

Aditivna proizvodnja polimernih kalupa

Tomašić, Vedran

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:098332>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vedran Tomašić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing. stroj.

Student:

Vedran Tomašić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović na velikoj pomoći ukazanoj prilikom izrade završnog rada te na nesebičnom dijeljenju vlastitog znanja i iskustva.

Od srca se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na velikom povjerenju i strpljenju tijekom studija te na neprestanoj i inspirativnoj podršci prilikom stjecanja akademskog obrazovanja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vedran Tomašić**

Mat. br.: 0035202613

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Aditivna proizvodnja polimernih kalupa**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Additive manufacturing of polymer moulds**

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 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 kapljevitih polimera, podtlasnog oblikovanja, preciznog lijevanja, oblikovanja kartona te silikonskih kalupa. U radu je potrebno također obraditi kalupe za ručno laminiranje kompozita, te jezgre za izradu šupljih kompozitnih tvorevina koje su načinjene aditivnim postupcima.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

Ana Pilipović
doc. dr. sc. Ana Pilipović

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. – 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY.....	II
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA I OZNAKA.....	VI
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA.....	2
2.1. Osnovni principi aditivne proizvodnje.....	2
2.2. Konkurentnost aditivne proizvodnje prema klasičnim postupcima.....	3
3. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE (e. <i>fused deposition modeling</i>).....	5
3.1. Tijek postupka.....	6
3.2. Materijali primjenjivi u FDM postupku.....	7
3.2.1. Standardni materijali.....	8
3.2.2. Materijali s posebnom namjenom.....	8
3.2.3. <i>Pametni</i> materijali.....	10
3.2.4. Materijali tvrtke <i>Stratasys</i>	11
3.3. Svojstva površine dobivene postupkom FDM	12
4. ISPISIVANJE MLAZOM FOTOPOLIMERA – POLYJET.....	15
4.1. Tijek postupka.....	15
4.2. Materijali koji se primjenjuju za postupak Polyjet.....	16
5. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH TVOREVINA.....	18
5.1. Kompozitni materijali.....	18
5.2. Struktura kompozita.....	18
5.2.1. Zadaća matrice i ojačavala.....	19
5.3. Proizvodnja kompozita.....	20
5.4. Postupak ručnog laminiranja.....	22
5.4.1. <i>Near - net - shape</i> proizvodi.....	23
5.5. Podtlačno oblikovanje.....	25
5.5.1. Prednosti i nedostaci podtlačnog oblikovanja.....	27
5.6. Općenito o kalupima.....	27

5.6.1. Kalupi i materijali za ručno laminiranje i podtlačno oblikovanje.....	28
6. ADITIVNA PROIZVODNJA KALUPA ZA PRERADU KOMPOZITA...	30
6.1. Aditivna proizvodnja kalupa namijenjenih za postupak ručnog laminiranja kompozita.....	30
6.2. Materijali za izradu kalupa za preradu kompozita kod postupka taložnog očvršćivanja.....	31
6.3. Konstrukcija kalupa.....	33
6.4. Primjena aditivne proizvodnje za izradu taljivih jezgri.....	34
6.4.1. Izrada taljive jezgre.....	35
7. ADITIVNA PROIZVODNJA U IZRADI KALUPA KOD OSTALIH POSTUPAKA PRERADE POLIMERA.....	37
7.1. Injekcijsko prešanje.....	37
7.2. Injekcijsko puhanje.....	40
7.3. Prerada papira u kalupima načinjenim aditivnom proizvodnjom...	42
8. ZAKLJUČAK.....	44
9. LITERATURA.....	46

SAŽETAK

Svjedoci smo izrazito brzih promjena trendova na svim poljima ljudskog djelovanja pa tako i u industriji i gospodarstvu općenito. Brojni timovi visokokvalificiranih ljudi svakodnevno rade na pronalasku konkretnih i primjenjivih rješenja vezanih uz postupke konstruiranja proizvoda i planiranja ukupnog postupka proizvodnje. Pojavom aditivnih postupaka otvara se jedno potpuno novo područje, izrazito velikih mogućnosti i potencijalnih poboljšanja poslovanja velikog broja tvrtki.

Aditivna proizvodnja pojavljuje se 1980-tih godina i danas omogućuje uz brzu izradu prototipova i gotovih tvorevina iz pretežito polimernih materijala i izradu metalnih tvorevina. Zamah je dobila zbog jednostavnosti postupaka i mogućnosti izrade proizvoda svih geometrijskih oblika i složenosti u relativno kratkom vremenu proizvodnje.

S obzirom na to da je jedna od najvećih prepreka primjeni aditivne proizvodnje upravo materijal, ovaj će rad biti primarno usmjeren baš na materijale koji se primjenjuju u nekim od aditivnih postupaka s time da će također biti obrađeni i neki od materijala koji se primjenjuju za izradu kalupa primjenom AM kao i neki materijali koji se upotrebljavaju za izradu proizvoda u takvim kalupima. U radu će se istražiti samo dva postupka aditivne proizvodnje koji se mogu primijeniti u izradi kalupa; postupak taložnog očvršćivanja i Polyjet iz razloga što su oni najčešći i najbolje istraženi do sada. Obraditi će se postupci prerade kompozita i polimera u takvim kalupima – izrađenim aditivnim postupcima, uz jasan prikaz prednosti takvih kalupa.

Također će se pokušati objasniti temeljne razlike između strojne obrade i izrade kalupa i aditivne izrade kalupa, izazovi s time povezani te prednosti i nedostaci obiju varijanti.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, kalupi, kompoziti, Polyjet, taložno očvršćivanje

SUMMARY

We are witnessing extremely rapid changes in trends in all fields of human activity, including in industry and the economy in general. Numerous teams of highly skilled people work every day to find concrete and applicable solutions related to product design postupaks and planning of the overall production postupaks. Development of additive technologies is opening up a whole new area, with enormous opportunities and potential business improvements for a large number of companies.

Additive manufacturing emerged in the 1980s and today allows rapid part production of predominantly polymeric materials, but also production of metal products is becoming more prevalent. It gained momentum because of the simplicity of the procedures and the ability to produce products of all geometric shapes and complexity in short time.

Considering that one of the biggest obstacles to the use of additive technology is the material itself, so this paper will focus primarily on materials used in some of the additive processes, with some of the materials used for mould making as well.

It will also attempt to explain the fundamental differences between machining of the mould and additive mould making, the challenges involved, and the advantages and disadvantages of both variants.

Key words: additive manufacturing, composites, fused deposition modeling, moulds, Polyjet, polymers

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Kvaliteta proizvoda u odnosu na visinu i širinu sloja materijala te vremena izrade [2].....	3
Slika 3.1. Primjeri različitih složenih geometrija izrađenih AM postupcima (a,b,c) [4].	5
Slika 3.2. Shema tijeka FDM [5].....	6
Slika 3.3. Oprema potrebna za FDM postupak [5].....	7
Slika 3.4. Shema FDC postupka [5].....	9
Slika 3.5 Primjena 4D tehnologije [5].....	10
Slika 3.6 Primjeri proizvoda dobivenih FDM-om: ABS-ESD7, PA 6, PA 12, ABS: a) kućište, b) držač, c) češalj, d) žmigavac [6].....	11
Slika 3.7 STL model: a) efekt stepenica, b) mreža trokuta u STL datoteci [2].....	12
Slika 3.8 Pojava poroznosti u izratku [7].....	13
Slika 3.9 Poboljšanje kvalitete površine (postpostupaki/predpostupaki).....	14
Slika 4.1. Postupak polyjet [3].....	15
Slika 4.2. Primjeri proizvoda načinjenih Polyjet postupkom a), b) MED materijal; c) VERO materijal; d) VEROFLEX [10, 11].....	16
Slika 5.1 Nastanak kompozita [12].....	19
Slika 5.2 Vrsta kompozitnog materijala prema orijentaciji vlakana [5].....	19
Slika 5.3. Postupci obrade kompozita [12, 13].....	21
Slika 5.4 Shematski prikaz ručnog laminiranja [12].....	22
Slika 5.5 Razni kompozitni tvorevine korišteni u konstruiranju borbenog zrakoplova [12].....	24
Slika 5.6 Razni kompozitni tvorevine konstrukcije satelita [12].....	24
Slika 5.7 Ulagivanje kompozitnog materijala u kalup [14].....	25

Slika 5.8 Konačni umreženi proizvod [15].....	25
Slika 5.9 Shematski prikaz postupka podtlačnog oblikovanja [12].....	26
Slika 5.10 Pripremak sa svim slojevima, spreman za ulazak u autoklav [12].....	27
Slika 5.11 a) postupak ručnog laminiranja; b) proizvod izrađen postupkom ručnog laminiranja; c) kalup za ručno laminiranje [12].....	29
Slika 6.1 Primjeri kalupa izrađenih FDM postupkom [13].....	31
Slika 6.2 Kalupi načinjeni postupkom FDM: a) Kalup sa šupljom unutrašnjosti; b) školjkasti kalup [18].....	33
Slika 6.3 Cijevi ispušnog sustava izrađene pomoću taljivih jezgri iz kompozitnog materijala epoksidna smola/ugljična vlakna [19].....	34.
Slika 6.4 Cijevi ispušnog sustava u motoru <i>Porsche</i> vozila [17].....	35
Slika 7.1. Usporedba obradaka izrađenih u kalupu konstruiranom klasičnim postupcima i u kalupu izrađenom 3D printerom [20].....	37
Slika 7.2 Kalup izrađen postupkom PolyJet za postupak injekcijskog prešanja.....	38
Slika 7.3 Primjer kalupa načinjenog za injekcijsko prešanje iz kompozita ABS + ugljične nanocjevčice [24].....	40
Slika 7.4 Postupak injekcijskog upuhivanja boca [25].....	41
Slika 7.5 Kalup za injekcijsko puhanje, izrađen 3D ispisom iz digitalnog ABS-a [19].....	41
Slika 7.6 Primjer kalupa izrađenog aditivnom proizvodnjom iz materijala ABS M30[17].....	42

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Klasifikacija ABS- a [1].....	8
Tablica 6.1. Podjela materijala kod postupka FDM za proizvodnju kalupa [18].....	32
Tablica 7.1 Mehanička svojstva digitalnog ABS-a [19].....	38

POPIS OZNAKA I KRATICA

ABS - akrilonitril/butadien/stiren

PS – polistiren

PA – poliamid

PC – polikarbonat

PP – polipropilen

PE – polietilen

PCL – polikaprolakton

FDC – taložno očvršćivanje keramike (e. *fused deposition of ceramics*)

SMP – polimeri koji pamte prvotni oblik (e. *shape memory polymers*)

α , K^{-1} - koeficijent toplinskog rastezanja

ASA – akrilonitril/stiren/akrilat

ABS - polietieramid

1. UVOD

Ulaskom u novu eru industrije te sagledavanjem proizvodnje iz drugačije perspektive no što je to bilo uobičajeno, javlja se potreba za velikim zaokretom u dotadašnjoj tehnologiji izrade proizvoda i njihovim razvojnim ciklusima. Izazov je proizašao iz rastućeg trenda ljudskog utjecaja u konstruiranju proizvoda, takozvanoj masovnoj kostumizaciji, slabe proizvodnosti, male mogućnosti za fleksibilnošću ciklusa, skupoće prenamjene i preraspodjele sredstava i čitavog sustava te rastom konkurentnosti. Aditivna proizvodnja omogućila je veliki odmak od velikog dijela ograničavajućih faktora no i dalje postoji problem malog broja materijala koji se mogu primjenjivati kao i male produktivnosti i fleksibilnosti samih postupaka.

Dodatnim proširenjem aditivne proizvodnje tvorevina u aditivnu proizvodnju kalupa i alata odrađen je prvi korak ka neograničenim mogućnostima proizvodnje. Također je to bio dodatan poticaj za nekonvencionalnim pristupom preradi kalupa, a koji će i biti fokus ovog rada. Bit će opisani postupci prerade polimernih kalupa aditivnim postupcima, a pogotovo kalupi za izradu kompozitnih tvorevina te će stoga u radu biti opisani samo oni AM postupci koji omogućuju izradu takvih kalupa, ali i postupci prerade kompozita u kojima bi se eventualno takvi kalupi mogli upotrijebiti. Takva je proizvodnja omogućila raznovrsnost materijala, veću proizvodnost i dobru kvalitetu tvorevina. Povećanjem manevarskog prostora u postupku konstrukcije proizvoda razina fleksibilnosti je višestruko bolja, razvojni ciklus proizvoda je pojednostavljen, vrijeme izrade je skraćeno, a troškovi su neizbježno smanjeni. Također valja napomenuti i izradu proizvoda prije planiranog vremena, no kao najveću prednost treba izdvojiti mogućnost potpuno personalizirane konstrukcije kalupa i na taj način stvoriti proizvod koji i u najmanjoj sitnici odgovara zahtjevu naručitelja, to jest kupca.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

2.1. Osnovni principi aditivne proizvodnje

Aditivna proizvodnja, tadašnja brza izrada prototipova, 1980-ih godina imala je skromnu ulogu u razvoju tvorevina no danas se profilirala u važnu granu industrije. S obzirom na to da aditivna proizvodnja jedina može zadovoljiti sve navedene zahtjeve moderne proizvodnje, ubrzo se profilira kao glavni smjer kretanja tvrtki koje žele konkurirati na tržištu razvoja proizvoda. Princip aditivne proizvodnje, poopćen i pojednostavljen, zasniva se ustvari na nekoliko temeljnih ideja. Jedna od njih je poticanje da se izbací kompleksan kriterij geometrije iz proračuna, smanjujući time vrijeme razvoja proizvoda, eliminirajući troškove konstruiranja steznih naprava, potporne strukture i slično. Izradom 3D modela željenog dijela u nekom od CAD računalnih programa, dano je dovoljno podataka da se obradak izradi nekim od aditivnih postupaka. [1]

