

Primjena aditivne proizvodnje za klasičnu preradu kompozitnih polimernih tvorevina

Zvekić, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:878588>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Josip Zvekić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Josip Zvekić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Ani Pilipović na korisnim savjetima, pruženoj pomoći i uloženom iznimnom trudu kako bi ovaj rad bio uspješno napisan.

Josip Zvekić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP ZVEKIĆ**

Mat. br.: 1191231542

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena aditivne proizvodnje za klasičnu preradu kompozitnih polimernih tvorevina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of additive manufacturing for classical processing of composite polymer products**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja je već dugi niz godina orijentirana na proizvodnju metalnih kalupa i alata zbog svojih mogućnosti izrade komplicirane geometrije. Najviše se primjenjuje tamo gdje je potrebna upotreba kanala za temperiranje komplicirane geometrije koji se klasičnim postupcima prerade ne mogu napraviti. Osim aditivne proizvodnje metalnih kalupa, izrađuju se i polimerni kalupi koji služe za male serije tvorevina, a primjenjuju se kod klasičnih postupaka prerade polimernih tvorevina. Najzastupljeniji su kalupi za injekcijsko prešanje, dok se o polimernim kalupima za ostale klasične postupke prerade malo zna.

U radu je potrebno napraviti osvrt na aditivne postupke i materijale od kojih je moguće izrađivati polimerne kalupe/alate i jezgre koje služe za preradu tvorevina postupcima puhanja, lijevanja kapljevitihih polimera, podtlačnog oblikovanja, itd. Također je potrebno obraditi kalupe za ručno laminiranje kompozita, te jezgre za izradu šupljih kompozitnih tvorevina koje su načinjene aditivnim postupcima. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je za odgovarajuću tvorevinu izabrati aditivni postupak i materijal kojim će se izraditi alat za klasičnu preradu polimernog kompozita.

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

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao: *Ana Pilipović*
prof. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:
[Signature]
prof. dr. sc. Diserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	IX
POPIS OZNAKA	X
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1 Razvoj aditivne proizvodnje.....	2
2.2 Podjela postupaka aditivne proizvodnje	4
3. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE	6
3.1 Princip rada postupka FDM.....	7
3.2 Materijali primjenjivi u postupku taložnog očvršćivanja	9
3.2.1 Standardni materijali	9
3.2.2 Materijali s posebnom namjenom	11
3.2.3 Pametni materijali	11
3.3 Prednosti i nedostaci postupka FDM.....	12
4. ISPISIVANJE MLAZOM FOTOPOLIMERA – POLYJET POSTUPAK.....	13
4.1 Princip rada tehnologije PolyJet.....	13
4.2 Materijali primjenjivi u postupku PolyJet	14
4.3 Prednosti i nedostaci postupka PolyJet.....	16
5. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	17
5.1 Struktura kompozita	17
5.2 Podjela kompozitnih materijala	20
5.3 Polimerni kompoziti	21
5.4 Postupci proizvodnje kompozita	23
5.4.1 Ručno laminiranje	24
5.4.2 Podtlačno oblikovanje	25
6. ADITIVNA PROIZVODNJA POLIMERNIH KALUPA	28
6.1 Injekcijsko prešanje	28
6.2 Injekcijsko puhanje.....	32

6.3	Kalupi za ručno laminiranje i podtlačno oblikovanje.....	33
6.4	Jezgre za izradu šupljih kompozitnih tvorevina	35
7.	EKSPERIMENTALNI DIO	36
7.1	Izrada kalupa za postupke ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja	36
7.1.1	Izrada kalupa postupkom FDM.....	38
7.1.2	Izrada kalupa postupkom Polyjet	40
7.2	Prerada kompozitne tvorevine postupcima ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja	42
7.2.1	Prerada kompozitne tvorevine ručnim laminiranjem	43
7.2.2	Prerada kompozitne tvorevine podtlačnim oblikovanjem.....	45
8.	ZAKLJUČAK.....	52
	LITERATURA.....	53
	PRILOZI.....	56

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Primjeri različitih oblika izrađenih 3D ispisom [3]	3
Slika 2.2. Kvaliteta ispisa u ovisnosti o debljini slojeva [4]	3
Slika 2.3. Podjela postupaka aditivne proizvodnje prema ASTM [6]	4
Slika 3.1. Primjeri proizvoda izrađenih postupkom FDM [8]	6
Slika 3.2. Tijek postupka izrade postupkom FDM [7]	7
Slika 3.3. Shematski prikaz postupka taložnog očvršćivanja [10]	8
Slika 3.4. Primjeri tvorevina izrađenih postupkom FDM: a) ABS kućište elektronike drona, b) PLA medicinski implantati, c) PC maska za mobitel, d) PC-ABS kućište uređaja [13,14,15,16]	10
Slika 4.1. Postupak PolyJet [10]	13
Slika 4.2. Primjeri proizvoda izrađenih postupkom PolyJet: a) <i>VeroFlex</i> okvir sunčanih naočala, b) <i>VeroGlaze</i> uzorak zubala, c) <i>Tango</i> jastučići na slušalicama, d) <i>Digital ABS Plus</i> model [14]	15
Slika 5.1. Struktura kompozitnog materijala [17]	18
Slika 5.2. Različite vrste orijentacije vlakana u kompozitima: a) kontinuirana jednosmjerna, b) isprekidana nasumično orijentirana, c) kontinuirana dvosmjerna, d) raznosmjerna u više ravnina [18]	18
Slika 5.3. Primjeri tvorevina izrađenih od polimernih kompozita: a) teniski reket ojačan ugljičnim vlaknima [19], b) lisnata opruga ojačana staklenim vlaknima [20], c) čamci ojačani staklenim vlaknima [21]	22
Slika 5.4. Postupci proizvodnje kompozita [22]	23
Slika 5.5. Shematski prikaz ručnog laminiranja [23]	24
Slika 5.6. Izrada ribičkog broda postupkom ručnog laminiranja [24]	25
Slika 5.7. Polaganje slojeva ugljičnog preprega na otvoreni kalup [25]	26
Slika 5.8. Podtlačno oblikovanje [26]	26
Slika 5.9. Podtlačno oblikovanje trupa radio-upravljanog zrakoplova [27]	27
Slika 6.1. Razni čepovi proizvedeni injekcijskim prešanjem [28]	28
Slika 6.2. Ispisani kalup umetnut u aluminijski potporni okvir [29]	30
Slika 6.3. Kalup za injekcijsko prešanje izrađen postupkom Polyjet digital ABS plus materijalom [29]	31
Slika 6.4. Kalup za injekcijsko puhanje izrađen postupkom Polyjet pomoću materijala digitalni ABS [32]	32

Slika 6.5. Kalup izrađen postupkom FDM te izvađena kompozitna tvorevina [33]	33
Slika 6.6. Kalup izrađen postupkom FDM: a) školjkasti kalup, b) kalup sa šupljikavom unutrašnjosti [34].....	34
Slika 6.7. Jezgra i gotova tvorevina za izradu šupljih kompozita izrađena postupkom FDM [35]	35
Slika 7.1. Primjer <i>NACA</i> usisnika izrađenog od kompozitnog materijala [37].....	36
Slika 7.2. Izrađeni CAD modeli kalupa: a) pozitivni oblik kalupa - za polaganje kompozitnog materijala na vanjsku stranu kalupa, b) negativni oblik kalupa - za ulaganje kompozitnog materijala u unutarnju stranu kalupa	37
Slika 7.3. FDM pisac <i>Kloner3D 300H</i>	38
Slika 7.4. Kalup ispisan postupkom FDM: a) s greškom pomicanja slojeva, b) bez greške ...	39
Slika 7.5. Polyjet pisac <i>Connex350</i>	40
Slika 7.6. Kalup izrađen postupkom Polyjet: a) pozitivni oblik kalupa - za polaganje kompozita na vanjsku stranu kalupa, b) negativni oblik kalupa - za ulaganje kompozita u unutarnju stranu kalupa	41
Slika 7.7. Staklena vlakna i kalup pripremljeni za postupak ručnog laminiranja	43
Slika 7.8. Kompozitna tvorevina izrađena ručnim laminiranjem s dva sloja staklenih vlakana	44
Slika 7.9. Kompozitna tvorevina izrađena ručnim laminiranjem s tri sloja staklenih vlakana	44
Slika 7.10. Postupak podtlačnog oblikovanja	46
Slika 7.11. Kompozitna tvorevina prerađena postupkom podtlačnog oblikovanja ojačana staklenim vlaknima	47
Slika 7.12. Istiskivanje zaostalog zraka u kompozitnom materijalu pomoću podtlačne pumpe	48
Slika 7.13. Postupak podtlačnog oblikovanja u preradi kompozitnog materijala ojačanog ugljičnim vlaknima.....	49
Slika 7.14. Kompozitna tvorevina izrađena polaganjem ugljičnih vlakana na pozitivni oblik kalupa, tj. na vanjsku stranu kalupa	50
Slika 7.15. Kompozitna tvorevina izrađena ulaganjem ugljičnih vlakana u negativni oblik kalupa, tj. u unutarnju stranu kalupa	51

POPIS TABLICA

Tablica 7.1. Osnovne specifikacije FDM pisača <i>Kloner3D 300H</i> [38]	38
Tablica 7.2. Osnovne specifikacije Polyjet pisača <i>Connex350</i> [39]	40

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
.3MF	format datoteke (eng. <i>3D manufacturing format</i>)
.AMF	format datoteke (eng. <i>additive manufacturing file</i>)
.OBJ	format datoteke
.STL	triangulizacijska datoteka (eng. <i>standard tessellation language</i>)
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
ABS-M30	materijal na bazi akrilonitril/butadien/stirena
ADAM	atomska raspršivanje (eng. <i>atomic diffusion additive manufacturing</i>)
ASA	akrilonitril/stiren/akrilat
BMC	vlaknasti preprezi (eng. <i>bulk moulding compound</i>)
C/C	kompoziti ugljične matrice (eng. <i>Carbon/carbon Composites</i>)
CLIP	proizvodnja kontinuiranim kapljevitim povezivanjem (eng. <i>continuous liquid interface production</i>)
CMC	kompoziti keramičke matrice (eng. <i>ceramic matrix composites</i>)
DLP	očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (eng. <i>digital light processing</i>)
DMLS	izravno lasersko srašćivanje metala (eng. <i>direct metal laser sintering</i>)
EBM	selektivno lasersko srašćivanje (eng. <i>electron beam melting</i>)
FDC	taložno očvršćivanje keramike (eng. <i>fused deposition of ceramics</i>)
FDM	taložno očvršćivanje (eng. <i>fused deposition modeling</i>)
FFF	taložno očvršćivanje (eng. <i>fused filament fabrication</i>)
LENS	izravno taloženje metala laserom (eng. <i>laser engineering net shaping</i>)
LMD-w	taloženje metala laserom pomoću žice (eng. <i>wire-based laser metal deposition</i>)
LOM	proizvodnja laminiranih objekata (eng. <i>laminated object manufacturing</i>)
MJF	spajanje pomoću više mlaznica (eng. <i>multi jet fusion</i>)

MJP	multi-jet tiskanje (eng. multi-jet printing)
MMC	kompoziti metalne matrice (eng. <i>Metal Matrix Composites</i>)
NACA	nacionalni savjetodavni odbor za zrakoplovstvo (eng. <i>Nacional advisory commitee for aeronautics</i>)
PA	poliamid
PC	polikarbonat
PE	polietilen
PLA	polilaktid
PMC	kompoziti polimerne matrice (eng. <i>polymer Matrix Composites</i>)
PolyJet	ispisivanje mlazom fotopolimera
PP	polipropilen
PP+G	polipropilen ojačan staklenim vlaknima
PPSU	poli(fenilen-sulfon)
PS	polistiren
RTM	(eng. <i>resin transfer moulding</i>)
SCRIMP	podtlačno ulijevanje Seeman (eng. <i>Seeman composite resin infusion moulding</i>)
SLA	stereolitografija
SLM	selektivno lasersko taljenje (eng. <i>selective laser melting</i>)
SLS	selektivno lasersko srašćivanje (eng. <i>selective laser sintering</i>)
SMC	osmoljeni list (pločasti prepreg) (eng. <i>sheet moulding compound</i>)
SPJ	(eng. <i>single pass jetting</i>)
SRIM	reakcijsko injekcijsko prešanje integralnih pjenastih duromernih otpresaka s predoblikovanim ojačavalom (eng. <i>structural reaction injection moulding</i>)
ST-130	topljivi materijal za 3D ispis
UAM	ultrazvučna aditivna proizvodnja (eng. <i>ultrasonic additive manufacturing</i>)
ULTEM	neojačani amorfni polieterimid

WAAM

aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom (eng. *wire arc additive manufacturing*)

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

JZ-001	Pozitivni oblik kalupa
JZ-002	Negativni oblik kalupa

POPIS OZNAKA

SAŽETAK

Živimo u vremenu brzih promjena i razvoja gdje je težnja za napretkom u svim poljima ljudskog djelovanja, pa tako i u industriji, sve izraženija. Svakodnevno se provode istraživanja i testiranja u proizvodnji s ciljem pronalaska što kvalitetnijeg i isplativijeg rješenja te se javlja potreba za međusobnim funkcioniranjem različitih postupaka prerade. Aditivna proizvodnja zasigurno je jedan od primjera naglog razvoja u industriji te svojim širokim rasponom mogućnosti poboljšava i druge postupke prerade.

U ovom radu opisana je primjena aditivnih postupaka na preradu kompozitnih tvorevina te klasičnu preradu polimernih tvorevina.

U prvom dijelu rada opisana je aditivna proizvodnja, njen razvoj, podjela postupaka aditivne proizvodnje te su ukratko objašnjene razlike između pojedinih postupaka. Nadalje su detaljnije razrađeni aditivni postupak taložnog očvršćivanja i postupak Polyjet koji se najčešće primjenjuju u izradi kalupa za preradu kompozita i preradu polimernih tvorevina. Opisani su kompozitni materijali te postupci proizvodnje kompozita gdje je naglasak na ručnom laminiranju i podtlačnom oblikovanju za koje se kalupi izrađuju aditivnim postupcima. Također su obrađeni klasični postupci prerade polimernih tvorevina te prikazana mogućnost izrade kalupa i jezgri aditivnom proizvodnjom.

Eksperimentalni dio prikazuje spoj aditivne proizvodnje i prerade kompozitnih polimernih tvorevina. Na 3D pisacima za taložno očvršćivanje i postupak Polyjet načinjeno je nekoliko kalupa za proizvodnju oblika za usis zraka na vozilima (eng. *NACA duct*) postupcima ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja te su tvorevine prerađene navedenim postupcima. Dana je usporedba svojstava u ovisnosti o postupku aditivne proizvodnje, obliku kalupa, postupku prerade kompozita te materijalima kojima je tvorevina izrađena.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, kalupi, kompoziti, podtlačno oblikovanje, polimeri, Polyjet, ručno laminiranje, taložno očvršćivanje

SUMMARY

We live in a time of rapid changes and development, where the desire for progress in all fields of human activity, including industry, is increasingly pronounced. Research and testing in manufacturing are carried out every day with the aim of finding the highest quality and most cost-effective solution, and there is a need for the mutual functioning of different processing procedures. Additive manufacturing is certainly one of the examples of rapid development in the industry, and with its wide range of possibilities, it improves other processing procedures as well.

This paper describes the application of additive manufacturing in composite production and in the classic processing of polymer products.

In the first part of the paper, additive manufacturing is described, its development, the classification of additive manufacturing procedures, and the differences between individual procedures are briefly explained. Furthermore, the additive processes fused deposition modeling and the Polyjet, which are most often used in the production of the moulds for the processing of composites and the processing of polymer products, are elaborated in more detail. Composite materials and composite production processes are described, where the emphasis is on hand lay-up and vacuum bagging, for which moulds are made by additive manufacturing. The classic procedures for the processing of polymer products were also covered, and the possibility of making moulds and cores through additive manufacturing was shown.

The experimental part shows the combination of additive manufacturing and processing of composite polymer products. Several moulds for the production of forms for air intake on vehicles (NACA duct) were printed on 3D printers for fused deposition modeling and the Polyjet process, using hand lay-up and vacuum bagging processes, and the products were made using the mentioned processes. A comparison of the properties is given depending on the additive manufacturing process, the form of the mould, the composite manufacturing process and the materials used to make the product.

Key words: additive manufacturing, composites, fused deposition modeling, hand lay-up, moulds, Polyjet, polymers, vacuum bagging

1. UVOD

Aditivni postupci su se prije nekoliko godina smatrali revolucionarnim tehnologijama proizvodnje, međutim zbog sve učestalijih promjena u potražnji kupaca kao i željom za proizvodnjom tvorevina kompliciranih oblika, aditivna proizvodnja danas ima svakodnevnu primjenu u brojnim industrijama.

Aditivna proizvodnja naširoko se primjenjuje za izradu funkcionalnih i nefunkcionalnih dijelova pomoću materijala kao što su polimeri, metali, keramika te njihove kombinacije. Tako izrađene tvorevine primjenjuju se u arhitekturi, građevinarstvu, automobilskoj, zrakoplovnoj, vojnoj, medicinskoj industriji, itd.

