

Utjecaj žarenja na mehanička svojstva AlSi10Mg legure dobivene aditivnim postupkom selektivnog laserskog taljenja praha u komori (LPBF)

Murković, Karlo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:694156>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





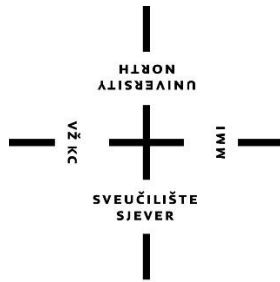
**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 111/STR/2024

**Utjecaj žarenja na mehanička svojstva AlSi10Mg legure
dobivene aditivnim postupkom selektivnog laserskog
taljenja praha u komori (LPBF)**

Karlo Murković, 4185/336

Varaždin, rujan 2024. godine



**Sveučilište
Sjever**

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 111/STR/2024

**Utjecaj žarenja na mehanička svojstva AlSi10Mg legure
dobivene aditivnim postupkom selektivnog laserskog
taljenja praha u komori (LPBF)**

Student

Karlo Murković, 4185/336

Mentor

izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić

Varaždin, rujan 2024. godine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Karlo Murković	JMBAG	4185/336
DATUM	26.8.2024.	KOLEGIJ	Novi inženjerski materijali
NASLOV RADA	Utjecaj žarenja na mehanička svojstva AISi10Mg legure dobivene aditivnim postupkom selektivnog laserskog taljenja praha u komori (LPBF)		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	The influence of annealing on the mechanical properties of the AISi10Mg alloy obtained by the additive process of laser powder bed fusion (LPBF)		
MENTOR	izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić	ZVANJE	izvanredna profesorica
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Matija Bušić, predsjednik povjerenstva 2. izv.prof.dr.sc. Sanja Šolić, mentorica, član 3. doc.dr.sc. Tanja Tomić, član 4. doc.dr.sc. Boris Jalušić, zamjenski član 5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ	111/STR/2024
------	--------------

OPIS

U diplomskom radu potrebno je prikazati novu aditivnu tehnologiju proizvodnje strojnih dijelova od aluminijskih legura selektivnog laserskog taljenja praha u komori (LPBF).

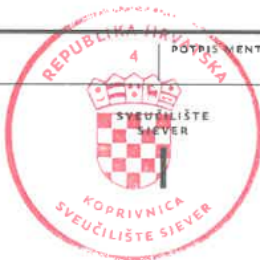
U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je opisati LPBF postupak s naglaskom na parametre postupka i njihov utjecaj na mehanička svojstva izradaka.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je napraviti ispitne uzorke od AISi10Mg praha LPBF postupkom varirajući brzinu taljenja čime se postiže različita gusooća energije lasera. Potrebno je napraviti dva seta ispitnih uzoraka za statičko vlačno ispitivanje i ispitivanje savojne čvrstoće metodom savijanja u tri točke koji će se ispitivati u "as built" stanju te u stanju nakon provedene toplinske obrade žarenja za redukciju zaostalih naprezanja. Ispitne uzorke potrebno je pripremiti standardnom metalografskom pripremom za analizu mikrostrukture u poliranom i nagriženom stanju te je potrebno izmjeriti mikrotvrdoću korištenjem Vickersove metode HV 0,02 i HV 0,2.

Dobivene rezultate je potrebno analizirati i opisati te je potrebno napraviti usporedbu dobivenih rezultata obzirom na varirane parametre potupka te dati zaključak.

U diplomskom radu jasno je potrebno navesti svu korištenu literaturu i eventualno korištenje alata umjente inteligencije.

ZADATAK URUČEN 26.8.2024.





IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navodenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, KARLO MURKVIĆ pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom UTJECAJ ŽARENJA NA MEHANIČKA SVIŠTVA AIS10 na LEGURE DRAVENE ADITIVNIM POSTUPKOM SELEKTIVNOG LASERSKOG TALJENJA PAMA U KAMORI (LPBF) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Karlo Murković

Karlo Murković

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišne te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, KARLO MURKVIĆ neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom UTJECAJ ŽARENJA NA MEHANIČKA SVIŠTVA AIS10 na LEGURE DRAVENE ADITIVNIM POSTUPKOM SELEKTIVNOG LASERSKOG TALJENJA PAMA U KAMORI (LPBF) čiji sam autor.

Student:

Karlo Murković

Karlo Murković

Predgovor

Veliko hvala mojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Sanji Šolić na pruženoj prilici, stručnom vodstvu, idejama i smjernicama tijekom pisanja diplomskog rada.

Zahvaljujem se Metalskoj jezgri iz Čakovca koja je omogućila izradu uzoraka i provođenje toplinske obrade za potrebe diplomskog rada. Hvala ravnatelju dr. sc. Mariu Šerceru i Lucianu Beliću univ. mag. ing. mech. na pomoći kod pripreme uzoraka za eksperimentalni dio rada.

Zahvaljujem se tvrtki Metalobrada iz Murskog Središća i vlasniku Borisu Dobraniću na nesebičnoj pomoći i brznoj usluzi strojne obrade ispitnih uzoraka.

Hvala doc. dr. sc. Matiji Bušiću na pomoći pri provedbi statičkog vlačnog ispitivanja u Laboratoriju za ispitivanje materijala na Sveučilištu Sjever.

Želim se zahvaliti i tehničkom suradniku Ivanu Vovku s Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na metalografskoj pripremi uzoraka i pomoći pri mjerenju mikrotvrdoće.

Od srca zahvaljujem svojim roditeljima i braći na podršci tijekom svih godina studija.

Sažetak

Aditivne proizvodne tehnologije odskaku od tradicionalnih tehnologija i razmišljanja pružajući novu razinu konstrukcijske slobode u izradi tehničkih rješenja. Selektivno lasersko taljenje praha u komori (LPBF) jedna je od najčešće korištenih tehnologija aditivne proizvodnje za proizvodnju komponenti od metala. Najvažniji korak u proizvodnji komponenti aditivnom tehnologijom odnosi se na izbor parametara postupka. Odabir parametara ima veliki utjecaj na relativnu gustoću, porozitet, a samim time i na mehanička svojstva izratka. Često su izradci podvrgnuti i naknadnoj toplinskoj obradi kako bi se smanjila zaostala naprežanja ili postigla tražena svojstva materijala. U teorijskom dijelu diplomskog rada opisan je LPBF postupak s fokusom na parametre i njihov utjecaj na mehanička svojstva izradaka. U eksperimentalnom dijelu napravljena je analiza utjecaja gustoće energije lasera koja je regulirana preko brzine taljenja na mehanička svojstva AlSi10Mg legure. Na jednoj seriji uzoraka provedeno je žarenje za redukciju zaostalih naprežanja te je prikazana usporedba rezultata s uzorcima u „as built“, odnosno osnovnom stanju. Provedeno je statičko vlačno ispitivanje, savijanje u 3 točke, mjerenje mikrotvrdoće HV 0,2 i HV 0,02 i analiza mikrostrukture u poliranom stanju.

Ključne riječi: SLM, LPBF, gustoća energije lasera, aditivna proizvodnja, 3D print, toplinska obrada

Abstract

Additive manufacturing technologies deviate from traditional technologies and thinking, offering a new level of design freedom in creating technical solutions. Laser Powder Bed Fusion (LPBF) is one of the most commonly used additive manufacturing technologies for producing metal components. The most critical step in component production using additive technology involves the selection of process parameters. The choice of parameters significantly impacts the relative density, porosity, and consequently, the mechanical properties of the material. Often, workpieces are subjected to post-heat treatment to reduce residual stresses or to achieve the desired material properties. The theoretical part of the thesis describes the LPBF process with a focus on the parameters and their impact on the mechanical properties of the material. The experimental part includes an analysis of the effect of laser energy density, which is regulated by the melting speed, on the mechanical properties of the AlSi10Mg alloy. One series of samples underwent annealing to reduce residual stresses, and a comparison of results with samples in the as-built state is presented. Tensile testing, three-point bending, microhardness measurement HV 0.2 and HV 0.02, and microstructure analysis in the polished state were conducted.

Keywords: SLM, LPBF, laser energy density, additive manufacturing, 3D print, heat treatment

Popis korištenih kratica

3D	Trodimenzionalno
AM	Aditivna proizvodnja (engl. <i>Additive Manufacturing</i>)
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (engl. <i>American Society for Testing and Materials</i>)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (engl. <i>Computer Aided Design</i>)
DED	Izravno energijsko taloženje (engl. <i>Direct Energy Deposition</i>)
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka (engl. <i>Face Centered Cubic</i>)
FDM	Postupak taložnog sraščivanja (engl. <i>Fused Deposition Modelling</i>)
FGM	Funkcionalno stupnjevani materijali (engl. <i>Functionally Graded Materials</i>)
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (engl. <i>International Organization for Standardization</i>)
LED	Gustoća energije lasera (engl. <i>Laser Energy Density</i>)
LPBF	Selektivno lasersko taljenje praha u komori (engl. <i>Laser Powder Bed Fusion</i>)
SEM	Skenirajući elektronski mikroskop (engl. <i>Scanning Electron Microscope</i>)
VED	Volumetrijska gustoća energije lasera (engl. <i>Volumetric Energy Density</i>)

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Aditivne tehnologije proizvodnje	2
2.1.	Postupak izrade proizvoda aditivnim tehnologijama	3
2.2.	Inovativne mogućnosti aditivne proizvodnje	4
2.3.	Aditivne tehnologije u usporedbi s konvencionalnim tehnologijama.....	5
3.	Selektivno lasersko taljenje praha u komori - LPBF	6
3.1.	Povijesni razvoj LPBF postupka	6
3.2.	Opis LPBF postupka	7
3.3.	Parametri LPBF postupka	9
3.3.1.	<i>Snaga i vrsta lasera.....</i>	<i>11</i>
3.3.2.	<i>Strategije skeniranja</i>	<i>12</i>
3.4.	Materijali	13
3.4.1.	<i>Proizvodnja metalnog praha.....</i>	<i>13</i>
3.4.2.	<i>Metode atomizacije</i>	<i>14</i>
3.4.3.	<i>Karakteristike praha</i>	<i>15</i>
4.	Aluminij	16
4.1.	Aluminijeve legure	17
4.2.	AlSi10Mg	18
5.	Karakteristike izradaka dobivenih LPBF postupkom	20
5.1.	Gustoća.....	20
5.2.	Kvaliteta površine	22
5.3.	Mikrostruktura i mehanička svojstva	23
5.4.	Zaostala naprežanja	25
6.	Eksperimentalni dio	27
6.1.	Definiranje dimenzija ispitnih uzoraka	27
6.2.	Uređaj i materijal za izradu uzoraka.....	29
6.2.1.	<i>EOS M 290.....</i>	<i>29</i>
6.2.2.	<i>AlSi10Mg.....</i>	<i>31</i>
6.3.	Proces izrade uzoraka na EOS M 290 printeru	32
6.4.	Toplinska obrada ispitnih uzoraka	40
6.5.	Statičko vlačno ispitivanje	42
6.5.1.	<i>Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja</i>	<i>45</i>
6.6.	Ispitivanje savojne čvrstoće	50
6.6.1.	<i>Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće</i>	<i>52</i>
6.7.	Ispitivanje mikrotvrdoće	55
6.7.1.	<i>Oblaganje uzoraka.....</i>	<i>55</i>
6.7.2.	<i>Brušenje i poliranje površine uzoraka</i>	<i>56</i>
6.7.3.	<i>Postupak ispitivanja mikrotvrdoće.....</i>	<i>57</i>
6.7.4.	<i>Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće.....</i>	<i>58</i>
6.8.	Analiza mikrostrukture.....	60
7.	Zaključak.....	62
8.	Literatura.....	64
	Popis slika	67

Popis tablica.....	70
Prilozi.....	71
Prilog 1.....	71
Prilog 2.....	72
Prilog 3.....	73
Prilog 4.....	74
Prilog 5.....	75
Prilog 6.....	76
Prilog 7.....	77
Prilog 8.....	78
Prilog 9.....	79
Prilog 10.....	80
Prilog 11.....	81

1. Uvod

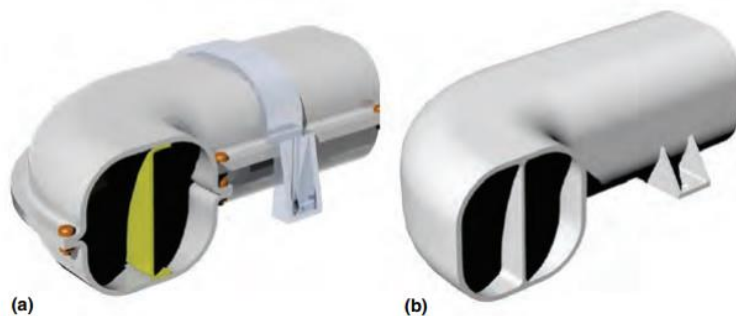
Postupci aditivne proizvodnje (engl. *Additive Manufacturing - AM*) širom svijeta poznatiji su pod okriljem riječi „3D printanje“ i predstavljaju novi način izrade proizvoda. Iako početak aditivnih tehnologija datira iz kraja 20. stoljeća, njihova komercijalizacija je zaživjela tek nakon usavršavanja postupaka proizvodnje materijala za aditivnu proizvodnju, prvenstveno metala u praškastom obliku, usavršavanjem strojeva i istraživanjima znanstvenika o utjecaju parametara na mehanička svojstva gotovog proizvoda. Aditivne tehnologije obuhvaćale su postupke brze izrade prototipa (engl. *Rapid prototyping*) i korištene su za prototipiranje – izradu komponenti koje bi prethodile razvoju konačnog konstrukcijskog rješenja prije serijske proizvodnje [1]. Današnji sofisticirani strojevi i tehnologija omogućavaju proizvodnju sve složenijih proizvoda čija mehanička svojstva zadovoljavaju postavljene zahtjeve i kao takvi mogu u eksploataciju. Iz tog razloga nije u potpunosti ispravno svrstavati proizvode proizvedene postupcima aditivne proizvodnje u kategoriju prototipa.

Konvencionalne tehnologije poput lijevanja, kovanja i obrade odvajanjem čestica i dalje su superiornije u pogledu velikoserijske i masovne proizvodnje. Aditivne tehnologije nisu razvijene s ciljem korištenja za serijsku proizvodnju, već za izradu komponenti vrlo složene geometrije koju bi konvencionalnim tehnologijama bilo vrlo teško ili nemoguće izraditi. Glavne prednosti aditivnih tehnologija u odnosu na konvencionalne postupke su eliminacija troškova izrade kalupa i alata za proizvodnju, kraće vrijeme od ideje do gotovog proizvoda, minimalan gubitak materijala i mogućnost konstrukcijskog smanjenja volumena, odnosno mase. Aditivna proizvodnja značajna je za zrakoplovnu, svemirsku i vojnu industriju, ali sve više primjene nalazi i u medicini te stomatologiji.

Postupak selektivnog laserskog taljenja praha u komori (engl. *Laser Powder Bed Fusion - LPBF*) jedan je od najzastupljenijih postupaka aditivne proizvodnje komponenti od metala. Kvaliteta proizvoda proizvedenih LPBF postupkom ovisi o više parametara te je potrebno odabrati optimalne vrijednosti kako bi se dobila što homogenija struktura i zadovoljavajuća mehanička svojstva. Ovaj diplomski rad razmatra utjecaj brzine taljenja i žarenja za redukciju zaostalih naprezanja na mehanička svojstva AlSi10Mg legure.

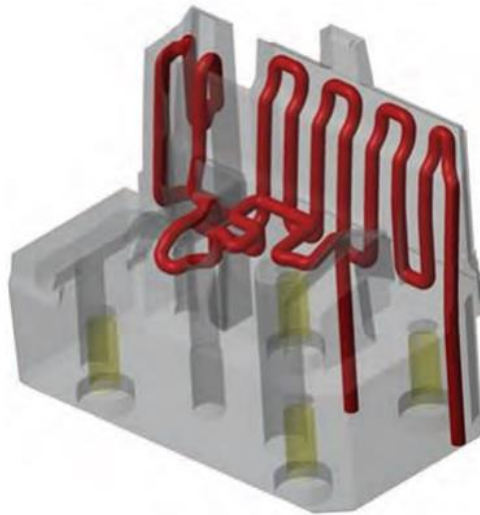
2. Aditivne tehnologije proizvodnje

Standard koji definira terminologiju vezanu za aditivne tehnologiju, ISO/ASTM 52900:2021 opisuje aditivnu proizvodnju kao postupak spajanja materijala radi stvaranja proizvoda iz 3D modela izrađenog na računalu, najčešće nanošenjem materijala sloj po sloj, za razliku od klasičnih postupaka proizvodnje odvajanjem materijala [2]. Prema navedenoj normi postoji sedam glavnih postupaka aditivne proizvodnje. Raznolikost postupaka omogućuje proizvodnju širokog spektra proizvoda koji variraju od jednostavnih i jeftinih sve do kompleksnih i skupocjenih. Ekonomični postupci poput postupka taložnog srašćivanja (engl. *Fused Deposition Modelling - FDM*) prilično su zastupljeni i cijena proizvodnje je manja u odnosu na konvencionalne postupke. Drugu krajnost predstavljaju postupci poput srašćivanja/taljenja praškastog materijala u komori (engl. *Powder Bed Fusion - PBF*) ili postupak direktnog taloženja izvorom energije (engl. *Direct Energy Deposition - DED*). Riječ je o skupim tehnologijama zbog visoke cijene ulaznih materijala, strojeva i naknadne obrade. Aditivne tehnologije vrlo su uspješne u smanjenju broja komponenti proizvoda čime se štedi vrijeme sastavljanja. Jedan takav primjer prikazan je na slici 2.1 gdje je sklop od 16 dijelova zamijenjen jednim proizvodom pomoću aditivne tehnologije [3].



Slika 2.1 Proizvod od više komponenti (a) reduciran na jednu komponentu (b) [3]

Također, važno je napomenuti da aditivne tehnologije omogućuju proizvodnju proizvoda sa geometrijskim značajkama koje nisu izvedive konvencionalnim tehnologijama. Dobar primjer su unutarnji kanali za hlađenje koji su karakteristični za kalupe i alate u ljevarstvu [3]. Na slici 2.2 prikazan je alat za injekcijsko prešanje s unutarnjim kanalima za hlađenje koji je proizveden aditivnim tehnologijama. Kao rezultat vrijeme hlađenja je smanjeno za 55% i napravljena je optimizacija procesa gdje je ciklus injekcijskog prešanja skraćen za 25% [3].



Slika 2.2 Alat za injekcijsko prešanje s unutarnjim kanalima za hlađenje proizveden aditivnom tehnologijom [3]

2.1. Postupak izrade proizvoda aditivnim tehnologijama

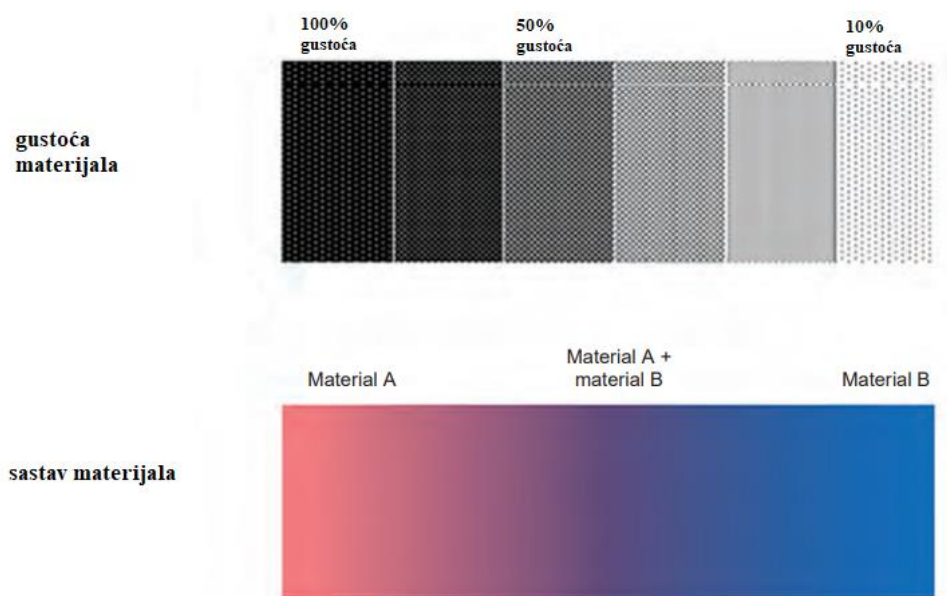
Postupak proizvodnje započinje skeniranjem postojećeg ili modeliranjem željenog proizvoda u nekom od CAD softvera kako bi se dobio 3D model. Kako bi upravljački program AM stroja mogao učitati 3D model, potrebno ga je prethodno konvertirati u STL format. Koraci koji slijede nakon prebacivanja datoteke na AM stroj uključuju podešavanje parametara postupka, postupak izrade, uklanjanje i naknadnu obradu [1].



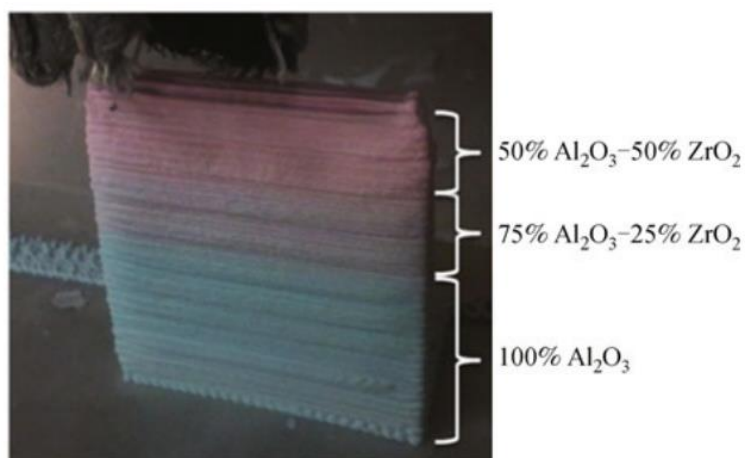
Slika 2.3 Koraci aditivne proizvodnje [1]

2.2. Inovativne mogućnosti aditivne proizvodnje

Proizvodnja aditivnim tehnologijama odvija se sloj po sloj, što pruža mogućnost modifikacije parametara po svakom sloju čime je moguće ostvariti različita svojstva materijala. Upravo su aditivne tehnologije omogućile proizvodnju funkcionalno stupnjevanih materijala (engl. *Functionally graded materials - FGM*) čija se struktura i sastav mogu razlikovati po volumenu. Optimiranje kompleksnih proizvoda je pojednostavljeno i mogu se postići različite gustoće i svojstva materijala unutar istog volumena proizvoda. Na ovaj način može se smanjiti ukupna masa finalnog proizvoda, utjecati na distribuciju topline i hlađenje te mehanička svojstva pojedinog segmenta, što ovu tehnologiju čini neophodnom za sofisticirane industrije [3].



Slika 2.4 Funkcionalno stupnjevani materijali [3]

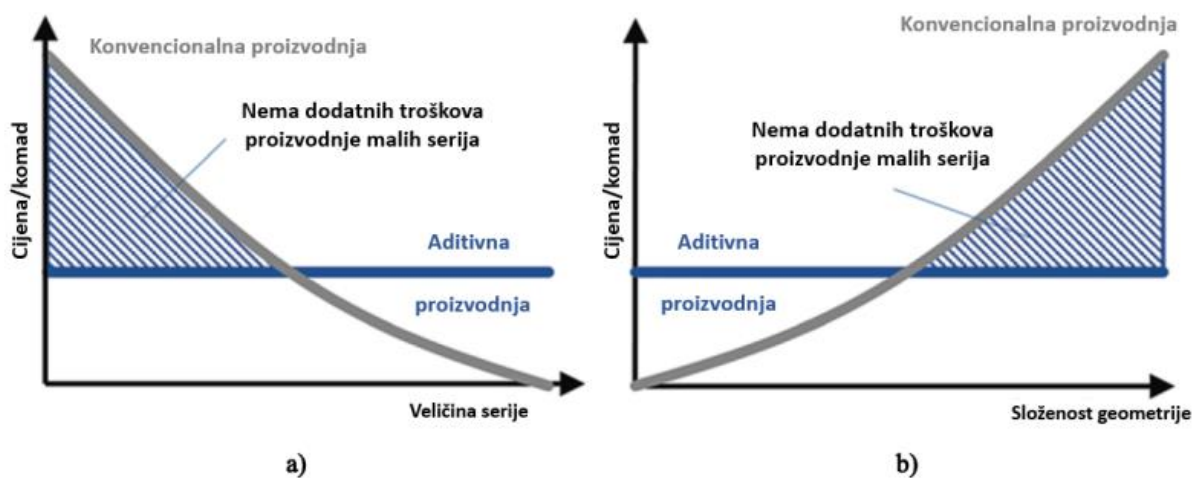


Slika 2.5 Primjer funkcionalnog stupnjevanog materijala od 100% Al₂O₃ do 50% Al₂O₃ i 50% ZrO₂

[4]

2.3. Aditivne tehnologije u usporedbi s konvencionalnim tehnologijama

Postupci aditivne tehnologije prikladni su za proizvodnju proizvoda kompleksne geometrije uz minimalan otpadni materijal. U usporedbi s konvencionalnim tehnologijama aditivna proizvodnja ima nekoliko nedostataka poput male proizvodnosti, ograničenog broja dostupnih materijala, ograničen je konačni volumen proizvoda zbog manjih radnih prostora stroja te lošija kvaliteta površine [3]. Također, bitne parametre predstavljaju veličina serije i složenost proizvoda. Serijska proizvodnja i dalje je najisplativija konvencionalnim tehnologijama te jedinična cijena proizvoda pada povećanjem komada u seriji. Međutim, kompleksni proizvodi zahtijevaju više proizvodnih koraka, alata i različitih strojeva što utječe na povećanje jedinične cijene. Proizvodnja aditivnim tehnologijama pokazuje linearnu, konstantnu ovisnost jedinične cijene i veličine serije, odnosno složenosti geometrije. Usporedba konvencionalne i aditivne proizvodnje prema spomenutim faktorima prikazana je na slici 2.6. Sjecište aditivne i konvencionalne proizvodnje predstavlja isplativost upotrebe jedne od tehnologija [5]. Vidljivo je da postupci aditivne tehnologije dolaze do izražaja kod izrazito složenih geometrija.

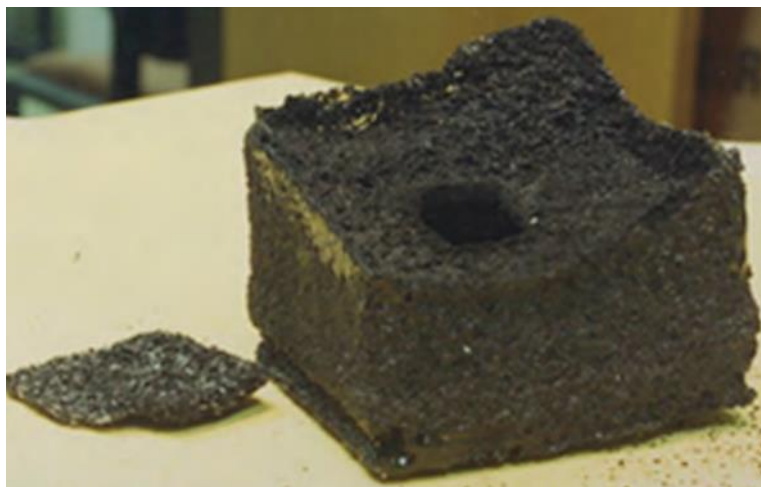


Slika 2.6 Usporedba: a) jedinična cijena o veličini serije; b) jedinična cijena o složenosti geometrije [5]

3. Selektivno lasersko taljenje praha u komori - LPBF

3.1. Povijesni razvoj LPBF postupka

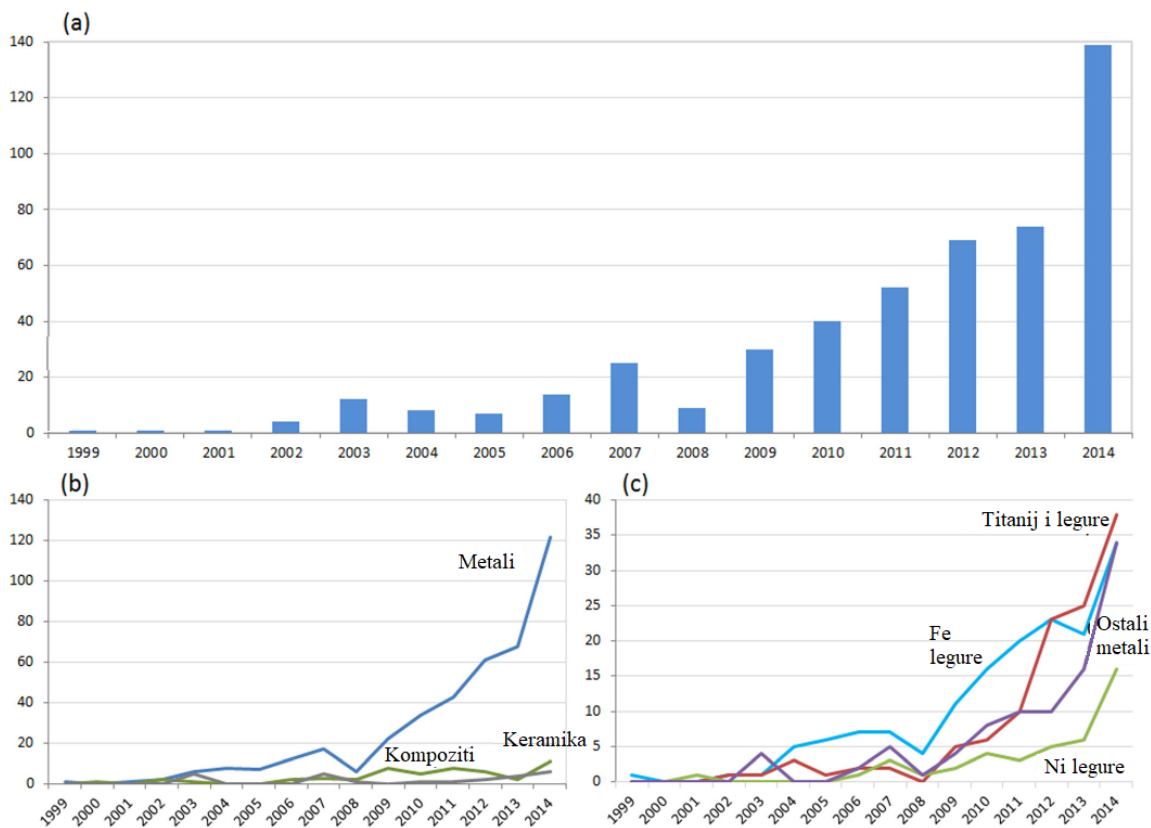
Ideja o LPBF postupku datira iz 1980.-ih godina kada je student po imenu Carl Deckard na Sveučilištu u Texasu došao na ideju razvoja tehnologije kod koje bi se pomoću koncentriranog izvora energije visoke gustoće lokalno talilo materijal u obliku praha kako bi se dobila željena geometrija. Njegov profesor Joe Beaman zajedno s njim sudjeluje u razvoju te u konačnici patentiraju tehnologiju selektivnog laserskog srašćivanja (engl. *Selective Laser Sintering - SLS*). Kako bi komercijalizirali tehnologiju osnivaju tvrtku DMT Corp. koja 1992. predstavlja stroj *Sinterstation 2000*. Tek dvije godine kasnije na tržištu se pojavljuje novi stroj EOSINT (P) 350 kojeg razvija njemačka tvrtka EOS GmbH. Ovaj način proizvodnje zainteresirao je sveučilišta i industriju te započinje međusobna suradnja s ciljem usavršavanja tehnologije za lakšu adaptaciju u proizvodne svrhe [3, 6]. Prvi proizvedeni primjerak izradio je Deckard 1986. godine od akrilonitril butadien stiren (ABS) polimera. Primjerak je prikazan na slici 3.1, bočna stranica je duljine 50 mm [3].