Proizvod se izrađuje sloj po sloj, s tim da će izrađena tvorevina biti to kvalitetnija i sličnija 3D modelu što su ti slojevi tanji kako to i slika 2.1. pokazuje. Razliku će činiti način stvaranja slojeva, materijal koji se primjenjuje, spajanje slojeva, svojstva i karakteristike materijala te je, ukoliko se želi postići kvaliteta, izrazito bitno pažljivo vagnuti prednosti i nedostatke jednog ili nekog drugog postupka. [1]



Slika 2.1. Kvaliteta proizvoda i vrijeme izrade u odnosu na visinu sloja i broj kontura [2]

2.2. Konkurentnost aditivne proizvodnje prema klasičnim postupcima

Da aditivni postupci konkuriraju klasičnim proizvodnim postupcima razvidno je iz činjenice da tvorevine koji su proizvedeni na taj način zadovoljavaju kriterije oblika, tolerancija i funkcije. Geometrija i svrha konstrukcije obuhvaćene su kriterijem oblika, dok je napredak u točnosti izrade omogućio izradu u zadanim tolerancijama koji su spremni za montažu. Poboljšanjem svojstava materijala, postaje smisleno testirati dijelove u uvjetima kakvi vladaju u radnoj okolini te time dobivaju i svoju funkcionalnost. Ipak, valja naglasiti da i uz sve prednosti, ovakav način proizvodnje ima smisla jedino u maloserijskoj proizvodnji, s obzirom na to da se tvorevine proizvode puno sporije nego je to slučaj za, primjerice, injekcijsko prešanje. [1]

Radi boljeg razumijevanja aditivnih postupaka, teorijski opisane principe potrebno je potkrijepiti praktičnim načinima njezine primjene, odnosno pojednostavljenim

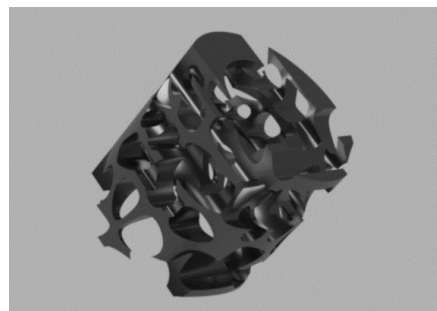
pojašnjenjima nekih od postupaka koji imaju svoju konkretnu praktičnu primjenu u industriji. Jedan od takvih postupaka je FDM, to jest taložno očvršćivanje (e. *fused deposition modeling*)

3. TALOŽNO OČVRŠĆIVANJE (*e. fused deposition modeling*)

Aditivna proizvodnja, kao i 3D tiskanje, razvija se 1980.-ih godina, a njihova šira upotreba kreće devedesetih godina. 1991. pojavljuje se FDM postupak kojeg razvija tvrtka *Stratasys*, a nakon toga i druge tvrtke također razvijaju svoje inačice postupka taloženja plastomernih materijala. FDM je postupak koji pretežno proizvodi dijelove od polimernih materijala, dimenzijski i oblikom stabilnih, uz naglasak na orijentaciji na želje kupca. Primjenu nalazi u velikom broju industrija, a samo neki od primjera su automobilska, zrakoplovna, medicina, obrana, zabavna industrija, proizvodnja roba široke potrošnje i slično. Nadalje, ovakva 3D proizvodnja sa sobom nosi revoluciju u dijelu problematike vezane za nemogućnost izrade vrlo složenih proizvoda. Naime, jednostavnost prikazivanja 3D modela pomoću 2D elemenata omogućuje praktički neograničenu izradu s obzirom na to da ukoliko se proizvod gradi sloj po sloj ne postoje ograničenja u vidu šupljina u unutrašnjosti, kompliciranih detalja, debljina stijenki i slično. Slika 3.1 prikazuje upravo to da su mogućnosti ovakvog postupka, što se tiče geometrije završnih proizvoda, praktički neograničene i da je moguće izraditi, primjerice, složen presjek građevine s jasnim detaljima bez da postupak izrade nužno mora biti skup ili prekomplikiran (slika 3.1 c). [1,3]



(a)



(b)

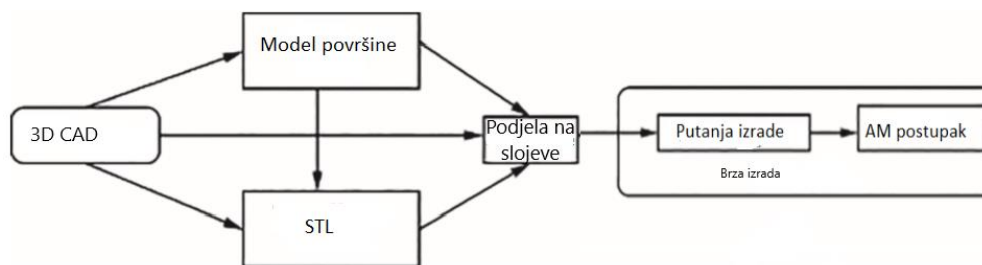


(c)

Slika 3.1. Primjeri različitih složenih geometrija izrađenih AM postupcima (a,b,c) [4]

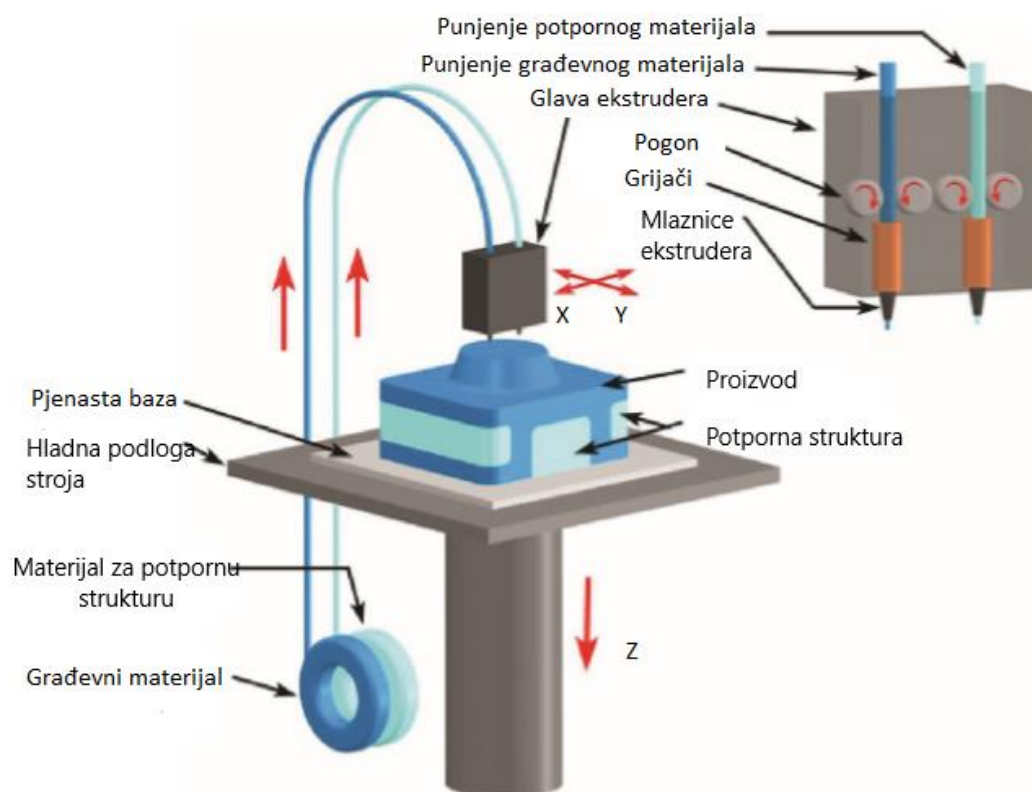
3.1. Tijek postupka

Postupak je sam po sebi prilično jednostavan, a sastoji se od 3 osnovna dijela – postupak prije same proizvodnje, proizvodnja i postupak neposredno nakon proizvodnje dijela. Na slici 3.2 prikazana je shema postupka FDM i redoslijed operacija od 3D CAD modela pa do AM postupka. Prvi je korak izrada CAD modela na kojoj se označuju točne dimenzije. Nakon toga se 3D CAD model „reže“ (e. *slice*) na tanke slojeve (slično integriranju krivulje) gdje svaki od njih predstavlja jednu „građevnu jedinicu“ u postupku izrade modela. Nadalje, model se prebacuje u STL ili AMF datoteku i model je nakon toga spreman za izradu. [5]



Slika 3.2. Shema tijeka FDM [5]

Materijal koji se nalazi najčešće u obliku žice, putuje prema glavi pisača, ovdje se tali i započinje izradu modela. Glava printera kreće se u X i Y smjeru osi (slika 3.3), a nakon što se jedan sloj izradi, on se skrućuje te se baza uređaja pomiče u smjeru Z za debljinu izrađenog sloja. Taj je pomak izrazito mali i iznosi najčešće između 0,1 – 0,3 mm, ovisno o parametrima koje smo zadali na početku izrade i promjeru mlaznice ekstrudera. [3, 5]



Slika 3.3. Oprema potrebna za FDM postupak [5]

Prilikom izrade modela, ponekad se primijenjuju 2 vrste materijala, od kojih je jedan zaslužan za izradu same tvorevine, a drugi za izradu potrebne potpore strukture kako se model, dok još nije stvrdnut do kraja, ne bi vitoperio ili nakrivio. Nakon što se tvorevina izradi po potrebi se uklanja materijal potpore strukture te se površina eventualno dodatno obrađuje brušenjem ili poliranjem. [1]

3.2. Materijali primjenjivi u postupku FDM

Kvaliteta izradaka presudan je čimbenik u svakom segmentu industrije pogotovo ako se uzme u obzir i zahtjev za što manjom naknadnom obradom s ciljem što manjih dodatnih troškova. Iz tog se razloga posebna pažnja pridaje izboru materijala koji moraju biti točno određenih svojstava kako bi ostvarili širu komercijalnu upotrebu. Važno je da se poznaju sva svojstva kako bi moguće nesigurnosti vezane uz ponašanje samog materijala u realnim uvjetima bile svedene na minimum. Prije svega materijal mora imati dovoljnu krutost i čvrstoću da bi i izraci bili takvi kada ih printer izradi. Također, mora biti postojan

pri različitim okolišnim uvjetima, regulirane moguće zapaljivosti i slično. Gruba podjela materijala za primjenu u aditivnoj proizvodnji sastoji se od standardnih materijala, materijala s posebnom namjenom i takozvanih naprednih materijala. [5]

3.2.1. Standardni materijali

Standardni materijali koji se upotrebljavaju u taložnom očvršćivanju za izratke su akrilonitril/butadien/stiren (ABS), polistiren (PS), poliamid (PA), polikarbonati (PC), polipropilen (PP), polietilen (PE) i mnogi drugi. Njihova je primjena toliko ukorijenjena u ovom postupku zbog činjenice da pružaju izrazito visoku čvrstoću i postojanost na temperaturu, dok je ABS dodatno u primjeni zbog toga što daje izrazito dobre završne proizvode s mogućnošću izrade vrlo sitnih detalja. [5]

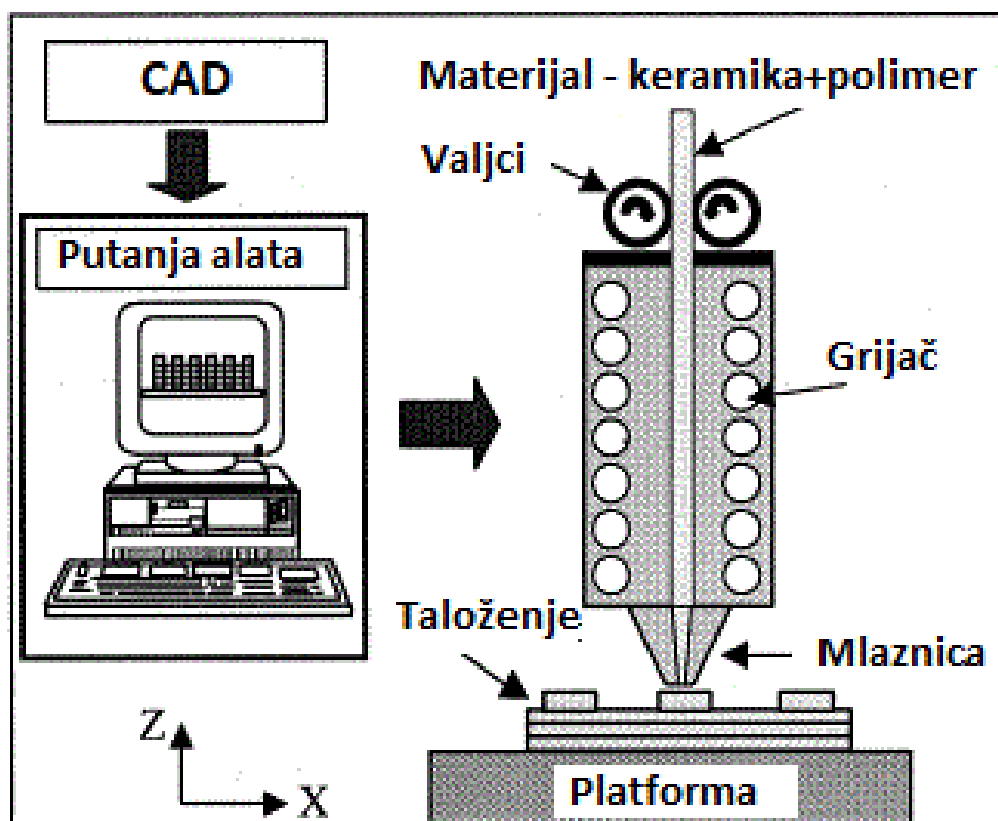
Tablica 3.1. Materijali koji se upotrebljavaju u FDM-u [5]

Redni broj	Materijal	Klasifikacija
1	Akrilonitril/butadien/stiren	ABS plus
2	Akrilonitril/butadien/stiren	ABS - M30
3	Akrilonitril/butadien/stiren	ABS - M30i
4	Akrilonitril/butadien/stiren	ABSi
5	Akrilonitril/butadien/stiren	ABS - ESD7
6	Poliamid	PA6
7	Poliamid	PA12
8	Poliamid	PA12 (CF)
9	Polikarbonat akrilonitril/butadien/stiren	PC ABS
10	Polikarbonat	PC
11	Polikarbonat	PC - ISO
12	Polifenilsulfon	PPSF/PPSU
13	PEI	ULTEM 1010

