

Optimiranje parametara aktivnog hlađenja kod aditivne proizvodnje električnim likom i žicom

Vresk, Jurica

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:000764>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Jurica Vresk

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof.dr.sc. Ivica Garašić

Student:

Jurica Vresk

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i kolegama iz Proizvodnje Dalekovod na omogućenim ispitivanjima u njihovim laboratorijima. Također se zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i djevojci na razumijevanju i podršci tijekom dosadašnjeg studija.

Jurica Vresk, bacc.ing.mech.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JURICA VRESK**

Mat. br.: 0035206077

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija parametara aktivnog hlađenja kod aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of active cooling parameters during wire and arc additive manufacturing**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu opisati aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Objasniti i analizirati toplinski ciklus kojemu je materijal podvrgnut prilikom takve proizvodnje te odrediti utjecaj toplinskog ciklusa na svojstva proizvoda. Navesti metode i tehnike aktivnog hlađenja kod aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te objasniti utjecaj na toplinski ciklus materijala i mogućnosti upravljanja svojstvima proizvoda.

U eksperimentalnom dijelu dati idejno rješenje i izraditi napravu za primjenu aktivnog hlađenja vodom kod aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Utvrditi najznačajnije parametre aktivnog hlađenja te odrediti njihove optimalne vrijednosti za izradu proizvoda od dupleks čelika. Analizirati homogenost i teksturu površine izrađenih uzoraka te zaključno ocijeniti primjenjivost aktivnog hlađenja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

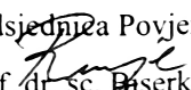
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predvideni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc.  D. Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. OPĆENITO O WAAM TEHNOLOGIJI.....	2
2.1. Planiranje procesa kod WAAM tehnologije	3
2.2. Parametri zavarivanja kod WAAM-a	4
2.3. Izazovi i trenutni razvoj kod WAAM-a	4
2.3.1. Kontrola poroznosti	5
3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI.....	6
4. UPRAVLJANJE UNOSOM TOPLINE KOD WAAM-A	8
4.1. Klasifikacija tehnika upravljanja unosa topline	8
5. KONCEPT AKTIVNOG HLAĐENJA	10
5.1. Potvrda koncepta aktivnog hlađenja	11
5.1.1 Analiza temperaturnih promjena i ciklusa.....	13
5.1.2. Utjecaj na kvalitetu geometrije predforme	15
5.1.3. Utjecaj upravljanja toplinom na poroznost aluminijske predforme.....	16
5.1.4. Utjecaj upravljanja toplinom na mehanička svojstva aluminijske predforme	18
5.2. Utjecaj udaljenosti između vrha predforme i razine vode (eng. layer enge to water distance – LEWD) na izvedbu predforme	20
6. EKSPERIMENTALNI DIO	27
6.1 Opis eksperimenta	27
6.2. Oprema za zavarivanje.....	28
6.2.1. Dodatni materijal.....	30
6.2.2. Zaštitni plin.....	31
6.3. Konstrukcija naprave za usis pare i odvođenje viška vode	31
6.3.1. Nacrta za proizvodnju komponenata naprave i sklop.....	34
6.3.2. Problem trenja i zapinjanja.....	41
6.3.3. Rješenje problema trenja	41
6.4. Parametri procesa taloženja i načini izvedbe eksperimenta.....	41
6.5. Postupak taloženja predformi	43
6.5.1. Taloženje prirodnim hlađenjem.....	43
6.5.2. Taloženje uz aktivno hlađenje.....	46

6.6. Odvajanje predforme s podloge, izrezivanje uzoraka i obrada uzoraka	49
6.6.1. <i>Izrada makroizbrusaka</i>	<i>50</i>
6.6.2. <i>Izrezivanje uzoraka za 3D skeniranje.....</i>	<i>52</i>
6.6.3. <i>Izrezivanje i obrada uzoraka za ispitivanje udarne radnje loma.....</i>	<i>52</i>
6.6.4. <i>Obrada uzoraka za rendgen</i>	<i>55</i>
6.7. Ispitivanja svojstava i homogenosti materijala.....	55
6.7.1. <i>Mjerenje tvrdoće makroizbrusaka</i>	<i>56</i>
6.7.2. <i>Ispitivanje udarne radnje loma, Charpy.....</i>	<i>57</i>
6.7.3. <i>Snimanje rendgenom</i>	<i>61</i>
7. ZAKLJUČAK	63
8. LITERATURA	65

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz TIG WAAM sustava [1]	2
Slika 2. Koraci kod WAAM procesa [1]	3
Slika 3. Spoj WAAM tehnologije i valjka [1]	5
Slika 4. Klasifikacija pristupa upravljanja unosom topline [4]	9
Slika 5. Shema koncepta aktivnog hlađenja u usporedbi s normalnim i pasivnim načinom hlađenja; Q_{kond} predstavlja odvođenje topline kondukcijom dok Q_{konv} predstavlja odvođenje topline konvekcijom [4]	10
Slika 6. Eksperimentalna oprema za testiranje principa aktivnog hlađenja [4]	12
Slika 7. Shematski prikaz usporedbe različitih pristupa hlađenju [4]	12
Slika 8. Termogrami uhvaćeni tik nakon završetka taloženja [4]	13
Slika 9. Primjer toplinskog ciklusa dobivenog mjerenjem temperature u istoj točki predforme i podloge [4]	14
Slika 10. Prikaz geometrije predforme s obzirom na tehnike upravljanja topline [4]	15
Slika 11. Prikaz utjecaja načina upravljanjem topline na poprečni presjek predforme [4]	16
Slika 12. Mikrostrukture poprečnih presjeka aluminijske predforme pod različitim uvjetima upravljanja topline [4]	17
Slika 13. Graf relativnih gustoća legure aluminijske s obzirom na princip upravljanja topline [4]	18
Slika 14. Mjesto vađenja uzoraka iz predforme i dimenzije istih [4]	19
Slika 15. Utjecaj upravljanja topline na naprezanje i istežanje u uzdužnoj i vertikalnoj osi [4]	19
Slika 16. Udaljenost od razine vode do vrha predforme (LEWD) [4]	20
Slika 17. Utjecaj LEWD-a na geometriju i hrapavost površine predforme [4]	21
Slika 18. Utjecaj LEWD-a na izgled poprečnog presjeka predforme [4]	22
Slika 19. Utjecaj LEWD-a na valovitost i efektivnu širinu predforme [4]	22
Slika 20. Utjecaj LEWD-a postotni volumen pora u predformi [4]	23
Slika 21. Utjecaj LEWD-a na međuprolaznu temperaturu [4]	24
Slika 22. Utjecaj LEWD-a na vrijeme trajanja procesa taloženja [4]	24
Slika 23. Utjecaj koncentracije taloženja na geometriju predforme u uvjetima normalnog i aktivnog hlađenja [4]	25
Slika 24. Usporedba temperatura kod koncentriranog taloženja predforme u uvjetima normalnog i aktivnog hlađenja [4]	26

Slika 25. Robotska stanica Almega OTC AX V6	29
Slika 26. Naprava za skupljanje pare i viška vode kod aktivnog hlađenja.....	32
Slika 27. Prikaz definirane udaljenosti od razine vode, LEWD	33
Slika 28. Parametri struje i napona prije na početku taloženja.....	42
Slika 29. Parametri struje i napona pred kraj taloženja	43
Slika 30. Poligon (podloga) za taloženje predforme	44
Slika 31. Kompletan sustav za taloženje predforme.....	44
Slika 32. Prikaz procesa za vrijeme taloženja	45
Slika 33. Završena predforma, još uvijek neizrezana s podloge	46
Slika 34. Poligon (podloga) za taloženje predforme	47
Slika 35. Predforma nekoliko slojeva nakon početka taloženja i prikaz LEWD-a	47
Slika 36. Predforma nakon završetka taloženja.....	48
Slika 37. Izrezivanje iskoristivog dijela predforme.....	49
Slika 38. Izrada makroizbruska	50
Slika 39. Izvađeni i nagriženi makroizbrusci	51
Slika 40. Prikaz uzorka i bijelog spreja	52
Slika 41. Vađenje i oznake uzoraka iz normalno hladene predforme	53
Slika 42. Vađenje i oznake uzoraka iz aktivno hladene predforme.....	53
Slika 43. Gotovi uzorci, spremni za izradu V-utora	54
Slika 44. Izrada V-utora.....	55
Slika 45. Princip i uređaj za mjerenje tvrdoće HV 10	56
Slika 46. Charpyev bat za ispitivanje udarne radnje loma (Proizvodnja Dalekovod).....	58
Slika 47. Oprema za rendgensko snimanje.....	61
Slika 48. Radiogram prirodno hladene predforme	62
Slika 49. Radiogram aktivno hladene predforme	62

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva konstrukcijskih čelika [2].....	6
Tablica 2. Čvrstoća konstrukcijskih čelika [2]	7
Tablica 3. Karakteristike izvora OTC Daihen Wellbee 500L	30
Tablica 4. Kemijski sastav konstrukcijskog čelika S355 [5].....	30
Tablica 5. Parametri procesa taloženja	41
Tablica 6. Izmjereni iznosi tvrdoće	57
Tablica 7. Rezultati dobiveni ispitivanje udarne radnje loma	59

SAŽETAK

U teorijskom dijelu, uz aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, predstavljani su različiti pristupi upravljanju toplinom u svrhu smanjivanja unosa topline i manje akumulacije topline tijekom procesa taloženja. Uz prirodni pristup hlađenja, obrađeni su i intrinzični princip upravljanja toplinom, aktivni i pasivni način hlađenja predforme tokom taloženja. Opisan je i konstrukcijski čelik S355 i njegova svojstva zbog korištenja istog u eksperimentalnom dijelu rada.

Eksperimentalni dio rada prikazuje proces aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom uz dva različita pristupa upravljanju toplinom. Jedna se predforma prirodno hladi dok je druga predforma podvrgnuta aktivnom hlađenju, puno intenzivnijem obliku od prirodnog. Fokus eksperimentalnog dijela rada je na usporedbi razlike mehaničkih svojstava predformi taloženih u različitim uvjetima hlađenja. Iz predforme su izvađeni uzorci iz kojih su izvađeni makroizbrusci, na kojima je mjerena tvrdoća, ispitivana udarna radnja loma i sniman rendgen.

Ključne riječi: *Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, upravljanje toplinom, prirodno hlađenje, aktivno hlađenje, predforma*

SUMMARY

In the theoretical part of the thesis, in addition to WAAM, different approaches to heat management are presented in order to reduce heat input and heat accumulation during the deposition process. In addition to the natural approach to cooling, the intrinsic principle of heat management, the active and passive way of cooling the preform during deposition are also discussed. The structural steel S355 and its properties due to its use in the experimental part of the paper are also described.

The experimental part of the thesis presents the process of WAAM with two different approaches to heat management. One preform cools naturally while the other preform is subjected to active cooling, a much more intense form of cooling than natural. The focus of the experimental part of the thesis is on comparing the differences in the mechanical properties of preforms deposited in different cooling conditions. On samples taken from the preform was measured hardness, the impact fracture was examined and an X-ray taken.

Keywords: *Wire and Arch Additive Manufacturing – WAAM, heat management, natural cooling, active cooling, preform*

1. UVOD

Posljednjih godina načini proizvodnje proizvoda uvelike su se promijenili, uključujući i industrijsku robu. Kako bi ostali konkurentni, proizvođači nastoje proizvoditi kvalitetnije proizvode, a istovremeno nastoje smanjiti vrijeme proizvodnje i povećati ekonomsku isplativost.

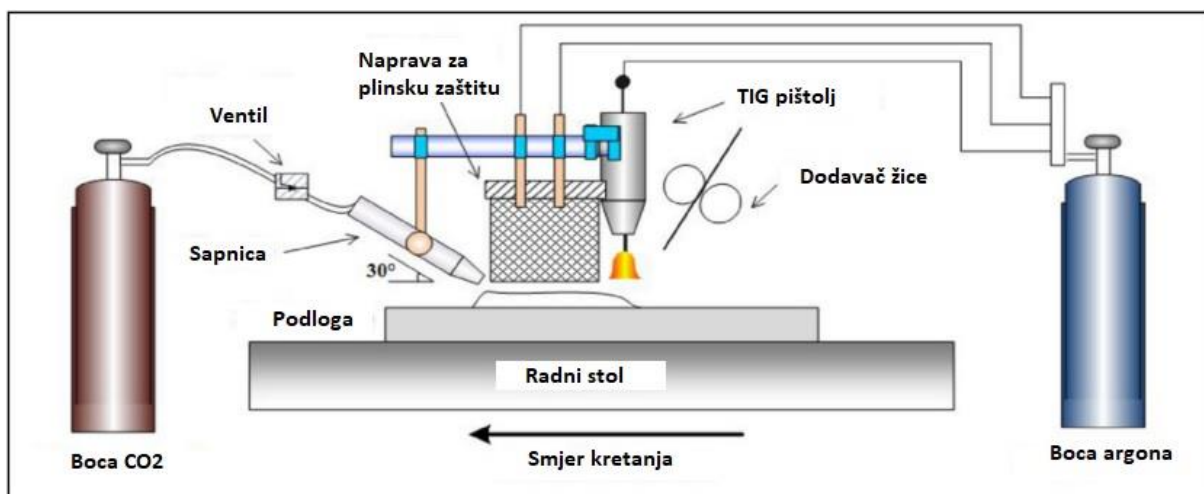
2015. godine aditivna se proizvodnja po ISO standardu definira kao proces spajanja materijala iz 3D modela, za razliku od subtraktivne proizvodnje, sloj po sloj. Iako je klasična aditivna proizvodnja u upotrebi od već ranijih godina, aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom intenzivno se počela proučavati tek nedavno. Mnogo je problema koji se pojavljuju s WAAM-om, najviše ih je vezanih uz odabir parametara i povećan unos topline u predformu tokom taloženja.

Da bi se doskočilo problemu, istražuju se različiti principi vođenja procesa i različiti načini upravljanja toplinom tokom procesa. Cilj novo istraživanih pristupa hlađenju je ubrzanje procesa taloženja, smanjenje unosa i akumulacije topline i u konačnici podizanje konkurentnosti na tržištu.

U ovom su radu opisani razni pristupi upravljanju toplinom od kojih su dva posebno odvojena i obrađena u eksperimentalnom dijelu rada. Iz predformi dobivenih u eksperimentalnom radu, izrezivani su uzorci koji su bili podvrgnuti ispitivanju udarne radnje loma, mjerenju tvrdoće i snimanju rendgenom.

2. OPĆENITO O WAAM TEHNOLOGIJI

Za razliku od subtraktivne proizvodnje, WAAM (eng. Wire arc additive manufacturing) tehnologija za konstrukciju komponente koristi pristup izrade sloj po sloj. To osigurava da se materijal odlaže samo tamo gdje je potreban, što rezultira boljom uštedom materijala i nižim troškovima. Zbog samog načina izrade i konstruiranja, pomoću WAAM tehnologije izrađuju se izradci koji su izgledom najbliži moguću izgledu nakon strojne obrade, što ubrzava proces strojne obrade i snižava troškove obrade i smanjuje količinu neiskorištenog materijala. WAAM se također može koristiti za reparaciju i popravke brojnih strojnih dijelova kao što su npr. mostovi, lopatice turbina, kalupa, matrica itd. Nanošenjem novog materijala na istrošenu površinu, istrošeni se dijelovi mogu popraviti WAAM-om. Štoviše, stopa taloženja koja se može postići WAAM-om u rasponu je od 50– 130 g/min u čemu uvelike prednjači pred aditivnim postupcima koji koriste snop elektrona ili laser kao izvorom energije (2-10 g/min). WAAM kao izvor topline koristi električni luk koji nastaje kroz aparat za zavarivanje. Ta se toplina koristi za taljenje žice i izradu zida. Odabirom pravih parametara zavarivanja i pogodne trajektorije gibanja može se proizvesti željeni oblik i veličina proizvoda. Putanja alata je dizajnirana i planirana na način da se veći volumenski oblici ili komponente s nešto manje kompliciranim oblikom mogu proizvesti po nižoj cijeni. Na Slici 1 nalazi se prikaz WAAM tehnologije pomoću TIG postupka. [1]

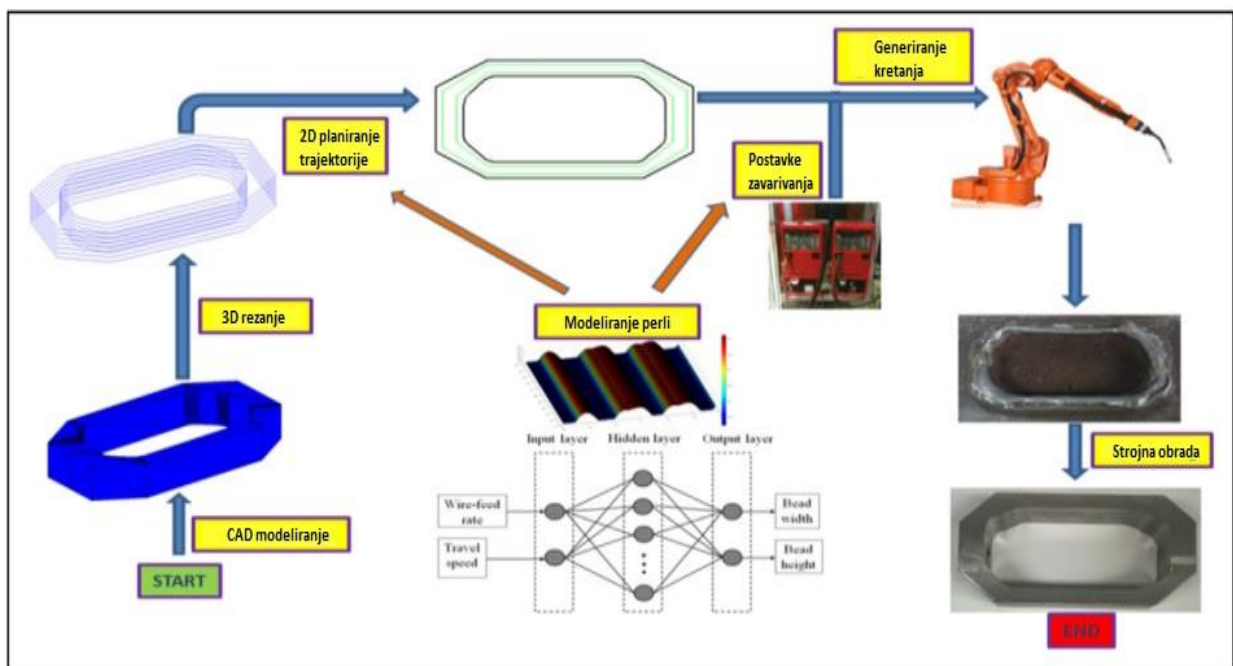


Slika 1. Shematski prikaz TIG WAAM sustava [1]

Testiranjem različitih postupaka zavarivanja i različitih materijala, došlo se do zaključka da je najbolji postupak zavarivanja za WAAM GMAW (eng. gas metal arc welding), a materijali koji se mogu koristiti zauzimaju širok spektar s te strane i nema previše ograničenja. [1]

2.1. Planiranje procesa kod WAAM tehnologije

Da bi se došlo do izrade konačnog oblika komponente, prvo je potrebno proći kroz razne procese. Sve počinje od CAD modeliranja i izrade 3D modela. Nakon toga, potrebno je isplanirati od koliko će se slojeva proizvod izraditi, u svrhu čim kvalitetnije strukture. Kad se to definira, potrebno je odrediti 2D putanju kretanja, parametre zavarivanja i potrebno je isprogramirati robotsku ruku. Na Slici 2 nalaze se koraci kod WAAM procesa. [2]



Slika 2. Koraci kod WAAM procesa [2]

2.2. Parametri zavarivanja kod WAAM-a

Da bi se izabrali specifični materijali kod WAAM procesa, potrebno je odabrati i odrediti glavne parametre kod zavarivanja, a to su struja zavarivanja i brzina žice, slobodni kraj žice, napon zavarivanja i brzina zavarivanja. Ti će parametri zajedno odrediti konačni, a bitan je i parametar unosa topline. Kao što je prikazano u jednadžbi 1.1, unos topline jednak je umnošku struje (I) i napona (V) kroz brzina zavarivanja (N). [3]

$$\text{Energija luka} = \frac{V \cdot I \cdot 60}{N} \quad [1.1]$$

Kod elektrolučnog procesa zavarivanja, struja je najvažniji parametar koji određuje brzinu izgaranja žice, penetraciju i geometriju zavara, a direktno je vezana uz brzinu žice. Povišenjem struje zavarivanja, povećavamo penetraciju i samim time kvalitetu samog zavarenog spoja. [2]

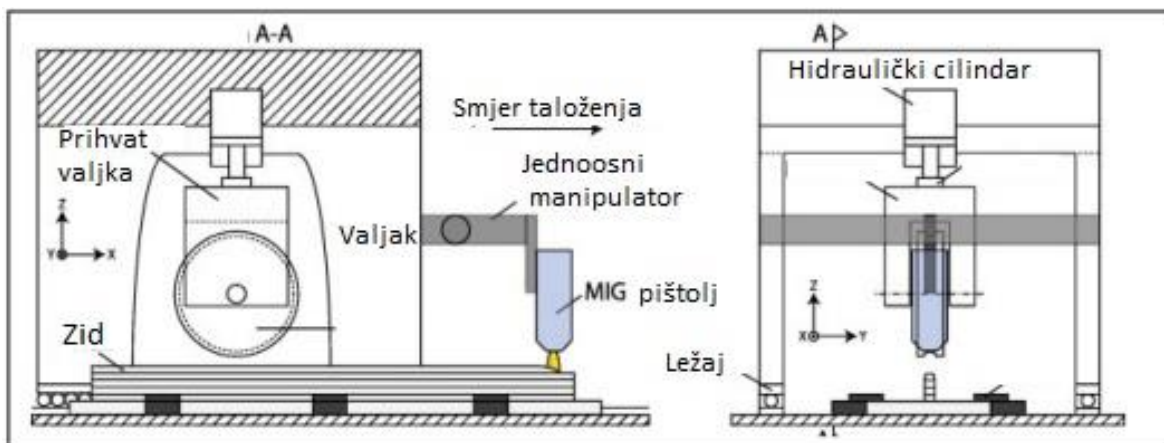
Brzina žice, kao i jakost struje, utječe na penetraciju i veličinu kupke tokom zavarivanja. Većom brzinom postizemo i veći depozit materijala, ali brzina zavarivanja mora biti pažljivo odabrana da bi svojstva zavara bila zadovoljavajuća. [3]

2.3. Izazovi i trenutni razvoj kod WAAM-a

Automobilska i avio industrija počele su davati prednost aditivnoj proizvodnji električnim lukom naspram konvencionalnih i subtraktivnih postupaka. Neki od glavnih problema zbog kojih se WAAM još uvijek ne koristi u velikim razmjerima su poroznost, tople pukotine, neravnost površine i zaostala naprezanja. U bliskoj budućnosti, uz tehnološki napredak i razvoj hardvera, WAAM će biti tehnologija koja najviše obećava. Da bi do toga došlo, sljedeće stvari moraju biti uvelike ublažene. [1]

2.3.1. Kontrola poroznosti

Poroznost je jedan od glavnih problema koji se pojavljuju kod WAAM-a. Zbog brzine izvođenja procesa, plin često ostaje zarobljen u talini i nastaje pora. Pore znatno narušavaju mehanička svojstva materijala pri naprezanju u određenom smjeru. Da bi se spriječilo nastajanje pora, zajedno s robotom za zavarivanje stavlja se i valjak koji sinkronizirano s robotom, tik nakon prolaza, valja sloj i istiskuje pore iz istog. Tim se postupkom rafinira struktura zrna i postižu se ujednačena mehanička svojstva. Postupak je prokazan na Slici 3. [4]



Slika 3. Spoj WAAM tehnologije i valjka [4]

3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Opći konstrukcijski čelici obuhvaćaju najširu grupu konstrukcijskih čelika, a najčešće se primjenjuju kod nosivih zavarenih konstrukcija velike mase. Ova skupina čelika najčešće se koristi za izradu mostova, dizalica, nosača, brodskih konstrukcija, dijelova vozila, opreme u industriji nafte i plina i dr. Konstrukcijski čelici u strojarstvu koriste se kod izrade karakterističnih konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. S obzirom na mehanička svojstva konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Pored toga, konstrukcijski čelici moraju biti otporni na trošenje i koroziju te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), zavarljivi, skloni hladnom oblikovanju (savijanje, štancanje, duboko vučenje) itd.