Aditivni postupci omogućavaju velik odmak od ograničenja koja posjeduju klasični postupci proizvodnje, a sve širi raspon materijala koji se upotrebljavaju omogućava primjenu i u drugim postupcima prerade.

Kalupi i jezgre za preradu kompozitnih materijala te klasične postupke prerade polimernih tvorevina izrađuju se aditivnim postupcima te se na taj način postiže raznovrsnost materijala, bolja kvaliteta tvorevina i veća proizvodnost. Vrijeme izrade se uvelike skraćuje, a troškovi za proizvodnju malih serija proizvoda su smanjeni. Postupci aditivne proizvodnje kojima se takvi kalupi najčešće izrađuju i koji će se detaljnije obraditi su taložno očvršćivanje i Polyjet.

Prilikom prerade kompozitnih materijala, veoma je važno primijeniti prikladnu tehniku proizvodnje jer to uvelike utječe na kvalitetu završnog proizvoda. U proizvodnji kompozita izbjegava se klasična strojna obrada radi oštećivanja vlakana te lošijih svojstava kompozitnog materijala. Postupci proizvodnje kompozita za koje se kalupi izrađuju aditivnom proizvodnjom su ručno laminiranje i podtlačno oblikovanje.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Kao što sami naziv kaže, aditivna proizvodnja (eng. *Additive manufacturing*) predstavlja „dodavanje“ materijala, odnosno izradbu tvorevina nanošenjem slojeva jedan na drugi. Na taj način generira se trodimenzionalni proizvod unaprijed određenog oblika i dimenzija.

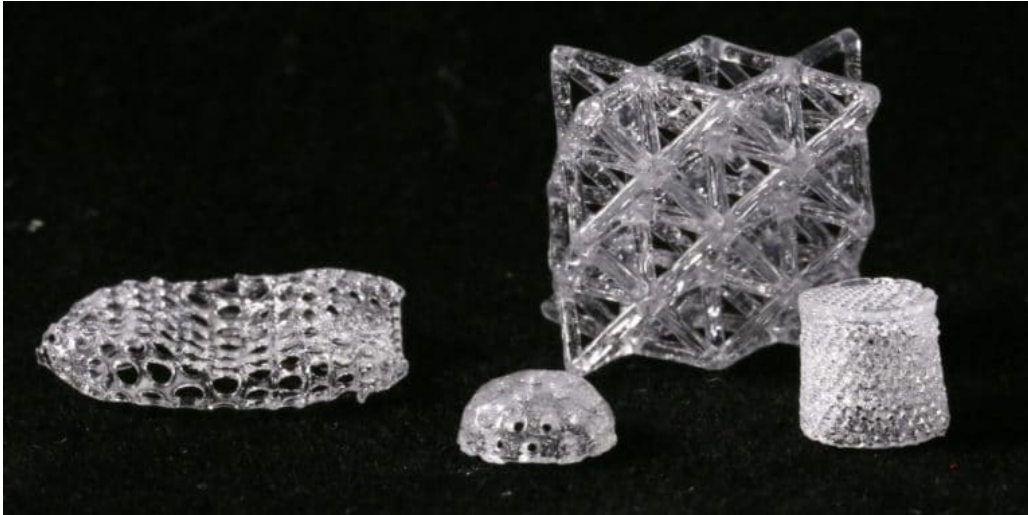
2.1 Razvoj aditivne proizvodnje

Krajem 80-ih godina prošlog stoljeća počeli su se razvijati i primjenjivati aditivni postupci. 1987. godine američka tvrtka *3D Systems* počinje s razvojem stereolitografije (SLA) – prvi pravi aditivni postupak koji je definiran očvršćivanjem fotopolimera u tankim slojevima zbog njihovog izlaganja nekom izvoru svjetlosti, najčešće laseru. [1]

Sljedećih nekoliko godina, nekoliko američkih tvrtki se ujedinilo kako bi nastavile s razvojem SLA materijala i na taj način su napravljene prve serije akrilnih kapljeviti fotoosjetljivih polimera, nakon čega dolazi do pojave prvih stereolitografskih uređaja i širenja postupka na azijsko tržište. Sve veća komercijalizacija tehnologije dovodi do razvoja novih proizvodnih postupaka koji pripadaju aditivnim postupcima.

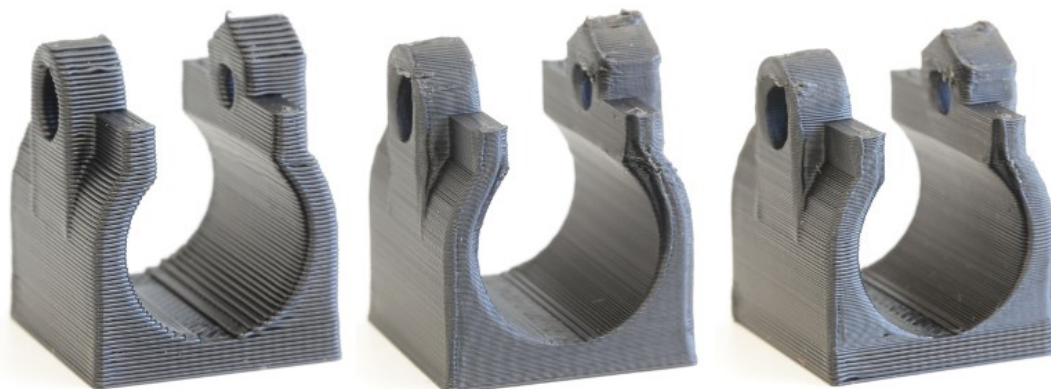
Tijekom 1991. godine razvijena su tri nova postupka aditivne proizvodnje. Tvrtka *Stratasys* razvija postupak očvršćivanja taloženjem (eng. *Fused Deposition Modeling* – FDM), dok iste godine još dvije američke tvrtke *Cubital* i *Helsys* započinju izradu tvorevina tonografskim postupkom i postupkom laminiranja. [2]

Svakom sljedećom godinom broj aditivnih postupaka samo je rastao zbog težnje brzoj, jednostavnoj i jeftinoj proizvodnji. U samim početcima to nije bilo lako ostvarivo zbog manjka stručnosti i kvalitetne opreme, međutim, u proteklih tridesetak godina aditivna proizvodnja je doživjela brz razvoj i komercijalizaciju. Vrijeme potrebno od same ideje do gotove tvorevine je uvelike skraćeno, a predmeti i veoma složene geometrije se proizvode dovoljno brzo i kvalitetno kako bi zadovoljili zahtjeve tržišta. Slika 2.1 prikazuje neograničenost u pogledu geometrije tvorevina izrađenih 3D ispisom.



Slika 2.1. Primjeri različitih oblika izrađenih 3D ispisom [3]

Tvorevina nastaje slaganjem sloja na sloj, a kvaliteta završnog proizvoda i sličnost 3D modelu, koji je prethodno izrađen u nekom od CAD računalnih programa, ovisi o debljini tih slojeva – što su slojevi tanji, konačni proizvod je kvalitetniji [5], što se može vidjeti na slici 2.2.










Slika 2.2. Kvaliteta ispisa u ovisnosti o debljini slojeva [4]

Dakako da to nije jedini parametar koji stvara razliku u kvaliteti konačnog proizvoda. Vrijeme ispisa, način stvaranja slojeva, pravilan izbor materijala, spajanje slojeva, pravilan izbor postupka kojim će se izrađivati svi su redom čimbenici koji uvelike utječu na kvalitetu tvorevine. [5]

2.2 Podjela postupaka aditivne proizvodnje

Prema *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, postupci aditivne proizvodnje se dijele u sedam kategorija koje se dijele u podkategorije, ovisno o primijenjenoj tehnologiji, kao što je prikazano na slici 2.3.

	Postupci fotopolimerizacije	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SLA ▪ DLP ▪ CLIP
	Raspršivanje materijala	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Polyjet ▪ MJP
	Ekstrudiranje materijala	<ul style="list-style-type: none"> ▪ FDM ▪ FFF ▪ ADAM
	Spajanje veziva	<ul style="list-style-type: none"> ▪ MJF ▪ SPJ
	Spajanje praha u komori	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SLS ▪ SLM ▪ DMLS ▪ EBM
	Izravno energijsko taloženje	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LENS ▪ EBAM ▪ LMD-w ▪ WAAM
	Laminiranje	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LOM ▪ UAM

Slika 2.3. Podjela postupaka aditivne proizvodnje prema ASTM [6]

Postupci fotopolimerizacije temelje se na emitiranju svjetlosti pri čemu dolazi do skrućivanja foto-osjetljivih polimera. Najraširenija tehnologija u ovoj skupini je stereolitografija (SLA), kod koje se kao izvor svjetlosti upotrebljava laser koji emitira ultraljubičastu svjetlost i umrežuje sloj foto polimera. [6]

Laser se primjenjuje prilikom postupaka izravnog energetskog taloženja gdje laserska zraka rastaljuje određeno područje, a istovremeno se dodaje novi materijal koji tvori novi sloj. [6]

Kod postupaka spajanja prahova u komori, sloj materijala koji je u obliku praha spaja se nekom vrstom svjetlosnog izvora, a kod postupaka spajanja vezivom se prah spaja nekom vrstom veziva, odnosno ljepila, koje se nanosi na njega. [6]

Laminiranje je postupak gdje se za izradu tvorevine primjenjuje folija koja se izrezuje laserom i naknadno lijepi sloj na sloj pomoću veziva ili zagrijanih objekata. [6]

Postupci od kojih je moguće izrađivati polimerne kalupe i jezgre koje služe za preradu kompozita te klasične postupke prerade polimernih tvorevina i koji će se detaljno obraditi u ovom radu su taložno očvršćivanje materijala, tj. FDM (e. *fused deposition modeling*) i Polyjet. [1]

3. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE

Kao što je ranije navedeno, postupak taložnog očvršćivanja izumljen je 1991. godine u SAD-u, a razvila ga je tvrtka *Stratasys*.

FDM je jedna od najpopularnijih tehnologija 3D ispisa primijenjena za razne primjene. Njena jednostavnost primjene i pristupačna cijena čine je popularnim među različitim grupama korisnika. [7]

To je najzastupljeniji aditivni postupak ekstrudiranja materijala zbog čega se mnogo puta pojmovi FDM i ekstrudiranje materijala poistovjećuju. Pretežno se primjenjuju polimerni materijali, većinom plastomeri, stabilnog oblika i dimenzija, a u novije vrijeme i keramika i metal kao i kompozitna vlakna. Prikazivanje trodimenzionalnih oblika pomoću dvodimenzionalnih elemenata dovodi do gotovo neograničenih mogućnosti izrade tvorevina u pogledu kompliciranih oblika, detalja, izrade šupljina itd. Zbog toga postupak FDM nalazi svoju primjenu u brojnim industrijama kao što su biomedicina, automobilska i zrakoplovna industrija, sportska i glazbena oprema, proizvodnja raznih dijelova kućanskih uređaja itd. [7] Neki od primjera proizvoda izrađenih FDM postupkom prikazani su na slici 3.1.



Slika 3.1. Primjeri proizvoda izrađenih postupkom FDM [8]

3.1 Princip rada postupka FDM

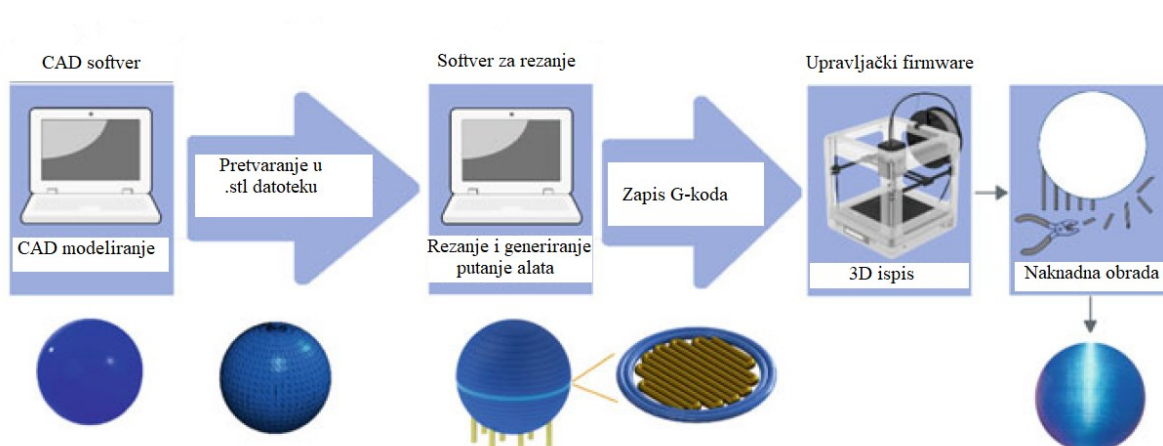
Cjelokupni proces FDM ispisa prikazan je na slici 3.2. Postupak počinje izradom CAD modela pomoću bilo kojeg CAD softvera. Zatim se izvorni CAD model pretvara u format datoteke koji se može razumjeti softverom za 3D ispis poznat kao „softver za rezanje“ (e. *slicing software*). Uobičajeni formati datoteka su .STL, .OBJ, .AMF i .3MF od kojih je najčešće primijenjen .STL format i postao je neslužbeno prihvaćen standardni prikaz. [9]

Softver za rezanje obavlja niz zadataka uključujući [9]:

- rezanje CAD modela na tanke horizontalne slojeve
- stvaranje ispune
- stvaranje potporne strukture
- generiranje putanje alata mlaznice za svaki sloj,

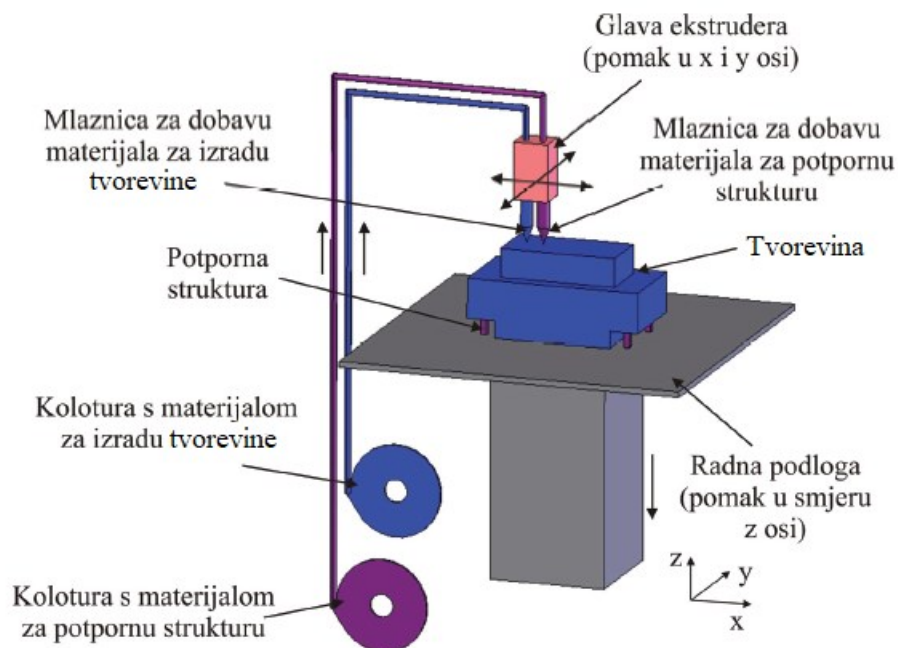
a sve to na temelju unesenih parametara: orijentacije izrade, parametara rezanja i parametara stroja.