3.2.2. Materijali s posebnom namjenom

U nastojanju i želji da proizvodni postupci budu bolji, brži i kvalitetniji, konstantno se radi na unapređenju pojedinih komponenti postupaka, a to se posebno odnosi na materijale. Zbog toga se osim navedenih standardnih materijala, veliki naponi ulažu u

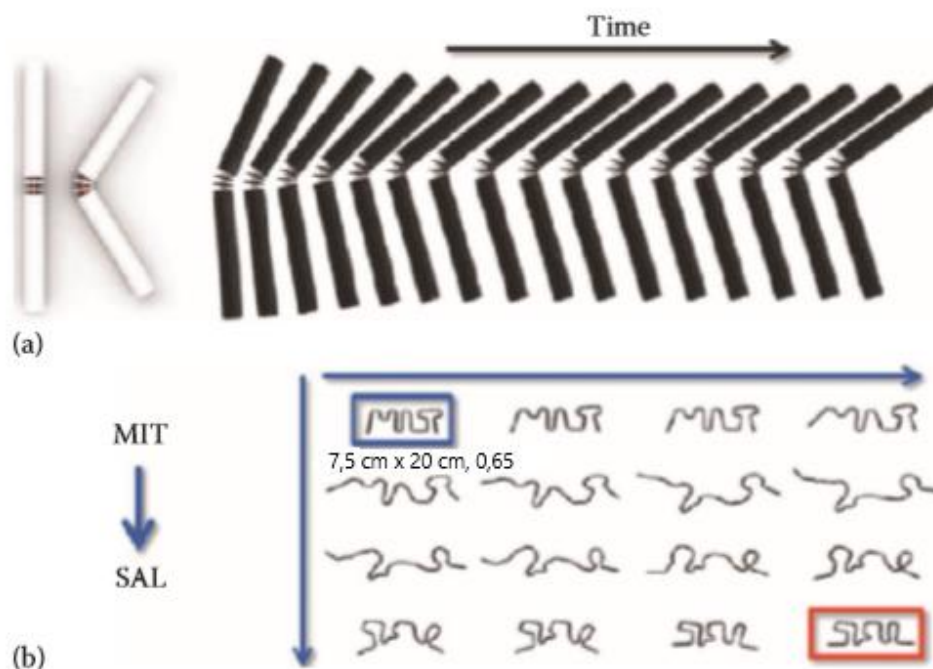
prilagođavanje materijala karakterističnijih za neke druge, klasične, postupke proizvodnje. Ovdje se misli na metale i kompozite, koji u određenim okolnostima mogu biti upotrebljavani i u postupcima poput FDM-a. Uglavnom je to u obliku kompozitnih materijala pa se tako u ovoj primjeni mogu pronaći kombinacija metala i voska, metala i poliamida, nehrđajućeg čelika, metali u kombinaciji s ABS-om, ali i materijali poput stakla, hidroksiapatita, aluminijevog oksida, silicijevog nitrata i sličnih. Nabrojani kompoziti postoje tek teoretski i za širu upotrebu vrlo vjerojatno neće biti dostupni još neko vrijeme. Ipak, postoji posebna varijanta FDM-a, koja upotrebljava keramiku za izradu slojeva. Postupak taložnog očvršćivanja keramike (e. *fused deposition of ceramics* - FDC) radi na sličnom principu kao FDM koji je shematski prikazan slikom 3.4, uz razliku u tome da se u toj varijanti kao materijal primjenjuje keramika. [5]



Slika 3.4. Shema FDC postupka [5]

3.2.3. Pametni materijali

Razvoj pametnih materijala potaknuo je dodavanje četvrte dimenzije u 3D postupke, dimenziju vremena. Točnije, to su materijali koji posjeduju mogućnost promjene svojstava ili oblika i to direktno na radnoj podlozi stroja za izradu tvorevine. Ta se transformacija događa nakon izlaganja materijala nekom od stimulansa kao što su tlak, voda, toplina, svjetlost i slično. Takvi su materijali najčešće polimeri koji pamte svoj prvotni oblik (SMP) te se oporavljaju nakon naprezanja (opterećenja) koje se može dogoditi ili poprečno ili uzdužno. Naime, polimeri takvih svojstava omogućuju lakšu i jednostavniju proizvodnju, nego li je to slučaj s metalima koji pamte prvotni oblik i stoga su polimeri češće u upotrebi. No ipak, njihovoj se primjeni rijetko pribjegava zbog nepovoljnijeg omjera cijena/prednost te su ograničeni na određene specijalne primjene, barem što se tiče aditivne proizvodnje. [5]



Slika 3.5 Primjena 4D tehnologije [5]

3.2.4. Materijali – Stratasys

Do sada je dana gruba podjela materijala koji se upotrebljavaju u postupku FDM, a u nastavku teksta bit će detaljnije opisani uz primjere. Materijal ABS je dostupan u nekoliko varijanti te stoga postoji raznovrsnost gotovih proizvoda izrađenih iz ABS-a. Primjeri proizvoda sa slike 3.6 (a, b, c, d) samo su neki od brojnih mogućih, poput žmigavca automobila ili mopeda, češlja i sličih. Nadalje, zbog svoje prozirnosti ABSi se primjenjuje u automobilskoj industriji za proizvodnju svjetala, ABS-ESD7 se primjenjuje za izradu kućišta elektroničkih komponenti te raznih drugih komponenti u industriji (slika 3.6 - a). Aditivna proizvodnja svoju primjenu nalazi i u medicini gdje se najčešće primjenjuje materijal ABS-M30i zbog svoje biokompatibilnosti i mogućnosti sterilizacije. U medicini je poznat materijal polikaprolakton (PCL) koji je zanimljiv baš zbog mogućnosti izrade prostetičkih pomagala kod većih tjelesnih oštećenja. Postupak je nov i u razvoju pa se dalje neće spominjati i opisivati. Nadalje, važnim se pokazao i poliamid, posebice verzije PA 6, PA 12 i PA 12 CF (s ugljičnim vlaknima). Poliamid 6 se zbog svojih izrazito povoljnih mehaničkih svojstava, visoke čvrstoće i krutosti primjenjuje za izradu različitih okvira i potpornih sustava (slika 3.7 - b), poliamid 12 za kućišta, a poliamid ojačan ugljičnim vlaknima zbog svoje izrazito visoke čvrstoće u odnosu na masu primjenjuje se za alate i druge dijelove. [1]



a)



b)



c)

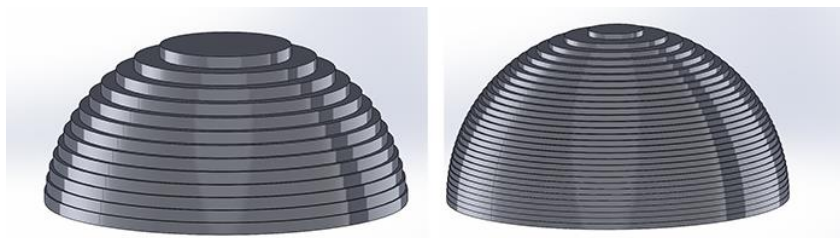


d)

Slika 3.6. Primjeri proizvoda dobivenih FDM-om: ABS-ESD7, PA 6, PA 12, ABS: a) kućište, b) držač, c) češalj, d) žmigavac [6]

3.3. Svojstva površine dobivene postupkom FDM

Površina tvorevine proizvedenog FDM -om jedan je od nedostataka ovog postupka jer je potrebno mnogo optimiranja parametara kako bi ona bila zadovoljavajuće kvalitete. Problem leži u činjenici da već prilikom prebacivanja CAD modela u oblik razumljiv uređaju za 3D izradu dolazi do kompenzacije koja je na štetu dimenzijskoj postojanosti modela.



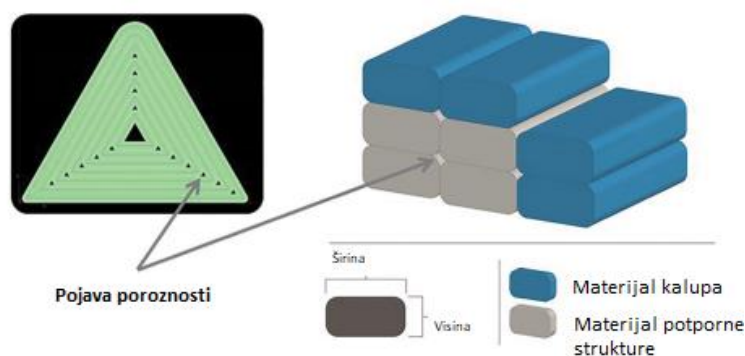
(a)



(b)

Slika 3.7 STL model: a) efekt stepenica, b) mreža trokuta u STL datoteci [2]

Naime, u 3D uređaj se ubacuje model u STL (standardni triangulacijski jezik, *e. standard triangulation language*) datoteci (slika 3.7), koji ustvari pretvara model iz CAD-a u metodu konačnih elemenata te aproksimira geometriju dijela infinitezimalnim trokutima. Međutim, ako se za primjer uzme model koji ima oblik kugle i prebaci ga u STL datoteku, vidi se odstupanje u dimenzijama do kojeg dolazi zbog zaobljenosti kugline površine (slika 3.7 a) Za manje modele odstupanje će biti pozitivno, a kod većih će u većini slučajeva doći do skupljanja i odstupanje će biti negativno. Problem bi se teoretski mogao riješiti povećanjem ili smanjenjem izradbenih dimenzija prilikom konstruiranja, ali bi to za sobom vuklo složenost izračuna takvog povećanja, odnosno smanjenja, a isto tako bile bi potrebne opsežne operacije nakon izrade. Nadalje, konverzija u STL datoteku nije jedini faktor koji uzrokuje površinu slabije kvalitete. Sam postupak izrade sloj po sloj rastaljenog materijala uzrokuje takozvani „efekt stepenica“, također zbog nemogućnosti izrade zaobljenih površina. Uz pojavu efekta stepenica dolazi i do poroznosti uslijed izrade unutrašnjeg dijela pojedinog sloja materijala (slika 3.8) [3, 5]



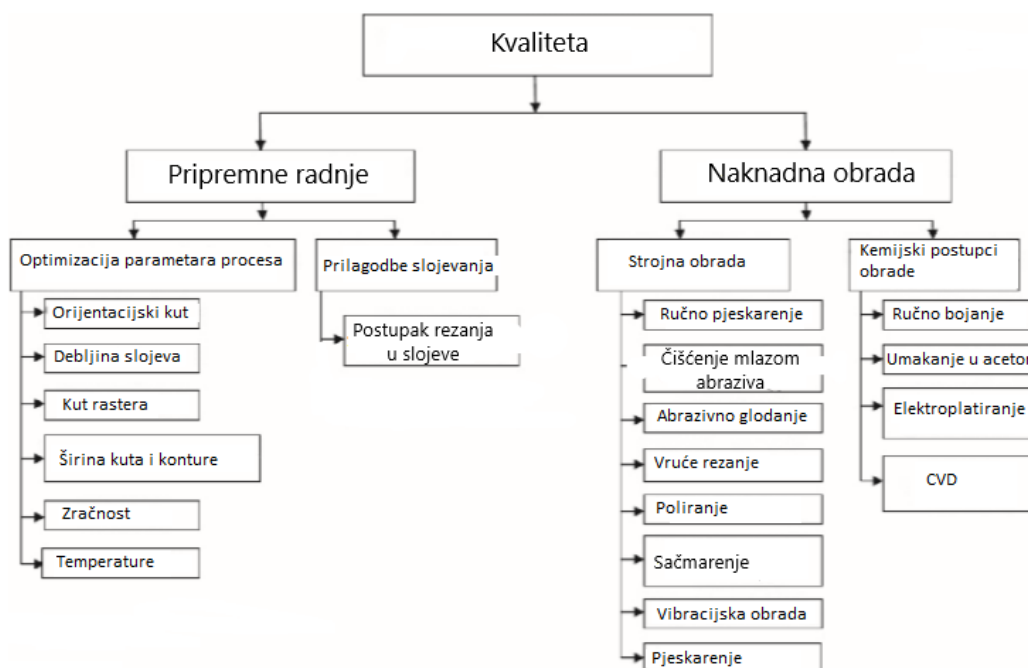
Slika broj 3.8 Pojava poroznosti u izratku [7]

Umanjivanje utjecaja poroznosti rješava se u posljednoj fazi obrade i to sa slojem brtvenog materijala koji ima zadaću zatvoriti rupe u izratku. Tu su još i greške izazvane ulaznim, odnosno izlaznim parametrima postupaka, oštećenje koje ostaju na modelu prilikom uklanjanja potporne strukture i slično. Često se javljaju problemi sa lijepljenjem sloja na sloj, prazninama koje zaostaju u modelu zbog prekida toka materijala, greške i pregrijavanje mlaznice, naglo zagrijavanje radne podloge, zastoje i začepljenje mlaznice ekstrudera i mnogi drugi. [1, 5, 8]

Dakle, kvalitetu površine određuje nekoliko ključnih faktora:

- efekt stepenica
- poroznost
- preciznost uređaja
- skupljanje i zaostala naprezanja u materijalu
- tijek materijala
- oštećenja zaostala nakon skidanja potpornih struktura

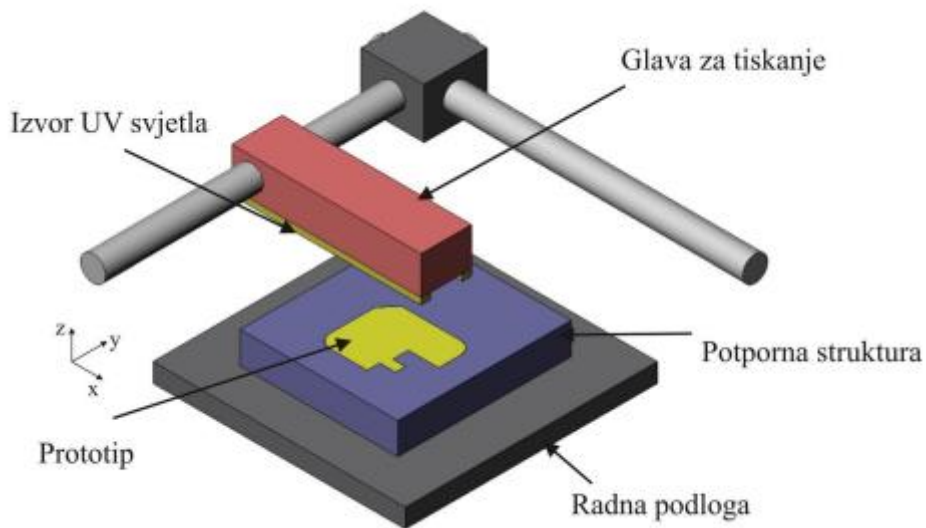
Djelomičan utjecaj na efekt stepenica može imati smanjena visina slojeva koji grade model, a na grešku kod pretvorbe u STL model upotreba gušće mreže trokuta na površini. Ostali faktori koji uzrokuju nejednoličnost kvalitete površine anuliraju se ili barem umanjuju njihov utjecaj pomoću pažljivo optimiranih parametara postupaka, ali i raznim drugim operacijama koje se vrše prije i nakon samog postupka 3D ispisa (slika 3.10.).