Općenito se konstrukcijski čelici mogu podijeliti na ugljične (ne legirane) i legirane. Konstrukcijski čelici (ne legirani i legirani koji sadrže $C < 0,60\%$) često se primjenjuju za izradu strojeva i uređaja koji rade u neagresivnim sredinama i pri temperaturama od -25 °C do 300 °C , kao i za nosive i građevinske konstrukcije [5].

Tablica 1. Svojstva konstrukcijskih čelika [5]

Naziv	Oznaka	Vrijednost
Modul elastičnosti	E	210 000 MPa
Modul posmaka	G	81 000 MPa
Poissonov broj	n	0,3
Koeficijent lin. topl rastezanja	α	$12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
Gustoća	γ	7850 kg/m^3

Tablica 2. Čvrstoća konstrukcijskih čelika [5]

Nominalna kvaliteta	Debljina elementa t, mm			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 100 mm	
	f _y , MPa	f _u , MPa	f _y , MPa	f _u , MPa
S235	235	360	215	340
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	490

4. UPRAVLJANJE UNOSOM TOPLINE KOD WAAM-A

Upravljanje toplinom ključni je faktor kod WAAM tehnologije zbog toga što je bitno umanjiti unos topline kako bi se nosilo s ograničenjima količine nataloženog materijala, problema s taloženjem i neravnomjernim mehaničkim svojstvima. Da bi se postigla proizvodnost visoke kvalitete, a s druge strane brzine i niskih troškova, to se područje kod WAAM-a intenzivno proučava. U svrhu smanjenja unosa topline, razvijeno je više pristupa ka upravljanju unosom topline. [6]

4.1. Klasifikacija tehnika upravljanja unosa topline

Kako se po raznim literaturama ne bi koristili različiti nazivi za iste stvari, među znanstvenicima je dogovorena klasifikacija postupaka upravljanja temperaturom. Temeljeći se na studijama i raznim istraživanjima, uz normalno upravljanje, definirane su još 3 tehnike upravljanja unosom topline, intrinzična, pasivna i aktivna tehnika upravljanja unosom topline. [7]

Normalan pristup upravljanja unosom topline temelji se na vremenu koje je potrebno da se nanese slojevi ohlade do željene temperature (tzv. međuprolazna temperatura) prije nego se krene s nanašanjem sljedećeg sloja. Osim vremena zadržavanja, tj. međuprolaznog vremena, temperatura međuprolaza posljedica je akumulirane topline unutar slojeva i kapaciteta odvođenja, te se ispostavilo da ta tehnika upravljanja unosa topline uvelike ovisi o svojstvima materijala i geometriji predforme. [7]

Intrinzični pristup upravljanja unosom topline temelji se na modifikaciji i upravljanju pomoću parametara zavarivanja. [7]

Pasivni pristup izvodi se na način da je samo platforma na koju se taloži materijal u doticaju s rashladnim medijem, najčešće vodom. Taj način uvelike se ograničen opsegom i veličinom predforme koju proizvodimo. [7]

Aktivni se pristup s druge strane temelji na naglašenom djelovanju rashladnog ili grijaćeg medija putem izravnog i konstantnog kontakta tokom izgradnje predforme. [7]

Na Slici 4. prikazani su načini upravljanja unosom topline.

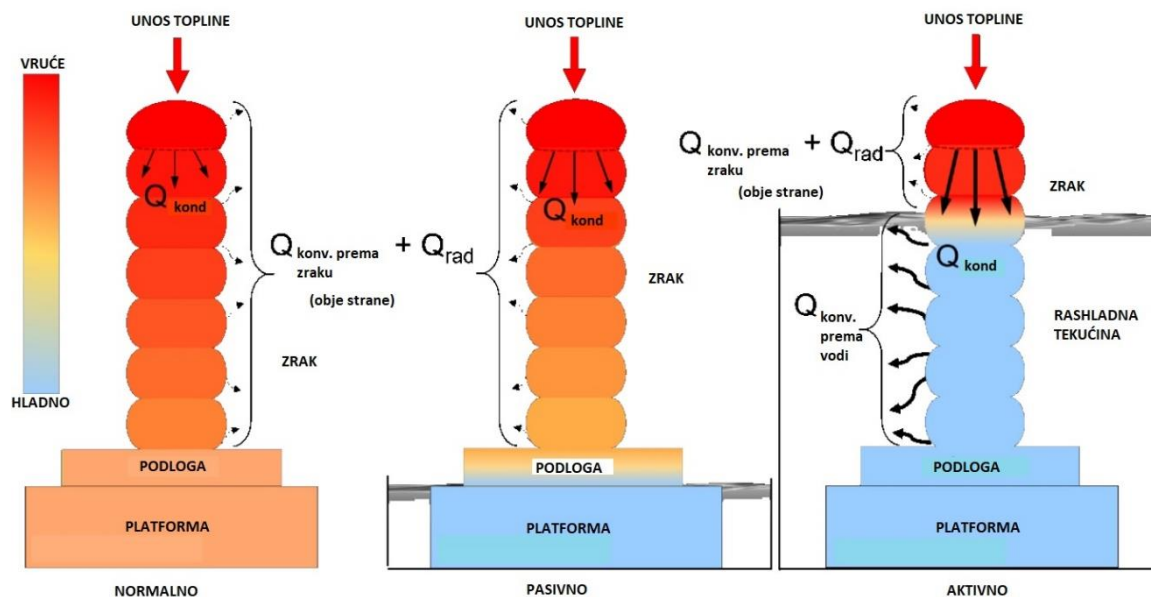
- **tip** - označava pristup upravljanja unosom topline o kojem se radi
- **podtip** - način na koji se toplina izvlači iz predforme
- **djelovanje** - način na koji traje hlađenje/grijanje
- **način upravljanja** - način/medij upravljanja procesom hlađenja/grijanja
- **aplikacija** - način na koji je izvor hlađenja/grijanja primijenjen na predformu
- **rezultat** - toplinski učinak procesa.

Načini upravljanja unosom topline				
	Normalno	Intrinzično	Pasivno	Aktivno
TIP:				
PODTIP:	Direktno	Direktno	Indirektno	Direktno/indirektno
DJELOVANJE:	Kontinuirano	Kontinuirano	Kontinuirano	Kontinuirano/intermitentno
NAČIN UPRAV:	Zrakom	Strujom i brzinom žice	Plin ili tekućina	Plin ili tekućina
APLIKACIJA:	Prirodna	Inherentan proces	Upravljana	Upravljana
REZULTAT:	Hlađenje	Hlađenje/grijanje	Hlađenje/grijanje	Hlađenje/grijanje

Slika 4. Klasifikacija pristupa upravljanja unosom topline [8]

5. KONCEPT AKTIVNOG HLAĐENJA

Postupak aktivnog hlađenja temelji se na aktivnom hlađenju predforme kontinuiranim i kontroliranim uranjanjem u rashladnu tekućinu unutar spremnika tijekom cijelog procesa izgradnje. Na slici 5. nalazi se shema procesa aktivnog hlađenja u usporedbi sa shemama normalnog i pasivnog hlađenja. [8]



Slika 5. Shema koncepta aktivnog hlađenja u usporedbi s normalnim i pasivnim načinom hlađenja; Q_{kond} predstavlja odvođenje topline kondukcijom dok Q_{konv} predstavlja odvođenje topline konvekcijom [8]

U tom slučaju brzina hlađenja ne uronjenog djela predforme i temperatura međuprolaza kontroliraju se razinom rashladne tekućine i izmjenom topline s djelom uronjenim u tekućinu. Konceptom aktivnog hlađenja osiguran je konstantan i izravan kontakt rashladnog medija sa svim slojevima predforme unutar radnog spremnika, osim par slojeva koje su neposredno prije nataloženi. Time se osigurava konstantno i neprestano odvođenje topline izravno iz predforme, čime se snižava međuprolazna temperatura i potencijalno smanjuje izražajna akumulacija topline u predformi tijekom izgradnje iste.

Za razliku od normalnog i pasivnog pristupa, implementacijom koncepta aktivnog hlađenja toplinski se tok neposredno ispod područja taloženja može smatrati trodimenzionalno uravnoteženim. Time bi se izazvalo skoro izotropno hlađenje (ujednačeno u svim smjerovima),

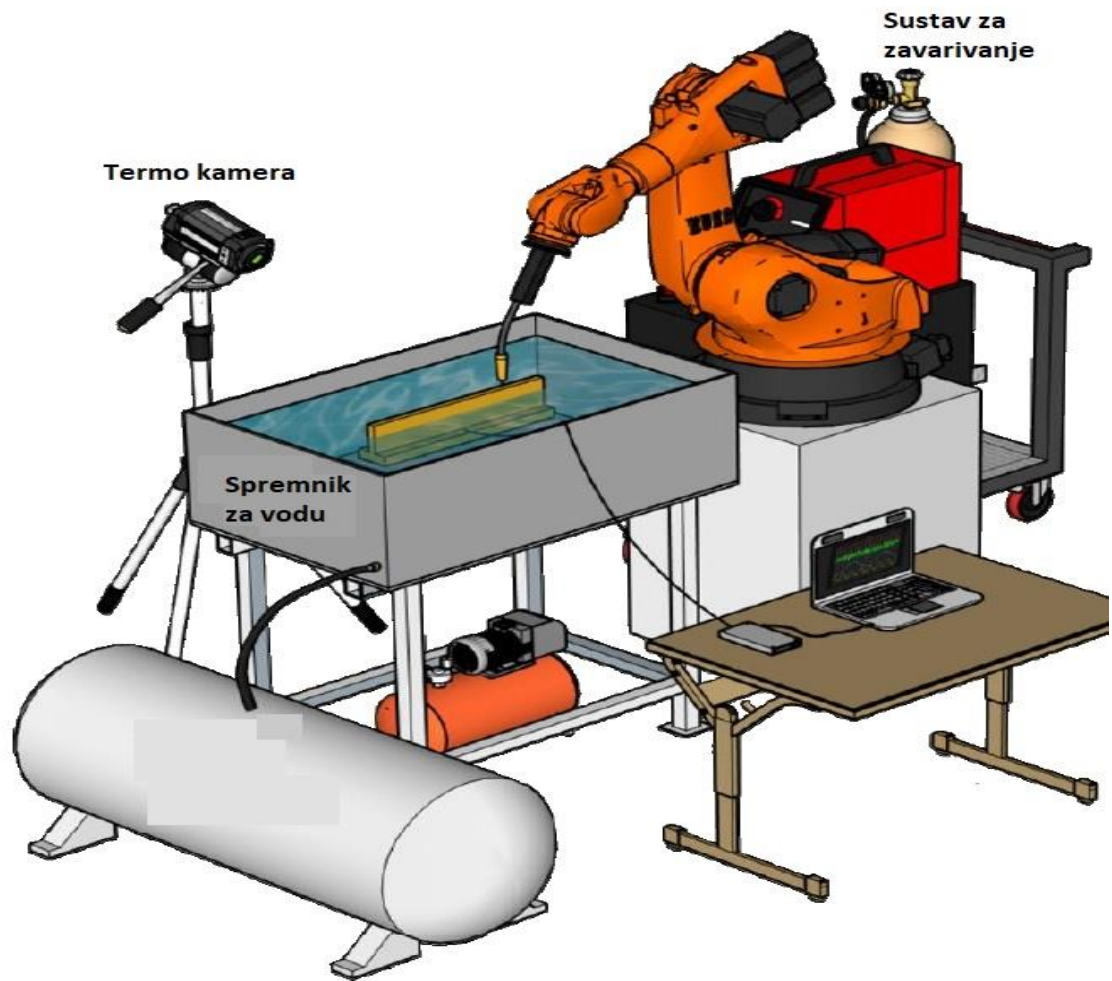
što bi moglo potaknuti bolju ravnotežu svojstava predforme u svim smjerovima rasta (okomitom i vodoravnom), bez obzira na konačnu visinu. [7]

Stoga se očekuje da će tehnika aktivnog hlađenja omogućiti ublažavanje nekoliko problema povezanih s akumulacijom topline kod WAAM-a. Bez obzira na geometriju koju treba izgraditi, mogle bi se povoljno regulirati značajke predforme u smislu mehaničkih značajki (mikrostruktura i veličina/tip formiranog zrna, rezultirajuća svojstva, razine zaostalih naprežanja itd.) i geometrijske kvalitete (pravilnost oblika slojeva, stupanj izobličenja itd.). Osim toga, predviđeni su potencijali za smanjenje razine oksidacije slojeva, pa čak i otrovnih emisija poput metalnih para, tipičnih za postupak taloženja električnim lukom. Osim povoljnog utjecaja na karakteristike predforme, implementacija tehnike aktivnog hlađenja omogućila bi očuvanje ili čak povećanje produktivnosti povećanjem stope izgradnje.

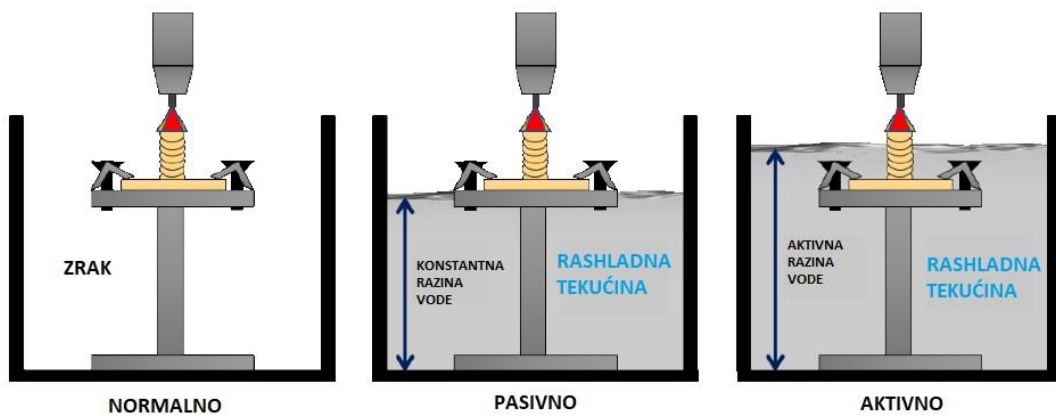
Promicanjem boljeg upravljanja toplinom kroz tehniku aktivnog hlađenja, bilo bi moguće spojiti veću proizvodnu produktivnost s poboljšanjem mehaničke i geometrijske kvalitete. Pošto je zamišljeno da se koncept upravljanja toplinom aktivnim hlađenjem oslanja na korištenje vode kao rashladne tekućine, aditivni su postupci privlačni u zelenoj proizvodnji. S obzirom na raznolikost potencijala, kako bi se potvrdio kao dokaz koncepta koji je uveden za upravljanje toplinom u WAAM-u, aspekti koncepta aktivnog hlađenja se dokazuju se na sljedeći način. [7]

5.1. Potvrda koncepta aktivnog hlađenja

Potvrda koncepta aktivnog hlađenja temelji se na tri pristupa hlađenju; normalnom, pasivnom i principu aktivnog hlađenja. Na Slici 6. nalazi se oprema pomoću koje se vršio eksperiment. Ista je izvedba korištena za sva tri načina izvođenja procesa. Kod normalnog pristupa je spremnik prazan, kod pasivnog je razina vode konstantna i u ravnini s podlogom, dok je kod principa aktivnog hlađenja razina vode sinkronizirana sa vertikalnim posmakom robota. Sva su tri principa prikazana na Slici 7. [7]



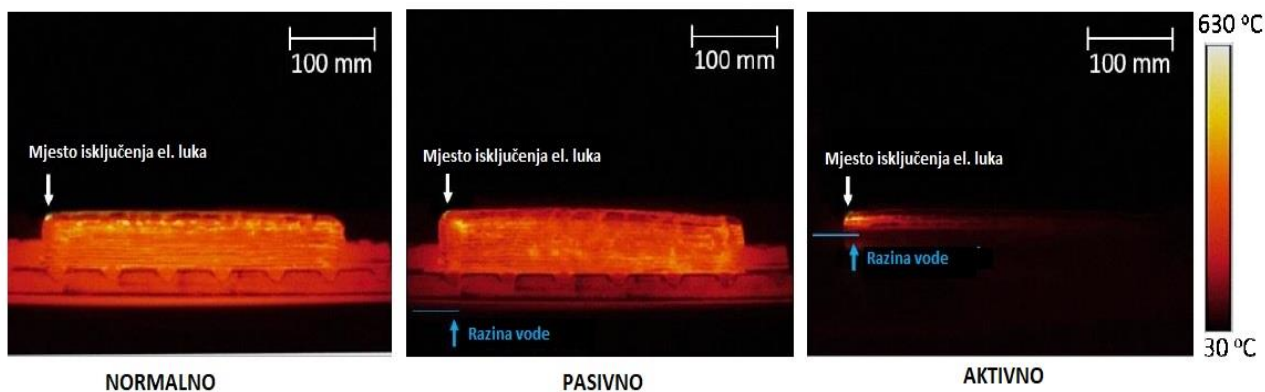
Slika 6. Eksperimentalna oprema za testiranje principa aktivnog hlađenja [7]



Slika 7. Shematski prikaz usporedbe različitih pristupa hlađenju [7]

5.1.1 Analiza temperaturnih promjena i ciklusa

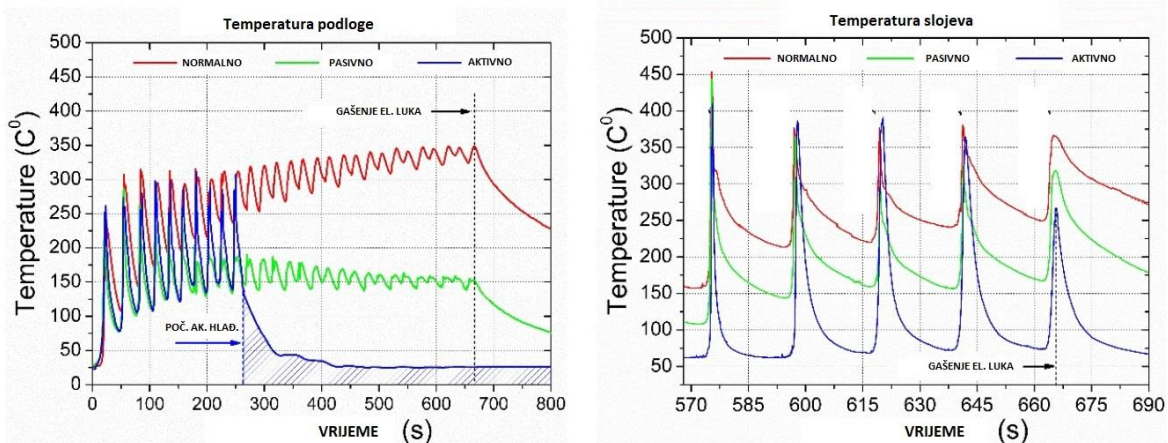
Netom nakon završenog taloženja, zidovi su uslikani termalnom kamerom. Rezultati su prikazani na Slici 8. [9]