Slika 3.1 Prvi primjerak proizveden od ABS materijala postupkom s komorom praha (engl. Powder bed) [3]

Broj istraživanja i objavljenih znanstvenih radova na temu LPBF postupka u kontinuiranom je porastu od 1999. godine. Pad u broju publikacija uočen je u 2008. godini kada je došlo do smanjenja prihoda u AM sektoru zbog svjetske gospodarske krize. Istraživanja su uglavnom bila usmjerena na metalne materijale i prate sličan trend (slika 3.2). U posljednjih nekoliko godina uočen je porast istraživanja kompozitnih materijala i keramika za LPBF postupak. U početku čelici su predvodili po broju istraživanja u odnosu na ostale materijale, međutim oko 2010. godine uočen

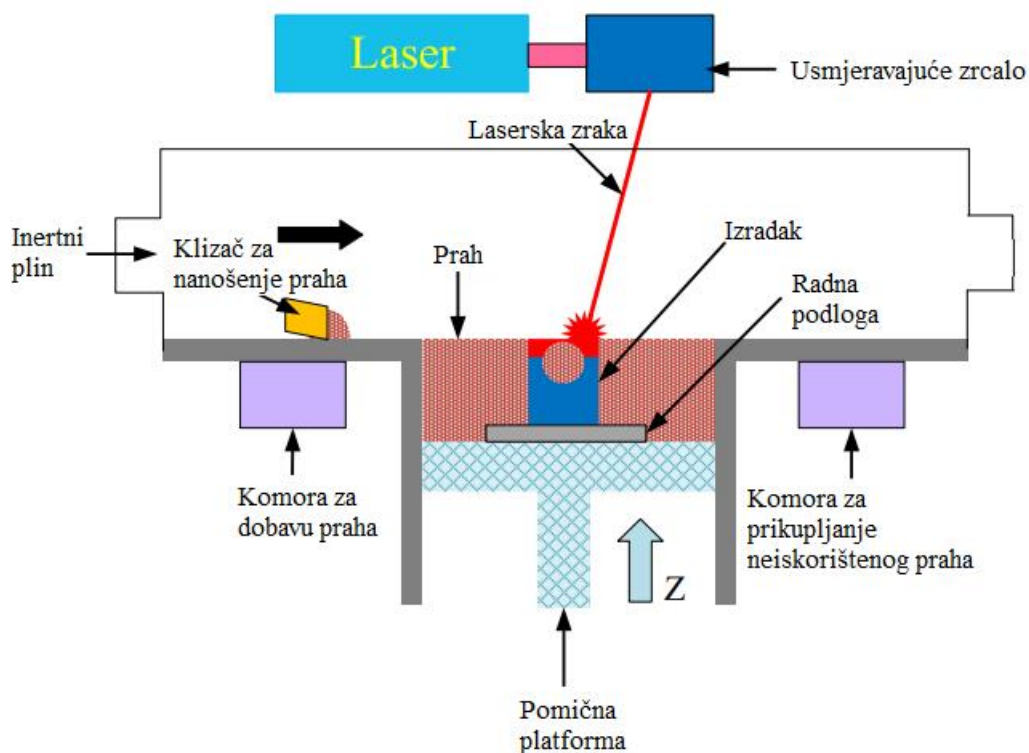
je nagli porast interesa znanstvene zajednice oko titanija. Jedan od razloga je lakša proizvodnja i personalizacija dentalnih i medicinskih implantata koje karakteriziraju odlična mehanička svojstva i mala gustoća. Također, porast je uočen i kod legura na bazi nikla koje su pogodne za rad na visokim temperaturama [7].



Slika 3.2 a) broj znanstvenih radova o LPBF postupku od 1999. do 2014. ; b) broj znanstvenih radova o LPBF postupku metalnih materijala, keramika i kompozita ; c) broj znanstvenih radova o LPBF postupku prema kategoriji metalnih materijala [7]

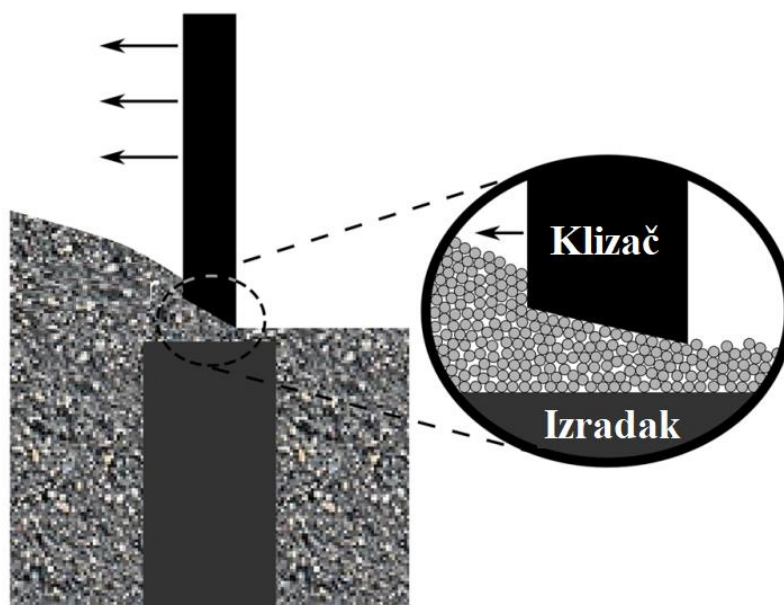
3.2. Opis LPBF postupka

Selektivno lasersko taljenje predstavlja tehnologiju spajanja prahova u komori i jedan je od najčešće korištenih postupaka aditivne proizvodnje metalnih materijala (slika 3.3) [5]. Postupak se temelji na lokalnom taljenju praha pomoću laserske zrake sloj po sloj. Prah se nanosi na radnu podlogu u vrlo tankim slojevima čija je debljina obično u granicama od 30 μm do 100 μm [3]. Postupak započinje izradom 3D modela i pripremom u nekom od programa za uslojavanje (engl. *slice*) kako bi model podijelili na konture presjeka od kojih svaka predstavlja jedan sloj za ispis. Nakon učitavanja pripremljenog modela slijedi punjenje stroja prahom. Radna komora pod zaštitom je inertnog plina (argon ili dušik) kako bi se spriječila oksidacija metala prilikom taljenja laserom.



Slika 3.3 Princip rada LPBF postupka [8]

Za taljenje metalnih materijala uglavnom se koriste laseri s optičkim vlaknom čija je snaga u rasponu od 300 W do 500 W. [3] Nakon taljenja prvog sloja pomična platforma spušta se za debljinu nanesenog sloja i pomoću klizača nanosi se novi sloj praha te se postupak ponavlja sve dok se ne postigne geometrija ulaznog 3D CAD modela (slika 3.4) [5].



Slika 3.4 Nanošenje sloja praha pomoću klizača [9]

Jedna od karakteristika LPBF postupka je brzo skrućivanje uz velike brzine ohlađivanja od 10^5 do 10^6 °C/s [10]. Navedena pojava može dovesti do toplinskih naprezanja koje nerijetko uzrokuju pukotine. Predgrijavanje radne podloge preporučeno je za smanjenje toplinskih naprezanja i mogu se povećati konačne vrijednosti mehaničkih svojstava. Također, primjenjuju se i potporne strukture, koje osim za lakše uklanjanje izrađenog modela od radne podloge služe i za sprječavanje deformacije tankih stjenki uslijed brzog hlađenja [5, 10].

Najčešći upotrebljavani materijali su: aluminij i njegove legure (AlSi10Mg, AlSi7Mg0.6, AlSi9Cu3), nikal i njegove legure (HX, IN625, IN718, IN939), željezo i njegove legure (316L, H13, 1.2709), titanij i njegove legure (Ti6Al4V, TA15), kobalt i njegove legure (CoCr28Mo6), bakar i njegove legure (CuNi2SiCr, CuSn10). Osim navedenih metala, mogu se i koristiti ostali metali koji se mogu proizvesti u obliku praha [5].

Literatura pokazuje da LPBF postupak omogućava potpuno taljenje materijala čime se mogu proizvesti komponente bez poroznosti, odnosno moguće je postići gotovo 100% teorijske gustoće. Cilj je postići što veće vrijednosti gustoće, obzirom da porozitet, pukotine i uključine u strukturi rezultiraju manjim vrijednostima mehaničkih svojstava [5, 11].

U tablici 1 prikazane su neke od glavnih specifikacija LPBF postupka.

Tablica 1 Specifikacije LPBF postupka [7, 12]

Kompatibilni materijali	Al legure, Ni legure, Fe legure, Ti legure, Cu legure, Co legure...
Dimenzijska točnost	± 0.1 mm
Dimenzije radnog prostora	250 x 150 x 150 mm – 500 x 280 x 360 mm
Debljina sloja	30 – 100 μ m
Površinska hrapavost	~ 20 μ m
Relativna gustoća	> 90%

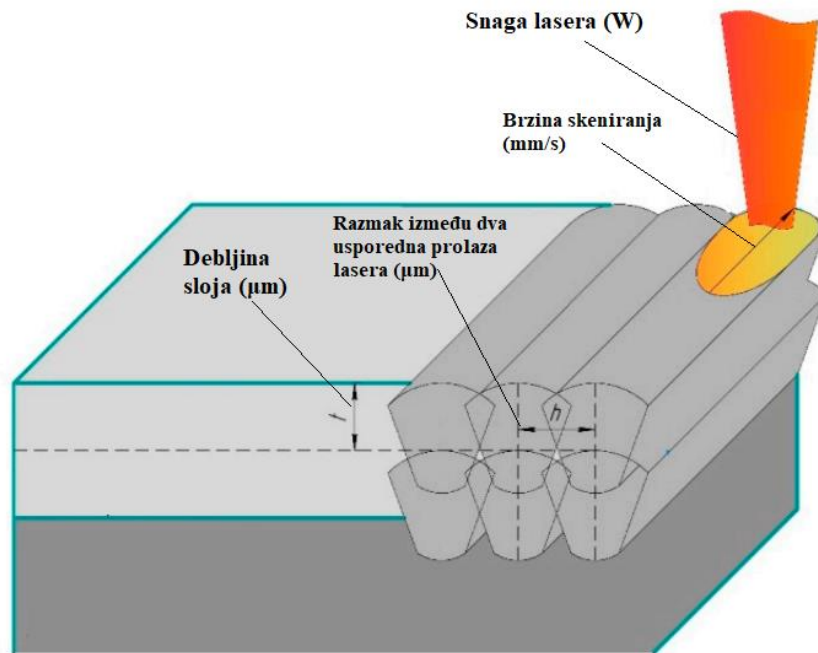
3.3. Parametri LPBF postupka

Odabir parametara diktira mikrostrukturu i mehanička svojstva konačnog proizvoda i ključan je korak u svim aditivnim tehnologijama proizvodnje. Brojni fizikalni fenomeni pojavljuju se tijekom LPBF postupka, uključujući apsorpciju i refleksiju laserske zrake, izmjenu topline, kemijske reakcije i fazne pretvorbe [13]. Razumijevanje pozadine procesa može pomoći u proizvodnji izratka bez pogrešaka na efikasan način odabirom pravilnih parametara.

Postoje četiri glavna parametara koji se mogu izraziti preko gustoće energije po volumenu (engl. *Volumetric Energy Density* - VED) (u nekoj literaturi naziva se i *Laser Energy Density* –

LED, odnosno gustoća energije lasera) [13]. *VED* predstavlja toplinu koja je unesena u materijal [5]. *VED* definiraju četiri osnovna parametra koje je moguće individualno podešavati: snaga lasera P , W , brzina skeniranja v , mm/s , razmak između dva usporedna prolaza lasera h , μm i debljina sloja t , μm (slika 3.5) [5, 13].

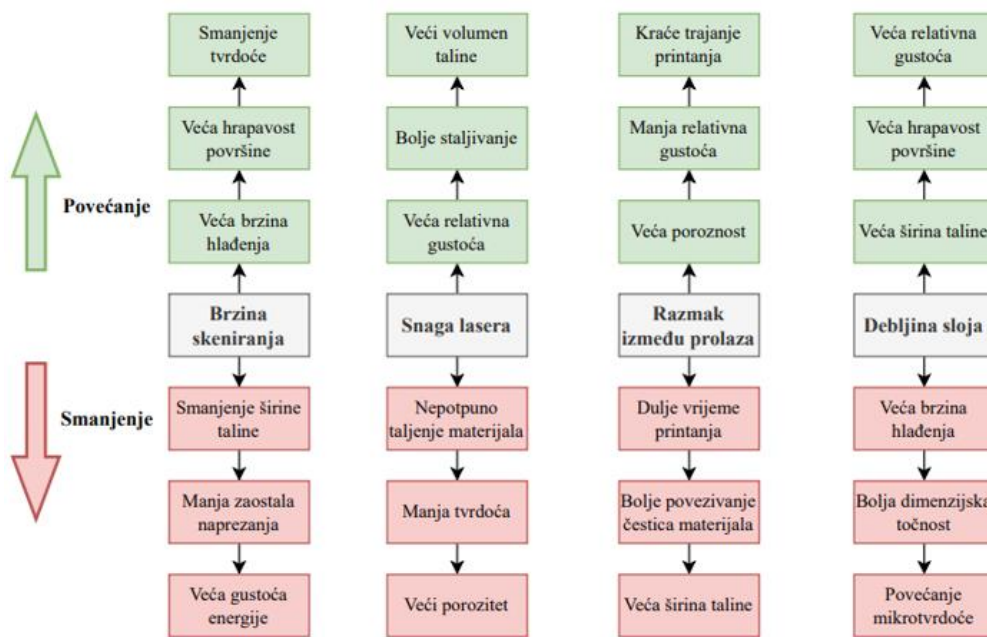
$$VED = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \text{ , } J/mm^3 \quad (1)$$



Slika 3.5 Prikaz glavnih parametara postupka [14]

Iznos gustoće energije moguće je izračunati prema jednadžbi (1). Ona direktno utječe na oblik, veličinu, temperaturu i brzinu skrućivanja taljenog materijala. Općenito vrijedi da veće vrijednosti *VED*-a uzrokuju veći volumen taline i dobije se veća gustoća materijala [5, 13]. Snaga lasera u najvećoj mjeri utječe na *VED* i nužna je za taljenje materijala. Mala snaga lasera i mala brzina skeniranja daju nedovoljnu gustoću energije za taljenje i povezivanje čestica materijala. Optimum se postiže povećanjem snage lasera i smanjenjem brzine skeniranja, međutim postoji i ograničenje. Prevelika gustoća energije uzrokovana većom snagom lasera i manjom brzinom skeniranja potencijalno može uzrokovati isparavanje materijala i nastanak poroziteta, ali i pojavu sferoidizacije koja je svakako nepoželjna [5, 11, 13].

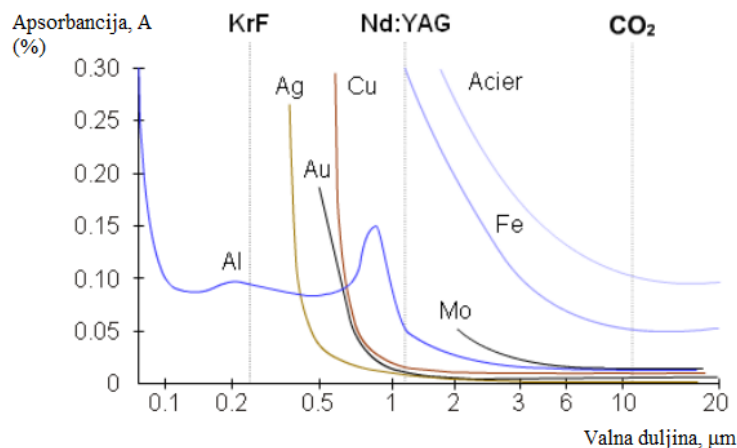
Utjecaji četiri navedena parametra prikazani su na slici 3.6.



Slika 3.6 Utjecaj glavnih parametara LPBF postupka [13]

3.3.1. Snaga i vrsta lasera

Proces selektivnog laserskog taljenja obično koristi Nd:YAG i fiber laser čija je valna duljina otprilike 1,06 μm i CO₂ laser valne duljine 10,6 μm kao izvor energije [3]. Vrsta materijala koji se koristi u LPBF postupku i apsorpcijski koeficijent diktiraju tip lasera. Apсорpcijski koeficijent je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo optičkog sredstva da apsorbira elektromagnetske valove [15]. Nd:YAG laseri emitiraju manje valne duljine koje su pogodne za materijale poput metala i neoksidne keramike koji ih bolje apsorbiraju. Polimeri i oksidna keramika puno bolje apsorbiraju veće valne duljine pa se za njihovu preradu koriste CO₂ laseri [16, 17].



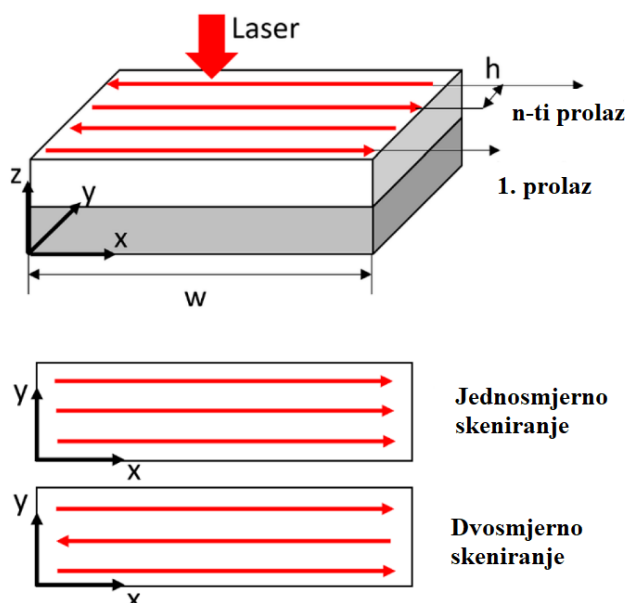
Slika 3.7 Apсорpcijski koeficijent pojedinih metala [18]

3.3.2. Strategije skeniranja

Strategija skeniranja predstavlja putanju vođenja laserske zrake po nanesenom prahu kako bi se izgradio sloj, odnosno više slojeva. Odabirom strategije skeniranja može se utjecati na ukupno vrijeme izrade proizvoda i kvalitetu u pogledu mehaničkih svojstava te dimenzijsku točnost [17].

Osim četiri parametara koji utječu na VED, strategija skeniranja može se smatrati dodatnim parametrom koji utječe na temperaturni gradijent. Pojave poput zaostalih naprezanja i sferoidizacije taline (engl. *balling*) mogu se regulirati strategijom skeniranja [19].

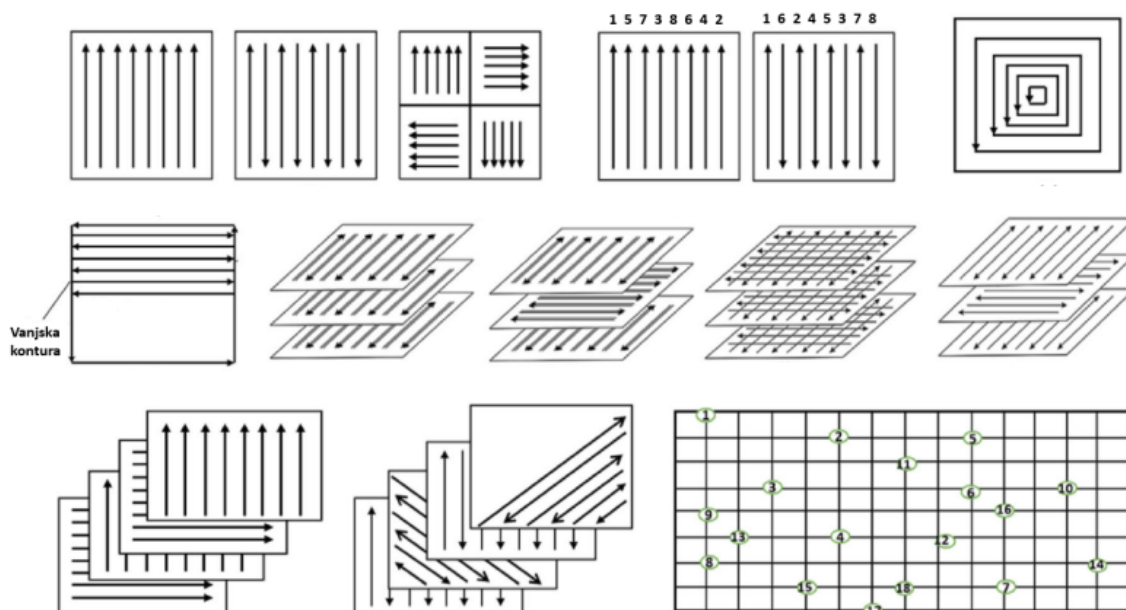
Jednosmjerna i dvosmjerna strategija skeniranja (slika 3.8) pripadaju u najjednostavnije strategije vođenja lasera koje su definirane dugim vektorima. Pri jednosmjernom skeniranju kretanje lasera je uvijek isto, dok je kod dvosmjernog skeniranja (često nazivano i cik-cak skeniranje) kretanje lasera definirano paralelnim vektorima suprotne orijentacije [19].



Slika 3.8 Jednosmjerna i dvosmjerna strategija skeniranja [20]

Dugi vektori po kojima se odvija skeniranje mogu uzrokovati povećana zaostala naprezanja, što ima negativni utjecaj na kvalitetu izratka. Kao rješenje problema predložena je strategija šahovske ploče (engl. *Island/chessboard scanning strategy*) koja dijeli površinu na manje kvadrate koji sadrže kratke vektore koji mogu biti različitih smjerova i orijentacija. Koristi se uglavnom za izradu dijelova većih dimenzija [16, 19].

Neke od mogućih strategija skeniranja prikazane su na slici 3.9.

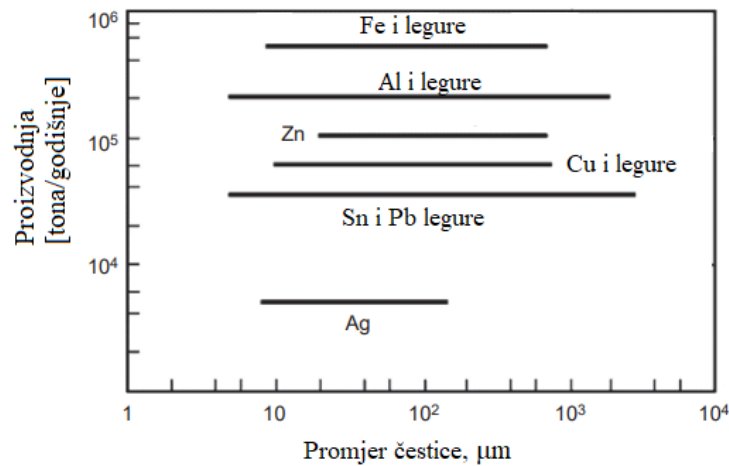


Slika 3.9 Primjeri različitih strategija skeniranja [5]

3.4. Materijali

3.4.1. Proizvodnja metalnog praha

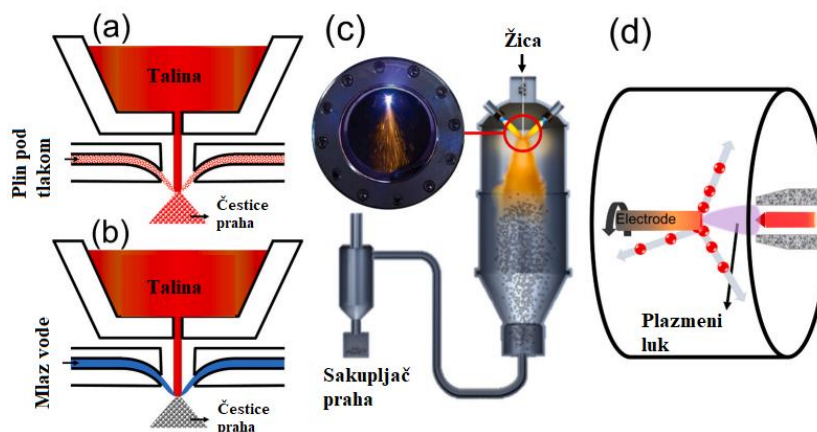
Materijali za LPBF postupak proizvedeni su u praškastom obliku. Oblik, veličina i karakteristike praha imaju utjecaj na svojstva završnog proizvoda. Svi metalni materijali mogu se proizvesti u praškastom obliku i različite tehnologije proizvodnje praha omogućuju preciznu kontrolu njihovih kemijskih i fizikalnih svojstava [3]. Najznačajnije postupci proizvodnje praha su mehanički i kemijski. Najčešće korištene metode su atomizacija vodom i plinska atomizacija, mljevenje, elektrolitički postupak i kemijske metode poput redukcije oksida [3]. Svaka od navedenih metoda razlikuje se po proizvodnosti, ali i kemijskim i fizikalnim svojstvima dobivenog praha. Elektrolitički postupak i kemijske metode proizvode metalne prahove visoke čistoće, izvrsnih svojstava i vrlo male veličine čestica. U današnje vrijeme atomizacija je najzastupljenija metoda proizvodnje prahova za aditivnu proizvodnju kojom se mogu proizvesti čestice praha gotovo idealno sferične geometrije u veličinama od 10 do 500 μm [3, 21]. Veličine čestica i proizvodnja pojedinog metalnog praha postupkom atomizacije prikazana je na slici 3.10.



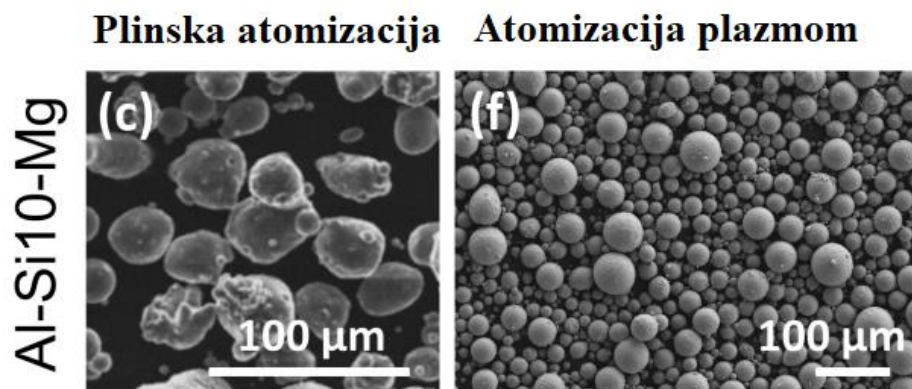
Slika 3.10 Veličina čestica i količina proizvedenog praha postupkom atomizacije [3]

3.4.2. Metode atomizacije

U metode atomizacije ubrajaju se atomizacija vodom, atomizacija plinom, atomizacija plazmom i centrifugalna atomizacija (slika 3.11). Navedeni postupci omogućuju dobivanje prahova visoke čistoće izravno iz taline čime se smanjuje potreba za daljnjom obradom. Svi procesi koriste izvor visoke energije za taljenje materijala koji se u kontroliranoj atmosferi hladi i skrućuje. Kod plinske atomizacije prvi korak uključuje taljenje čistog ili predlegiranog ingota u indukcijskoj peći. Talina pod utjecajem gravitacije prolazi kroz mlaznicu u atomizacijsku komoru gdje se pomoću strujanja plina pod tlakom atomizira. Najčešće korišteni plinovi su argon i dušik [21]. Atomizacija plazmom koristi polazni materijal u obliku žice koji se tali i atomizira pod utjecajem plazmenog luka. Dobivene čestice praha kvalitetnije su u odnosu na druge postupke atomizacije jer nastaju gotovo idealno sferične čestice (slika 3.12) [16, 21].



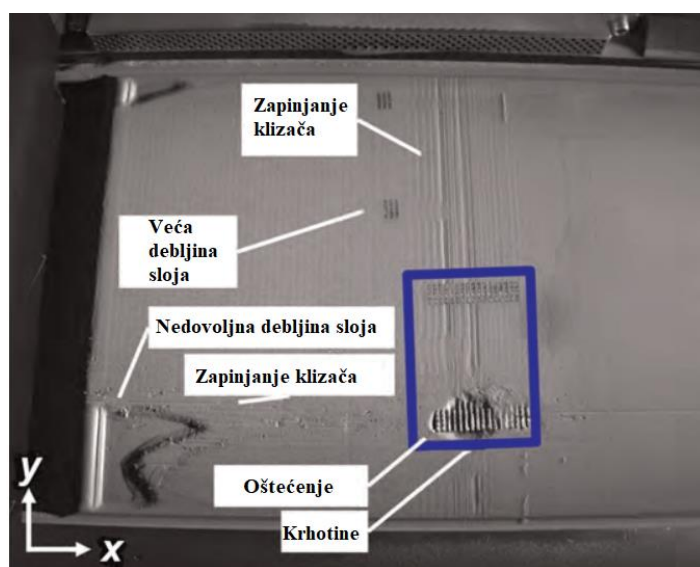
Slika 3.11 Metode atomizacije; a) atomizacija plinom; b) atomizacija vodom; c) atomizacija plazmom; d) centrifugalna atomizacija rotirajućom elektrodom [21]



Slika 3.12 Usporedba veličine i oblika čestica AlSi10Mg metalnog praha dobivenog plinskom atomizacijom i atomizacijom plazmom [21]

3.4.3. Karakteristike praha

Bitan parametar LPBF postupka je kvaliteta metalnog praha. Udio poroziteta, mehanička svojstva, geometrijska točnost i kvaliteta površine neke su od stavki koje mogu biti regulirane čistoćom, morfologijom i veličinom čestica praha. Mala veličina čestica praha i sferična morfologija idealna su kombinacija za postizanje optimalnih svojstava. Prah dobiven atomizacijom vodom u pravilu se ne koristi za ovaj postupak zbog svoje nepravilne morfologije čestica koja negativno utječe na tečnost praha (engl. *Powder flowability*) i uzrokuje probleme pri nanošenju praha (slika 3.13) u vidu različite debljine sloja što dovodi do manjih vrijednosti relativne gustoće konačnog proizvoda [3].



Slika 3.13 Pogreške pri nanošenju metalnog praha [3]

4. Aluminij

Činjenica da je aluminij drugi metal na ljestvici po godišnjoj proizvodnji, odmah iza željeza, govori o njegovoj važnosti kao tehničkom materijalu. U prirodi se nalazi u obliku oksida te se čisti aluminij izdvaja postupkom elektrolize, koji je prilično energetski zahtjevan proces. Elementarni aluminij je vrlo mekan, duktilan i karakterizira ga manja vlačna čvrstoća. Iz tog razloga se danas koristi u obliku aluminijevih legura čija se mehanička svojstva mogu regulirati legirnim elementima i različitom vrstom toplinske obrade [22].

Tri glavna svojstva aluminijskog materijala su: [23]

1. Povoljan omjer čvrstoće i gustoće (R_m/ρ , naziva se i specifična čvrstoća), osobito u obliku legura. Gustoća aluminijska iznosi 2700 kg/m^3 što je otprilike trećina gustoće čelika, pa se koristi za potrebe zrakoplovne i automobilske industrije.
2. Najpovoljniji omjer električne vodljivosti i gustoće među svim metalima.
3. Aluminij ima velik afinitet prema kisiku, ali ipak je korozijski postojan.

U tablici 2 navedena su osnovna svojstva aluminijska.

Tablica 2 Fizikalna i mehanička svojstva aluminijska [22, 23]

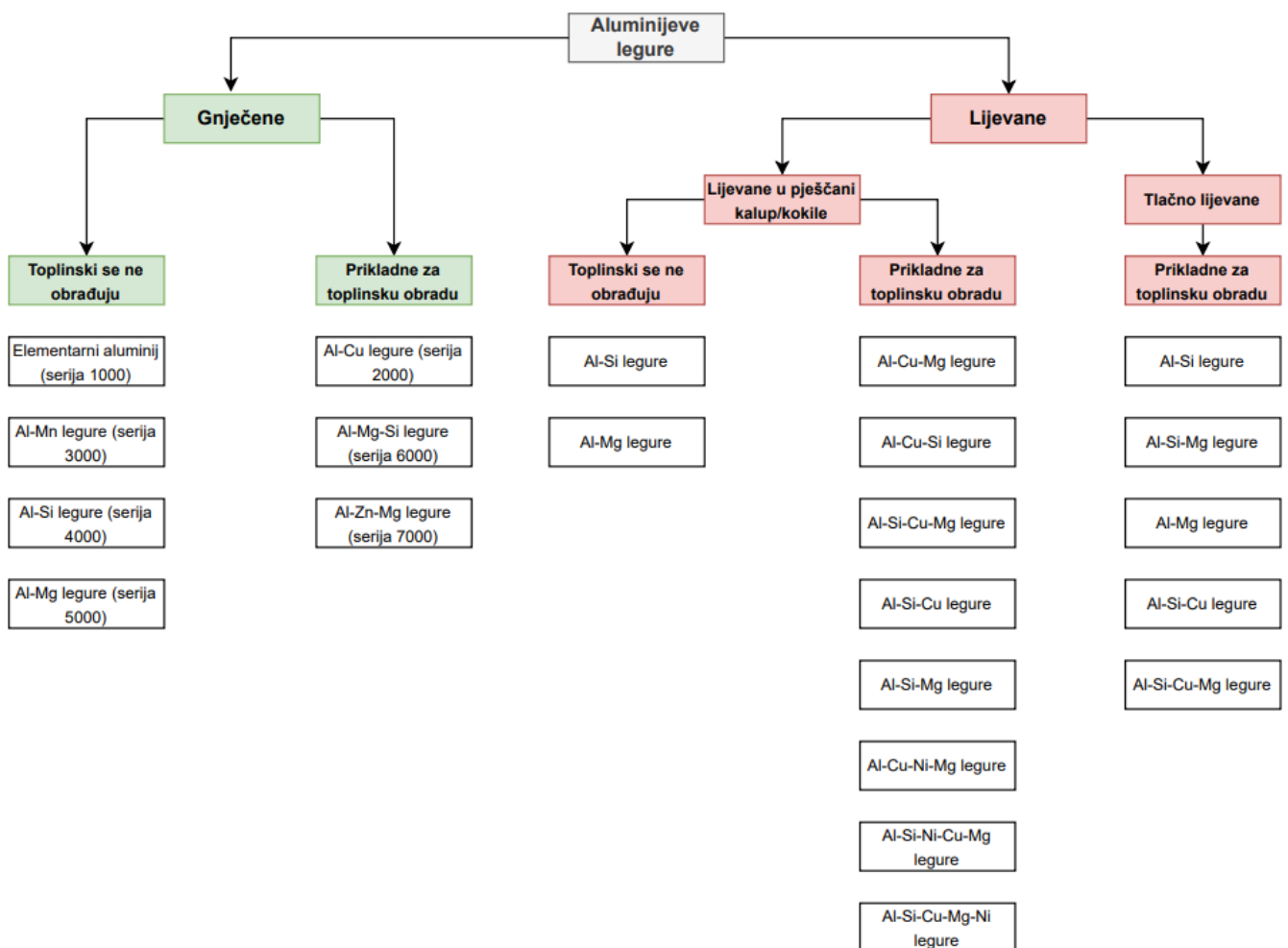
Svojstvo	Vrijednost
Gustoća, kg/m^3	2700
Talište, °C	660
Modul elastičnosti, GPa	69
Toplinska rastezljivost, $10^{-6}/\text{K}$	23,8
Električna vodljivost, $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$	36...37,8
Granica razvlačenja, N/mm^2	20...120
Vlačna čvrstoća, N/mm^2	40...180
Istezljivost, %	50...4
Kristalna rešetka	Plošno centrirana kubična (FCC)

4.1. Aluminijeve legure

Dodatkom legirnih elemenata poboljšavaju se mehanička svojstva, posebno vlačna čvrstoća i tvrdoća, krutost, a moguće je utjecati i na žilavost te livljivost [23]. Legure na bazi aluminija dijele se na lijevane i gnječene (slika 4.1) [22, 23].