Slika 3.9 Poboljšanje kvalitete površine (postpostupaki/predpostupaki) [5]

4. ISPISIVANJE MLAZOM FOTOPOLIMERA – POLYJET

Uz postupak FDM često se primjenjuje postupak ispisivanja mlazom fotopolimera. Karakteristika Polyjeta je da se mlaznice kreću u smjeru x i y (slika 4.1) te pritom nanose sloj fotopolimernog materijala debljine $16\text{ }\mu\text{m}$ koji se pri svakom prolazu skrućuje te na taj način stvara potpuno umreženi prototip. Slično kao kod postupka FDM, mlaznica gradi jedan sloj te se nakon toga radna podloga spušta za debljinu izgrađenog sloja te kreće izrada sljedećeg. [3]



Slika 4.1. Postupak polyjet [3]

4.1. Tijek postupka

Kako bi se model mogao proizvesti te kako ne bi došlo do vitoperenja ili izvijanja, potrebno je primijeniti dvije vrste materijala. Jednim će se materijalom graditi tvorevina, a drugim potporna struktura koja se naknadno, nakon potpunog skrućivanja, uklanja vodom koja je pod većim ili manjim pritiskom. Za velike, robusne dijelove voda može biti i na tlaku veličine do 40 bara. [3]

Zbog male debljine gradbenih slojeva od 16 μm postiže se zadovoljavajuća kvaliteta površine, ali ju je svakako poželjno tretirati nekim od postupaka poboljšanja kvalitete površine kao što je na primjer poliranje, brušenje, nanošenje boja, obrada abrazivnim česticama i slično. Dodatne prednosti postupka su mogućnost izrade prozirnih dijelova, oštih rubova, fleksibilnih proizvoda. Izrada je relativno brza, nema potrebe za naknadnim umreživanjem, rad je čist i uredan pa i nema zahtjeva za naknadnim čišćenjem. [3]

4.2. Materijali koji se primjenjuju za postupak Polyjet

Paleta materijala koji se potencijalno mogu upotrebljavati je široka pa tako tvrtka *Stratasys* nudi brojne opcije koje pokrivaju područja kao što su medicina, stomatologija, oprema za vodene instalacije, parfemska i kozmetička industrija i slično. Zbog svoje biokompatibilnosti, mogućnosti za velikom točnošću i izradu oštih rubova u stomatologiji se primjenjuje „MED“ serija materijala (MED 625 FLX, MED 610, 620...). Nadalje, materijali kod kojih je temperatura 80 °C pri kojoj se vitopere u slučajevima povišenog opterećenja, upotrebljavaju se u slučajevima toka vruće vode ili zraka. Zbog brojnih prednosti u vidu mogućnosti izrade sitnih detalja, dobre kvalitete i glatkoće površine, različitih boja i prozirnosti, široku primjenu ima serija materijala „VERO“. Ponajviše u kozmetičkoj industriji i proizvodnji parfema zbog prozirnosti i mogućnosti proizvodnje u različitim bojama (slika 4.2 (c)), a VEROFLEX se zbog posebno dobrog omjera krutosti i fleksibilnosti primjenjuje u proizvodnji okvira za naočale i drugih modnih dodataka slične vrste. [9]





c)

d)

Slika 4.2. Primjeri proizvoda načinjenih postupkom Polyjet a), b) MED materijal; c) VERO materijal; d) VEROFLEX [10, 11]

Usporedbom postupaka FDM i Polyjet primjećuju se neke od osnovnih razlika. Kod Polyjeta ne postoji potreba za dodatnim umreživanjem, potporni se materijal uklanja vodom, a postoji i razlika u konačnoj kvaliteti površine. Zbog puno manje debljine slojeva koji grade proizvod, kod Polyjeta, dobiva se puno bolja površina koja ne zahtjeva veliku završnu obradu. Razlika je također i u materijalima, a i u samom postupku izrade tvorevina, kao što je to u prethodnim odlomcima jasnije i opisano.

5. PROIZVODNJA KOMPOZITNIH TVOREVINA

Sljedeće će poglavlje biti posvećeno kompozitnim tvorevinama, njihovoj proizvodnji i strukturi. Od postupaka proizvodnje kompozita, opisat će se samo dva – ručno laminiranje i podtlačno oblikovanje s obzirom na to da se jedino ta dva postupka prerade kompozita izvode samo u jednoj polovici, to jest jedino kod ovih postupaka eventualno postoji mogućnost da se primijenjuju kalupi načinjeni aditivnim postupcima.

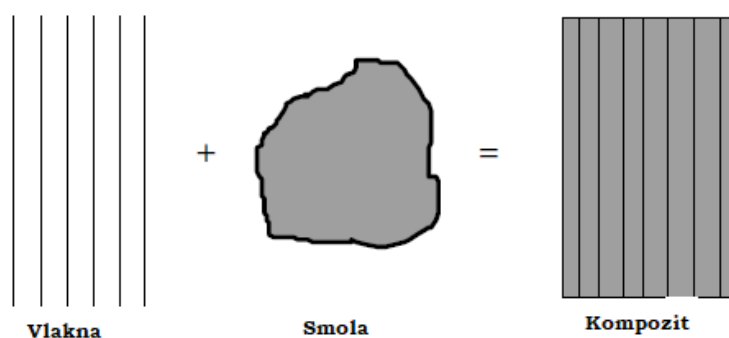
5.1. Kompozitni materijali

Nakon definiranja osnovnih zahtjeva i faktora koji imaju presudan utjecaj prilikom konstruiranja kalupa, obraditi će se neki od postupaka izrade kalupa primjenom aditivnih postupaka, a posebno će biti naglašeni postupci koji služe za izradu kalupa za preradu kompozitnih materijala.

Kompozitni materijal nastaje kombinacijom dvaju ili više materijala s ciljem dobivanja najboljih mogućih svojstava. U široj su primjeni najčešće materijali ojačani vlaknima zbog vrlo povoljnih svojstava završnog proizvoda. Najvažnije svojstvo kompozitnih materijala je, dakle, ono da je materijal nastao iz dvaju različitih materijala bolji od svakog od ta dva materijala pojedinačno i upravo je to razlog što su oni uopće i pronašli svoju primjenu. Ideja kombiniranih materijala potječe iz prirode, a primjeri su mnogobrojni pa tako možemo izdvojiti drvo – spoj vlakana celuloze i lignina kao i kompozitnu ljusku nekih od beskralježnjaka. [12]

5.2. Struktura kompozita

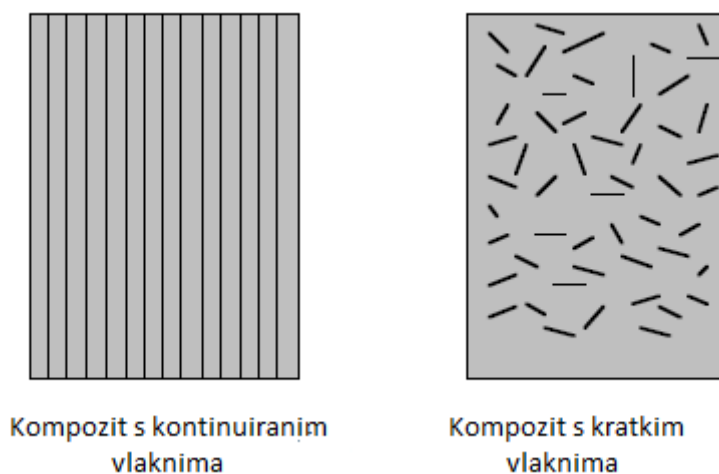
Kompozitni materijal se sastoji od 2 glavne komponente – materijala matrice i materijala ojačavala (slika 5.2). Tipično se materijal ojačavala, vlakno polimera, metala, keramike ili pak stakla, ulaže u materijal matrice koja može biti sve od metala pa do polimera. Vlakno ojačavala daje čvrstoću dok matrica stvara postojanost na okolišne uvjete i povećava krutost. [12]



Slika 5.1 Nastanak kompozita [12]

5.2.1 Zadaća matrice i ojačavala

Svojstva kompozita proizlaze uglavnom iz rasporeda ulaganja vlakana u matricu, a ona mogu biti u rasponu od dugih, kontinuiranih vlakana pa do kratkih, raznosmjerno postavljenih vlakana ako što je prikazano slikom 5.4. Svaka vrsta rasporeda nosi sa sobom različita svojstva pa svakako treba poznavati eksploatacijske uvjete materijala kako bi se mogla donijeti pravilna odluka. [12]



Slika 5.2 Vrsta kompozitnog materijala prema orijentaciji vlakana [12]

Uloga vlakana je mnogostruka, ali najvažnija je prenošenje opterećenja na čitavi kompozitni -materijal i to čak 70 do 90 %. Nadalje, vlakna pružaju krutost, čvrstoću, toplinsku stabilnost i električnu vodljivost materijala (ovisno o vrsti vlakna koja se primjenjuje). Zadaća je matrice također mnogo, od kojih je većina presudna za

funkcionalnost takvog materijala i proizvoda koji će biti iz njega napravljen. Matrica natapanjem vlakana omogućuje prenošenje opterećenja, ali isto tako i omogućuje vlaknima da svako od njih može djelovati kao zaseban prijenosnik sila. Osigurava zaštitu vlakana od kemijskih tvari ili izlaganja drugim štetnim učincima poput trošenja te omogućava dobru završnu kvalitetu površine i tvorevina koji gotovo i nije potrebno dodatno obrađivati. Kvalitetnim odabirom matrice u velikom se postotku određuje tvrdoća, duktilnost i krutost materijala. [12]

Kao što je već navedeno, kvalitetnim odabirom matrice i uložnog vlakna i njihovim povezivanjem dobiva se izvrstan materijal s brojnim prednostima i povoljnim svojstvima.

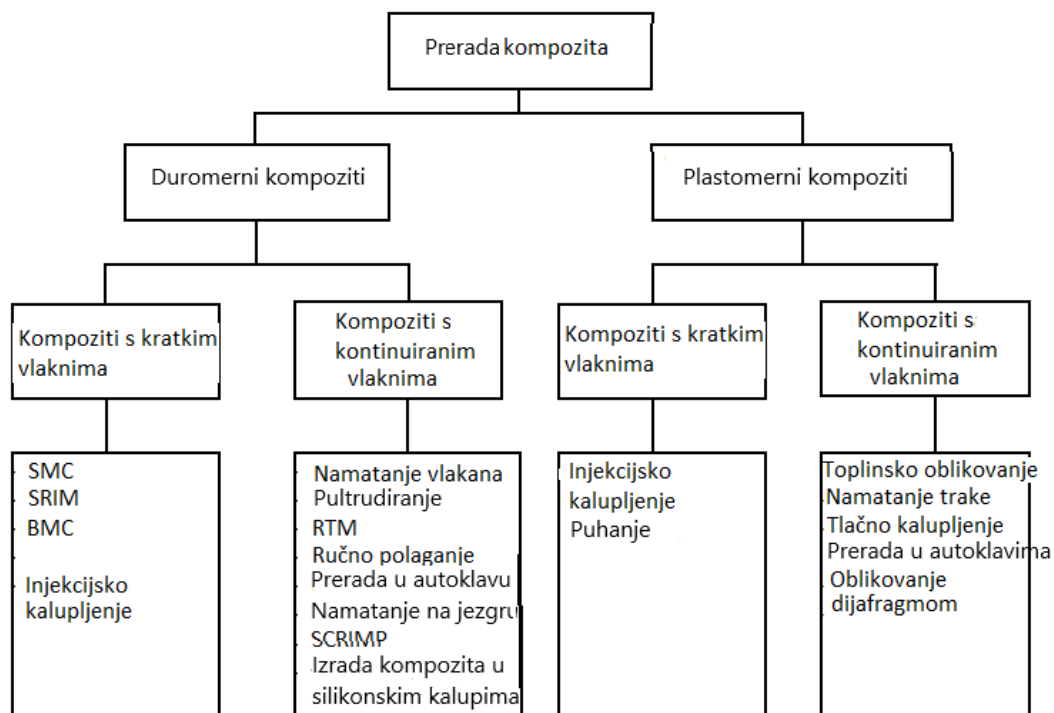
Neka od njih su: [12]

- mogućnost integriranja pojedinih dijelova u jedan (pogotovo metalnih)
- mogućnost ugradnje senzora u sam materijal koji daju povratne informacije o mogućem zamoru ili oštećenju materijala
- izvanredan omjer gustoća/čvrstoća zbog čega su sve kompozitne tvorevine puno lakše od primjerice, metalnih i zbog toga se najčešće primjenjuju u zrakoplovnoj industriji
- jednaka krutost kao kod čelika i aluminija za petinu, odnosno, polovinu njihove mase
- visoka tolerancija na zamor materijala, odlična antikorozivna svojstva, mogućnost kombiniranja takvih materijala da je koeficijent toplinskog širenja praktički nepostojeći
- lakše izvođenje komplicirane geometrije i mogućnost izvedbe proizvoda koji osim zavarivanjem ili sličnim postupcima u pravilu nisu izvedivi