Slika 8. Termogrami uhvaćeni tik nakon završetka taloženja [9]

Na slici je jasno vidljivo da je toplinsko polje predforme izrađene uz tehniku aktivnog hlađenja značajno drugačije i dokazuje da je aktivno hlađeno. Kod pasivnog i normalnog izvođenja procesa jasno je vidljivo da je cjelokupna predforma znatno više zagrijana nakon taloženja, što dokazuje da je tokom procesa akumulirala puno više topline generirane električnim lukom. [9]

Da bi se dobila kompletna slika procesa, posebnim se senzorom topline mjeri temperatura egzaktno jedne točke. Tim se mjerenjem dobiva povijest materijala u jednoj točki, nakon čega se definira toplinski ciklus u obliku dijagrama. U isto vrijeme, mjeri se temperatura podloge, da bi se uočilo djelovanje električnog luka na podlogu. Primjer rezultata mjerenja i dobiveni toplinski ciklusi nalaze se na Slici 9. [7]



Slika 9. Primjer toplinskog ciklusa dobivenog mjerenjem temperature u istoj točki predforme i podloge [7]

Kod pristupa normalnim hlađenjem, temperature podloge i sloja kontinuirano rastu kako se slojevi talože, što je dokaz povećane akumulacije topline. Na prikazanom slučaju, temperatura podloge kod svakog novog prolaza raste na otprilike konstantnu vrijednost s laganim trendom porasta i nakon toga teži dostizanju sobne temperature. Unos topline uravnotežen je kondukcijskim hlađenjem kroz predformu i podlogu te konvekcijom prema zraku i okolini. Nakon završetka procesa, temperatura počinje padati i težiti ka sobnoj temperaturi. [7]

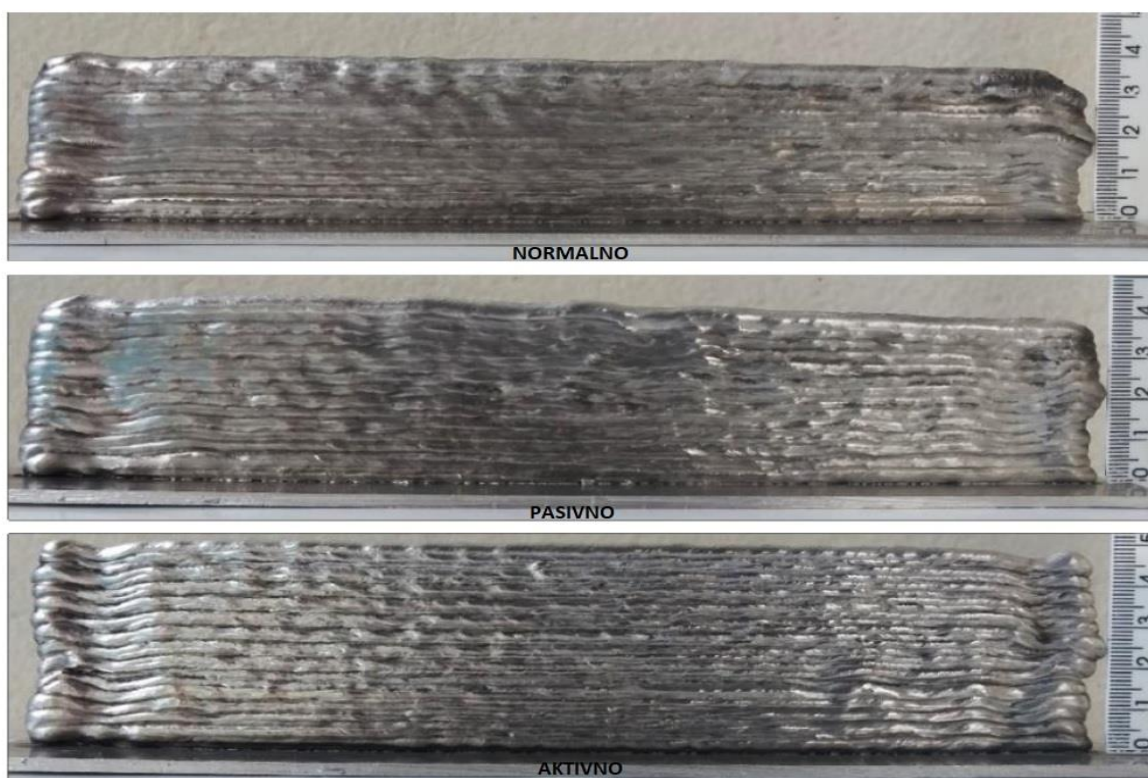
Kod pristupa pasivnog hlađenja primjećuje se isti opći trend. Međutim, temperatura podloge dostiže stabilnu razinu mnogo prije i značajno je niže vrijednosti, što ukazuje na manju akumulaciju topline. Vodljivost kroz predformu i podlogu pojačava se konvekcijom vode u spremniku i funkcionira kao hladnjak. Temperatura zida, s druge pak strane ima veću amplitudu zbog toga što se nakon udaljavanja električnog luka, zbog utjecaja vode na razini podloge, hladi na znatno nižu temperaturu, što dokazuje utjecaj vode na proces. [7]

Kod tehnike aktivnog hlađenja, prvih je nekoliko slojeva zapravo izvedenih pasivnim pristupom, što se jasno može iščitati iz grafa, a temperature se u tom području ponašaju gotovo identično. U trenutku kad električni luk postigne određenu visinu i kad se voda počne aktivno dizati, temperatura podloge u vrlo kratkom vremenu postiže temperaturu identičnu temperaturi vode. Bitna stvar koja se dešava nakon početka dizanja razine vode je ta da voda lagano počinje isparavati, što povećava rizik od pojavljivanja pora. Kod slučaja aktivnog hlađenja, temperatura

zida ima najveću amplitudu promjene temperature, ali je zbog pojačanog intenziteta hlađenja, graf na nižoj razini. [7]

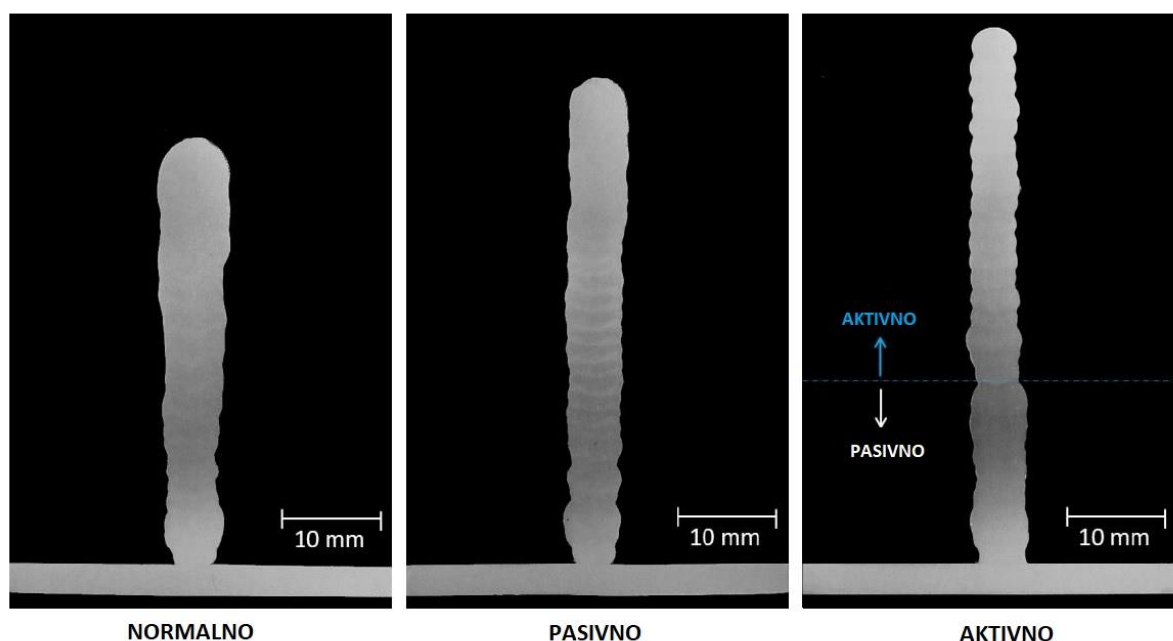
5.1.2. Utjecaj na kvalitetu geometrije predforme

Vrsta upravljanja toplinom ima velik utjecaj na konačnu geometriju predforme. Osim što utječe na sam oblik pojedinačnog prolaza i visinu gotove predforme, geometrija je na kraju procesa uvelike ravnomjernija kod aktivnog hlađenja, nego kod normalnog izvođenja procesa. Ta pojava pomaže kod kontinuiranosti procesa. U slučaju kad nema aktivnog hlađenja, da bi predforma bila pravilnija, proces ne smije biti kontinuiran, nego nakon svake linije trebamo imati zadržavanje, inače dolazi do prevelike akumulacije topline i predforma se doslovno razlijeva i gubi formu. S druge strane, kod aktivnog hlađenja, predforma je po visini jednolika i hlađenje nam omogućava kontinuiranost procesa i liši nas potrebe za među prolaznim zadržavanjem. Geometrija plošne površine vidljiva je na Slici 10. [7]



Slika 10. Prikaz geometrije predforme s obzirom na tehnike upravljanja toplinom [7]

Razlika u geometriji još je uočljivija kad se promatra poprečni presjek predforme. Također je vidljivo da je predforma nastala pod utjecajem aktivnog hlađenja uvelike pravilnija i viša od predformi nastalih ili normalnim ili pasivnim hlađenjem. Ta je pojava može se objasniti povećanjem rastaljene kupke uzrokovane povećanom akumulacijom topline zbog nedostatka odvođenja topline. Razlike u debljini i visini poprečnog presjeka predformi vidljiva je na Slici 11. [7].

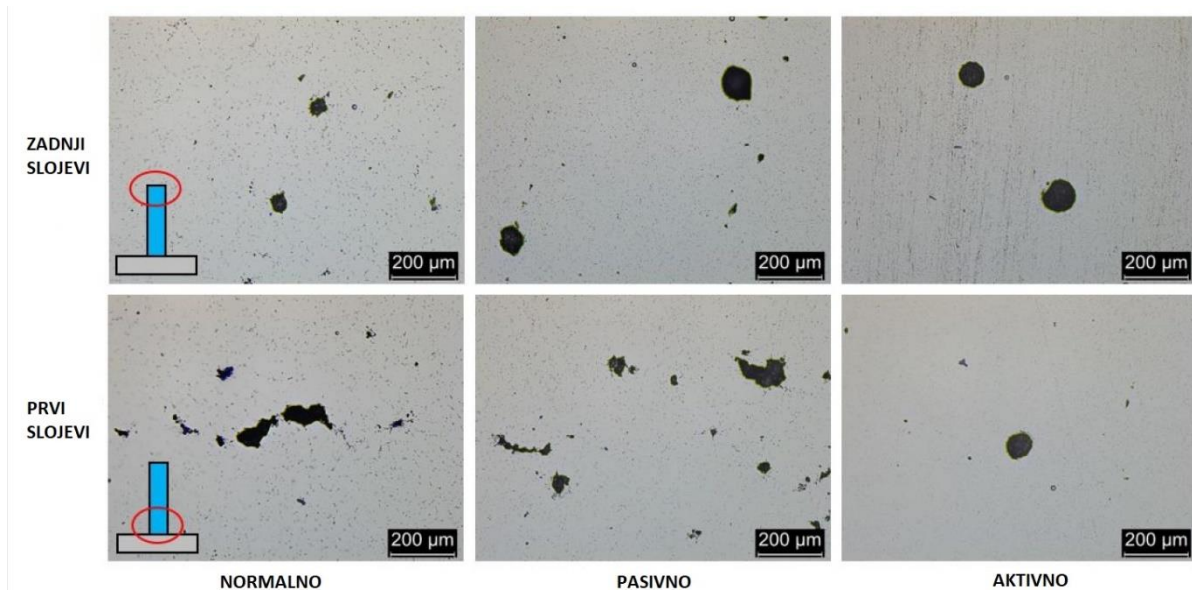


Slika 11. Prikaz utjecaja načina upravljanjem topline na poprečni presjek predforme [7]

5.1.3. Utjecaj upravljanja topline na poroznost aluminijske predforme

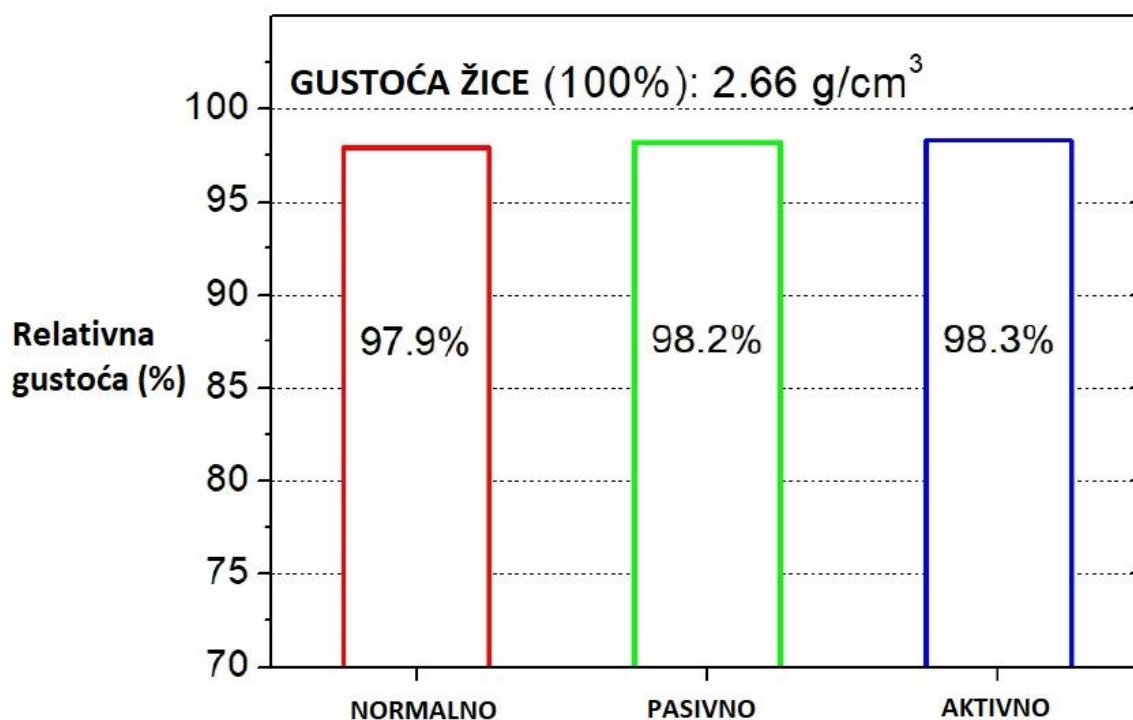
Nekolicinom je istraživanja dokazano da na pojavljivanje pora kod legura aluminija velik utjecaj ima akumulacija topline i brzina hlađenja metala. Zbog toga je na nekoliko predformi izrađenih WAAM-om s različitim principima upravljanja topline na poprečnim presjecima napravljena snimka mikrostrukture.

Iz snimaka su dobiveni rezultati na temelju kojih je zaključeno da način upravljanja toplinom utječe na količinu pora, tj. da je pojava pora za neki postotak intenzivnija kod normalnog upravljanja toplinom, dok je na mikrostrukturi predforme izrađene u uvjetima aktivnog hlađenja uočen manji postotak i manja veličina pora. Prikaz mikrostrukture nalazi se na Slici 12. [9]



Slika 12. Mikrostrukture poprečnih presjeka aluminijske predforme pod različitim uvjetima upravljanja toplinom [9]

Između ostalog, principi upravljanja toplinom utječu i na konačnu gustoću materijala, što je u vezi s količinom pora u predformi. Slika 13 prikazuje graf relativne gustoće legure aluminija u usporedbi sa sto postotnom gustoćom koja iznosi 2.66 g/cm^3 . [10]

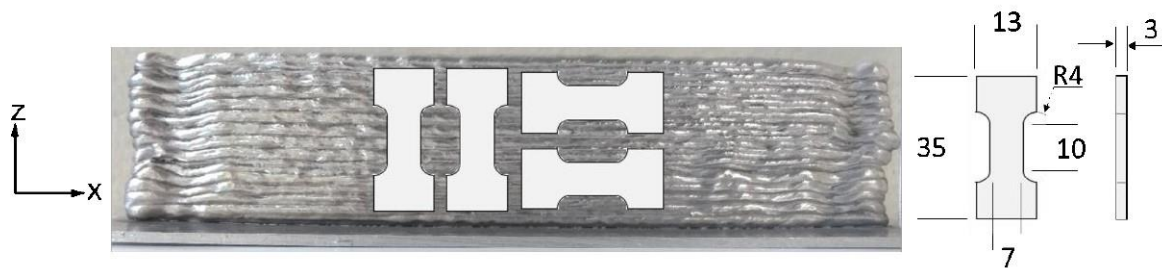


Slika 13. Graf relativnih gustoća legure aluminija s obzirom na princip upravljanja toplinom [10]

Iz ovih se rezultata zaključuje da korištenje vode kao medija za aktivno hlađenje ne povećava rizik od nastajanja pora izazvanih vodikom. Na tu pojavu utječe tlak koji stvara strujanje zaštitnog plina. [10]

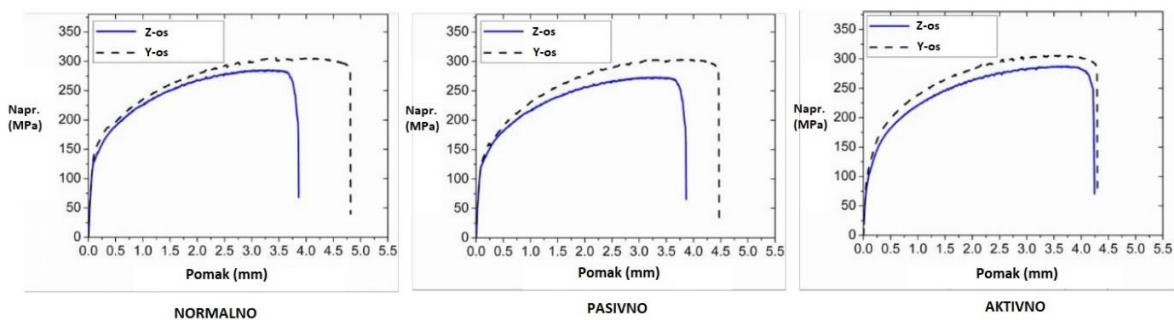
5.1.4. Utjecaj upravljanja toplinom na mehanička svojstva aluminijske predforme

Istraživanja su pokazala da upravljanje toplinom zamjetno utječe na mehanička svojstva predformi izrađenih WAAM-om. Da bi se dokazao utjecaj na predforme, potrebno je iz pojedine predforme izvaditi uzorak, tj. epruvetu. U ovom su primjeru izvađene 4 epruvete po predformi. Dvije u Z-osi i dvije u X-osi, da bi se zornije prikazao utjecaj u obje osi, uzdužnoj i vertikalnoj. Slika 14 prikazuje način na koji se epruvete izrezuju iz uzorka [7].