Glavni legirni elementi aluminijevih legura su bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn). Neke od kompleksnijih legura u svom sastavu mogu sadržavati i nikal (Ni), kobalt (Co) i druge elemente [23]. Kategorija lijevanih aluminijevih legura objedinjuje tri osnovne grupe u koje pripadaju Al-Si, Al-Mg i Al-Cu legure. Navedene legure mogu se lijevati različitim tehnologijama, poput lijevanja u pijesak, kokile i tlačno. Neke lijevane legure mogu se dodatno precipitacijski očvrstnuti, poput Al-Si-Mg legure [23].

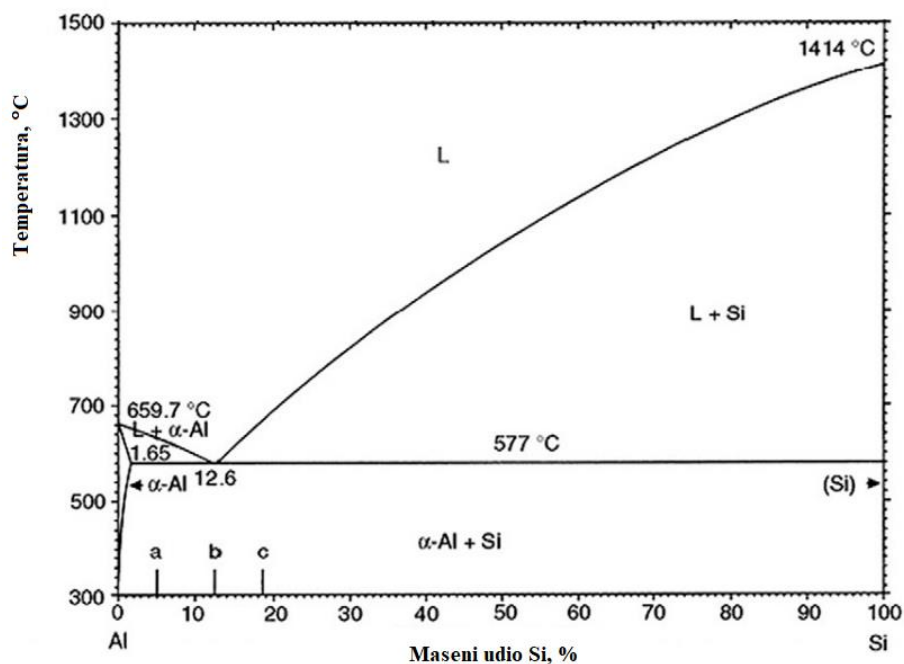
Precipitacijski očvrstljive legure imaju izrazito povoljan omjer čvrstoće i gustoće. Za precipitacijsko očvrstnuće nužni su legirni elementi poput magnezija, cinka i silicija koji će stvarati intermetalne spojeve s aluminijem ili međusobno. Postupak precipitacijskog očvrstnuća osnovni je postupak za povećanje čvrstoće i tvrdoće prethodno gnječenih legura [23].



Slika 4.1 Podjela aluminijevih legura [22, 23, 24]

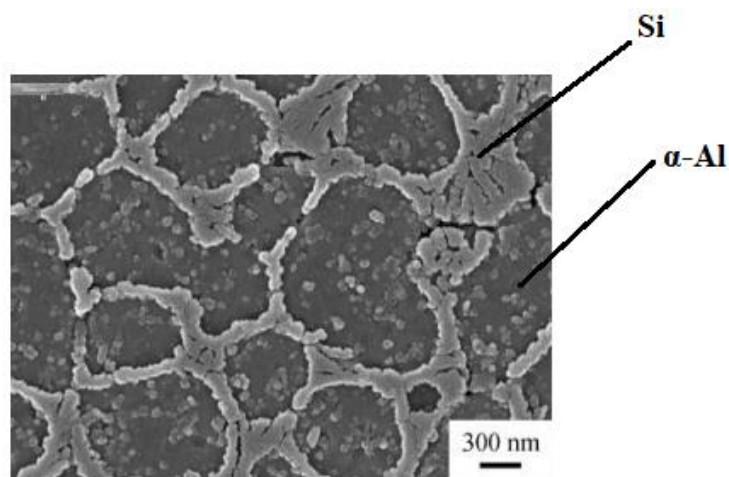
4.2. AlSi10Mg

Legura AlSi10Mg pripada u skupinu ljevačkih legura, no zbog dobrih svojstava koristi se i za proizvodnju komponenti LPBF postupkom. Al-Si legure čine 80% svih lijevanih aluminijevih legura zbog specifične čvrstoće i podložnosti toplinskoj obradi čime se mogu postići bolja svojstva konačnog proizvoda [25]. Dijagram stanja Al-Si legura je eutektičkog tipa s eutektičkom točkom pri 12,5% masenog udjela silicija i pri temperaturi od 577°C (slika 4.2). AlSi10Mg je podeutektička legura približno eutektičkog sastava. Eutektik čini oko 90% kristala mješancina aluminija, a ostatak je čisti silicij. Svojstva Al-Si legura najviše ovise o žilavim kristalima mješancima aluminija, a manje o krhkom siliciju [22, 23]. Silicij poboljšava livljivost ove skupine legura, ali i utječe na skupljanje materijala pri hlađenju i poboljšava otpornost na vruće pukotine. Magnezij zajedno sa silicijem može tvoriti intermetalnu fazu koja je raspršena u aluminijevoj matrici čime se povećava granica razvlačenja [22].



Slika 4.2 Dijagram stanja Al-Si [26]

Zbog specifične čvrstoće, malog skupljanja i niskog tališta ova je legura sve više zastupljena u aditivnim tehnologijama proizvodnje. LPBF postupak karakterizira velika brzina ohlađivanja čime se postiže sitnozrnata mikrostruktura koju čine sitna zrna α -Al s izlučenim silicijem po granicama zrna (slika 4.3) [25, 27].



Slika 4.3 Mikrostruktura AlSi10Mg legure dobivene LPBF postupkom [27]

Kemijski sastav AlSi10Mg legure prikazan je u tablici 3.

Tablica 3 Kemijski sastav AlSi10Mg legure [22, 25]

Kemijski element	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti
Maseni udio, %	~85	9,0-11,00	0,2-0,45	≤0,55	≤0,05	≤0,45	≤0,05	≤0,1	≤0,05	≤0,05	≤0,15

Pored navedenih prednosti ove legure postoji i nekoliko nedostataka u pogledu primjene za LPBF postupak. Nedostaci su vezani za metalni prah koji karakterizira visoka refleksija, visoka toplinska vodljivost i niska apsorpcija lasera te proces proizvodnje koji može rezultirati porozitetom, nepotpunim spajanjem i zaostalim napreznjima [22]. Uglavnom je potrebna i završna strojna obrada zbog hrapavosti površine koja može predstavljati koncentratore napreznja i mjesta inicijacije mikropukotina kod dinamički opterećenih strojnih dijelova.

Od naknadnih toplinskih obrada najčešće se koriste precipitacijsko očvršnuće i žarenje za redukciju zaostalih napreznja [28].

5. Karakteristike izradaka dobivenih LPBF postupkom

Prethodna poglavlja približila su princip rada i parametre LPBF postupka. Činjenica da se komponente proizvedene LPBF postupkom sve više koriste u zrakoplovnoj, automobilskoj pa i svemirskoj industriji ukazuje da je moguće postići mehanička svojstva i za najzahtjevnije primjene. Veliki interes znanstvenika za istraživanje utjecajnih parametara postupka na finalna svojstva proizvoda učinio je ovu tehnologiju kompatibilnijom za izradu kompleksnih komponenti. Relativna gustoća, kvaliteta površine, mehanička svojstva, mikrostruktura i zaostala naprezanja glavni su pokazatelji kvalitete izradaka dobivenih LPBF postupkom te su prikazani u ovom poglavlju.

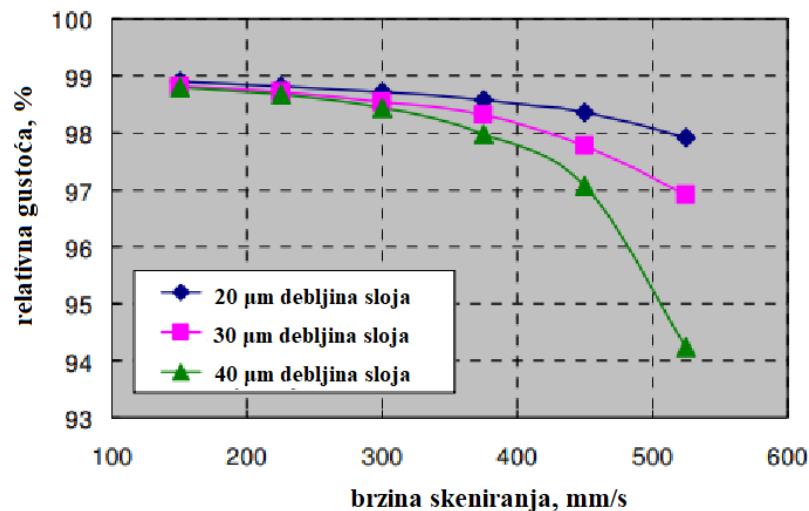
5.1. Gustoća

Kada se govori o kvaliteti izradaka LPBF postupka često se spominje relativna gustoća. Relativna gustoća jedan je od glavnih indikatora kvalitete i predstavlja omjer gustoće izratka i teorijske gustoće materijala te idealno iznosi 100%. Mehanička svojstva i ponašanje u eksploataciji u korelaciji su s relativnom gustoćom pa se nastoji optimirati parametre postupka kako bi porozitet bio minimalan. Porozitet se može pojaviti zbog zarobljenog plina prilikom brzog skrućivanja materijala ili zbog nepravilnog stapanja rastaljenih regija [11, 29]. Porozitet se negativno odražava na dinamičku izdržljivost jer svaka pora predstavlja koncentrador naprezanja. Maksimalne postignute vrijednosti relativne gustoće materijala vrlo su blizu njihovoj teorijskoj vrijednosti i prikazane su u tablici 4.

Tablica 4 Maksimalna relativna gustoća pojedinih materijala kod LPBF postupka [7]

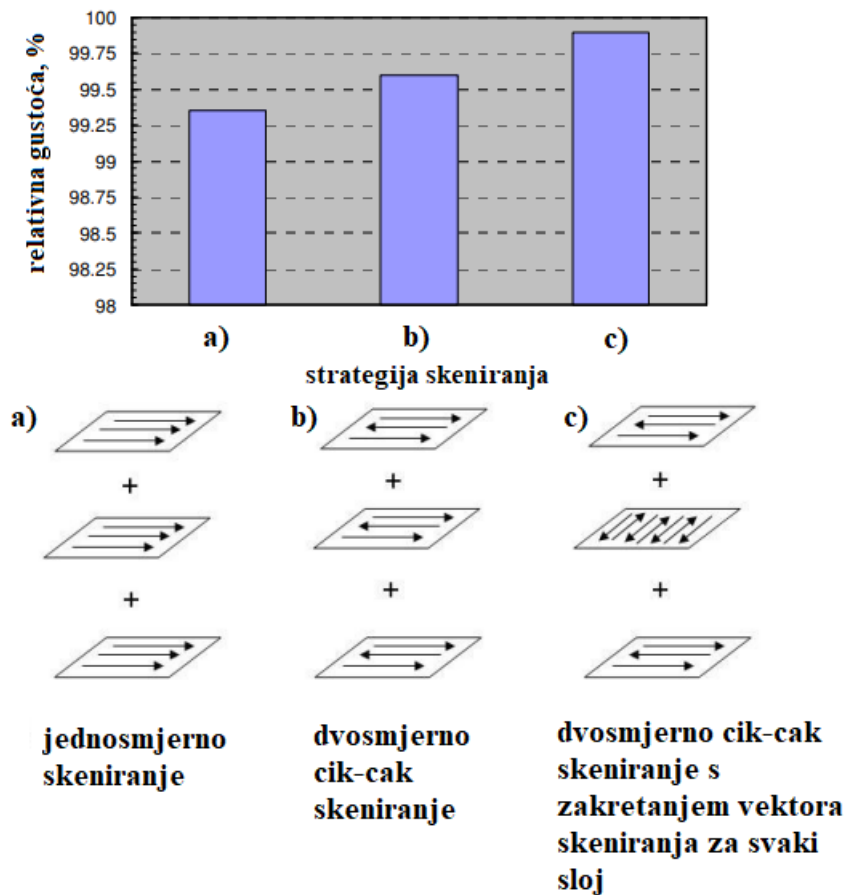
Materijal	Maksimalna postignuta relativna gustoća, %
Fe	99,00
Fe + 0,8% C	93,00
316L	99,90
H13 alatni čelik	90,00
Ti-6Al-4V	99,98
Ti-6Al-7Nb	99,95
Inconel 625	95,00
Inconel 718	99,98
Hastelloy X	99,75
Al6061	96,50
AlSi10Mg	99,50

Na vrijednost relativne gustoće moguće je utjecati parametrima postupka. Utjecaj brzine skeniranja, debljina sloja praha i strategija skeniranja jedni su od njih. Ustanovljeno je da pri manjim brzinama skeniranja debljina sloja praha ne utječe na vrijednost relativne gustoće (slika 5.1). Kod malih brzina skeniranja moguće je postići maksimalnu relativnu gustoću. Veća brzina skeniranja u kombinaciji sa debljim slojem praha rezultira manjom relativnom gustoćom [29]. Pojava se može objasniti manjim iznosom gustoće energije lasera pri velikim brzinama skeniranja i većim debljinama sloja praha što rezultira nepotpunim stapanjem rastaljenih regija i porozitetom.



Slika 5.1 Utjecaj brzine skeniranja i debljine sloja praha na vrijednost relativne gustoće (vrijednosti za AISI 316L čelik) [29]

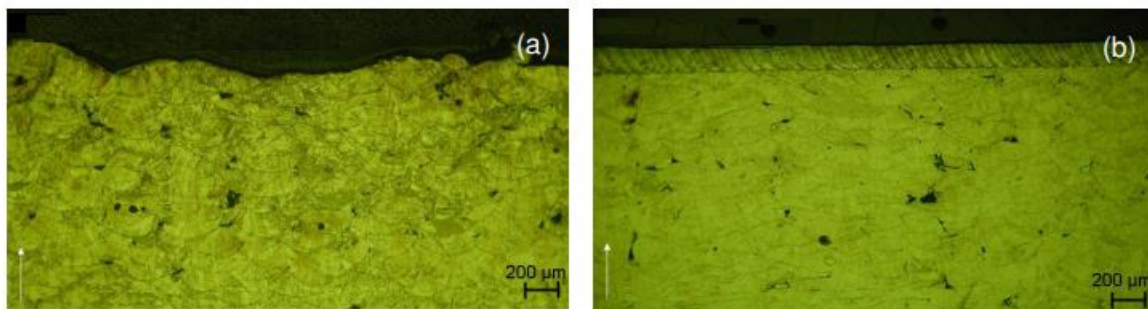
U nešto manjoj mjeri na vrijednost relativne gustoće utječe strategija skeniranja. Dvosmjerno, takozvano cik-cak skeniranje s različitim smjerom i orijentacijom vektora skeniranja za svaki pojedinačni sloj ostvaruje najbolje rezultate. Zakretanjem vektora skeniranja smanjuje se mogućnost pojave nerastaljenih područja pa se i navedena strategija skeniranja najčešće koristi. Na slici 5.2 prikazan je utjecaj različitih strategija skeniranja pri istim parametrima postupka na relativnu gustoću Ti-6Al-4V legure [29].



Slika 5.2 Utjecaj strategije skeniranja na relativnu gustoću [29]

5.2. Kvaliteta površine

Kvaliteta, odnosno hrapavost površine smatra se jednim od nedostataka ovog postupka. Zbog principa građenja proizvoda u slojevima formiraju se neravnine na površini koje osim estetike utječu i na mehanička svojstva. Uobičajena hrapavost površine (R_a) iznosi oko 20 μm i može se regulirati nekim od parametara procesa [7, 11]. Nakon završetka printanja često je potrebno obraditi površinu nekim od mehaničkih ili kemijskih postupaka modifikacije površine. Najčešće se primjenjuju postupci pjeskarenja, kugličarenja, brušenja ili kemijskog postupka nagrivanja kako bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta površine. Metoda koja se javila u novije vrijeme odnosi se na površinsko pretaljivanje laserom (engl. *Laser surface remelting*) i pokazala se kao vrlo efikasna metoda kojom je moguće postići hrapavost površine (R_a) čija je vrijednost oko 1,5 μm [11, 29]. Kako bi pretaljivanje bilo što efikasnije potrebno je podesiti parametre postupka na način da se koristi mala udaljenost između prolaza lasera (oko 20 μm), srednja brzina skeniranja (200-400 mm/s) i srednja snaga lasera (85-95 W) [29]. Dodatno pretaljivanje značajno utječe na trajanje procesa izrade te se preporuča za obradu samo ključnih dijelova. Razlika u hrapavosti površine u „as built“ stanju i nakon površinskog pretaljivanja prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3 Poboljšanje kvalitete površine uslijed površinskog pretaljivanja laserom; a) izradak u „as built“ stanju; b) površina nakon površinskog pretaljivanja (200 mm/s brzina skeniranja u kombinaciji s 95 W snage lasera) [29]

5.3. Mikrostruktura i mehanička svojstva

Mehanička svojstva dobivena postupcima aditivne tehnologije predmet su istraživanja diljem svijeta. Najviše radova objavljeno je na temu statičkih ispitivanja mehaničkih svojstava materijala dobivenih LPBF postupkom gdje se utvrđuju vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istezljivosti. Na temelju dobivenih rezultata za pojedine materijale (tablica 5) može se zaključiti da su mehanička svojstva u pravilu bolja u odnosu na konvencionalne postupke [29]. Iznimno brzo ohlađivanje smanjuje vrijeme kristalizacije i rezultira sitnozrnatom mikrostrukturom koja je povoljna u pogledu mehaničkih svojstava. Metalni materijali proizvedeni LPBF postupkom imaju višu granicu razvlačenja, vlačnu čvrstoću i tvrdoću od konvencionalno proizvedenih materijala. Osim sitnozrnate mikrostrukture ostvaruje se i homogeniji kemijski sastav uz manji stupanj segregacije legirnih elemenata što također pridonosi boljim mehaničkim svojstvima od lijevanih izradaka [7, 11, 16]. Duktilnost metalnih materijala dobivenih LPBF postupkom lošija je od konvencionalnih postupaka te uz anizotropna svojstva pripada u nedostatke postupka. Dinamičkim ispitivanjima utvrđena je manja dinamička izdržljivost LPBF komponenata jer nepravilnosti poput poroziteta, nerastaljenog praha i uključaka oksida značajno degradiraju svojstva materijala u uvjetima dinamičkog opterećenja [27].

Tablica 5 Vrijednosti čvrstoće materijala dobivenih LPBF postupkom [7, 27]

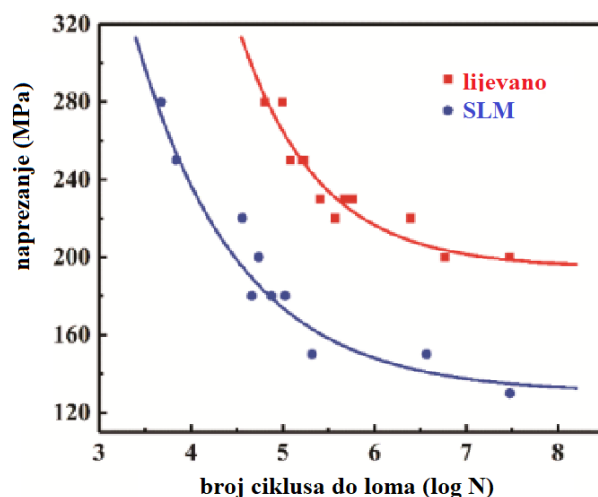
Materijal	Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Istezanje, %	Vlačna čvrstoća, MPa – lijevano stanje
15-5 PH čelik	1470	1100	15	1317
304 nehrđajući čelik	717	570	42,8	579
316L nehrđajući čelik	760	650	30	558
Maraging čelik	1290	1214	13,3	1930
cp-Ti	654	522	17	655
Ti-6Al-4V	1250	1125	6	1055
Ti-6Al-7Nb	1515	1440	1,4	1000
Inconel 625	1030	800	10	1000
Inconel 718	1148	907	25,9	1000
Hastelloy X	930,5	814	35	785
Nimonic 263	1085	818	24	940
AlSi10Mg	430	/	8,7	315

J.-P. Kruth et al. proveli su ispitivanje udarnog rada loma na epruvetama sa zarezom dobivenih LPBF postupkom te su ih usporedili sa lijevanim uzorcima (tablica 6). Ustanovljena je manja žilavost kod LPBF epruveta te su pad žilavosti pripisali porozitetu, prisutnosti kisika i dušika u mikrostrukturi (osobito kod Ti legura) te krhkim nestabilnim fazama [29].

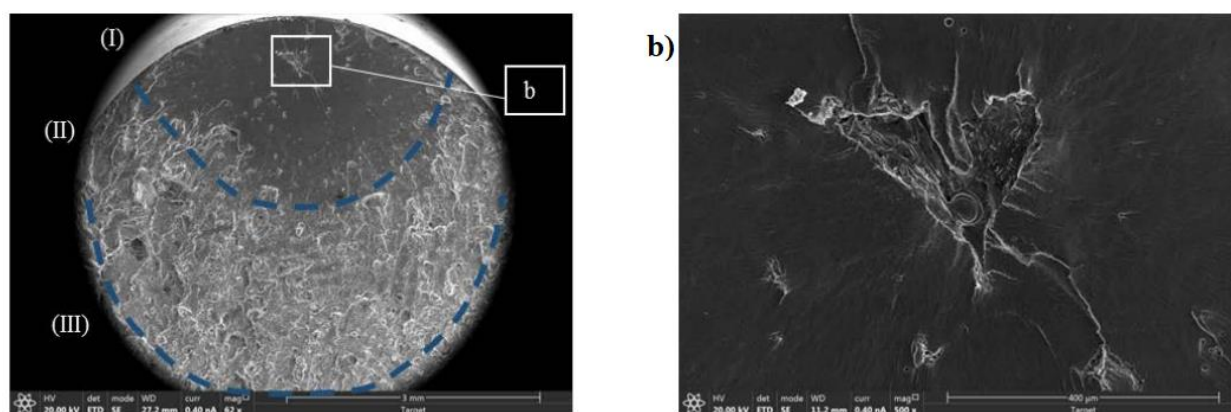
Tablica 6 Usporedba vrijednosti udarnog rada loma epruveta izrađenih LPBF i konvencionalnim postupkom [29]

Materijal	LPBF	Lijevano
Ti-6Al-4V	11,5 ± 0,5 J (<i>as built</i> stanje)	15 J
	10,1 ± 0,5 J (žareno stanje)	
Maraging 300 čelik	36,3 ± 4,8 J (<i>as built</i> stanje)	18 J
	10,1 ± 1,4 J (nakon dozrijevanja)	
316L nehrđajući čelik	59,2 ± 3,9 J (<i>as built</i> stanje)	160 J

Song et al. usporedili su dinamička svojstva AlSi10Mg legure dobivene LPBF postupkom i lijevanjem pri izmjenično promjenljivom naprezanju. Dinamička izdržljivost LPBF AlSi10Mg epruvete ($R_d=130$ MPa, $N_g=10^7$ ciklusa) je manje u odnosu na lijevano stanje ($R_d=200$ MPa, $N_g=10^7$ ciklusa) (slika 5.4). Prilikom fraktografske analize utvrđen je interkristalni prijelom duž granica Al zrna koja su okružena krhkim eutektičkim silicijem (slika 5.5) [27].



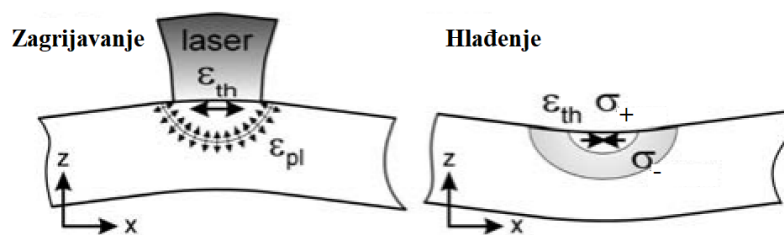
Slika 5.4 Wöhlerov dijagram AlSi10Mg legure dobivene LPBF postupkom i lijevanjem [27]



Slika 5.5 Prijelomna površina AlSi10Mg LPBF legure uslijed dinamičkog ispitivanja zabilježena na SEM mikroskopu; b) inicijacija/žarište [30]

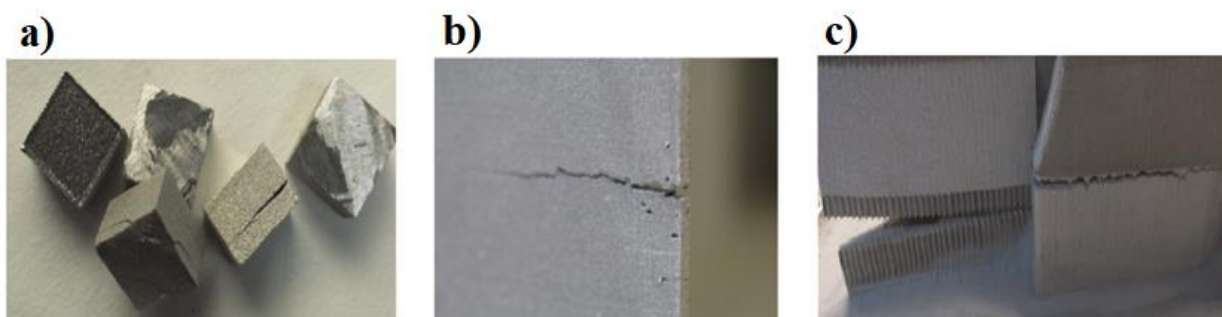
5.4. Zaostala naprezanja

Zaostala naprezanja (engl. *Residual stress*) su mikro i makro naprezanja koja su prisutna u izratku bez djelovanja vanjskih sila i momenata. Brza i učestala izmjena ciklusa zagrijavanja i hlađenja uzrokuju pojavu toplinskih zaostalih naprezanja zbog velikog temperaturnog gradijenta. Zaostala naprezanja mogu uzrokovati deformaciju izratka, inicijaciju pukotina te neželjeni pad čvrstoće materijala [29]. Laserska zraka brzo zagrijava i tali eksponirani sloj praha te se toplina u prethodne slojeve prenosi putem kondukcije. Povećanjem temperature materijala neizbježan je pad čvrstoće. U fazi zagrijavanja i taljenja toplinsko širenje gornjeg sloja materijala ograničeno je prethodnim slojevima čime nastaju tlačna naprezanja. Prilikom ohlađivanja gornjeg sloja taline dolazi do toplinske kontrakcije i pojave vlačnih naprezanja u gornjem sloju (slika 5.6) [31]. Cikličkim građenjem sloj po sloj dolazi do akumulacije tlačnih naprezanja u unutrašnjosti izratka koja se uravnotežuju s vlačnim napreznjima koja su prisutna u površinskim slojevima [32].



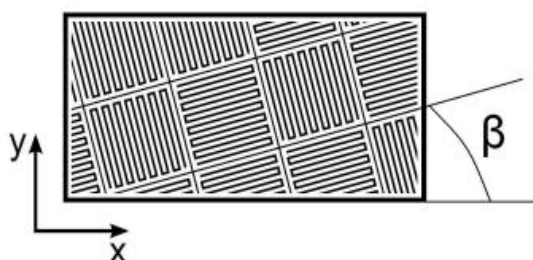
Slika 5.6 Nastanak toplinskih zaostalih naprezanja uslijed ciklusa zagrijavanja i hlađenja kod LPBF postupka [31]

Velika zaostala naprezanja kod LPBF postupka mogu rezultirati pojavom pukotina, raslojavanjem, a kod tankih stjenki zbog tlačnih naprezanja u unutrašnjim slojevima dolazi do izvijanja (slika 5.7) [32].



Slika 5.7 Utjecaj zaostalih naprezanja: a) pucanje izratka od Inconel 718; b) pukotina u Ti-6Al-4V leguri; c) raslojavanje [32]

Na temelju provedenih istraživanja ustanovljeno je da strategija skeniranja može smanjiti zaostala naprezanja u izratku. Preporuča se strategija šahovske ploče (engl. *Island/chessboard*) s kraćim vektorima skeniranja koji su pod kutom od 45° u odnosu na x os (slika 5.8). Naknadna toplinska obrada i predgrijavanje radne komore također pridonose smanjenju zaostalih naprezanja [29].



Slika 5.8 Optimalna strategija skeniranja za smanjenje zaostalih naprezanja [29]

6. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio diplomskog rada podijeljen je na dva dijela. U prvom dijelu opisan je postupak izrade uzoraka od AlSi10Mg legure LPBF postupkom, a drugi dio odnosi se na ispitivanja izrađenih uzoraka i diskusiju. Isprintane su dvije ploče s uzorcima namijenjenih za statičko vlačno ispitivanje, ispitivanje dinamičke izdržljivosti i savijanja u tri točke. Cilj rada je utvrditi utjecaj brzine skeniranja lasera i naknadnog žarenja na mehanička svojstva AlSi10Mg uzoraka.

6.1. Definiranje dimenzija ispitnih uzoraka

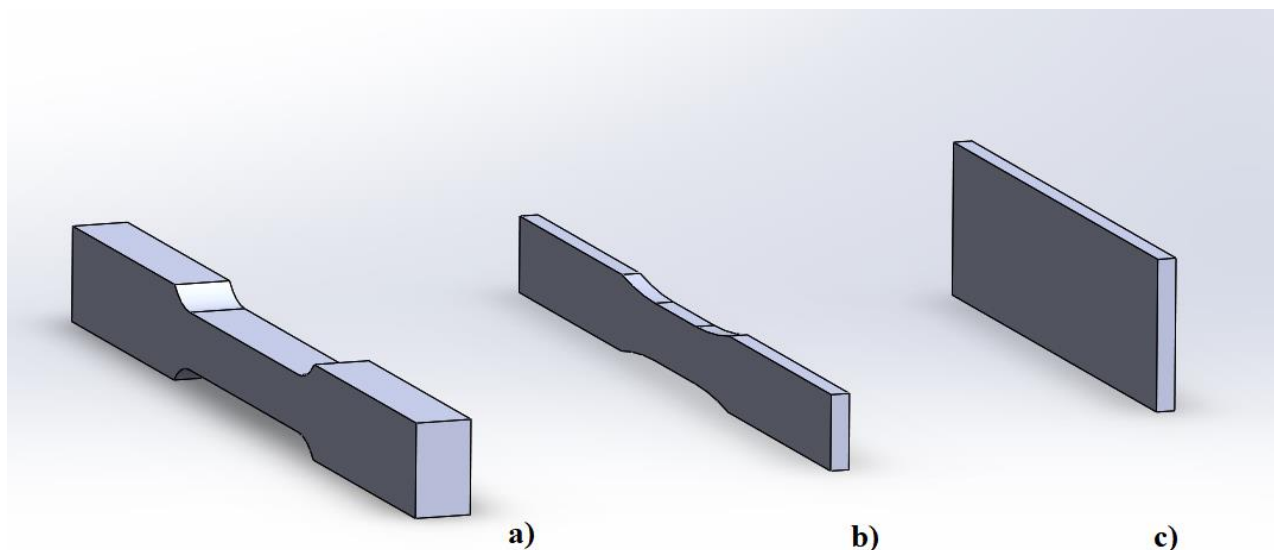
U ranoj fazi adaptacije aditivnih tehnologija proizvodnje nedostatak standarda usporavao je komercijalizaciju postupaka. Kako bi područje aditivnih tehnologija bilo pokriveno standardima, 2008. godine ASTM (engl. *American Society for Testing and Materials*) donosi odluku o formiranju tehničkog odbora za aditivne tehnologije proizvodnje. U 2011. organizacija ISO također osniva tehnički odbor TC 261 za aditivne tehnologije [3]. Cilj standarda je definirati terminologiju, postupke ispitivanja, parametre i ostale važne aspekte proizvodnje.

Kako bi se osigurala relevantnost i sljedivost rezultata ispitivanja uzorci za ispitivanja izrađeni su u skladu s postojećim standardima. Za uvid u potrebne standarde za izvođenje eksperimentalnog dijela korištena je norma ASTM F3122-22 koja služi kao vodič za procjenu mehaničkih svojstava metalnih materijala izrađenih procesima aditivne proizvodnje. U navedenoj normi predloženi su već postojeći standardi za ispitivanja koji se mogu primijeniti i za metalne materijale dobivene aditivnom tehnologijom. U tablici 7 navedene su norme po kojima su izrađeni ispitni uzorci [33].

