 5. Ulivanje kovine
 6. Razbijanje/odstranjevanje kalupa
 7. Odstranjevanje posameznih odlitkov iz sklopa
 8. Končna obdelava odlitka
3. Gravitacijsko litje je znano tudi kot trajnostno kokilno litje, pri katerem se tekoča zlitina ulije v kovinske kalupe in se zaradi gravitacije zapolni notranjost kalupa (slika 12).

S tem postopkom litja kovine lahko proizvedemo različne predmete, kot so zobniki, ohišja menjalnika, priključki za cevi, kolesa, bati motorja itd.

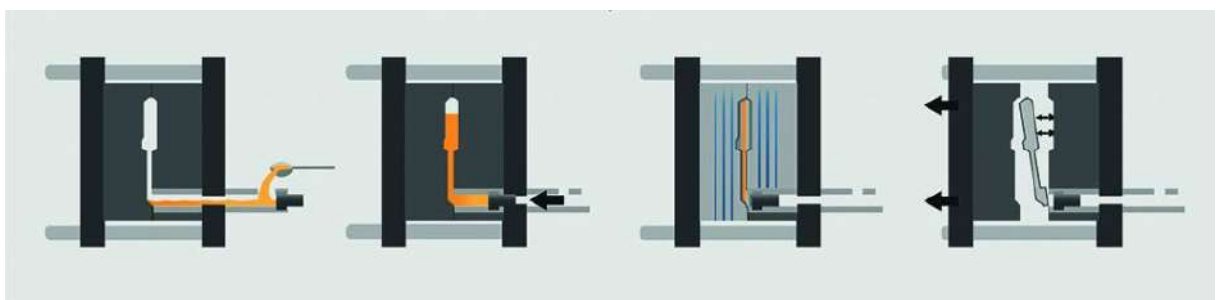
Je hitrejša, vendar dražja metoda od litja v pesek, in sicer zaradi visokih stroškov pri izdelavi kovinskih kalupov.



Slika 12: Gravitacijsko litje

Vir: (<https://www.topgrid.co/casting-process-a-brief-guide-by-topgrid/>)

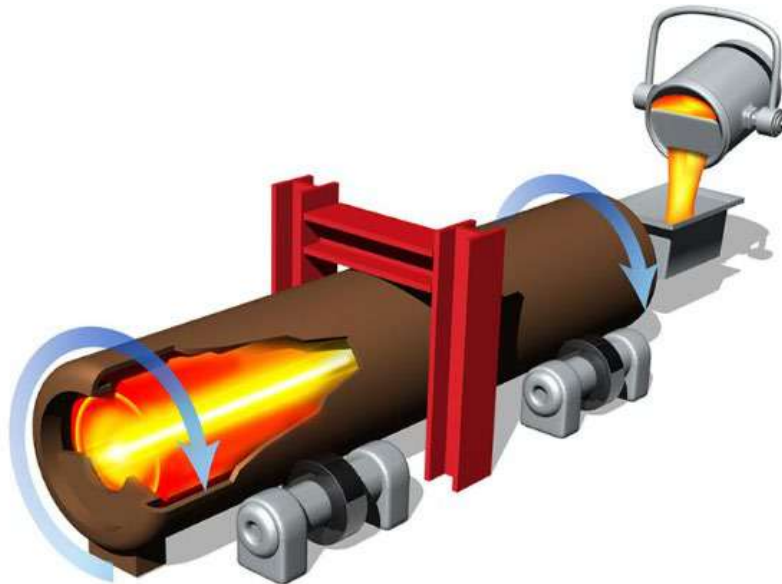
4. Tlačno litje je postopek, pri katerem se talina pod pritiskom vlije v kovinsko formo ali gravuro pod visokim pritiskom (slika 13). Ta postopek se uporablja za izdelavo velikih serij trdnih, natančnih izdelkov zapletenih geometrijskih oblik, večinoma iz zlitin cinka, aluminija ali magnezija. Postopek je popolnoma avtomatiziran.



Slika 13: Tlačno litje

Vir: (<https://prismier.com/what-is-die-casting/>)

5. Centrifugalno litje je metoda za industrijsko proizvodnjo odlitkov cilindrične oblike, kot so cevi, valji, puše, kolesa itd. Zlitina se pri tej metodi ulivanja kovine vlije v rotirajočo votlo posodo (slika 14). Pri visokem tlaku centrifugalne sile pomagajo pri porazdelitvi staljene kovine po obodu posode.



Slika 14: Centrifugalno litje

Vir: (<https://www.metaltek.com/blog/centrifugal-casting-process-advantages-and-limitations/>)

6. Kontinuirano litje je masovna proizvodnja kovinskih profilov s konstantnim prerezom (slika 15). Največkrat se uporablja pri izdelavi jeklenih palic. Zlitina se s preračunano hitrostjo vlije v vodno hlajen kalup z odprtim koncem.



Slika 15: Kontinuirano litje

Vir: (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Continuous_casting_%28Tundish_and_Mold%29-2_NT.PNG)

3.1.2 Varjenje

Varjenje je postopek, pri katerem se dva ali več kovinskih ali termoplastičnih materialov združijo v trdno spojeno enoto. Cilj varjenja je ustvariti nerazstavljivo zvezo, ki ima podobne ali enake mehanske lastnosti kot osnovni materiali. To se doseže s taljenjem materialov na delovnih površinah, ki se nato ohladijo in se povežejo, tvoreč trdno povezavo. Varjenje ima številne aplikacije v različnih industrijah, vključno z gradbeništvom, avtomobilsko industrijo, letalstvom, energetiko, proizvodnjo pločevinastih izdelkov itd. Pomembno je, da se pri izbiri metode varjenja upoštevajo zahtevane mehanske lastnosti, oblikovne potrebe, stroški in druge specifične zahteve projekta.

Obstaja več kot 30 različnih vrst varjenja in vsaka od njih ima svoje specifične prednosti in omejitve. Nekatere najbolj pogoste metode varjenja vključujejo:

1. Elektroobločno varjenje: Je ena najpogosteje uporabljenih metod. Uporablja električni tok za ustvarjanje obloka med elektrodo in zvarjencem (slika 16). Zaradi izgorevanja je elektroda vedno krajša. S tem postopkom lahko varimo v obratih ali na prostem.

Odlikujejo ga ekonomičnost, univerzalnost, enostavnost, vsestranska uporabnost, zelo dobre mehanske lastnosti zvarov, pomanjkljivosti pa so nizka produktivnost zaradi menjave elektrod in velike količine odpada, tj. konic elektrod.

Prednosti varjenja z elektrodami so:

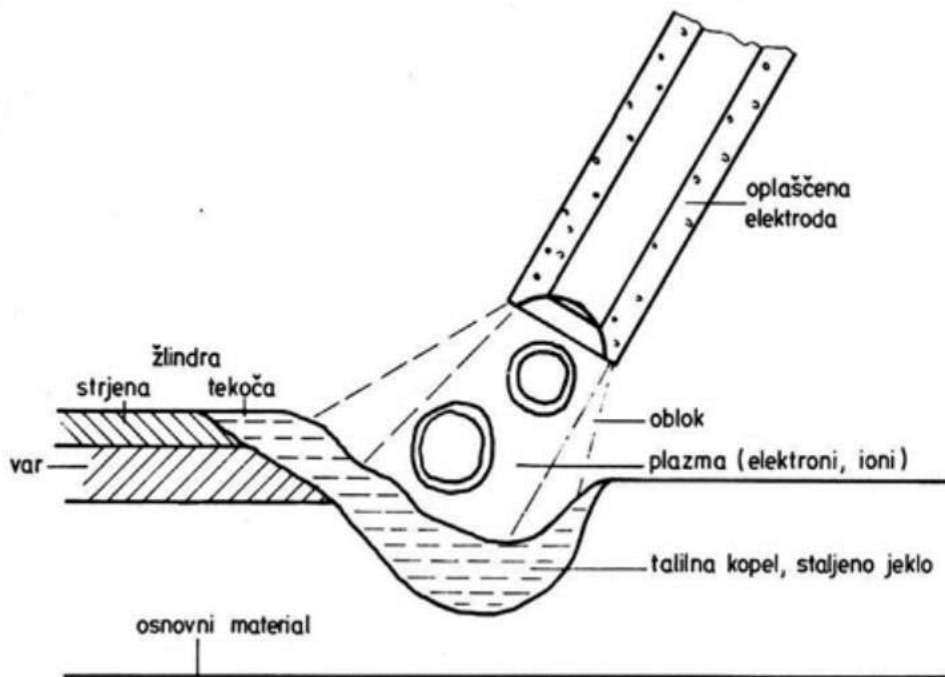
- Prenosljivost: Varilna oprema je relativno enostavna in prenosljiva, kar omogoča delo na terenu in v različnih pogojih.
- Univerzalnost: Primerna za varjenje različnih materialov, vključno z jeklom, nerjavim jeklom, litim železom in drugimi.
- Ni potrebe po zaščitnem plinu: Zaščitni plin se ustvarja iz obloge elektrode, kar omogoča delo na prostem in v vetrovnih pogojih.

Slabosti varjenja z elektrodami:

- Zahteva po čiščenju: Po varjenju je treba odstraniti žlindro, kar poveča čas obdelave.
- Manjša hitrost: Varjenje z elektrodami je počasnejše v primerjavi z nekaterimi drugimi metodami, kot je MIG/MAG varjenje.
- Zahteva po usposobljenosti: Varjenje z elektrodami zahteva določeno mero spretnosti in izkušenj za doseganje kakovostnih zvarov.

Uporaba varjenja z elektrodami:

- V gradbeništvu za varjenje jeklenih konstrukcij, podpornih nosilcev in drugih strukturnih elementov.
- Popravila in vzdrževanje, kot so popravila kmetijske opreme, industrijskih strojev in drugih kovinskih struktur.
- Izdelava in montaža kovinskih izdelkov, kot so ograje, vrata, konstrukcije in okvirji.
- Na terenu, kjer je delo v oddaljenih ali težko dostopnih območjih, kjer ni enostavno zagotoviti dodatne opreme za zaščitni plin.



Slika 16: Elektroobločno varjenje

Vir: (<https://sij.suz.si/assets/magazine-files/SIJ-09-011-web.pdf>)

2. TIG (tungsten inert gas) varjenje: Uporabljata se inertni plin (na primer argon) in varilna elektroda iz volframa, ki je netaljiva, za varjenje različnih materialov, zlasti aluminija in nerjavečega jekla. Dodajni material se dodaja ročno (slika 17), lahko pa se tudi naredi zvarni spoj med zvarjencema z zvarjenjem njunih robov. Uporablja se tam, kjer je pomemben estetski izgled zvara. Je zahtevnejše od ostalih postopkov in zahteva veliko izkušenj varilca. Je natančna in vsestranska metoda varjenja. Ta metoda je še posebej primerna za varjenje tankih materialov in visokokakovostnih zvarov.

Prednosti TIG varjenja so:

- Visoka kakovost zvara: TIG varjenje zagotavlja zelo čiste in visokokakovostne zware brez žindre.
- Natančnost: Omogoča zelo natančno usmerjanje toplote, kar je idealno za tankostenske materiale in občutljive aplikacije.
- Raznolikost materialov: Uporablja se za varjenje širokega spektra materialov, vključno z jeklom, nerjavim jeklom, aluminijem, magnezijem, bakrom in njihovimi zlitinami.

- Brez žlindre: Ker ni potrebna zaščitna obloga, ni žlindre, ki bi jo bilo treba odstraniti po varjenju.