Slika 14. Mjesto vađenja uzoraka iz predforme i dimenzije istih [7]

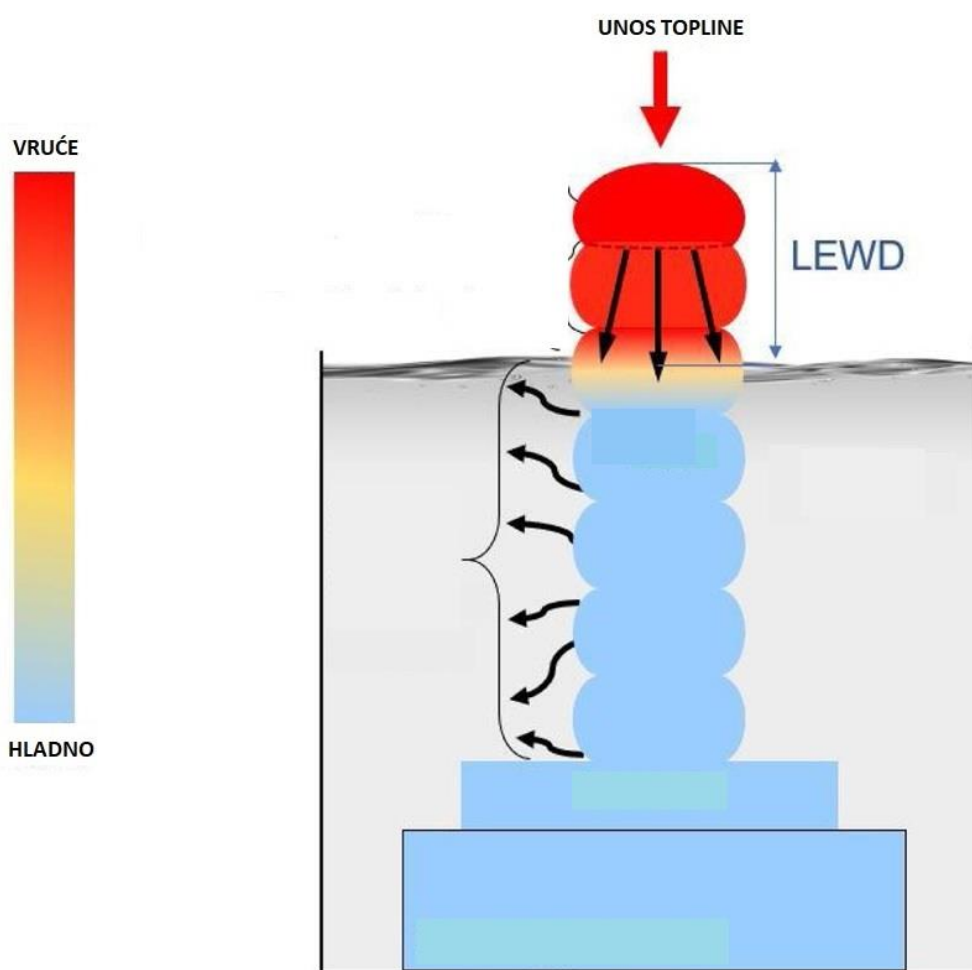
Nakon vlačnih ispitivanja rezultati su pokazali da je vlačna čvrstoća uzoraka jednaka neovisno o načinu upravljanja toplinom i iznosi u prosjeku od 250 MPa do 300 MPa. Za razliku od čvrstoće koja je jednaka, duktilnost se pokazala značajno različitom u svakom od uzoraka. Kod uzoraka u uvjetima normalnog i pasivnog hlađenja pojavila se velika razlika između duktilnosti okomitog i uzdužnog smjera, što u određenoj mjeri ukazuje na anizotropiju koja je uzrokovana povećanom akumulacijom topline kod tih oblika upravljanja toplinom. S druge strane, tehnika aktivnog hlađenja jasno izjednačava mjeru duktilnosti koja se veže uz smjer rasta predforme, sugerirajući na ublažavanje postojanja anizotropije, što bi moglo dovesti do superiornijih mehaničkih svojstava. Razlika između ispitivanja prikazana je na slici 15. [7]



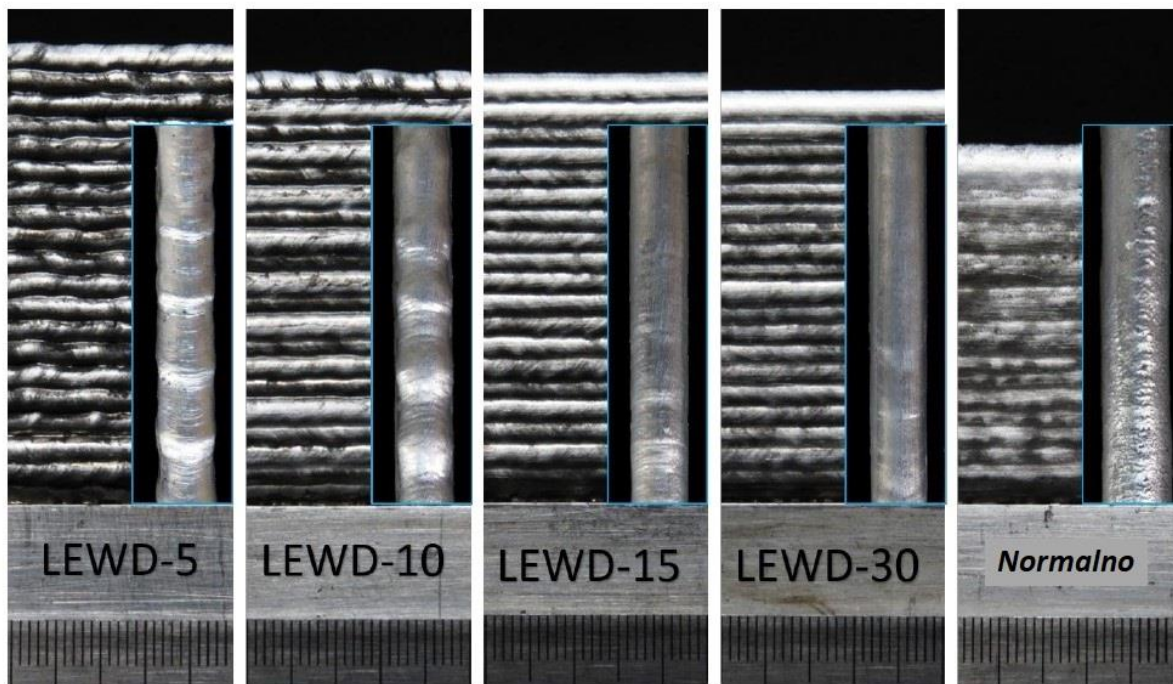
Slika 15. Utjecaj upravljanja toplinom na naprezanje i istežanje u uzdužnoj i vertikalnoj osi [7]

5.2. Utjecaj udaljenosti između vrha predforme i razine vode (eng. layer enge to water distance – LEWD) na izvedbu predforme

LEWD (prikazano na slici 16.) vizualno i geometrijski utječe na formu predformi. Valovitost i hrapavost predformi pojave su usko povezane s LEWD-om. Mala udaljenost od vode slična valovitošću i hrapavošću slična je kao kod normalnog upravljanja toplinom. Utjecaj udaljenosti od razine vode prikazan je na Slici 17. [7]

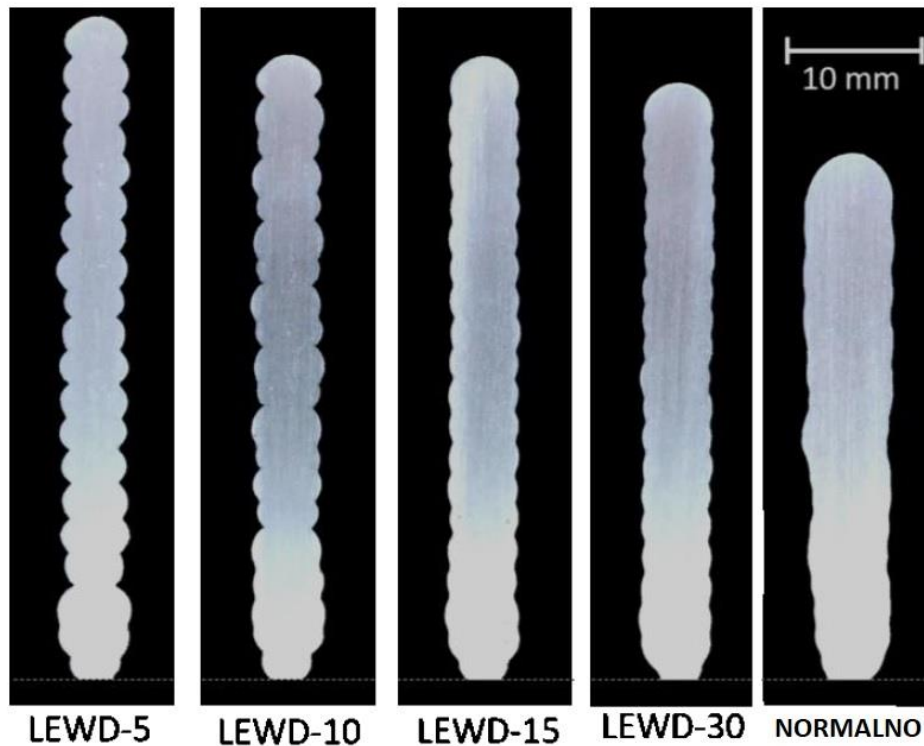


Slika 16. Udaljenost od razine vode do vrha predforme (LEWD) [7]



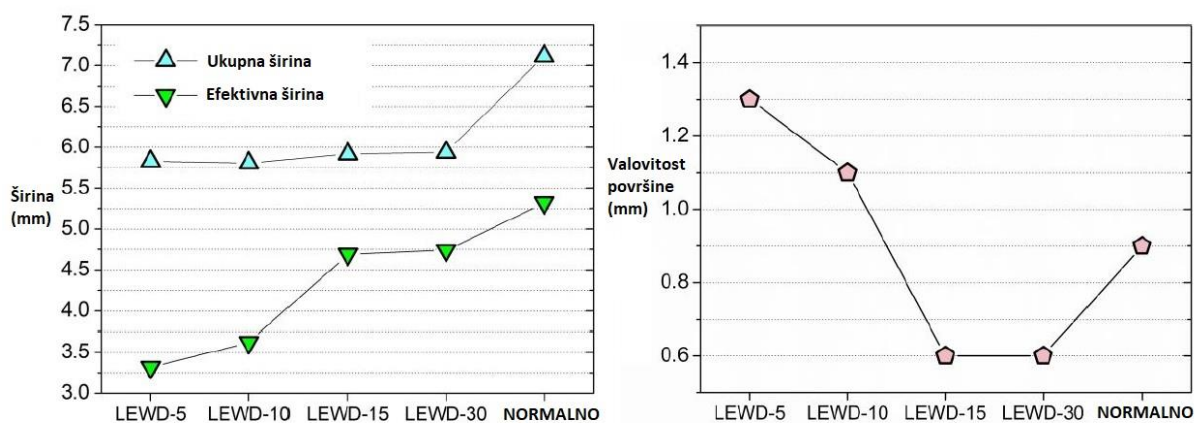
Slika 17. Utjecaj LEWD-a na geometriju i hrapavost površine predforme [7]

Predforme izrađene tehnikom aktivnog hlađenja više i vitkije od onih proizvedenih normalnim pristupom. Također, može se primijetiti da su pri normalnom pristupu predforme nepravilnije i imaju tendenciju širenja po visini. Takvo ponašanje povezano je s povećanjem rastaljene kupke zbog akumulacije topline i prekomjerne oksidacije. Bez obzira na valovitost površine, širina predformi izrađenih uz utjecaj aktivnog hlađenja gotovo je konstantna po visini. Ta se svojstva mogu vidjeti na Slici 18. [7]



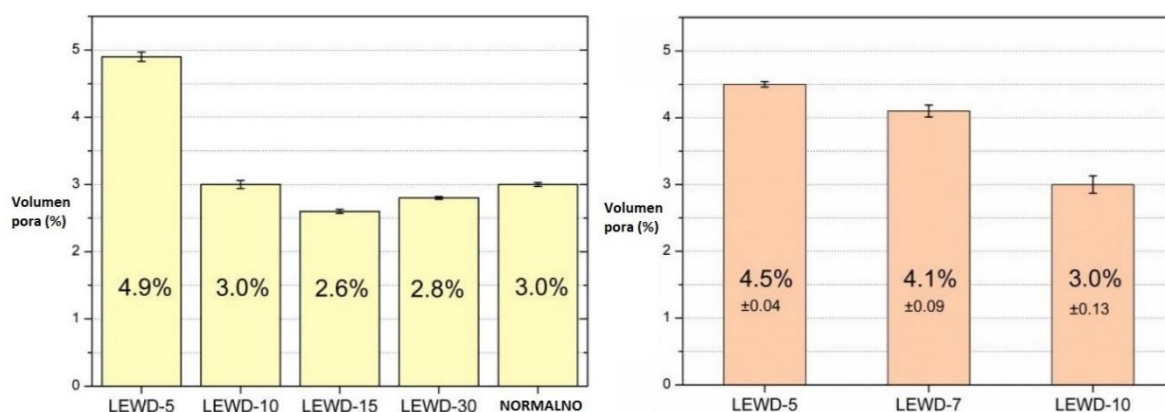
Slika 18. Utjecaj LEWD-a na izgled poprečnog presjeka predforme [7]

Kao što je vidljivo na slici 18, promjena LEWD-a značajno ne utječe na vanjsku širinu predforme, ali značajno utječe na efektivnu širinu. Istraživanja su pokazala da je najbolje LEWD držati od 15 do 30 mm i da će tada širina predforme biti najefektivnija. Utjecaj LEWD-a na efektivnu širinu i valovitost predforme prikazan je na Slici 19. [7]



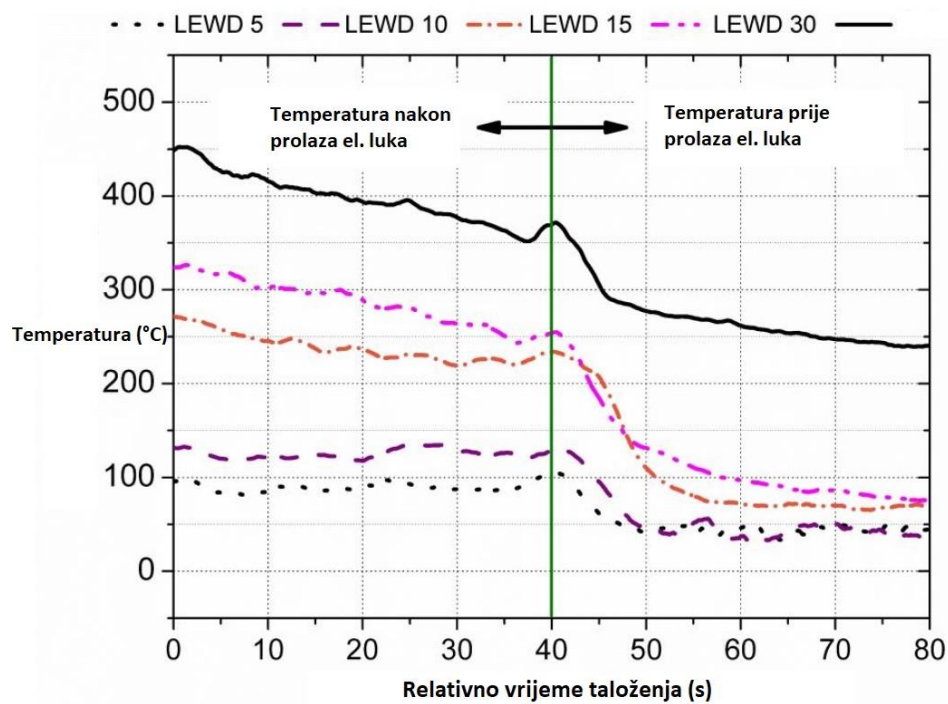
Slika 19. Utjecaj LEWD-a na valovitost i efektivnu širinu predforme [7]

LEWD ima velik utjecaj na nastajanje pora u samoj predformi. Na manjim udaljenostima od razine vode, dolazi do pojačanog pojavljivanja pora, što se može pripisati prije spomenutom utjecaju pare nastale od isparavanja vode zbog povišene temperature. Povećana pojava pora također je izražena kod normalnog principa upravljanja toplotom, gdje do nastajanja pora dolazi ili zbog većih dimenzija rastaljene kupke, pa time i mogućnosti veće adsorpcije vodika, ili zbog povećane akumulacije topline. Utjecaj LEWD-a na postotno volumen pora u predformi prikazan je na Slici 20. [11]



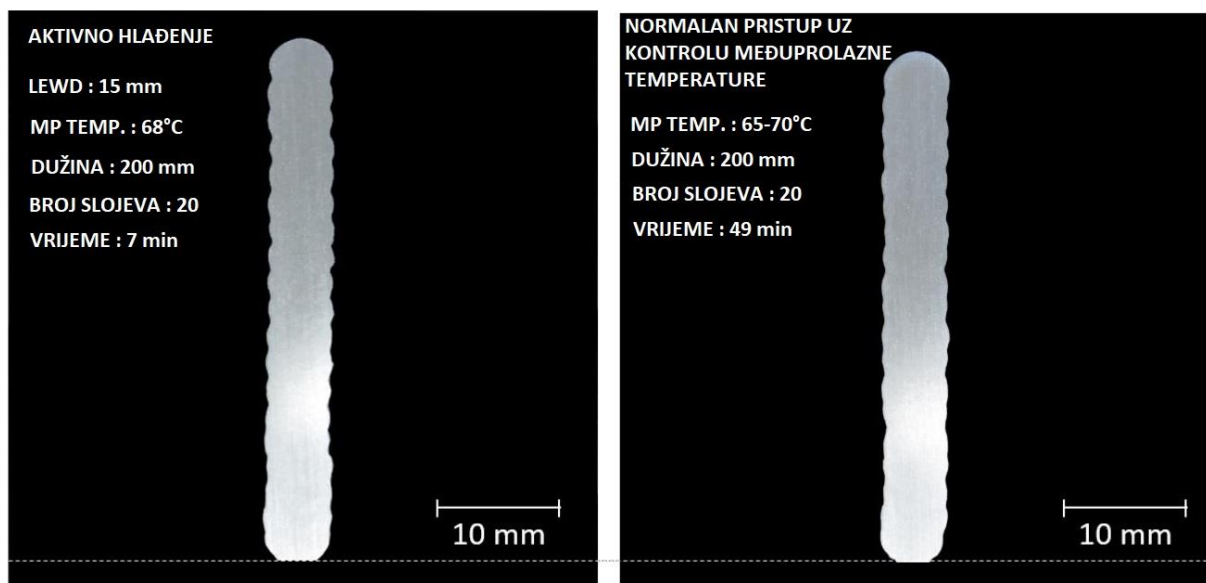
Slika 20. Utjecaj LEWD-a postotni volumen pora u predformi [11]

Da bi se zorno prikazao utjecaj aktivnog hlađenja i LEWD-a na temperaturu tokom samog taloženja, na pištolj se stavlja prateći i vodeći pirometar kojim se mjeri temperatura iza luka u prvom prolazu i temperatura ispred luka u povratnom prolazu (prolazi su iznad 10. sloja). Rezultati su se pokazali očekivanima, i u slučaju manje udaljenosti od vode, hlađenje je puno intenzivnije nego kod principa normalnog upravljanja toplotom i međuprolazna je temperatura znatno niža. Što je udaljenost do vode manja, to je potrebno manje vremena da se sustav stabilizira. Rezultati su prikazani na slici 21. [7]



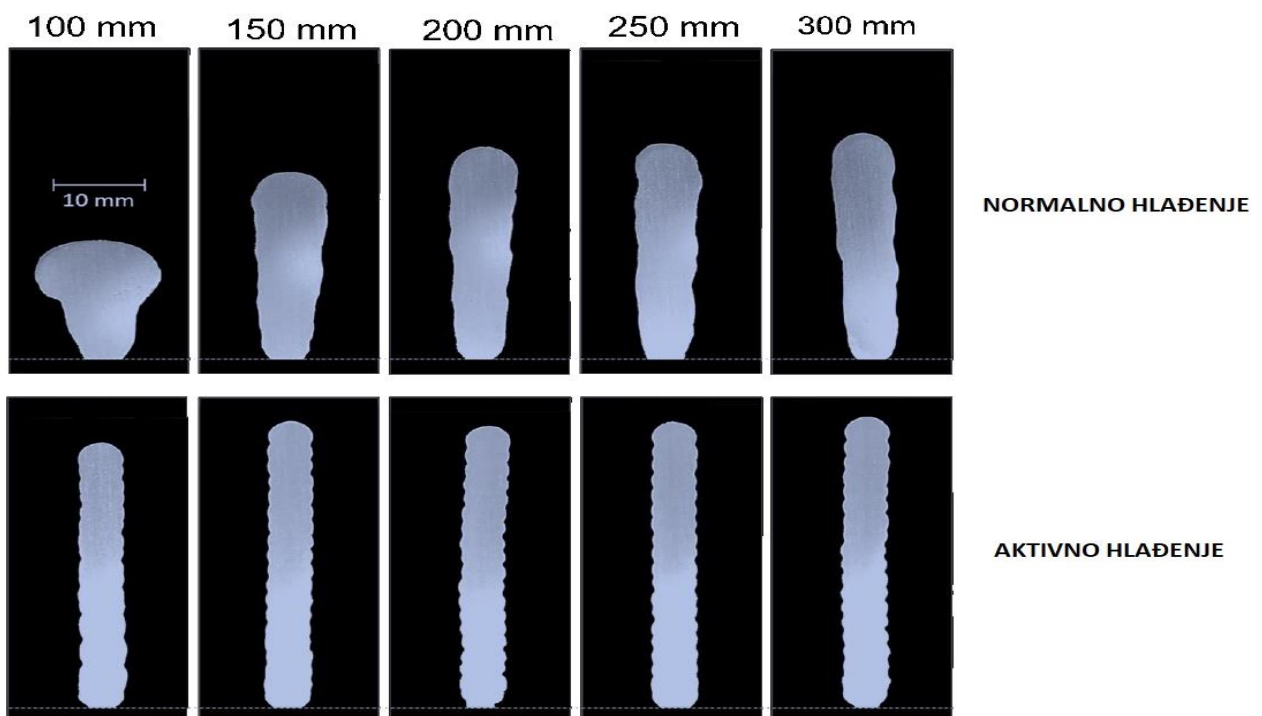
Slika 21. Utjecaj LEWD-a na međuprolaznu temperaturu [7]

Utjecajem LEWD-a na međuprolaznu temperaturu značajno možemo ubrzati proces taloženja i podići ga na višu razinu. Na Slici 22. prikazano je kako uz istu međuprolaznu temperaturu, ali korištenjem aktivnog hlađenja možemo proces ubrzati i do 7 puta, uz to da je važno imati na umu da kod normalnog pristupa imamo puno duže izlaganje visokim temperaturama čime dolazi do štetnih posljedica, primjerice prekomjerne oksidacije. [7]