Tablica 7 Ispitni uzorci korišteni u eksperimentalnom dijelu s pripadajućim standardom

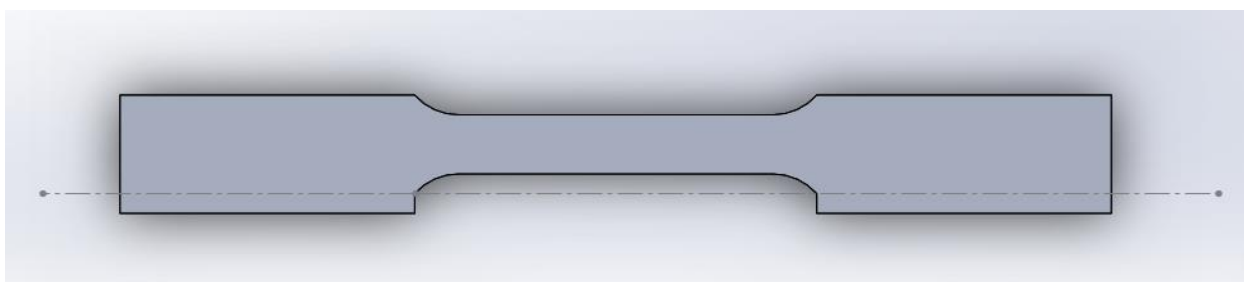
Vrsta ispitivanja	Standard	Tip uzorka
Statičko vlačno ispitivanje (engl. <i>Tensile test</i>)	ASTM E8/E8M-22	<i>Subsize specimen</i>
Dinamičko ispitivanje (engl. <i>Fatigue test</i>)	ASTM E466-21	<i>Specimen with tangentially blended fillets between the uniform test section and the ends</i>
Savijanje u tri točke (engl. <i>Three point bending test</i>)	ASTM E290-22	

Prvi korak u procesu proizvodnje LPBF postupkom je izrada 3D modela. Za modeliranje je korišten SolidWorks i uzorci su prikazani na slici 6.1.



Slika 6.1 3D modeli ispitnih uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava: a) uzorak za statičko vlačno ispitivanje; b) uzorak za dinamičko ispitivanje; c) uzorak za ispitivanje savijanja u 3 točke

Konačne dimenzije uzoraka i tehnički crteži nalaze se u prilogu. Tehnički crtež uzorka za statičko vlačno ispitivanje nalazi se u prilogu 1, za dinamičko ispitivanje u prilogu 2 te za savijanje u prilogu 3. Dimenzije ispitnih uzoraka u skladu su sa standardima i prilagođene su karakteristikama uređaja za ispitivanje. Nakon izrade uzorci se uklanjaju s ploče tračnom pilom pa je postojeće uzorke potrebno modificirati na način da se uključi dodatak s donje strane koji je povezan s pločom (slika 6.2).



Slika 6.2 Uzorak za statičko vlačno ispitivanje s dodatkom za uklanjanje s ploče

Kako bi utjecaj hrapavosti površine na rezultate ispitivanja bio sveden na minimum, na uzorke je stavljen dodatak od 0,5 mm sa svake strane koji se nakon printanja uklanja glodanjem. Potporne strukture nije potrebno modelirati jer se automatski generiraju u programu za ispis.

6.2. Uređaj i materijal za izradu uzoraka

6.2.1. EOS M 290

Uzorci su izrađeni u suradnji s razvojno-edukacijskim centrom Metalska jezgra iz Čakovca. Metalska jezgra posjeduje jedan od vodećih 3D printera za LPBF postupak EOS M 290 (slika 6.3). EOS M 290 pripada u skupinu srednjih 3D printera po pitanju volumena gradnje, čije su dimenzije 250 x 250 x 325 mm i što zadovoljava većinu potreba. Koristi se za izradu proizvoda iz različitih materijala, uključujući legure aluminija, legure titanija, superlegure na bazi nikla, nehrđajući čelik, Co-Cr legure i neke od alatnih čelika.



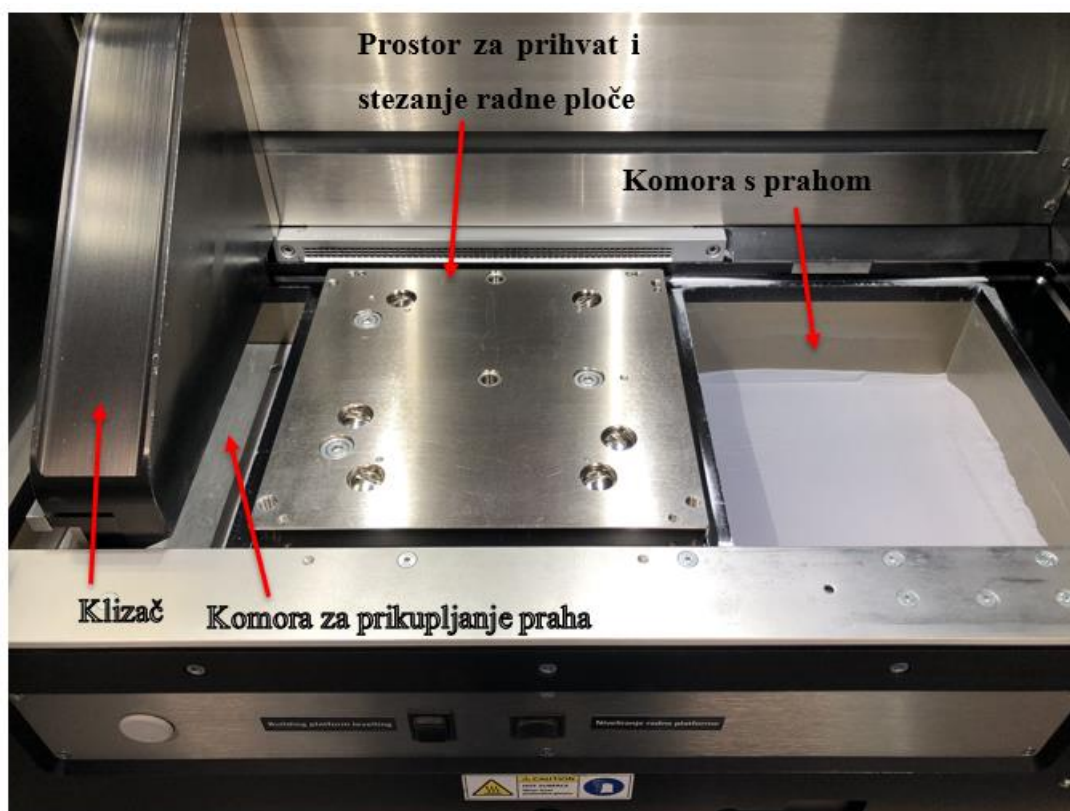
Slika 6.3 EOS M 290 – Metalska jezgra

Glavne karakteristike EOS M 290 printera navedene su u tablici 8.

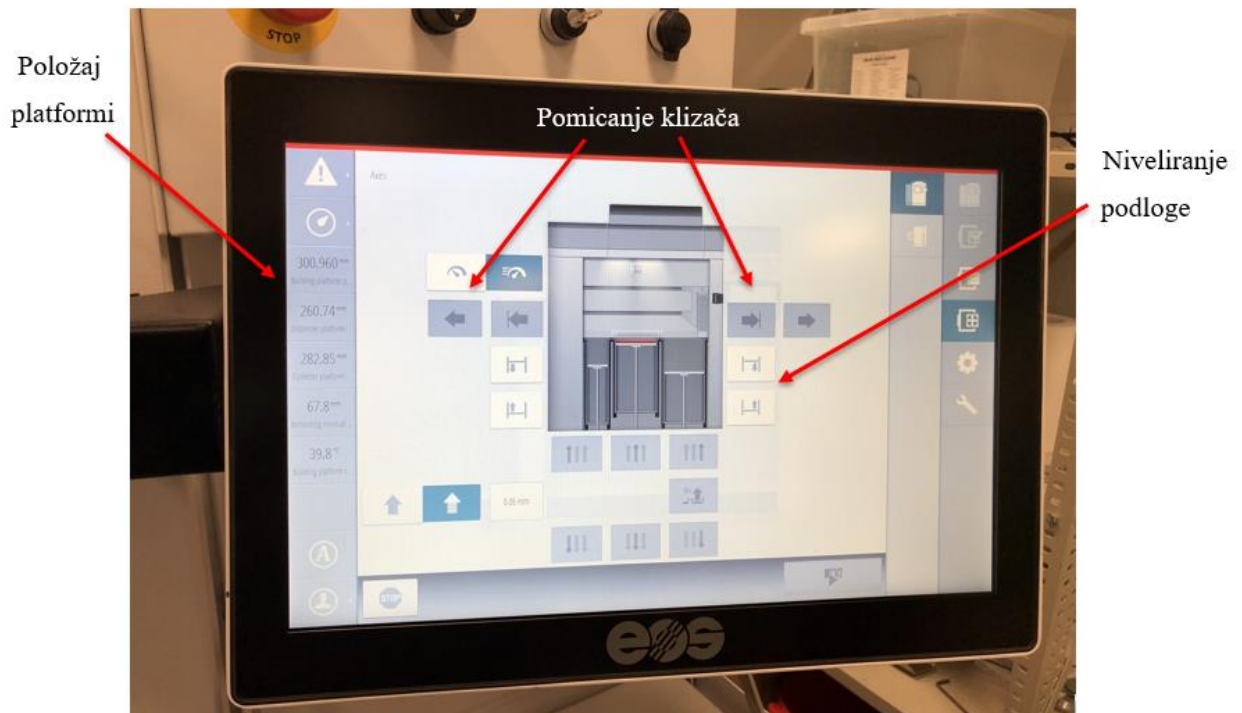
Tablica 8 Karakteristike EOS M 290 [34]

Volumen komore	250 x 250 x 325 mm	
Vrsta lasera	Yb-fiber laser, 1 x 400 W	
Optika	1 F-theta leća	
Brzina skeniranja	7 m/s	
Promjer fokusa	100 μm	
Priprema zraka	7 bar; 20 m ³ /h	
Dimenzije stroja	2500 x 1300 x 2190 mm	
Preporučeni prostor za instalaciju	4800 x 3600 x 2900 mm	
Masa	1250 kg	
Debljina sloja gradnje u smjeru Z-osi	Za AlSi10Mg	30 μm , 60 μm
	Za alatni čelik MS1	20 μm , 40 μm , 50 μm
	Za 316L	40 μm

Radnu komoru (slika 6.4) čine tri zasebne platforme od kojih svaka ima zaseban sustav za posmično gibanje po Z osi. Iznos posmaka definira debljina sloja koja se printa. Prilikom namještanja stroja, punjenja prahom ili čišćenja moguće je na upravljačkom računalu regulirati položaj svake platforme (slika 6.5).



Slika 6.4 Radna komora EOS M 290



Slika 6.5 Upravljačko računalo – podešavanje visine platformi

6.2.2. AlSi10Mg

Metalni prah AlSi10Mg moguće je pronaći u nekoliko različitih varijanti od proizvođača EOS-a. Razlika može biti u granulaciji čestica metalnog praha, vrijednostima mehaničkih svojstava nakon printanja, udjelu poroziteta nakon taljenja, potrebnoj temperaturi predgrijavanja radne podloge ili vrsti zaštitne atmosfere. Za printanje uzoraka korišten je metalni prah oznake AlSi10Mg_060_CoreM291 1.00. Riječ je o metalnom prahu granulacije 60 μm . Za navedeni metalni prah proizvođač preporuča predgrijavanje radne podloge na 100°C i korištenje argona kao zaštitne atmosfere. Prosječni udio pogrešaka nakon printanja za ovaj metalni prah iznosi 0,2% , a prosječna gustoća izratka prema ISO 3369 je veća ili jednaka 2,66 g/cm^3 [28].

Vrijednosti mehaničkih svojstava koje garantira proizvođač prikazane su u tablici 9 i 10.

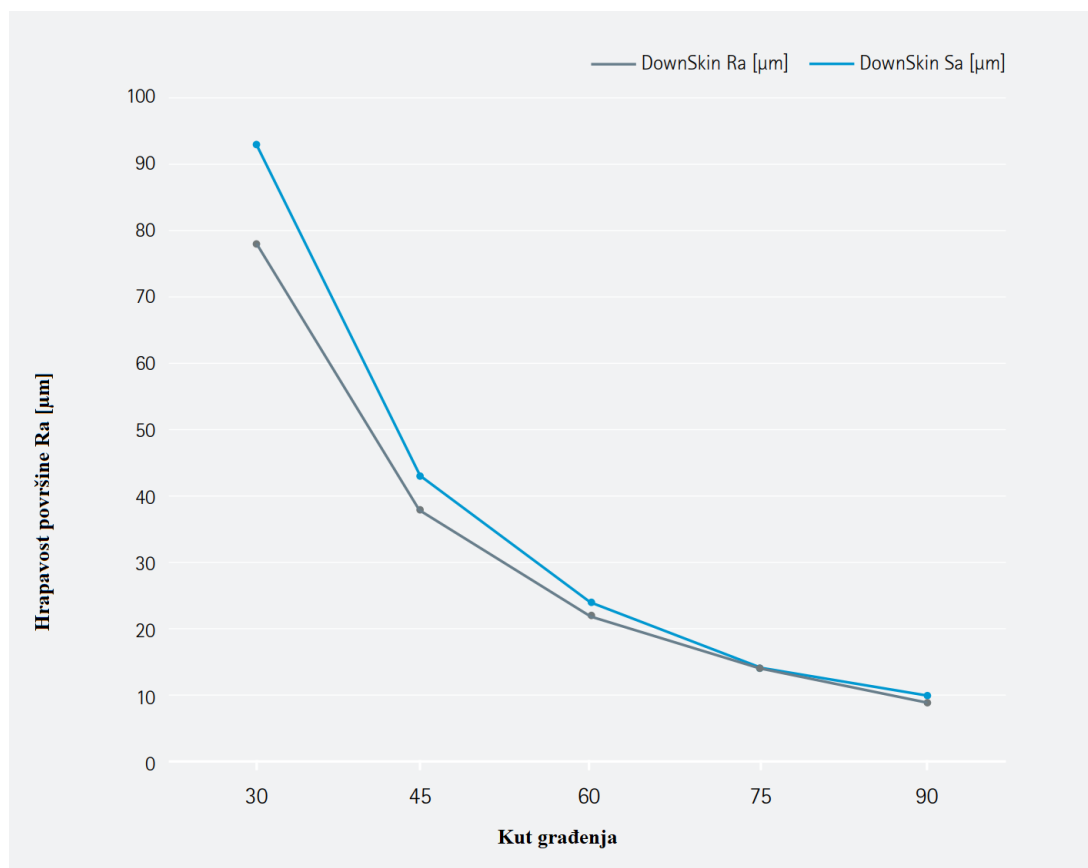
Tablica 9 Vrijednosti mehaničkih svojstava u as built stanju [28]

	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0.2}$, MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Istezanje A, %
Vertikalno	240	440	4
Horizontalno	250	440	7

Tablica 10 Vrijednosti mehaničkih svojstava nakon toplinske obrade (EOS T6) [28]

	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0.2}$, MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Istezanje A , %
Vertikalno	250	320	8
Horizontalno	260	320	9

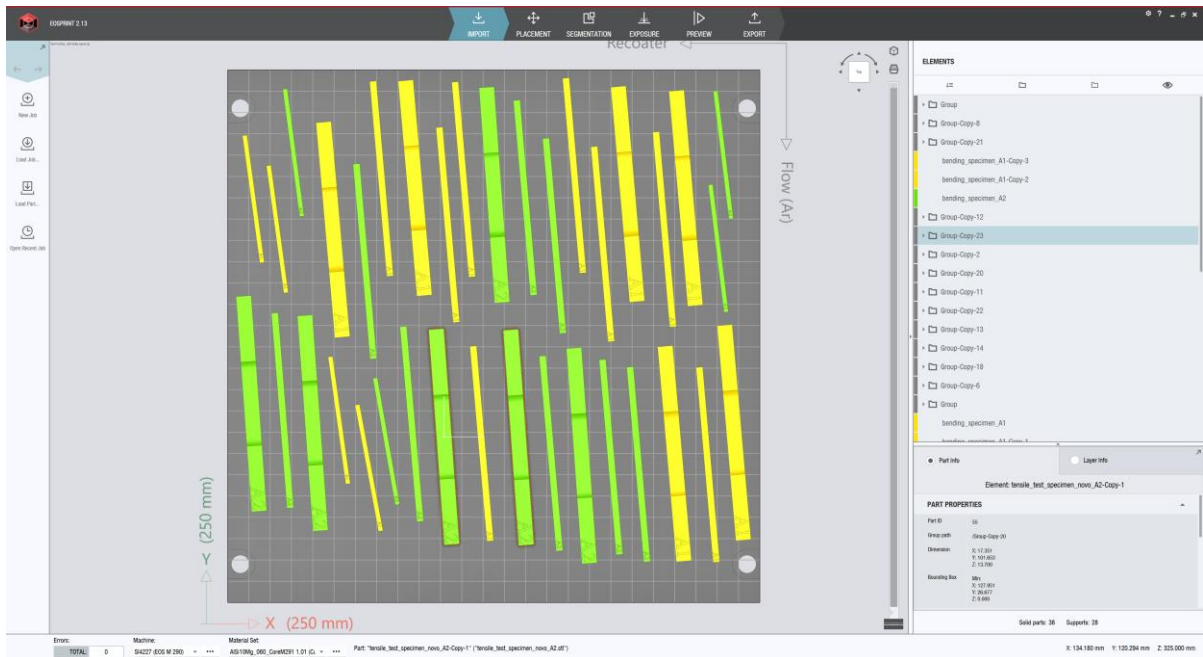
Prilikom printanja pod kutom dolazi do narušavanja kvalitete površine izratka. Hrapavost površine R_a za korišteni prah u ovisnosti o kutu građenja prikazana je na slici 6.6.



Slika 6.6 Hrapavost površine izratka u ovisnosti o kutu građenja za *AlSi10Mg_060_CoreM291 1.00* [28]

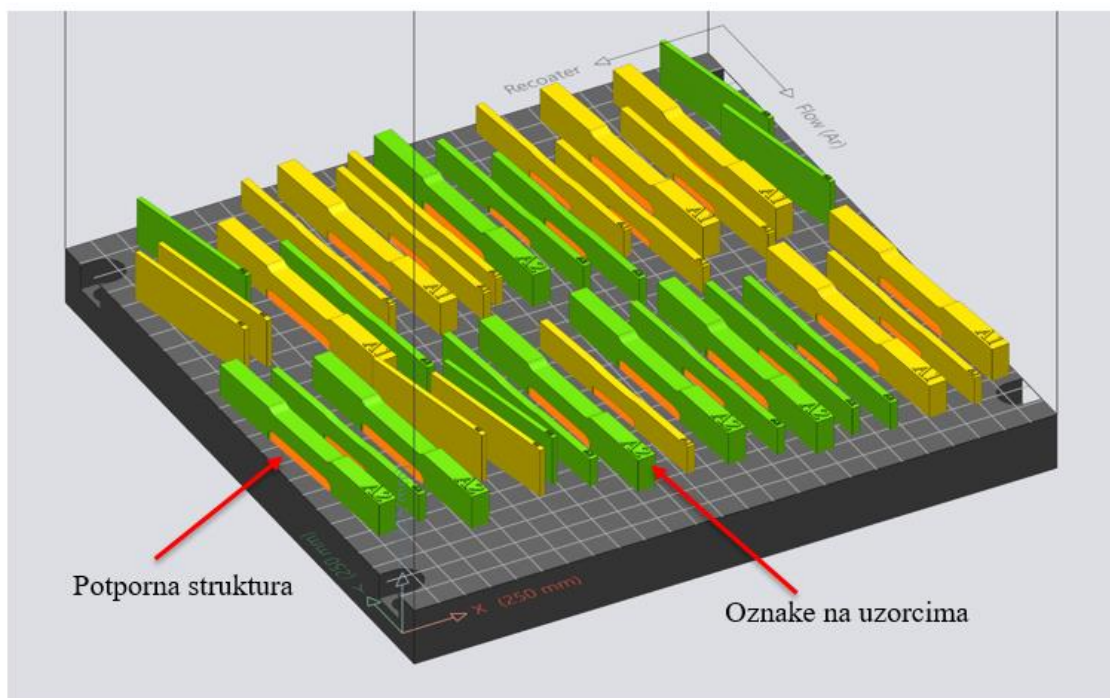
6.3. Proces izrade uzoraka na EOS M 290 printeru

Priprema ispisa može se podijeliti na dva dijela – pripremu na računalu i podešavanje stroja za ispis. Nakon definiranja geometrije i dodataka na uzorcima potrebno je stvoriti .stl datoteku koja se učitava u program EOSPRINT 2. U programu je potrebno napraviti raspored uzoraka na ploči, dodati potporne strukture, odabrati parametre postupka i definirati tijek printanja. Slika 6.7 prikazuje raspoređene uzorke na ploči u tlocrtu, gdje su različitim bojama označeni uzorci s drugačijim parametrima.



Slika 6.7 Raspored uzoraka na ploči

Kako bi bilo moguće razlikovati uzorke printane s različitim parametrima dodane su oznake s gornje strane svakog uzorka u visini 0,7 mm. Oznake je moguće dodati u programu EOSPRINT 2 uporabom značajke *label*. Potporne strukture izrađuju se drugačijim parametrima i većim stupnjem poroznosti. Korištena su dva stanja parametara postupka navedena u tablici 11 gdje su usporedbe radi dodani i preporučeni parametri EOS-a za debljinu sloja od 0,06 mm.



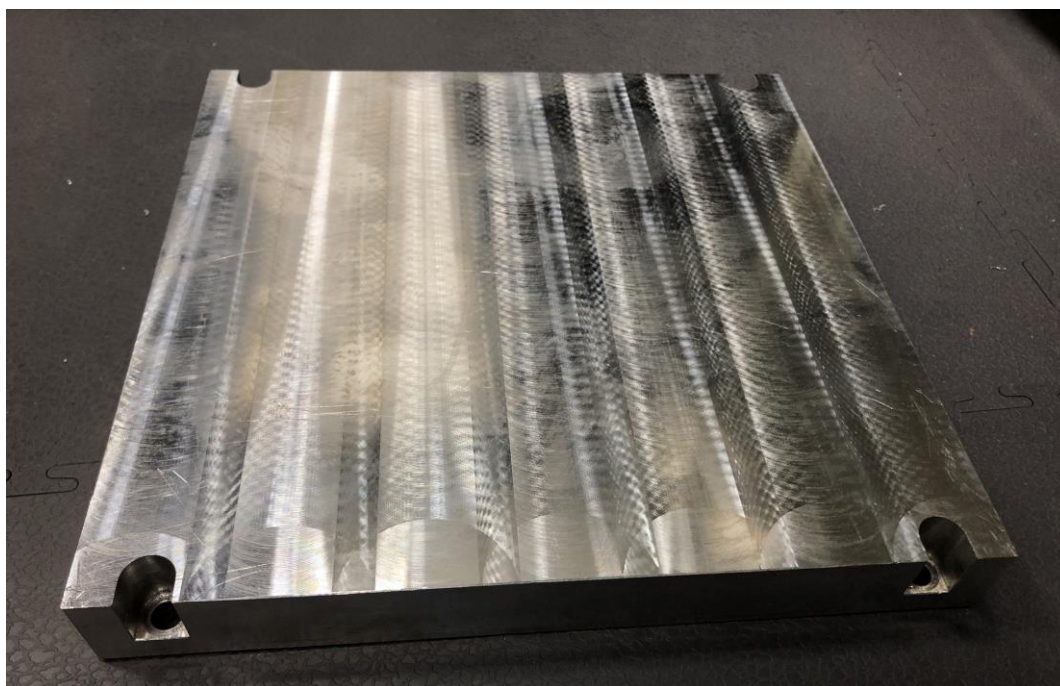
Slika 6.8 Potporne strukture i označavanje uzoraka u EOSPRINT 2 programu

Tablica 11 Parametri izrade ispitnih uzoraka i usporedba s EOS parametrima

	Snaga lasera P, W	Brzina skeniranja $v, \text{mm/s}$	Hatch distance h, mm	Debljina sloja t, mm	Gustoća energije lasera $E, \text{J/mm}^3$
Stanje 1	370	1100	0,2	0,06	28,03
Stanje 2	370	1200	0,2	0,06	25,69
EOS	370	1210	0,15	0,06	33,98

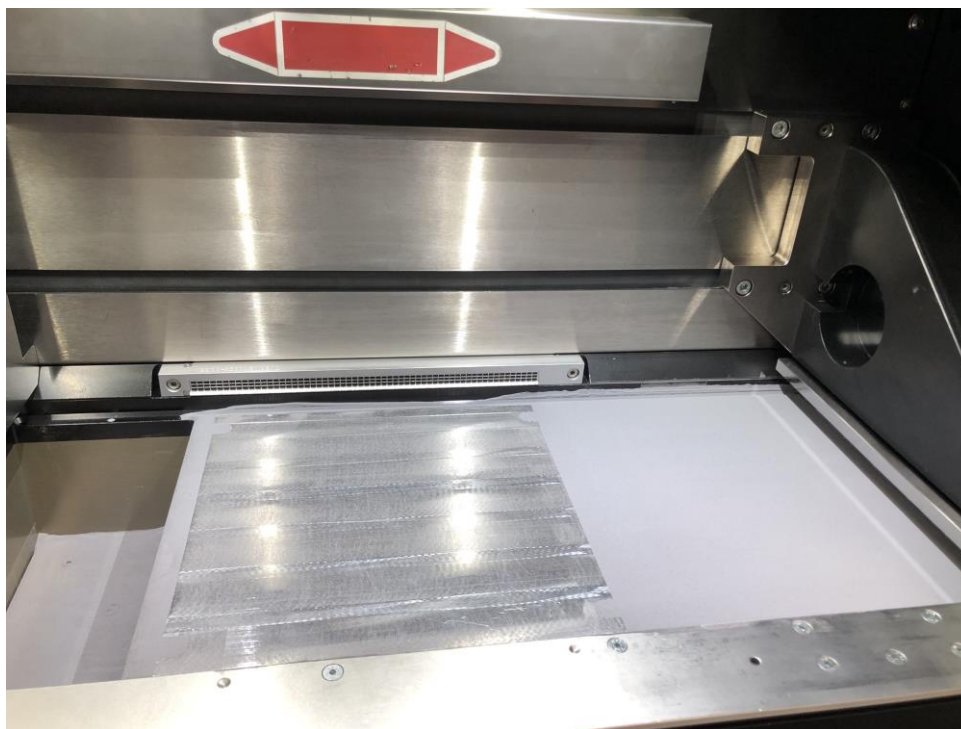
Predviđeno trajanje ispisa raspoređenih uzoraka prema slici 6.8 iznosi 5 sati i 30 minuta. Drugi dio pripreme odnosi se na podešavanje stroja.

Prije svakog printanja, osobito ako dolazi do promjene materijala nužno je detaljno očistiti radni prostor stroja kako ne bi došlo do kontaminacije materijala. Potrebno je staviti novu ploču na prostor za prihvat i stegnuti vijcima. U ovom slučaju korištena je aluminijska radna ploča koja se može više puta koristiti ako se strojno obradi (slika 6.9).

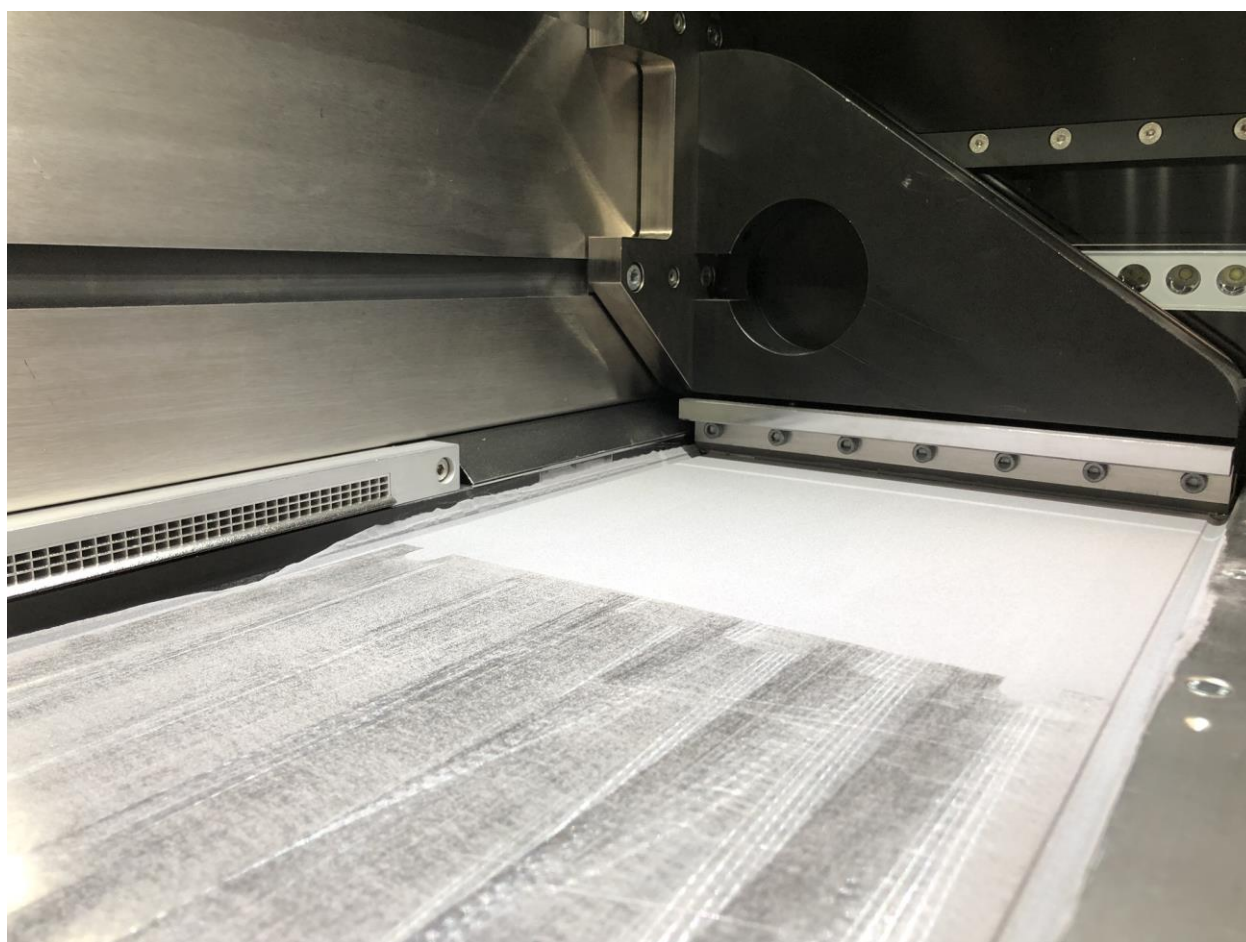


Slika 6.9 Radna ploča od aluminija

Nakon fiksiranja ploče slijedi kalibracija kako bi se postigla ravnost. Kalibracija se provodi na način da se klizač postavi iznad radne ploče i pomoću etalona se provjerava zračnost ili preklop između klizača i radne ploče u četiri točke na radnoj ploči. Kalibracija je završena kada etalon za provjeru zračnosti od 0,05 mm zapinje u sve četiri rubne točke. Po završetku kalibracije komora s prahom podiže se po Z osi i nanosi se sloj praha pomoću klizača. Ukoliko je raspodjela praha po ploči ravnomjerna i nema znakova zapinjanja klizača moguće je krenuti s printanjem.



Slika 6.10 Pripremljen radni prostor stroja za početak ispisa

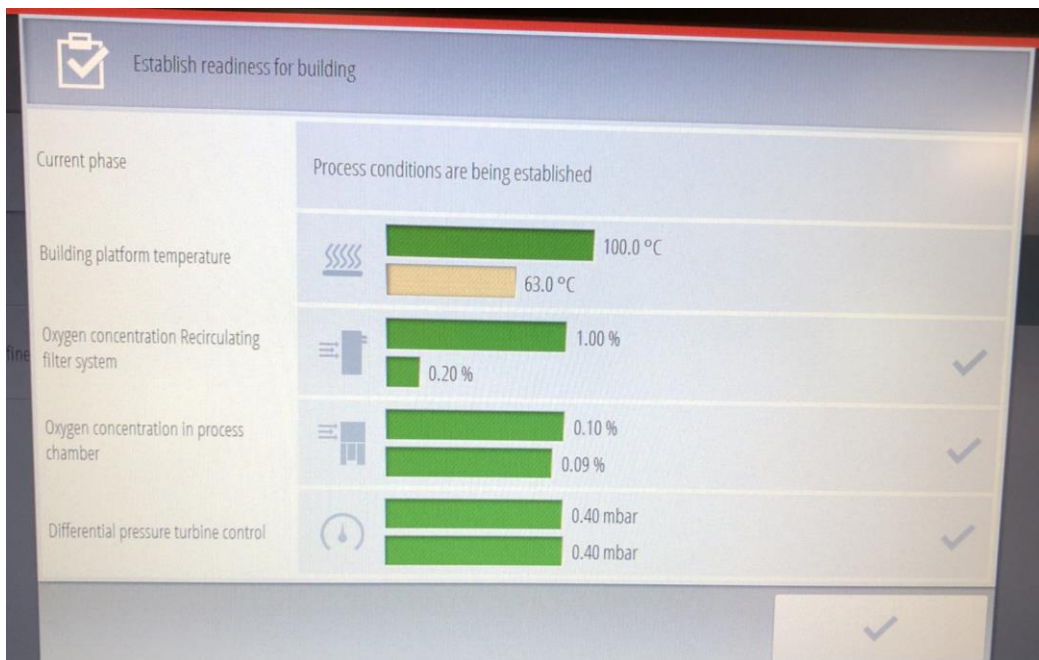


Slika 6.11 Prvi sloj praha na radnoj ploči

U sljedećem koraku potrebno je osigurati protok zaštitnog plina do pripreme zraka i pokrenuti pripremu radne komore za početak ispisa. Za printanje AlSi10Mg legure korišten je argon kao zaštitna atmosfera (slika 6.12). Koncentracija kisika u radnoj komori mora postići koncentraciju od 0,1% kako bi se smanjila oksidacija, ali i pojava efekta kuglanja (engl. *balling*). Radna podloga zagrijava se na 100°C i počinje postupak printanja. Uvjete u radnoj komori moguće je pratiti na upravljačkom računalu (slika 6.13).