5.3. *Proizvodnja kompozita*

Gledajući i uspoređujući trendove proizvodnje i planiranja proizvodnje, potrebe za kraćim proizvodnim postupcima, smanjenjem ukupnih troškova kao i količina utrošenih

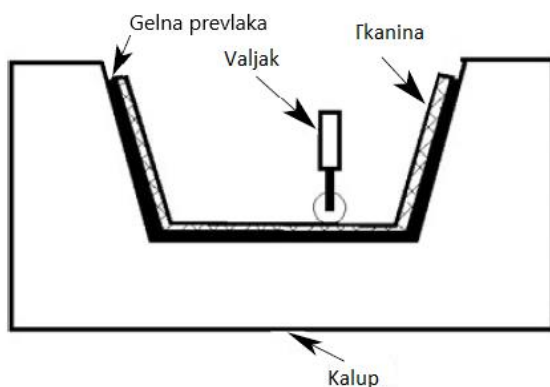
materijala, jasno je da se uvode noviteti i biraju novi pravci razvoja pojedinih industrija. U proizvodnji kompozita izbjegavaju se postupci klasične strojne obrade jer se na taj način režu i oštećuju vlakna, a time se umanjuju povoljna svojstva kompozitnih materijala. Kompoziti ne zahtijevaju visoke temperature i tlakove za obradu kao što je to potrebno za klasičnu proizvodnju metalnih tvorevina te je stoga omogućena proizvodnja tvorevina koji su gotovo odmah spremni za upotrebu (e. *near-net-shape*). Brojne tvrtke rade na razvijanju novih načina proizvodnje kompozitnih materijala koji se, dakako, razlikuju u nekom od svojih ključnih dijelova imajući u vidu povećanje povoljnih svojstava materijala koji se spajaju u kompozite. Dalje će u radu biti dana klasifikacija postupaka proizvodnje kompozita (slika 5.3), a detaljnije će objašnjeni biti samo neki od njih.



Slika 5.3. Postupci obrade kompozita [12, 13]

5.4. Postupak ručnog laminiranja

Kod ručnog laminiranja na kalup se najprije postavlja odvajalo, gelna prevlaka te zatim sloj tkanine i smola sve dok se ne dobije zadovoljavajuća ili potrebna debljina tvorevine. Prilikom svakog stavljanja smole, primjenjuje se valjak kojim se istiskuje zrak i višak smole i izravna se tkanina (slika 5.4), a također se osigurava homogenost smole na vlaknima.



Slika 5.4 Shematski prikaz ručnog laminiranja [12]

Čitav je postupak posebno ovisan o veličini tvorevine koja se izrađuje pa je za veće dijelove čak moguće umreživanje i očvršćivanje pri sobnoj temperaturi. Na kalup se nanosi odvajalo koje će po završetku postupka prerade omogućiti lakše vađenja izratka iz kalupa. Nakon toga, nanosi se gelna prevlaka (slika 5.4) koja doprinosi kvaliteti površine tvorevine, ali za funkciju također ima moguće bojanje izratka. Na očvrснуtu gelnu prevlaku se dodaje sloj vinilestera koji osigurava dobru kemijsku postojanost i postojanost na koroziju. Proizvodnja tvorevine započinje postavljanjem sloja vlakana (tkanine) na kalup te izlivanjem smole na čitavu površinu, kao što slika 5.4 prikazuje. Nakon toga slijedi poravnavanje, istiskivanje zraka i ovisno o debljini stijenke, sljedeći sloj materijala. [12]

Materijali koji su najpristupniji kod ovog postupka za izradu kalupa su staklena vlakna, a laminiraju se proizvodi s epoksidnom, poliesterskom i vinilesterskom smolom. S obzirom na to da je ovo jedan od najjednostavnijih postupaka prerade kompozita i zahtjeva gotovo

samo sobnu temperaturu za umreživanje često se primjenjuje za izradu prototipova i ispitnih tijela. Tvorevine se izrađuju u otvorenim kalupima jednostavne geometrije koji mogu biti izrađeni iz drva, čelika i drugih materijala. [12]

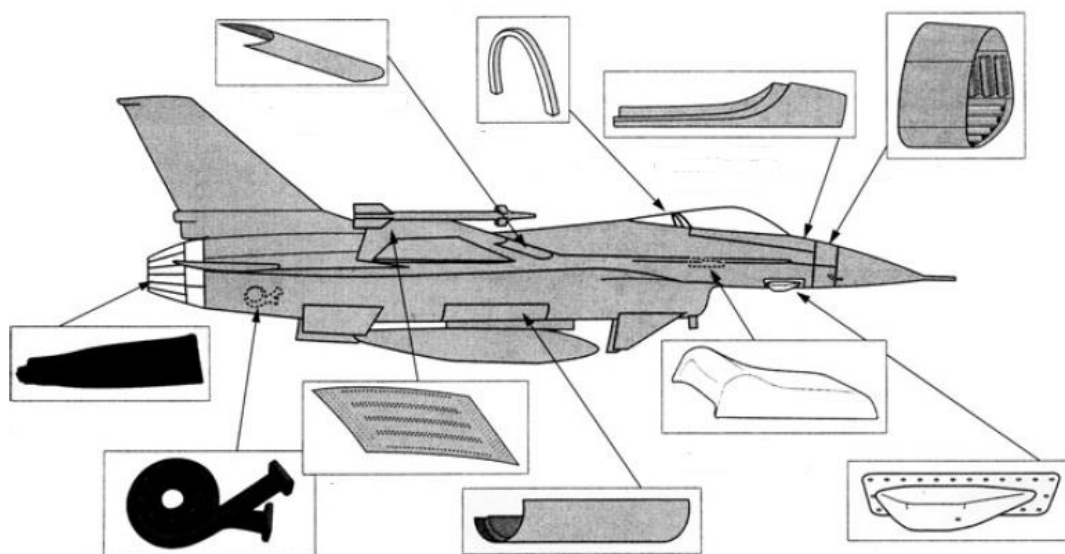
Prednosti postupka uglavnom su financijske prirode jer su kod ručnog laminiranja mali inicijalni investicijski troškovi, ali i jeftina oprema potrebna za rad. Nadalje kao prednost se također može izdvojiti jednostavnost postupka, raznovrsnost proizvoda koji se mogu izraditi, ali relativno malu cijenu potrebnih materijala i kalupa. S druge strane, neki od nedostataka su slabija kvaliteta površine koja uvelike ovisi o radniku, loša ponovljivost postupaka, sam postupak je naporan i zbog toga dugotrajan. [12]

5.4.1. Near - net - shape proizvodi

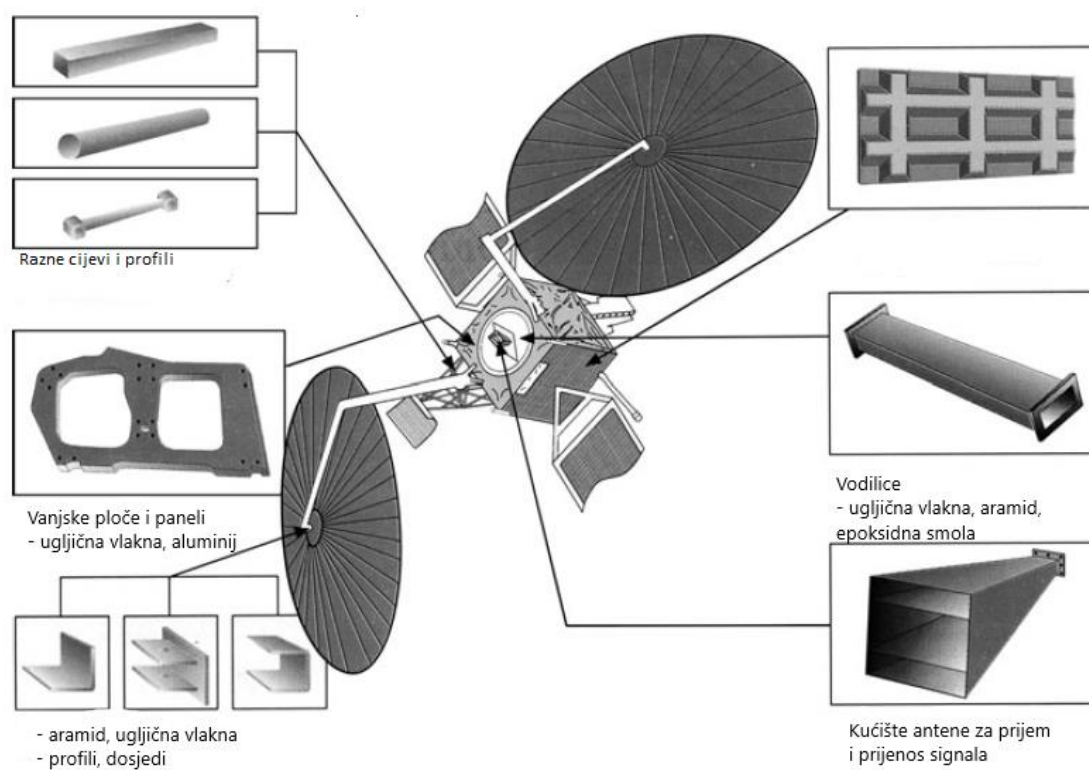
Važnost *near-net-shape* proizvodnje je dvojaka, a vrlo važna iz ekonomskih i praktičnih razloga. Prvo, nije potrebna velika naknadna obrada čime se vrijeme proizvodnog ciklusa smanjuje i povećava se konkurentnost, a druga prednost je u tome što su bačeni i neiskorišteni materijal (odvojena čestica, brušenje, ostaci uljevnog sustava..) također minimalni. Zbog manjih tlakova i temperatura pod kojima se kompozitni materijali prerađuju, kalupi za njihovu preradu ne moraju biti toliko složeni i čvrsti čime se također pojeftinjuje postupak proizvodnje. [1]

Veliku raznolikost postupaka proizvodnje kompozita može objasniti široka primjenjivost tih materijala pa se tako kao reprezentativan primjer industrije posebno privržene kompozitima uzima aeronautička industrija. Najčešću primjenu ima postupak ručnog laminiranja (*e. hand lay-up*), ali se primjenjuje i RTM (prešanje smole) i namatanje niti (*e. filament winding*). [12]

Primjena kompozita u aeronautičkoj industriji (slika 5.5) opravdava se velikim smanjenjem mase iskorištenog materijala što neizbježno vodi smanjenju potrošnje goriva i ostalih troškova. 1999. godine je u toj industriji upotrijebljeno bilo preko 10 milijuna kilograma kompozitnih materijala što je značilo smanjenje mase za oko 30 %. Kompoziti su također zastupljeni i u gradnji komercijalnih zrakoplova, satelitskih komponenti (slika 5.6), robe široke potrošnje, sportskoj industriji, upotrebljavaju se i u konstrukciji motora i slično. [12]



Slika 5.5 Razni kompozitni tvorevine korišteni u konstruiranju borbenog zrakoplova [12]



Slika 5.6 Razni dijelovi satelita načinjeni od kompozitnih materijala [12]

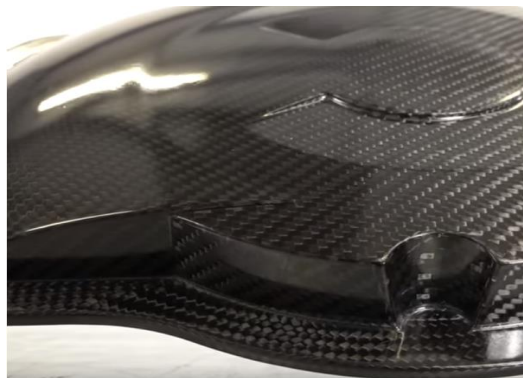
5.5. *Podtlačno oblikovanje*

Postupak podtlačnog oblikovanja uz ručno laminiranje najčešći je u preradi kompozita. U podtlačnom oblikovanju primjenjuju se već pripremljena vlakna kao u ručnom laminiranju ili prepreg. Prepreg iliti materijal (tkanina) imregnirana smolom koja se kroji, polaže u željenom smjeru i orijentaciji vlakna te se nakon toga podtlačno oblikuje.

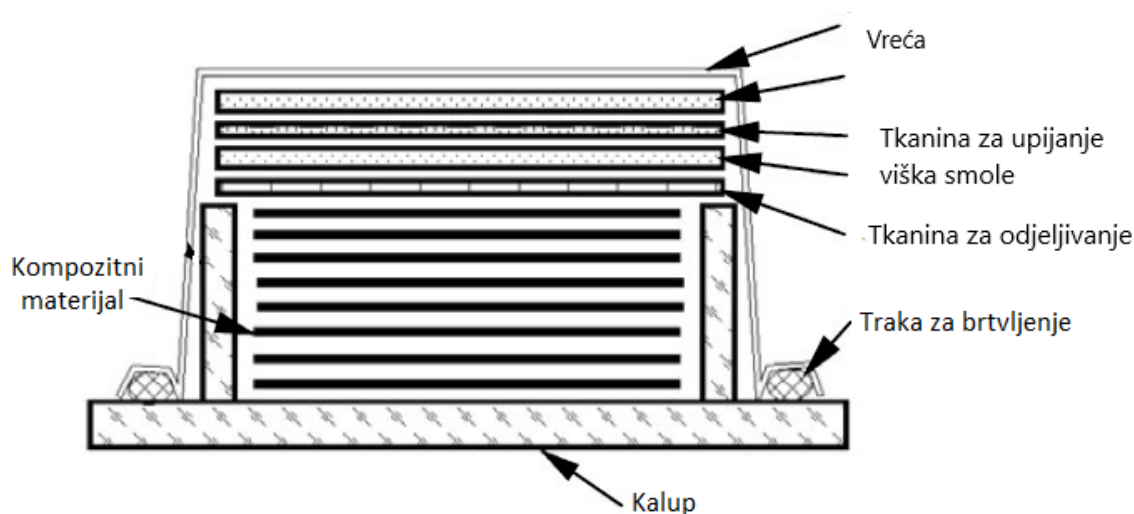


Slika 5.7 Ulagivanje kompozitnog materijala u kalup [14]

Najčešće se primjenjuje za složene dijelove s visokim udjelom kratkih vlakana u materijalu, ali mu je produktivnost vrlo mala. Nakon podtlačnog oblikovanja, tvorevina se stavlja u peć za konačno umreživanje i skrućivanje (slika 5.8). Primjenjuje se najviše u aeronautičkoj industriji zbog mogućnosti izrade lakih, a čvrstih tvorevina kakve su neophodne za zrakoplove.