Svi navedeni potrebni podaci za pretvaranje digitalnog u fizički model se zatim bilježe u G-kod datoteku. G-kod se nakon toga može poslati na FDM pislač. [8]



Slika 3.2. Tijek postupka izrade postupkom FDM [7]

Shematski prikaz postupka taložnog očvršćivanja prikazan je na slici 3.3. Polimerni materijal nalazi se u obliku dugačke žice i putuje prema glavi pisača, prolazi kroz mlaznicu gdje se zagrijava, tali i izlazi u omekšanom stanju te započinje izradu modela. Materijal pri sobnoj temperaturi brzo očvršćuje, stvara sloj izrade, a radna podloga radi pomak po Z-osi za debljinu izrađenog sloja. Glava ekstrudera kreće se u smjerovima X i Y osi. [10]



Slika 3.3. Shematski prikaz postupka taložnog očvršćivanja [10]

Kod složenije geometrije tvorevine može se upotrijebiti potporna struktura. Tada se upotrebljava dvostruka glava ekstrudera. U jednoj mlaznici nalazi se materijal, a u drugoj vosak/materijal za potporna strukturu tvorevine. Kada je tvorevina završena, potporna struktura se vrlo jednostavno uklanja (npr. otapanjem u vodenoj otopini ili lomljenjem). Nakon što se tvorevina izradi po potrebi se uklanja materijal potporne strukture te se površina eventualno dodatno obrađuje brušenjem ili poliranjem. [5, 10]

3.2 Materijali primjenjivi u postupku taložnog očvršćivanja

Materijali koji se primjenjuju u postupku taložnog očvršćivanja moraju ispunjavati zahtjeve kao što su niske tolerancije, krutost, žilavost, postojanost pri različitim okolišnim uvjetima, itd. Svako svojstvo pojedinog materijala mora biti u potpunosti precizirano i materijal mora zadovoljavati sve uvjete kako bi se nepredviđene situacije u realnim uvjetima svele na minimum. [11]

FDM materijali mogu se klasificirati u tri grupe: standardni materijali, materijali s posebnom namjenom i napredni materijali. [11]

3.2.1 Standardni materijali

Standardni materijali koji se primjenjuju u postupku FDM, ujedno i najčešće upotrebljeni materijali kod ovog postupka izrade su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polilaktidna kiselina (PLA), polikarbonat (PC), poliamidi (PA) i polistiren (PS). [11]

ABS (akrilonitril/butadien/stiren) je amorfni polimer koji nastaje polimerizacijom emulzije ili mase akrilonitrila i sitrena u prisustvu polibutadiena. Najvažnija svojstva ABS-a su otpornost na udar i tvrdoća, a također ima dobru savojnu žilavost pri sniženoj temperaturi. Nedostatak je slaba postojanost na vremenske uvjete pa se rijetko upotrebljava za vanjsku primjenu. Primjena mu je u automobilskoj industriji i elektronici. Primjer modela izrađenog ABS materijalom prikazan je na slici 3.4.a). [10]

PLA (polilaktidna kiselina) je ekološki najprihvatljiviji materijal jer se pravi od šećera dobivenog iz kukuruza i šećerne trske. To je najpopularniji biopolimer kojeg se često uspoređuje s PET ambalažom jer bi se nakon nekog vremena na zemlji prirodno razgradio. Prikladan je za ispis pri niskim temperaturama što smanjuje rizik od savijanja materijala. Primjena mu je široka, od medicine, konstrukcijske primjene, tekstilne industrije do kozmetike (slika 3.4.b) [12]

PC (polikarbonat) je materijal kojeg karakterizira visoka čvrstoća zbog čega ima široku primjenu: farmaceutska industrija, medicina, prehrambena, automobilska i telekomunikacijska industrija, kao što je prikazano na slici 3.4.c. [10]

PC-ABS je najčešće upotrebljeni industrijski plastomer koji je nastao miješanjem polikarbonata i ABS-a. Ima izvrsna toplinska i mehanička svojstva, čvršći je od ABS-a zbog dodatka polikarbonata, a istovremeno posjeduje dobru savitljivost zbog prisustva ABS-a. Primjenjuje se u elektronici, automobilskoj i telekomunikacijskoj industriji (slika 3.4.d). [10]



a)



b)



c)



d)

Slika 3.4. Primjeri tvorevina izrađenih postupkom FDM: a) ABS kućište elektronike drona, b) PLA medicinski implantati, c) PC maska za mobitel, d) PC-ABS kućište uređaja [13,14,15,16]

3.2.2 Materijali s posebnom namjenom

Zbog konstantne želje za napretkom i komercijalizacijom postupka taložnog očvršćivanja, dolazi do razvoja materijala primjenjivih u postupku. Ponajviše se to odnosi na materijale koji se primjenjuju u klasičnim postupcima proizvodnje: metali i kompoziti. Većina materijala s posebnom namjenom koji su primjenjivi u postupku FDM su kompozitni materijali poput stakla, voska, papira, ABS-a ojačanog metalom, keramike, itd. Istraživači na *Sveučilištu Virginia Tech* razvili su novi plastomerni kompozit visokih performansi za FDM proizvodnju koji sadrži termotropna kapljevita kristalna vlakna polimera, grijanjem polimera iznad staklišta, a primijenili su ga za izradu dijelova prototipa postupkom FDM. Rastezno naprezanje i čvrstoća tog materijala bili su približno četiri puta viši od istih svojstava ABS materijala. [11]

Kompozitni materijal koji se ipak češće upotrebljava u postupku FDM od prethodno nabrojanih je keramika. Taložno očvršćivanje keramike (eng. *fused deposition of ceramics* – FDC) razvijeno je na *Sveučilištu Rutgers* i temelji se na tehnologiji gdje se polimerni materijal ojačan keramikom primjenjuje za izradu tvorevina. Dodavanjem keramike se postiže više tvrdoća i tlačna čvrstoća konačne tvorevine. [13]

3.2.3 Pametni materijali

Osim spomenutih materijala za postupak FDM, mnogi stručnjaci su se usredotočili na razvoj 4D materijala. 4D ispis primjenjuje više materijala koji imaju sposobnost transformiranja oblika iz jednog stanja u drugo. Moguća je transformacija oblika tijekom vremena prilikom izlaganja određenim vanjskim uvjetima kao što su tlak, vjetar, vlaga, toplina, svjetlost, itd. Konkretno, 4D ispis je proširenje 3D ispisa s jednom ili više dodatnih dimenzija dizajna, kao npr. gradacija materijala prema udaljenosti ili smjeru i prilagodba tijekom vremena. Drugim riječima, postupak 4D ispisa ima dodatnu dimenziju – vrijeme. [11]

Da bi 4D ispis bio moguć, potrebna je kombinacija 3D ispisa i pametnih (naprednih) materijala. Pametni materijali su polimeri s prisjećanjem oblika (SMP). Oni reagiraju na primijenjeni podražaj, pomoću memorije pamte prijašnje stanje kako bi se nakon opterećenja oporavili i na taj način omogućili izradu malih dijelova u najrazličitijim geometrijama. Iako postoje potencijalne grane primjene pametnih materijala, kao što su robotika, tekstilna industrija, ortopedska i vojna oprema, ovi se materijali danas slabo upotrebljavaju zbog nepovoljnog odnosa cijene i kvalitete. [11]

3.3 Prednosti i nedostaci postupka FDM

Prednosti postupka FDM su [7]:

- jednostavniji, pristupačniji i isplativiji postupak u odnosu na druge postupke aditivne proizvodnje; najprikladniji za početnike
- relativno čist i siguran postupak koji ne zahtijeva grubu upotrebu kemikalija
- raznoliki materijali koji su dostupni i pristupačni
- FDM pisac je jednostavan za rukovanje i održavanje
- širok raspon polimernih materijala može se ispisivati bez ili s vrlo malo izmjena na bilo kojem FDM pisacu

Nedostaci postupka FDM su [7]:

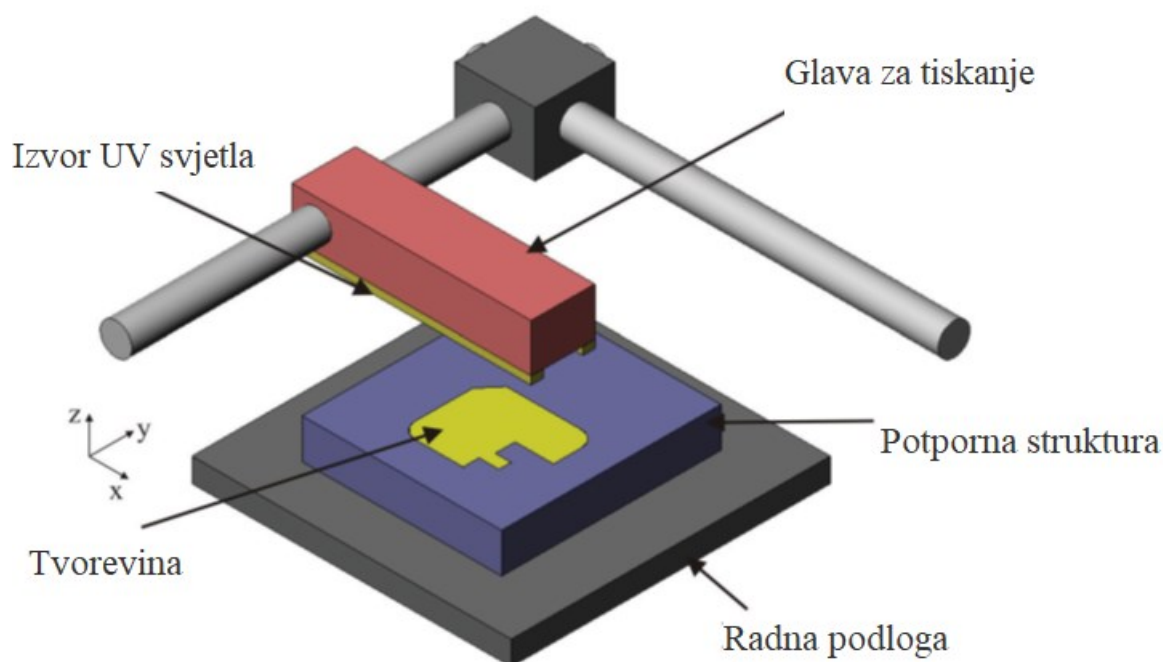
- kvaliteta površine (uključujući volumensku pogrešku i odstupanje oblika) nije tako dobra kao kod drugih postupaka aditivne proizvodnje – potrebna naknadna obrada
- ispise s visokim detaljima teško je postići
- vidljivost linija između slojeva – efekt stepenica
- niska čvrstoća
- slojevi nisu potpuno gusti, dolazi do raslojavanja izratka jer međuslojno vezanje nije tako jako kao vezanje unutar samog sloja
- nemogućnost izrade oštih rubova zbog zaobljenih mlaznica ekstrudera

4. ISPISIVANJE MLAZOM FOTOPOLIMERA – POLYJET POSTUPAK

Tehnologija PolyJet pojavljuje se početkom 21. stoljeća spajanjem stereolitografije i 3D tiskanja. To je postupak 3D ispisa koji gradi dijelove mlazom tisuća fotopolimernih kapljica na radnu podlogu učvršćujući ih UV svjetlom. Jedan je od najbržih i najpreciznijih postupaka aditivne proizvodnje u današnje vrijeme. [10]

4.1 Princip rada tehnologije PolyJet

PolyJet pisači sastoje se od glave za tiskanje, izvora UV svjetla, radne podloge i potporne strukture (slika 4.1). Glava za tiskanje koja se sastoji od mreže mlaznica kreće se u smjerovima x i y osi te nanosi sloj fotoosjetljivog polimernog materijala debljine 16 μm na radnu podlogu, dok istovremeno UV svjetlost zagrijava radnu podlogu kako bi svaki sloj fotopolimera očvrsnuo odmah nakon tiskanja. Na taj način postiže se potpuno umrežena struktura bez potrebe za naknadnih umreživanjem. [10]



Slika 4.1. Postupak PolyJet [10]

Mrežu mlaznica moguće je podijeliti na način da jedan njen dio nanosi materijal za model, dok drugi dio nanosi drukčiji materijal za potporna strukturu. Tako se sprječava izvijanje ili vitoperenje modela. Nakon završenog prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu sljedećeg sloja i glava za tiskanje započinje izradu tog sljedećeg sloja. Potporna struktura se nakon izrade modela uklanja vodom pri tlaku do 40 bara, ovisno o obliku modela. [10]

4.2 Materijali primjenjivi u postupku PolyJet

Izbor materijala primjenjivih u postupku PolyJet je veoma širok – od krutih do gumenih, od prozirnih do neprozirnih. Takav široki raspon omogućuje primjenu postupka PolyJet u brojnim područjima, poput medicine, kozmetičke industrije, stomatologije, elektronike, automobilske industrije itd. [14]

Tehnologija PolyJet nudi tridesetak osnovnih akrilnih smola, odnosno ne miješanih smola koje se mogu upotrebljavati same ili u kombinaciji s nekom drugom smolom tvoreći „digitalne materijale“ (eng. *Digital Materials*). Neke od najzastupljenijih serija materijala su *Vero*, *Tango*, *Agilus* i *Durus*. [14]

Skupina *Vero* materijala je najraširenija u postupku PolyJet, različitih svojstava i izgleda. *VeroFlex* je kruti neprozirni ili prozirni materijal s velikom mogućnošću izbora boja te se jako često upotrebljava za proizvodnju okvira za naočale (slika 4.2.a). *VeroGlaze* posjeduje neprozirnu bijelu boju i idealan je materijal za realne uzorke u stomatologiji kako bi liječnici vizualizirali rezultate proteza prilikom ugradnje (slika 4.2.b). [14]

Agilus i *Tango* materijali simuliraju elastomere dajući proizvodu visoku fleksibilnost poput gume. Upotrebljavaju se kod potrebne vizualne, dodirne i funkcionalne vrijednosti proizvoda, kao što su gumeni okviri, ručke, brtve, dijelovi elektronskih uređaja (slika 4.2.c). Također se primjenjuju za izradu prototipa potplata za obuću. [14]

Durus materijal ima svojstva slična polipropilenu, posjeduje veliku otpornost na udarce, žilavost i fleksibilnost. [14]

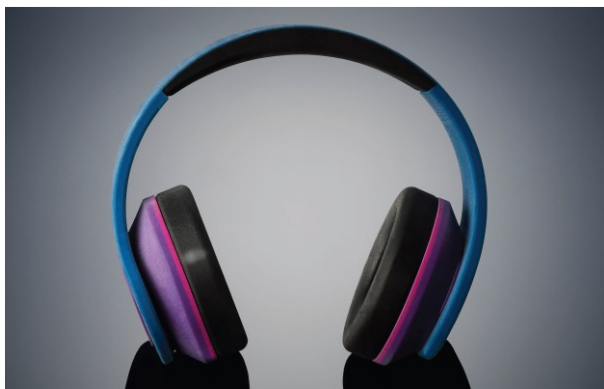
Digital ABS Plus primjer je digitalnog materijala sličnih svojstava ABS-u te ima visoku postojanost pri visokoj temperaturi i dobru žilavost. Primjenjuje se za realistične i precizne dijelove, alate i prototipove (slika 4.2.d). [14]



a)



b)



c)



d)

Slika 4.2. Primjeri proizvoda izrađenih postupkom PolyJet: a) *VeroFlex* okvir sunčanih naočala, b) *VeroGlaze* uzorak zubala, c) *Tango* jastučići na slušalicama, d) *Digital ABS Plus* model [14]

4.3 Prednosti i nedostatci postupka PolyJet

Prednosti postupka Polyjet su [10,15]:

- visoka kvaliteta završnog proizvoda – glatka površina bez potrebe za velikom završnom obradom zbog vrlo male debljine slojeva
- nema potrebe za dodatnim umreživanjem
- mogućnost izrade sitnih i preciznih detalja
- izrada složenih i kompliciranih oblika
- širok raspon boja i materijala
- brz postupak
- lagano uklanjanje potporne strukture vodom

Nedostatci postupka Polyjet su [15]:

- nerijetko lošija mehanička svojstva tvorevina u odnosu na druge postupke aditivne proizvodnje – osjetljivost na toplinu i sunčevu svjetlost
- relativno visoka cijena
- oštri rubovi postaju blago zaobljeni

5. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijali ili kompoziti građeni su od dvaju ili više međusobno čvrsto spojenih materijala s ciljem dobivanja boljih svojstava. [16]

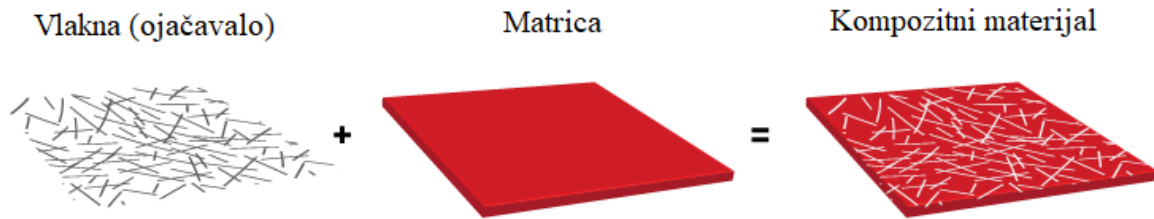
Primjena kompozita može se pratiti od 2000. godine prije nove ere kad su narodi upotrebljavali cigle od blata ojačane slamom ili proizvodili armiranu keramiku također uz pomoć slame. Na razvoj kompozita kakve danas poznajemo uvelike je utjecao razvoj u području sirovina, odnosno ojačavala i smole, i razvoj postupaka proizvodnje kompozita. [16]

Prva staklena vlakna proizvedena su tridesetih godina prošlog stoljeća, otprilike u isto vrijeme kad su se pojavile poliesterske smole. Narednih godina počela je proizvodnja prvih čamaca, trupova brodova, karoserija automobila od plastike ojačane staklenim vlaknima. Nakon toga je uslijedio razvoj ugljičnih, borovih i aramidnih vlakana kad su komercijalizaciju postigle i epoksidne smole. [16]

5.1 Struktura kompozita

Sastavni materijali u kompozitima su metali, polimeri, keramika ili njihova kombinacija. Kompoziti se mogu definirati identificiranjem svojstava komponenata i procesa nastanka na sljedeći način [16]:

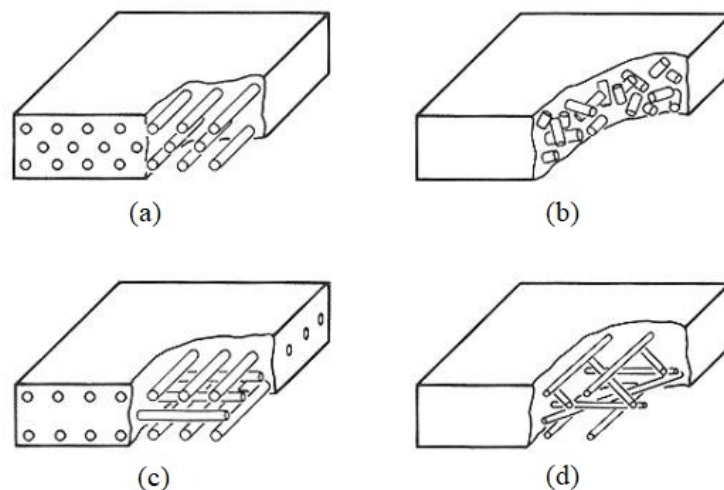
- sastavni materijali razlikuju se po sastavu i obliku te njihovom kombinacijom nastaju dvije faze – ojačavalo (diskontinuirana faza, obično tvrda i jaka) i matrica (kontinuirana faza, povezuje dijelove ojačavala) (slika 5.1)
- materijal ojačavala ugrađen je u materijal matrice na makroskopskoj razini – sastavni materijali se ne otapaju niti spajaju zajedno i zadržavaju svoja pojedinačna svojstva
- matrica veže ojačavala na način da između njih tvori međufazu
- ojačavalo i matrica, kao pojedinačni materijali nemaju nikakvu inženjersku namjenu; proces njihovog kombiniranja pretvara ih u novi materijal koji je koristan i učinkovit



Slika 5.1. Struktura kompozitnog materijala [17]

Kako svaka od komponenti kompozita ima svoja pojedinačna svojstva, tako svaka ima i svoju funkciju unutar kompozitnog materijala. [16]

U ovisnosti o rasporedu vlakana unutar matrice dobivaju se različita svojstva kompozita. Vlakna mogu biti duga i kontinuirana, ali i kratka, prekinuta i raznosmjerno postavljena kao što je prikazano na slici 5.2.