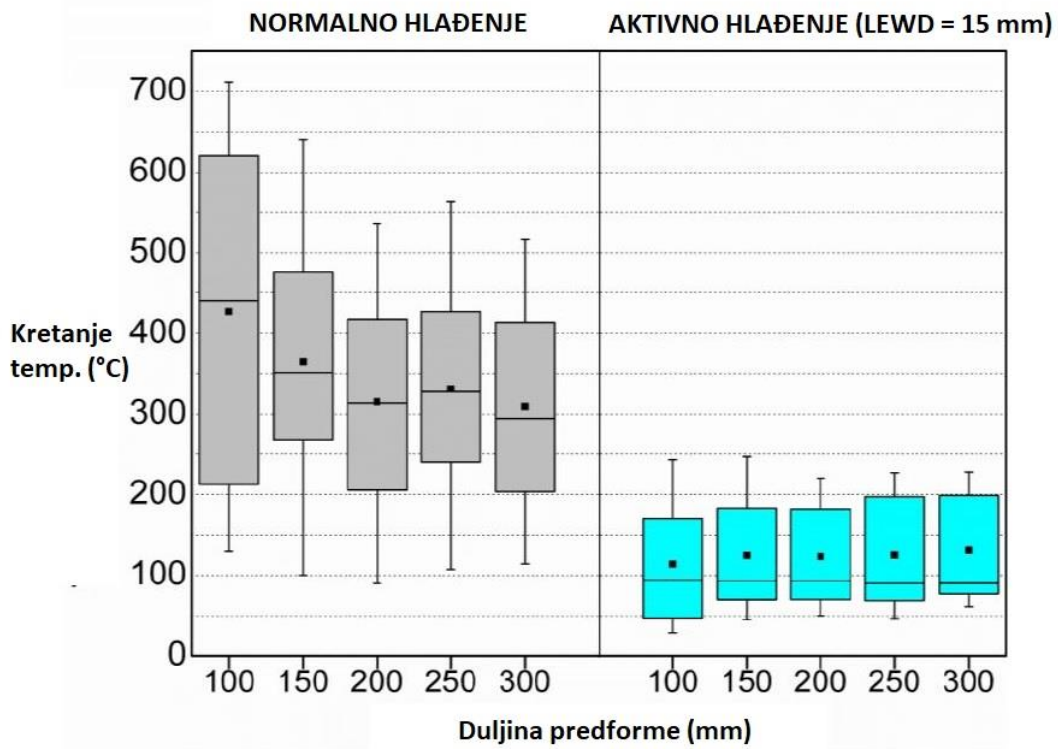


Slika 22. Utjecaj LEWD-a na vrijeme trajanja procesa taloženja [7]

Kako bi se simulirale različite razine koncentracije taloženja, izrađeni su zidovi različitih duljina s normalnim pristupom hlađenju i aktivnim hlađenjem, s time da su parametri, vremena trajanja i ukupan broj slojeva identični. Kod normalnog hlađenja na slici 23 se jasno može vidjeti kako visoka akumulacija topline utječe na poprečni presjek predforme. Za stijenke kraće od 100 mm, rastaljena kupka se urušava zbog svog vrlo velikog volumena. Kako se duljina zidova povećava, oni postaju viši i vitki zbog dužeg vremena taloženja i dužeg vremena hlađenja dok se taloženja ne završe. Nasuprot tome, predforme taložene uz primjenu tehnike aktivnog hlađenja bile su prilično slične u usporedbi jednih s drugima za sve testirane duljine. Osim geometrije, predforme taložene uz primjenu tehnike aktivnog hlađenja pokazale su sličnu raspodjelu temperaturnih podataka kao što je prikazano na slici 24, iz čega se može zaključiti da ovaj pristup upravljanja toplinom može zadržati slične brzine hlađenja i toplinsku povijest neovisno o geometriji i obliku predforme. Raspodjela podataka o temperaturi normalno hlađene predforme, također prikazana na slici 24, potvrđuje da što je veća koncentracija taloženja to je predforma toplija. [7]



Slika 23. Utjecaj koncentracije taloženja na geometriju predforme u uvjetima normalnog i aktivnog hlađenja [7]



Slika 24. Usporedba temperatura kod koncentriranog taloženja predforme u uvjetima normalnog i aktivnog hlađenja [7]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela rada dokazivanje je utjecaja aktivnog hlađenja na geometriju predforme, žilavost, tvrdoću i općenito mehaničkih svojstava. Dodatni materijal koji se koristio za izradu predforme jest EZ-SG2 žica koja je svojstvima slična konstrukcijskom čeliku S355. Konačni cilj diplomskog rada je usporedba eksperimentalnog dijela s dosadašnjim istraživanjima i eksperimentima, te utvrđivanje djelovanja aktivnog hlađenja na strukturu i mehanička svojstva dobivenog materijala.

6.1 Opis eksperimenta

Eksperimentalni je dio proveden u više dijelova, a to su:

- konstrukcija i testiranje naprave za usis vode i pare
- izrada i pripajanje poligona za navarivanje predforme
- izrada dvije predforme pod različitim uvjetima hlađenja
- izrezivanje zidova iz predforme za daljnju izradu makroizbrusaka, uzoraka za rendgen i uzoraka za ispitivanje udarne radnje loma
- izrezivanje svih potrebnih uzoraka, strojna obrada zidova za rendgen i epruveta za ispitivanje udarne radnje loma te izrada V-utora
- mjerenje tvrdoće makroizbrusaka
- ispitivanje udarne radnje loma
- rendgen zidova.

Iz uočenih problema do kojih je dolazilo kod već prije izvedenih istraživanja i eksperimenata, konstruirana je naprava koja je trebala anulirati ili barem smanjiti do tada viđene probleme, pogotovo kod aktivnog hlađenja s malim LEWD-om. Naprava je tako izvedena da se instalira na sam pištolj i trebala bi zajedno s njim putovati tokom taloženja i usisavati paru i višak rashladne tekućine da bi se održavao konstantan LEWD.

Priprema poligona na koji se taložila predforma odvijala se kao i samo taloženje predforme. Da bi se taloženje odvijalo od početka što bolje i kvalitetnije, poligon je izrađen sa istim parametrima i identičnom trajektorijom gibanja robota. Time smo dobili savršenu podlogu za izradu predforme. Poligon se potom pričvrstio za podlogu i izbrusio da bi dobili najbolju moguću pripremu za izradu prvog, a i ostalih slojeva.

Kad je podloga bila spremna za početak taloženja, testirali smo napravu i funkcionalnost iste. Testiranje se vršilo bez zavarivanja da bi se uvidjeli problemi kod gibanja naprave zajedno s pištoljem.

Nakon testiranja naprave za usis pare i viška tekućine izrađene su dvije predforme, na istom poligonu, sa istim parametrima ali drugačijim pristupom upravljanju toplinom. Kod prve je predforme princip upravljanja toplinom bio normalan, tj. prirodnim se putem predforma hladila i rashladni medij bio je zrak. Druga se pak predforma izvodila pod uvjetima aktivnog hlađenja i održavao se konstantan LEWD.

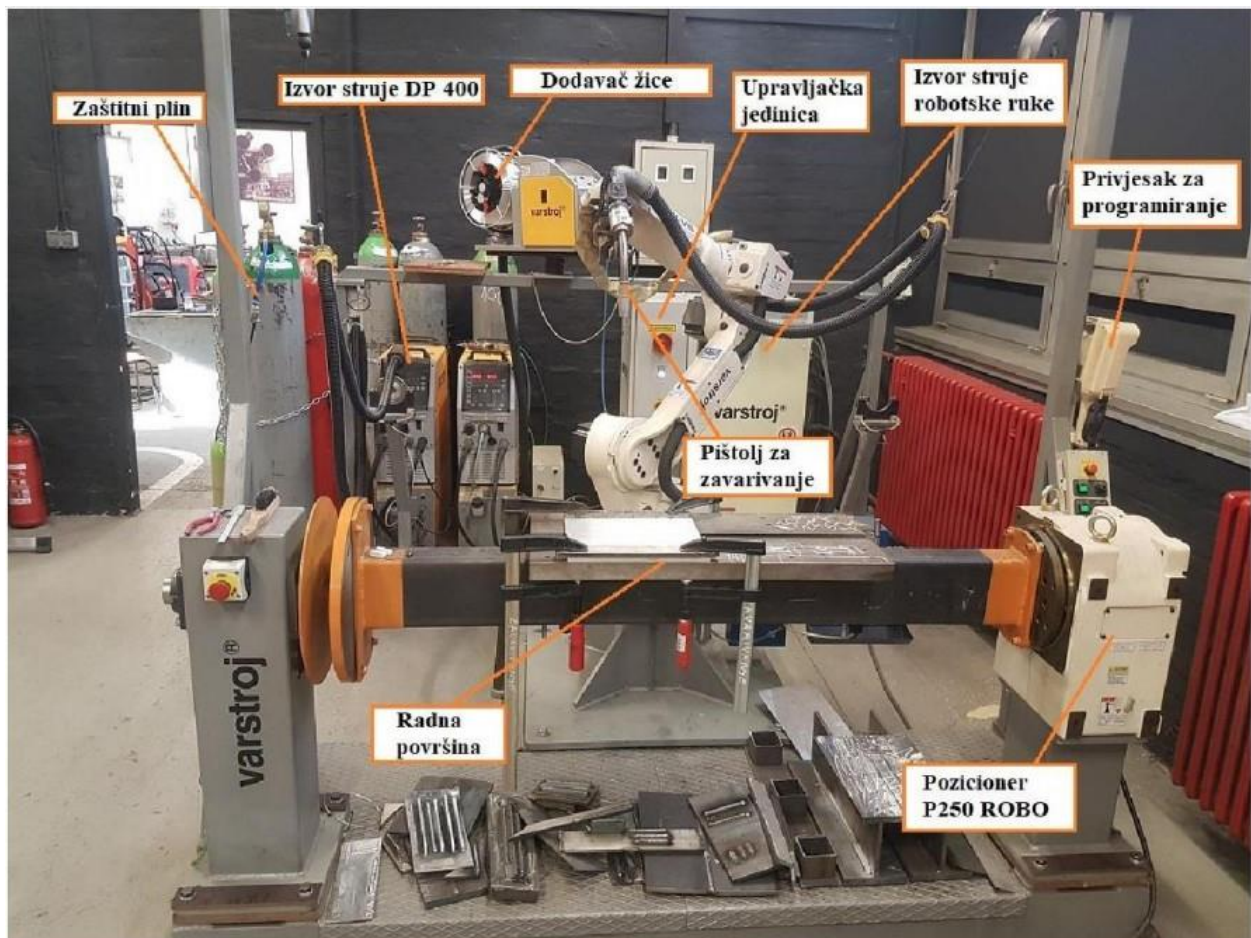
Kad s predforme bile gotove, iz njih su se izrezala po dva zida, a iz zidova po jedan komad materijala za izradu makroizbrusaka. Ostatak materijala kasnije je iskorišten za izradu uzoraka potrebnih za ispitivanje udarne radnje loma i ispitivanje i analizu parametara površine. Po jedan veći dio iz zida svake od predformi strojno je obrađen i korišten kasnije za rendgen. Izrezani uzorci strojno su obrađeni u epruvete, u kojima je izrađen V-utor i izvršeno ispitivanje udarne radnje loma.

6.2. Oprema za zavarivanje

Za izradu zidova korištena je robotska stanica Almega OTC AX V6. Glavni dijelovi robota su robotska ruka sa 6 stupnjeva slobode gibanja koja na sebi ima pištolj za zavarivanje te privjesak za on-line programiranje robota. Programiranje se vrši definiranjem putanji gibanja te bilježenjem željenih pozicija zavarivačkog pištolja.

Uz navedena dva dijela, ovaj robot sadrži i shock senzor koji služi za sprečavanje značajnijih oštećenja ako bi došlo do kolizije robota s nekim od elemenata iz okoline, uređaje za rezanje žice, čišćenje sapnice te nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica. Tu je dodatni izvor struje za

TIG postupak zavarivanja te elektrodučni senzor AX-AR. Slika 25 prikazuje spomenuti robot te su na slici navedeni svi njegovi dijelovi.



Slika 25. Robotska stanica Almega OTC AX V6 [12]

Za izradu uzoraka korišten je izvor struje za zavarivanje OTC Daihen Wellbee 500L, a u tablici 3 prikazane su njegove karakteristike. Ovaj izvor struje omogućuje konvencionalno i impulsno MIG i MAG zavarivanje te REL zavarivanje obloženim elektrodama.

Tablica 3. Karakteristike izvora OTC Daihen Wellbee 500L

IZVOR STRUJE		OTC Daihen Wellbee 500L
Priključni napon, V/Hz		3 – 400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 – 500
Područje napona zavarivanja, V		12 - 45
Intermitencija, A	100 %	387
	60 %	500
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,6
Masa, kg		83
Dimenzije (D × Š × V), mm		710 × 395 × 762

6.2.1. Dodatni materijal

Za izradu uzorka korištena je puna žica S355, poprečnog presjeka 1,2 mm. Posjeduje odlična mehanička i antikorozivna svojstva zbog kojih se uglavnom koristi u brodogradnji, automobilskoj i željezničkoj industriji. Također, zavarljivost ove legure je vrlo dobra, a zavar je bez poroznosti ako je pravilno izveden. Kemijski sastav konstrukcijskog čelika S355 nalazi se u Tablici 4.

Tablica 4. Kemijski sastav konstrukcijskog čelika S355 [12]

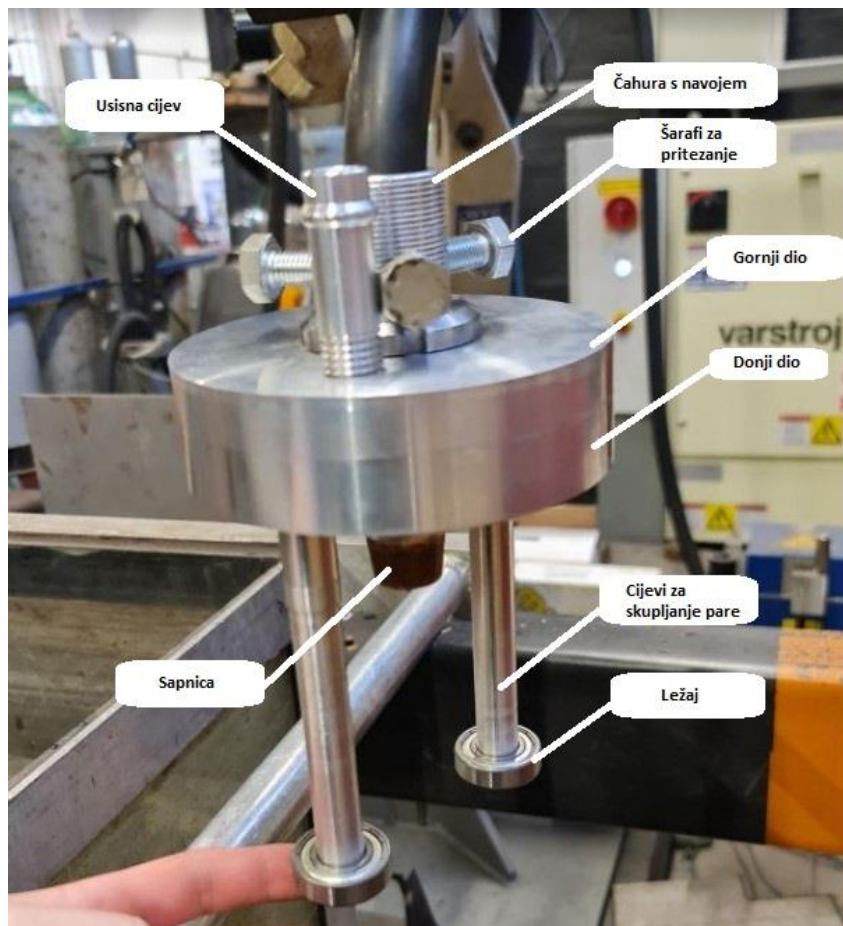
S355	Maseni udio elemenata, %							
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Al
	0,15-0,20	0,30	1,6	0,025	0,015	0,010	0,20	0,015-0,080

6.2.2. Zaštitni plin

Plin korišten za zavarivanje je bio u postotku 82% Ar i 18% CO₂. Navedena se mješavina koristi za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Argon, koji u većem postotku čini navedenu plinsku mješavinu je bezbojni plemeniti plin bez mirisa, te je gušći od zraka. Najvažnije mu je svojstvo inertnost, zbog čega se svrstava u red idealnih zaštitnih plinova.

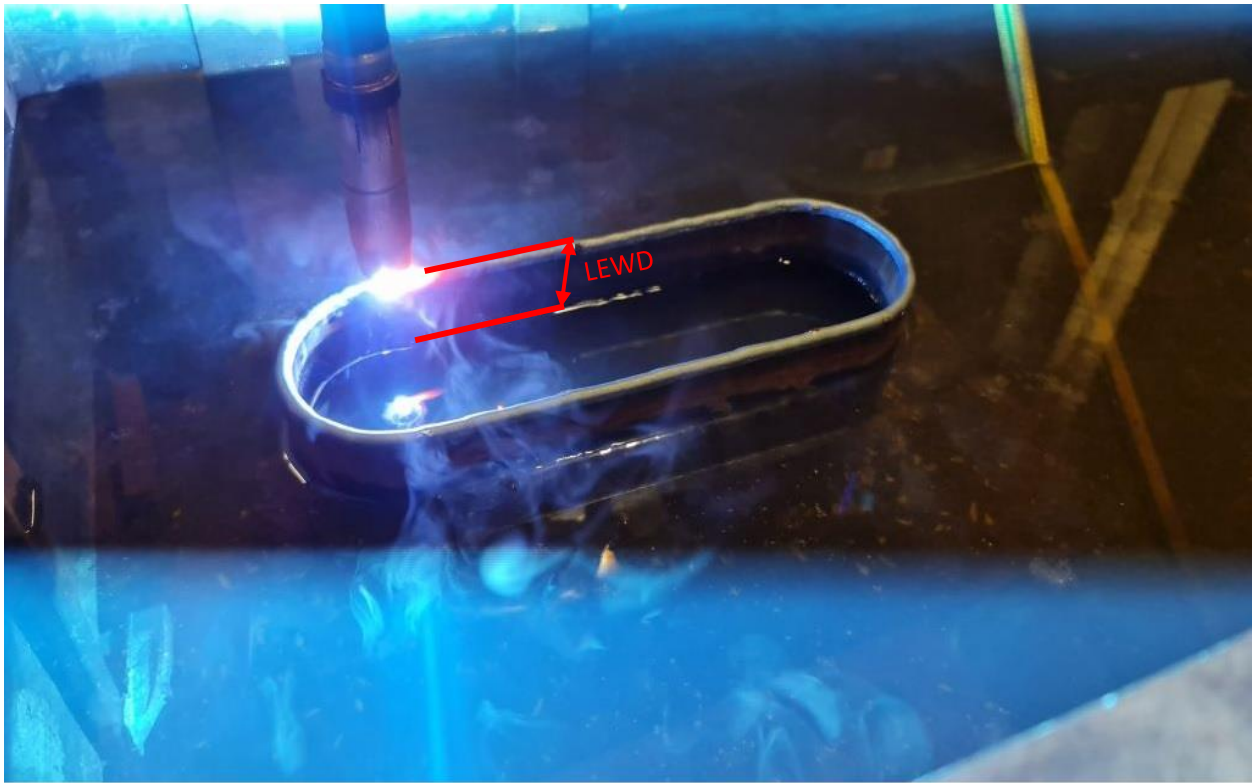
6.3. Konstrukcija naprave za usis pare i odvođenje viška vode

Iz prijašnjih prototipova i naprava koje su bile konstruirane kroz razna istraživanja, konstrukcija je bila koncentrirana izričito na sprječavanje pare da dođe do električnog luka, da bi se anuliralo ili maksimalno smanjilo utjecanje pare na nastanak pora u predformi. Kako je konačno izgledala naprava prikazano je na Slici 26, a nacrti za izradu naprave nalaze se u prilogu rada.