- Kontrola toplote: Varilec ima popoln nadzor nad količino toplote, kar zmanjšuje deformacije in termične poškodbe.

Slabosti TIG varjenja:

- Počasnejša hitrost varjenja: V primerjavi z drugimi metodami, kot je MIG varjenje, je TIG varjenje počasnejše.

- Visoki stroški: Oprema za TIG varjenje je draga in zahteva vzdrževanje, prav tako pa je visoka cena inertnih plinov.

- Zahtevnost: Zahteva visoko usposobljenost in izkušnost varilca, saj je proces bolj kompleksen in natančen.

- Občutljivost na okolje: Varjenje na prostem je težje, ker lahko veter vpliva na zaščitni plin in kakovost zvara.

Uporaba TIG varjenja:

- Varjenje tankih kovinskih plošč in cevi.

- Popravila in izdelava visokokakovostnih avtomobilskih delov.

- V letalski in vesoljski industriji za varjenje visokotehnoloških komponent, kjer je potrebna visoka kakovost zvara.

- Varjenje lahkih materialov, kot sta aluminij in titan.

- Proizvodnja in popravila medicinskih instrumentov, kjer so potrebne čiste in natančne zveze.

- Hrana in farmacija:

V prehrabni in farmacevtski industriji za varjenje nerjavnega jekla, kjer je potrebna visoka higiena in odpornost proti koroziji.

- Elektronika

V elektroniki se uporablja za varjenje majhnih in občutljivih komponent, kjer je potrebna natančnost in kontrola toplote.

Postopek TIG varjenja:

- Priprava:

Čiščenje osnovnega materiala in odstranjevanje oksidov, maščob in nečistoč.

Pravilna izbira volframove elektrode glede na material in debelino.

- Nastavitev opreme:

Nastavitev varilnega toka in zaščitnega plina.

Pravilna nastavitev gorilnika in dovod polnilnega materiala.

- Varjenje:

Vzpostavitev električnega obloka med elektrodo in osnovnim materialom.

Ročno dodajanje polnilnega materiala v taljeno zvarno območje.

Nadzor hitrosti in gibanja za enakomeren in kakovosten zvar.

- Zaključek:

Preverjanje zvara za morebitne napake in pomanjkljivosti.

Čiščenje zvara, če je potrebno.

3.

Varjenje po TIG postopku:



Slika 17: TIG varjenje

Vir: (https://kljucavnicarstvo.eu/rocno_varjenje/)

4. MIG/MAG (metal inert gas/metal active gas) varjenje: Električni oblok se ustvari med varilno žico, ki jo podaja varilni aparat preko gorilnika, in zvarjencem. Preko gorilnika se odaja še zaščitni plin ali mešanico plinov za zaščito varilnega območja (slika 18). Med MIG in MAG postopkom je razlika v tem, da se pri MIG postopku uporablja inertni plin, ki kemijsko ne reagira z varjencem, medtem ko je pri MAG postopku aktivni plin, ki kemijsko reagira z varjencem.

Prednosti MIG/MAG varjenja:

- Visoka hitrost: Postopek je hitrejši kot mnoge druge metode varjenja, kar povečuje produktivnost.
- Enostavna avtomatizacija: Primerna metoda za avtomatizacijo v proizvodnih linijah.
- Manj čiščenja; ker ni žindre, je potrebna manjša obdelava po varjenju.
- Vsestranskost: Uporablja se lahko za varjenje različnih materialov, vključno z jeklom, aluminijem, nerjavnim jeklom in bakrom.

Slabosti MIG/MAG varjenja:

- Občutljivost na veter: Zaščitni plin je občutljiv na premike zraka, kar lahko oteži delo na prostem brez dodatne zaščite.
- Višji stroški: Oprema in zaščitni plini lahko povečajo stroške varjenja v primerjavi z nekaterimi drugimi metodami.
- Zahteva po usposobljenosti: Potrebno je ustrezno usposabljanje za pravilno nastavitvev opreme in izvajanje varjenja.

Uporaba MIG/MAG varjenja:

Avtomobilska industrija:

- V avtomobilski industriji za varjenje karoserij in šasij avtomobilov, kjer sta potrebni hitrost in kakovost zvarov.
- Za popravila in izdelavo avtomobilskih delov.
- V proizvodnji za izdelavo kovinskih konstrukcij, okvirjev, ograj in drugih kovinskih izdelkov.
- Za avtomatizirane proizvodne linije za množično proizvodnjo.

- V gradbeništvu za varjenje jeklenih konstrukcij, podpornih nosilcev in drugih strukturnih elementov.
- Za varjenje cevi in rezervoarjev.
- V pomorski industriji za gradnjo in popravila ladij in drugih plovil.
- Za varjenje kovinskih komponent in struktur v morskem okolju.

Postopek MIG/MAG varjenja:

- Priprava:

Čiščenje osnovnega materiala za odstranitev rje, maščob in nečistoč.

Izbira ustrezne žice in zaščitnega plina glede na material in debelino varjenja.

- Nastavitev opreme:

Nastavitev varilnega toka, napetosti in pretoka zaščitnega plina glede na premer žice in vrsto materiala.

Pravilna nastavitev hitrosti podajanja žice.

- Varjenje:

Vzpostavitev obloka z dotikom žice na osnovni material in sprožitvijo gorilnika.

Enakomerno premikanje gorilnika vzdolž spoja, medtem ko se žica neprekinjeno dovaja in tali.

Kontrola hitrosti podajanja žice in gibanja gorilnika za enakomeren zvar.

- Zaključek:

Preverjanje kakovosti zvara za morebitne napake ali pomanjkljivosti.

Po potrebi čiščenje zvara.

Varjenje po MIG/MAG postopku:



Slika 18: MIG varjenje

Vir: (https://kljucavnicarstvo.eu/rocno_varjenje/)

5. Lasersko varjenje spaja material s pomočjo laserja, usmerjenega v material, in s pomočjo zaščitnega plina, ki preprečuje oksidacijo. Visoka energija laserskega žarka tali material v natančno določenem območju. Taljeni material se združi in ob ohlajanju tvori trdno vez.

Prednosti laserskega varjenja so:

- Visoka natančnost, ker lasersko varjenje omogoča natančno usmerjanje žarka, kar omogoča zelo natančno delo.
- Minimalna deformacija, ker so zaradi koncentrirane toplote in kratkega časa segrevanja deformacije materiala minimalne.
- Visoka hitrost. Hitrost varjenja je običajno večja kot pri tradicionalnih metodah.
- Čistost zvara. Zvar je čist in brez žindre, kar zmanjšuje potrebo po dodatnem čiščenju in obdelavi.
- Možnost avtomatizacije. Lasersko varjenje se enostavno integrira v avtomatizirane proizvodne linije, kar povečuje produktivnost.

Slabosti laserskega varjenja:

- Visoki stroški opreme. Laserski sistemi so dragi in zahtevajo specifično vzdrževanje.

- Omejena debelina materiala. Čeprav obstajajo napredne tehnologije za varjenje debelih materialov, so možnosti še vedno omejene v primerjavi z nekaterimi drugimi metodami varjenja.

- Zahteva po zaščitni opremi. Lasersko varjenje ustvarja visoko intenzivne svetlobe in UV sevanje, kar zahteva ustrezno zaščitno opremo in varnostne ukrepe.

Uporaba laserskega varjenja:

- Avtomobilska industrija:

Varjenje komponent in delov, kot so karoserije in motorni deli, kjer je potrebna visoka natančnost in majhna deformacija.

- Elektronika:

Varjenje tankih kovinskih plošč in komponent v elektroniki, kot so sončne celice in baterije.

Medicinska industrija:

Proizvodnja medicinskih instrumentov in naprav, kjer so potrebne natančne in čiste spojitve.

Letalska in vesoljska industrija, varjenje komponent letalskih in vesoljskih plovil, kjer so potrebni visoki standardi kakovosti in zanesljivosti.

- Proizvodnja:

Uporaba v avtomatiziranih proizvodnih linijah za hitro in natančno varjenje široke palete izdelkov.

Lasersko varjenje je še posebej koristno v aplikacijah, kjer sta natančnost in kakovost ključnega pomena. Zaradi svojega naprednega pristopa in možnosti integracije v avtomatizirane sisteme je postalo pomembno orodje v številnih visokotehnoloških industrijah.

6. Varjenje pod praškom je obločno varjenje, pri katerem oblok gori pod praškom. Dodajni material se dodaja s podajalno napravo. Je delno mehanizirano varjenje. Med varjenjem se prašek stopi na zvar in ustvari žlindro.

Prednosti varjenja pod praškom so:

- Visoka kakovost zvara, ker je zvarček zaščiten pred oksidacijo in kontaminacijo, kar zagotavlja visoko kakovost in trdnost zvara.

- Visoka produktivnost, ker postopek omogoča visoko hitrost varjenja in je primeren za varjenje debelih materialov.
- Enostavno ga je avtomatizirati, kar zmanjšuje potrebo po ročnem delu in povečuje doslednost zvara.
- Manj izpostavljenosti operaterjev svetlobi obloka in varilnim hlapom, saj je oblok popolnoma potopljen pod praškom.

Slabosti varjenja pod praškom

- Omejena uporaba, ker je primeren predvsem za varjenje v vodoravni legi in ni primeren za vse položaje varjenja.
- Visoka začetna investicija za ta proces je draga in zahteva specifično nastavitvev.
- Težavnost uporabe na terenu. Zaradi potrebe po natančni kontroli prahu in dovajanja žice je postopek manj primeren za delo na terenu.

Uporaba varjenja pod praškom:

- V težki industriji za varjenje debelih jeklenih plošč in konstrukcij, kot so mostovi, ladje in težki stroji.
- Za izdelavo in popravilo velikih rezervoarjev in tlačnih posod.
- Varjenje velikih premerov cevi in cevovodov, ki zahtevajo visoko trdnost in kakovost zvara.
- Za varjenje komponent za elektrarne, vključno z jedrskimi, termoelektrarnami in vetrnimi elektrarnami.
- Izdelava tramov in konstrukcij. Izdelava in spajanje velikih nosilcev in strukturnih komponent za gradbene projekte.

Postopek varjenja pod praškom:

Priprava:

- Čiščenje osnovnega materiala za odstranitev rje, maščob in nečistoč.
- Nastavitvev opreme glede na debelino materiala in željeno hitrost varjenja.

Nastavitvev opreme:

- Pravilna nastavitve varilnega toka, napetosti in hitrosti podajanja žice.
- Dovajanje praška na zvarno mesto, ki popolnoma prekrije oblok in zvarno kopel.

Varjenje:

- Vzpostavitev obloka pod plastjo praška.
- Premikanje varilne glave vzdolž spoja za ustvarjanje neprekinjenega zvara.
- Samodejno dovajanje žice in praška med varjenjem.

Zaključek:

- Po končanem varjenju se žindra, ki nastane iz stopljenega praška, odstrani.
- Preverjanje kakovosti zvara za morebitne napake ali pomanjkljivosti.

7. Plazemsko varjenje je relativno novejša tehnologija. Plazma nastane pri pretoku plina skozi električni tok visoke napetosti (slika 19). Ta plin se ionizira. V fiziki in kemiji je eno od agregatnih stanj snovi. Ta vrsta varjenja je uporabna za varjenje tankih pločevin in varjenje varjencev brez varilnega žleba.