Slika 5.2. Različite vrste orijentacije vlakana u kompozitima: a) kontinuirana jednosmjerna, b) isprekidana nasumično orijentirana, c) kontinuirana dvosmjerna, d) raznosmjerna u više ravnina [18]

Nerijetko su vlakna koja se upotrebljavaju kao ojačavala malog volumena po jedinici duljine i mnogi postupci proizvodnje vlakana uključuju napinjanje i istežanje prilikom čega se odvija visok stupanj mikrostrukturne orijentacije. Rezultat toga su povoljna mehanička svojstva vlakana poput čvrstoće i modula elastičnosti. [16]

Glavne funkcije ojačavala unutar kompozita su [16]:

- primarni su element koji nosi opterećenje u kompozitnom materijalu
- osiguravaju krutost kompozitnom materijalu
- osiguravaju toplinsku stabilnost
- osiguravaju električnu i toplinsku vodljivost (ili izolaciju)

Matrica je u pogledu mehaničkih svojstava inferiornija od ojačavala, međutim pozitivno utječe na mehanička svojstva kompozita te ima niz važnih funkcija [16]:

- djeluje kao ljepilo i drži vlakna ojačavala zajedno, te daje oblik i krutost kompozitnom materijalu
- prenosi opterećenje između vlakana
- pruža dobru zaštitu vlaknima od kemikalija i mehaničkog trošenja
- osigurava dobru završnu obradu tvorevine
- poprečna mehanička svojstva kompozita uvelike su pod utjecajem matrice

5.2 Podjela kompozitnih materijala

Kao što je već ranije spomenuto, za materijal matrice kompozita primjenjuju se metali, polimeri i keramika, ali i ugljik. Dakle, kompozitni materijali dijele se s obzirom na materijal matrice na [16]:

- kompoziti polimerne matrice – PMC (eng. *Polymer Matrix Composites*)
- kompoziti metalne matrice – MMC (eng. *Metal Matrix Composites*)
- kompoziti keramičke matrice – CMC (eng. *Ceramic Matrix Composites*)
- kompoziti ugljične matrice – C/C (eng. *Carbon/carbon Composites*)

Kod MMC materijala metal ili legura je kontinuirana faza u koju se ugrađuju ojačavala. Prednosti kompozita s metalnom matricom su visoka poprečna čvrstoća, modul elastičnosti i modul smicanja, malo toplinsko širenje, dimenzijska stabilnost, dobra električna i toplinska provodnost. [16]

Keramika kao materijal ima vrlo visoku temperaturnu postojanost, ali slabu otpornost na lom, što čini keramiku osjetljivom na lomove pod rasteznim ili udarnim opterećenjima. Međutim, dodavanjem ojačavala nastaju CMC materijali koji uz poboljšanu otpornost na lom uključuju i malu gustoću, kemijsku inertnost, visoku tvrdoću i čvrstoću. Upotrebljavaju se tamo gdje su poželjna visoka mehanička svojstva pri visokim radnim temperaturama. [16]

U C/C kompozitima, ugljična vlakna ugrađena su u ugljičnu matricu. Ugljik je sam po sebi krhak, međutim dodavanjem ugljičnih vlakana svojstva se uvelike poboljšavaju. Ova vrsta kompozitnog materijala je obično vrlo postojana pri visokim temperaturama, zadržavaju veliku rasteznu i tlačnu čvrstoću te su otporni na zamor materijala. Nedostatak ovih kompozita je dug i složen proces obrade. [16]

Kako je tema ovog rada vezana za kompozitne polimerne tvorevine, u nastavku će se detaljnije opisati kompozitni materijali koji upotrebljavaju polimerne matrice. [16]

5.3 Polimerni kompoziti

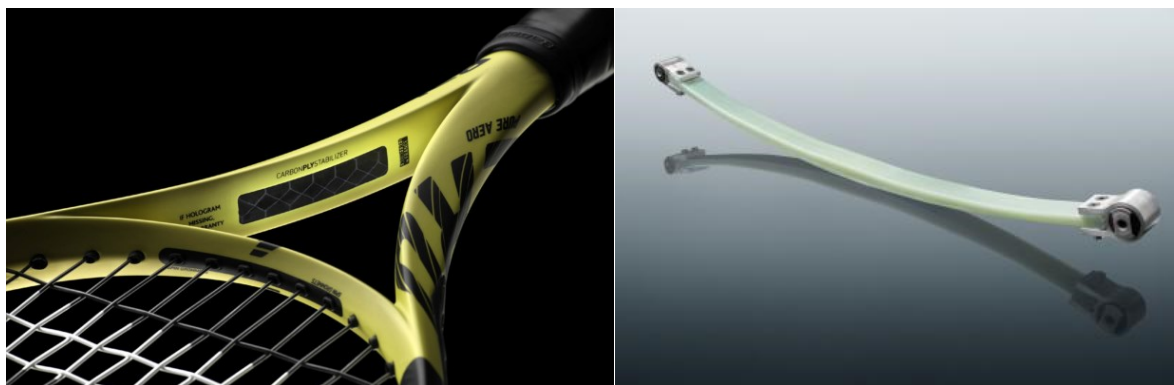
PMC kompoziti predmet su velikog interesa za temeljna, ali i primijenjena istraživanja. Ovi kompoziti posjeduju nekoliko prednosti u odnosu na metalne i keramičke te su to danas proizvodi široke primjene koji se učinkovito projektiraju, izrađuju i primjenjuju. U polimernim kompozitima se kao materijal matrice najčešće primjenjuju poliesterske, epoksidne i vinil-ester smole, dok se kao ojačavala upotrebljavaju staklena, ugljična ili aramidna vlakna. Vlakna mogu biti kontinuirana ili isprekidana. Kontinuirana vlakna mogu biti u obliku niti i tkanina, dok isprekidana mogu biti u obliku čestica. [16]

Mehanička svojstva PMC kompozita kao što su čvrstoća i krutost izravno ovise o svojstvima ojačavala. S druge strane, matrica povezuje ojačavala i pomaže pri prijenosu opterećenja, odnosno glavna ideja u projektiranju kompozitne tvorevine je usmjeriti ojačavala u smjeru opterećenja kako bi se svojstva kompozitnog materijala poboljšala. Polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima ima u smjeru vlakana rasteznu čvrstoću približno jednaku čeliku, dok je s druge strane višestruko puta lakši od čelika. [16]

Postoji nekoliko prednosti kompozitnih materijala koje ih čine upotrebljivijim od drugih klasičnih materijala, a najviše se očituju kod tvorevina gdje su bitni zahtjevi za visokim performansama i malom masom. Najveće prednosti polimernih kompozita su visoka rastezna i specifična čvrstoća i krutost, otpornost prema zamoru materijala, fleksibilnost oblikovanja te visoka postojanost na koroziju. [16]

Neki od nedostataka polimernih kompozita su smanjena otpornost na udar, degradacija svojstava pri visokim temperaturama, osjetljivost na vlagu te slaba elastična svojstva. [16]

Polimerni kompoziti primjenjuju se u raznim industrijama, a najčešće se primjenjuju za dijelove zrakoplova, automobila, brodova i čamaca, kao i za sportsku opremu, bazene, kemijsku industriju, itd. (slika 5.3)



a)

b)

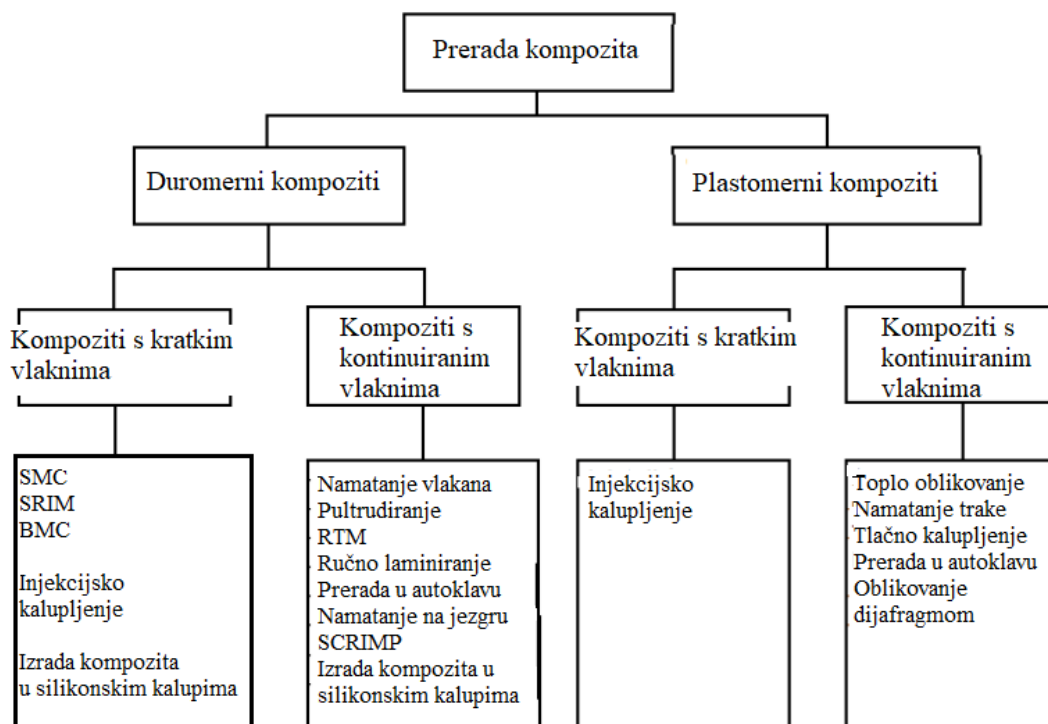


c)

Slika 5.3. Primjeri tvorevina izrađenih od polimernih kompozita: a) teniski reket ojačan ugljičnim vlaknima [19], b) lisnata opruga ojačana staklenim vlaknima [20], c) čamci ojačani staklenim vlaknima [21]

5.4 Postupci proizvodnje kompozita

Svaki materijal ima jedinstvena fizikalna i mehanička svojstva te se stoga mora primijeniti prikladna tehnika proizvodnje i transformacije materijala u konačni oblik. U proizvodnji kompozita izbjegavaju se postupci klasične strojne obrade jer se na taj način režu i oštećuju vlakna, a time se umanjuju povoljna svojstva kompozitnih materijala. U usporedbi s obradom metalnih dijelova klasičnim postupcima proizvodnje, proizvodnja kompozita ne zahtijeva visoku temperaturu i tlak za obradu. Tehnike proizvodnje kompozita primjenjuju različite vrste sirovina, uključujući vlakna, smole, tkanine itd. Podjela postupaka proizvodnje prikazana je na slici 5.4. Uspjeh proizvodnje kompozitnih dijelova ovisi o ispravnom odabiru proizvodnog postupka kao i o ispravnom odabiru parametara prerade. [22]



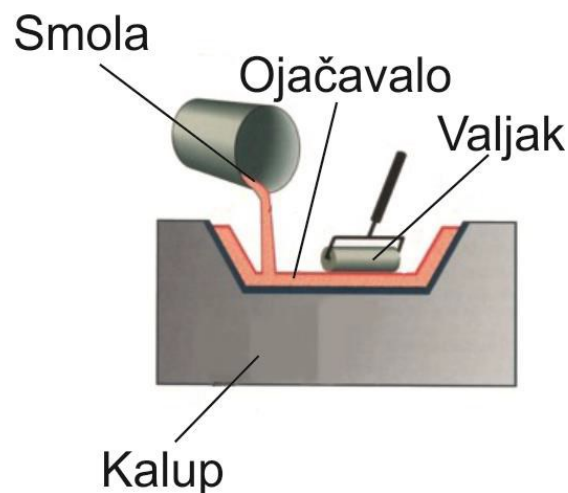
Slika 5.4. Postupci proizvodnje kompozita [22]

U nastavku će biti opisana samo dva postupka koja će se potencijalno primijeniti u eksperimentalnom dijelu rada.

5.4.1 Ručno laminiranje

Ručno laminiranje jedan je od najstarijih postupaka proizvodnje kompozita, a i danas ima široku primjenu, naročito u pomorskoj industriji i za izradu prototipnih dijelova.

Kod ovog postupka proizvodnje kompozita primjenjuje se otvoreni kalup na koji se prvo nanosi odvajalo, odnosno tvar za lakše odvajanje modela od kalupa, zatim gelna prevlaka koja poboljšava kvalitetu završne površine tvorevine i omogućuje bojanje po potrebi, nakon čega se stavlja sloj ili slojevi tkanine te smola (slika 5.5). Slojevi tkanine i smole se dodaju sve dok se ne postigne zadovoljavajuća debljina, a za stvaranje jednolike raspodjele smole po cijeloj površini i istiskivanje zraka zadržanog među slojevima primjenjuje se valjak. [22]



Slika 5.5. Shematski prikaz ručnog laminiranja [23]

Kao ojačavalo se primjenjuju tkanine od stakla i ugljična vlakna, dok se aramidna vlakna rjeđe upotrebljavaju jer ih je teže natopiti. Ovisno o zahtjevima postupka, kao matrica se upotrebljavaju poliesterske, epoksidne i vinil-esterske smole. Izbor kalupa za ručno laminiranje je puno jednostavniji u usporedbi s drugim proizvodnim postupcima jer postupak uglavnom zahtijeva sobnu temperaturu bez previsokih tlakova te nema potrebe za prečvrstim i složenim kalupima. Materijali od kojih se izrađuju kalupi su čelik, drvo, kompoziti i drugi materijali. [22]

Postupak se primjenjuje za izradu čamaca, manjih brodova, lopatica vjetrenjača, spremnika za skladištenje, bazena, itd. (slika 5.6.). Zbog jednostavnosti postupka i malo kapitalnih ulaganja,

postupak se naširoko primjenjuje za izradu dijelova prototipova. Probni modeli za provođenje testiranja ojačavala i smole izrađuju se ručnim laminiranjem. [22]

Glavno ograničenje postupka je postizanje glatke površine samo na jednoj strani modela, onoj koja je u kontaktu s kalupom. Nadalje, kvaliteta postupka uvelike ovisi o vještinama radnika, nema kontrole nad debljinom tvorevine i teško je proizvesti tvorevine s malim udjelom smole bez nastajanja pukotina. Postupak je dugotrajan i nije primjenjiv za velike serije proizvoda. [22]



Slika 5.6. Izrada ribičkog broda postupkom ručnog laminiranja [24]

5.4.2 Podtlačno oblikovanje

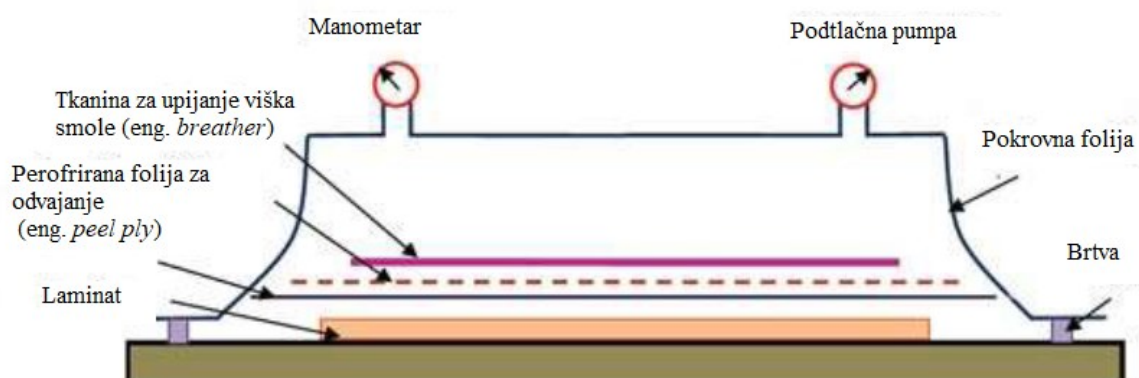
Podtlačno oblikovanje je postupak proizvodnje kompozita kod kojeg se u otvoreni kalup ručno polaže prepreg – tkanina impregnirana smolom, narezana na željene oblike i duljine (slika 5.7). Za izradu tvorevine primjenjuju se pretežno preprezi od vlakana, a slojevi su rezani na takav način da se osigura željena orijentacija vlakana. Za rezanje, prepreg se stavlja na dasku za rezanje, a zatim se pomoću čeličnog ravnala i noža reže. Za veće količine koristi se automatizirano rezanje, računalno vođeno i softverski optimizirano. Softver minimizira otpad i osigurava ponovljivost i dosljednost operacija rezanja sloja. Postupak se odvija u vrlo urednoj i čistoj atmosferi u kontroliranim uvjetima vlažnosti i temperature. Kao i kod postupka ručnog

laminiranja, također je potrebno nanijeti odvajalo na kalup za lakše vađenje gotove tvorevine iz kalupa. [22]