Slika 5.8 Konačni umreženi proizvod [15]



Slika 5.9 Shematski prikaz postupka podtlačnog oblikovanja [12]

Postupak podtlačnog oblikovanja kompozitnog materijala najčešće se provodi u zaštitnoj okolini u strogo kontroliranim uvjetima (posebice tvorevine koji se upotrebljavaju u aeronautičkoj industriji.). Razlog tome leži u tome što bi svaka pojava stranih čestica poput prašine ili slično, rezultirala neravninama i nesavršenostima očvrsnute tvorevine. Postupak započinje polaganjem unaprijed pripremljenog kroja vlakana, izrezanog nekim od računalno vođenih postupaka rezanja, najčešće laser i CNC čime se otpadni materijal rezanja svodi na minimum. Nakon toga slijedi postupak polaganja tih vlakana u otvoreni kalup. U kalup je moguće položiti više preprega, ovisno o željenoj debljini tvorevine. [13]

Nakon slaganja kompozita, stavlja se tkanina za odjeljivanje pa tkanina za upijanje viška smole i na kraju podtlačna vreća (slika 5.9) koja se po obodu brtvi trakom za brtvljenje. Jednom kada su svi slojevi posloženi, iz kalupa se pomoću podtlačne pumpe istiskuje zaostali zrak. U takvim uvjetima dolazi do potpunog spajanja kompozitnih slojeva, slijedi umreživanje i konačno očvršćivanje. [13]



Slika 5.10 Pripremak sa svim slojevima, spreman za ulazak u autoklav [12]

5.5.1. Prednosti i nedostaci podtlačnog oblikovanja

Osnovne prednosti postupka su u vrlo visokoj kvaliteti proizvoda, uz velik udio vlakana u proizvodu. Nadalje, osim kvalitete površine, tvorevine posjeduju veliku čvrstoću i krutost, a mogu se izrađivati u kalupima koji se relativno jeftini. S druge pak strane, neki od nedostataka ovog postupka su činjenica da je ručno slaganje preprega nezahvalno kada se govori o orijentaciji vlakana i da bi polaganje, za najbolje rezultate, trebalo biti automatizirano što istovremeno znači višu cijenu i kompleksnost postupka. Isto tako, problemi se javljaju prilikom istiskivanja zaostalog zraka između slojeva pa su iz tog razloga ipak moguće manje nesavršenosti na krajnjem proizvodu. [12]

5.6 Općenito o kalupima

Kako bi kalup bio kvalitetno izrađen te u mogućnosti podnijeti zahtjevan postupak proizvodnje izradaka, bilo od kompozitnih materijala ili bilo kojih drugih, mora zadovoljiti određene kriterije.

Tokom konstrukcije kalupa potrebno je uzeti u obzir skupljanje materijala koje se događa tokom stvrdnjavanja materijala, ali i toplinskog stezanja. Zbog toga se u većini slučajeva

kalup mora izraditi u dimenzijama koje su nešto veće od zadanih (proračunato veće) kako bi na kraju postupaka stvrdnjavanja izrađeni proizvod bio u točno zadanim dimenzijama. Nastavno na hlađenje, prilikom konstruiranja kalupa također je od velike važnosti poznavanje koeficijenata toplinskog širenja materijala kalupa i materijala tvorevine. Tako je potrebno kalup i materijal tvorevine odabrati na način da zaostala toplinska naprezanja na kraju postupaka budu što manja, a taj se kriterij zadovoljava u slučaju da toplinski koeficijenti materijala budu, koliko je to moguće, jednaki. [12, 16]

Kvaliteta proizvoda definira se, prije svega, stupnjem kvalitete površine o kojoj uvelike ovisi završna cijena proizvoda. Zbog toga površina samog kalupa mora biti visoke kvalitete kako bi tvorevina izrađena u tom kalupu, imala što bolju površinu i time se uklonile moguće naknadne operacije. Kalup se, također, premazuje odvajalom za lakše vađenje tvorevine te se uklanjaju nečistoće koje mogu uzrokovati oštećenja proizvoda, ali i kalupa. [16]

Posljednji od najutjecajnijih faktora prilikom konstruiranja kalupa su skošenja i polumjeri zaobljenja u kalupu. Odabire se kut nagiba od 1° koji omogućuje lakše vađenje tvorevina po završetku operacije i bolji protok materijala u kalupu. Dodatno se osiguravaju polumjeri u kalupu na unutarnjim bridovima od barem 0,2 mm te na vanjskim bridovima od 0,15 mm čime se izbjegavaju oštri bridovi na proizvodu, bolji tok materijala i lakše vađenje. [16]

5.6.1. Kalupi i materijali za ručno laminiranje i podtlačno oblikovanje

Kalupi za preradu kompozita ovim postupkom su otvoreni kalupi u koji se slojevi kompozita polažu jedan na drugi (slika 5.11). Jednostavniji kalupi, primijenjeni isključivo za prototipove proizvoda izrađeni su iz nekog polimernog materijala ili drva. Kalupi za visokokvalitetne proizvode, posebice u aeronautičkoj industriji izrađeni su najčešće od metala i kompozitnih materijala poput epoksidne smole i staklenih vlakana, koji je zbog izvrsnog omjera mase i čvrstoće najpovoljniji izvor. No još se primijenjuje i epoksidna smola/BMI, epoksidna smola/staklo i slično. Nabrojeni materijali su najčešći u klasičnoj tehnologiji prerade kompozita kod otvorenih kalupa pa je stoga potrebno ispitati

isplativost i potencijalne materijale kalupa načinjenog za ručno laminiranje, ali izrađenih aditivnom proizvodnjom. [12]

Slika 5.11 pokazuje važnost dobrog postavljanja impregniranog materijala u kalup, a pogotovo na skošenjima, rubovima i slično kako bi se dobile zadovoljavajuće tolerancije polumjera na rubovima. Na slici 5.11 c) prikazan je kalup za postupak ručnog laminiranja.



a)



b)



c)

Slika 5.11 a) postupak ručnog laminiranja; b) proizvod izrađen postupkom ručnog laminiranja; c) kalup za ručno laminiranje

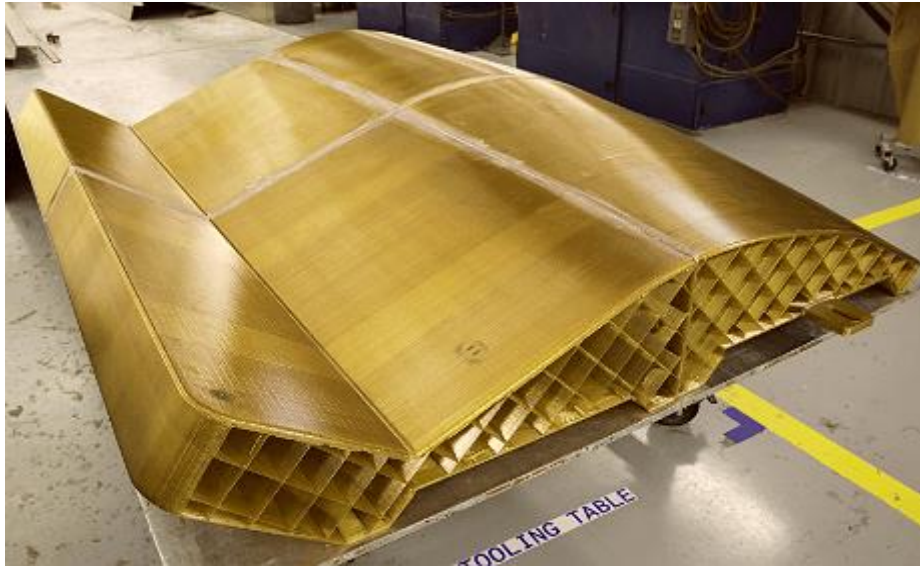
6. ADITIVNA PROIZVODNJA KALUPA ZA PRERADU KOMPOZITA

Pojavom proizvodnje koja je u potpunosti posvećena krajnjem korisniku, mijenja se i filozofija proizvodnje te se podupiru novi, fleksibilni postupci prerade. Zbog toga se u maloserijskoj proizvodnji poseže za kalupima izrađenim nekim od postupaka aditivne proizvodnje. Aditivna proizvodnja primarno je u upotrebi za izradu kompliciranih tvorevina s minimalnom naknadnom obradom. Iako teoretski nema granica ili ograničenja za vrstu postupka ili materijala koji će biti primijenjen za izradu tvorevina, u ovom će slučaju predmet istraživanja biti polimerni i kompozitni materijali.

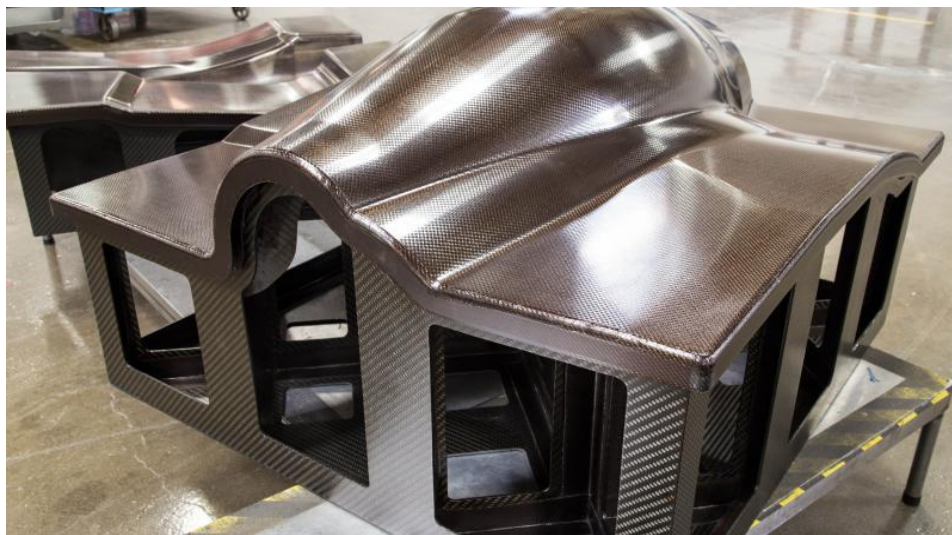
Ideja je ta da se ovakvim načinom izrade kalupa smanji pripremno vrijeme potrebno za ispitivanje, mnogobrojne analize i sve ostalo što prethodi gotovom izrađenom kalupu. Naravno, ograničenja ovakvog modela izrade kalupa su postojeća i vrlo ih je važno uzeti u obzir jer će biti prijelomna prilikom odlučivanja koju opciju odabrati. Jedan od najvažnijih ograničavajućih faktora jest trajnost kalupa budući da je poznato kako metalni kalupi izrađeni klasičnim konstruiranjem omogućavaju serije koje broje desetke i stotine tisuća izrađenih komada. No pažljivim odabireom tehnike 3D ispisa, odgovarajućim materijalom izrade i ostalim parametrima poput parametara prerade, umrežavanja, temperature i konačne obrade kalupa moguće je postići zadovoljavajuću proizvodnost pod uvjetom da nije potrebna serija koja broji stotine i tisuće komada. [5]

6.1. Aditivna proizvodnja kalupa namijenjenih za postupak ručnog laminiranja

Promjenu pristupa prema izradi i konstruiranju kalupa za ručno laminiranje kompozita ponajviše je pokrenula tvrtka *Stratasys*, a slika 6.1 a) prikazuje jedan od kalupa proizvedenih FDM postupkom. Ideju da se skрати vrijeme potrebno za sveukupnu konstrukciju kalupa, da se smanje troškovi materijala, potrebni ljudski resursi i slično, realiziraju primjenom FDM postupka za izradu kalupa. Dakako, kao što je već spomenuto, najveću prepreku za kalupe izrađene nekim od postupaka aditivne proizvodnje predstavljaju materijali i njihova, ponajprije, toplinska svojstva.[13]



a)



b)

Slika 6.1 Primjeri kalupa izrađenih postupkom FDM [13]

6.2. *Materijali za izradu kalupa za preradu kompozita kod postupka taložnog očvršćivanja*

Novim materijalima s točno ciljanim svojstvima danas je moguća prerada kompozita u kalupima nastalim taložnim očvršćivanjem postupkom pri temperaturama višim i od 175 °C. Zbog toga je potrebno poznavati toplinska svojstva kao što je koeficijent toplinskog

rastezanja i temperatura umreživanja. Kako bi se izbjegle neželjene posljedice toplinskog rastezanja unaprijed se poduzimaju određeni koraci poput proračunatog povećanja (ili smanjenja) komada s ciljem da po završetku hlađenja i umrežavanja dimenzije budu u zadanim tolerancijama. Također se kod kompleksnijih kalupa, s velikim brojem skošenja ili šupljina primjenjuju se određeni međupostupci kako bi se izbjegla oštećenja ili naprezanja prilikom vađenja proizvoda iz kalupa. [13]

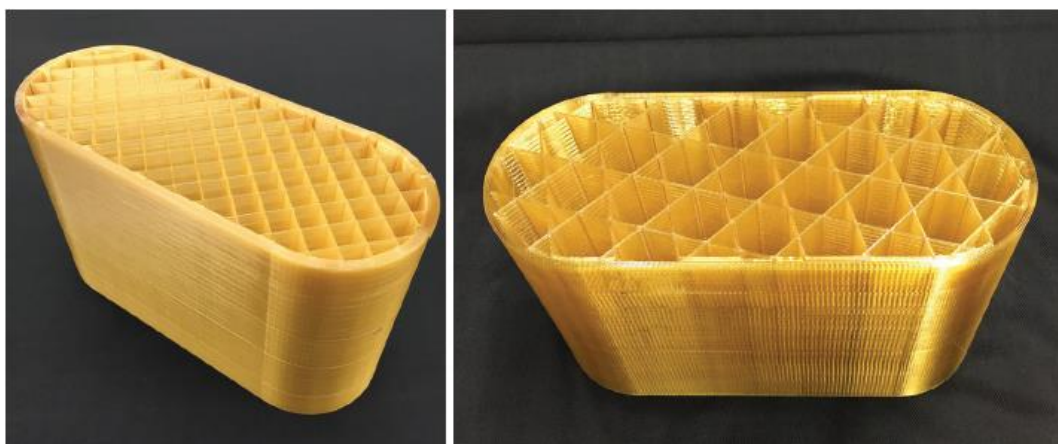
Materijali koji su specijalizirani za aditivnu izradu kalupa za ručno polaganje su ULTEM 1010 s mogućnošću podnošenja cikluse umrežavanja i pri temperaturi od 177 °C, ULTEM 9085 koji podnosi cikluse do 149 °C dok primjerice polikarbonat i ABS podnose temperature do 82 °C. O ovim temperaturama najviše ovise tolerancije dimenzija pa je potrebno postupak prilagoditi za najbolji ishod, ali isto tako kako bi bilo što manje dodatnih operacija i kako bi kalup odmah poslije izrade bio što bliže potrebnim dimenzijama.