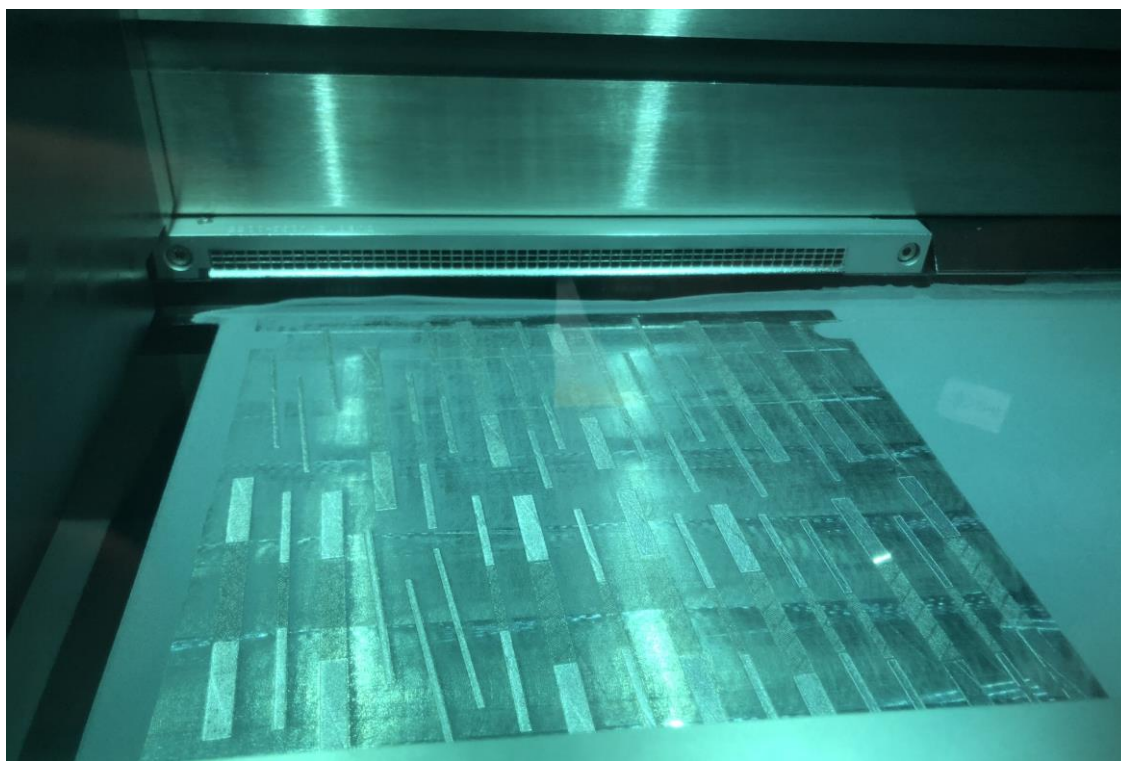


Slika 6.12 Plinske boce argona

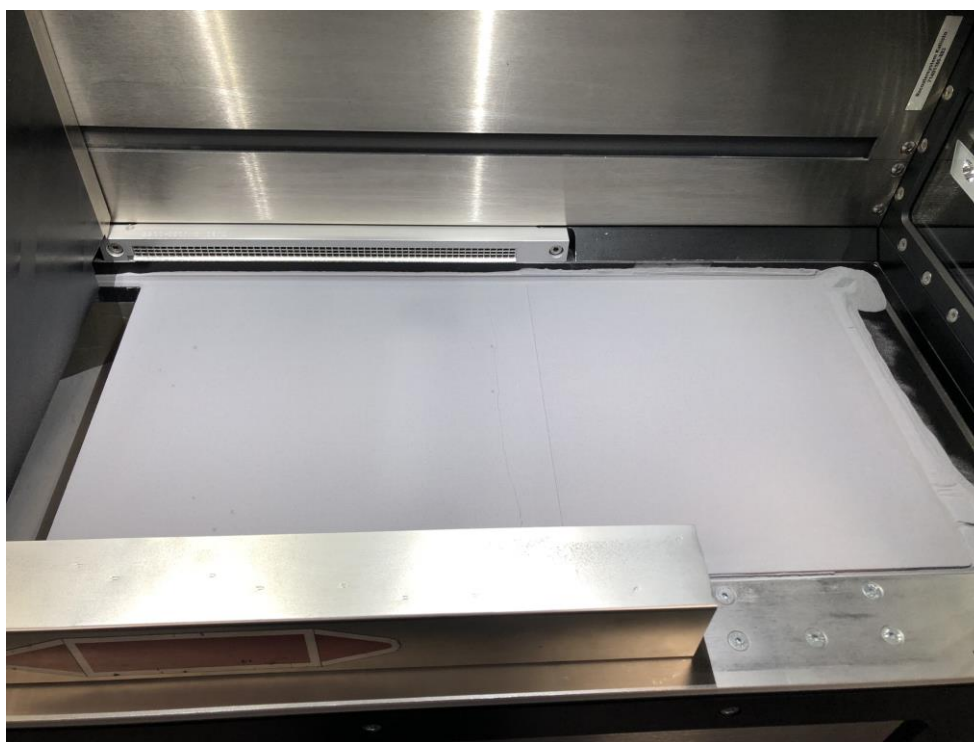


Slika 6.13 Priprema radne komore za početak printanja

Prvih nekoliko slojeva praha skeniraju se laserskom zrakom u više prolaza kako bi se osigurala čvrsta veza s radnom podlogom. Ostali slojevi tale se u jednom prolazu laserske zrake. Slika 6.14 prikazuje prvi prolaz lasera.

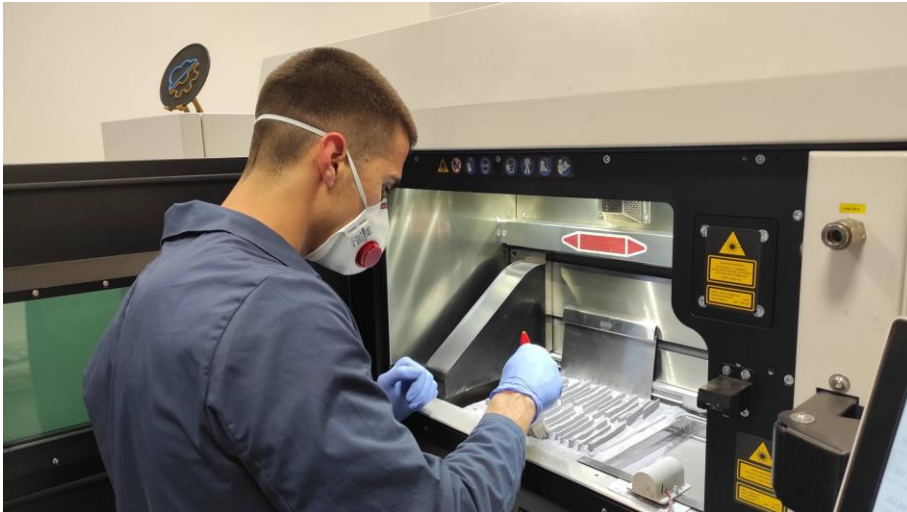


Slika 6.14 Početak printanja – prvi prolaz lasera

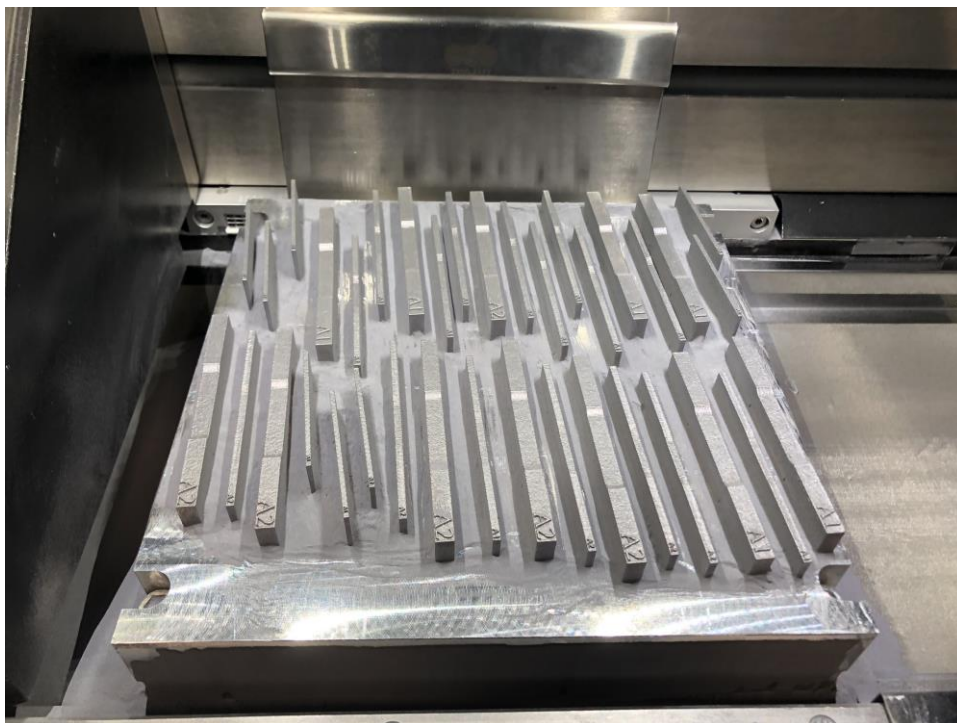


Slika 6.15 Završetak printanja

Ploča s ispitnim uzorcima ostaje prekrivena metalnim prahom nakon završetka printanja. Potrebno je ostaviti isprintane uzorke u radnoj komori stroja kako bi se postepeno ohladili u kontroliranoj atmosferi. Pomoću upravljačkog računala spušta se komora s prahom i stavlja se sito za prosijavanje praša s veličinom otvora od 80 μm kako bi se spriječio ulazak nečistoća koje su nastale tijekom taljenja praša u neiskorišteni metalni praš. Pomoću ručnih alata odstranjuje se višak praša s ploče i odlaže se u komoru za prikupljanje praša. Prilikom čišćenja radne komore obavezno je korištenje zaštitne maske i rukavica.

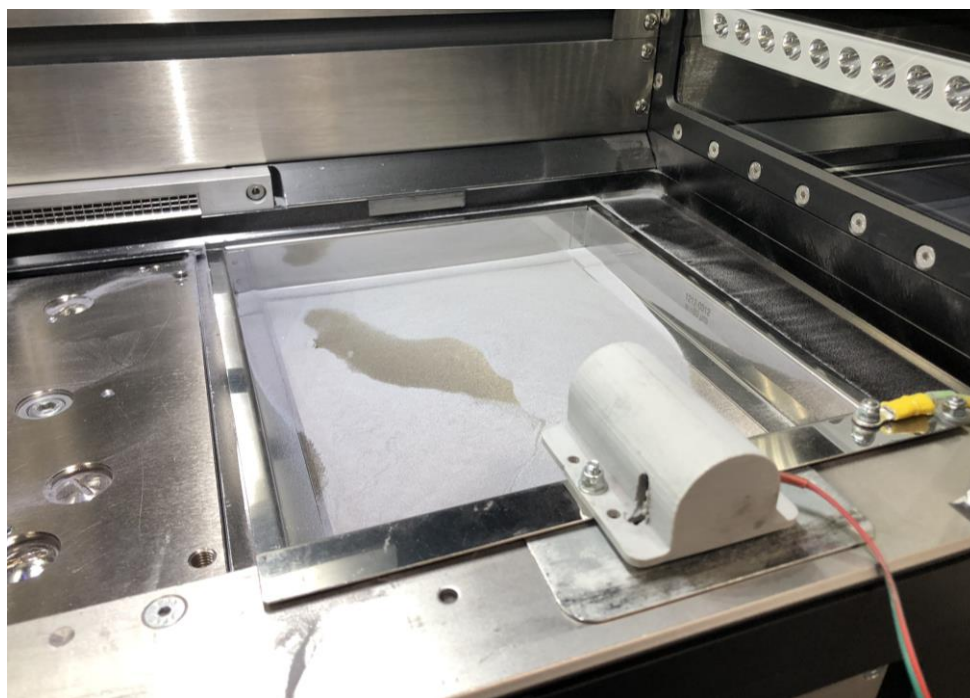


Slika 6.16 Odstranjivanje viška praša nakon printanja

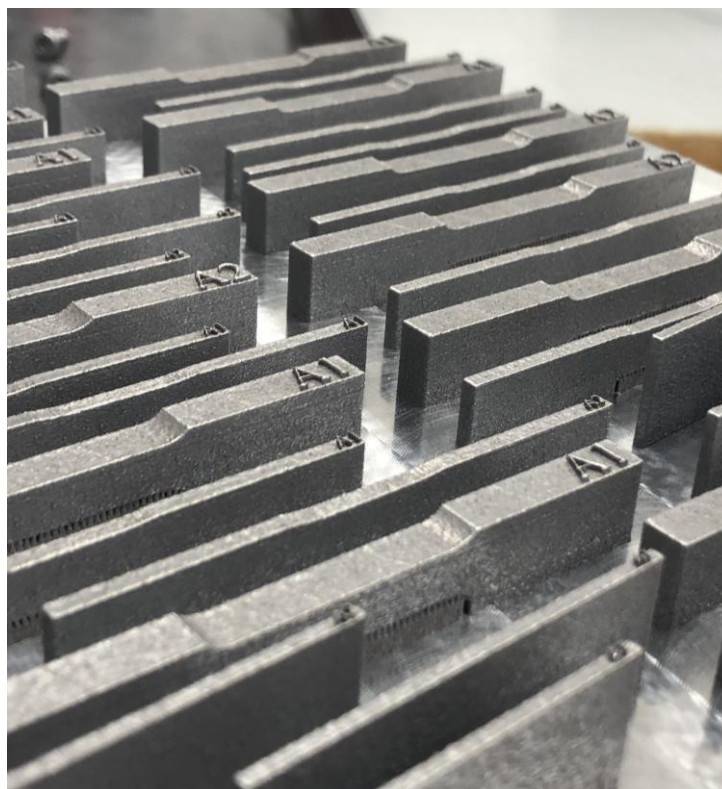


Slika 6.17 Ploča s isprintanim ispitnim uzorcima

Prosijavanjem praha uklanjaju se nečistoće i rastaljene čestice praha koje su nastale tijekom printanja. Ovim postupkom pročišćava se neiskorišteni metalni prah i moguće ga je ponovo koristiti za printanje. Oprema za prosijavanje metalnog praha prikazana je na slici 6.18.



Slika 6.18 Prosijavanje metalnog praha



Slika 6.19 Ploča s isprintanim uzorcima nakon uklanjanja sa stroja

Prva isprintana ploča s uzorcima koji nisu namijenjeni za naknadnu toplinsku obradu steže se na napravu na tračnoj pili Farrox CY210A kako bi se odvojili uzorci s ploče. Na ploči se nalazi ukupno 36 uzoraka koji se nakon rezanja svrstavaju u zasebne kutije prema parametrima ispisa.

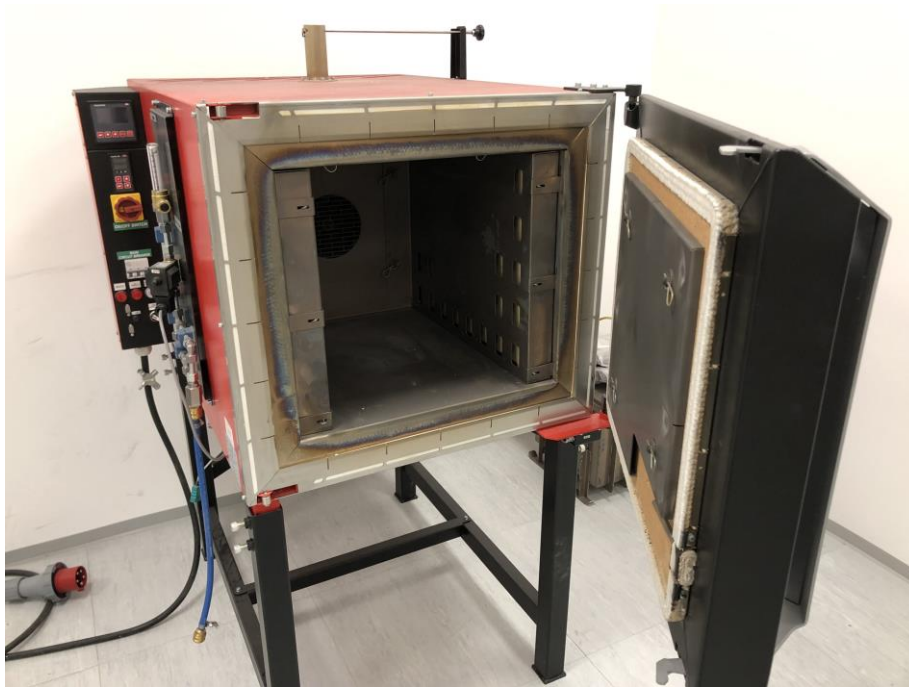


Slika 6.20 Odvajanje uzoraka s ploče

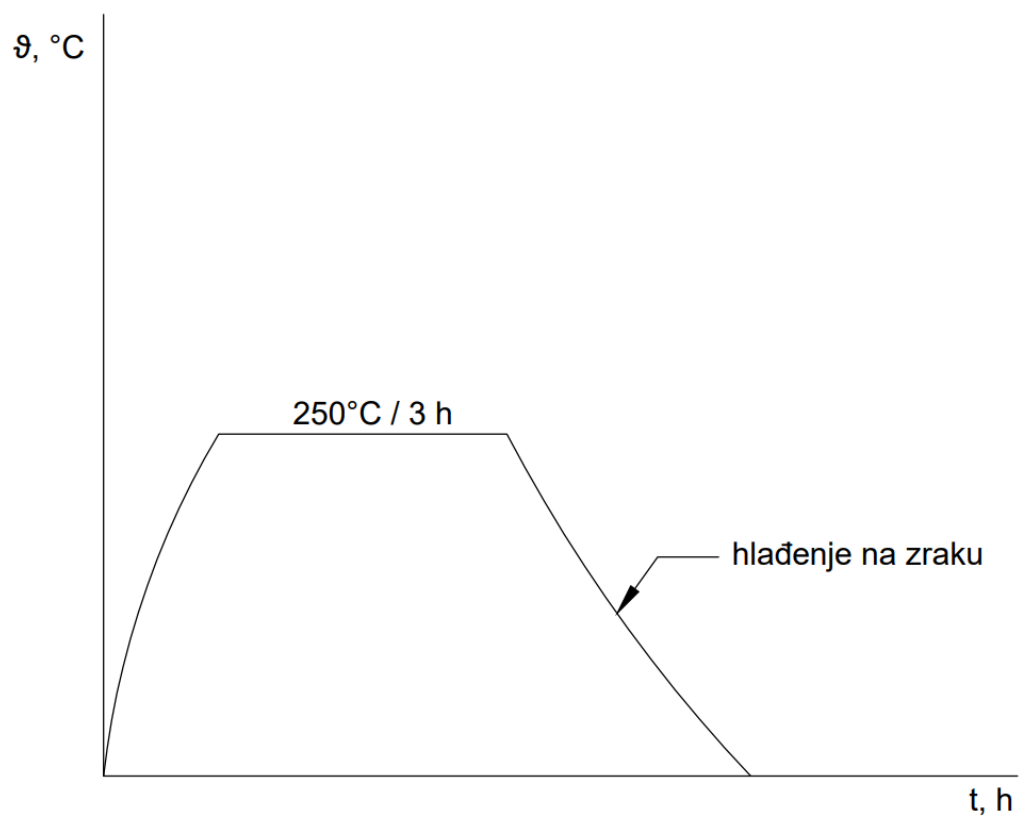
6.4. Toplinska obrada ispitnih uzoraka

Za toplinsku obradu ispitnih uzoraka odabrano je žarenje za redukciju zaostalih naprezanja. Toplinska obrada odrađena je u Metalskoj jezgri u peći namijenjenoj za toplinsku obradu izradaka izrađenih tehnologijom aditivne proizvodnje LAC PP 140/85 (slika 6.21). U peći je moguće ostvariti temperature do 850°C pa je prikladna za toplinsku obradu različitih metalnih materijala.

Za toplinsku obradu ispitnih uzoraka od AlSi10Mg nije korištena zaštitna atmosfera. Temperatura žarenja iznosi 250°C s vremenom držanja od 3 sata te potom slijedi hlađenje na zraku do sobne temperature. Dijagram toplinske obrade prikazan je na slici 6.22.



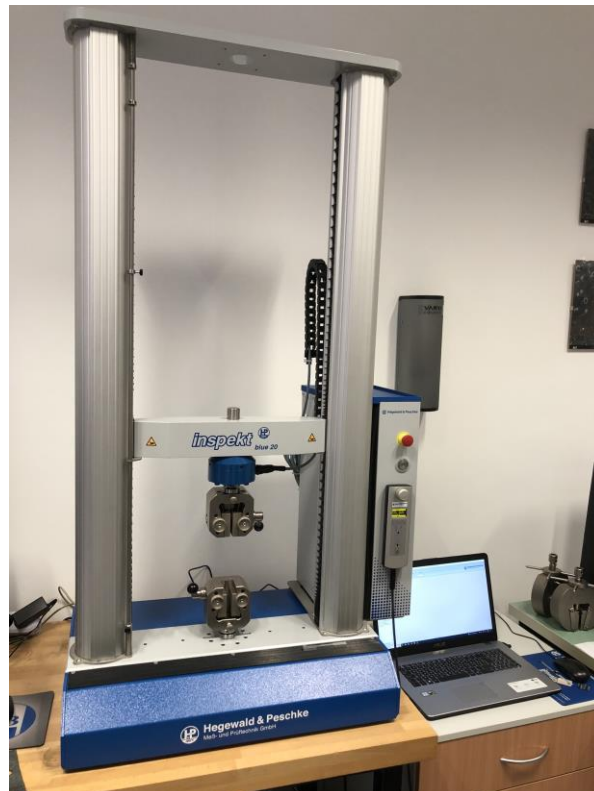
Slika 6.21 Peć za toplinsku obradu LAC PP 140/85



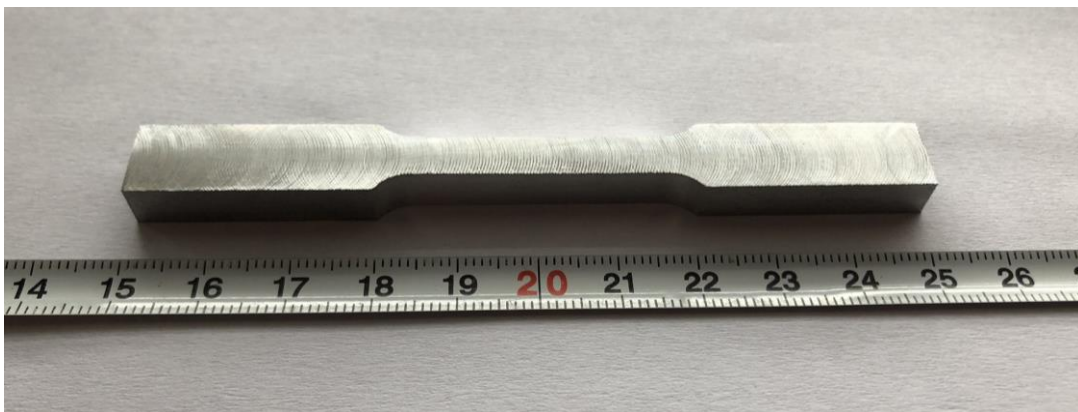
Slika 6.22 Dijagram toplinske obrade žarenja za redukciju zaostalih naprezanja

6.5. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje LPBF uzoraka provedeno je na Sveučilištu Sjever u Laboratoriju za ispitivanje materijala. Za ispitivanje je korištena kidalica od 20 kN njemačkog proizvođača Hegewald & Peschke (slika 6.23). Ispitano je pet uzoraka po stanju, odnosno ukupno 20 uzoraka. Prije ispitivanja svi uzorci su strojno obrađeni na hrapavost površine $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ kako bi se uklonile potporne strukture i postigla dimenzijska točnost (slika 6.24).



Slika 6.23 Hegewald & Peschke 20 kN kidalica



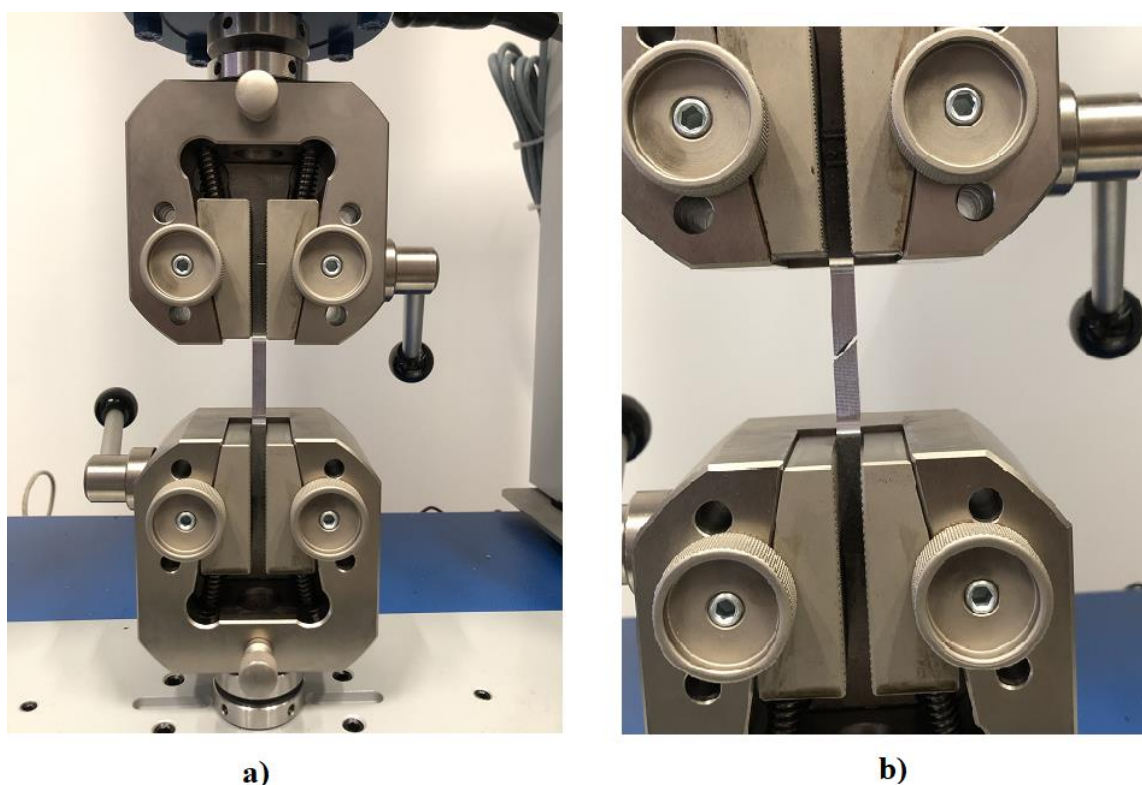
Slika 6.24 Epruveta za statičko vlačno ispitivanje nakon strojne obrade

Nakon stezanja ispitnih epruveta u čeljusti kidalice pomoću upravljačkog računala podešavaju se parametri ispitivanja. Nakon što se ostvari prednaprezanje od 20 MPa kreće kontinuirano vlačno opterećenje epruvete do loma. Prirast sile iznosi 100 N/s. Oznake uzoraka prema parametrima izrade prikazane su u tablici 12 i pojavljuju se u narednim rezultatima provedenih ispitivanja.

Tablica 12 Oznake uzoraka

„As built“ stanje			
Oznaka uzorka	Snaga lasera P , W	Brzina lasera v , mm/s	Gustoća energije lasera E , J/mm ³
B1	370	1100	28,03
B2	370	1200	25,69
Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja			
Oznaka uzorka	Snaga lasera P , W	Brzina lasera v , mm/s	Gustoća energije lasera E , J/mm ³
A1	370	1100	28,03
A2	370	1200	25,69

Na slici 6.25 prikazan je uzorak za statičko vlačno ispitivanje u čeljustima kidalice prije i nakon ispitivanja.



Slika 6.25 Uzorak u čeljustima kidalice (a) prije i (b) nakon ispitivanja

Nakon provedenih ispitivanja zamijećen je različiti položaj prijeloma na ispitnom dijelu epruvete. Kod B1 epruveta prijelom se dogodio u blizini središta ispitnog dijela, kod B2 epruveta položaj prijeloma pomaknut je ka jednoj od steznih površina epruvete dok je kod A1 i A2 epruveta taj pomak još izraženiji.