Slika 5.7. Polaganje slojeva ugljičnog preprega na otvoreni kalup [25]

Nakon što je prepreg položen, na njega se stavlja tkanina za odjeljivanje (eng. *peel ply*), na koju se stavlja tkanina za upijanje viška smole (eng. *breather*). Na kalup se postavlja pokrovna vreća koja se brtvi, kalup se spaja s podtlačnom pumpom te se istiskuje zaostali zrak (slika 5.8). Cijelo vrijeme pumpa osigurava podtlak te dolazi do umreživanja smole. Nakon postupka podtlačnog oblikovanja, izradak se stavlja u peć za konačno umreživanje i skrućivanje. [26]



Slika 5.8. Podtlačno oblikovanje [26]

Za materijal preprega najčešće se upotrebljava epoksidna smola u kombinaciji s ugljičnim vlaknima, a još se primjenjuju grafit, aramidna i staklena vlakna. Kombinacija epoksidne smole i ugljičnih vlakana daje mnogo lakši i jači materijal preprega od ostalih kombinacija i osigurava bolju uštedu mase u komponenti. [22]

Za prototip u građevinske svrhe, kalupi se izrađuju strojnom obradom metala, drva ili polimera. Za izradu zrakoplovnih dijelova, za materijal kalupa primjenjuju se kompozitni materijali kao što su epoksidna smola/ugljik, epoksidna smola/staklo, itd. [22]

Ovaj postupak omogućuje proizvodnju visokog volumnog udjela vlakana uz visoku kvalitetu završnog proizvoda. Moguće je proizvesti veoma čvrste i krute kompozitne tvorevine. Jednostavni i složeni dijelovi mogu se proizvesti ovim postupkom te je pogodan za izradu prototipnih dijelova. Iako je cijena kalupa niska, cijeli postupak i oprema za podtlačno oblikovanje nisu jeftini. Postupak je vrlo radno intenzivan i nije prikladan za proizvodnju velikih serija, a izrađeni dijelovi su skupi. [22]

Postupak podtlačnog oblikovanja široko se primjenjuje u zrakoplovnoj industriji kao i za izradu prototipnih dijelova. Strukture krila, radari, dijelovi za jahte, sportska oprema proizvode se ovim postupkom (slika 5.9).



Slika 5.9. Podtlačno oblikovanje trupa radio-upravljanog zrakoplova [27]

6. ADITIVNA PROIZVODNJA POLIMERNIH KALUPA

Aditivna proizvodnja već dugi niz godina primjenjuje se za izradu metalnih kalupa i alata, ponajviše tamo gdje postoji potreba za izradom dijelova komplicirane geometrije koji se teško mogu napraviti klasičnim postupcima prerade. Budući da se proizvodnja sve više okreće fleksibilnim postupcima prerade, manjim serijama, te se teži izradi dijelova bez potrebe za naknadnom obradom, sve je veća primjena izrade polimernih kalupa aditivnom proizvodnjom. [28]

Aditivnom proizvodnjom polimernih kalupa postiže se sve veći izbor materijala, dobra kvaliteta proizvoda te veća proizvodnost u preradi polimernih i kompozitnih materijala. Kao i kod proizvodnje metalnih kalupa, tako i kod polimernih kalupa, najveća primjena je tamo gdje se traže složeni oblici s minimalnom naknadnom obradom. Izrađuju se kalupi za maloserijsku proizvodnju tvorevina zbog male trajnosti kalupa, naročito u odnosu na metalne kalupe. [28]

Aditivnom proizvodnjom proizvode se polimerni kalupi za klasične postupke prerade polimernih tvorevina kao što su injekcijsko prešanje, rjeđe injekcijsko puhanje te kalupi za preradu kompozitnih materijala postupcima ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja. [28]

6.1 Injekcijsko prešanje

Injekcijsko prešanje izumljeno je u 19. stoljeću i dobro je razvijen proizvodni postupak za proizvodnju širokog spektra složenih proizvoda u velikim serijama. Daleko najčešće upotrebljeni materijali za injekcijsko prešanje su plastomeri, a primjena je ponajviše za velikoserijsku proizvodnju primjerice čepova za boce, kopči, poklopaca, lonaca, itd. (slika 6.1) [28]



Slika 6.1. Razni čepovi proizvedeni injekcijskim prešanjem [28]

Injekcijsko prešanje je postupak stvaranja komponenti ubrizgavanjem rastaljenog materijala pod pritiskom u kalup. Materijal ispunjava kalupna šupljina i kada se ohladni stvrdne se, poprimajući oblik kalupa. Kalup se tada otvara, tvorevina se izbacuje i postupak se ponavlja. [28]

Najvažnija investicija za svaku proizvodnju injekcijskim prešanjem, uz stroj i pomoćna sredstva, su oblikovanje, izrada i kupnja kalupa. Svaka nova komponenta treba namjenski precizan kalup, a troškovi kalupa u ovisnosti o veličini i složenosti mogu doseći jako visoke cijene. Stoga se za manje serije proizvoda u zadnje vrijeme sve više primjenjuju kalupi proizvedeni aditivnom proizvodnjom. [28]

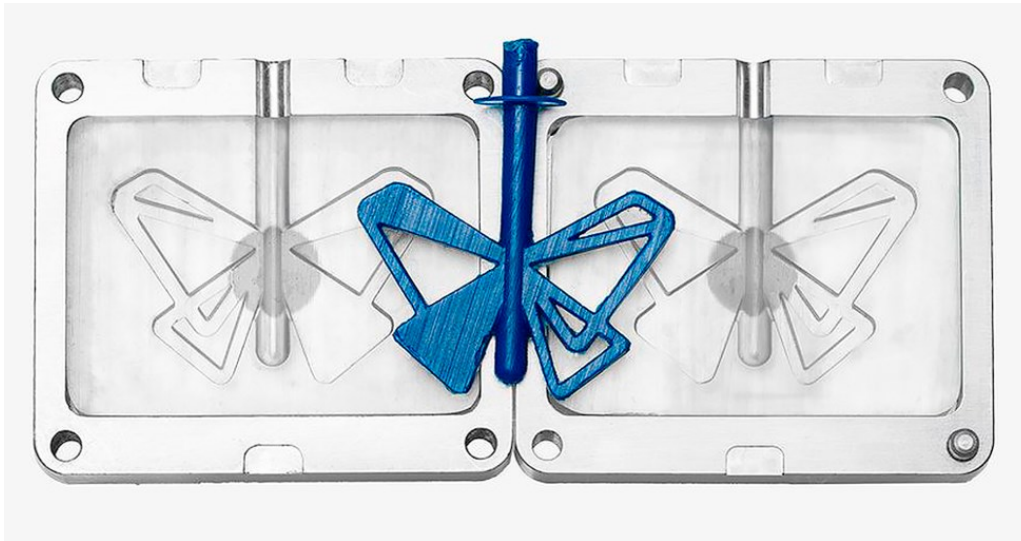
Postupak aditivne proizvodnje koji se primjenjuje za izradu kalupa za injekcijsko prešanje je Polyjet zbog mogućnosti izrade kalupa s visokom preciznošću s izvrsnom završnom obradom površine. U kombinaciji sa sve širim rasponom materijala za ispis, postojanim na visokim temperaturama i odličnim mogućnostima oblikovanja, aditivna proizvodnja ima svakodnevnu primjenu u proizvodnji ovih kalupa. [28]

Aditivna proizvodnja najprikladnija je [29]:

- kad je potrebno brzo vrijeme prerade – 1 do 2 tjedna za razliku od 5 do 7 tjedana,
- za male količine proizvodnje – 50 do 100 dijelova,
- za kalupe gdje su vjerojatne promjene i iteracije,
- za dijelove koji su relativno mali (do 200 mm)

Dva su standardna tipa ispisanih kalupa [29]:

- umetci kalupa u aluminijskim okvirima (slika 6.2) – kalupni umetak je ispisan i umetnut u čvrste aluminijske okvire koji daju podršku protiv pritiska i topline mlaznica za injekcijsko prešanje (najčešći tip, proizvodi preciznije dijelove, smanjeno savijanje nakon višekratne upotrebe)
- samostalni kalup – primjenjuju se za kanale za temperiranje komplicirane geometrije, zahtijeva više materijala i skloniji su deformaciji nakon veće upotrebe



Slika 6.2. Ispisani kalup umetnut u aluminijski potporni okvir [29]

U odnosu na kalupe načinjene klasičnim postupcima, kvaliteta površine ispisanog kalupa sigurno je manja, međutim, kod nevelikog broja komada naknadne operacije kojima se površina doraduje su isplative. Također, zbog snižene čvrstoće materijala, kako se ne bi narušila kvaliteta izratka i stabilnost kalupa, materijal se ubrizgava u kalup pod nižim tlakom. [28]

Materijali za aditivnu proizvodnju kalupa za injekcijsko prešanje moraju zadovoljavati kriterije [29]:

- postojanost pri visokim temperaturama – potrebna kako bi se izdržala mehanička i toplinska opterećenja primijenjena na kalup tijekom ubrizgavanja materijala
- visoka krutost i žilavost – ponavljano uklanjanje dijelova može uzrokovati trošenje kalupa, tako da su materijali visoke krutosti potrebni za održavanje točnosti kalupa tijekom vremena
- visoka razina detalja – visoka točnost dimenzija i glatka površina potrebne za proizvodnju visoko preciznog kalupa iz kojeg proizlaze precizni dijelovi

Plastomeri za koje je potrebna temperatura prerade do 300 °C uspješno se oblikuju pomoću kalupa načinjenih postupkom Polyjet. Također, materijali koji se ubrizgavaju s relativno niskim talištem i visokom tečnošću, poput polipropilena (PP) i polietilena (PE), omogućuju najduži vijek trajanja kalupa, dok materijali kao što je polipropilen ojačan staklenim vlaknima (PP+G) daje malo kraći vijek trajanja kalupa. [30]

Materijal koji najbolje ispunjava navedene kriterije i koji se primjenjuje za postupak PolyJet je digitalni ABS Plus (eng. *digital ABS Plus*) tvrtke *Stratasys*. Kao što je ranije spomenuto, Digital ABS Plus primjer je digitalnog materijala sličnih svojstava ABS plastici te postojanost pri visokim temperaturama i žilavost. Posjeduje rasteznu čvrstoću 45-60 MPa, savojnu čvrstoću 55-75 MPa, žilavost 90-115 J/m, a temperatura postojanosti oblika pri opterećenju 0,45 MPa je 58-68 °C. Primjer kalupa za injekcijsko prešanje izrađenog tim materijalom prikazan je na slici 6.3. [30]



Slika 6.3. Kalup za injekcijsko prešanje izrađen postupkom Polyjet digital ABS plus materijalom [29]

Postupak FDM također je prisutan kod izrade kalupa za injekcijsko prešanje, međutim potreban je kvalitetan odabir materijala zbog lošije kvalitete površine kalupa i potrebe za naknadnim poliranjem, pjeskarenjem i drugim postupcima završne obrade. Za izradu kalupa postupkom FDM postupkom primjenjuje se digitalni ABS ojačan ugljičnim nanocjevčicama zbog dobre toplinske provodnosti ugljičnih vlakana i omogućivanja bržeg hlađenja polimernog materijala. [31]

6.2 Injekcijsko puhanje

Injekcijsko puhanje je proizvodni postupak kojim se izrađuju šuplji plastični dijelovi kao što su boce, spremnici i slično. Proizvodnja tih predmeta je brza i isplativa, ali je izrada prototipova spora i skupa. Kalupi izrađeni postupcima PolyJet i FDM dobra su opcija za prototipove i male proizvodne serije, omogućujući testiranje i provjeru završnoj proizvodnji plastike i smanjujući vrijeme izrade i rizik (slika 6.4). Kada su vjerojatne promjene oblika proizvoda ili u obzir treba uzeti više različitih oblika, postupci aditivne proizvodnje su poželjni za izradu kalupa. Trošak kalupa je manji za 40 do 80 %, vrijeme isporuke je smanjeno za 30 do 70 % i gotovo da nije potrebna naknadna obrada. [32]

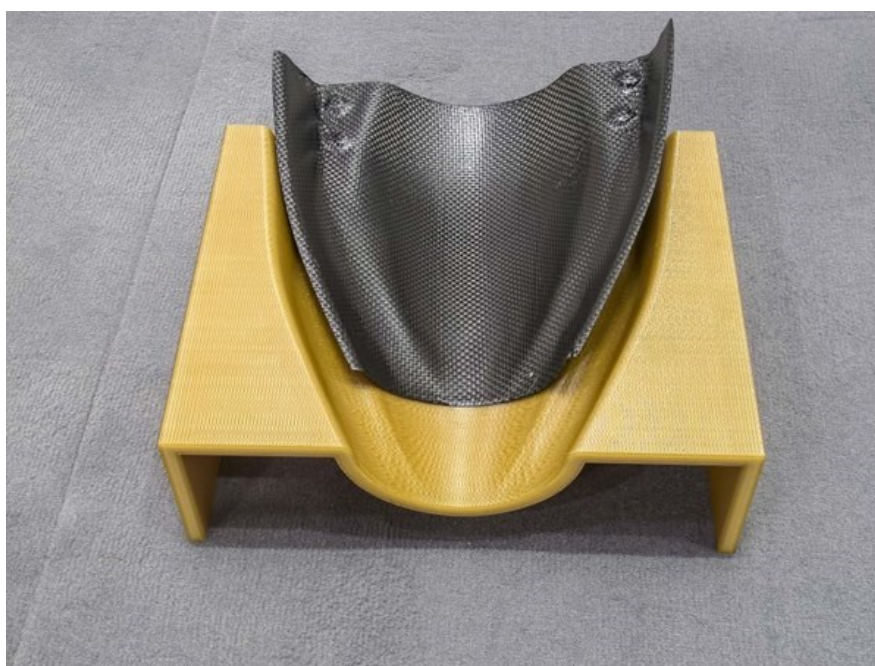


Slika 6.4. Kalup za injekcijsko puhanje izrađen postupkom Polyjet pomoću materijala digitalni ABS [32]

Iako postoje materijali koji se primjenjuju u postupcima PolyJet i FDM koji prema svojim karakteristikama čak i zadovoljavaju potrebe injekcijskog puhanja, toplinska i dimenzijska postojanost ne dozvoljavaju u ovom trenutku izradu kalupa aditivnim postupcima za velike serije injekcijskog puhanja. [32]

6.3 Kalupi za ručno laminiranje i podtlačno oblikovanje

Industrije diljem svijeta sve više uviđaju nedostatke metalnih materijala u proizvodnji kalupa – visoki troškovi, dugo vrijeme isporuke, kruta proizvodnja, ograničenja dizajna, teški proizvodi. U tom pogledu, postupak FDM postaje sve više primijenjen za izradu kalupa za ručno laminiranje. Svi navedeni nedostaci metalnih materijala su ono što se postupkom FDM nadilazi. Kalupi izrađeni postupkom FDM imaju dosta sličnosti u pogledu oblika i upotrebe kao i klasični kalupi, osobito oni s višim koeficijentima toplinskog rastezanja, a s druge strane tehnologija pruža bolju sposobnost i slobodu stvaranja oblika. Kako bi se osigurala visokokvalitetna površina, obično je potrebna naknadna obrada, najčešće brušenje kako bi se izgladile vidljive linije izrade te poliranje. [34] Primjer kalupa za preradu kompozita izrađenog FDM-om prikazan je na slici 6.5.