Tablica 6.1. Podjela materijala kod postupka FDM za proizvodnju kalupa [13]

MATERIJAL	NAJČEŠĆA UPOTREBA	PREDNOSTI	T _g , °C	α , K ⁻¹
ULTEM 1010	Kalupi za sve temperature umreživanja	Najviše temperature mogućnosti, najniži α	215	47
ULTEM 9085	Kalupi za temperature umreživanja do 149 °C	Širok temperaturni raspon	186	65
PC	Kalupi za temperature umreživanja do 132 °C	Jeftiniji materijal ali korisna za male serije	161	68
ABS-M30	Kalupi za temperature umreživanja do 82 °C	Niska cijena i mogućnost različitih boja	108	88
ASA	Kalupi za temperature umreživanja do 82 °C, proizvodnja većinom manjih dijelova	Najniži troškovi, UV stabilan, različite boje	108	88

6.3. Konstrukcija kalupa

Prednost FDM-a je u tome da je moguće izraditi kompleksne kalupe s manjim troškovima, a kraćim ciklusima izrade. Konstrukcija kalupa ovisi najviše o parametrima prerade za koji je kalup namijenjen. U okviru ručnog laminiranja postoje dvije vrste kalupa – školjkasti i kalup sa šupljikavom unutrašnjosti. Već sa slike 6.2 je vidljiva osnovna razlika. Školjkasti kalup primjenjuje najmanju moguću količinu materijala bez da se oduzima na stabilnosti, čvrstoći i kvaliteti površine samog kalupa.



a)



b)

Slika 6.2 Kalupi načinjeni postupkom FDM: a) Kalup sa šupljom unutrašnjosti; b) školjkasti kalup [13]

Debljina stijenke takvog kalupa varira, ali određena razmjernost između krutosti alata i potrošnje materijala se postiže pri otprilike 7,6 mm. Ovakav je kalup primjeren za preradu kompozita podtlačnim oblikovanjem, a može podnijeti tlakove i do 700 kPa. Konstrukcija kalupa kakva je na slici 6.1 b) primjenjuje se u slučajevima prerade kompozita kod koje su potrebni veći pritisak i temperatura prerade. [13]

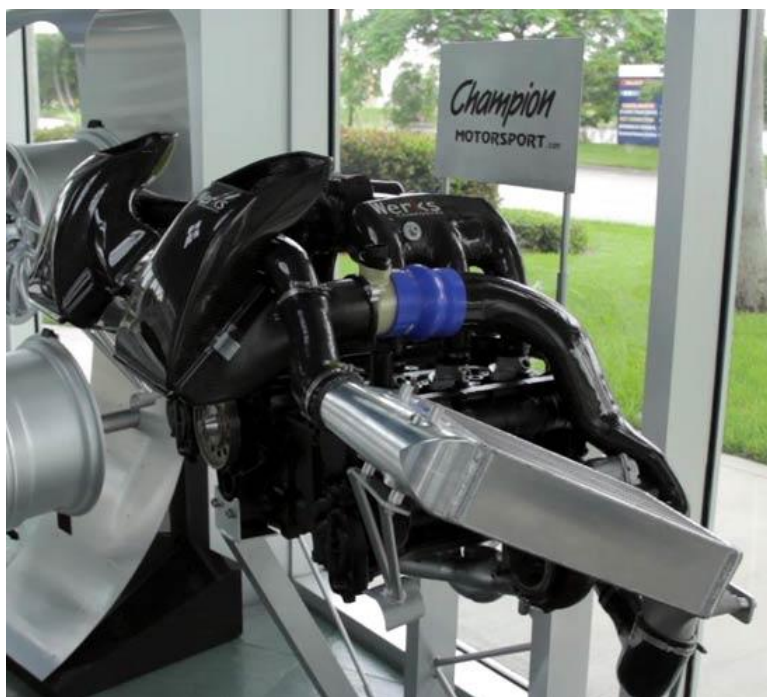
6.4. Primjena aditivne proizvodnje za izradu taljivih jezgri

Kod cilindričnih šupljih kompozitnih tvorevina upotrebljavaju se jezgre. Takve jezgre moguće je izraditi aditivnom proizvodnjom, što je velika prednost s obzirom na to da se po završetku polaganja vlakana, takve jezgre mogu otopiti ne oštećujući pritom kompozitnu tvorevinu. Ovakve se jezgre također primjenjuju iz ekonomskih razloga, ali i dugotrajnog postupaka izrade šupljih proizvoda. Kako bi se to utrošeno vrijeme smanjilo, a izradak proizveo u jednom komadu, započinje primjena postupka FDM u izradi taljivih jezgri. Na tako izrađenu jezgru polaže se kompozitni materijal, a po učvršćivanju se takva jezgra tali i ostavljaju gotovu šuplju tvorevinu što je prikazano na slici 6.3. Prednosti ovakvog pristupa su mnogobrojne. Omogućeno je izrađivanje kompleksnijih proizvoda, posebice onih sa šupljom unutrašnjosti, a prilikom taljenja jezgre nema opasnosti od oštećivanja proizvoda ili tolerancijskih pomaka. [17, 18]



Slika 6.3 Cijevi ispušnog sustava izrađene pomoću taljivih jezgri iz kompozitnog materijala epoksidna smola/ugljična vlakna [19]

Slika 6.3 prikazuje ispušno sustav koji se za neke automobilske tvrtke izrađuje isključivo ovim postupkom. Činjenica da se čvrstoća takvih cijevi smanjuje spajanjem dviju polovica napravljenih nekom vrstom ručnog polaganja, ali i alternativa, do tada korištena pješčana jezgra koja je rezultirala slabom kvalitetom površine, potaknula je neke automobilske tvrtke da pređu na ovakav sustav konstruiranja cijevi. Jedna od takvih je tvrtka *Porsche*, poznata po vrhunskoj kvaliteti svojih automobila koju djelomično ili u potpunosti može pripisati ovakvim inovativnim, dugoročnim i kvalitetnim rješenjima i čvrstim kompozitnim materijalima. Osim što se zbog taljivih jezgri ne narušava čvrstoća, također je omogućeno smanjivanje debljine stijenke, čime se postiže bolji pritok zraka, a ne povećavaju se vanjske dimenzije sustava, smanjuje se masa i posljedično poboljšavaju ukupne performanse motora vozila. [18]



Slika 6.4 Cijevi ispušnog sustava u motoru *Porsche* vozila [17]

6.4.1 Izrada taljive jezgre

Jezgra se ne izrađuje kao puni komad, nego mrežasti zbog toga što se na taj način omogućuje lakše odvođenje materijala. Također se zbog što manje potrošnje materijala, ali i kako bi jezgra mogla podnijeti tlak i temperaturu očvršćivanja kompozitnog materijala, ostavlja u sredini jezgre nekoliko milimetara slobodnog prostora. Jedina razlika između klasičnog FDM 3D ispisa je u tome da za taljivu jezgru nije potreban čvrsti

materijal poput onog koji se upotrebljava za FDM proizvode već se one mogu izrađivati iz materijala koji se inače kod taložnog očvršćivanja upotrebljava samo kao potporni materijal te se na završetku postupaka uklanja. Jezgra može podnijeti tlakove do 350 kPa, i temperature do 120 °C, što je izrazito bitno obzirom na prirodu izrade kompozitnih tvorevina. [18]

7. ADITIVNA PROIZVODNJA U IZRADI KALUPA KOD OSTALIH POSTUPAKA PRERADE POLIMERA

7.1 Injekcijsko prešanje

Primjer proizvoda izrađenog u kalupu načinjenom klasičnim postupcima i postupcima aditivne proizvodnje prikazuje slika 7.1. Vidljivo je na koji se način manifestiraju prednosti i nedostaci jednog ili drugog postupka, ali je isto tako vidljivo da se lijeva tvorevina (AM proizvodnja) određenim naknadnim operacijama vrlo jednostavno doraduje i anulira nedostatke vezane uz kvalitetu površine, svakako imajući na umu njihovu isplativost.



a)

b)

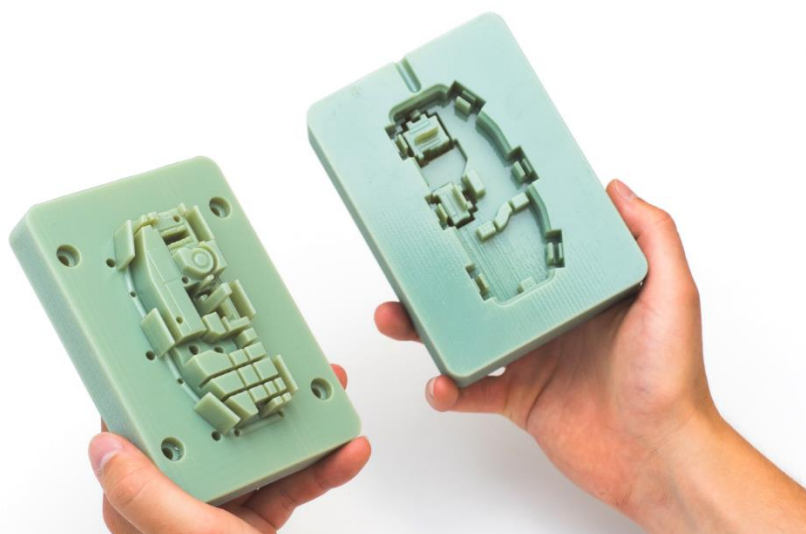
Slika 7.1. Usporedba obradaka izrađenih u kalupu konstruiranom klasičnim postupcima i u kalupu izrađenom 3D printerom [20]

Kalup primijenjen za lijevi izradak napravljen je 3D pisačem *Stratasys Objet 260* koji omogućava fleksibilnost izrade kao i kratko trajanje izrade. Postupak izrade kalupa jest Polyjet, dok je postupak izrade tvorevine u takvom kalupu injekcijsko prešanje. Kako je napomenuto ranije, zbog konstrukcijskih razloga, ali i snižene čvrstoće kalupa načinjenog printanjem, materijal se injekcijski uprešava pod smanjenim tlakom kako se ne bi narušila stabilnost kalupa i kvaliteta obratka. [21]

Za postupak Polyjet razvijeni su materijali koji kombiniraju toplinsku postojanost za visoku čvrstoću i izdržljivost materijala. Rezultat takve kombinacije jest materijal koji je dovoljno tvrd i čvrst da podnese cikluse injekcijskog prešanja do 100 komada. Digitalni ABS (tablica 7.1) (*e. digital ABS*) jest materijal koji najpovoljnije poništava efekte zagrijavanja kalupa uslijed ubrizgavanja polimerne taljevine u kalupnu šuplinu. [20]

Tablica 7.1 Mehanička svojstva digitalnog ABS-a [22]

Mehanička svojstva	
Rastezna čvrstoća	55 - 60 MPa
Istezanje	25 - 40 %
Modul rasteznosti	2.600 – 3.000 MPa
Savojna čvrstoća	65 - 75 MPa
Modul savijanja	1,700 - 2,200 MPa
Žilavost	90 - 115 J/m
Staklište, T_g	47 - 53 °C
Tvrdoća po Rockwellu	67 - 69
Temperatura postojanosti oblika za 0,45 MPa	58 - 68 °C
Temperatura postojanosti oblika za 1,82 MPa	51 - 65 °C
Temperatura postojanosti oblika za 0,45 MPa, toplinski obrađen	92- 95 °C



Slika 7.2 Kalup izrađen postupkom PolyJet za postupak injekcijskog prešanja [23]

Temperatura kalupa raste na 120 °C već nakon nekoliko prvih izradaka i izrazito je bitno da kalup ostane postojan na porast temperature i na eventualno vitoperenje. Na ovaj je način moguće napraviti i izratke komplicirane geometrije što još više govori o isplativosti aditivne proizvodnje kalupa.