Slika 6.26 B1 epruvete nakon ispitivanja



Slika 6.27 A2 epruvete nakon ispitivanja

6.5.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Tablica 13 Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

R.br.	$R_{p0.2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²	F_{max} , kN	A , %	A_t , %
B1					
1	261,32	423,00	15,23	6,22	14,90
2	264,99	427,92	15,41	14,87	14,45
3	261,08	427,88	15,40	15,56	15,17
4	264,00	428,87	15,44	14,91	14,55
5	263,35	430,22	15,49	12,11	14,73
\bar{x}	262,95	427,58	15,39	12,73	14,76
B2					
1	268,50	411,52	14,81	12,98	12,62
2	270,01	390,77	14,07	3,63	11,24
3	269,24	414,57	14,92	13,41	13,05
4	267,95	427,39	15,39	14,57	14,21
5	269,42	396,12	14,26	3,86	11,75
\bar{x}	269,02	408,07	14,69	9,69	12,57
A1					
1	263,38	384,18	13,83	6,74	14,82
2	265,02	383,10	13,79	6,78	14,93
3	257,09	380,18	13,69	6,64	14,83
4	265,76	383,21	13,80	6,44	14,82
5	268,85	385,77	13,89	6,55	14,94
\bar{x}	264,02	383,29	13,8	6,63	14,87
A2					
1	270,34	388,27	13,98	5,59	13,76
2	272,77	390,70	14,07	4,97	13,16
3	269,41	391,39	14,09	4,83	13,19
4	268,70	372,06	13,39	12,24	11,80
5	267,25	387,59	13,95	5,62	14,00
\bar{x}	269,69	386	13,9	6,65	13,18

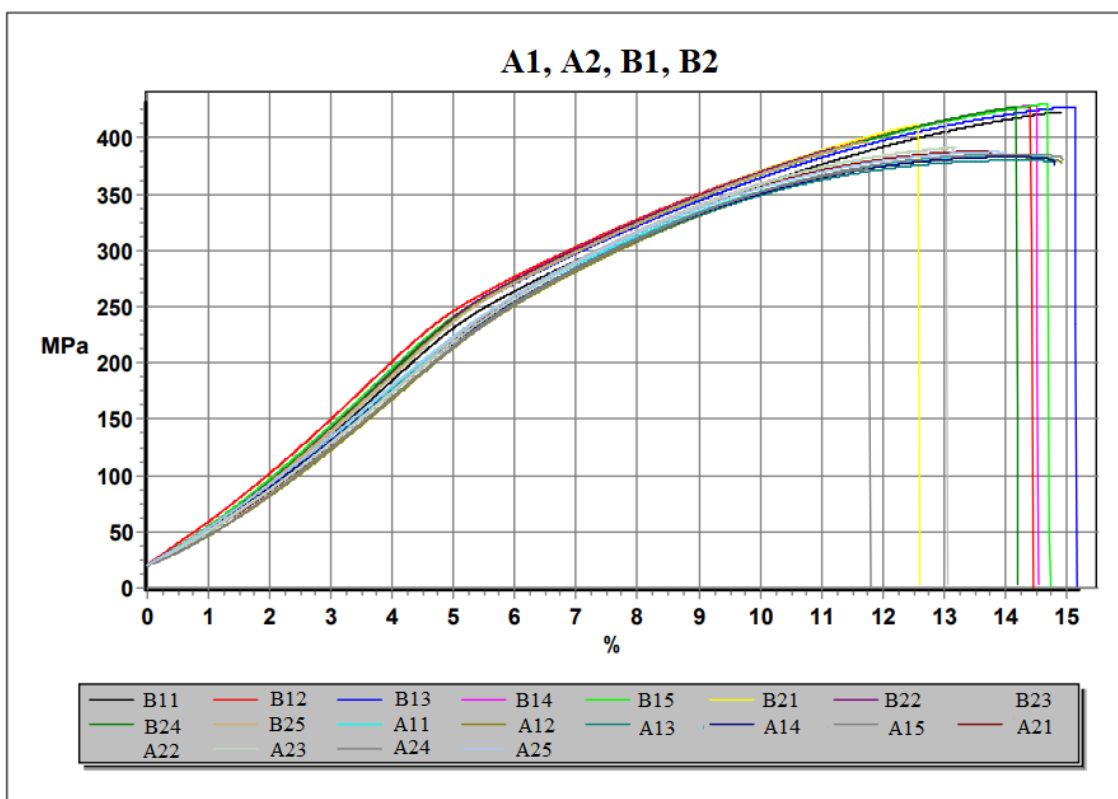
$R_{p0.2}$ – konvencionalna granica razvlačenja, MPa

R_m – vlačna čvrstoća, MPa

F_{max} – maksimalna sila, kN

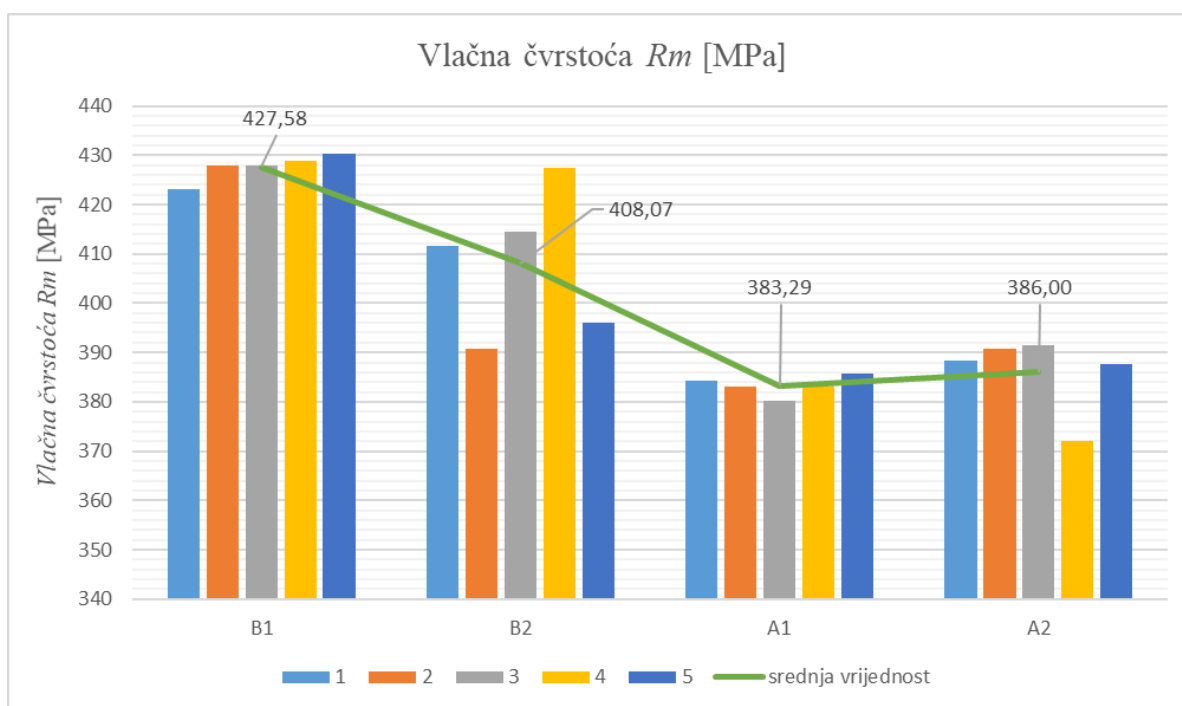
A – istežljivost, %

A_t – ukupna istežljivost, %

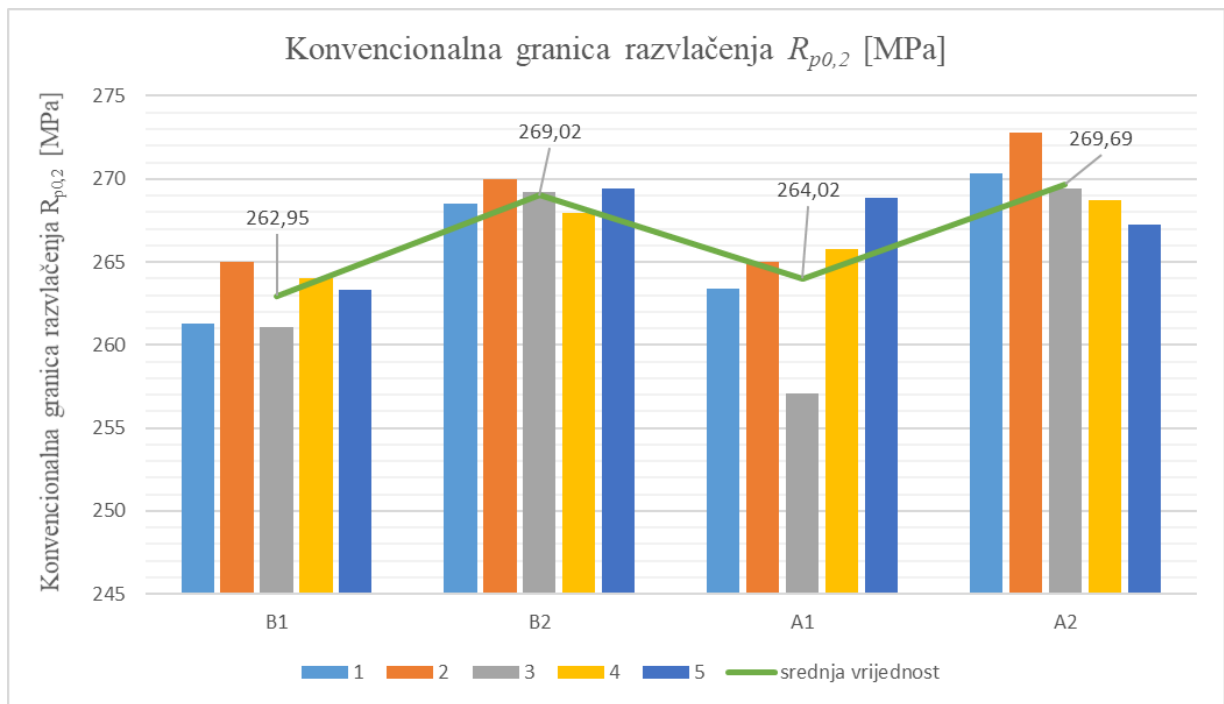


Slika 6.28 Dijagram naprezanje – istezanje za A1, A2, B1 i B2 uzorke

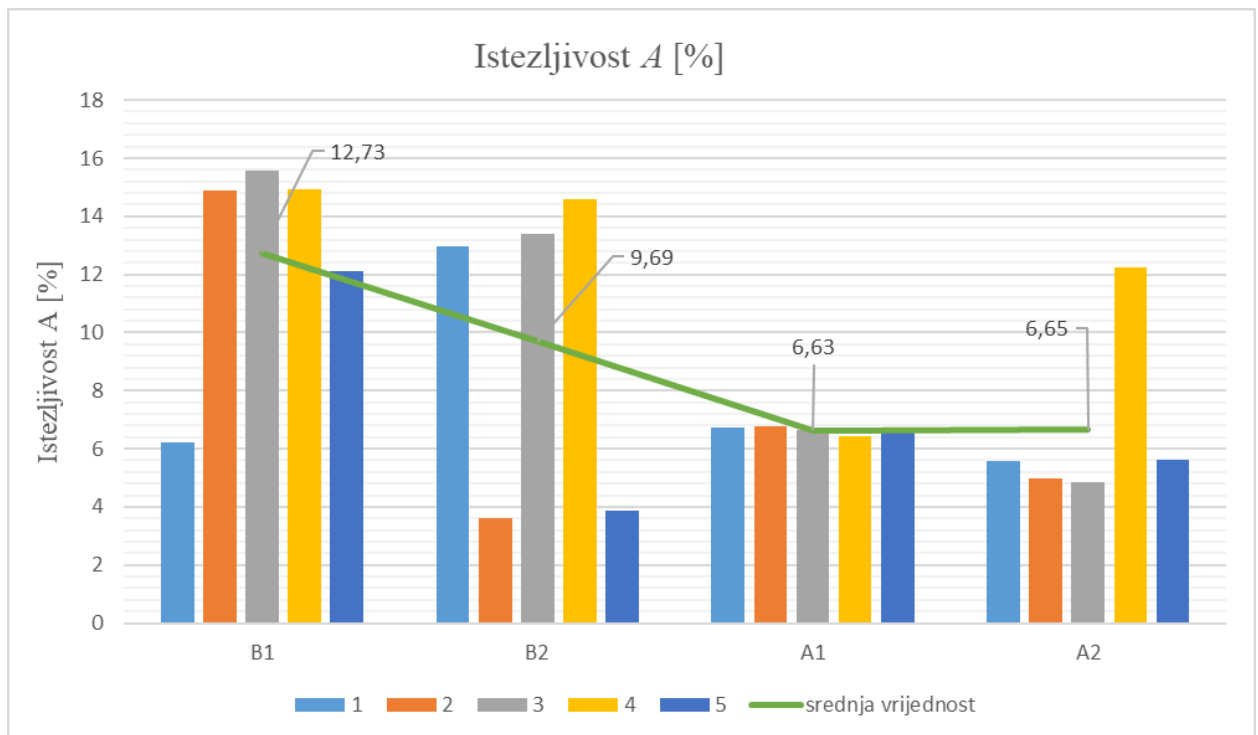
Dijagrami naprezanje – istezanje za svaku skupinu uzoraka zasebno nalaze se u prilogu diplomskog rada.



Slika 6.29 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – vlačna čvrstoća



Slika 6.30 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – konvencionalna granica razvlačenja



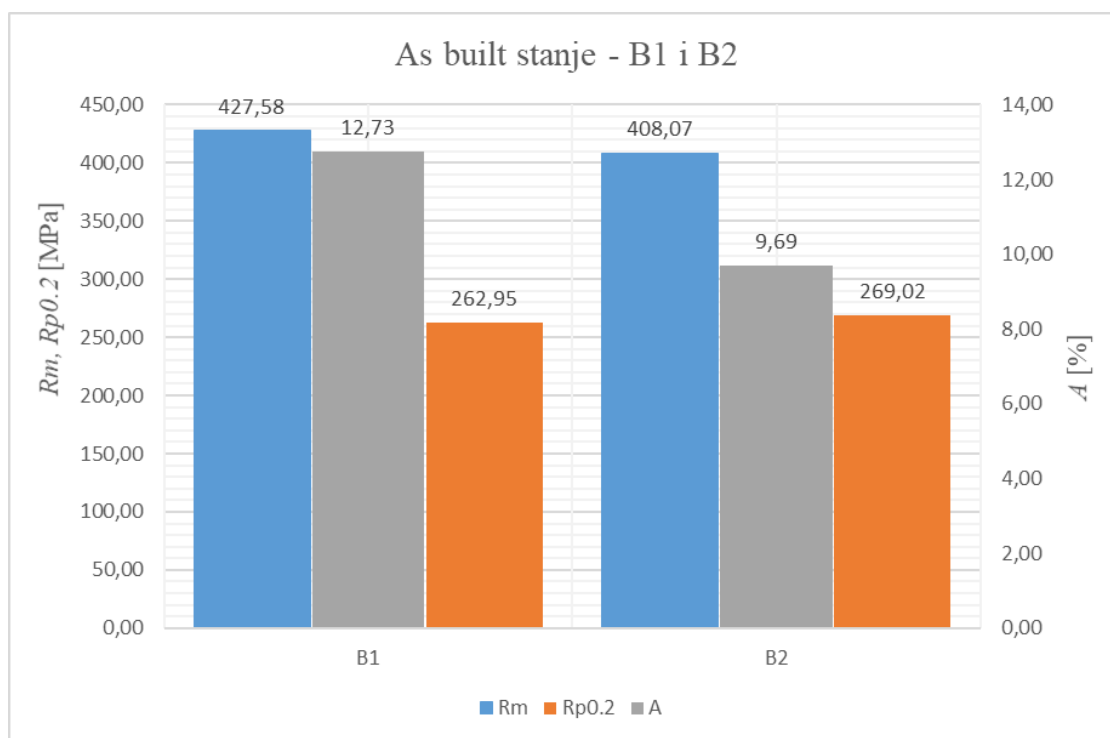
Slika 6.31 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – istezljivost

Tablica 14 Vrijednosti mehaničkih svojstava AlSi10Mg legure (AlSi10Mg_060_CoreM291 1.00 - 60 μ m) u „as built“ stanju prema podacima proizvođača [28]

Smjer građenja	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0.2}$, MPa	Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Istezljivost A, %
Vertikalno (Z)	240	440	4
Horizontalno (XY)	250	440	7

Na temelju tabličnih i grafičkih prikaza rezultata ispitivanja te usporedbom sa vrijednostima mehaničkih svojstva koje deklarira proizvođač za navedeni prah, moguće je donijeti sljedeće zaključke. Uzorci s oznakama 1 (A1 i B1) izrađeni su parametrima koji rezultiraju 17,5% manjom gustoćom energije lasera u odnosu na preporučene parametre, dok su uzorci s oznakama 2 (A2 i B2) izrađeni s parametrima čija je gustoća energije lasera manja za 24,4% od preporučene. Vrijednosti relativne gustoće u korelaciji su sa gustoćom energije lasera i nalaze se u proporcionalnom odnosu, što znači da će manja gustoća energije lasera rezultirati višim stupnjem poroziteta zbog nepotpunog taljenja i stapanja slojeva, odnosno manjom relativnom gustoćom. Nepravilnosti u mikrostrukturi materijala poput poroziteta u pravilu dovode do degradacije mehaničkih svojstava.

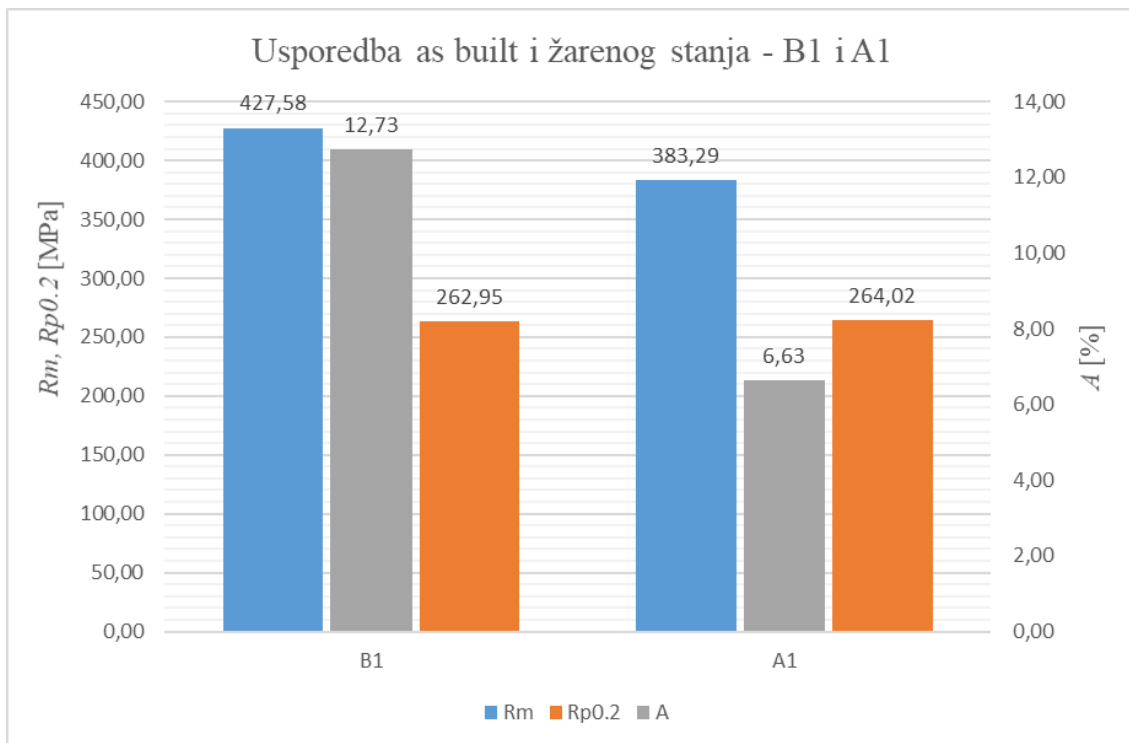
Na slici 6.32 grafički su prikazane vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istežljivosti za uzorke u „as built“ stanju (B1 i B2) koji se razlikuju prema gustoći energije lasera.



Slika 6.32 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – usporedba B1 i B2 stanja

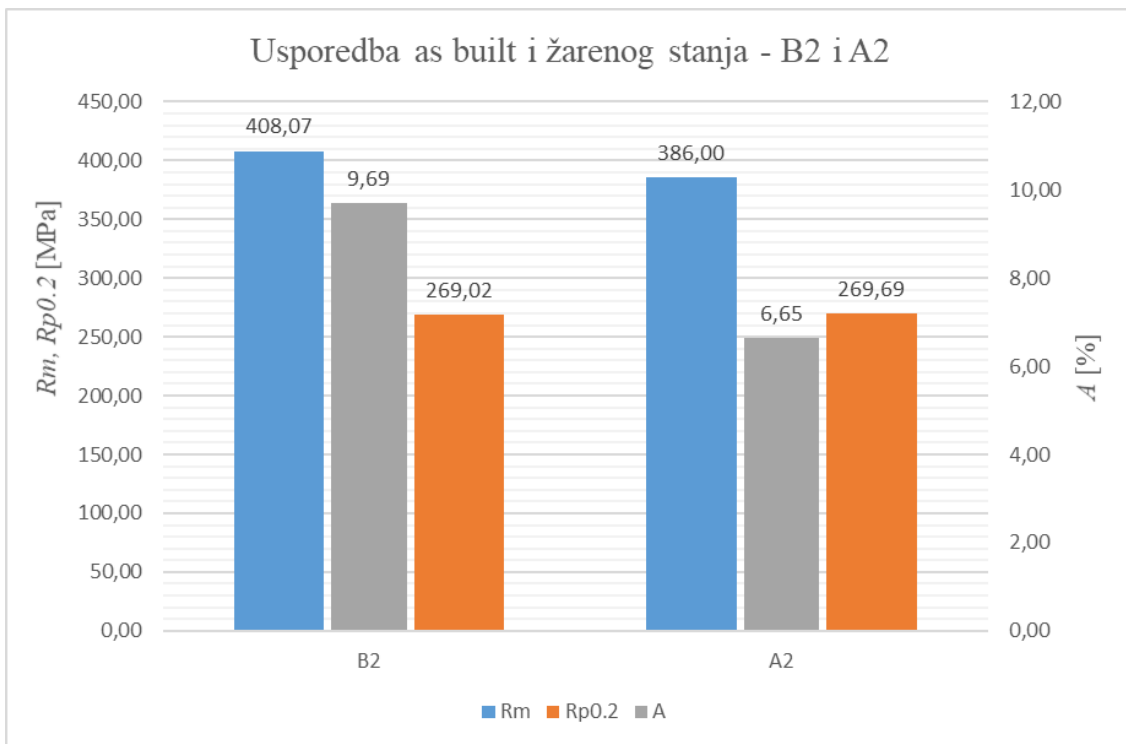
Uzorci oznake B1 razlikuju se po većoj vlačnoj čvrstoći i istežljivosti od uzoraka B2. Rezultat je očekivan zbog parametara printanja koji su rezultirali nešto većom gustoćom energije lasera. Iako je gustoća energije lasera prilično manja od preporučene od strane EOS-a, rezultati dobiveni statičkim vlačnim ispitivanjem vrlo su blizu deklariranim vrijednostima. Zapažena je veća istežljivost uzoraka u oba stanja u odnosu na EOS-ove vrijednosti.

Uzorci A1 i A2 toplinski su obrađeni žarenjem za redukciju zaostalih naprezanja. Kod žarenja za redukciju zaostalih naprezanja LPBF izradaka žrtvuje se vrijednost vlačne čvrstoće za poboljšanje duktilnosti koja se očituje kroz veću vrijednost istežljivosti A. Na slici 6.33 grafički je prikazana usporedba uzoraka B1 i A1 koji su izrađeni identičnim parametrima printanja, međutim uzorak A1 je naknadno žaren.



Slika 6.33 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – usporedba B1 i A1 stanja

Prema slici 6.33 uočava se pad vlačne čvrstoće uzoraka u žarenom stanju za oko 10%. Granica razvlačenja u žarenom stanju neznatno je viša, međutim došlo je do smanjenja istežljivosti za gotovo 48%. Na uzorcima je provedeno žarenje za redukciju zaostalih naprezanja na temperaturi od 250°C u trajanju od 3 sata nakon čega slijedi hlađenje na zraku. Za AlSi10Mg leguru EOS preporuča žarenje na 270°C u trajanju od 90 minuta. Smanjena vrijednost istežljivosti nakon žarenja svakako nije cilj ove toplinske obrade. Dobiveni rezultat može biti naznaka da su odabrani neadekvatni parametri toplinske obrade. Slični rezultati zapaženi su i kod uzoraka B2 i A2 gdje je uočen pad istežljivosti za 31% (slika 6.34).

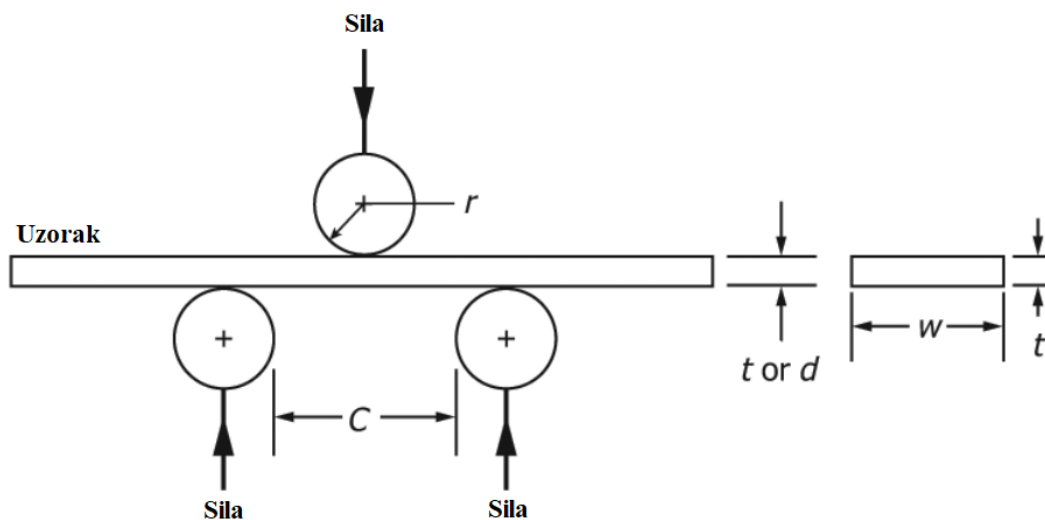


Slika 6.34 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – usporedba B2 i A2 stanja

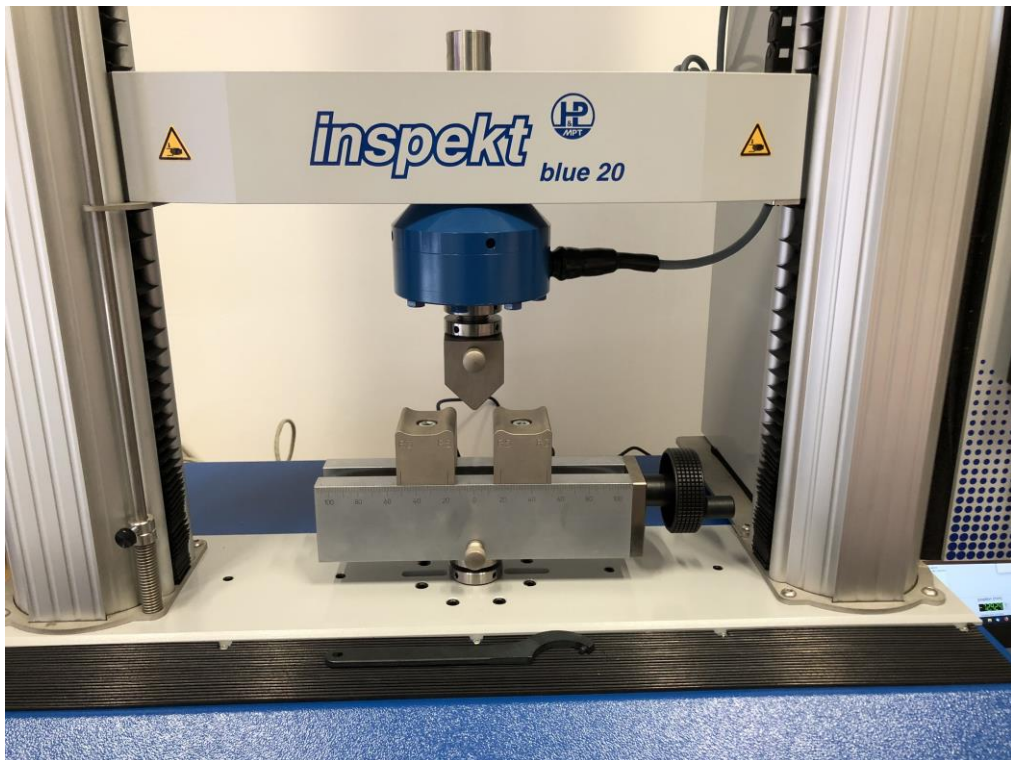
6.6. Ispitivanje savojne čvrstoće

Ispitivanje savojne čvrstoće R_{ms} provedeno je prema normi ASTM E290 postupkom savijanja u 3 točke na univerzalnoj kidalici Hegewald & Peschke. Udaljenost između oslonaca definirana je debljinom ispitnog uzorka i radijusom klipa te se izračunava prema formuli 2. Brzina ispitivanja iznosila je 5 mm/min.

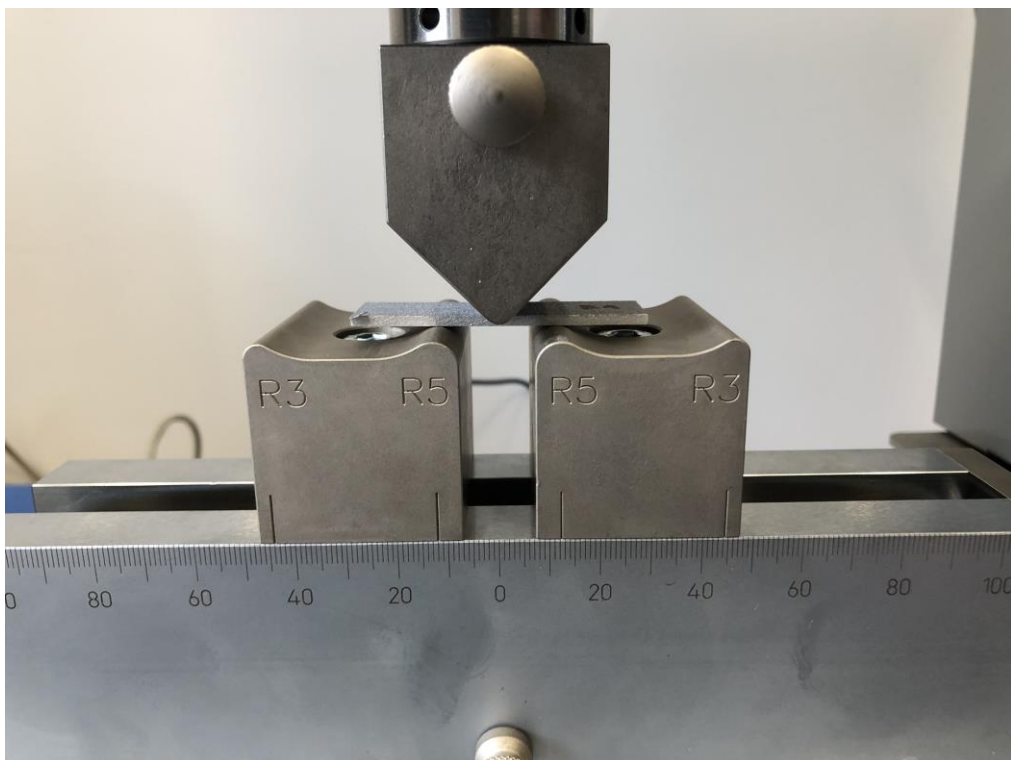
$$C = (2r + 3t) \pm t/2 \quad (2)$$



Slika 6.35 Shematski prikaz savijanja u 3 točke [35]



Slika 6.36 Oprema za provođenje ispitivanja



Slika 6.37 Ispitivanje savijanjem u 3 točke

6.6.1. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće

Tablica 15 Rezultati savijanja u 3 točke

R.br.	W , mm ³	Sc , mm	σfB , MPa	R_{ms} , MPa	εfB , %
B1					
1	10,67	3,00	557,153	775,067	5,678
2	10,67	3,00	530,506	755,318	5,847
3	10,67	3,00	522,483	745,109	5,802
\bar{x}	10,67	3,00	536,714	758,498	5,776
B2					
1	10,67	3,00	526,412	743,480	5,669
2	10,67	3,00	518,110	737,024	5,368
3	10,67	3,00	573,035	765,579	5,727
\bar{x}	10,67	3,00	539,186	748,694	5,588
A1					
1	10,67	3,00	432,434	614,212	5,579
2	10,67	3,00	420,038	596,929	5,392
3	10,67	3,00	420,203	599,796	5,930
\bar{x}	10,67	3,00	424,225	603,646	5,634
A2					
1	10,67	3,00	407,467	579,820	6,017
2	10,67	3,00	410,499	585,709	5,223
3	10,67	3,00	423,235	600,631	5,847
\bar{x}	10,67	3,00	413,734	588,72	5,696

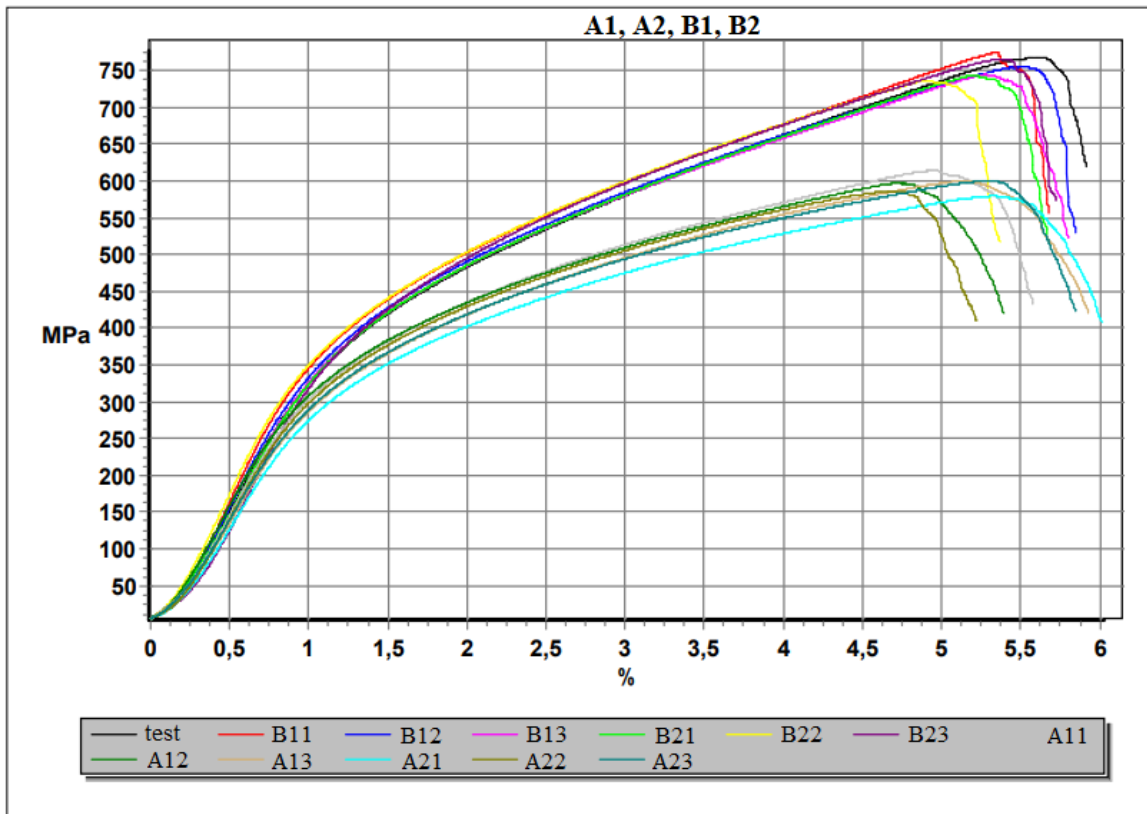
W – moment tromosti, mm³

Sc – konvencionalni progib, mm

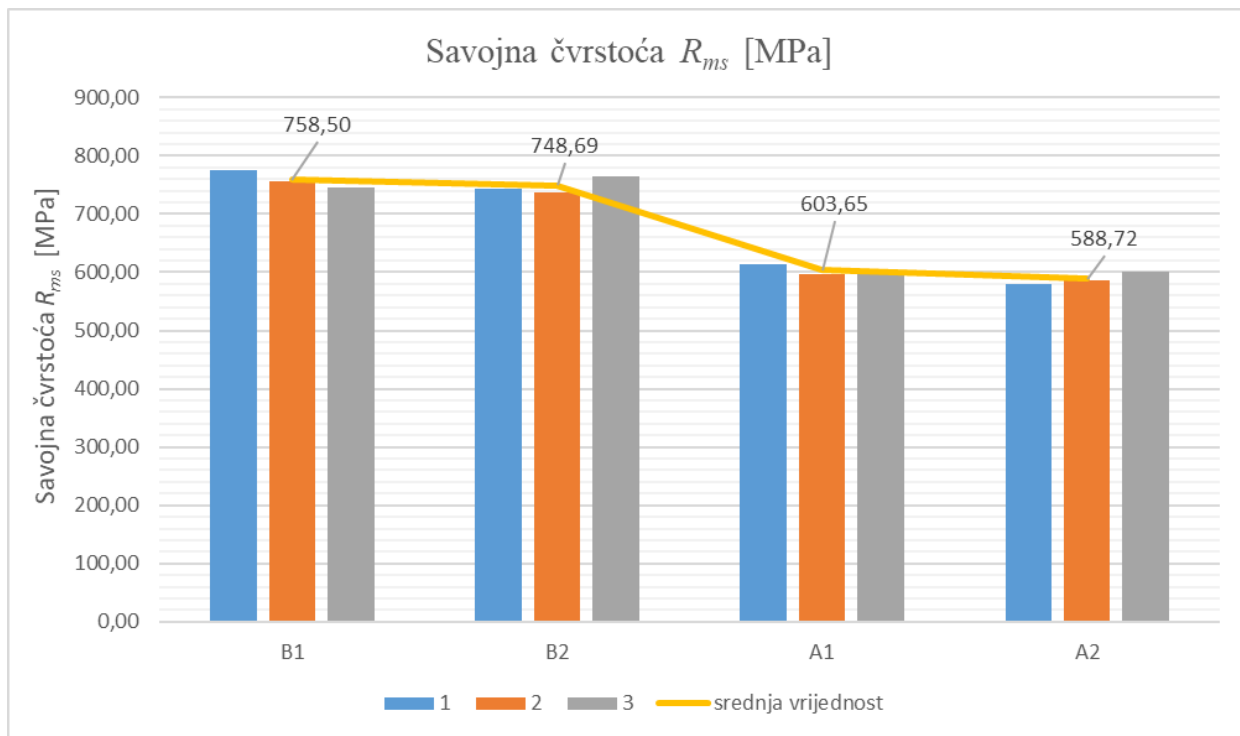
σfB – naprezanje uslijed savijanja pri lomu, MPa