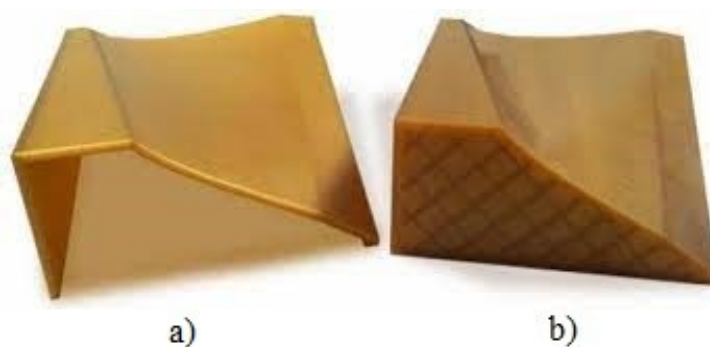


Slika 6.5. Kalup izrađen postupkom FDM te izvađena kompozitna tvorevina [33]

Kalupi izrađeni postupkom FDM primjenjuju se i za postupke podtlačnog oblikovanja jer podtlačna vreća nije prevelike mase i optimalnih je veličina te nije potrebna teška potporna konstrukcija. Također, kalupi su učinkoviti za peć nakon podtlačnog oblikovanja i mogu se primijeniti s parametrima ciklusa umreživanja iznad 180 °C, ovisno o odabranom materijalu. [34]

Tehnologijom FDM proizvode se kalupi u širokom rasponu polimernih materijala visokih performansi. Svaki materijal ima svoje prednosti i nedostatke koja se moraju uzeti u obzir za učinkovitu upotrebu pri izradi kalupa za preradu kompozitnih materijala. Tvrtka *Stratasys* razvila je niz materijala koji se primjenjuju za izradu kalupa kao što su ULTEM 1010, ULTEM 9085, PC, ABS-M30, ST-130, PPSU, ABS, ASA, itd. ULTEM 1010 posjeduje najveću temperaturnu sposobnost te može podnositi cikluse umreživanja i do 177 °C, a također ima najniži koeficijent toplinskog rastezanja što ga čini poželjnim izborom za većinu primjena pri izradi kalupa za ručno laminiranje. [34]

Postupak FDM omogućava izradu kalupa kompleksne geometrije bez prevelikih troškova i s kraćim vremenom izrade. Oblikovanje i konstrukcija kalupa prvenstveno ovisi o parametrima postupka temperaturi, tlaku, dostupnosti vreća za podtlačno oblikovanje i slično. Općenito, kalupi za ručno laminiranje izrađeni postupkom FDM dijele se na školjkaste kalupe i kalupe sa šupljikavom unutrašnjosti (slika 6.6). [34]



Slika 6.6. Kalup izrađen postupkom FDM: a) školjkasti kalup, b) kalup sa šupljikavom unutrašnjosti [34]

Školjkasti kalup relativno je jednostavan pristup koji pruža površinu za ručno laminiranje te je izgrađen u debljini koja osigurava stabilnost s minimalnom upotrebom stranih materijala. Kalupi ovog tipa mogu izdržati tlak u podtlačnom oblikovanju viši od 6,8 bara. [34]

6.4 Jezgre za izradu šupljih kompozitnih tvorevina

Proizvodnja šupljih kompozitnih dijelova koji moraju biti precizno izrađeni predstavljaju svojevrsni izazov u proizvodnji. Moguća je primjena kalupa pa spajanje dvije polovice ili upotreba topivih jezgri. U prošlosti koristili su se CNC strojevi za proizvodnju kalupa, međutim cijena tog pristupa je previsoka, a vrijeme isporuke dugo. Iz tih razloga, mnoge tvrtke prešle su na proizvodnju topivih jezgri pomoću postupka FDM. [36] (slika 6.7)



Slika 6.7. Jezgra i gotova tvorevina za izradu šupljih kompozita izrađena postupkom FDM [35]

Proizvodnja topivih jezgri postupkom FDM osigurava značajna poboljšanja za proizvodnju malih količina proizvoda – umjesto kompliciranog polaganja dviju polovica kalupa, zatim polaganja dijelova u svakoj polovici pa spajanja, kompozitni materijal može se omotati oko topive jezgre. Nakon što dio očvrstne, jezgra se jednostavno otopi u otopinama. Takve jezgre dovoljno su čvrste da izdrže opterećenja postupka proizvodnje kompozita te nema opasnosti od oštećenja dijela tijekom vađenja jezgre jer se jezgra topi u kupelji s otopinom. [36]

Proizvodnja takvih jezgri zahtijeva dvije promjene s obzirom na standardni postupak FDM. Jezgra je oblikovana tako da svoju unutarnju strukturu čini šupljom, a drugo, standardni čvrsti materijali koji se primjenjuju u FDM postupku zamjenjuju se topivim materijalom koji se inače primjenjuje za potpunu strukturu. Kompozitni dijelovi s FDM jezgrama moraju očvršćivati pri temperaturama ispod 121 °C i pri tlakovima nižim od 345 kPa. [36]

7. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu pokušat će se izraditi kalupi za postupke ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja aditivnim postupcima FDM i Polyjet. Također će se izraditi kompozitna tvorevina postupcima ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja s različitim kompozitnim materijalima.

Predmetna tvorevina je NACA usisnik (eng. *NACA duct*), oblik koji se često izrađuje od kompozitnih materijala, a služi za usis zraka na automobilima, zrakoplovima i drugim vozilima (slika 7.1).

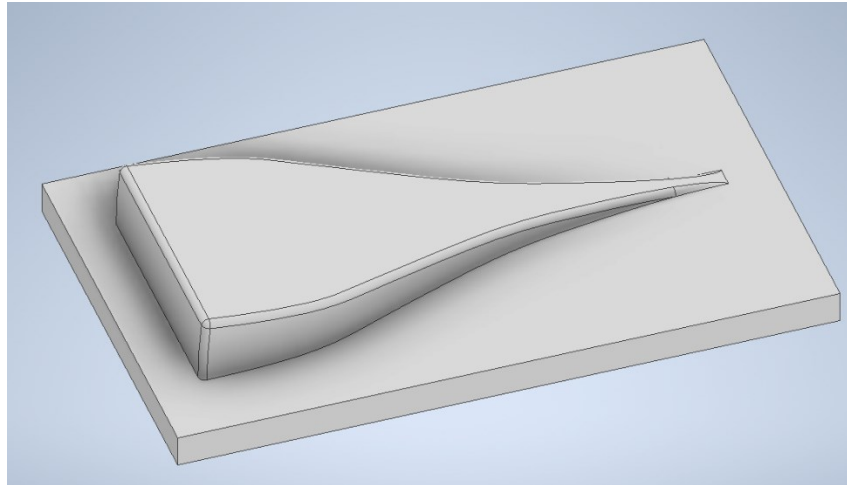


Slika 7.1. Primjer *NACA* usisnika izrađenog od kompozitnog materijala [37]

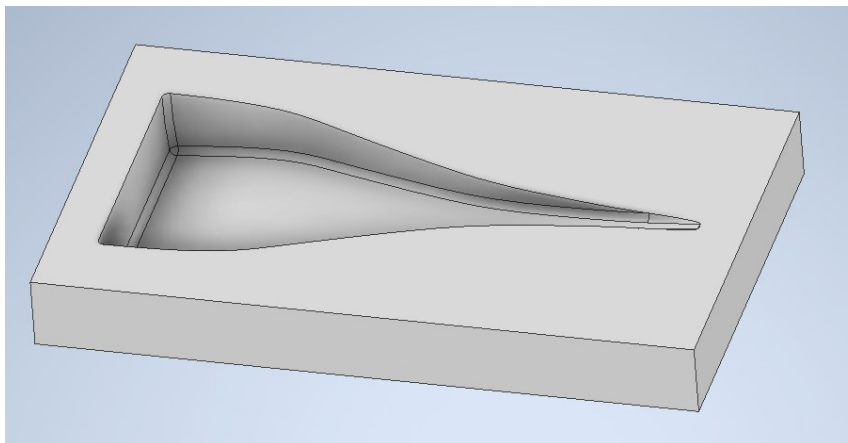
7.1 Izrada kalupa za postupke ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja

Prvi korak u izradi kalupa je izrada 3D CAD modela. Predviđena je izrada dva tipa kalupa, jednog za polaganje kompozitnog materijala na vanjsku stranu kalupa (slika 7.2.a) i drugog za ulaganje kompozitnog materijala u unutarnju stranu kalupa (slika 7.2.b) te su za takve kalupe izrađeni CAD modeli je u programu *Autodesk Inventor*. Pravokutna površina na kojoj se nalazi ili, u drugom slučaju, u koju je udubljen oblik *NACA* usisnika je dimenzija 200x120 mm što znači da se kalup može izraditi bilo kojim FDM ili Polyjet pisačem. Kalupi su mogli biti i šuplji,

međutim ne bi se postiglo puno u smislu uštede materijala što je utvrđeno u softverima 3D pisača.



a)



b)

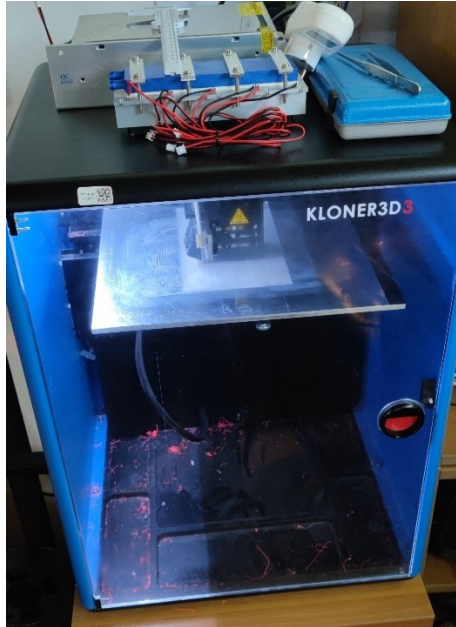
Slika 7.2. Izrađeni CAD modeli kalupa: a) pozitivni oblik kalupa - za polaganje kompozitnog materijala na vanjsku stranu kalupa, b) negativni oblik kalupa - za ulaganje kompozitnog materijala u unutarnju stranu kalupa

Nakon izrade 3D CAD modela u *Autodesk Inventoru*, potrebno ga je učitati u neki od softvera za *slicing* u kojem će taj model biti prebačen u .stl datoteku te će se odrediti parametri ispisa poput brzine izrade, temperature prerade, visine sloja, itd.

Iako bi logički bilo zbog same prirode primjene ove tvorevine i površine koja mora biti kvalitetnija izrađivati ju u kalupu prikazanom na slici 7.2.a, u ovom radu htjela se pokazati mogućnost izrade u negativnom obliku kalupa, od zahtjeva prilikom prerade do samog vađenja tvorevine iz kalupa.

7.1.1 Izrada kalupa postupkom FDM

Kalup čiji je 3D CAD model prikazan na slici 7.2.a izrađen je FDM pisačem *Kloner3D 300H* koji je prikazan na slici 7.3. Upotrebljeni materijal je PLA.



Slika 7.3. FDM pisač *Kloner3D 300H*

Neke od osnovnih specifikacija navedenog pisača prikazane su u tablici 7.1.

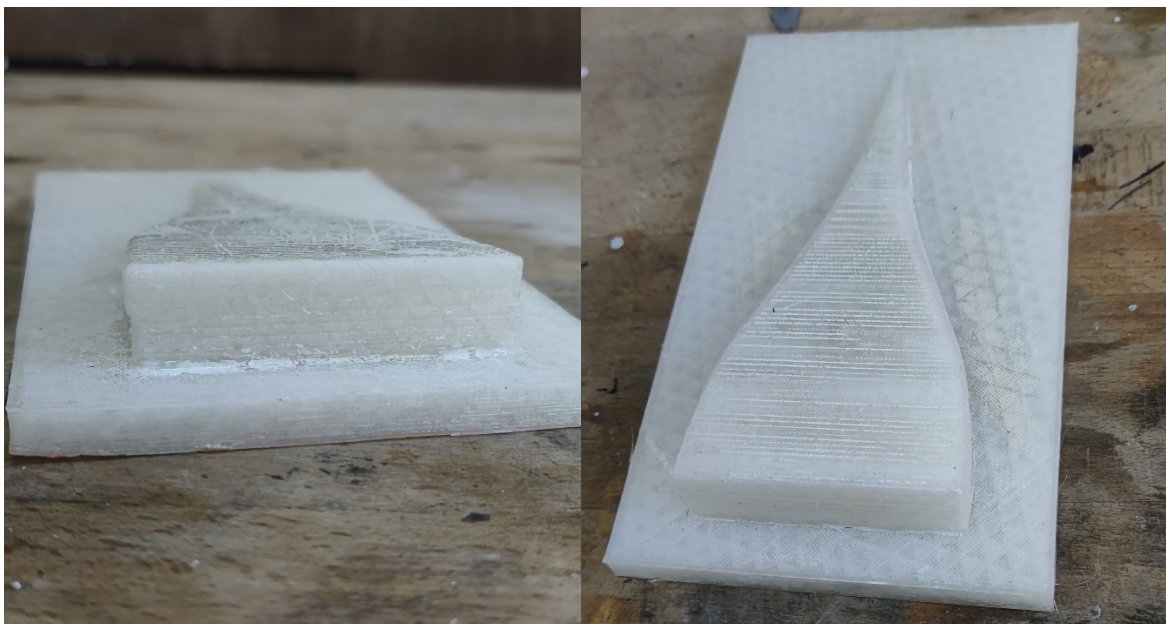
Tablica 7.1. Osnovne specifikacije FDM pisača *Kloner3D 300H* [38]

Dimenzije pisača	400x450x650 mm
Masa pisača	25 kg
Minimalna visina sloja	0,1 mm
Maksimalne dimenzije izratka	320x260x330 mm
Promjer filamenta	1,75 mm
Promjer mlaznice	0,5 mm
Potrebna radna temperatura u printanju	15–35 °C
Potrebna vlaga u printanju	15-55 %

Parametri ispisa kalupa postupkom FDM:

- predviđena masa: 135 g
- predviđeno vrijeme ispisa: 9 h i 13 min
- visina sloja: 0,2 mm
- debljina konture: 1,2 mm
- gustoća ispune: 20 %
- temperatura ispisa: 220 °C
- brzina ispisa: 60 mm/s
- temperatura podloge: 70 °C

Kalup koji je ispisan postupkom FDM nije izrađen onako kako je zamišljeno jer je došlo do pomicanja slojeva pri ispisu (slika 7.4.a). Prilikom ispisa kod postupka FDM mogući razlozi za takav problem su prebrzo kretanje glave alata, nedostatak snage u motoru, previsoka temperatura u pogonskom dijelu ili nekakav mehanički kvar. Nije točno utvrđeno zbog čega je došlo do greške pri prvom ispisu, no drugi pokušaj ispisa je uspješno proveden te se ispisao kalup onako kako je izrađen CAD model (slika 7.4.b). Vidljivi crni tragovi na površini kalupa su tragovi obrade površine vlažnim brusnim papirom nakon ispisa kako bi se postigla što glatkija površina kalupa na koju će se polagati kompozitni materijal.



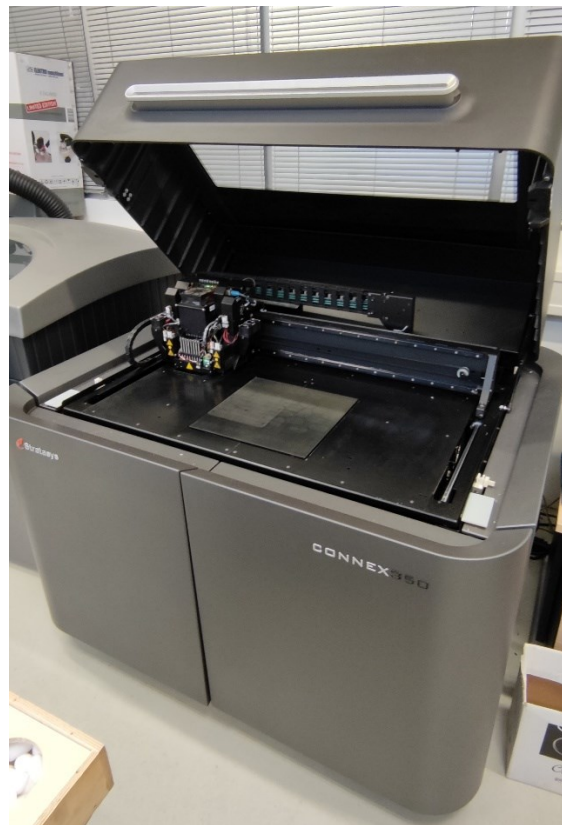
a)

b)

Slika 7.4. Kalup ispisan postupkom FDM: a) s greškom pomicanja slojeva, b) bez greške

7.1.2 Izrada kalupa postupkom Polyjet

Postupkom Polyjet izrađena su oba tipa kalupa čiji su CAD modeli prikazani na slikama 7.2.a i 7.2.b. Kalupi su izrađeni Polyjet pisačem *Connex350* tvrtke *Stratasys* koji je prikazan na slici 7.5 te čije su osnovne specifikacije dane u tablici 7.2.