Slično kao Polyjet, taložnim očvršćivanjem je također moguće izraditi kalupe za preradu polimera injekcijskim prešanjem. Dobro odabran materijal je najvažniji faktor kod izrade kalupa postupkom FDM, zbog toga što će on izravno odrediti karakteristike i kvalitetu otpreska. Potrebno je moći tiskati slojeve manje od 0,1 mm, biti postojan na visoki tlak i temperaturu, ali i dovoljno čvrst da podnese poliranje, pjeskarenje i druge postupke završne obrade. Materijal mora posjedovati visoku toplinsku provodnost zbog što povoljnijeg hlađenja i biti kemijski nereaktivan, kako ne bi došlo do reakcije s materijalom koji se u kalupu prerađuje. Također, potrebno je biti upoznat sa smjerom 3D tiskanja, s pravilnim postavljanjem unutarnjih kanala za hlađenje. [23]

Za izradu kalupa primjenjuje se digitalni ABS ojačan ugljičnim nanocjevčicama (slika 7.3), koje materijalu osiguravaju dovoljnu čvrstoću, oblikovljivost i otpornost. Ovakav modificirani digitalni ABS posjeduje dobre toplinske značajke jer su ugljična vlakna dobri toplinski vodiči i omogućuju dobre uvjete hlađenja za plastičan materijal koji sam po sebi zadržava toplinu i kao takav ne osigurava dovoljno brzo hlađenje. Dodatnu prednost osigurava mogućnost izrade kanala za hlađenje nekoliko milimetara od šupljine u materijal čime put topline postaje iznimno kratak. [23]

Proizvodnost kalupa proizvedenog na opisani način nije velika, otprilike za seriju proizvoda od 100 komada. 3D ispis ne isključuje niti materijale poput PE-HD-a i PP-a no to je područje još uvijek nedovoljno istraženo i potrebno je napraviti daljnja ispitivanja kako bi se utvrdili najpovoljniji uvjeti postupaka za kvalitetan izradak načinjen iz nabrojenih materijala.

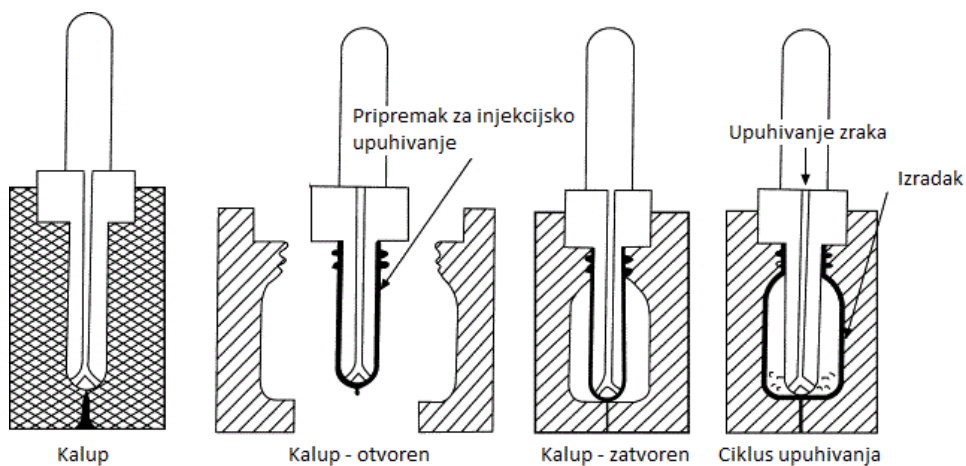


Slika 7.3 Primjer kalupa načinjenog za injekcijsko prešanje iz kompozita ABS + ugljične nanocjevčice [24]

Na kalupu sa slike 7.3 vide se svi detalji gornje i donje polovice te kvaliteta površine koja je zadovoljavajuća. Detalji, poput završetaka navoja, izraženi su i kvalitetno tiskani što bi trebalo značiti da će takvi biti i modeli iz tog kalupa. Gornja polovica kalupa sa slike nije dodatno obrađivana, a donja je pjeskarena po završetku postupaka. [24]

7.2. Injekcijsko puhanje

Iako se u 3D tiskanim kalupima proizvodi najčešće izrađuju injekcijskim prešanjem, to nije jedina mogućnost. Slika 7.4 prikazuje postupak injekcijskog puhanja za koji se kalupi također mogu izrađivati aditivnim postupcima. Kao što je već spomenuto, najveće ograničenje za takve kalupe jest toplinska postojanost te je stoga potrebno poznavati karakteristične temperature i mehanička svojstva i materijala kalupa, ali i materijala koji se primjenjuje za izradu spremnika postupkom puhanja. Iako se postupak izrade plastičnih boca u plastičnom kalupu gotovo nikad ne bi primjenjivao zbog nikakve ili slabe ekonomske isplativosti s obzirom na to da se boce izrađuju u milijunskim serijama, svakako vrijedi ispitati i tu mogućnost.



Slika 7.4 Postupak injekcijskog upuhivanja boca [25]



Slika 7.5 Kalup za injekcijsko puhanje, izrađen 3D ispisom iz digitalnog ABS-a [19]

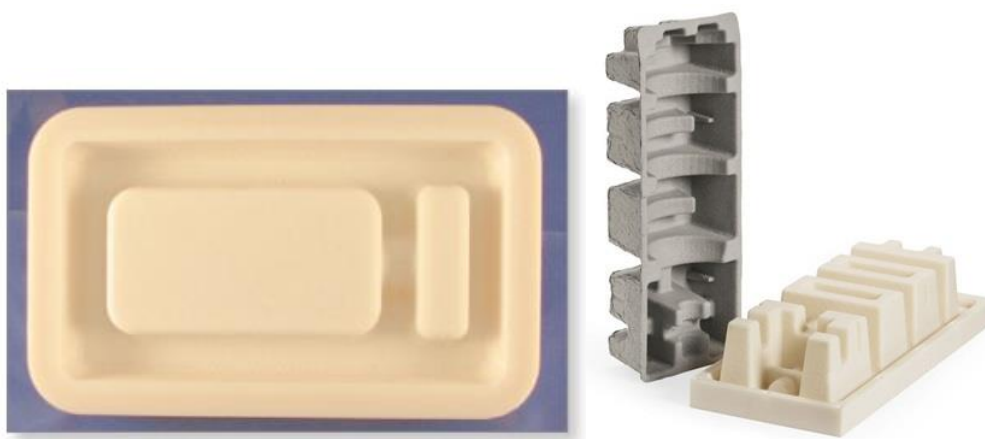
Iz tablice 7.1 vidljivo je da digitalni ABS može izdržati temperaturu i do 100 °C, a neki drugi materijali i do 175 °C, što je, barem teoretski, dovoljno da izdrži nekoliko sekundi zagrijanog PET-a, čija je temperatura taljenja 260 °. Pitanje koje se postavlja jest koliko

točno boca bi se moglo izraditi u jednom takvom kalupu prije nego on postane dimenzijski i oblikom previše nestabilan.

7.3. Prerada papira u kalupima načinjenim aditivnom proizvodnjom

Prerada papira u kalupima je postupak prerade kapljevite smjese recikliranog papira za izradu konačnih proizvoda primjenom kalupa izrađenih aditivnim postupcima, konkretnije FDM-om. S obzirom na to da je za ovaj postupak potreban kalup s rupicama kako bi se materijal tvorevine podtlakom ravnomjerno raspodijelio, kalupi izrađeni postupkom FDM izvrsna su alternativa klasičnoj izradi baš zbog prirode postupka FDM kojim se stvara porozna struktura kalupa. Ovim se postupkom najčešće izrađuju kartonska pakiranja (slika 7.6) poput onih za jaja. Prednost postupka FDM je u tome da je moguće vrlo lako prilagoditi debljinu stijenke kalupa i tako regulirati količinu utrošenog materijala, ali i početnim parametrima ispisa odrediti razmake između slojeva i time djelovati na tok zraka prilikom djelovanja podtlaka, ali i za potrebe skidanja gotove tvorevine s kalupa. [26]

Materijali koji se pretežito upotrebljavaju za kalupe su ABS - M30 ukoliko je potrebna visoka čvrstoća, i polikarbonat ukoliko je potrebna krutost i čvrstoća. Postupak se provodi na način da se kalup umače u smjesu načinjenu od recikliranih tvorevina, poput papira ili vlakana razgrađenih u vodi. [17, 27]



Slika 7.6 Primjer kalupa izrađenog aditivnom proizvodnjom iz materijala ABS – M30

[17]

Postoje dvije verzije prerade papirnate ambalaže ovim postupkom, od kojih se u jednoj od njih tvorevina skida s kalupa na način da djelovanje podtlaka prestaje i ona se zrakom uklanja. Drugi način jest da tvorevinu preuzima drugi kalup na suprotnoj strani te ju prenosi na dodatno sušenje. Postupak omogućuje jednostavnu izradu proizvoda čime se ostvaruje konkurentnost na tržištu i fleksibilnost. Klasična strojna obrada kakvom se inače izrađuju kalupi za preradu papira, skupa je te kalupi dosežu cijenu i do 30 tisuća dolara, a za njegovu izradu je potrebno nekoliko tjedana. S druge strane, prosječan FDM kalup stoji 600 \$, a dostupan je unutar nekoliko dana s time da ima jako dobru proizvodnost, koja može biti čak do 30 000 jedinica proizvoda, što je dovoljan broj za ozbiljniju upotrebu postupka FDM. [18, 26]

8. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja postaje važan dio industrije zbog brojnih prednosti koje nosi sa sobom. Kao što je naglašeno u radu, najveća prednost je u tome što se uvelike skraćuje pripremne procese koji usporavaju proizvodnju. Ovdje se prije svega misli na izradu kalupa i operacije koje je na njemu potrebno izvesti prije nego se primijeni. CAD razvoj, simulacije, završna obrada i slično, faktori su koji poskupljuju proizvodnju i samim time krajnji proizvod.

Treba ipak naglasiti kako su nabrojane operacije neizostavne ukoliko se radi o velikoserijskoj proizvodnji, gdje aditivna proizvodnja ipak pokazuje određene nedostatke, pretežito zbog nedovoljno istraženih materijala, ali i male proizvodnosti koja je na taj način moguća. U ovom je radu naglasak stavljen na izradu kalupa te su s tim u vidu obrađivani oni postupci koji se mogu primjenjivati za izradu kalupa u kojim će se prerađivati kompoziti i polimeri. Postupci aditivne proizvodnje pokazali su se dobroj alternativu klasičnim postupcima baš zbog svoje jednostavnosti i velikih mogućnosti u pogledu geometrije tvorevina. Stoga se u situacijama kada su serije male i kada postoje zahtjevi za visoko personaliziranim proizvodima primjenjuju postupci obrađeni u ovom radu.

Najvažniji od postupaka izrade kalupa za preradu kompozita i polimera obrađenih u radu je postupak taložnog očvršćivanja. Ovaj je postupak najviše istražen te je njegova primjena velika. Primjenjuje se u automobilske industrije za izradu taljivih jezgri koje se primjenjuju za izradu cijevi. Također se upotrebljava i za izradu kalupa za ručno laminiranje i podtlačno oblikovanje, ali i za izradu kalupa koji se primjenjuju u preradi papirne mase. Važan je i postupak ispisivanja fotopolimera – PolyJet koji većinu primjene nalazi u izradi kalupa za injekcijsko prešanje i puhanje iz kojih proizlaze proizvodi vrlo dobre kvalitete.

Najvažniji faktor kod ovih postupaka jest materijal te je zaključak da je, za sada, najpovoljniji materijal ABS i njegove inačice, zbog dobre obradivosti i toplinskih svojstava, no ipak je vrlo bitno, kako bi se primjena ovih postupaka dodatno proširila,

nastaviti s istraživanjima i daljnjim razvojem materijala i postupaka i eventualnim novim mogućnostima njihove primjene, posebice u izradi kalupa.

9. LITERATURA

- [1] Ian Gibson, David W. Rosen, Brent Stucker: Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, 2010.
- [2] <https://www.instructables.com/id/5-Settings-to-Improve-Your-SLADLPLCD-3D-Print-Qual/>, 22.08.2019.
- [3] Pilipović, Ana: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
- [4] <https://www.stratasys.com/fdm-technology>, 05.09.2019.
- [5] Rupinder Singh, J. Paulo Davim: Additive Manufacturing Applications and Innovations, 2018.
- [6] <https://www.stratasys.com/materials/search/fdm-nylon-6>, 25.08.2019.
- [7] <https://grabcad.com/tutorials/how-to-prepare-a-3d-printed-composite-tool-for-use>, 05.09.2019.
- [8] L. Jyothish Kumar, Pulak M. Pandey, David Ian Wimpenny: 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies, 2017.
- [9] <https://www.stratasys.com/materials/search>, 05.09.2019.
- [10] <https://www.stratasys.com/materials/search/veroflex>, 22.08.2019.
- [11] <https://www.stratasys.com/materials/search/vero>, 25.08.2019.
- [12] Sanjay Mazumdar: Composites Manufacturing: Materials, Product, and Postupaks Engineering, 2001.
- [13] <https://www.stratasys.com/tooling/composite-tooling>, 2016.
- [14] <https://www.youtube.com/watch?v=yUAUaATqINw>, 25.07.2019.
- [15] <https://www.youtube.com/watch?v=HfrFaKDsJxc>, 25.07.2019.
- [16] Steve Thompson, Handbook of mold, tool and die repair welding, 1999.

- [17] <http://blog.stratasys.com/2015/01/08/porsche-3d-printing-soluble-cores/>
- [18] <https://prototypingsolutions.com/soluble-cores/>, 21.08.2019.
- [19] <https://www.ptonline.com/blog/post/3d-printed-plastic-molds-k-exhibit-would-make-you-a-believer>, 21.8.2019
- [20] <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/where-do-3d-printed-molds-make-sense>, 23.07.2019.
- [21] <https://www.stratasys.com/3d-printers/objet260-connex3>, 20.07.2019.
- [22] Digital ABS plus, Stratasys, 2016.
- [23] <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/the-right-design-material-and-machine-combination-takes-the-risk-out-of-3d-printing-molds>, 25.07.2019.
- [24] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printed-injection-molds-materials-compared>, 25.07.2019.
- [25] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/injection-blow-molding>, 30.08.2019.
- [26] <https://www.objective3d.com.au/solutions/additive-manufacturing/tooling/molded-fiber/>, 05.07.2019
- [27] <https://www.stratasys.com/materials/search/abs-m30i>, 30.08.2019.

10. PRILOZI

1. CD – R disc