R_{ms} – savojna čvrstoća, MPa

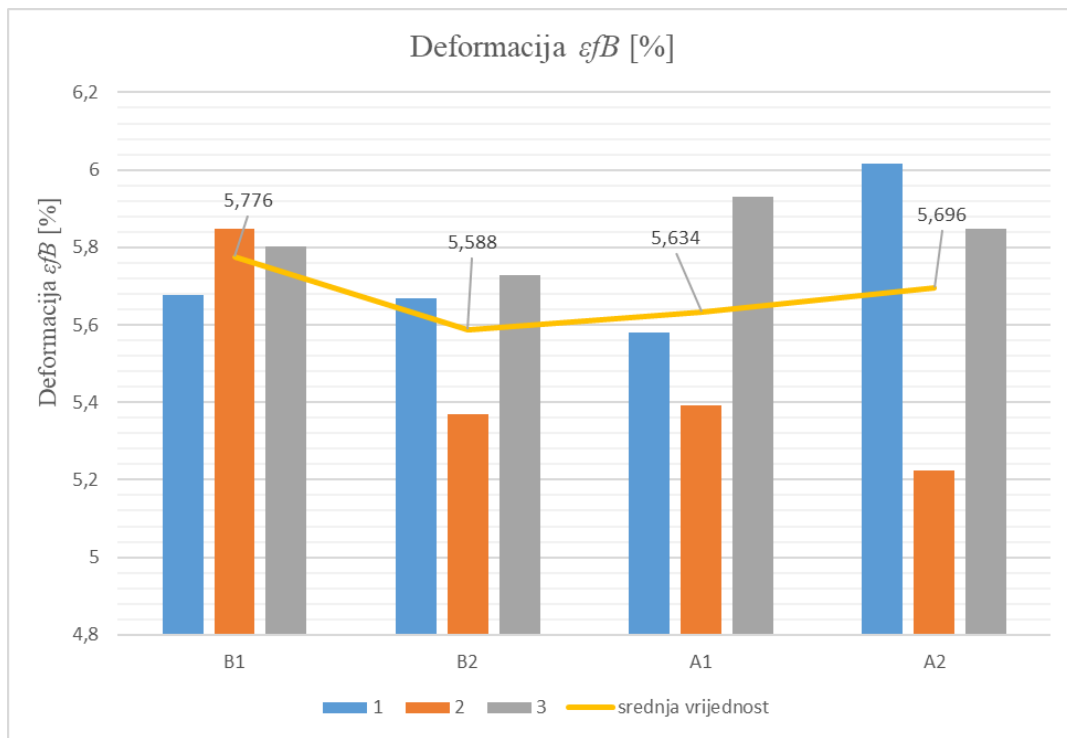
εfB – deformacija uslijed savijanja, %



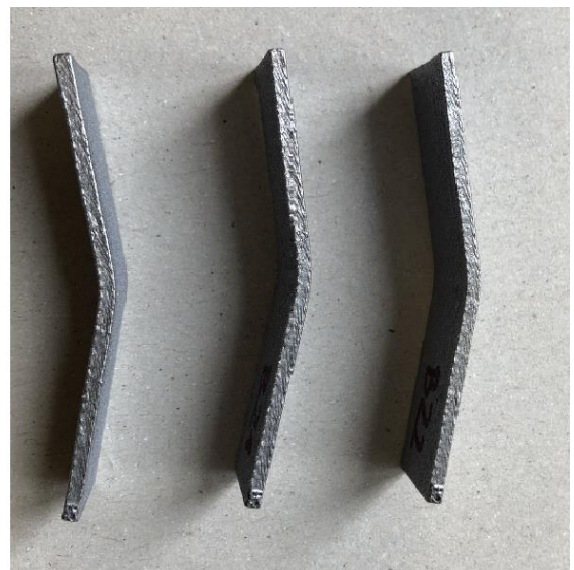
Slika 6.38 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće – A1, A2, B1 i B2 uzorci



Slika 6.39 Grafički prikaz rezultata savijanja – savojna čvrstoća



Slika 6.40 Grafički prikaz rezultata savijanja – deformacija



Slika 6.41 Uzorci nakon savijanja

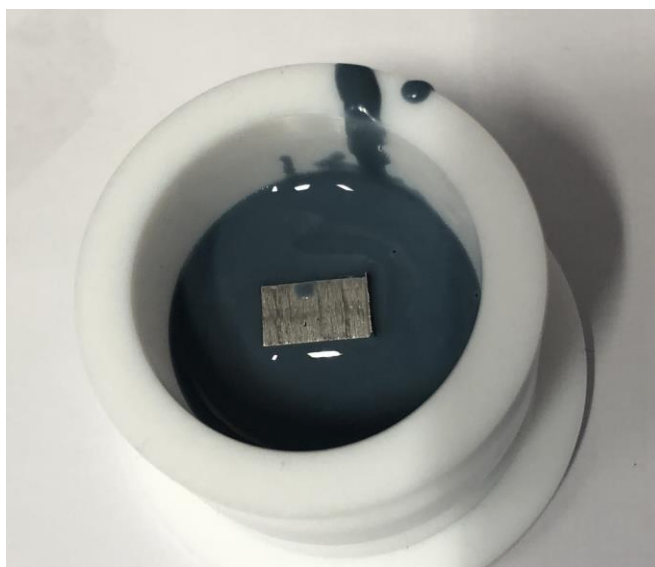
Najveće naprezanje pri savijanju pojavljuje se u točki koja je najudaljenija od neutralne osi koja prolazi težištem poprečnog presjeka. Gornji sloj koji je u kontaktu s klipom opterećen je tlačno, dok je donja površina vlačno opterećena. Vlačno opterećeni dio presjeka mjesto je inicijacije i propagacije pukotina. Kod LPBF uzoraka koncentrotori naprezanja na razini mikrostrukture mogu rezultirati manjom vrijednosti savojne čvrstoće. Na temelju rezultata dobivenih savijanjem uzoraka najveću savojnu čvrstoću postigli su uzorci B1 čiji prosjek iznosi

758,5 MPa što ukazuje na visoku otpornost na savijanje materijala izrađenog aditivnom proizvodnjom. Na uzorcima koji su žareni za redukciju zaostalih naprežanja zabilježen je pad savojne čvrstoće u iznosu 20,4% za uzorke izrađene većom gustoćom energije lasera te 21,4% kod uzoraka izrađenih manjom gustoćom energije lasera..

6.7. Ispitivanje mikrotvrdoće

6.7.1. Oblaganje uzoraka

Mjerenje mikrotvrdoće zahtjeva metalografsku pripremu uzoraka koja uključuje oblaganje u polimernu masu, brušenje i poliranje. Nakon provedbe statičkog vlačnog ispitivanja dijelovi epruveta su izrezani i obloženi u polimernu masu kako bi se olakšalo rukovanje uzorcima prilikom brušenja i poliranja. Materijal obloge je akrilna smola proizvođača Presi koja se u omjeru miješa s pripadajućim katalizatorom i ulijeva u kalup s uzorkom (slika 6.42).



Slika 6.42 Oblaganje uzorka u polimernu masu



Slika 6.43 Obloženi uzorci nakon vađenja iz kalupa

6.7.2. Brušenje i poliranje površine uzoraka

Daljnja priprema uzoraka odrađena je u Laboratoriju za metalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Brušenje pripada u obrade odvajanjem čestica i provodi se s ciljem da se ukloni sloj nečistoća, oksida i postigne ravna površina. Postupak brušenja odvija se u 5 koraka pri čemu se nakon svakog sljedećeg uzorak zakreće za 90°. U prvom koraku brušenja koristi se brusni papir P320, a zatim slijede P600, P1000, P2400 i P4000. Brzina vrtnje brusne ploče je konstantna i iznosi 300 okretaja u minuti za svaki korak. Sredstvo za ispiranje, hlađenje i podmazivanje je voda koja teče tijekom cijelog procesa brušenja. Naziv korištenog uređaja za brušenje i poliranje je Presi Mecatech 250 SPI (slika 6.44).



Slika 6.44 Presi Mecatech 250 SPI

Poliranje je završni postupak kojim se postiže zrcalna površina bez brazdi i oštećenja. Postupak poliranja odvija se u dva koraka pri brzini vrtnje od 150 okretaja u minuti. U prvom koraku korištena je dijamantna pasta s veličinom abrazivnih čestica 3 μm dok je u drugom korištena tekućina za poliranje s česticama veličine 0,03 μm . Nakon poliranja površina uzorka spremna je za ispitivanje mikrotvrdoće i analizu na svjetlosnim mikroskopu.

6.7.3. Postupak ispitivanja mikrotvrdoće

Ispitivanje mikrotvrdoće provodilo se na uređaju PMT-3 u Laboratoriju za metalografiju Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 6.45 Mikrotvrdomjer PMT-3

Mikrotvrdoća se odnosi na ispitivanja tvrdoće čija sila utiskivanja ne prelazi 2 N. Metoda po Vickersu koristi indenter u obliku četverostrane dijamentne piramide čiji vršni kut iznosi 136°. Indentor se utiskuje u površinu pripremljenih uzoraka pri opterećenju utega mase 20 g i 200 g. Za svako opterećenje napravljeno je 5 otisaka na svakom od uzoraka. Između svakog sljedećeg otiska nužno je ostaviti razmak koji ne smije biti manji od 3 duljine dijagonale otiska. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće prikazani su u tablicama 16 i 17.

Prema izrazu 3, na temelju izmjerene dijagonale i sile prodiranja indentora izračuna se iznos tvrdoće.

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{d^2} \quad (3)$$

F – sila, N

d – prosječna duljina dijagonale, mm

6.7.4. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće

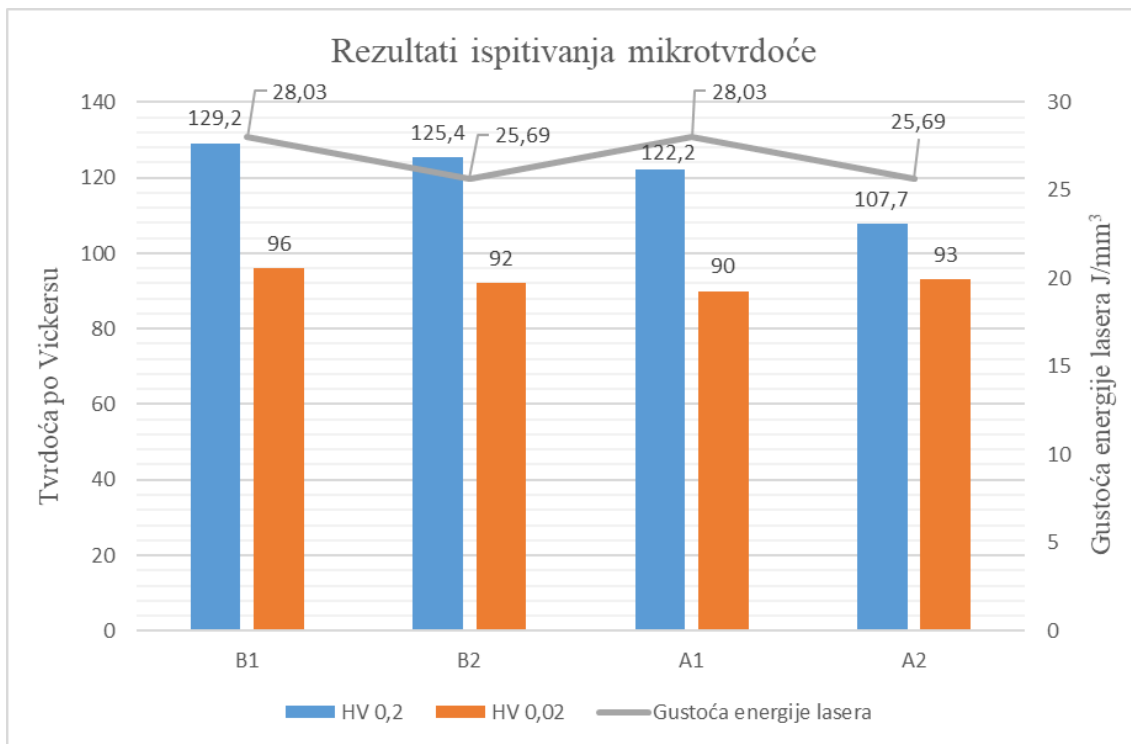
Tablica 16 Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće – HV 0,2

R.br.	d , μm	HV 0,2
B1		
1	55,27	121
2	54,06	127
3	54,06	127
4	51,34	141
5	53,45	130
\bar{x}		129,2
B2		
1	53,45	130
2	55,87	119
3	53,45	130
4	56,17	117
5	53,15	131
\bar{x}		125,4
A1		
1	56,17	117
2	53,45	130
3	54,06	127
4	54,96	123
5	57,08	114
\bar{x}		122,2
A2		
1	55,57	120
2	62,21	95,9
3	56,47	116
4	61,91	96,8
5	57,98	110
\bar{x}		107,74

d – prosječna duljina dijagonale, μm

Tablica 17 Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće – HV 0,02

R.br.	d [μm]	HV 0,02
B1		
1	17,21	125
2	19,03	102
3	21,44	81
4	20,84	85
5	20,84	85
\bar{x}		96
B2		
1	19,93	93
2	19,63	96
3	19,03	102
4	18,42	109
5	24,76	60
\bar{x}		92
A1		
1	19,03	102
2	21,14	83
3	20,84	85
4	19,03	102
5	21,74	78
\bar{x}		90
A2		
1	17,52	121
2	19,03	102
3	34,43	31
4	18,42	109
5	19,03	102
\bar{x}		93



Slika 6.46 Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće

Dobiveni podaci prikazani u tablicama i slici 6.46 pokazuju da promjena gustoće energije lasera kao i naknadno žarenje za redukciju zaostalih naprezanja nemaju značajan utjecaj na vrijednost mikrotvrdoće HV 0,02. Kod vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 uočen je pad kod uzoraka izrađenih s manjom gustoćom energije u „as built“ stanju i nakon žarenja u iznosu od 14%.

6.8. Analiza mikrostrukture

Analizirana je mikrostruktura uzoraka u poliranom stanju na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX 51. Analiza mikrostrukture napravljena je u Laboratoriju za metalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na slici 6.47 prikazana je površina uzoraka u poliranom stanju gdje se zamjećuje prisutnost poroziteta na svim uzorcima. Moguće je vidjeti zone taljenja i linije staljivanja. Identični parametri izrade uzrokovali su porozitet od 0,19 % za gustoću energije lasera 28,03 J/mm³ te 0,33 % za gustoću energije lasera 25,69 J/mm³ koji je mjereno u sklopu istraživanja [10]. Naknadno žarenje nije bitno utjecalo na mikrostrukturu i porozitet na uzorcima.



a)



b)



c)



d)

Slika 6.47 Površina uzoraka u poliranom stanju: a) B1, b) B2, c) A1, d) A2

7. Zaključak

Inženjeri u 21. stoljeću imaju na raspolaganju širok izbor tehničkih materijala i proizvodnih tehnologija za izradu tehničkih proizvoda. Izbor ovisi o geometrijskim karakteristikama komponenti i eksploatacijskim uvjetima koji definiraju zahtjeve na mehanička svojstva materijala. Iako čelik već dugi niz godina drži prvo mjesto po svjetskoj potrošnji, legure aluminija zbog svoje specifične čvrstoće i korozijske postojanosti zauzimaju drugo mjesto i neizostavni su dio gotovo svih proizvodnih sektora. Povećanje čvrstoće aluminijevih legura ostvaruje se različitim mehanizmima među kojima se ističu legiranje i precipitacijsko očvršnuće. AlSi10Mg je podeutektička legura približno eutektičkog sastava te je zbog niskog tališta, specifične čvrstoće i malog skupljanja najzastupljenija legura aluminija za proizvodnju komponenti LPBF postupkom.

Selektivno lasersko taljenje praha u komori je uz postupak taljenja elektronskim snopom najznačajnija metoda aditivne proizvodnje komponenti od metalnih materijala. Aditivne tehnologije proizvodnje su nekonvencionalne tehnologije kojima je između ostalog moguće izraditi geometrijske značajke koje su neizvedive klasičnim konvencionalnim tehnologijama. U proizvodnim postupcima gdje se građenje modela odvija sloj po sloj moguće je modificirati unutarnju strukturu proizvoda čime se smanjuje gustoća, odnosno masa ili se uvode nova tehnička rješenja poput kanala za hlađenje čime se produljuje radni vijek i poboljšava efikasnost pojedinih sustava. Kombinacijom proizvodnih mogućnosti aditivnih tehnologija i novih inženjerskih materijala moguće je izraditi komponente za najzahtjevnije namjene.

Kod LPBF postupka taljenje metalnog praha ostvaruje se pomoću lasera po konturama dobivenih na temelju ulaznog CAD modela. Postoje četiri ključna parametra koji definiraju gustoću energije lasera – snaga lasera, brzina taljenja, debljina sloja i razmak između putanja lasera (engl. *hatch distance*). Velik broj znanstvenih istraživanja usmjeren je upravo na optimizaciju navedenih parametara kako bi mikrostruktura i mehanička svojstva proizvoda bila što povoljnija. Gustoća energije lasera predstavlja unesenu toplinu i jedan je od najbitnijih parametara postupka. Male gustoće energije lasera rezultiraju većim porozitetom zbog nerastaljenih čestica praha i nepravilnog stapanja rastaljenih regija unutar materijala što se u konačnici manifestira lošijim mehaničkim svojstvima. Za optimalne rezultate postupka potrebno je pronaći parametre čija kombinacija rezultira najvećom relativnom gustoćom koja se u pravilu asimptotski približava teorijskoj vrijednosti za pojedini materijal. Zbog velikih brzina hlađenja osigurava se sitnozrnata mikrostruktura pa LPBF izradci u pravilu imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na lijevane izratke.

Temeljem rezultata statičkog vlačnog ispitivanja uočen je pad vrijednosti vlačne čvrstoće za oko 5% pri povećanju brzine taljenja za 100 mm/s. Nakon toplinske obrade žarenja za redukciju

zaostalih naprezanja došlo je do smanjenja vlačne čvrstoće za otprilike 10% kod uzoraka izrađenih s većom gustoćom energije te za 5,5% kod uzoraka izrađenih manjom gustoćom energije lasera. Žarenje za redukciju zaostalih naprezanja uzrokovalo je i manje vrijednosti istežljivosti. Kod uzoraka s većom gustoćom energije lasera za gotovo 48% te kod uzoraka s manjom gustoćom energije lasera za 31%.

Savojna čvrstoća nije se bitno promijenila kod uzoraka s različitom gustoćom energije lasera u „*as built*“ stanju dok je nakon toplinske obrade uočen pad savojne čvrstoće u prosjeku za 21%.

Rezultati dobiveni mjerenjem mikrotvrdoće ukazuju da promjena unosa energije s $28,03 \text{ J/mm}^3$ na $25,69 \text{ J/mm}^3$ kao i naknadno žarenje za redukciju zaostalih naprezanja značajno ne utječu na vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,02. Kod vrijednosti mikrotvrdoće HV 0,2 uočen je pad tvrdoće za oko 14% kod uzoraka izrađenih s manjom gustoćom energije lasera nakon žarenja.

Najbitniji korak u proizvodnji aditivnim tehnologijama je odabir parametara. Naizgled beznačajna promjena brzine taljenja potencijalno može degradirati vrijednosti mehaničkih svojstava finalnog proizvoda. Četiri spomenuta parametara moraju rezultirati dovoljnom gustoćom energije lasera kako bi se osiguralo potpuno taljenje materijala i staljivanje slojeva. Svakako je cilj proizvesti proizvod što veće relativne gustoće uz što bolja mehanička svojstva. Činjenica da se LPBF postupak koristi za izradu komponenti raketnih motora, satelita i dijelova zrakoplova dovoljno govori o razini znanja o postupku kao i kvaliteti izradaka.

8. Literatura

- [1] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker: Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Springer, 2014.
- [2] ISO/ASTM 52900:2021(en): Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary, dostupno na <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (pristupljeno 3.4.2024.)
- [3] D. L. Bourell, W. Frazier, H. Khun, M. Seifi: ASM Handbook volume 24: Additive Manufacturing Processes, ASM International, 2020.
- [4] N. Guo, M. C. Leu: Additive manufacturing: technology, applications and research needs, Frontiers of Mechanical Engineering, Volume 8, 215-243, 2013.
- [5] D. Vidersčak: Utjecaj parametara selektivnog laserskoga taljenja na strukturu i svojstva dentalne Co-Cr legure, disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2023.
- [6] M. Ewy: Selective Laser Melting Technology: Benefits, Applications and Best Models, članak na blogu dostupan na <https://top3dshop.com/blog/selective-laser-melting-technology-benefits-applications-and-best-models> (pristupljeno 4.4.2024.)
- [7] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, L. S. Sing: Review of selective laser melting: Materials and applications, Applied Physics Reviews, 2015.
- [8] Q. Wang, M. Gao, L. Li, Z. Ma, C. Liu: Energy-based environmental impact evaluation and modeling of selective laser melting, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, br. 115, str. 1155-1169, 2021.
- [9] T. G. Spears, S. A. Gold: In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing, Integrating Materials and Manufacturing Innovation, br. 5, str. 16-40, 2016.
- [10] Šolić, Sakač, Šercer, Tropša: Influence of the LPBF Process Parameters on the Porosity of the AlSi10Mg Alloy, TECHNICAL JOURNAL 18, 1(2024), 87-91
- [11] V. Županić: Karakterizacija MARAGING čelika dobivenih aditivnim postupkom selektivnog laserskog taljenja, diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2021.
- [12] C. Cavallo: All About Selective Laser Melting 3D Printing, članak na blogu dostupan na <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/selective-laser-melting-3d-printing/> (pristupljeno 9.4.2024.)
- [13] E. M. Sefene: State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review, Journal of Manufacturing Systems, Vol.63, str. 250-274, 2022.
- [14] A. Khaimovich, Y. Erisov, V. Smelov, A. Agapovichev, I. Petrov, V. Razhivin, I. Bobrovskij, V. Kokareva, A. Kuzin: Interface Quality Indices of Al-10Si-Mg Aluminum Alloy and Cr18-Ni10-Ti Stainless-Steel Bimetal Fabricated via Selective Laser Melting, Metals 2021

- [15] Apsorpcijski koeficijent, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, dostupno na <https://www.enciklopedija.hr/clanak/apsorpcijski-koeficijent> (pristupljeno 10.4.2024.)
- [16] R. Fraj-Sladoljev: Selektivno lasersko srašćivanje i taljenje metala, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [17] S. Kumar: Selective Laser Sintering/Melting, Comprehensive Materials Processing, Vol. 10, str. 93-134, 2014.
- [18] A. Bajard, P. Sallamand, O. Aubreton, F. Truchetet: 3D Digitization of Metallic Specular Surfaces using Scanning from Heating Approach, Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2021.
- [19] H. Jia, H. Sun, H. Wang, Y. Wu, H. Wang: Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.
- [20] J. Ning, D. E. Sievers, H. Garmestani, S.Y. Liang: Analytical Modeling of In-Process Temperature in Powder Bed Additive Manufacturing Considering Laser Power Absorption, Latent Heat, Scanning Strategy and Powder Packing, Materials 2019
- [21] P. Moghimian, T. Poirie, M. Korayem, J. A. Zavala, J. Kroeger, F. Marion, F. Larouche: Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys, Additive Manufacturing, Vol. 43, 2021.
- [22] I. Poljak: Mikrostruktura i mehanička svojstva lijevane i 3D ispisane legure AlSi10Mg, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [23] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Udžbenik Sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [24] 6000 series aluminum alloys, članak na blogu dostupan na <https://taberextrusions.com/6000-series-aluminum-alloys/> (pristupljeno 17.4.2024.)
- [25] S. Šolić, N. Dolić, V. Tropša: Utjecaj temperature žarenja na mikrostrukturu i tvrdoću AlSi10Mg dijelova proizvedenih SLM aditivnim postupkom, MTECH - International conference on materials, 2021.
- [26] Q. Miao, D. Wu, D. Chai, Y. Zhan, G. Bi, F. Niu, G. Ma: Comparative study of microstructure evaluation and mechanical properties of 4043 aluminum alloy fabricated by wire-based additive manufacturing, Materials & Design, Vol. 186, 2022.
- [27] B. Song, Q. Yan, Y. Shi: Comparative study of performance comparison of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting and casting, Journal of Materials Science & Technology, 2019.
- [28] EOS GmbH, EOS Aluminum AlSi10Mg: Material Data Sheet, dostupno na <https://www.eos.info/05-datasheet->

[images/Assets_MDS_Metal/EOS_Aluminium_AlSi10Mg/Material_Datasheet_EOS_Aluminium_AlSi10Mg_EN.pdf](#) (pristupljeno 20.4.2024.)

- [29] J.-P. Kruth, M. Badrossamay, E. Yasa, J. Deckers, L. Thijs, J. Van Humbeeck: Part and material properties in selective laser melting of metals, 16th International Symposium on Electromachining, ISEM 2010.
- [30] A. D. Brandao, J. Gumpinger, M. Gschweidl, C. Seyfert, P. Hofbauer, T. Ghidini: Fatigue Properties of Additively Manufactured AlSi10Mg – Surface Treatment Effect, 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD 2017.
- [31] P. Mercelis, J.-P. Kruth: Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, Vol. 12, str. 254-265, 2006.
- [32] Z.-C. Fang, Z.-L. Wu, C.-G. Huang, C.-W. Wu: Review on residual stress in selective laser melting additive manufacturing of alloy parts, Optics & Laser Technology, Vol. 129, 2020.
- [33] ASTM Standard F3122, 2022., Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes, ASTM International, DOI: 10.1520/F3122-14R22, www.astm.org
- [34] EOS GmbH, EOS M 290, Technical Dana, dostupno na <https://www.eos.info/en-us/metal-solutions/metal-printers/eos-m-290#technical-data> (pristupljeno 15.5.2024.)
- [35] ASTM Standard E290, 2022., Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility, ASTM International, DOI: 10.1520/E0290-22, www.astm.org

Popis slika

Slika 2.1 Proizvod od više komponenti (a) reduciran na jednu komponentu (b) [3].....	2
Slika 2.2 Alat za injekcijsko prešanje s unutarnjim kanalima za hlađenje proizveden aditivnom tehnologijom [3]	3
Slika 2.3 Koraci aditivne proizvodnje [1]	3
Slika 2.4 Funkcionalno stupnjevani materijali [3].....	4
Slika 2.5 Primjer funkcionalnog stupnjevanog materijala od 100% Al_2O_3 do 50% Al_2O_3 i 50% ZrO_2 [4].....	4
Slika 2.6 Usporedba: a) jedinična cijena o veličini serije; b) jedinična cijena o složenosti geometrije [5].....	5
Slika 3.1 Prvi primjerak proizveden od ABS materijala postupkom s komorom praha (engl. Powder bed) [3]	6
Slika 3.2 a) broj znanstvenih radova o LPBF postupku od 1999. do 2014. ; b) broj znanstvenih radova o LPBF postupku metalnih materijala, keramika i kompozita ; c) broj znanstvenih radova o LPBF postupku prema kategoriji metalnih materijala [7]	7
Slika 3.3 Princip rada LPBF postupka [8]	8
Slika 3.4 Nanošenje sloja praha pomoću klizača [9].....	8
Slika 3.5 Prikaz glavnih parametara postupka [14]	10
Slika 3.6 Utjecaj glavnih parametara LPBF postupka [13]	11
Slika 3.7 Apsorpcijski koeficijent pojedinih metala [18]	11
Slika 3.8 Jednosmjerna i dvosmjerna strategija skeniranja [20].....	12
Slika 3.9 Primjeri različitih strategija skeniranja [5]	13
Slika 3.10 Veličina čestica i količina proizvedenog praha postupkom atomizacije [3]	14
Slika 3.11 Metode atomizacije; a) atomizacija plinom; b) atomizacija vodom; c) atomizacija plazmom; d) centrifugalna atomizacija rotirajućom elektrodom [21].....	14
Slika 3.12 Usporedba veličine i oblika čestica $AlSi10Mg$ metalnog praha dobivenog plinskom atomizacijom i atomizacijom plazmom [21]	15
Slika 3.13 Pogreške pri nanošenju metalnog praha [3]	15
Slika 4.1 Podjela aluminijskih legura [22, 23, 24]	17
Slika 4.2 Dijagram stanja Al-Si [26]	18
Slika 4.3 Mikrostruktura $AlSi10Mg$ legure dobivene LPBF postupkom [27]	19
Slika 5.1 Utjecaj brzine skeniranja i debljine sloja praha na vrijednost relativne gustoće (vrijednosti za AISI 316L čelik) [29].....	21
Slika 5.2 Utjecaj strategije skeniranja na relativnu gustoću [29]	22

Slika 5.3 Poboljšanje kvalitete površine uslijed površinskog pretaljivanja laserom; a) izradak u „as built“ stanju; b) površina nakon površinskog pretaljivanja (200 mm/s brzina skeniranja u kombinaciji s 95 W snage lasera) [29]	23
Slika 5.4 Wöhlerov dijagram AlSi10Mg legure dobivene LPBF postupkom i lijevanjem [27] ...	25
Slika 5.5 Prijelomna površina AlSi10Mg LPBF legure uslijed dinamičkog ispitivanja zabilježena na SEM mikroskopu; b) inicijacija/žarište [30].....	25
Slika 5.6 Nastanak toplinskih zaostalih naprezanja uslijed ciklusa zagrijavanja i hlađenja kod LPBF postupka [31].....	26
Slika 5.7 Utjecaj zaostalih naprezanja: a) pucanje izratka od Inconel 718; b) pukotina u Ti-6Al-4V leguri; c) raslojavanje [32].....	26
Slika 5.8 Optimalna strategija skeniranja za smanjenje zaostalih naprezanja [29]	26
Slika 6.1 3D modeli ispitnih uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava: a) uzorak za statičko vlačno ispitivanje; b) uzorak za dinamičko ispitivanje; c) uzorak za ispitivanje savijanja u 3 točke.....	28
Slika 6.2 Uzorak za statičko vlačno ispitivanje s dodatkom za uklanjanje s ploče	28
Slika 6.3 EOS M 290 – Metalska jezgra	29
Slika 6.4 Radna komora EOS M 290	30
Slika 6.5 Upravljačko računalo – podešavanje visine platformi	31
Slika 6.6 Hrapavost površine izratka u ovisnosti o kutu građenja za AlSi10Mg_060_CoreM291 1.00 [28].....	32
Slika 6.7 Raspored uzoraka na ploči	33
Slika 6.8 Potporne strukture i označavanje uzoraka u EOSPRINT 2 programu	33
Slika 6.9 Radna ploča od aluminijske legure	34
Slika 6.10 Pripremljen radni prostor stroja za početak ispisa.....	35
Slika 6.11 Prvi sloj praha na radnoj ploči.....	35
Slika 6.12 Plinske boce argona.....	36
Slika 6.13 Priprema radne komore za početak printanja	36
Slika 6.14 Početak printanja – prvi prolaz lasera	37
Slika 6.15 Završetak printanja	37
Slika 6.16 Odstranjivanje viška praha nakon printanja	38
Slika 6.17 Ploča s isprintanim ispitnim uzorcima	38
Slika 6.18 Prosijavanje metalnog praha	39
Slika 6.19 Ploča s isprintanim uzorcima nakon uklanjanja sa stroja.....	39
Slika 6.20 Odvajanje uzoraka s ploče.....	40
Slika 6.21 Peć za toplinsku obradu LAC PP 140/85	41