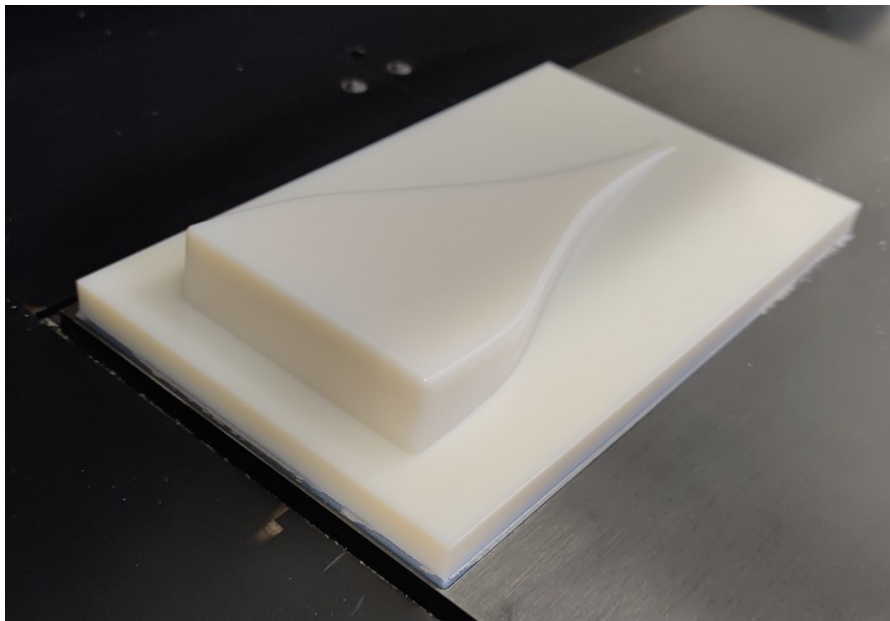


Slika 7.5. Polyjet pisač *Connex350*

Tablica 7.2. Osnovne specifikacije Polyjet pisača *Connex350* [39]

Veličina radne podloge	340x340x200 mm
Minimalna visina sloja	16 μ m
Masa pisača	430 kg
Dimenzije pisača	1400x1260x1100 mm
Radna temperatura stroja	18-25 °C
Vlaga pri izradi	30-70 %
Temperatura prerade	70 °C

Za materijal ispisa odabran je VeroWhite materijal, fotopolimer na bazi akrila, u bijeloj boji kojemu je temperatura tališta 45-50 °C i koji se preporučuje za izradu manjih, detaljnijih proizvoda, a u postavkama ispisa odabrana je sjajna završna obrada površine (eng. *glossy surface finish*). Pri ispisu upotrebljava se potporna struktura kako je opisano u poglavlju 4. Za pozitivni oblik kalupa (slika 7.6.a) potrošeno je 553 g VeroWhite materijala i 55 g potpornog materijala, a vrijeme izrade trajalo je 5 sati i 40 minuta, dok je za negativni oblik kalupa (slika 7.6.b) potrošeno 750 g VeroWhite materijala i 55 g potpornog materijala, a vrijeme izrade trajalo je 5 sati i 20 minuta.



a)



b)

Slika 7.6. Kalup izrađen postupkom Polyjet: a) pozitivni oblik kalupa - za polaganje kompozita na vanjsku stranu kalupa, b) negativni oblik kalupa - za ulaganje kompozita u unutarnju stranu kalupa

Očigledno je kako su kalupi izrađeni postupkom Polyjet mnogo finije teksture s puno manjom potrebom za naknadnom obradom površine od onih kalupa izrađenih postupkom taložnog očvršćivanja. Svojstva dobivene površine kalupa uvelike utječu i na svojstva površine kompozitne tvorevine koja je u preradi u kontaktu s kalupom. Vrijeme izrade kalupa istog oblika i dimenzija je kod postupka Polyjet otprilike 4 sata manje nego kod postupka FDM.

Odabir prikladnijeg postupka za izradu kalupa za preradu ove kompozitne tvorevine ovisio bi o veličini serije, dimenzijama, potrebnoj estetici površine te mehaničkim svojstvima proizvoda.

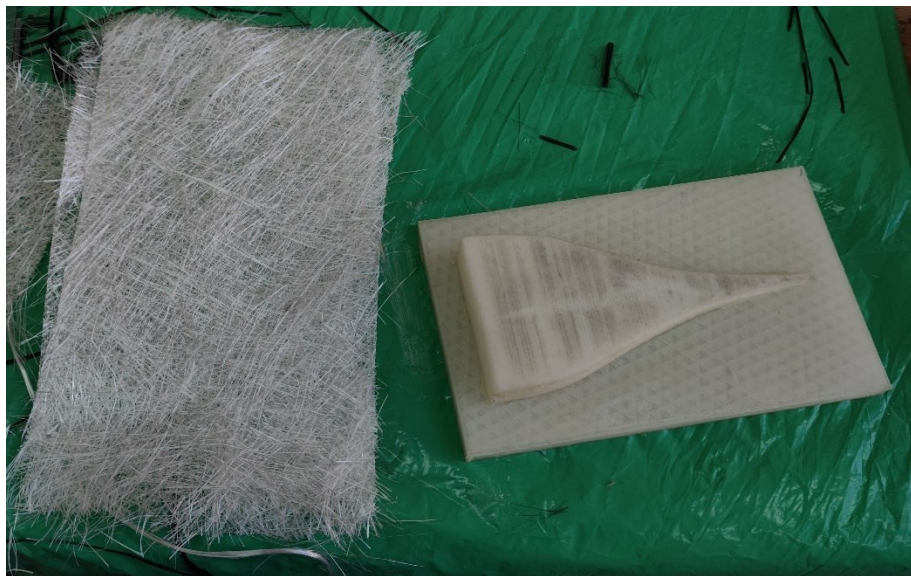
7.2 Prerada kompozitne tvorevine postupcima ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja

Nakon izrade, kalupe je potrebno naknadno obraditi brusnim papirom da se dobije glatka površina i uklone eventualni nedostaci 3D tiskanja. Prije prerade, na kalupe je potrebno nanijeti odvajalo za lakše odvajanje tvorevine iz kalupa. Odvajalo TR-102 REGULAR tvrtke *TR Mold Release* je nanoseno tri puta s odmakom od 15-ak minuta između svakog nanošenja kako bi se odvajalo stvrdnulo i krpom ispolirale sve površine kalupa. Primijenjeno odvajalo se upotrebljava za postupke ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja za kompozitne materijale s poliesterskom ili epoksidnom smolom.

Za sve prerađene kompozitne tvorevine upotrebljena je epoksidna smola *Novapox UV* tvrtke TEL-KOM d.o.o., gdje se komponenta A (epoksidna smola) i komponenta B (umreživalo) miješaju u omjeru 2:1.

7.2.1 Prerada kompozitne tvorevine ručnim laminiranjem

Postupkom ručnog laminiranja izrađene su dvije predmetne tvorevine pomoću kalupa sa slike 7.4.b. Za obje prerade je upotrebljena epoksidna smola u kombinaciji sa staklenim vlaknima koja su prethodno skrojena tako da nakon polaganja na kalup zauzmu cijelu površinu kalupa, a opet da ne dođe do prevelike bespotrebne potrošnje materijala (slika 7.7).



Slika 7.7. Staklena vlakna i kalup pripremljeni za postupak ručnog laminiranja

Debljina jednog sloja tkanine staklenih vlakana iznosila je 0,5 mm. Za prvu preradu upotrebljena su dva sloja tkanine uz 26 g epoksidne smole i 13 g umreživala te se tokom postupka polaganja uvidjelo kako je količina smole prevelika pa se za drugu preradu uz tri sloja tkanine pripremlilo 30 g epoksidne smole i 15 g umreživala. Za svaku preradu je kompozit ostavljen 24 sata kako bi se smola umrežila.



Slika 7.8. Kompozitna tvorevina izrađena ručnim laminiranjem s dva sloja staklenih vlakana



Slika 7.9. Kompozitna tvorevina izrađena ručnim laminiranjem s tri sloja staklenih vlakana

Iz slika 7.8 i 7.9 jasno je kako je bio potreban još jedan sloj staklenih vlakana kako bi donio gustoću kompozitnoj tvorevini. Tvorevina s dva sloja tkanine je na nekim mjestima ostala šuplja, naročito ne mjestima rubova i kutova kalupa. Jedan od problema koji se javlja kod nanošenja smole prilikom ručnog laminiranja je istiskivanje zraka te je potrebna znatna vještina radnika. Iako je tvorevina s tri sloja staklenih vlakana iznimno bolji završni proizvod od onog s dva sloja vlakana, dimenzije tvorevine su veće od kalupa jer je ostalo neistisnutog zraka pa je tvorevina ostala napuhuta. Proizvode bi trebalo naknadno obraditi rezanjem dijelova kompozitnog materijala koji je ostao izvan volumena kalupa te zaglađivanjem površine tvorevine.

7.2.2 Prerada kompozitne tvorevine podtlačnim oblikovanjem

Postupkom podtlačnog oblikovanja izrađene su tri različite kompozitne tvorevine. Na kalupu sa slike 7.6.a napravljena su dva postupka prerade podtlačnim oblikovanjem, jedan s epoksidnom smolom ojačanom staklenim vlaknima, a drugi s epoksidnom smolom ojačanom ugljičnim vlaknima. Treća prerada kompozitnog materijala podtlačnim oblikovanjem napravljena je pomoću negativnog oblika kalupa sa slike 7.6.b, a kompozitni materijal se sastojao se od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima.

Kao i kod postupaka ručnog laminiranja, prije samog postupka na kalupe je nanoseno odvajalo, a vlakna su skrojena prema potrebnim dimenzijama.

Za postupak prerade u kojem su se primijenila staklena vlakna pripremljena su tri sloja vlakana uz 30 g smole i 15 g umreživala. Koraci u postupku podtlačnog oblikovanja:

1. postavljanje vlakana u kalup i nanošenje smole na svaki sloj vlakana (slika 7.10.a)
2. postavljanje tkanine za odjeljivanje (eng. *peel ply*) (slika 7.10.b)
3. postavljanje tkanine za upijanje viška smole (eng. *breather*) (slika 7.10.c)
4. postavljanje pokrovne vrećice koja se brtvi (slika 7.10.d)
5. spajanje kalupa s podtlačnom pumpom te istiskivanje zaostalog zraka (slika 7.10.e)



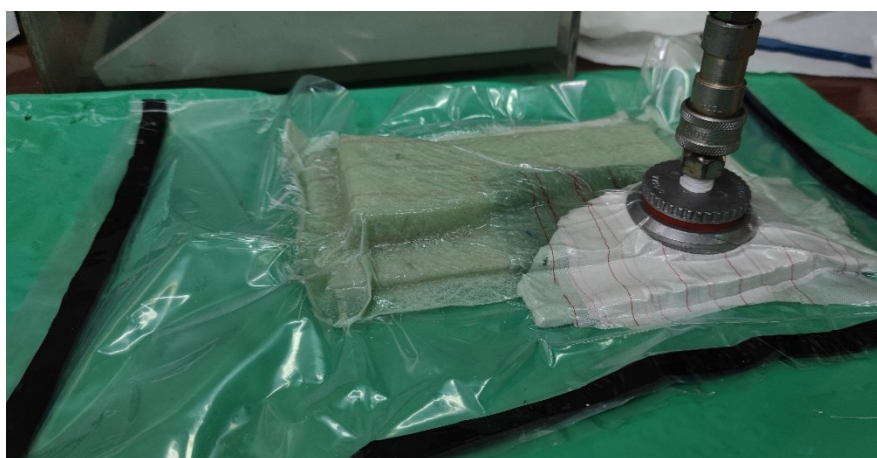
a)

b)



c)

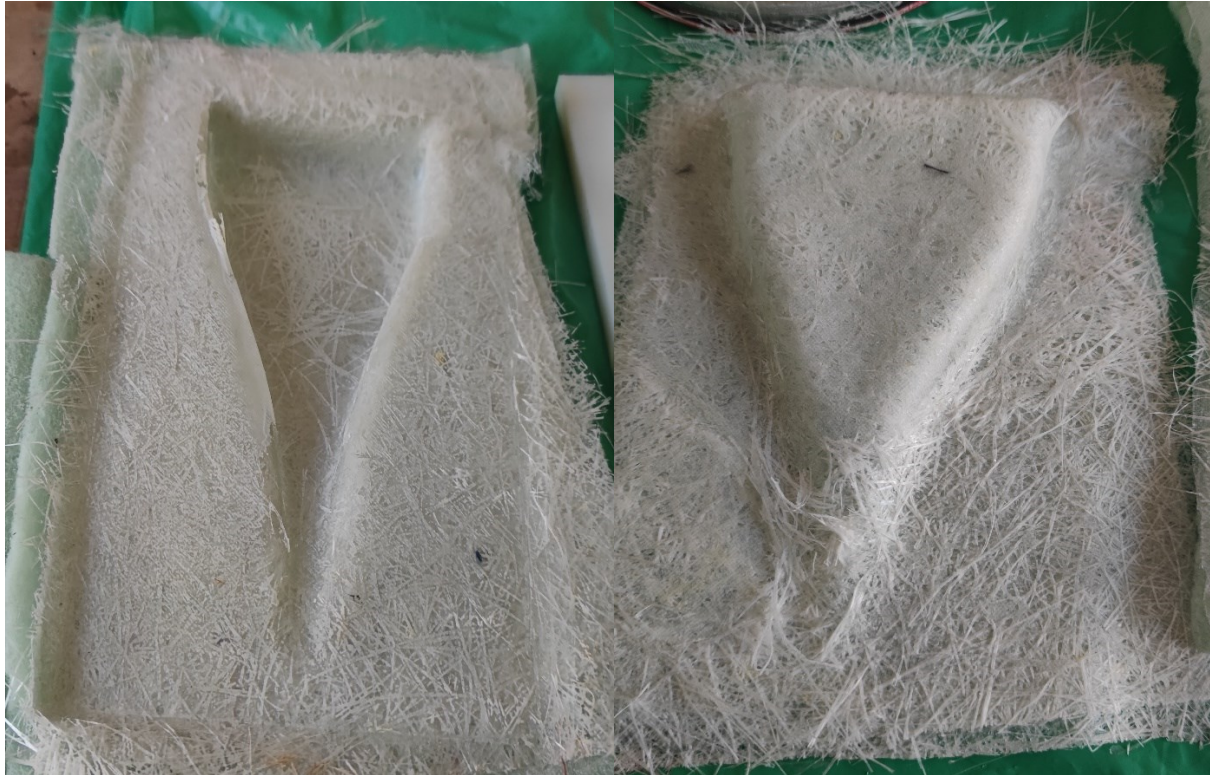
d)



e)

Slika 7.10. Postupak podtlačnog oblikovanja

Tako spojena podtlačna pumpa ostavljena je da radi još nekoliko sati (do početka geliranja kad više nije moguće raditi sa smolom) te je nakon toga isključena, a kompozitni materijal je ostavljen u tom okruženju jedan dan kako bi se smola umrežila. Tako izrađena predmetna tvorevina prikazana je na slici 7.11.



Slika 7.11. Kompozitna tvorevina prerađena postupkom podtlačnog oblikovanja ojačana staklenim vlaknima

Kompozitna tvorevina prerađena postupkom podtlačnog oblikovanja puno je točnijih dimenzija nego one prerađene postupkom ručnog laminiranja jer je podtlačnom pumpom istisnut sav nepotreban zrak. Površina koja je bila u kontaktu s kalupom je glatka, međutim na drugoj strani površine došlo je do problema jer se dio tkanine za upijanje smole zalijepio za staklena vlakna i prilikom odvajanja je dio vlakana ostao na tkanini pa je površina tvorevine ostala nekvalitetna, a debljina sloja nekonstantna. Ponovno su se na rubovima i kutovima pojavile pukotine ili mjesta smanjene debljine sloja.

Na istom kalupu postupkom podtlačnog oblikovanja prerađen je kompozitni materijal koji se sastoji od epoksidne smole i ugljičnih vlakana. Debljina jednog sloja vlakana iznosila je 0,4 mm te su za preradu pripremljena tri sloja ugljičnih vlakana, a epoksidno vezivo napravljeno je s 30 g epoksidne smole i 15 g umreživala. Koraci u postupku podtlačnog oblikovanja su identični kako je prethodno opisano, a slika 7.12 prikazuje proces istiskivanja zaostalog zraka podtlačnom pumpom. Isto kao i kod prethodnih prerada, smola je ostavljena jedan dan kako bi umrežila.



Slika 7.12. Istiskivanje zaostalog zraka u kompozitnom materijalu pomoću podtlačne pumpe

Posljednja prerada je jedina koja je napravljena pomoću negativnog oblika kalupa sa slike 7.6.b. Primijenjen je kompozitni materijal s tri sloja ugljičnih vlakana, 30 g epoksidne smole te 15 g umreživala. Postupak podtlačnog oblikovanja na tom kalupu prikazan je na slici 7.13.



a)



b)



c)

Slika 7.13. Postupak podtlačnog oblikovanja u preradi kompozitnog materijala ojačanog ugljičnim vlaknima

Jedno od najvećih ograničenja postupaka ručnog laminiranja te podtlačnog oblikovanja je postizanje samo jedne glatke površine, one koja je u kontaktu s kalupom. U slučaju proizvodnje *NACA* usisnika površina koja je estetski puno bitnija je udubljena površina, ona koja se vidi s vanjske strane vozila na kojem se nalazi *NACA* usisnik. Zbog toga je postupak prerade u kojem su ugljična vlakna položena na pozitivni oblik kalupa, tj. na vanjsku stranu kalupa, logičniji izbor. Tim načinom proizvedena je kompozitna tvorevina prikazana na slici 7.14. Vidljivo je kako je udubljena površina puno glatkija od izdubljene jer je bila u kontaktu s kalupom. Problem kod takvog načina prerade može se javiti kod polaganja vlakana na rubove i kutove, što je već pokazano kod primjene staklenih vlakana u prethodnim slučajevima. Potrebna su podebljanja rubova, a naročito kutova kako bi ti dijelovi nakon prerade ostali postojani, a s

druge strane ne smije se s podebljanjima pretjerati kako ti dijelovi ne bi bili više debljine nego ostali.