Prednosti plazemskega varjenja:

- Visoka natančnost omogoča zelo natančno usmerjanje toplote, kar je idealno za tankostenske materiale.
- Globoka penetracija plazemskega obloka omogoča globoko in ozko zvarno kopel, kar povečuje trdnost zvara.
- Manj deformacij. Zaradi koncentrirane toplote je manjša verjetnost deformacij osnovnega materiala.
- Visoka kakovost zvara. Zvari so čisti in visokokakovostni, brez žindre in kontaminacije.

Slabosti plazemskega varjenja:

- Višji stroški, ker je oprema za plazemsko varjenje dražja kot pri drugih metodah varjenja.
- Zahteva visoko usposobljenost in izkušnost varilca za pravilno nastavitve in izvajanje varjenja.
- Ni primerna za varjenje zelo debelih materialov ali aplikacije, kjer je potrebna visoka hitrost varjenja.

Uporaba plazemskega varjenja:

- V letalski in vesoljski industriji za varjenje visokonatančnih in tankostenskih komponent, kjer je potrebna visoka kakovost zvara. Uporaba pri izdelavi in popravilu letalskih motorjev in drugih kritičnih delov.
- Varjenje nerjavnega jekla in drugih materialov, ki se uporabljajo v medicinskih instrumentih in opremi. Zagotavljanje čiste in močne zveze brez kontaminacije.
- V elektroniki za varjenje majhnih in občutljivih komponent, kjer je potrebna natančnost in kontrola toplote in za izdelavo in popravilo elektronskih naprav in komponent.
- V proizvodnji za varjenje tankih pločevin in cevi iz različnih materialov, vključno z aluminijem, titanom in nerjavnim jeklom. Za izdelavo in popravila visokokakovostnih kovinskih izdelkov.

Postopek plazemskega varjenja

Priprava:

- Čiščenje osnovnega materiala za odstranitev rje, maščob in nečistoč.
- Nastavitev parametrov varjenja glede na material in debelino varjenca.

Nastavitev opreme:

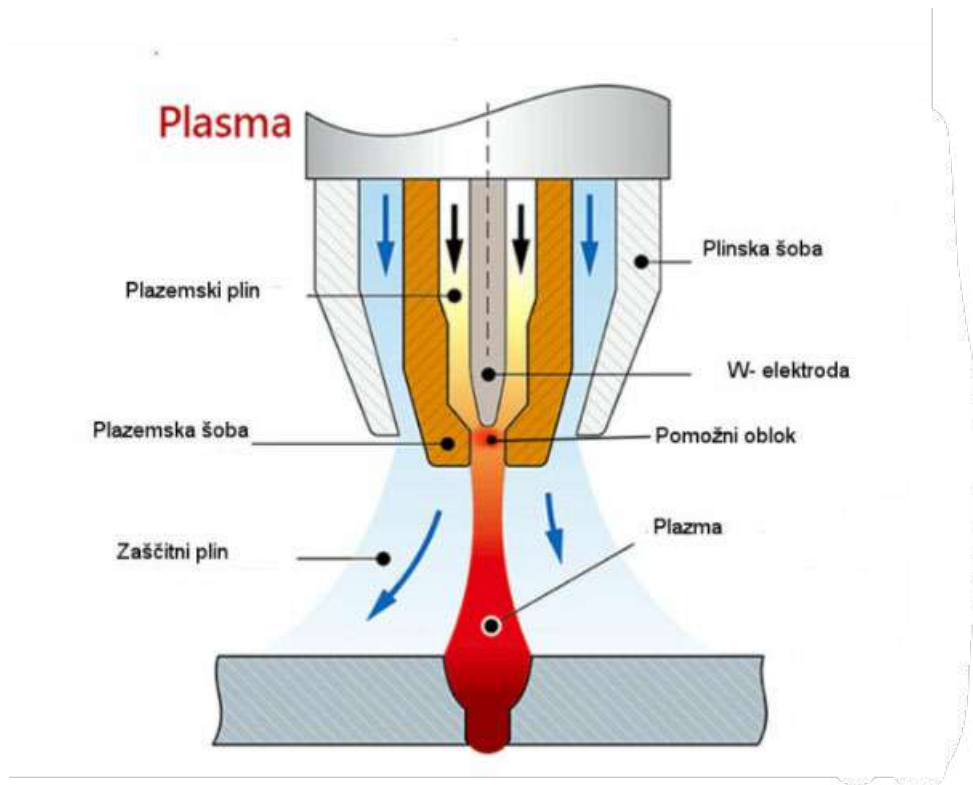
- Nastavitev varilnega toka, napetosti in pretoka plina.
- Pravilna nastavitev gorilnika in elektrod.

Varjenje:

- Vzpostavitev plazemskega obloka med elektrodo in osnovnim materialom.
- Enakomerno premikanje gorilnika vzdolž spoja, medtem ko plazma topi osnovni material in ustvarja zvar.
- Dodajanje polnilnega materiala, če je to potrebno, za zapolnitev spoja.

Zaključek:

- Preverjanje kakovosti zvara za morebitne napake ali pomanjkljivosti.
- Po potrebi čiščenje zvara in odstranitev zaščitnega plina.



Slika 19: Plazemsko varjenje

Vir: (<http://dusan.sts.si/varjenje-s-plazmo-v4/>)

8. Uporovno varjenje se izvaja tako, da s pomočjo električne energije zaradi upora pride do velike toplotne energije, ki povzroči taljenje in spajanje materialov. Material je vstavljen med elektrodi (slika 20), ki varjenca stisneta in nato se vključi električni tok, ki zmehta material ter se dela zvarita.

Prednosti uporovnega varjenja:

- Hitrost postopka je zelo velika, kar omogoča visoko produktivnost.
- Manjši so stroški porabe energije in dodatnih materialov (npr. varilne žice ali plina).
- Zelo primerna metoda za avtomatizacijo v proizvodnji.
- Operaterji so manj izpostavljeni svetlobi obloka in varilnim hlapom.
- Zaradi natančne kontrole toplote in pritiska je popačenje osnovnega materiala minimalno.

Slabosti uporovnega varjenja:

- Omejena uporaba, ker je primerna predvsem za tanjše materiale in določene vrste kovin.
- Visoka začetna investicija, ker je oprema za uporovno varjenje lahko draga.
- Omejen dostop pri varjenju kompleksnih oblik in nedostopnih mest.

- Zahteva usposobljenost in izkušnost za pravilno nastavitvev in izvajanje varjenja.

Uporaba uporovnega varjenja:

- V avtomobilski industriji za varjenje karoserij in okvirjev vozil.

- Za izdelavo in popravila avtomobilskih delov.

Za proizvodnjo gospodinjskih aparatov, varjenje komponent gospodinjskih aparatov, kot so pralni stroji, hladilniki in pečice.

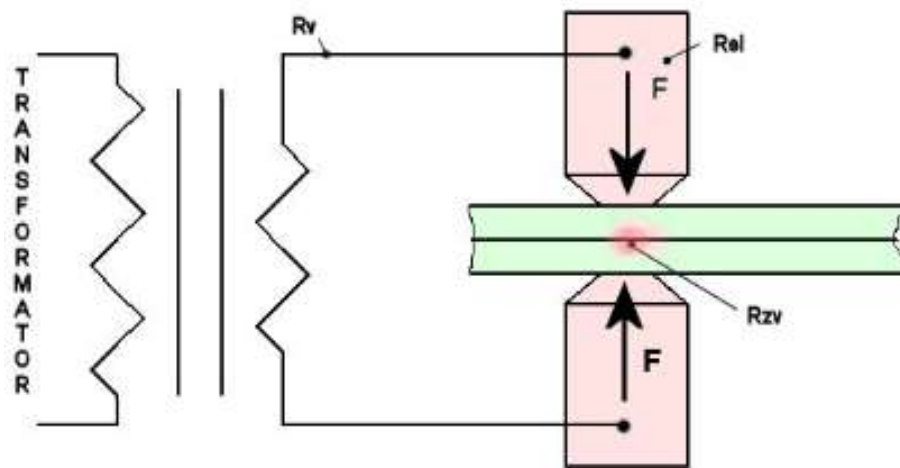
- V elektroniki za varjenje kovinskih ohišij in komponent elektronskih naprav.

- Pri varjenju kontaktov in povezav v elektronskih sklopih.

- V gradbeništvu za varjenje kovinskih konstrukcij, nosilcev in drugih strukturnih elementov, pri izdelavi in popravilu kovinskih ograj in vrat.

- V železniški industriji za varjenje tirnic in drugih komponent železniškega sistema.

- Za izdelavo in popravilo železniških vozil in infrastrukture.



Slika 20: Uporovno varjenje

Vir: (<http://dusan.sts.si/tockovno-varjenje-v21-2/>)

Glavne vrste uporovnega varjenja:

- Točkovno varjenje, kjer električni tok prehaja skozi majhno površino stika (točko), kjer se ustvari toplota in zvar. Uporablja se v avtomobilski industriji (varjenje karoserij), pri izdelavi gospodinjskih aparatov. Prednosti te vrste varjenja so hitrost, avtomatizacija, minimalno popačenje.

- Šivno varjenje, ki je podobno točkovnemu varjenju, vendar z neprekinjenim ali zaporednim nizom točk, kar tvori šiv. Uporablja se za izdelavo rezervoarjev, cevi, posod. Prednost te vrste varjenja je tesnost in je primerna za izdelavo posod in rezervoarjev.

- Čelno varjenje, kjer se kovina segreje z električnim tokom, nato pa se deli pod pritiskom združijo. Uporablja se za varjenje žic, palic, tirnic. Prednost tega varjenja je močen spoj in je primerno za neprekinjene in dolge spoje.

- Izbočeno varjenje se uporablja za varjenje več točk hkrati z uporabo predhodno oblikovanih izboklin na enem izmed kosov. Uporablja se za pritrditev vijakov in drugih pritrdilnih elementov. Prednost tega varjenja je enakomerna porazdelitev toplote, zmožnost varjenja več točk hkrati.

9. Varjenje s trenjem (slika 21) je proces, pri katerem se varjenca premikata drug na drugega in zaradi trenja med zvarjencema nastaja toplota. Poleg premikanja deluje še sila, ki ju združi.

Prednosti varjenja s trenjem so:

- Visoka kakovost zvara. Postopek omogoča ustvarjanje zelo trdnih in visokokakovostnih zvarov brez potrebe po dodatnih varilnih materialih.

- Manj deformacij. Zaradi natančnega nadzora toplote in pritiska je deformacija materialov minimalna.

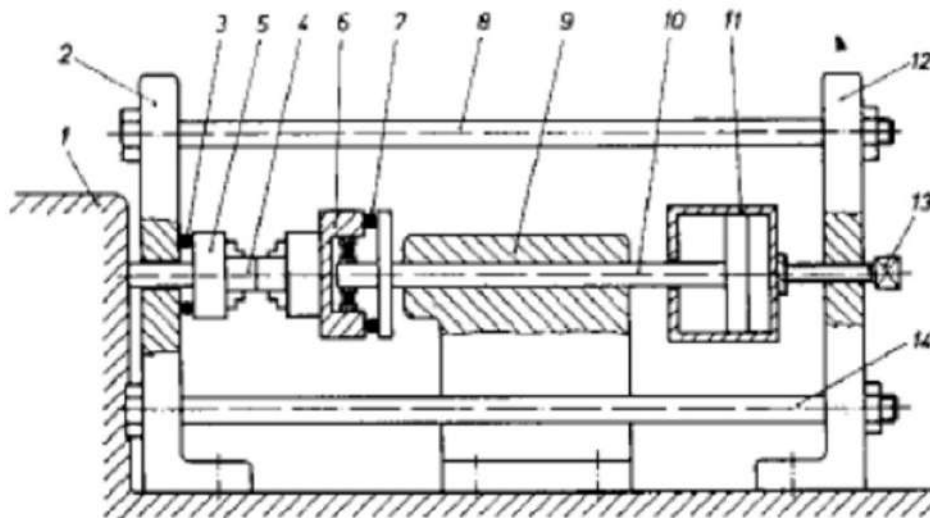
- Brez dodatnih materialov, ker ni potrebe po dodajanju varilnih žic ali plinov, kar zmanjšuje stroške in potrebo po dodatnih materialih.