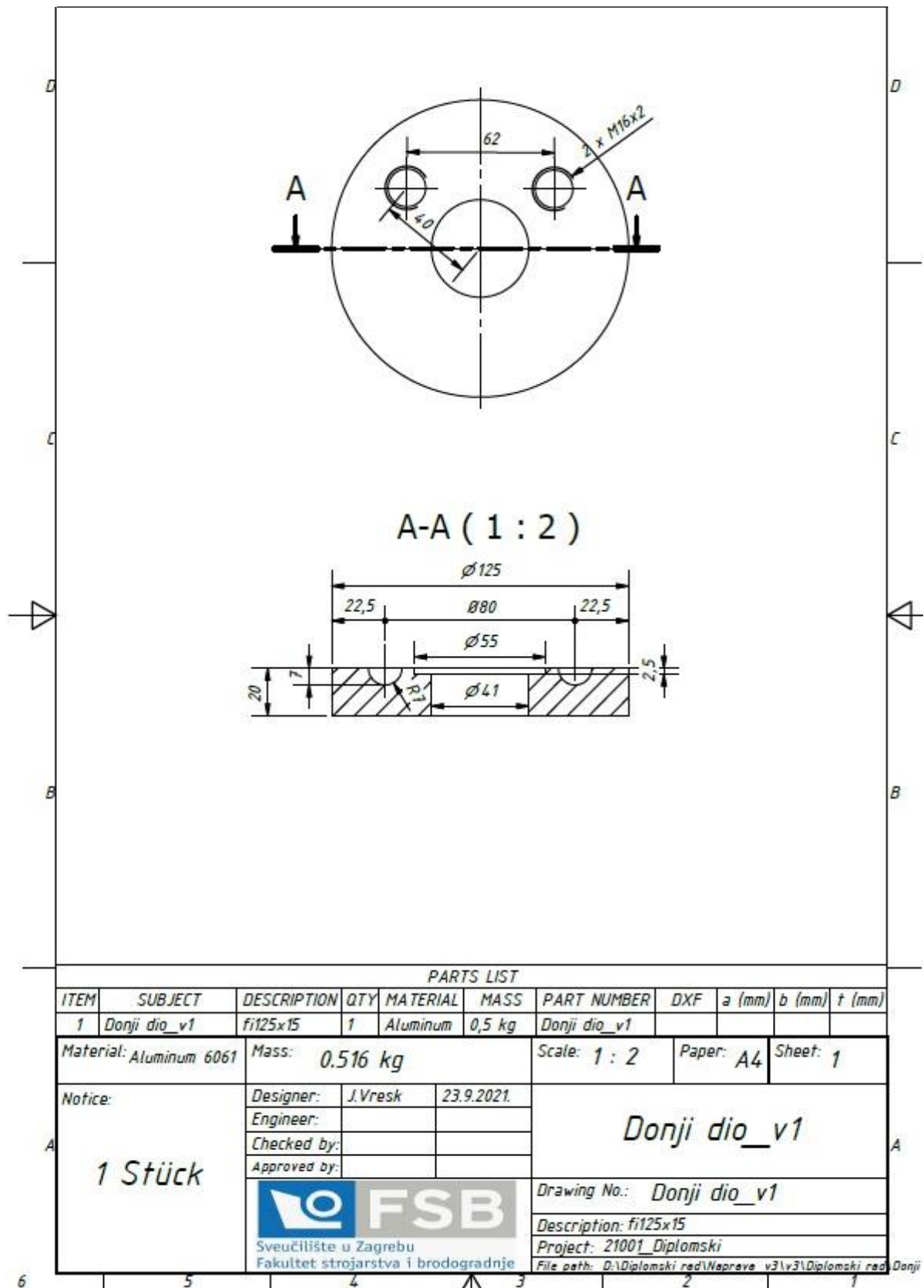
Slika 26. Naprava za skupljanje pare i viška vode kod aktivnog hlađenja

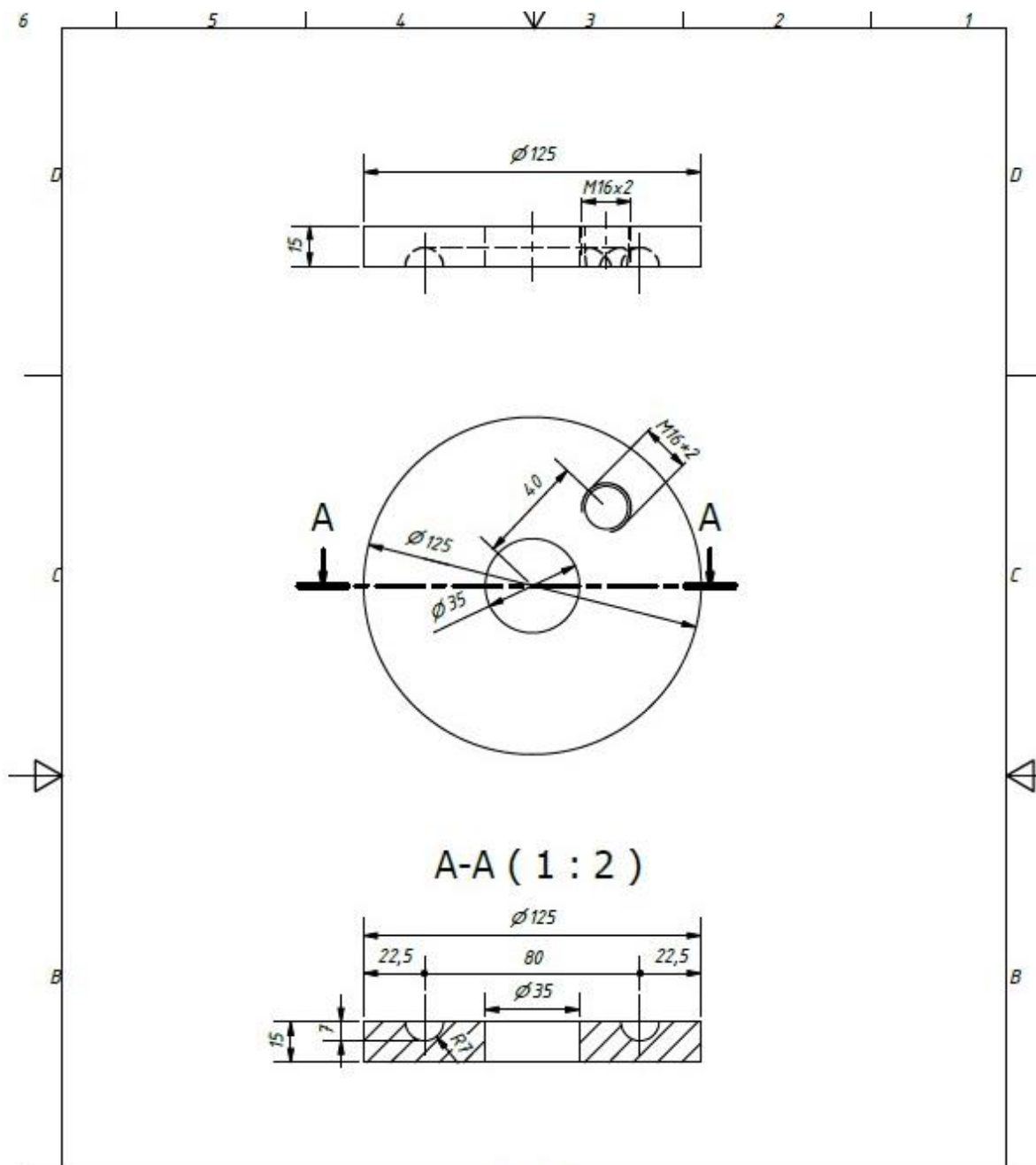
Osim što služi za sprječavanje pare, funkcija naprave je i održavanje bitnog parametra kod taloženja uz utjecaj aktivnog hlađenja, a to je udaljenost vrha predforme od razine vode (LEWD-a). LEWD-om se kontrolira odvođenje topline sa predforme i olakšava se odvijanje procesa taloženja.



Slika 27. Prikaz definirane udaljenosti od razine vode, LEWD

6.3.1. Nacrti za proizvodnju komponenata naprave i sklop





A-A (1 : 2)

PARTS LIST

ITEM	SUBJECT	DESCRIPTION	QTY	MATERIAL	MASS	PART NUMBER	DXF	a (mm)	b (mm)	t (mm)
1	Gornji dio_v1	fi125x20	1	Aluminum	0,4 kg	Gornji dio_v1				

Material: Aluminum 6061	Mass: 0,401 kg	Scale: 1 : 2	Paper: A4	Sheet: 1
-------------------------	----------------	--------------	-----------	----------

Notice: 1 Stück	Designer: J.Vresk	23.9.2021.	Gornji dio_v1
	Engineer:		
	Checked by:		
	Approved by:		



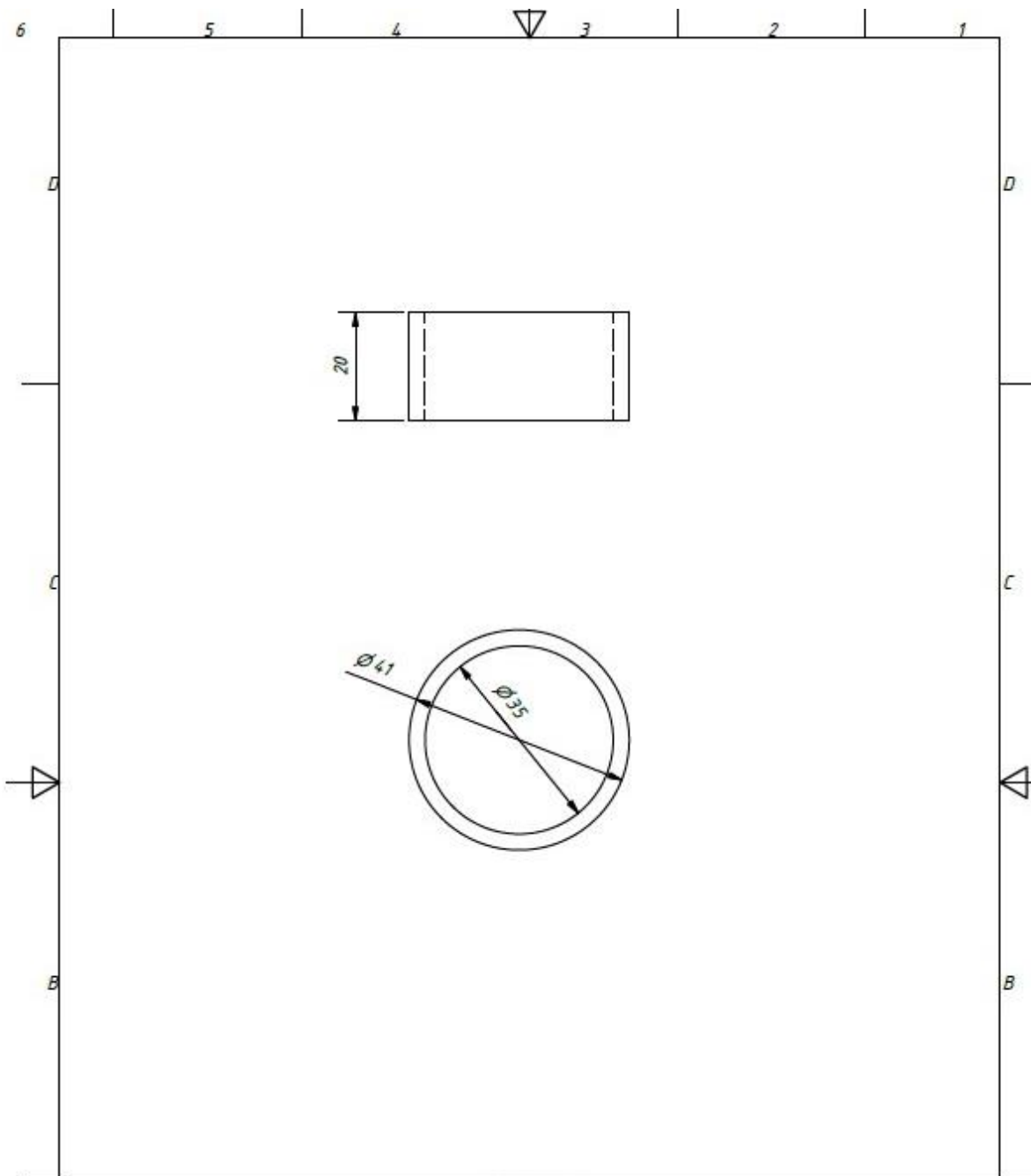
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Drawing No.: Gornji dio_v1

Description: fi125x20

Project: 21001_Diplomski

File path: D:\Diplomski red\Naprava_v3\31Diplomski red\Gori



PARTS LIST

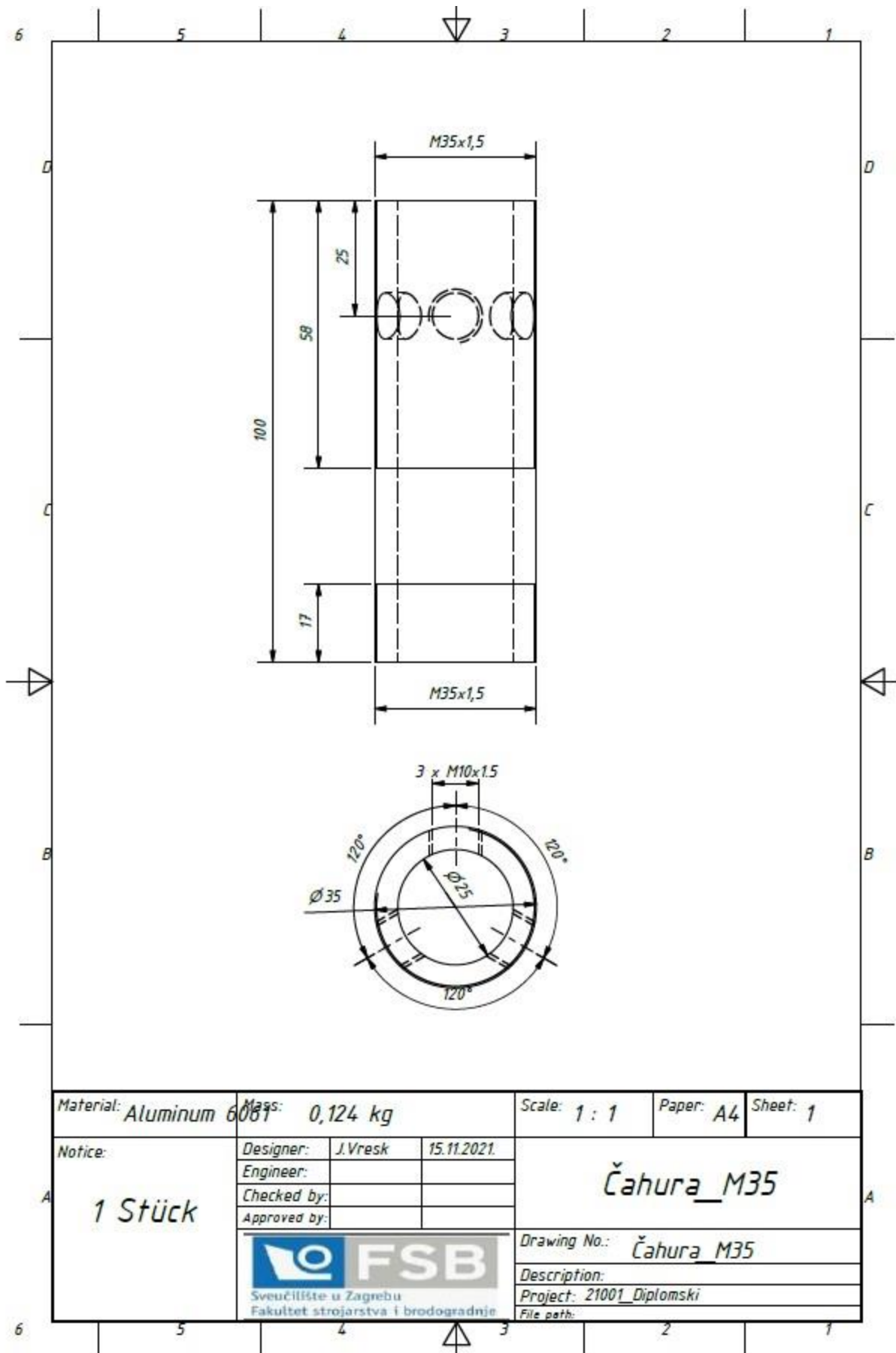
ITEM	SUBJECT	DESCRIPTION	QTY	MATERIAL	MASS	PART NUMBER	DXF	a (mm)	b (mm)	t (mm)
1	Čahura teflon	fi41	1	Teflon	0,0 kg					

Material: Teflon	Mass: 0.008 kg	Scale: 1 : 1	Paper: A4	Sheet: 1
------------------	----------------	--------------	-----------	----------

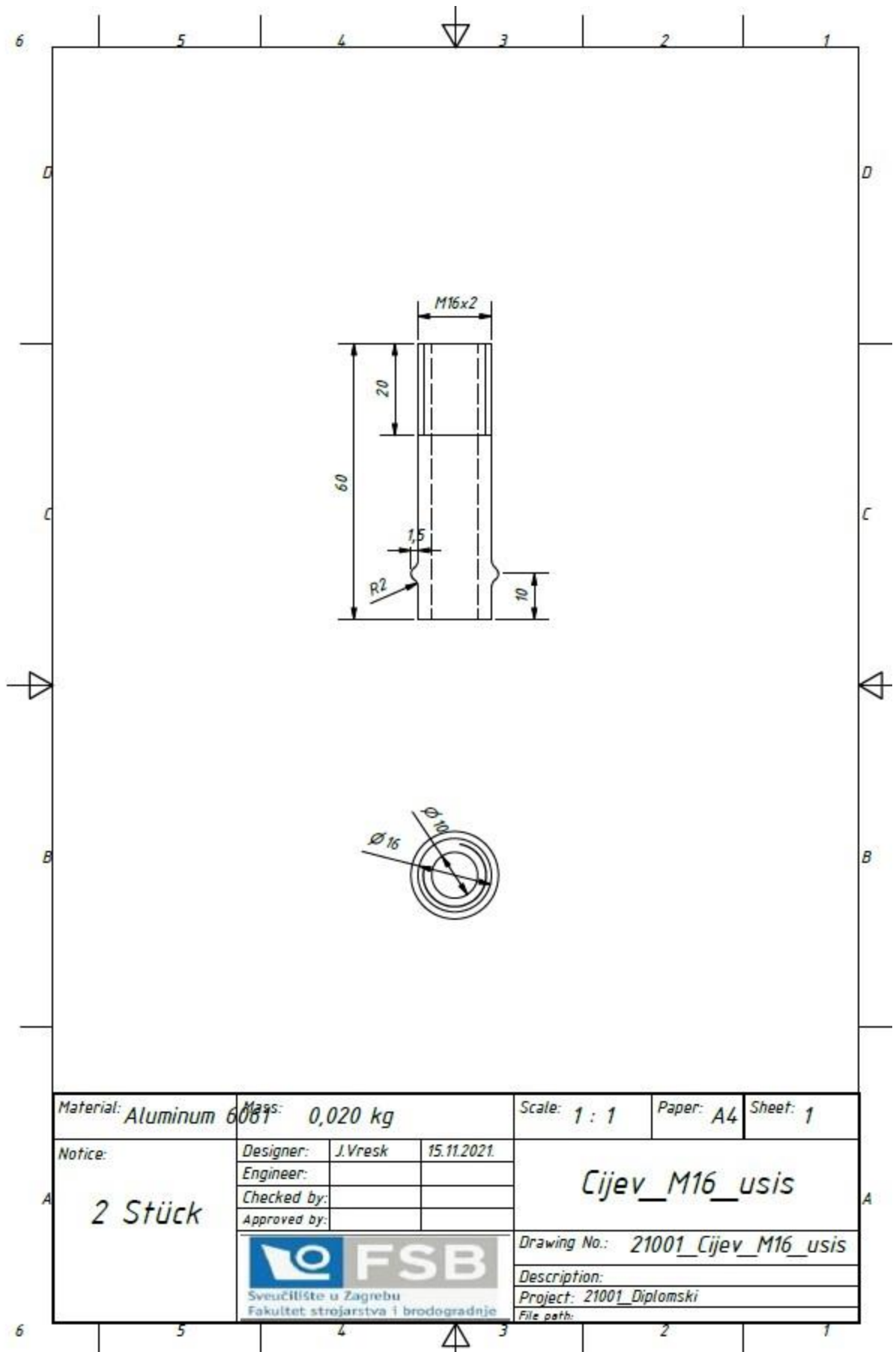
Notice: 1 Stück	Designer: J.Vresk	15/11/2021	Teflon
	Engineer:		
	Checked by:		
	Approved by:		

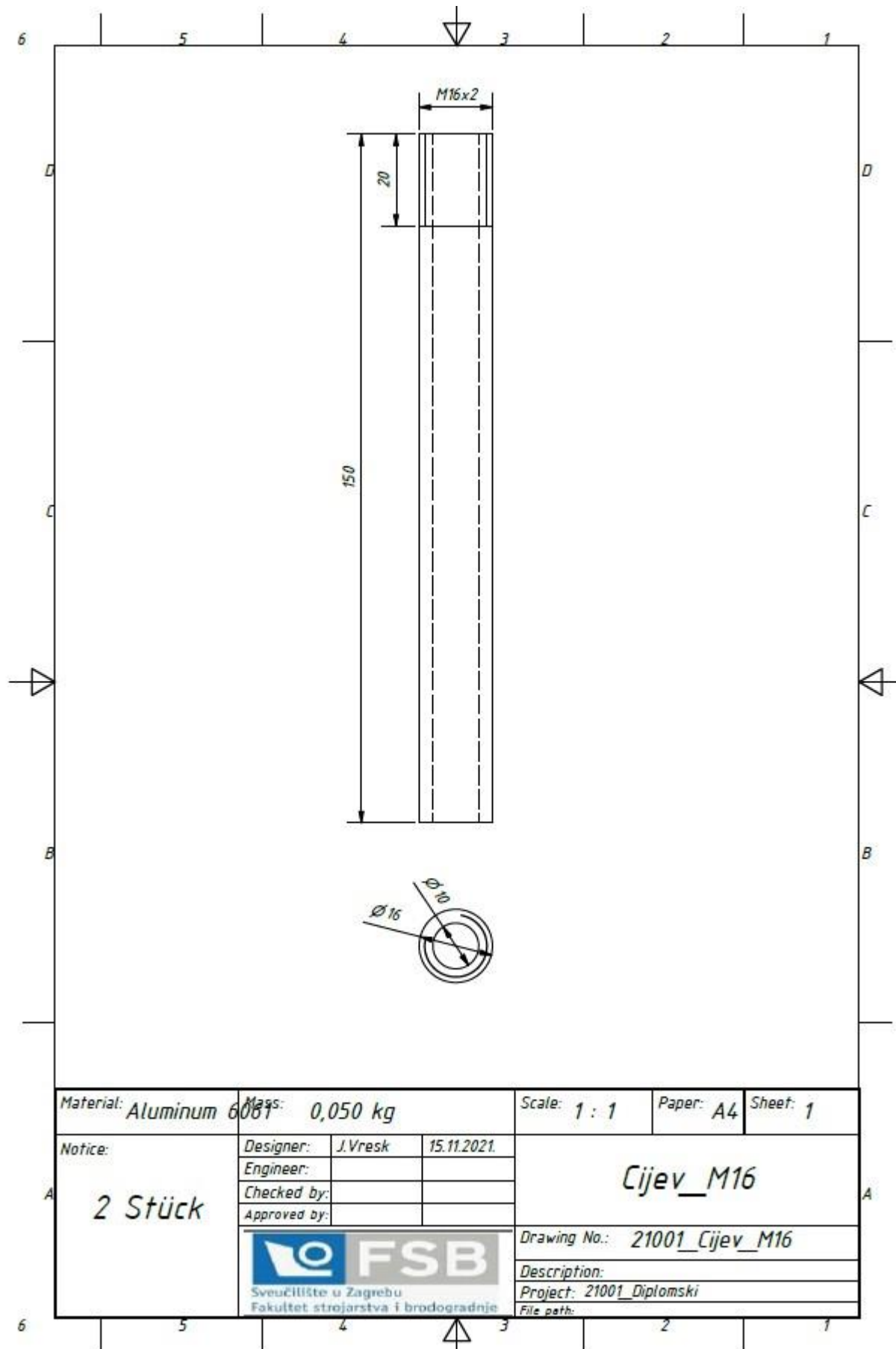


Drawing No.: Teflon
Description: fi41 mm
Project: 21001_Diplomski rad
File path: C:\Users\iurica.vresk\Desktop\JV\1Diplomski rad_v2