Iz tih razloga je napravljena prerada s ulaganjem vlakana u unutrašnju stranu kalupa (slika 7.13.a), a kompozitna tvorevina dobivena takvim pristupom prikazana je na slici 7.15. I kod ove prerade se pokazalo kako sami kutovi kalupa nisu bili dovoljno prekriveni ugljičnim vlaknima te su se također pojavila mjesta manje debljine materijala. Tako izrađena tvorevina mora proći naknadnu obradu kako bi se površina koja nije bila u kontaktu s kalupom zagladila i postigla puno bolja kvaliteta površine te se odstranio srh s krajeva. Vađenje tvorevine iz kalupa bilo je otežano u odnosu na prošle prerade zbog kontra kuta zadnje stranice usisnika.



Slika 7.14. Kompozitna tvorevina izrađena polaganjem ugljičnih vlakana na pozitivni oblik kalupa, tj. na vanjsku stranu kalupa



Slika 7.15. Kompozitna tvorevina izrađena ulaganjem ugljičnih vlakana u negativni oblik kalupa, tj. u unutarnju stranu kalupa

8. ZAKLJUČAK

Iako su prisutne brojne prednosti aditivne proizvodnje zbog kojih je ona danas važan dio industrije, u radu je pokazano kako su ipak prisutni neki nedostaci zbog kojih aditivna proizvodnja nije primjenjiva u velikoserijskoj proizvodnji.

Najveća prednost aditivne proizvodnje je skraćenje vremena izrade tvorevina, ponajviše u pogledu pripremnih procesa – izrada kalupa i jezgri te rukovanje njima prije same primjene. U tom smislu, postupak Polyjet pronalazi veliku primjenu u izradi kalupa jer u svega nekoliko sati omogućava kalup spreman za upotrebu. Kalupi izrađeni tim postupkom su visoke kvalitete bez prevelike potrebe za naknadnom obradom površine.

Nedostaci aditivne proizvodnje najviše se očituju u neisplativosti velikoserijske proizvodnje, troškovima postupaka te potrebom za naknadnom površinskom obradom. Velika početna ulaganja i potrebna stručnost u održavanju 3D pisača također su neki od elemenata koji opisuju aditivne postupke. Materijali koji se upotrebljavaju u postupcima aditivne proizvodnje i dalje su nedovoljno istraženi te su prisutne velike razlike u svojstvima pojedinog materijala. Kako bi se primjena aditivnih postupaka još više proširila, potrebna su dodatna istraživanja, testiranja i razvoj materijala.

U eksperimentalnom dijelu rada pokazano je kako je primjena aditivne proizvodnje za izradu kalupa i jezgri za preradu kompozitnih materijala itekako moguća, međutim, pokazani su i nedostaci takve proizvodnje u primjeni u realnim uvjetima. Troškovi proizvodnje su visoki, a svaka dodatna pogreška dodatno ih povećava. Potreba za naknadnom obradom je sveprisutna, ali maloserijska proizvodnja komplicirane geometrije je najveća prednost.

Prerada kompozitnih materijala postupcima ručnog laminiranja i podtlačnog oblikovanja pomoću kalupa izrađenih aditivnom proizvodnjom zahtijeva iznimnu sposobnost radnika i kod ručnog laminiranja teško je proizvesti tvorevine s malim udjelom smole i vlakana bez nastajanja pukotina što je djelomično otklonjeno podtlačnim oblikovanjem.

U daljnja istraživanja trebalo bi uključiti druge materijale za aditivne postupke, kao i druge postupke prerade kompozitnih materijala, te ustanoviti koliki broj tvorevina je moguće preraditi u kalupima načinjenim aditivnom proizvodnjom bez utjecaja na dimenzijsku stabilnost kompozitne tvorevine.

LITERATURA

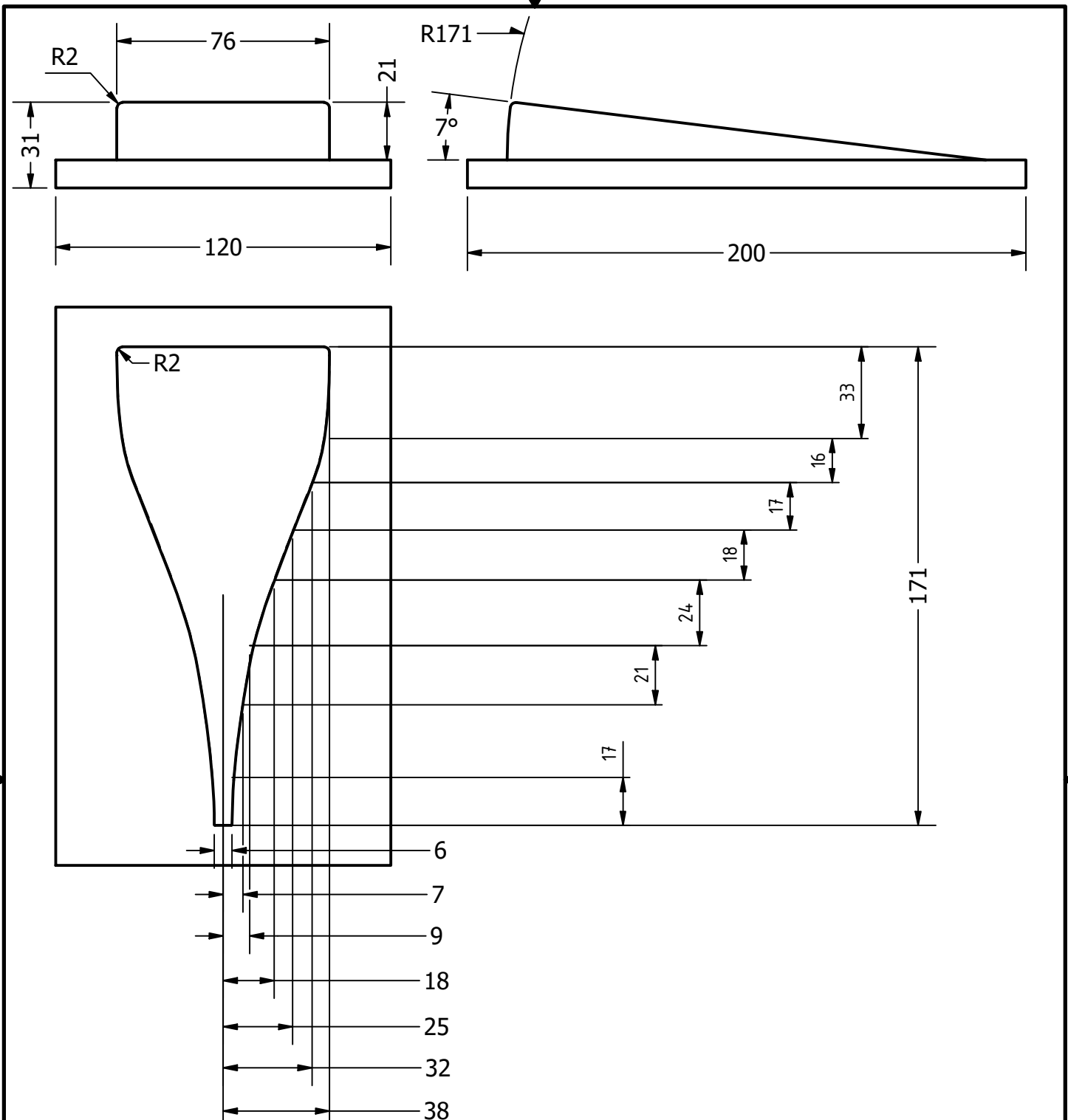
- [1] Devine, Declan M., *Polymer-Based Additive Manufacturing*, Springer, Cham, 2019.
- [2] Wohlers T., *Rapid prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry*, Wohlers Associates, INC, 2005.
- [3] <https://www.techexplorist.com/using-3d-printing-technique-produce-glass-objects/28021/>, 15.05.2022.
- [4] <https://manual.slic3r.org/expert-mode/variable-layer-height>, 15.05.2022.
- [5] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, New York, 2010.
- [6] Nazir A., Abate K.M., Kumar A., Jeng J.-Y., *A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures*, Springer, London, 2019.
- [7] Harshit K.D., Davim J.P., *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*, Springer, New York, 2021.
- [8] Dudek P., *FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements*, Archives of Metallurgy and Materials, 2013.
- [9] Qin Y., Qi Q., Scott P.J., Jiang X., *Status, comparison, and future of the representations of additive manufacturing data*, Computer-Aided Design, 2019.
- [10] Pilipović A., *Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa*, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [11] Singh R., Davim J.P., *Additive Manufacturing Applications and Innovations*, CRC Press, New York, 2018.
- [12] Redwood B., Schöffner F., Garret B., *The 3D Printing Handbook*, 3D Hubs, Amsterdam, 2017.
- [13] Allahverdi M., Danforth S.C., Jafari M., Safari A., *Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique*, Journal of the European Ceramic Society, 2001.
- [14] http://arkadditive.com/public/products/download_16287553801.pdf, 30.05.2022.
- [15] <https://www.stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>, 02.06.2022.

- [16] Buragohain M.K., *Composite Structures: Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*, Taylor & Francis, CRC Press, 2018.
- [17] <https://romeorim.com/what-are-composites/>, 02.06.2022.
- [18] https://www.researchgate.net/figure/11-Different-types-of-fiber-orientation-in-composites-a-unidirectional-b-random-c_fig10_267779397, 02.06.2022.
- [19] <https://www.composites.media/chomarat-carbon-fibre-babolat-tennis-racket/>, 05.06.2022.
- [20] <https://www.mubea.com/en/composite-components>, 05.06.2022.
- [21] <https://cen.acs.org/materials/inorganic-chemistry/s-fiberglass-does-delicate-material/96/i38>, 05.06.2022.
- [22] Mazumdar S., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Processs Engineering*, CRC Press, 2001.
- [23] Špoljar M., *Ispitivanje kompozitnih tvorevina za primjenu u automobilskoj industriji*, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [24] <https://www.facebook.com/bassonerboats/photos/pcb.3048412905487347/3048412292154075>, 10.06.2022.
- [25] <https://www.youtube.com/watch?v=HfrFaKDsJxc>, 12.06.2022.
- [26] Šercer M., Pilipović A., *Proizvodnja kompozitnih tvorevina*, predavanja 2014./2015., Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [27] <https://vacaero.com/information-resources/vac-aero-training/180484-vacuum-systems-for-composite-manufacturing.html>, 12.06.2022.
- [28] Goodship V., Middleton B., Cherrington R., *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality : Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing*, Elsevier, 2016.
- [29] <https://www.hubs.com/knowledge-base/3d-printing-low-run-injection-molds/>, 19.06.2022.
- [30] <https://www.stratasys.com/en/materials/materials-catalog/polyjet-materials/digital-abs-plus/>, 19.06.2022.
- [31] <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/democratizing-3d-printing-of-injection-molds>, 19.06.2022.

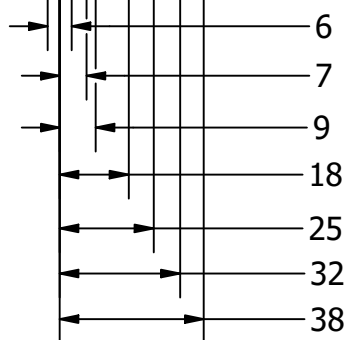
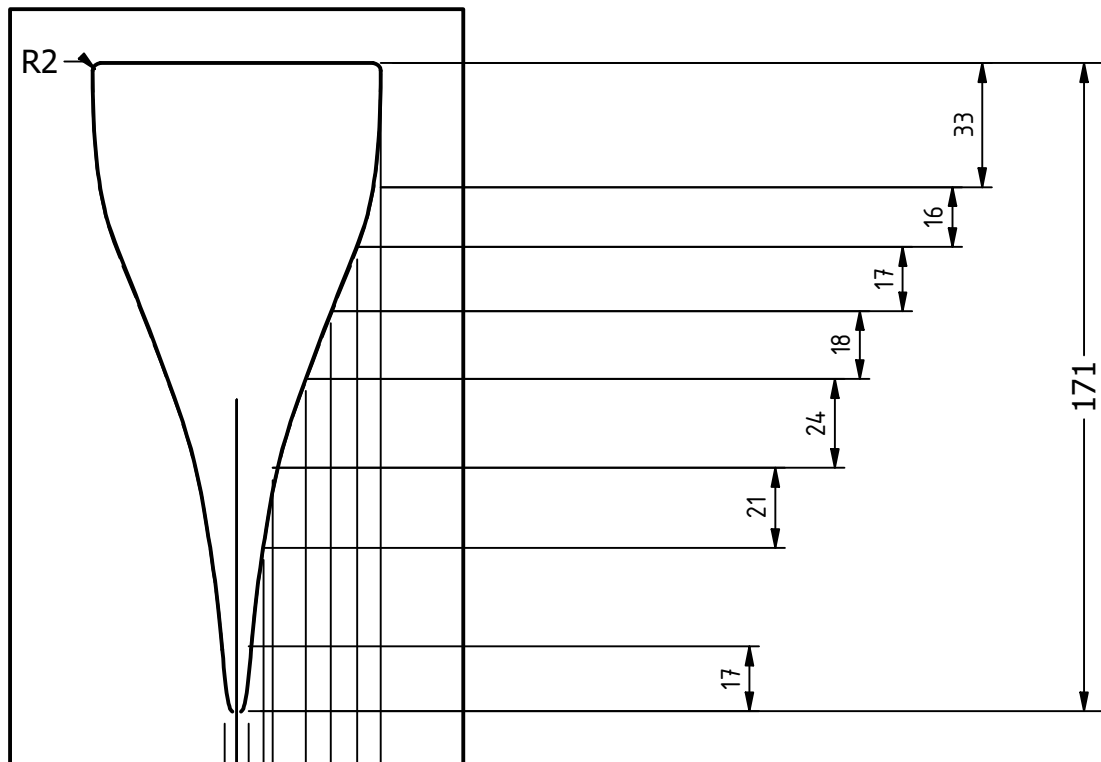
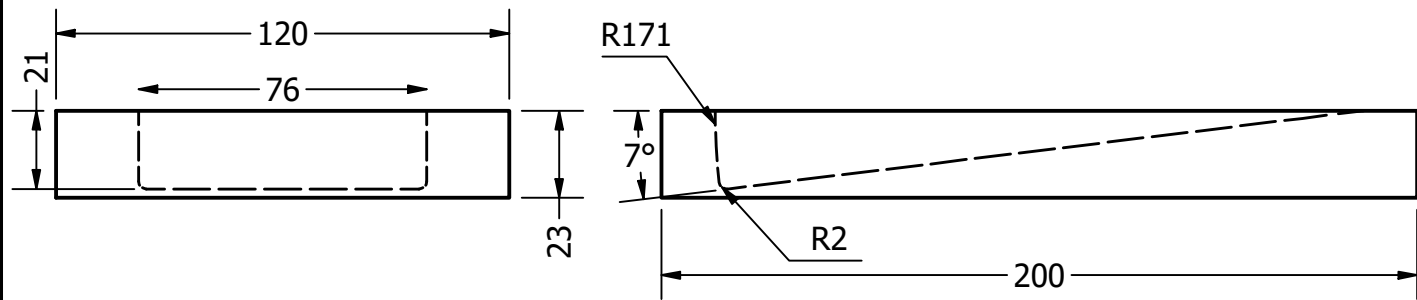
- [32] <https://all3dp.com/blow-molding-moulding-injection-extrusion-stretch/>, 21.06.2022.
- [33] <https://www.ptonline.com/blog/post/3d-printed-plastic-molds-k-exhibit-would-make-you-a-believer>, 22.06.2022.
- [34] <https://www.sys-uk.com/wp-content/uploads/2017/06/Design-Guide-FDM-for-Composite-Tooling-SYS.pdf>, 22.06.2022.
- [35] <https://www.stratasys.com/es/explore/blog/2015/porsche-3d-printing-soluble-cores>, 22.06.2022.
- [36] <https://prototypingsolutions.com/soluble-cores/>, 22.06.2022.
- [37] <https://competitionmotorsport.com/c3-carbon-porsche-991-2-gt2-rs-gt3-rs-front-naca-ducts>, 25.06.2022.
- [38] <http://www.kloner3d.com/kloner3d300h-en.html>, 26.06.2022.
- [39] <https://www.sculpteo.com/en/materials/polyjet-resin-material/verowhite-polyjet-resin-material/>, 29.06.2022.

PRILOZI

- I. Tehnička dokumentacija



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio				
Crtao	5.7.2022.	Josip Zvekić		
Pregledao	5.7.2022.	izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
Materijal:		Masa:		
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	POZITIVNI OBLIK KALUPA			Listova: 1
Crtež broj: JZ-001			List: 1	



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao				
Razradio				
Crtao	5.7.2022.	Josip Zvekic		
Pregledao	5.7.2022.	izv. prof. dr. sc. Ana Pilipovic		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				
			Kopija	
Materijal:			Masa:	
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	
	NEGATIVNI OBLIK KALUPA			
Crtež broj: JZ-002			List: 1	