- Hiter doseg zvarnega spoja, kar povečuje produktivnost.

- Učinkovito varjenje različnih kovinskih materialov, vključno z nerjavnim jeklom, aluminijem in titanom.

Slabosti varjenja s trenjem so:

- Oprema za varjenje s trenjem je lahko draga, kar predstavlja visoke začetne stroške.
- Omejena uporaba, ker je primerna predvsem za varjenje ciljno oblikovanih delov in materialov, ki jih je težko obdelovati z drugimi metodami.
- Postopek zahteva natančno nastavitve hitrosti in pritiska, kar lahko zahteva usposobljenost in izkušnje.



1 - vretenjak, 2 in 12 - oporni plošči, 3 in 7 - tlačna ležaja. 4 - varienca. 5 in 6 - vpenjalni dlavi, 8 in 14 - ojačitveni vezi, 9 - konjiček, 10 - batni vijak

Slika 21: Varjenje s trenjem

Vir: (https://studentski.net/gradivo/vis_scv_meh_tpr_sno_varjenje__varjenje_z_mehansko_energijo_01)

3.2 Primerjava procesov, prednosti in slabosti

Litje in varjenje sta dva procesa, ki se uporabljata za oblikovanje kovine v specifično obliko.

Vsak proces ima svoje prednosti in slabosti, zato je pomembno, da razumemo razlike, da se pravilno odločimo, kateri je primernejši za naš projekt.

Litje in varjenje imata podobne procese in lastnosti materiala, saj gre za metalurška procesa, kjer z enim oblikujemo izdelek v kompaktno obliko, z drugim pa ustvarimo končni izdelek s spajanjem materialov v neločljivo zvezo.

Ulivanje se uporablja za izdelavo celotnih delov, zvarjenci pa se sestavijo in zavarijo iz več komponent, ki se posamezno pripravijo z različnimi procesi. Kljub temu imata ta procesa veliko skupnega. Njune materialne lastnosti in fizikalni procesi so precej podobni. Oba postopka

vključujeta segrevanje kovin nad tališčem. Tako pri ulitih kot pri varjenih kovinah lahko majhni plinski mehurčki ali tvorba hlapov povzročijo poroznost, ko se kovina strdi. **Kovine se prav tako strdijo iz staljenega stanja, da ustvarijo končno zrnato strukturo, ki je običajno manj prečiščena od kovane kovine, ki je bila po strjevanju hladno obdelana. Tudi stopnja ohlajanja v obeh procesih lahko določa končno strukturo zrn.**

3.2.1 Prednosti litja v pesek

- Oblikovanje kompleksnih geometrij: Pri oblikovanju predmetov s kompleksnimi oblikami, kot so votli deli ali deli z notranjimi votlinami, je ulivanje pogosto primernejše, saj omogoča enostavno izdelavo teh oblik brez potrebe po sekundarnih operacijah kot pri varjenju.
- Proizvodnja velikih serij: Pri proizvodnji velikih serij enakega izdelka je ulivanje pogosto bolj ekonomično in hitreje kot varjenje, saj omogoča masovno proizvodnjo enakih delov z manjšo potrebo po ročnem delu.
- Materiali z nizko talilno točko: Pri materialih z nizko talilno točko, ki se ne morejo variti s konvencionalnimi postopki varjenja, je primernejše ulivanje, saj omogoča oblikovanje brez izpostavljanja materiala visokim temperaturam.
- Zmanjšanje porabe materiala: Pri ulivanju se material lahko porabi učinkoviteje kot pri varjenju, saj se material oblikuje znotraj kalupov, kar omogoča minimalno izgubo materiala.
- Boljša kakovost površine: Pri nekaterih aplikacijah je površina, dosežena s postopkom ulivanja, boljša kot površina, dosežena s postopkom varjenja, kar lahko pri nekaterih izdelkih prispeva k estetskemu ali funkcionalnemu izboljšanju.

3.2.2 Prednosti varjenja

- Kjer je potreba po reparaciji ali popravilih: Pri manjših popravilih ali reparacijah na obstoječih delih je varjenje pogosto primernejše, saj omogoča natančno povezovanje obstoječih delov brez potrebe po izdelavi kalupov ali litju novega dela.
- Hitrejša proizvodnja manjših serij: Pri proizvodnji manjših serij ali celo posameznih izdelkov je pogosto primernejše varjenje, saj omogoča hitro prilagajanje in izdelavo delov brez potrebe po izdelavi dragih kalupov.
- Večja fleksibilnost pri oblikovanju: Pri izdelavi delov s kompleksnimi oblikami, ki zahtevajo veliko prilagajanja ali sprememb med proizvodnim procesom, je primernejše varjenje, saj omogoča enostavno prilagajanje oblikovanja brez potrebe po izdelavi novih kalupov.
- Uporaba različnih materialov: Pri proizvodnji delov iz različnih materialov, ki se ne morejo enostavno ulivati skupaj, je primernejše varjenje, saj omogoča povezovanje različnih materialov brez ovir.
- Manjše zahteve po površinski obdelavi: Pri delih, kjer ni potrebna visoko estetska ali funkcionalno zahtevna površinska obdelava, je primernejše varjenje, saj omogoča hitro izdelavo delov brez potrebe po dodatnih površinskih operacijah.
- Jeklo ima visoko razmerje med trdnostjo in težo, zaradi česar je idealno za uporabo v gradbeništvu in proizvodnji.

3.2.3 Slabosti varjenja proti ulivanju

- Omejitve oblike in geometrije: Varjenje je lahko omejeno pri oblikovanju kompleksnih geometrij, zlasti pri notranjih votlinah ali votlih delih, kar lahko omejuje uporabnost v primerjavi z ulivanjem, ki omogoča izdelavo bolj kompleksnih oblik.
- Tveganje za deformacije: Med postopkom varjenja se lahko pojavijo termične deformacije, še posebej pri debelih ali občutljivih materialih, kar lahko vpliva na natančnost in trdnost končnega izdelka. Pri ulivanju se takšnim deformacijam izogibamo.
- Potreba po dodatnih postopkih: Varjene spoje je pogosto treba dodatno obdelati, da dosežemo želeno trdnost, tesnost ali estetski videz. To lahko vključuje brušenje, poliranje ali drugo površinsko obdelavo, kar poveča čas in stroške proizvodnje v primerjavi z ulivanjem.
- Omejitve pri materialih: Nekateri materiali se lahko težje varijo kot ulivajo, še posebej materiali z visoko talilno točko ali tisti, ki so kemično občutljivi na visoke temperature, kar omejuje uporabnost varjenja v primerjavi z ulivanjem.
- Visoki stroški opreme in vzdrževanja: Za varjenje je pogosto potrebna specializirana oprema, kot so varilni stroji, elektrode, plini itd. Ti stroški lahko predstavljajo znatno investicijo in zahtevajo redno vzdrževanje, kar poveča skupne stroške proizvodnje v primerjavi z ulivanjem.

3.2.4 Slabosti ulivanja proti varjenju

- Omejena fleksibilnost pri oblikovanju: Pri ulivanju je oblika izdelka določena s kalupom, kar lahko omejuje možnosti prilagajanja ali spreminjanja oblike med proizvodnim procesom, kar pa pri varjenju ni nujno.

- Potreba po izdelavi kalupov: Za vsak unikaten del ali spremembo oblike je potrebno izdelati nov kalup, kar lahko predstavlja dodaten čas, stroške in napor v primerjavi z varjenjem, kjer se lahko deli prilagajajo brez potrebe po izdelavi kalupov.
- Omejitve pri materialih: Nekateri materiali se lahko težje ulivajo kot varijo, še posebej tisti, ki imajo visoko talilno točko ali so kemično občutljivi na visoke temperature. To lahko omejuje uporabo ulivanja v primerjavi z varjenjem za določene materiale.
- Tveganje za napake v litju: Med postopkom ulivanja se lahko pojavijo napake, kot so poroznost, neenakomerna gostota ali deformacije, kar lahko vpliva na končno kakovost in trdnost izdelka. Pri varjenju se lahko napake opazi in popravi med postopkom, medtem ko je napake pri ulivanju težje zaznati in odpraviti.
- Omejena primernost za manjše serije: Za manjše serije ali enkratne izdelke lahko ulivanje postane ekonomsko manj učinkovito zaradi stroškov izdelave kalupov in priprave procesa v primerjavi z varjenjem, ki omogoča hitrejšo prilagodljivost in proizvodnjo manjših količin brez potrebe po izdelavi kalupov.

3.3 Primerjava materialov pri ulitkih in zvarjencih

Prednosti litja:

- Lito železo je močan, vzdržljiv material, ki lahko prenese velike obremenitve in pritisk.
- Ima razmeroma nizko tališče, zaradi česar ga je enostavno vliti v različne oblike in velikosti.
- Je odporno na obrabo in lahko prenese izpostavljenost vremenskim vplivom.
- Lito železo je relativno poceni v primerjavi z drugimi materiali.

Slabosti litega železa:

- Lito železo je krhko in lahko počí ali se zlomi pod določenimi pogoji, kot so udarci ali nenadne temperaturne spremembe.
- Je slabo odporno na udarce in se zlahka poškoduje.
- Je tudi težko, zaradi česar je manj idealno za nekatere aplikacije.

Prednosti jekla:

- Jeklo je močan in vzdržljiv material, ki prenese velike obremenitve in pritisk.
- Je odporno na udarce in upogibanje.
- Jeklo je mogoče enostavno reciklirati in je okolju prijazna možnost.
- Jeklo ima visoko razmerje med trdnostjo in težo, zaradi česar je idealno za uporabo v gradbeništvu in proizvodnji.

Slabosti jekla:

- Jeklo je nagnjeno k rji in koroziji in zahteva redno vzdrževanje, da ga zaščitimo pred vremenskimi vplivi.
- Jeklo je lahko dražje od litega železa, zlasti če se uporablja visokokakovostno jeklo.
- Manjša tlačna trdnost kot pri litem železu.
- Manj dušilne lastnosti kot pri litem železu.

3.4 Primer predelave zvarjenca iz ulitka

V sodelovanju s partnerjem, ki izdeluje CNC stroje, smo delali projekt študije izvedljivosti predelave ulitka v zvarjenec. Glavni cilj projekta je bil izvesti oceno CNC (Computer Numerical Control) vertikalnega rezkalnega stroja, sestavljenega iz varjenih komponent, in nato primerjati njegovo zmogljivost z rezkalnim strojem, izdelanim iz ulitih komponent. Pričakovalo se je, da bi varjena različica zagotavljala enakovredno funkcionalnost kot stroj, izdelan iz litega železa (EN-GJL-200). Za ovrednotenje uspešnosti obeh modelov sta bili za

vsakega izvedeni modalna analiza in primerjava, narejeni med varjeno konstrukcijo in osnovno ulito strukturo.

Projekt je bil sestavljen iz več delov:

1. Izbira materiala

- Izbira materiala je ključnega pomena, saj vpliva na trdnost, stabilnost, vzdržljivost in obdelovalne lastnosti stroja. Za izdelavo komponent stroja je partner izbral siva litino GG20. Za zvarjenec smo izbrali konstrukcijsko jeklo S355J2, ki ima primerljive mehanske lastnosti.

Vsekakor je pred samo izdelavo potreben tehten premislek in raziskava med posameznimi materiali, da bi se z izbiro le-teh dosegla zahtevana pričakovanja in lastnosti, ki so bistvene za uporabo. Primerljivost lastnosti materialov nam prikazuje tabela 1.

- Primerjava materialov

Tabela 1: Primerjava litih izdelkov iz litega železa in konstrukcijskega jekla

Lastnosti	Lito železo	Konstrukcijsko jeklo
Vsebnost ogljika	2 % do 4 %	Manj kot 2 %
Tališče	1200 °C	1370 °C do 1540 °C
Trdnost	Večja tlačna trdnost	Večja natezna trdnost
Sposobnost ulivanja	Je enostavno za vlivanje zaradi nizkega krčenja in dobre pretočnosti.	Težje ga je uliti kot lito železo, saj ima nizko pretočnost in večje krčenje.
Zmogljivost dušenja	Večja od jekla	Manj kot lito železo
Zlom	Lito železo se zlahka zlomi in počni na mestu nečistoč.	Jeklo se ne zlomi tako zlahka in je upogljivo.
Stroški	Je cenejše zaradi nižjih stroškov materiala, dela in energije, potrebne za izdelavo končnega izdelka.	Je dražje od litega železa, čeprav obstajajo cenejše alternative, kot so montažne jeklene oblike, kot so palice, palice, tramovi in cevi.

Aplikacije	Cevni priključki, podložke, kmetijska oprema, strojni deli, rudarska strojna oprema, ročno orodje in električna oprema	Infrastruktura, vozila, električni aparati, rakete, orodje in orožje
Prednosti	Dobra sposobnost vlivanja	Večja prilagodljivost pri oblikovanju (lahko izberete element zlitine, ki ga želite kombinirati z jeklom)
	Na voljo je v velikih količinah, zaradi česar je proizvodnja razmeroma poceni.	Povečana trdnost
	Ima visoko tlačno trdnost.	Odpornost proti koroziji
	Lito železo ima dobro obdelovalnost.	Enostavna obdelava
	Dobra antivibracijska lastnost	
	Ima odlično odpornost proti obrabi.	
	Nizka koncentracija stresa	
	Visoka odpornost na deformacije	
	Visoka vzdržljivost	
	Slabosti	Nagnjenost h koroziji in rji
Nizka natezna trdnost		Manj odporno na udarce
Visoka odpornost na udarce		
Visoko razmerje med težo in trdnostjo		
Visoka krhkost		
Povezave	http://www.atlasfdry.com/grayiron-damping.htm	
	https://www.durcrete.de/verf%C3%BCllte-konstruktionen	

https://www.rapiddirect.com/blog/cast-iron-vs-steel/	
---	--

Vir: (Navedeni v tabeli)

- Določitev potrebnih zahtev

Pri izbiri materiala za izdelavo CNC stroja je treba upoštevati naslednje dejavnike:

- trdnost in stabilnost, da lahko stroj prenaša velike obremenitve;
- odpornost proti vibracijam, da lahko stroj dosega večje natančnosti;
- obdelovalnost, da se komponente stroja lahko natančno obdelajo;
- stroške, ki vplivajo na konkurenčno ceno izdelka;
- odpornost proti koroziji, ki podaljša življenjsko dobo stroja.

3. Geometrija zvarjenja

- Analiza obstoječega 3D modela ulitka z vidika tehnologije izdelave

Ker je varjenje drugačna tehnologija izdelave, zahteva tudi drugačne operacije, s katerimi dosežemo podobne merske in mehanske lastnosti izdelkov.

Procesi so naslednji:

- Priprava materiala (razrez, rezanje faz, vrtanje, upogibanje ...)
- Sestavljanje
- Varjenje
- Žarenje za odpravo napetosti
- Brušenje
- Merska kontrola zvarjenja
- Peskanje
- Barvanje
- Mehanska obdelava
- Merska kontrola obdelovanca

- Izdelava 3D modela zvarjenja – Modela S235JR in S355J2

Glede na to, da je 3D model odlitka uporabljen kot osnova za izdelavo zvarjenja, so pri zvarjencu zunanje dimenzije in obdelave morale ostati enake, da bi se lahko na stroj montirale še ostale komponente, pomembne za delovanje stroja. Debeline sten odlitka so se spremenile v debelino pločevine, namesto modelov z eno komponento je nastal 3D model z več različnimi pozicijami, ki se izrežejo, sestavijo in nato zavarijo. Dodane so merske in geometrijske tolerance (tabela 2) za zvarjenec (DIN EN ISO 13920-BAF) in kvaliteto zvarov (DIN EN ISO 5817-C). Teža odlitka je bila 3885 kilogramov, po predelavi v zvarjenec pa je narasla na 4255 kilogramov.

Tabela 2: Tolerance po ISO 13920

Tolerančni razred	Razpon nominalnih dolžin l v mm										
	2 do 30	30 do 120	120 do 400	400 do 1000	1000 do 2000	2000 do 4000	4000 do 8000	8000 do 12000	12000 do 16000	16000 do 20000	>20 000
	Mejna odstopka +/- za imenske mere v mm										
A	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
B	1	2	2	3	4	6	8	10	12	14	16
C	1	3	4	6	8	11	14	18	21	24	27
D	1	4	7	9	12	16	21	27	32	36	40

Vir: (<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/23313/68ef2052e2324d40b14d2d7c639a8dd7/ISO-13920-1996.pdf>)

- Izdelava 3D modela zvarjenja – S355J2 – postelja stroja kompozitno polnilo

V slučaju slabih rezultatov zvarjenja se je odprla možnost izboljšanja konstrukcije z različnimi kompozitnimi polnili, ki bi izboljšale mehanske lastnosti konstrukcije.

Na trgu se pojavljajo novi trendi aplikacije mineralnih kompozitov, ki dajejo prednost pred konvencionalnimi metodami in materiali, ki so se uporabljali v preteklosti.

Mineralni kompozit je material, ki je sestavljen iz mešanice mineralnih polnil (kot so kremenčev pesek, apno, marmor ali granitni prah) in veziva (običajno smole ali polimerni

materiali). Ta kombinacija ustvarja trden in trpežen material z različnimi lastnostmi, ki se lahko prilagodi glede na uporabo. Zelo pogosto se uporabljajo v kombinaciji z jeklenimi konstrukcijami, ki jih zapolnijo za večjo stabilnost in dušenje vibracij za večjo natančnost strojev.

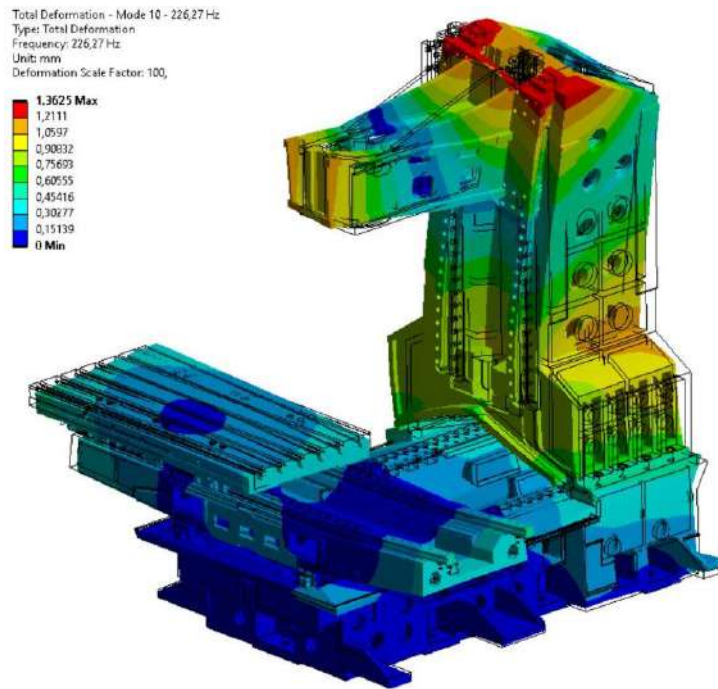
4. Analiza z metodo končnih elementov

3D CAD model za vsako varianto CNC rezkalnega stroja je dobil laboratorij za vrednotenje konstrukcij. Modele smo nato modificirali in pripravili za numerično simulacijo. Za simulacijo je uporabljena programska oprema Ansys. Geometrija modelov je bila poenostavljena, da se zagotovi pravilna diskretizacija s končnim elementom mreže ustrezne kakovosti. Nebistvene komponente, kot so zaščitni elementi in ohišja, ki nimajo pomembnega vpliva na dinamični odziv stroja, so bile izključene iz simulacije. 3D CAD model, predviden za varjeno različico rezkalnega stroja, je pokazal visoko stopnjo zahtevnosti zaradi dejstva, da je bil vsak zvar predstavljen kot eno samo telo znotraj modela. Posledično se je velikost modela znatno povečala, kar je povzročilo številna posamezna telesa, ki so zahtevala spajanje brez vnašanja geometrijskih napak. Izvedena je bila simulacija končnih elementov za upoštevanje obremenitev, ki izhajajo iz teže rezkalnega stroja. Dobljeni rezultati so se nato prenesli v modalno analizo. Pri obeh različicah CNC strojev so bile uporabljene enake obremenitve in robni pogoji. Rezultati analize končnih elementov so povzeti v tabeli 3, medtem ko grafični prikaz za litino in zvarjenec vidimo na slikah 22 in 23.

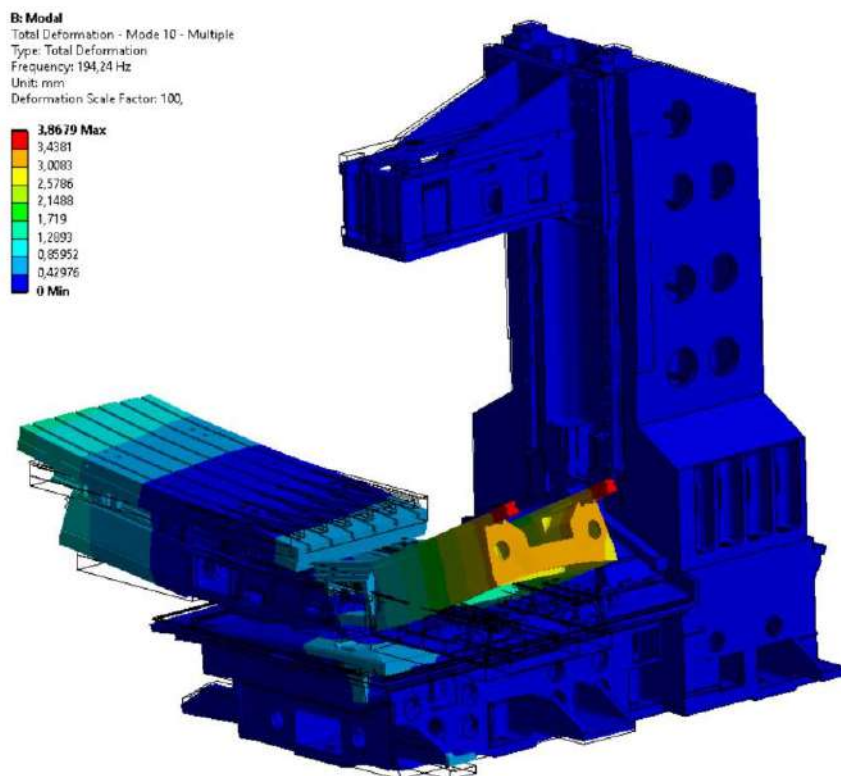
Tabela 3 Rezultati analize končnih elementov

Oblika modela	Frekvenca [Hz] - GJL-200	Frekvenca [Hz] - S355J2
1	46,17	58,987
2	70,738	88,649
3	88,473	102,97
4	114,83	108,26
5	120,16	108,31
6	160,44	131,81
7	166,4	132,04
8	180,73	136,13
9	209,81	149,77
10	226,27	194,24

Vir: (Lastni vir)



Slika 22: Grafični prikaz rezultatov simulacije za litino
 Vir:(Mega Metal d.o.o.)