Slika 6.22 Dijagram toplinske obrade žarenja za redukciju zaostalih naprezanja.....	41
Slika 6.23 Hegewald & Peschke 20 kN kidalica	42
Slika 6.24 Epruveta za statičko vlačno ispitivanje nakon strojne obrade.....	42
Slika 6.25 Uzorak u čeljustima kidalice (a) prije i (b) nakon ispitivanja	43
Slika 6.26 B1 epruvete nakon ispitivanja	44
Slika 6.27 A2 epruvete nakon ispitivanja	44
Slika 6.28 Dijagram naprezanje – istežanje za A1, A2, B1 i B2 uzorke	46
Slika 6.29 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – vlačna čvrstoća	46
Slika 6.30 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – konvencionalna granica razvlačenja	47
Slika 6.31 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – istežljivost.....	47
Slika 6.32 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – usporedba B1 i B2 stanja....	48
Slika 6.33 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – usporedba B1 i A1 stanja....	49
Slika 6.34 Grafički prikaz rezultata statičkog vlačnog ispitivanja – usporedba B2 i A2 stanja....	50
Slika 6.35 Shematski prikaz savijanja u 3 točke [35]	50
Slika 6.36 Oprema za provođenje ispitivanja	51
Slika 6.37 Ispitivanje savijanjem u 3 točke	51
Slika 6.38 Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće – A1, A2, B1 i B2 uzorci	53
Slika 6.39 Grafički prikaz rezultata savijanja – savojna čvrstoća	53
Slika 6.40 Grafički prikaz rezultata savijanja – deformacija.....	54
Slika 6.41 Uzorci nakon savijanja	54
Slika 6.42 Oblaganje uzorka u polimernu masu	55
Slika 6.43 Obloženi uzorci nakon vađenja iz kalupa.....	55
Slika 6.44 Presi Mecatech 250 SPI.....	56
Slika 6.45 Mikrotvrdomjer PMT-3.....	57
Slika 6.46 Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće	60
Slika 6.47 Površina uzoraka u poliranom stanju: a) B1, b) B2, c) A1, d) A2	61

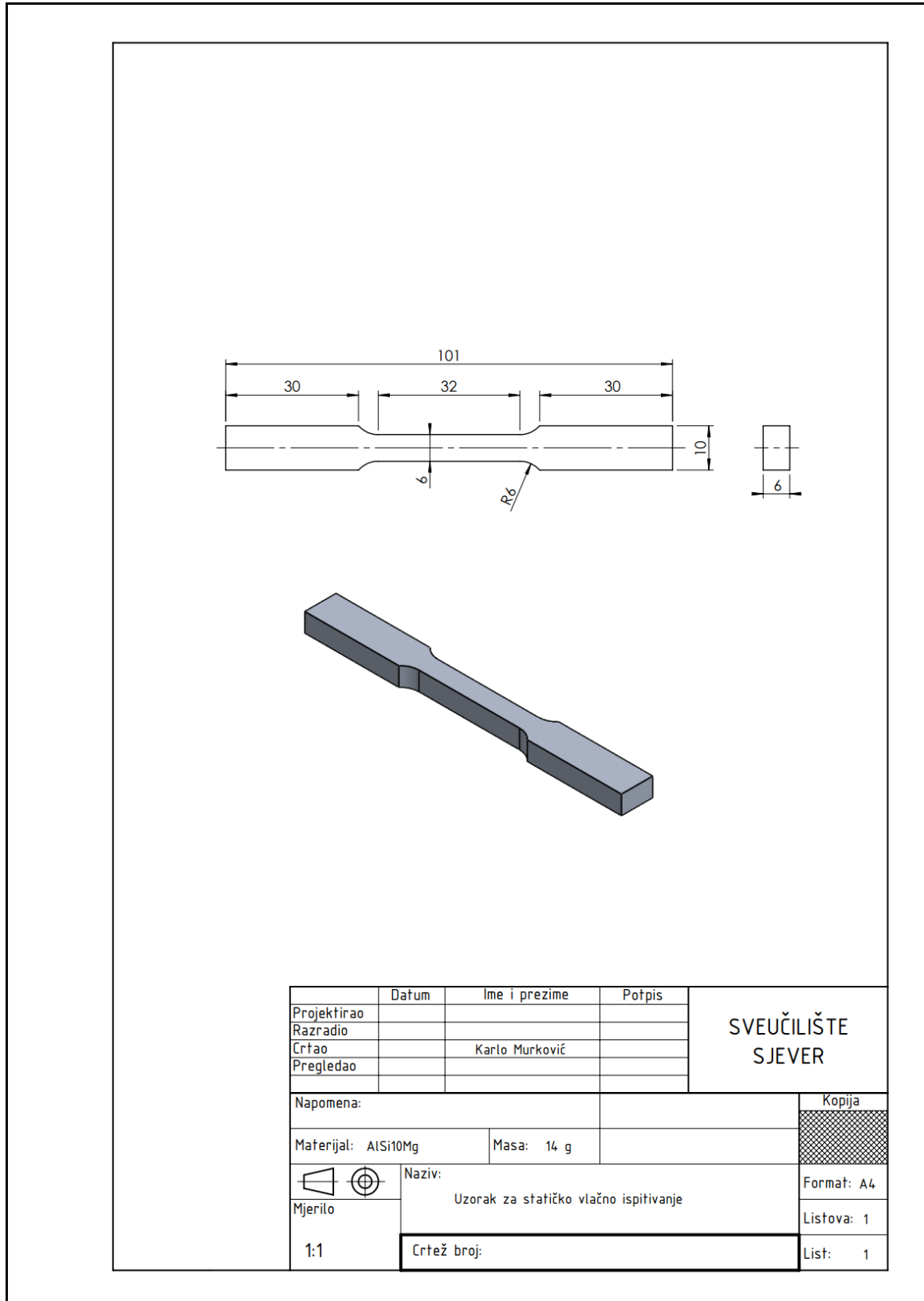
Popis tablica

Tablica 1 Specifikacije LPBF postupka [7, 12].....	9
Tablica 2 Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [22, 23]	16
Tablica 3 Kemijski sastav AlSi10Mg legure [22, 25]	19
Tablica 4 Maksimalna relativna gustoća pojedinih materijala kod LPBF postupka [7]	20
Tablica 5 Vrijednosti čvrstoće materijala dobivenih LPBF postupkom [7, 27].....	24
Tablica 6 Usporedba vrijednosti udarnog rada loma epruveta izrađenih LPBF i konvencionalnim postupkom [29].....	24
Tablica 7 Ispitni uzorci korišteni u eksperimentalnom dijelu s pripadajućim standardom	27
Tablica 8 Karakteristike EOS M 290 [34].....	30
Tablica 9 Vrijednosti mehaničkih svojstava u as built stanju [28].....	31
Tablica 10 Vrijednosti mehaničkih svojstava nakon toplinske obrade (EOS T6) [28]	32
Tablica 11 Parametri izrade ispitnih uzoraka i usporedba s EOS parametrima	34
Tablica 12 Oznake uzoraka	43
Tablica 13 Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja	45
Tablica 14 Vrijednosti mehaničkih svojstava AlSi10Mg legure (AlSi10Mg_060_CoreM291 1.00 - 60µm) u „as built“ stanju prema podacima proizvođača [28].....	48
Tablica 15 Rezultati savijanja u 3 točke	52
Tablica 16 Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće – HV 0,2.....	58
Tablica 17 Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće – HV 0,02.....	59

Prilozi

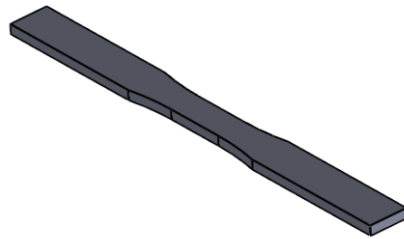
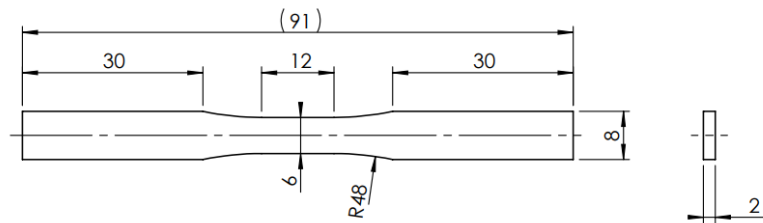
Prilog 1

Tehnički crtež uzorka za statičko vlačno ispitivanje



Prilog 2

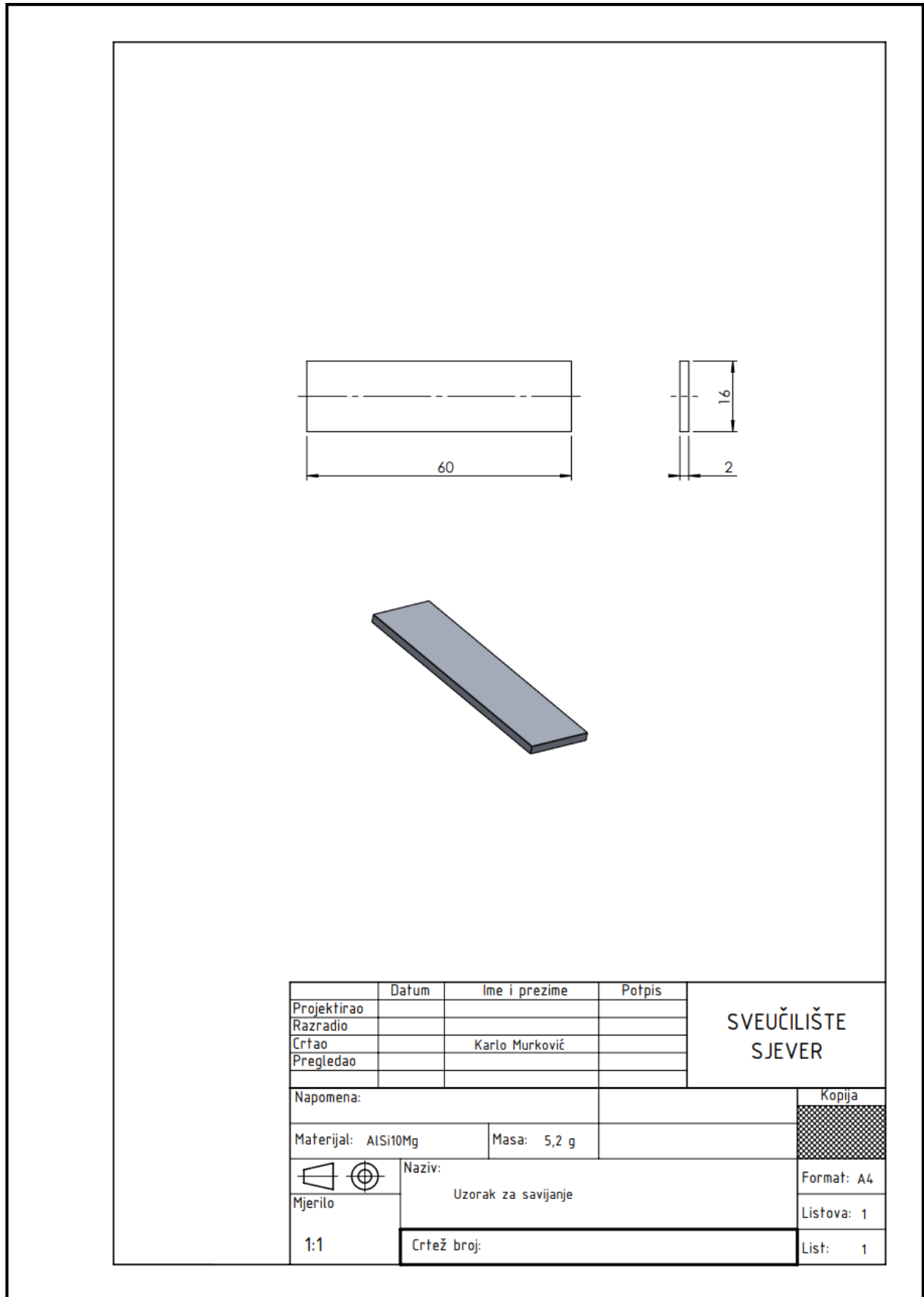
Tehnički crtež uzorka za dinamičko ispitivanje



	Datum	Ime i prezime	Potpis	SVEUČILIŠTE SJEVER
Projektirao				
Razradio				
Crtao		Karlo Murković		
Pregledao				
Napomena:				Kopija
Materijal:	AlSi10Mg	Masa:	3,8 g	
		Naziv:		Format: A4
Mjerilo	1:1	Uzorak za dinamičko ispitivanje		Listova: 1
		Crtež broj:		List: 1

Prilog 3

Tehnički crtež uzorka za savijanje



Prilog 4

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja – uzorak B1

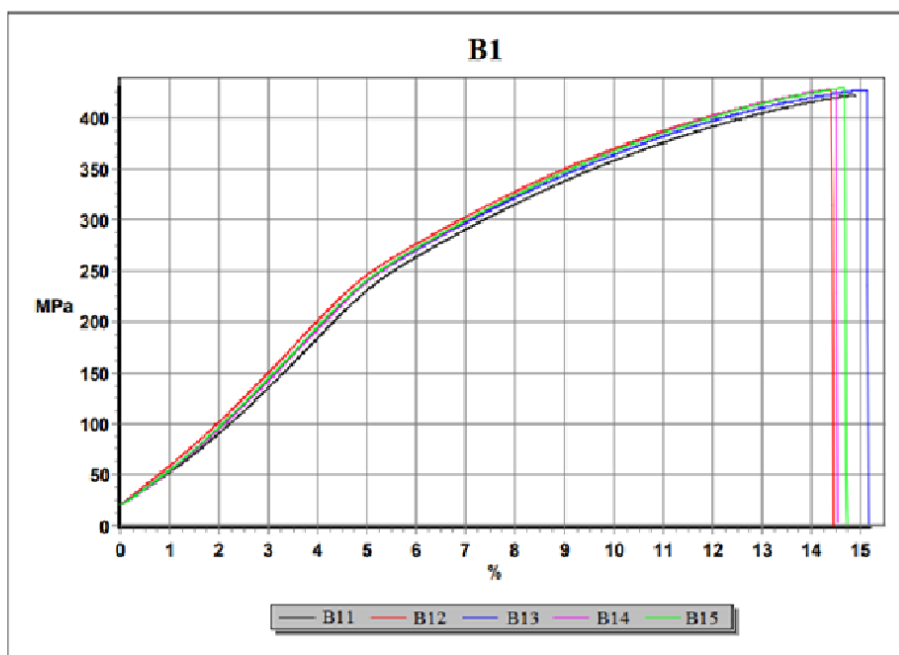
B1

machine | inspekt blue 20 kN
 nom. Value | 20000 N

shortname	name	shortname	name
So	calculated area	Fmax	Maximum force (global)
E	Modulus of elasticity	Rm	tensile strength
Rp0,2	Proof stress 0,2%	A	elongation at fracture
ReL	Lower yield strength	At	total elongation at fracture
ReH	Upper yield strength		

results

name	So [mm ²]	E [GPa]	Rp0,2 [MPa]	ReL [MPa]	ReH [MPa]	Fmax [kN]	Rm [MPa]	A [%]	At [%]
Test 1	36,00	4,63	261,32	n.a.	n.a.	15,23	423,00	6,22	14,90
Test 2	36,00	4,82	264,99	n.a.	n.a.	15,41	427,92	14,87	14,45
Test 3	36,00	4,78	261,08	n.a.	n.a.	15,40	427,88	15,56	15,17
Test 4	36,00	4,79	264,00	n.a.	n.a.	15,44	428,87	14,91	14,55
Test 5	36,00	4,80	263,35	n.a.	n.a.	15,49	430,22	15,11	14,73



Prilog 5

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja – uzorak B2

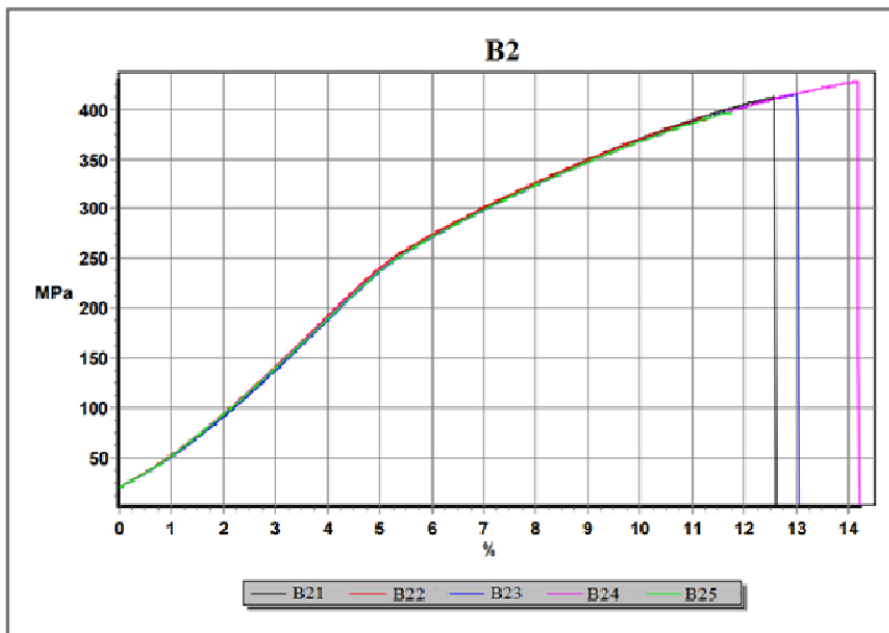
B2

machine | inspekt blue 20 kN
 nom. Value | 20000 N

shortname	name	shortname	name
So	calculated area	Fmax	Maximum force (global)
E	Modulus of elasticity	Rm	tensile strength
Rp0,2	Proof stress 0,2%	A	elongation at fracture
ReL	Lower yield strength	At	total elongation at fracture
ReH	Upper yield strength		

results

name	So [mm²]	E [GPa]	Rp0,2 [MPa]	ReL [MPa]	ReH [MPa]	Fmax [kN]	Rm [MPa]	A [%]	At [%]
Test 6	36,00	4,84	268,50	n.a.	n.a.	14,81	411,52	12,98	12,62
Test 7	36,00	4,83	270,01	n.a.	n.a.	14,07	390,77	3,63	11,24
Test 8	36,00	4,80	269,24	n.a.	n.a.	14,92	414,57	13,41	13,05
Test 9	36,00	4,77	267,95	n.a.	n.a.	15,39	427,39	14,57	14,21
Test 10	36,00	4,75	269,42	n.a.	n.a.	14,26	396,12	3,86	11,75



Prilog 6

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja – uzorak A1

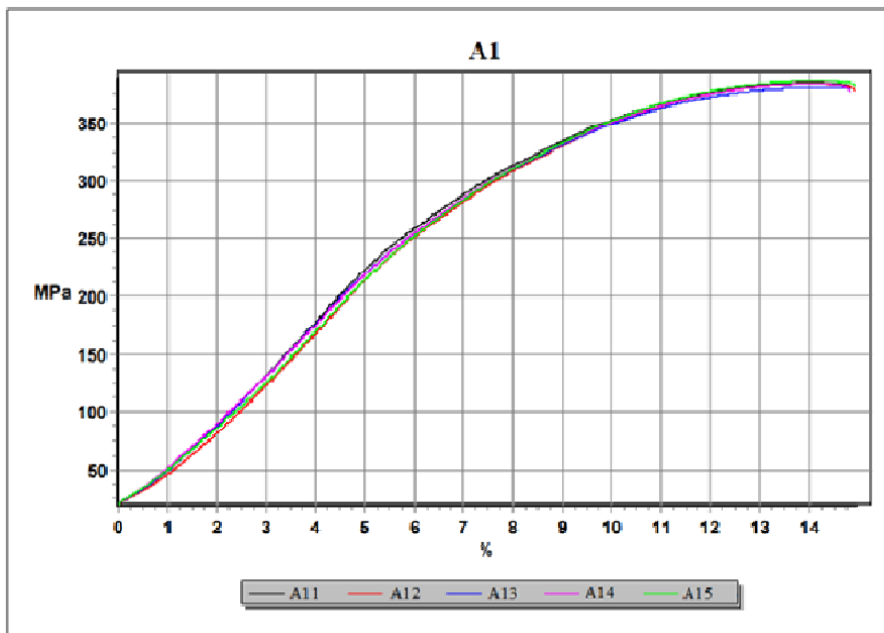
A1

machine | inspekt blue 20 kN
 nom. Value | 20000 N

shortname	name	shortname	name
So	calculated area	Fmax	Maximum force (global)
E	Modulus of elasticity	Rm	tensile strength
Rp0,2	Proof stress 0,2%	A	elongation at fracture
ReL	Lower yield strength	At	total elongation at fracture
ReH	Upper yield strength		

results

name	So [mm ²]	E [GPa]	Rp0,2 [MPa]	ReL [MPa]	ReH [MPa]	Fmax [kN]	Rm [MPa]	A [%]	At [%]
Test 11	36,00	4,45	263,38	n.a.	n.a.	13,83	384,18	6,74	14,82
Test 12	36,00	4,39	265,02	n.a.	n.a.	13,79	383,10	6,78	14,93
Test 13	36,00	4,38	257,09	n.a.	n.a.	13,69	380,18	6,64	14,83
Test 14	36,00	4,25	265,76	n.a.	n.a.	13,80	383,21	6,44	14,82
Test 15	36,00	4,30	268,85	n.a.	n.a.	13,89	385,77	6,55	14,94



Prilog 7

Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja – uzorak A2

A2

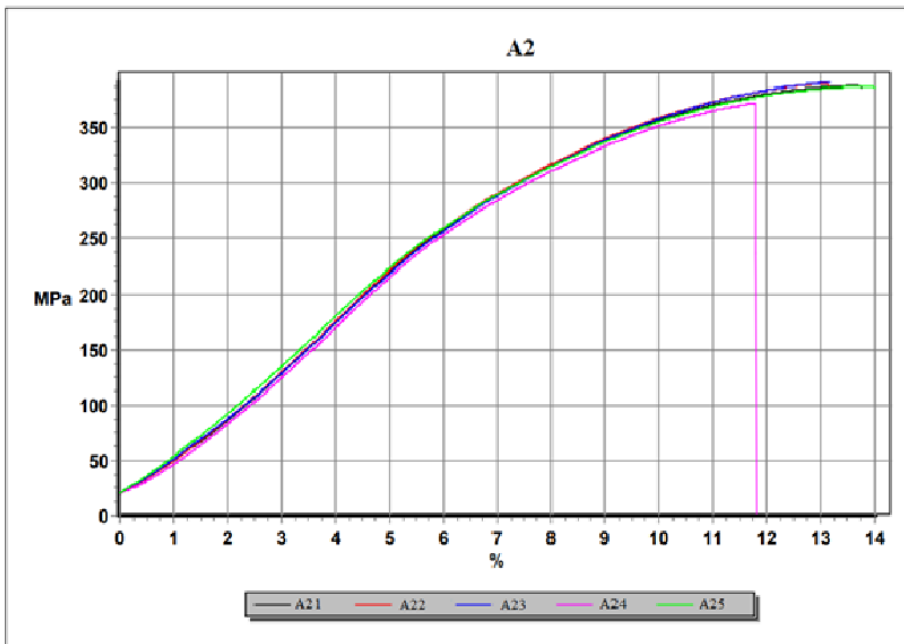
machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname | **name**
So | calculated area
E | Modulus of elasticity
Rp0,2 | Proof stress 0,2%
ReL | Lower yield strength
ReH | Upper yield strength

shortname | **name**
Fmax | Maximum force (global)
Rm | tensile strength
A | elongation at fracture
At | total elongation at fracture

results

name	So [mm ²]	E [GPa]	Rp0,2 [MPa]	ReL [MPa]	ReH [MPa]	Fmax [kN]	Rm [MPa]	A [%]	At [%]
Test 16	36,00	4,48	270,34	n.a.	n.a.	13,98	388,27	5,59	13,76
Test 17	36,00	4,47	272,77	n.a.	n.a.	14,07	390,70	4,97	13,16
Test 18	36,00	4,43	269,41	n.a.	n.a.	14,09	391,39	4,83	13,19
Test 19	36,00	4,41	268,70	n.a.	n.a.	13,39	372,06	12,24	11,80
Test 20	36,00	4,37	267,25	n.a.	n.a.	13,95	387,59	5,62	14,00



Prilog 8

Rezultati savijanja – uzorak B1

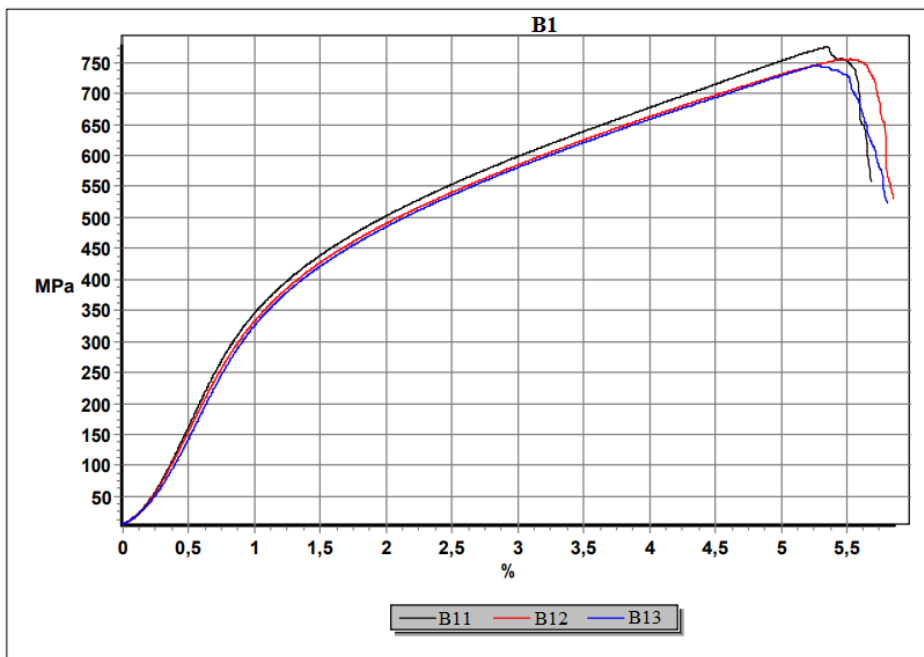
B1

machine | inspekt blue 20 kN
 nom. Value | 20000 N

shortname	name	shortname	name
W	section modulus	σ_M	bending strength
Sc	conventionall deflection (Sc)	ϵ_B	bending strain at break
σ_C	stress at conventionall deflection	ϵ_M	bending strain at bending strength
σ_B	bending stress at break		

results

name	W [mm ³]	Sc [mm]	σ_C [MPa]	σ_B [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_B [%]	ϵ_M [%]
Test 2	10,67	3,00	n.a.	557,153	775,067	5,678	5,339
Test 3	10,67	3,00	n.a.	530,506	755,318	5,847	5,521
Test 4	10,67	3,00	n.a.	522,483	745,109	5,802	5,277



Prilog 9

Rezultati savijanja – uzorak B2

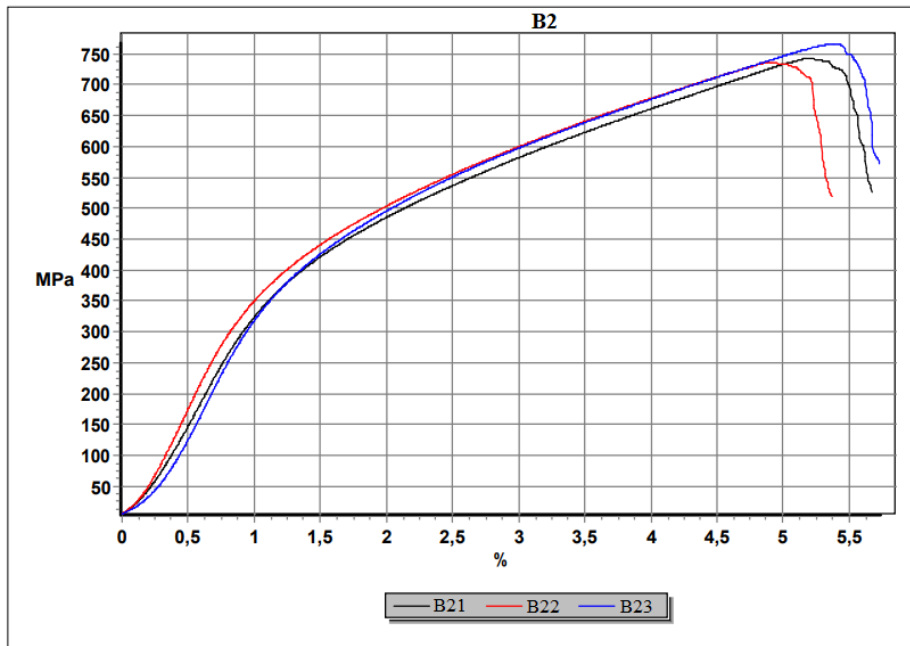
B2

machine | inspekt blue 20 kN
 nom. Value | 20000 N

shortname	name	shortname	name
W	section modulus	σ_M	bending strength
Sc	conventionall deflection (Sc)	ϵ_B	bending strain at break
σ_C	stress at conventionall deflection	ϵ_M	bending strain at bending strength
σ_B	bending stress at break		

results

name	W [mm ³]	Sc [mm]	σ_C [MPa]	σ_B [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_B [%]	ϵ_M [%]
Test 5	10,67	3,00	n.a.	526,412	743,480	5,669	5,195
Test 6	10,67	3,00	n.a.	518,110	737,024	5,368	4,889
Test 7	10,67	3,00	n.a.	573,035	765,579	5,727	5,401



Prilog 10

Rezultati savijanja – uzorak A1

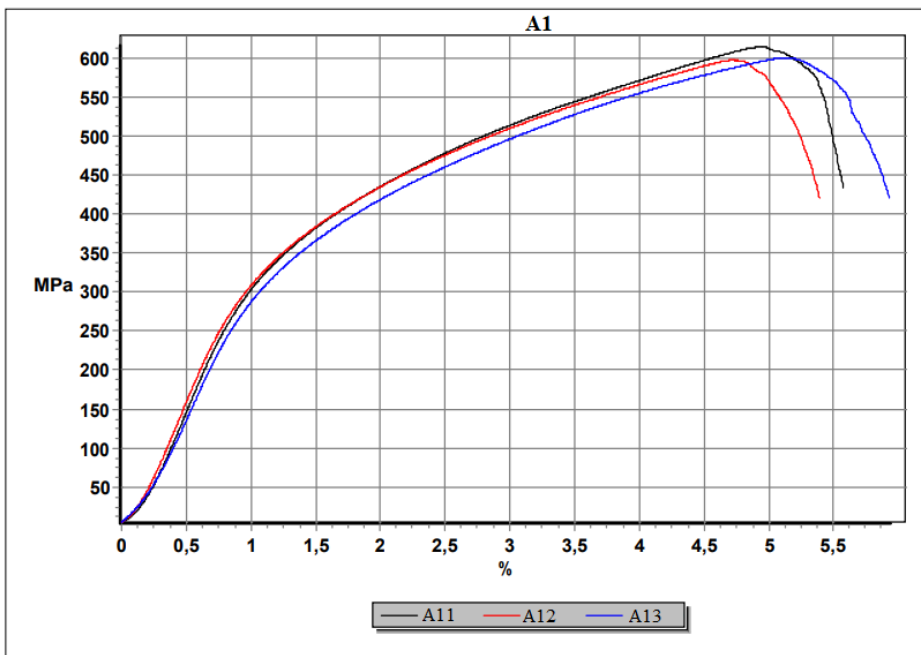
A1

machine | inspekt blue 20 kN
 nom. Value | 20000 N

shortname	name	shortname	name
W	section modulus	σ_M	bending strength
Sc	conventionall deflection (Sc)	ϵ_B	bending strain at break
σ_C	stress at conventionall deflection	ϵ_M	bending strain at bending strength
σ_B	bending stress at break		

results

name	W [mm ³]	Sc [mm]	σ_C [MPa]	σ_B [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_B [%]	ϵ_M [%]
Test 8	10,67	3,00	n.a.	432,434	614,212	5,579	4,938
Test 9	10,67	3,00	n.a.	420,038	596,929	5,392	4,711
Test 10	10,67	3,00	n.a.	420,203	599,796	5,930	5,120



Prilog 11

Rezultati savijanja – uzorak A2

A2

machine | inspekt blue 20 kN
nom. Value | 20000 N

shortname	name	shortname	name
W	section modulus	σ_M	bending strength
Sc	conventionall deflection (Sc)	ϵ_B	bending strain at break
σ_C	stress at conventionall deflection	ϵ_M	bending strain at bending strength
σ_B	bending stress at break		

results

name	W [mm ³]	Sc [mm]	σ_C [MPa]	σ_B [MPa]	σ_M [MPa]	ϵ_B [%]	ϵ_M [%]
Test 11	10,67	3,00	n.a.	407,467	579,820	6,017	5,331
Test 12	10,67	3,00	n.a.	410,499	585,709	5,223	4,723
Test 13	10,67	3,00	n.a.	423,235	600,631	5,847	5,314