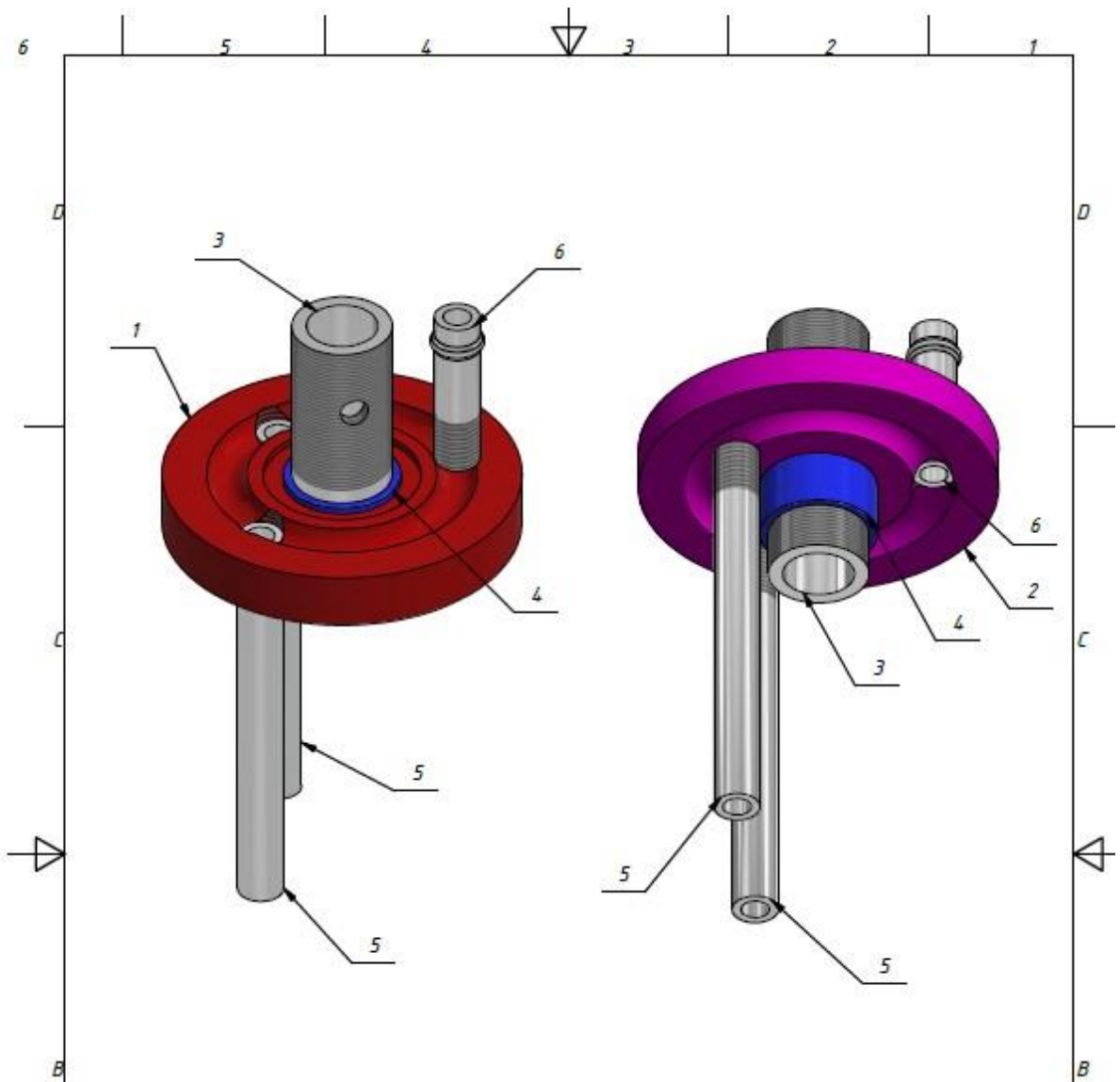


Material: Aluminum 6061		Mass: 0,124 kg	Scale: 1 : 1	Paper: A4	Sheet: 1
Notice: 1 Stück	Designer:	J.Vresk	15.11.2021.	Čahura_M35	
	Engineer:				
	Checked by:				
	Approved by:				
 Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje		Drawing No.: Čahura M35		Description:	
		Project: 21001_Diplomski		File path:	





Material: Aluminum 6061		Mass: 0,050 kg		Scale: 1 : 1	Paper: A4	Sheet: 1
Notice: 2 Stück	Designer:	J.Vresk	15.11.2021.	Cijev_M16		
	Engineer:					
	Checked by:					
	Approved by:					
 Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje		Drawing No.: 21001_Cijev_M16				
		Description:				
		Project: 21001_Diplomski				
		File path:				



PARTS LIST

ITEM	SUBJECT	DESCRIPTION	QTY	MATERIAL	MASS	PART NUMBER	DXF
1	Donji dio_v1	fi125x15	1	Aluminum	0,5 kg	21001_Donji dio_v1	
2	Gornji dio_v1	fi125x20	1	Aluminum	0,4 kg	21001_Gornji dio_v1	
3	Čahura_M35		1	Aluminum	0,1 kg	21001_Čahura_M35	
4	Teflon		1	Teflon	0,0 kg	21001_Teflon	
5	Cijev_M16		2	Aluminum	0,0 kg	21001_Cijev_M16	
6	Cijev_M16_usis		1	Aluminum	0,0 kg	21001_Cijev_M16_usis	

Material:	Mass: 1,169 kg	Scale: 1 : 2	Paper: A4	Sheet: 1
Notice: 1 Stück	Designer: J.Vresk	23.9.2021.	Naprava za usis pare	
	Engineer:			
	Checked by:			
	Approved by:			
 Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje		Drawing No.: 21000_Naprava za usis pa Description: Project: 21001_Diplomski rad File path: D:\Diplomski rad\Naprava_v3\31Diplomski rad\Usis		

6.3.2. Problem trenja i zapinjanja

Naprava se kod prvog testiranja nije pokazala funkcionalnom zbog prevelike sile trenja između gornjeg i donjeg dijela te je zbog nedovoljne krutosti cijelog sistema (pištolja i naprave zajedno) dolazilo do izlaženja glave pištolja iz putanje. Pošto naprava, da bi bila funkcionalna, svojim oblikom mora osigurati praćenje konture zida, svi njezini dijelovi koji su u međusobnom kontaktu moraju imati minimalni otpor trenja. Zbog toga se predlaže sljedeće rješenje.

6.3.3. Rješenje problema trenja

Prijedlog za rješenje je ugradnja aksijalnog ležaja između tarnih površina gornjeg i donjeg dijela naprave te ugradnja radijalnog ležaja između sapnice i donjeg dijela naprave. Time će biti osigurana međusobna interakcija između tarnih dijelova naprave i naprava će lakše i nesmetano obavljati svoju primarnu funkciju.

6.4. Parametri procesa taloženja i načini izvedbe eksperimenta

Najboljim parametrima, iz već prije učinjenih proba taloženja, pokazali oni prikazani u Tablici 5.

Tablica 5. Parametri procesa taloženja

PARAMETRI	IZNOS
Struja, A	50
Napon, V	19,7
Brzina žice, m/min	1,4
Promjer žice, mm	1,2
Brzina zavarivanja, cm/min	20
LEWD, mm	30-35

Prva i druga predforma taložene su identičnim parametrima. Razlika između postupaka je bila ta što je prva predforma bila hlađena prirodno, samo zrakom, dok je druga predforma bila aktivno hlađena vodom uz ručno reguliranje visinske razlike između vrha predforme i vode, tj. LEWD-a.

Na slikama 28 i 29 može se vidjeti razlika između parametara na početku i pred kraj procesa taloženja. Iz tih se parametara zaključuje da se slobodni kraj žice tokom procesa smanjio za određeni iznos te da je potrebno povećati posmak robota u vertikalnoj osi da bi rast visine predforme bio sinkroniziran sa posmakom robota.



Slika 28. Parametri struje i napona prije na početku taloženja



Slika 29. Parametri struje i napona pred kraj taloženja

6.5. Postupak taloženja predformi

Oblik predforme i putanja po kojoj se kretao robot s namjerom je u neprekinutoj formi da ne bi došlo do prekidanja luka i da bi postupak bio kontinuiran. Takva postavka procesa najbližnja je realnom izvođenju procesa taloženja i zorno prikazuje utjecaj akumulacije topline na geometriju izratka i s druge strane pozitivan utjecaj aktivnog hlađenja na svojstva i geometriju predforme.

6.5.1. Taloženje prirodnim hlađenjem

Prije početka taloženja, podloga je izrađena, izrezana, izbrušena i pripojena na postolje da bi što više taložene mase bilo iskoristivo i da bi utjecaj debelog postolja u odvođenju topline bio minimalan. Postava prije početka postupka taloženja prikazana je na slikama 30 i 31.



Slika 30. Poligon (podloga) za taloženje predforme



Slika 31. Kompletan sustav za taloženje predforme

Prilikom procesa taloženja nije bilo značajnih problema. Proces je bio u potpunosti stabilan i bez prekida električnog luka. Prikaz procesa nalazi se na Slici 32.



Slika 32. Prikaz procesa za vrijeme taloženja

Predforma je nakon završetka procesa bila zadovoljavajuće geometrije i bez vidljivih površinskih pora, što je znak dobro odabranih parametara zavarivanja i dobrog programa vođenja robota. Pred sam kraj procesa, žica se priličepila na predformu što je znak da vertikalni posmak nije bio u skladu s visinom nataloženog sloja, što je kasnije regulirano kod taloženja uz aktivno hlađenje. Iz mjerenja visine predforme dobio se idealni vertikalni posmak od 1,4 mm, što je odgovaralo visini jednog nataloženog sloja. Prikaz predforme kratko nakon završetka taloženja nalazi se na Slici 33.



Slika 33. Završena predforma, još uvijek neizrezana s podloge

Visina konačne predforme iznosila je 80 mm i bila je zadovoljavajuće geometrije i izgleda.

6.5.2. Taloženje uz aktivno hlađenje

Prije početka taloženja, podloga je izrađena, izrezana, izbrušena i pripojena na postolje da bi što više taložene mase bilo iskoristivo i da bi utjecaj debelog postolja u odvođenju topline bio minimalan. Također je bazen napunjen vodom do razine da LEWD prije samog početka procesa iznosi 30 mm. Taj je iznos LEWD-a bio manualno održavan do kraja samog procesa i kretao se između 30 i 35 mm. Postava prije i nakon početka postupka taloženja prikazana je na slikama 34 i 35.



Slika 34. Poligon (podloga) za taloženje predforme



Slika 35. Predforma nekoliko slojeva nakon početka taloženja i prikaz LEWD-a

Predforma je nakon završetka procesa bila zadovoljavajuće geometrije i bez vidljivih površinskih pora, što je znak dobro odabranih parametara zavarivanja i dobrog programa vođenja robota. Za razliku od taloženja bez aktivnog hlađenja, ovdje nije došlo do zaljepljivanja žice za predformu jer je vertikalni posmak reguliran i dobro određen. Izmjerena visina predforme nakon završetka taloženja iznosila je oko 88 mm, što je dokaz manje akumulacije topline kod aktivnog hlađenja i uže stjenke predforme. Prikaz predforme kratko nakon završetka taloženja nalazi se na Slici 36.



Slika 36. Predforma nakon završetka taloženja

6.6. Odvajanje predforme s podloge, izrezivanje uzoraka i obrada uzoraka

Nakon završetka procesa taloženja, bilo je potrebno odvojiti iskoristivi dio predforme s poligona za taloženje. Taj se dio izrezao na tračnoj pili, a postupak izrezivanja nalazi se na Slici 37.



Slika 37. Izrezivanje iskoristivog dijela predforme

Iz dobivene predforme izrezana su po 2 zida, iz kojih su daljnjim rezanjem izvlačeni uzorci za 3D skeniranje, ispitivanje udarne radnje loma, izradu makroizbruska i ispitivanje tvrdoće.

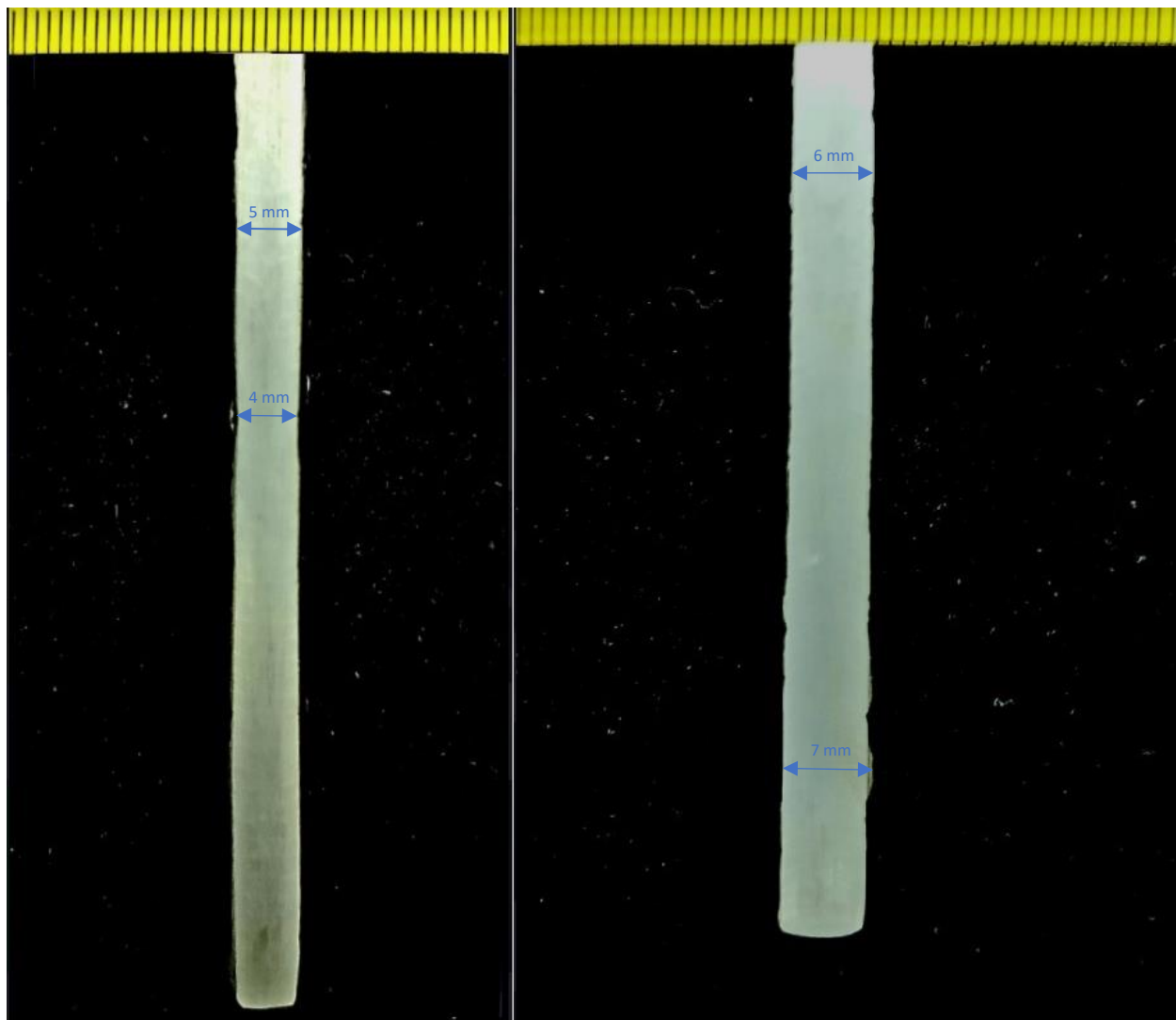
6.6.1. Izrada makroizbrusaka

Da bi se dobio kvalitetan makroizbrusak, potrebno je kvalitetno obraditi izrezanu površinu. Kvalitetna se obrada površine može dobiti brušenjem brus papirom granulacije P200-P400. Nakon fine obrade, površinu je potrebno nagristi kako bi se lakše uočile potencijalne nepravilnosti. Prikaz brušenja nalazi se na Slici 38.



Slika 38. Izrada makroizbruska

Na izrađenim makroizbruscima koji se nalaze na Slici 39, vidljivo je da nema nikakvih nepravilnosti u strukturi i da prilikom procesa nije došlo do nastajanja pora. Barem ne na mjestu reza.



Aktivno hlađenje

Normalno hlađenje

Slika 39. Izvađeni i nagriženi makroizbrusci

Na makroizbruscima se može vidjeti već prije naglašena razlika u debljini i visini predformi. Aktivno hlađena predforma je zbog intenzivnijeg hlađenja i manjeg unosa topline uža i viša od prirodno hlađene predforme koja je šira i niža.

6.6.2. Izrezivanje uzoraka za 3D skeniranje

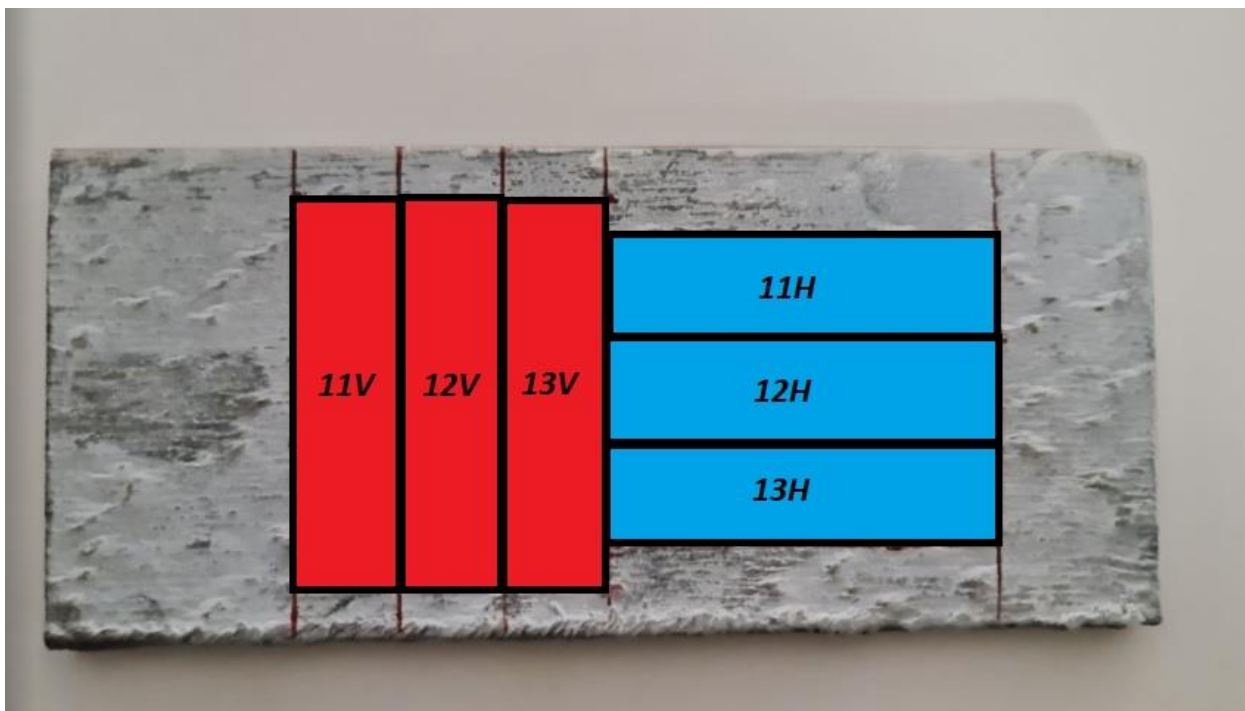
Uzorci potrebni za 3D skeniranje nisu bili posebno obrađivani, potrebno ih je bilo samo izrezati iz predforme i obojiti bijelom bojom radi boljeg kontrasta tijekom skeniranja. Prikaz uzorka i spreja nalazi se na Slici 40.