Slika 23: Grafični prikaz rezultatov simulacije za zvarjenec
 Vir: (Mega Metal d.o.o)

Rezultati in strokovno mnenje:

Primerljivost med lastnostmi, ki jih imajo materiali, nam je podala določene usmeritve, kako ustrezno nastopiti pri odločitvi glede izbire materialov. Lastnosti materialov so povzete v tabeli 4.

Tabela 4: Lastnosti uporabljenih materialov

Material	Lastnosti, oznaka [enota]	Vrednost
EN-GJL-200	Modul elastičnosti, E [MPa]	100,500
	Poissonovo število, ν [-]	0,26
	Gostota, ρ [kg/m ³]	7150
S355J2	Modul elastičnosti, E [MPa]	200,000
	Poissonovo število, ν [-]	0,3
	Gostota, ρ [kg/m ³]	7850

Vir: (Lastni vir)

Rezultati so pokazali, da so frekvence, povezane z varjenim strojem, približno 10–15 Hz višje od ulitka in je predlagana trša zasnova. Ta ugotovitev velja za uporabo varjene konstrukcije stroja iz jekla S355J2, za katerega je značilna večja gostota v primerjavi z litino. Zaradi tega skupna teža varjene različice presega težo odlitka. Poleg tega ima jekleni material višji modul elastičnosti v primerjavi z litim železom, kar prispeva k večji togosti konstrukcije stroja. Osnovna primerjava med izvedbo ohišja stroja v liti ali varjeni izvedbi kaže ustreznost varjene različice, ki jo je treba dodatno raziskati glede optimalne togosti in tehnološke zmogljivosti. Z namenom izvajanja nadaljnje numerične analize zvarjene različice bi bilo koristno uskladiti način izdelave geometrijskega modela varjene komponente, da bi se izognili dodatnemu ročnemu naporu pri pripravi modela numerične simulacije.

Rezultati študije izvedljivosti so bili pozitivno sprejeti z vseh strani in so baza za nadaljnje raziskave predelave odlitkov v zvarjenje.

Pri tem smo dobili nekaj manjših, zelo starih poškodovanih odlitkov, ki so se že zdavnaj nehali proizvajati in je stranka nujno potrebovala zamenjavo. Kose smo premerili, naredili 3D modele zvarjenca in jih nato uspešno izdelali iz konstrukcijskega jekla.

3.5 Opis CAD programov, ki se uporabljajo pri raziskavi

3.5.1 Solid edge

Solid Edge se uporablja za izdelavo 3D modelov.

Solid Edge je programska oprema za računalniško podprto oblikovanje (CAD), je zmogljivo orodje za tridimenzionalno oblikovanje in načrtovanje izdelkov ter ima široko paleto funkcij, ki omogočajo inženirjem, oblikovalcem in izdelovalcem, da učinkovito ustvarjajo kompleksne modele. Solid edge omogoča:

Modeliranje trdnih teles: Solid Edge omogoča uporabnikom, da ustvarijo 3D modele trdnih teles s pomočjo različnih metod, kot so ekstruzija, rezanje, vlečenje, obračanje itd.

Sinhrono modeliranje: Eden izmed pomembnih konceptov v Solid Edge je sinhrono modeliranje, ki omogoča hitro in intuitivno urejanje 3D modelov.

Načrtovanje s sklopi: Solid Edge omogoča ustvarjanje kompleksnih sestavnih delov in sklopov z vsemi potrebnimi funkcionalnostmi za načrtovanje in montažo izdelkov.

Analiza in simulacija: Vključuje funkcionalnosti za izvajanje analize trdnosti, toplotne analize, dinamične analize in druge vrste simulacij za preverjanje delovanja in zmogljivosti izdelkov.

Risanje in dokumentacija: Solid Edge omogoča ustvarjanje tehničnih risb, dokumentacije in izdelavo tehničnih navodil za izdelavo izdelkov.

Sodelovanje in integracija: Podpira sodelovanje z drugimi programi in sistemi ter integracijo s sistemom upravljanja s podatki o izdelku (PDM) in sistemom upravljanja z izdelki (PLM).

Solid Edge se pogosto uporablja v različnih panogah, kot so strojništvo, avtomobilska industrija, letalska industrija, elektronika, medicina in druge. Je eno izmed vodilnih orodij za tridimenzionalno oblikovanje in načrtovanje izdelkov na trgu CAD programov.

Kljub temu, da ima Solid Edge modul za analize in simulacije, smo to nalogo predali strokovnjakom, ki uporabljajo programsko opremo Ansys.

3.5.2 Ansys

Ansys je programska oprema za inženirsko simulacijo in analizo in je eno izmed najbolj priznanih orodij na področju inženirske simulacije ter se uporablja v različnih industrijah po vsem svetu. Ansys omogoča inženirjem, oblikovalcem in razvijalcem, da izvajajo različne vrste simulacij in analiz, ki pomagajo pri načrtovanju in optimizaciji izdelkov, preden se ti dejansko izdelajo in testirajo v realnem svetu. Ansys omogoča:

Modeliranje geometrije: ANSYS omogoča uporabnikom, da ustvarijo kompleksne geometrije in modele izdelkov za simulacijo.

Nastavitev simulacije: Uporabniki lahko določijo materialne lastnosti, robne pogoje, obremenitve in druge parametre za simulacijo.

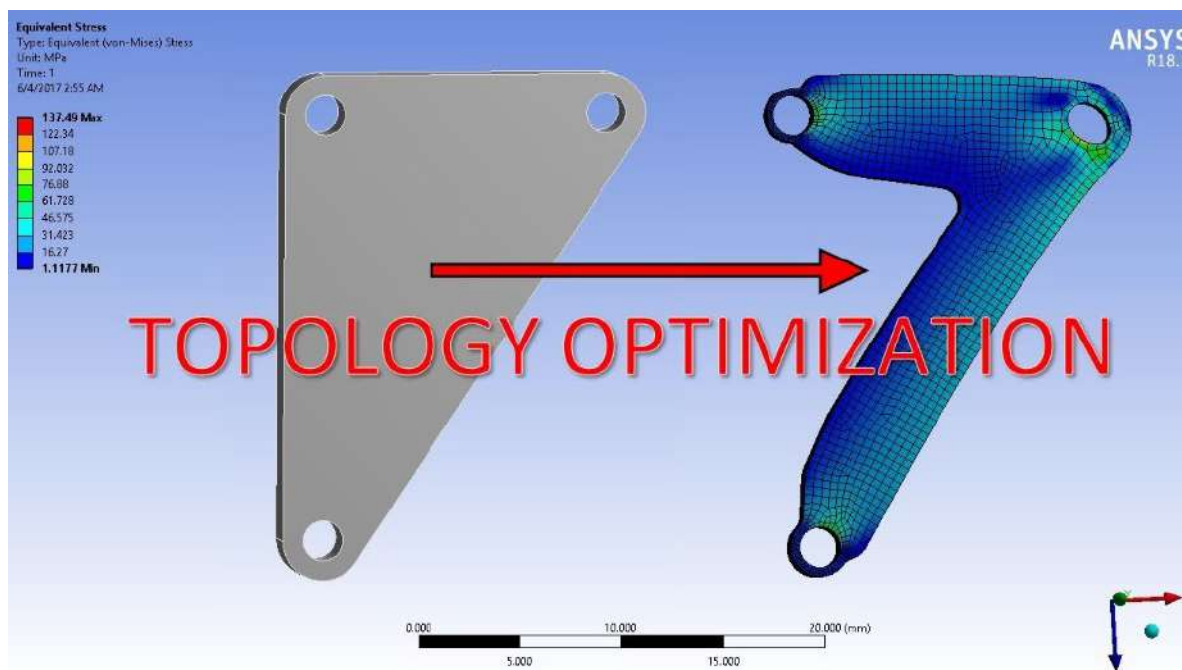
Izvajanje simulacij: ANSYS omogoča izvajanje različnih vrst simulacij, vključno s strukturnimi, toplotnimi, tokovnimi, elektromagnetnimi, akustičnimi, optičnimi simulacijami in drugimi.

Postprocesiranje rezultatov: Programska oprema ponuja napredne funkcije za analizo in interpretacijo rezultatov simulacije, vključno z vizualizacijo, grafičnimi prikazi, tabelarnimi podatki in poročili.

Optimizacija dizajna: ANSYS omogoča izvajanje optimizacije dizajna in izboljšanje učinkovitosti, trdnosti, stabilnosti, toplotne učinkovitosti in druge lastnosti izdelkov (slika 24).

Več fizične simulacije: Omogoča integracijo različnih fizikalnih pojavov v eni simulaciji, kar omogoča natančnejše modeliranje kompleksnih sistemov.

Ansys se uporablja v različnih panogah, kot so letalska industrija, avtomobilska industrija, energetika, medicina, elektronika, gradbeništvo in še več. Je eno izmed najbolj priznanih orodij za inženirsko simulacijo in analizo, ki omogoča inženirjem razvoj in optimizacijo izdelkov pred njihovo dejansko izdelavo in preizkušanjem v realnem svetu.



Slika 24: Primer optimizacije topologije

Vir: (<https://i.ytimg.com/vi/PMcP7mK1Zec/maxresdefault.jpg>)

3.6 Uporaba digitalnih tehnologij za izboljšanje procesa varjenja

Digitalne tehnologije imajo ključno vlogo v sodobni proizvodnji, kjer omogočajo avtomatizacijo, optimizacijo, spremljanje in nadzor proizvodnih procesov ter izboljšujejo učinkovitost in konkurenčnost podjetij. Uporaba digitalnih tehnologij je v zadnjih letih prinesla številne inovacije in izboljšave v procesu varjenja. Nekatere od teh tehnologij vključujejo:

Robotsko varjenje: Je postopek, pri katerem se varilni robot uporablja za avtomatizirano izvajanje varilnih operacij. Ta tehnologija združuje prednosti varilnega procesa z avtomatizacijo, kar omogoča hitrejše, natančnejše in ponovljive varilne operacije. Nekatere ključne značilnosti robotskega varjenja vključujejo:

Natančnost: Varilni roboti so opremljeni s senzorji in naprednimi nadzornimi sistemi, ki omogočajo izvajanje natančnih varilnih operacij in vzdrževanje konstantne kakovosti zvara. Uporaba naprednih senzorjev, kot so laserski senzorji ali kamere, omogoča natančnejše nadzorovanje postopka varjenja in zaznavanje morebitnih napak ali nepravilnosti.

Hitrost: Roboti lahko izvajajo varilne operacije hitreje kot ročno varjenje, kar povečuje produktivnost in zmanjšuje čas proizvodnje.

Ponovljivost: Z uporabo robotskega varjenja je mogoče doseči visoko stopnjo ponovljivosti varilnih operacij, kar zagotavlja enakomerno kakovost zvarov in zmanjšuje tveganje za napake.

Avtomatizacija: Avtomatizacija varilnih operacij z varilnimi roboti zmanjšuje potrebo po ročnem delu in omogoča učinkovitejše izkoriščanje delovne sile.

Vsestranskost: Varilni roboti (slika 25) so prilagodljivi in lahko izvajajo različne vrste varjenja, vključno s točkovnim varjenjem, MIG/MAG varjenjem, TIG varjenjem, plazemskim varjenjem in drugimi.



Slika 25: Varilni robot

Vir: (<https://www.mega-metal.si>)

Simulacije varjenja so pomemben del razvojnega procesa pri načrtovanju varilnih postopkov in izdelkov. Te simulacije omogočajo inženirjem in oblikovalcem, da pred dejanskim varjenjem preizkusijo in optimizirajo različne parametre, kot so materiali, postopki varjenja, geometrija spojev, hitrosti varjenja itd. Nekatere ključne značilnosti simulacij varjenja vključujejo:

Analizo napetosti in deformacij: Simulacije omogočajo oceno napetosti in deformacij, ki se pojavijo med varjenjem, ter identifikacijo morebitnih problematičnih področij, kot so napetostne koncentracije ali deformacije.

Napovedovanje napak: S simulacijami je mogoče napovedati morebitne napake v zvaru, kot so razpoke, poroznost, nepopolnosti in druge nepravilnosti, ter izvajati ustrezne ukrepe za njihovo preprečevanje.

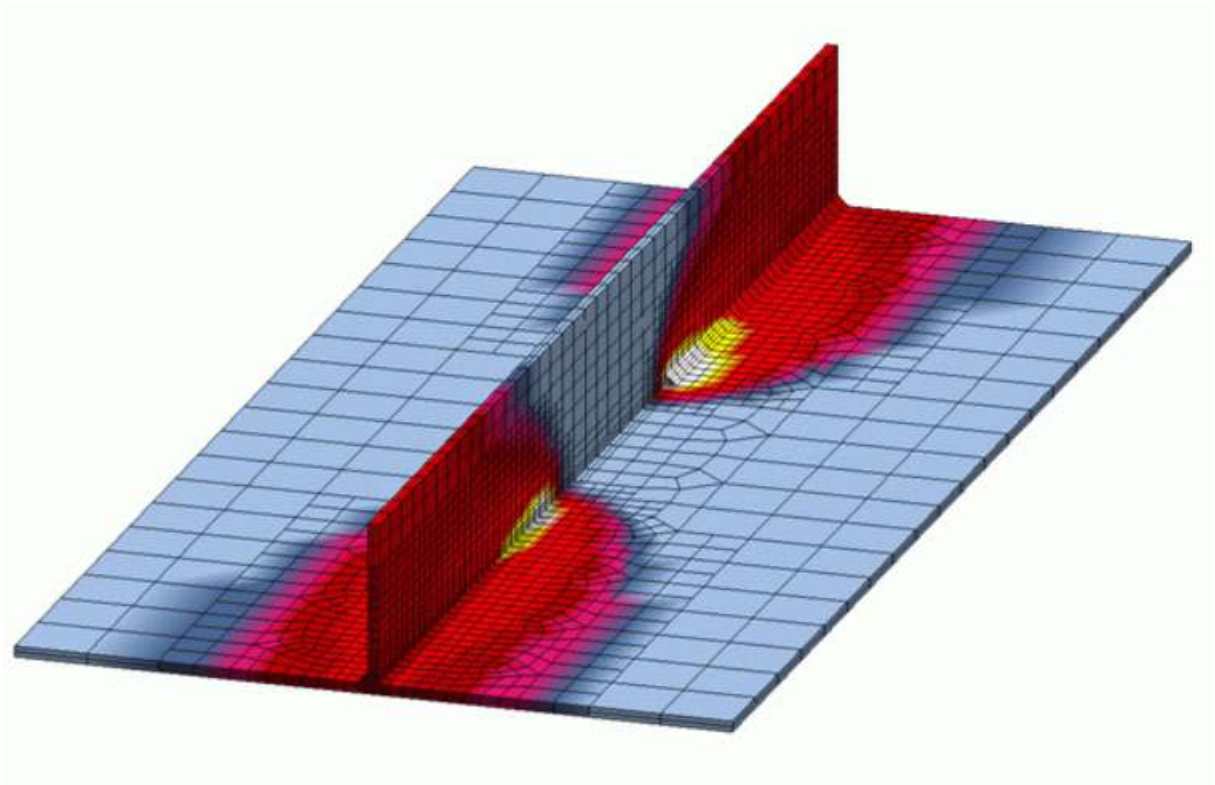
Optimizacijo postopkov: Inženirji lahko s simulacijami preizkusijo različne postopke varjenja, kot so vrsta elektrode, tok varjenja, hitrost varjenja itd., ter izberejo najboljše kombinacije za želeno kakovost zvara.

Izboljšanje geometrije spojev: Simulacije omogočajo načrtovanje in optimizacijo geometrije spojev ter izbiro najboljših metod varjenja za določene aplikacije.

Analizo trdnosti in trdnosti zvara: Simulacije omogočajo oceno trdnosti in trdnosti zvara ter preverjanje, ali izpolnjujejo zahteve glede mehanskih lastnosti.

Evaluacijo termičnih vplivov: Simulacije omogočajo oceno termičnih vplivov varjenja na okoliške materiale in identifikacijo morebitnih težav, kot so deformacije ali termično razpokanje.

Simulacije varjenja se izvajajo s pomočjo specializirane programske opreme za inženirsko simulacijo, ki omogoča modeliranje varilnih procesov, uporabo različnih algoritmov za napredne analize ter vizualizacijo rezultatov. S pravilno uporabo lahko simulacije varjenja prispevajo k izboljšanju kakovosti, zmanjšanju stroškov in skrajšanju časa razvoja pri izdelavi varjenih konstrukcij. Primer simulacije obremenitev na zvarjenec nam prikazuje slika 26.



Slika 26: Primer simulacije obremenitev na zvarjenec

Vir: (<https://simulatemore.mscsoftware.com/multi-phase-simulations-with-marc-and-simufact/>)

Internet stvari (IoT) lahko igra ključno vlogo tudi v procesih varjenja. Integracija IoT v varilne procese omogoča zbiranje podatkov v realnem času, spremljanje delovanja varilnih strojev in optimizacijo proizvodnega procesa. Tu je nekaj načinov, kako se IoT lahko uporablja v varilni industriji:

Nadzor in spremljanje: Senzorji, nameščeni na varilnih strojih, lahko zbirajo podatke o parametrih varjenja, kot so temperatura, tok, napetost in hitrost varilnega žarka. Te podatke lahko pošiljajo v oblak, kjer se analizirajo in spremljajo v realnem času.

Diagnostika in vzdrževanje: Z uporabo naprednih analitičnih orodij lahko IoT pomaga pri zgodnjem zaznavanju napak ali nepravilnosti v varilnem procesu. To omogoča izvajanje preventivnega vzdrževanja, kar lahko zmanjša zastoje v proizvodnji in izboljša učinkovitost.

Optimizacija varilnih procesov: Na podlagi zbranih podatkov lahko IoT omogoči analizo učinkovitosti varilnih procesov in identifikacijo možnosti za izboljšave. Na primer, lahko pomaga pri določanju optimalnih parametrov varjenja za doseg želenih rezultatov.

Sledenje kakovosti zvara: S pomočjo IoT je mogoče slediti kakovosti zvara in identificirati morebitne nepravilnosti ali napake v realnem času. To omogoča hitro ukrepanje in preprečevanje izdelave nekvalitetnih izdelkov.

Povezljivost v proizvodni verigi: Integracija IoT omogoča povezljivost med varilnimi stroji, upravljavskimi sistemi in drugimi napravami v proizvodni verigi. To omogoča boljše upravljanje proizvodnega procesa in optimizacijo celotnega proizvodnega toka.

Vključitev IoT v varilne procese lahko prispeva k večji učinkovitosti, zmanjšanju stroškov in izboljšanju kakovosti proizvodnje. Pomaga tudi pri digitalizaciji proizvodnih procesov in ustvarjanju pametnih tovarn prihodnosti (slika 27).



Slika 27: Internet of things

Vir: (<https://magellanx.co/industrial-iot-solutions-examples/>)

Navidezna in obogatena resničnost: Uporaba navidezne resničnosti ali obogatene resničnosti omogoča usposabljanje varilcev in inženirjev ter simulacijo varjenja v virtualnem okolju (slika 28), kar omogoča boljše razumevanje postopkov in izboljšano usposobljenost.



Slika 28: Virtual/augmented reality v industriji

Vir: (<https://www.linkedin.com/pulse/vr-welding-simulator-vs-ar-which-better-simbott-94y1f>)

Z uporabo teh digitalnih tehnologij lahko podjetja dosežejo večjo natančnost, učinkovitost in kakovost pri varilnih procesih, kar prispeva k izboljšanju proizvodnje in konkurenčnosti na trgu.

3.7 Analiza stroškov primerljivih tehnologij izdelave

Analiza stroškov med primerljivimi metodami ni prikazana kot numerična vrednost, temveč zgolj kot strokovna razlaga, saj sem se v predstavljenem primeru izbire postopka dotaknil raziskave, kaj pomeni ustrezna izbira materiala in postopka za uporabno vrednost izdelka ob računalniško podprtih orodjih.

Pri izdelavi ulitka nekateri glavni stroški vključujejo:

- **Materiale:** Stroške surovin, kot so kovine, ki se uporabljajo za izdelavo ulitka. To vključuje cene materialov za taljenje in kalupov.
- **Delovno silo:** Stroške dela, povezane z oblikovanjem, pripravo kalupov, taljenjem kovine, ulivanjem in končno obdelavo ulitka.
- **Energijo:** Stroške energije, potrebne za taljenje kovine in delovanje opreme za pripravo in obdelavo ulitka.
- **Opremo:** Stroške nakupa, vzdrževanja in popravil opreme, kot so peči za taljenje, stroji za obdelavo in orodja za pripravo kalupov.
- **Kakovosten nadzor:** Stroške, povezane z nadzorom kakovosti, vključno s testiranjem materialov, kontrolami procesa in končnim pregledom ulitka.
- **Transport in logistiko:** Stroške prevoza surovin in končnih izdelkov ter drugih logističnih storitev.
- **Odpadke in recikliranje:** Stroške ravnanja z odpadki, kot so odpadki kovine in ostanki kalupov, ter stroške recikliranja materialov, kjer je to mogoče.
- **Stroške administracije in upravljanja:** Vključujejo stroške vodenja proizvodnega procesa, upravljanje zalog, administrativne stroške in druge splošne stroške poslovanja.

Skupni stroški izdelave ulitka so lahko odvisni od več dejavnikov, vključno s kompleksnostjo oblike ulitka, uporabljenimi materiali, velikostjo serije in ravni avtomatizacije v proizvodnem procesu.

Glavni stroški pri izdelavi zvarjenca so:

- **Materiali:** Stroški materialov, vključno z varilno elektrodo ali žico ter osnovnim materialom, ki se varita. Cena materiala za varjenje se lahko razlikuje glede na vrsto in kakovost materiala ter uporabljene varilne tehnike.
- **Delovna sila:** Stroški dela, povezani z izvedbo varilnega procesa. To vključuje čas delavca ali varilca, potrebnega za pripravo, izvedbo in končno obdelavo zvara.
- **Energija:** Stroški energije, potrebne za delovanje varilne opreme, kot so varilni stroji, in za ogrevanje materiala med postopkom varjenja.

- **Oprema:** Stroški nakupa, vzdrževanja in popravil varilne opreme, vključno z varilnimi stroji, elektrodami, žicami, zaščitno opremo in drugimi pripomočki.
- **Kakovosten nadzor:** Stroški, povezani z nadzorom kakovosti varjenja, ki vključujejo preglede varilnega spoja, preizkuse kakovosti in morebitno popravljanje nepravilnosti.
- **Transport in logistika:** Stroški prevoza materialov in končnih izdelkov ter logistične storitve, povezane z distribucijo varjenih izdelkov.
- **Odpadki in recikliranje:** Stroški ravnanja z odpadki, kot so kovinski ostanki in odrezki, ter stroški recikliranja materialov, kjer je to mogoče.
- **Stroški administracije in upravljanja:** Vključujejo stroške upravljanja proizvodnega procesa, upravljanja zalog, administrativne stroške in druge splošne stroške poslovanja, povezane z izdelavo zvarjenca.

Stroški so navedeni za standardne procese varjenja in litja, čeprav se pri varjenju ne spremenijo pri serijski proizvodnji, medtem ko pri litju padajo zaradi izdelave kalupa, ki se lahko uporabi za večjo serijo izdelkov.

4 SKLEP

Kot je bil namen diplomskega dela, smo primerjali procese varjenja in litja ter ugotavljali njihove prednosti in omejitve in poskušali razviti tehnologijo varjenja, ki bi dala prednost zvarjencem pred ulitkom. S tem namenom so bile podane tudi določene hipoteze, ki so tudi podlaga za upravičenost izvedene raziskave in predstavljenih rezultatov.

H1 - Zvarjenci se lahko izdelajo hitreje kot ulitki.

Ta trditev drži za prototipe kompleksnih oblik, pri manjših serijah in izdelkih, pri katerih pogosto prihaja do sprememb med izdelavo. Pri varjenju je možno rezati in variti dodatne pozicije že med samo izdelavo, medtem ko je pri ulitkih treba spremeniti kalupe in pogosto narediti nov izdelek. Pri večjih serijah se hitrost in ponovljivost krepko povečata na strani ulitkov.

H2 - Pri zvarjencu lahko zmanjšamo količino odpadkov.

Pri simulaciji zvarjencev v programu Ansys se je pokazalo, da se lahko po analizi zvarjenec optimizira tako, da se mu spremeni geometrija in postavitev pozicij. S tem ohranimo željene mehanske lastnosti izdelka in zmanjšamo količino porabljenega materiala za izdelavo zvarjenca.

H3 - Pri zvarjencu so manjši začetni stroški izdelave.

Ta trditev je pravilna.

Pri izdelavi zvarjenca ni potrebe po izdelavi dragih orodij ali kalupov in zato se lahko po razreзу materiala izdelek takoj začne sestavljati in variti. V redkih primerih je lahko dodaten strošek izdelava šablon za pravilno nastavljanje pozicij pred varjenjem.

Stroški lahko nastanejo pri kompleksnejših konstrukcijah, saj je sestavljanje zvarjenca ročni proces, pri katerem pogosto prihaja do merskih in geometrijskih odstopanj izdelka.

H4 - Digitalizacija omogoča avtomatizacijo varilnih procesov, ki lahko pripomore k povečanju ekonomske učinkovitosti.

Digitalizacija in avtomatizacija varilnih procesov sta postali ključna elementa v industriji, saj omogočata povečanje učinkovitosti in konkurenčnosti. Izboljšave v robotizaciji, programskih rešitvah, povezovanju, nadzoru in optimizaciji parametrov vodijo k povečanju ekonomske

učinkovitosti. Digitalni sistemi omogočajo sledenje vsake faze varilnega procesa in zbiranje podatkov o kakovosti, nastavitvah in porabi materialov. To omogoča boljše upravljanje proizvodnje, hitrejšo odpravljanje težav in optimizacijo procesov na podlagi zbranih podatkov.

Digitalizacija omogoča natančno nadzorovanje kakovosti varjenja in zmanjšuje možnost človeških napak. S tem se izboljša zanesljivost izdelkov in zmanjša tveganje za okvare ali poškodbe. Z uporabo digitalizacije za avtomatizacijo varilnih procesov lahko podjetja dosežejo večjo ekonomsko učinkovitost, saj se zmanjšajo stroški dela, izboljša kakovost in zmanjša odpad. Hkrati omogoča tudi boljšo konkurenčnost in prilagodljivost na spremembe v industriji.

Pri analizi in raziskavi procesov varjenja in ulivanja smo prišli do zanimivih rezultatov in sicer, da je vsak proces primeren za specifičen nabor izdelkov, odvisno od potreb in zahtev izdelkov ter omejitev ali izzivov, s katerimi se sooča vsak proces. Npr. z zvarjenci lahko hitreje in ceneje pridemo do prototipa, proces je fleksibilnejši pri spremembah v dizajnu in oblikah, ulivanje je primernejše za večje serije, kjer je potreba po večjem izkoristku materiala in kompleksnejši geometriji izdelkov.

Tako kot skozi zgodovino se bodo tudi v prihodnosti te tehnologije razvijale in tekmovala med seboj, da bi trgu ponudile konkurenčnejše izdelke. To je tudi razlog, da se je razvilo toliko različnih postopkov, od katerih je za specifične izdelke vsak primernejši od drugih. Izdelki so tudi prilagojeni tem različnim postopkom, da bi bili konkurenčnejši glede kakovosti, hitrosti in stroškov izdelave, in se medsebojno razvijajo.

Prihajajo tudi časi, ko je vse večja potreba po »pametnih« izboljšavah, ki pomagajo ohranjati konkurenčnost te industrije. Zaradi gospodarskega in industrijskega vzpona azijskih držav jeklena industrija postaja čedalje bolj ogrožena in nekonkurenčna v primerjavi z Azijo.

Eden glavnih faktorjev so višji proizvodni stroški v primerjavi z azijskimi državami, zlasti zaradi dejavnikov, kot so višji stroški dela, stroški energije in strogi okoljski predpisi.

Azijske države, zlasti Kitajska, imajo koristi od nižjih stroškov dela in manj strogih okoljskih predpisov, kar jim omogoča nižjo ceno proizvodnje jekla. Da bi izboljšala učinkovitost v jekleni proizvodnji, pa Evropa ogromno investira v napredne tehnologije in procese.

Digitalizacija in avtomatizacija sta ena izmed načinov, s katerimi si pomagamo, sta pa za veliko podjetij nakup in uvajanje velik finančni strošek, ki ga morajo investirati, da preživijo.

V sodobni industriji so inovacije zelo pomembne za ohranjanje konkurenčnosti, pri čemer umetna inteligenca predstavlja enega izmed najbolj perspektivnih orodij za izboljšanje proizvodnih procesov, kot sta litje in varjenje.

Umetna inteligenca lahko prinese pomembne izboljšave pri primerjalni analizi litja in varjenja za izdelavo varilnih konstrukcij s tem, da analizira velike količine podatkov in identificira vzorce, ki bi lahko sicer ostali neopaženi. Z uporabo naprednih algoritmov za strojno učenje lahko AI optimizira postopek varjenja tako, da določi najboljše prakse, nastavitve in parametre, kar vodi do večje konkurenčnosti zvarjencev. Poleg tega lahko umetna inteligenca predvidi potencialne napake in predlaga rešitve za zmanjšanje napak in izboljšanje kakovosti končnega izdelka.

Umetna inteligenca lahko poleg optimizacije postopkov prispeva tudi k zmanjšanju stroškov in povečanju učinkovitosti proizvodnje. Z analizo podatkov o porabi materialov, energiji in delovnem času lahko AI pomaga pri identifikaciji področij, kjer lahko dosežemo prihranke. Na ta način nam AI pomaga doseči boljšo konkurenčnost na trgu.

5 VIRI, LITERATURA

- Aškerc, U. A., Fišer, K., & Drovenik, A. (2016). *AVTOMATIZIRANO VARJENJE*. Pridobljeno iz Knjižnica Celje: <https://www.knjiznica-celje.si/raziskovalne/4201603846.pdf>
- Business guide to Industrial IoT*. (december 2020). Pridobljeno iz i-scoop: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iot/industrial-internet-things-iiot-saving-costs-innovation/>
- Casting*. (januar 2020). Pridobljeno iz New World Encyclopedia: <https://www.newworldencyclopedia.org/p/index.php?title=Casting>
- Fast Engineering. (2021). *What is the difference between the casting of metals and fusion welding?* Pridobljeno iz Design World: <https://fastenerengineering.com/what-is-the-difference-between-the-casting-of-metals-and-fusion-welding/>
- Investment Casting PCI. (brez datuma). *What is investment casting?* Pridobljeno iz Investment Casting PCI: <https://www.investmentcastingpci.com/blog/what-is-investment-casting/>
- Klemenšek. (2018). *Ulivanje*. Pridobljeno iz Študentski: https://studentski.net/gradivo/vis_scv_meh_tpr_sno_ulivanje_01
- Klemenšek, Š. (2018). *Varjenje z mehansko energijo*. Pridobljeno iz Študentski: https://studentski.net/gradivo/vis_scv_meh_tpr_sno_varjenje__varjenje_z_mehansko_energijo_01
- LEDUK d.o.o. (2017). *Ključavničarstvo*. Pridobljeno iz Ročno varjenje: https://kljucavnicarstvo.eu/rocno_varjenje/
- Metaltek. (24. november 2020). *Centrifugal Casting Process: Advantages and Limitations*. Pridobljeno iz Metaltek: <https://www.metaltek.com/blog/centrifugal-casting-process-advantages-and-limitations/>
- Pesek, T. (september 2020). *ZASNOVA IN DIMENZIONIRANJE ORODJA*. Pridobljeno iz DK UM: <https://dk.um.si/Dokument.php?id=146685&lang=slv>
- Šircelj, D. (brez datuma). *Točkovno varjenje*. Pridobljeno iz STŠ Koper: <http://dusan.sts.si/tockovno-varjenje-v21-2/>
- Šircelj, D. (brez datuma). *Varjenje s plazmo*. Pridobljeno iz STŠ Koper: <http://dusan.sts.si/varjenje-s-plazmo-v4/>

TheMetalCasting. (brez datuma). *Gravity Die Casting*. Pridobljeno iz TheMetalCasting:
<https://www.themetalcasting.com/gravity-die-casting.html>

Varikon. (2021). *Prihodnost varjenja*. Pridobljeno iz Varikon:
<https://www.varikon.com/welding-4-0-prihodnost-varjenja/?cn-reloaded=1>

Virs. (brez datuma). *ABC Varjenja*. Pridobljeno iz VIRS:
https://kljucavnicarstvo.eu/rocno_varjenje/

Višja šola Ravne. (november 2018). *TEHNOLOŠKI PROCESI*. Pridobljeno iz Višja šola
Ravne: <https://dk.um.si/Dokument.php?id=146685&lang=slv>