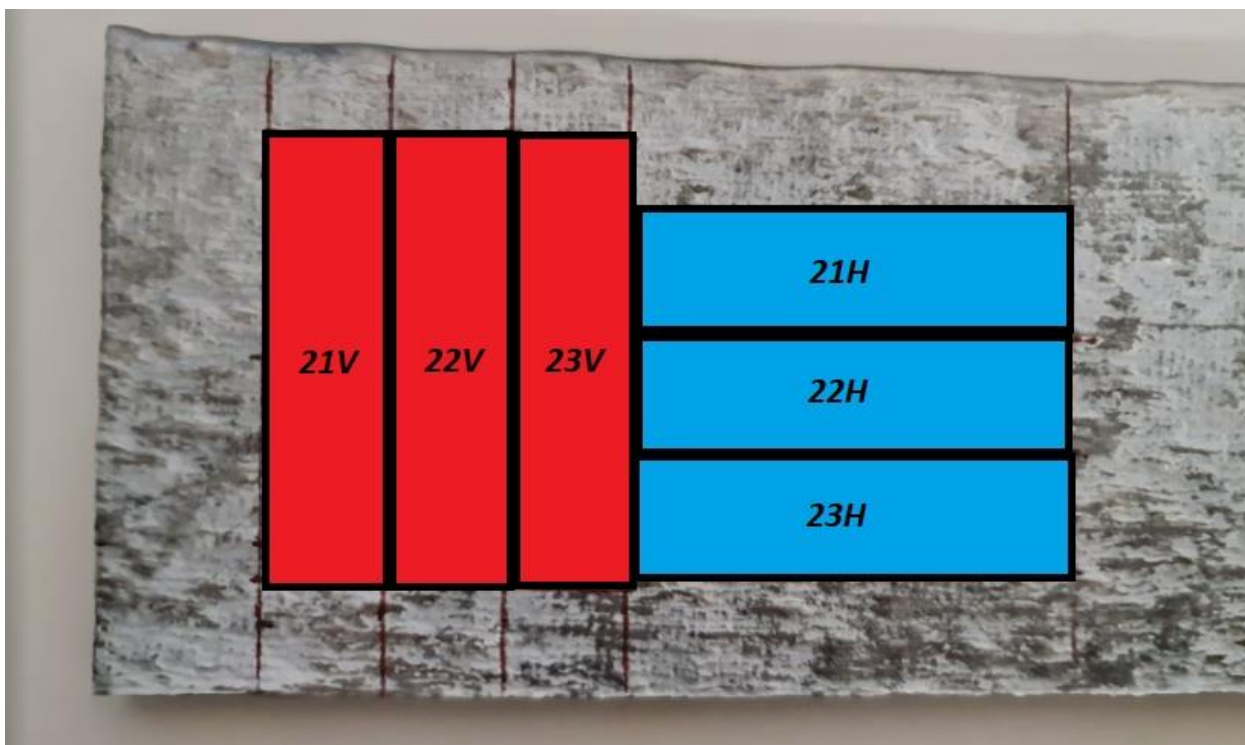
Slika 40. Prikaz uzorka i bijelog spreja

6.6.3. Izrezivanje i obrada uzoraka za ispitivanje udarne radnje loma

Da bi se dobili što vjerniji rezultati, iz svake je predforme izvađeno šest uzoraka, tri horizontalna i tri vertikalna. Način vađenja uzoraka iz predformi prikazan je na slikama 41 i 42.



Slika 41. Vađenje i oznake uzoraka iz normalno hladene predforme

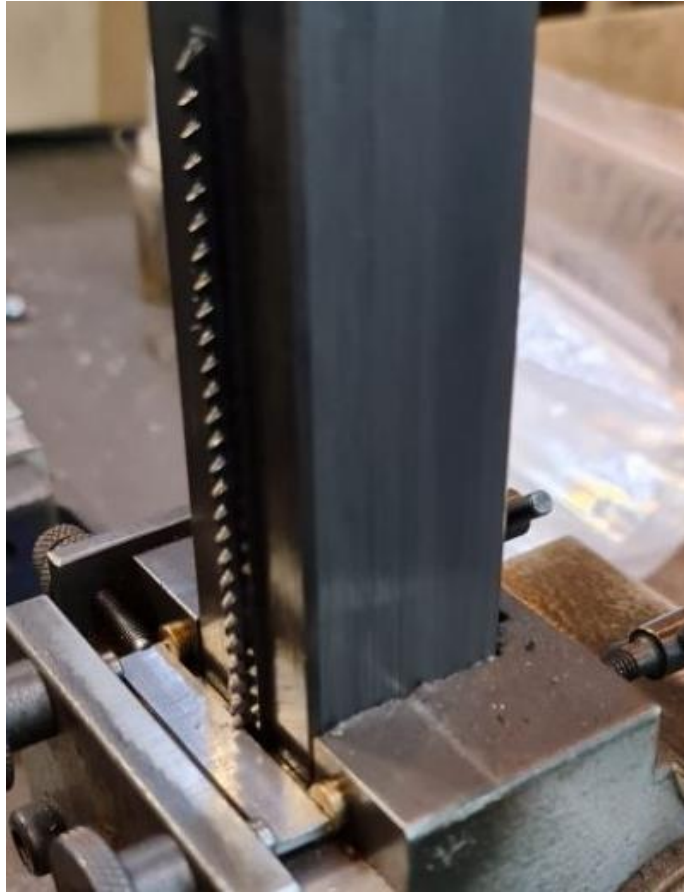


Slika 42. Vađenje i oznake uzoraka iz aktivno hladene predforme

Uzorci su izrezani na tračnoj pili i potom toga strojno obrađeni. Naposljetku je na uzorcima izrađen V-utor u svrhu ispitivanja udarne radnje loma. Postupak od rezanja do obrade i konačnog izgleda epruveta nalazi se na sljedećim slikama.



Slika 43. Gotovi uzorci, spremni za izradu V-utora



Slika 44. Izrada V-utora

6.6.4. Obrada uzoraka za rendgen

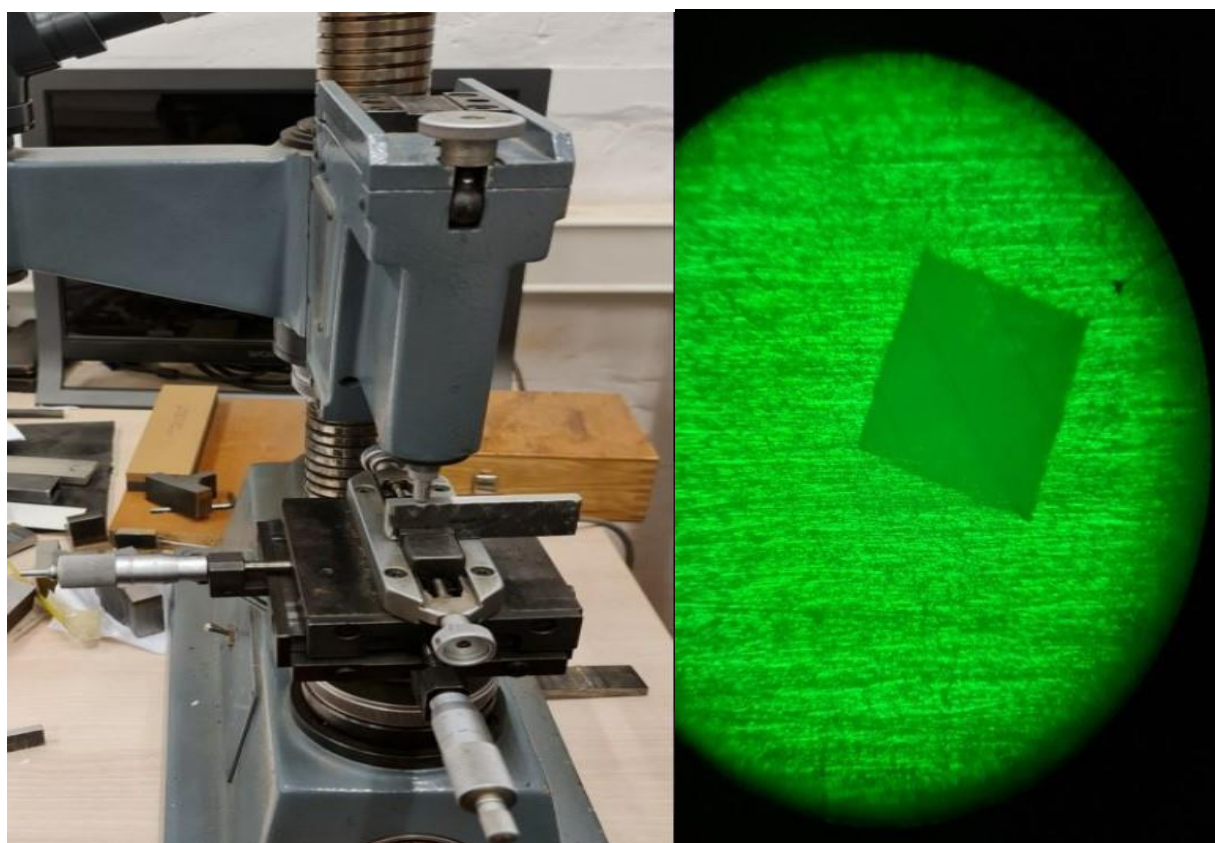
Da bi eventualne nepravilnosti u strukturi bile lakše vidljive, predforme je potrebno predobraditi. Uzorci za rendgen bili su obrađeni do te mjere da je ostao samo čisti materijal, bez nečistoća.

6.7. Ispitivanja svojstava i homogenosti materijala

Da bi se dobio uvid u svojstva i homogenost materijala, bilo je potrebno izvršiti određena ispitivanja koja su uključivana mjerenje tvrdoće, ispitivanje udarne radnje loma, rendgen i 3D skeniranje.

6.7.1. Mjerenje tvrdoće makroizbrusaka

U svrhu dolaženja do spoznaje kakav je utjecaj na svojstva materijala imala tehnika upravljanja toplinom, na svakom od makroizbrusaka je izmjerena tvrdoća. Mjerenje tvrdoće provedeno je metodom HV 10 i vršilo se od dna prema vrhu uzorka u 8 ravnomjerno raspoređenih točaka. Uređaj za mjerenje i princip mjerenja prikazani su na slici 50, a rezultati mjerenja u Tablici 6.



Slika 45. Princip i uređaj za mjerenje tvrdoće HV 10

Tablica 6. Izmjereni iznosi tvrdoće

Iznos tvrdoće, HV 10		
Rd. br. mjerenja	Prirodno hlađen	Aktivno hlađen
1.	155	169
2.	146	156
3.	143	156
4.	141	156
5.	142	156
6.	141	153
7.	138	155
8.	144	152
Srednja vrijednost \bar{x}	143,75	156,75
Srednje odstupanje σ	5,12	5,15

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da je utjecaj vode na veći intenzitet hlađenja kod aktivno hlađenog uzorka uzrokovao višu tvrdoću od prirodno hlađenog uzorka. Iznosi tvrdoća konstantni su po visini što dokazuje jednolikost procesa od početka do kraja.

6.7.2. Ispitivanje udarne radnje loma, Charpy

Ispitivanje udarnog rada loma po Charpy-ju provodi se s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja. Iznos udarnog rada loma pokazatelj je žilavosti materijala. Ispitivanje udarnog rada loma Charpy-jevim batom propisano je normom HRN EN ISO 148-1. Ispitivanje udarne radnje loma izvodilo se u certificiranom laboratoriju Proizvodnje Dalekovod, na sobnoj temperaturi. Postupak ispitivanja prikazan je na Slici 51.

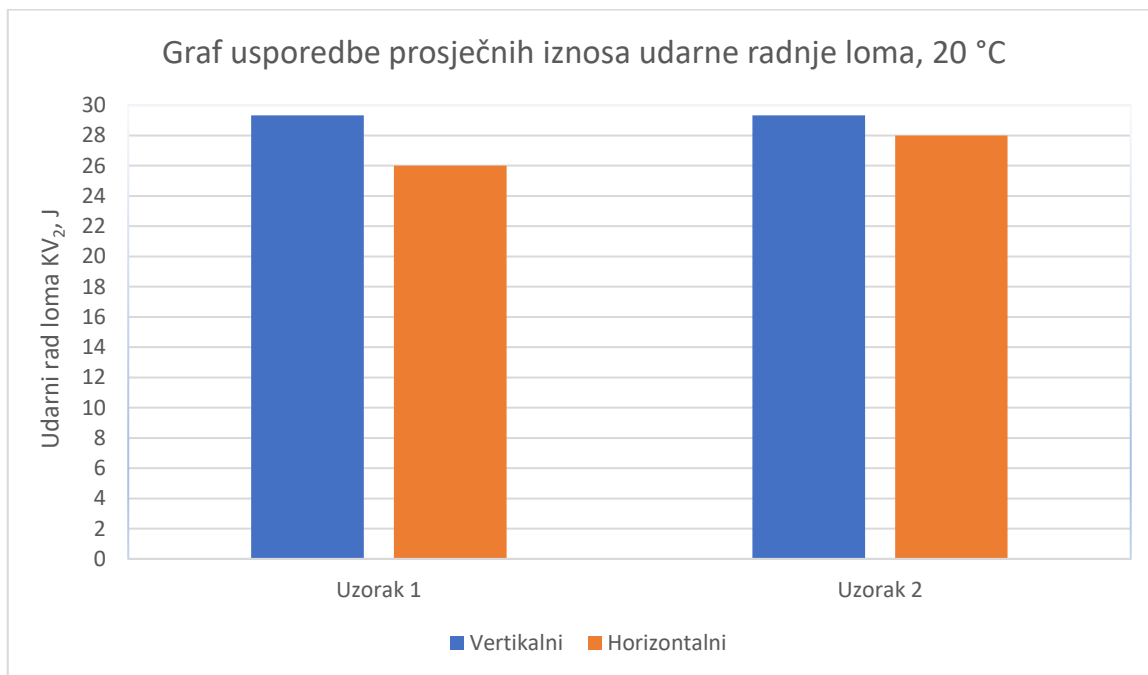


Slika 46. Charpyev bat za ispitivanje udarne radnje loma (Proizvodnja Dalekovod)

Epruvete za ispitivanje bile su dimenzija $55 \times 10 \times 2,5$ (D x Š x D). Debljina epruvete iznosila je 2,5 mm zbog nemogućnosti obrade aktivno hlađenog uzorka na veću debljinu. Iz prirodno se hlađenog uzorka mogla izvući epruveta debljine 5 mm, ali zbog veće vjerodostojnosti rezultata, sve su epruvete obrađene na 2,5 mm. Da bi bili pokriveni svi slučajevi opterećenja predforme, uzorci su vađeni iz obje ravnine, i horizontalne i vertikalne. Za svaki slučaj izvučene su po 3 epruvete, što je u konačnici činilo skup od ukupno 12 epruveta. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 7.

Tablica 7. Rezultati dobiveni ispitivanju udarne radnje loma na 20 °C

Rezultati ispitivanja udarne radnje loma, +20 °C			
Rd. br.	Uzorak	Lom epruvete, mm	KV ₂ , J
1.	1H1	NE	26
2.	1H2	NE	26
3.	1H3	NE	26
4.	1V1	NE	32
5.	1V2	NE	28
6.	1V3	NE	28
7.	2H1	NE	28
8.	2H2	NE	28
9.	2H3	NE	28
10.	2V1	NE	30
11.	2V2	NE	28
12.	2V3	NE	30



Pošto su epruvete debljine 2,5 mm, iznose udarne radnje loma potrebno je pomnožiti s četiri da bi se dobila stvarna udarna radnja loma.

Iz prije izmjerenih iznosa tvrdoće moglo se zaključiti da će iznosi udarne radnje loma kod aktivno hlađenih uzoraka biti nešto niži nego kod prirodno hlađenih uzoraka. Ispitivanje je pokazalo da je udarna radnja loma kod aktivno hlađenih uzoraka jednaka ili nešto malo viša u odnosu na prirodno hlađene uzorke, čime se može zaključiti da su uz znatno smanjeni unos topline i mehanička svojstva uzoraka dobivenih pod utjecajem aktivnog hlađenja i više nego zadovoljavajuća.

Iz rezultata se još može zaključiti da udarna radnja loma ne ovisi o smjeru taloženja materijala i da je svejedno u kojem smjeru su opterećeni uzorci.

6.7.3. Snimanje rendgenom

Korištena oprema za snimanje:

- RTG uređaj: Balteau 300D
- skener: VMI 5100
- slikovna ploča: Kodak industrex flex Blue.

Parametri snimanja:

- napon: 150 kV
- struja: 4 mA
- fokus filma: 700 mm
- vrijeme: 180 s.

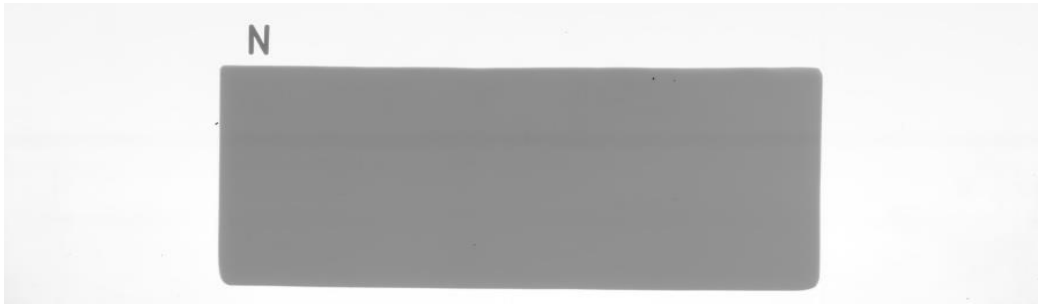
Parametri skeniranja:

- napon lasera: 15 V
- napon fotomultiplikatora: 5,25 V
- rezolucija skeniranja: 50 nm.

Prikaz uređaja za snimanje nalazi se na Slici 52, pripremljeni uzorci na slici 53, a rezultat snimanja nalazi se na slici 54.



Slika 47. Oprema za rendgensko snimanje



Slika 48. Radiogram prirodno hlađene predforme



Slika 49. Radiogram aktivno hlađene predforme

Na radiogramima je jasno vidljivo da u metalu, bez obzira na pristup upravljanju topline, nema nikakvih nesukladnosti i da je proces taloženja izvršen bez pojavljivanja pora u metalu predforme.

7. ZAKLJUČAK

Primjena aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom tehnologija je proizvodnje koja je još u razvoju. Smanjivanje ulaznih parametara proizvodnje kao što su vrijeme i materijal te povećanje produktivnosti i profita uvelike potiče razvoj WAAM-a. U ovom diplomskom radu prikazana je izrada dva uzorka koji su tijekom taloženja bili podvrgnuti različitim pristupima hlađenja u svrhu povećanja brzine procesa i smanjenja unosa i akumulacije topline.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je izraditi dvije predforme podvrgnute različitim pristupima upravljanja toplinom. Uzorci su nakon taloženja postigli kvalitetu i svojstva koja je bila iznad očekivanja. Geometrija oba uzorka bila je na visokoj razini zbog pomno izabраниh parametara taloženja, a očekivane greške poput uključaka i pora nisu se pojavile u nataloženom metalu. Prilikom izrade prve predforme, one prirodno hlađene, primijećeno je da je posmak robota za određeni postotak premalen u odnosu na stopu taloženja materijala, tj. visinu svakog novog sloja. Zbog toga je pred kraj procesa, jedan prolaz prije kraja, došlo do naljepljivanja žice na predformu. Da bi se to spriječilo na sjedećoj predformi, onoj aktivno hlađenoj, posmak robota povećan je za određeni iznos. Posmak je također bilo potrebno povećati zbog toga jer je bilo očekivano da će stopa rasta predforme prilikom aktivnog hlađenja biti nešto veća, što se u konačnici i dokazalo nešto većom visinom druge predforme.

Tvrdoća na uzorcima bila je ispitivana metodom po Vickersu (HV 10). Na svakom je uzorku provedeno osam mjerenja jednako raspoređenih po visini u svrhu što vjerodostojnijih rezultata. Dobiveni rezultati bili su očekivani i tvrdoća aktivno hlađene predforme bila je veća, što je rezultat intenzivnijeg hlađenja.

Da bi se ispitala mehanička svojstva predformi, iz svake je predforme izrezano po šest uzoraka, tri vertikalna i tri horizontalna. Strojno izrađene epruvete bile su podvrgnute ispitivanju udarne radnje loma radi usporedbe žilavosti predformi. Rezultati testiranja nisu se pokazali nimalo očekivanima i udarna radnja loma aktivno hlađene predforme bila je za mali postotak veća od udarne radnje loma prirodno hlađene predforme. Aktivnim hlađenjem značajno je ubrzan proces taloženja bez gubitka mehaničkih svojstava materijala.

Da bi se u potpunosti zaokružilo ispitivanje predforme su bile rendgenski snimane. Iz snimaka se pokazalo da u taloženom metalu nije bilo nikakvih uključaka i pora, kao što se i vidjelo na makroizbruscima.

Princip aktivnog hlađenja, uz niže parametre zavarivanja, omogućuje smanjeni unos topline koji sa sobom nosi brojne prednosti kao što su ušteda energije, veća preciznost, manje deformacije i značajno manji unos i akumulacija topline. Daljnji razvoj i istraživanje aktivnog hlađenja uz primjenu WAAM tehnologije mogao bi u budućnosti omogućiti korištenje nešto viših parametara zavarivanja kako bi u konačnici proces bio brži i mnogo efikasniji.

8. LITERATURA

- [1] Singh, S., Sharma, S. Kumar, & Rathod, D. W. *A review on process planning strategies and challenges of WAAM.* (dostupno od 02.2021.)
- [2]] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, et al., *Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing*, *Rob. Comput. Integr. Manuf.* 39 (dostupno od 03.2015)
- [3] Z. Pan, D. Ding, B. Wu, D. Cuiuri, H. Li, J. Norrish, *Arc welding processes for additive manufacturing: A review*, in: S. Chen, Y. Zhang, Z. Feng , *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. Transactions on Intelligent Welding Manufacturing* (dostupno od 01.2018.)
- [4] Qiao, Liuping, *Integrated deposition and machining of aluminium alloy using WAAM*
- [5] Fembar, Saša, *Analiza svojstava konstrukcijskih i alatnih čelika, Karlovac 2016.*
- [6] Scotti, Fernando Matos; Teixeira, Felipe Ribeiro; Silva, Leandro Joao da Silva; de Araujo, Douglas Bezerra; Reis, Ruham Pablo; Scotti, Americo (2020). *Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique.*
- [7] Leonardo Joao da Silva. *Near-immersion active cooling for wire + arc additive manufacturing: from concept to application*
- [8] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Fei, Z., *The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy* (dostupno od 02.2018.)
- [9] Yang, D., Wang, G., Zhang, G., *Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography* (dostupno od 05.2017)
- [10] Derekar, K., Lawrence, J., Melton, G., Addison, A., Zhang, X., Xu, L., *Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium* (dostupno od 02.2018)
- [11] Ryan, E.M., Sabin, T.J., Watts, J.F., Whiting, M.J., *The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy* (dostupno od 07. 2018.)
- [12] Vresk, Jurica. *Optimiranje parametara zavarivanja ppri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom*