

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Gašper TIČ

**ŠTUDIJ VPLIVA PROCESNIH PARAMETROV IN
POVRŠINSKE HRAPAVOSTI NA ADHEZIJO
MED KOMPONENTAMI PRI PRETISKU
TERMOPLASTIČNEGA POLIURETANA NA
BRIZGANE POLIAMIDNE PLOŠČE**

Diplomsko delo

Slovenj Gradec, september 2023

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**ŠTUDIJ VPLIVA PROCESNIH PARAMETROV IN
POVRŠINSKE HRAPAVOSTI NA ADHEZIJO
MED KOMPONENTAMI PRI PRETISKU
TERMOPLASTIČNEGA POLIURETANA NA
BRIZGANE POLIAMIDNE PLOŠČE**

Diplomsko delo

Študent:	Gašper TIČ
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentorica:	izr. prof. dr. Irena PULKO
Somentor:	asist. Janez SLAPNIK

Slovenj Gradec, september 2023

IZJAVA

Podpisani Gašper Tič izjavljam, da:

- je bilo predloženo diplomsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo diplomsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo diplomskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve diplomskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi diplomsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se vsem, ki so mi stali ob strani na kakršenkoli način. Posebej pa bi se zahvalil svoji partnerki Danaji, ki me je ves čas spodbujala in verjela vame, ter svoji hčeri Ivi, ki mi je bila največja motivacija. Zahvalil bi se tudi mentorici in somentorju za pomoč in podporo.

POVZETEK

Študij vpliva procesnih parametrov in površinske hrapavosti na adhezijo med komponentami pri pretisku termoplastičnega poliuretana na brizgane poliamidne plošče

Brizganje plastike je eden najbolj uporabljenih postopkov izdelave plastičnih izdelkov. Slabost brizganja je v tem, da smo geometrijsko omejeni in zato ne moremo izdelati izdelkov poljubnih geometrij. Rešitev za to težavo je v pretisku, kjer na brizgan izdelek s 3D tiskom izdelamo komponente običajno kompleksnih oblik, ki jih ne moremo izdelati s tehnologijo brizganja. Težava pri združitvi teh dveh tehnologij se pojavi pri adheziji med površinama. Če adhezija ni dovolj visoka, je izdelek neuporaben. V diplomskem delu smo proučevali vpliv parametrov pretiska in površinske hrapavosti brizganih izdelkov na adhezijo med komponentami. Termoplastična poliuretanska (TPU) rebra smo pretisnili na poliamidne (PA) plošče s tehnologijo izdelave s spajanjem filamentov (ang. fused filament fabrication (FFF)) pri različnih parametrih. Plošče treh različnih hrapavosti smo pretisnili pod konstantami parametri. Vpliv procesnih parametrov smo določili z variiranjem temperature taline, hitrosti tiskanja in temperature podlage z uporabo Box-Behnken načrta metode odzivne površine. Za določevanje adhezije smo uporabili trgalni test. Mikrostrukturo pretiskanih komponent smo ovrednotili z digitalno optično mikroskopijo. Iz dobljenih rezultatov smo ugotovili, da vsi procesni parametri vplivajo na adhezijo, medtem ko površinska hrapavost ni imela vpliva. Največji vpliv na adhezijo ima hitrost tiskanja in temperatura taline. Ugotovili smo, da je največja adhezija pri višji temperaturi taline, višji temperaturi podlage in nizki hitrosti tiskanja.

Ključne besede:

Brizganje, pretisk, termoplastičen poliuretan, poliamid, parametri.

SUMMARY

Influence of processing parameters and surface roughness on the adhesion between overprinted thermoplastic polyurethane components and injection moulded polyamide plates

Plastic injection molding is one of the most used plastic manufacturing processes. The disadvantage of injection molding is that we are geometrically limited and therefore cannot produce products of arbitrary geometries. The solution to this problem is in overprinting, where components of usually complex shapes are produced on the injected product with 3D printing, which cannot be produced using injection technology. The problem with combining these two technologies is the adhesion between the surfaces. If the adhesion is not high enough, the product is useless. In the thesis, we studied the influence of the overprinting parameters and the surface roughness of the injected products on the adhesion between the components. Thermoplastic polyurethane (TPU) ribs were overprinted on polyamide (PA) plates using fused filament fabrication (FFF) technology at various parameters. Plates of three different roughness were overprinted under constant parameters. The influence of process parameters was determined by varying the melt temperature, print speed and substrate temperature using the Box-Behnken plot of the response surface method. A tear test was used to determine adhesion. The microstructure of overprinted components was evaluated using digital optical microscopy. From the obtained results, we found that all process parameters affect adhesion, while surface roughness had no effect. Printing speed and melt temperature have the greatest influence on adhesion. We found that the greatest adhesion is at a higher melt temperature, higher substrate temperature and a low printing speed.

Keywords:

Injection molding, overprinting, thermoplastic polyurethane, polyamide, parameters.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen in cilj diplomskega dela	1
1.2	Hipoteze ali trditve	2
1.3	Omejitve	2
1.4	Metode dela	2
2	TEORETIČNI DEL	3
2.1	Brizganje plastike	3
2.2	Prebrizgavanje	4
2.3	Dodajalna izdelava	4
2.4	Hibridne dodajalne tehnologije	5
2.5	Pretisk	6
2.6	Polimerne medpovršine in adhezija	7
2.7	Termoplastičen poliuretan (TPU)	7
2.8	Poliamid	9
3	EKSPERIMENTALNI DEL	11
3.1	Materiali	11
3.2	Pretisk plošč	11
3.3	Karakterizacija	13
3.3.1	Trgalni test	13
3.3.2	Digitalna optična mikroskopija	15
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	16
4.1	Vpliv hrapavosti substrata na adhezijo	16
4.2	Vpliv parametrov 3D tiska na adhezijo	16
4.2.1	Vpliv parametrov na povprečno napetost trganja	17
4.2.2	Vpliv parametrov 3D tiskanja na standardni odklon	20
4.3	Digitalna optična mikroskopija	22
5	SKLEP	25
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	26
	SEZNAM SLIK	27
	SEZNAM TABEL	28
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	29
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	30

1 UVOD

Danes se ogromno polimernih izdelkov proizvede s postopkom brizganja. To je zapleten postopek, pri katerem veliko različnih parametrov vpliva na lastnosti končnih izdelkov. Potrebno je obsežno znanje in razumevanje delovanja brizgalnega stroja ter vpliva posameznih parametrov na končen produkt. Brizganje je zanimivo predvsem zato, ker omogoča zelo hitro in množično izdelavo izdelkov. Za brizganje izdelkov je potrebno izdelati orodje, ki je narejeno za specifičen izdelek. Prednost je v tem, da ko je orodje enkrat izdelano, se lahko z njim brizgajo ogromne serije, tudi do več sto tisoč izdelkov. Brizganje poteka v štirih glavnih fazah, in sicer plastificiranje, zapolnjevanje, hlajenje in izmetavanje [1].

Glavna slabost brizganja je, da smo omejeni z geometrijo možnih izdelkov, saj bolj kompleksnih ne moremo izdelati, ker jih ni možno razkalupiti. Zaradi te pomanjkljivosti brizganja prihaja v zadnjem času zmeraj bolj v ospredje 3D tiskanje polimernih izdelkov. Pri 3D tiskanju se izdelki izdelujejo z nanašanjem materiala po plasteh. Velika prednost 3D tiskanja polimernih izdelkov je v tem, da za to tehnologijo ne potrebujemo nobenega orodja ali kalupov, ampak lahko izdelamo izdelek neposredno iz 3D modela. 3D izdelek z uporabo namenske programske opreme »razrežemo na plasti« in ustvarimo datoteko, ki vsebuje ukaze po katerih 3D tiskalnik po plasteh natisne izdelek. 3D tisk je zelo uporaben za izdelavo prototipov, saj omogoča hitro in preprosto izdelavo izdelkov različnih geometrij. Včasih ni bilo mogoče narediti prototipov brez izdelave prototipnega orodja ali postopkov izdelave z odrezovanjem, kar je običajno zamudno in stroškovno neučinkovito. Danes se lahko prototipi enostavno in cenovno ugodno izdelajo s 3D tiskalnikom. Torej imamo prototip narejen zelo hitro in lahko preverimo vse, kar nas zanima. Čeprav ima 3D tisk določene prednosti pred brizganjem, se v veliki večini 3D tisk uporablja skoraj izključno za izdelavo prototipov. Problem implementacije 3D tehnologije v industrijo je predvsem v tem, da je izdelava počasna v primerjavi z drugimi tehnologijami. Izdelki imajo lahko slabše lastnosti, kot če bi jih naredili z drugimi tehnologijami [2].

1.1 Namen in cilj diplomskega dela

Namen našega diplomskega dela je bil določiti vpliva procesnih parametrov in površinske hrapavosti na adhezijo med komponentami. PA plošče smo pretiskali s TPU s tehnologijo FFF. Pri tem smo opazovali, kako vplivajo hitrost tiska, temperatura taline, temperatura poliamidne ploščice in površinska hrapavost substrata na adhezijo. Procesne parametre smo variirali z Box-Behnken metodologijo načrtovanja eksperimentov. Na univerzalnem stroju za preizkušanje mehanskih lastnosti smo določali adhezijo med komponentami s trgalnim testom. Izdelke smo si ogledali tudi z digitalno optično mikroskopijo.

Glavni cilj je bil določiti, pri katerih parametrih dosežemo najvišjo adhezijo med PA 6 ploščo ter pretiskanim TPU.

Sprotni cilji dela so bili:

- priprava eksperimentalnega načrta z Box-Behnken metodologijo;
- pretisk TPU reber na poliamidne plošče pod različnimi pogoji;
- določanje adhezije s trgalnim testom;
- statistična analiza podatkov.

1.2 Hipoteze ali trditve

Predpostavljali smo, da bomo s pretiskom TPU na PA plošče dosegli zadostno adhezijo za izvedbo trgalnih testov.

Predvidevali smo, da se z:

- višanjem temperature taline adhezija zviša;
- višanjem hitrosti tiska adhezija zniža;
- višanjem temperature substrata adhezija zviša.

1.3 Omejitve

Ocenili smo, da se bodo omejitve pri diplomski nalogi se pokazale pri pretisku materiala pri različnih parametrih. Težave smo pričakovali pri previsoki temperaturi taline pretiska, saj bi se takrat lahko material degradiral. Pri prenizki temperaturi pretiska pa smo ocenili, da obstaja možnost, da je adhezija preslaba in zato ni mogoče izvesti trgalnega testa.

1.4 Metode dela

Tekom priprave diplomskega dela smo:

- zbirali, pregledali in študirali literaturo s področja brizganja plastike, dodajalne izdelave, polimernih medpovršin in pretiska TPU na PA površine;
- izdelali preizkušance s pretiskom;
- določili adhezijo s trgalnim testom;
- zbirali podatke in kako procesni parametri ter hrapavost vplivajo na adhezijo;
- ovrednotili dobljene rezultate.

Ploščice smo pretiskali pri različnih parametrih v laboratoriju Fakultete za tehnologijo polimerov, z uporabo 3D tiskalnika Creality Ender 3. Adhezijo med komponentami smo določili z univerzalnim strojem za preizkušanje mehanskih lastnosti Shimadzu Ag-X plus 10kN. Komponente smo si bolj podrobno ogledali pod optičnim mikroskopom Keyence VHX 7000.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Brizganje plastike

Brizganje plastike je zapleten postopek in za brizganje dobrih izdelkov je potrebno veliko znanja. Stroj za brizganje je sestavljen iz več enot in vsaka služi svojemu namenu. Posluževalec stroja mora vedeti, kako posamezni parametri vplivajo na izdelek, ki se brizga, ter pod katerimi pogoji bo lahko nabrizgal najboljši možen izdelek [1].

Postopek brizganja plastike je ena glavnih tehnologij predelave polimernih materialov, s katero lahko izdelamo izdelke iz materiala, ki je po navadi v obliki granulata. Za industrijo ima postopek brizganja plastike zelo pomembno vlogo zaradi visoke kakovosti izdelkov ter visoke produktivnosti. Pravilno nastavljeni ter vzdrževani stroji običajno obratujejo skoraj neprestano. Brizgalni stroji temeljijo na tehnologiji batnega stroja, ki ga je leta 1872 razvil John Wesley Hyatt, in polžnega stroja iz leta 1951, ki ga je razvil William H. Willert. Sodobni brizgalni stroji omogočajo spremljanje in optimizacijo delovanja stroja ter potek delovnega procesa. Omogočajo vključitev v industrijo 4.0, saj lahko beležimo vse parametre brizga ter jih obdelujemo in ugotavljamo, kje se lahko proces še izboljša [3].

Pri brizganju govorimo o ciklih brizganja. Cikel je razdeljen na štiri faze: plastificiranje, zapolnjevanje, hlajenje in izmetavanje. Cikel brizganja se začne, ko je orodje odprto ter so vsi parametri nastavljeni tako, kot zahteva izdelek. Pred začetkom brizganja mora biti orodje temperirano na pravo temperaturo. Sprva poteka faza plastificiranja, v kateri se granulata preko dovodnega sistema dovede v segret cilinder, v katerem je polž, ki se vrtili okoli svoje osi. Zaradi temperature cilindra in vrtenja polža se granulata zaradi delovanja strižnih sil in temperature plastificira, torej preide v tekoče stanje, kar omogoča vbrizg v orodje. Material se po cilindru pomika proti šobi ter nato iz šobe preko dolivnega sistema do orodne votline. Pri brizganju izdelkov moramo na polimerno talino delovati z dodatnim tlakom, da lahko dovolj dobro zapolnimo orodno votlino in tako dobimo dobre izdelke. Tekom brizganja je potrebno nadzorovati več tlakov, kot sta na primer brizgalni in naknadni tlak. Brizgalni tlak je tlak, s katerim delujemo na material, ko ga potisnemo skozi šobo v orodje. Z brizgalnim tlakom zapolnimo približno 95 % orodne votline, nakar začnemo delovati z naknadnim tlakom, ki je praviloma 80 % brizgalnega tlaka. Naknadni tlak omogoči, da se orodna votlina dokončno zapolni, ter da dobimo lepe izdelke. Naknadni tlak lahko deluje samo tako dolgo, dokler dolivek ne zamrzne. Ko je orodna votlina zapolnjena, se začne hlajenje izdelka. Čas hlajenja je odvisen od izbire materiala in izvedbe hladilnih kanalov v orodju. Če imamo bolj kompleksne izdelke, lahko čas hlajenja močno vpliva na končno geometrijo, saj se lahko zaradi temperaturnih razlik po površini orodne votline izdelek popači. Med hlajenjem izdelka polž začne plastificirati novo maso v cilindru, da je pripravljena na novi brizg. Ko se izdelek dovolj ohladi, se orodje odpre in nabrizgan

izdelek se s pomočjo izmetalnega sistema izmeče [4]. Čas cikla $t(c)$ se izračuna po enačbi 1:

$$t(c) = t(z) + t(t) + t(h) + t(iz) \quad (1),$$

pri čemer je:

- $t(z)$ - čas zapiranja orodja (s),
- $t(t)$ - čas delovanja brizgalnega tlaka in čas delovanja naknadnega tlaka (s),
- $t(h)$ - čas dodatnega hlajenja izdelka v orodju (s),
- $t(iz)$ - čas odpiranja in izmetavanja izdelka iz orodja (s).

2.2 Prebrizgavanje

V današnjem času se uporablja veliko večkomponentnih izdelkov, ki so narejeni iz plastičnega in gumijastega dela. Prednost večkomponentnih izdelkov je, da zaradi uporabe različnih materialov dobimo dodatne funkcije, kot bi jih lahko dosegli z uporabo posameznih materialov. Tovrstne izdelke običajno izdelamo s tehnologijo prebrizgavanja, oziroma večkomponentnega brizganja [5].

Prebrizgavanje je tehnologija brizganja, pri kateri uporabimo dva ali več materialov, da naredimo končni izdelek. Največkrat prebrizgavamo plastični del izdelka z gumo. Prvi nabrizgani komponenti rečemo substrat, nanj se prebrizga druga komponenta. Tako imamo lahko substrat iz plastičnega materiala, prebrizgamo pa ga z gumo. Sprva se je prebrizgavanje uporabljalo za boljšo estetiko izdelkov, danes pa se uporablja tudi za izboljšanje lastnosti izdelkov. S prebrizgavanjem lahko izboljšamo kemijsko odpornost, elektro izolativnost ter izdelamo boljši oprijem na izdelku [5].

Eden najbolj tipičnih razlogov za prebrizgavanje je izboljšanje oprijema na izdelku. S prebrizgavanjem lahko zagotovimo, da izdelki obdržijo svoje mehanske lastnosti in sočasno izboljšamo oprijem. To se uporablja pri različnih izdelkih, kot so izvijači ali kirurška oprema [5].

Pri prebrizgavanju je potrebna dovolj dobra adhezija, da se komponente držijo skupaj. Pri kvalitetno prebrizganih izdelkih, se ta prej zlomi, kot pa da bi se razplastil. Določeni materiali imajo zaradi svoje kemijske sestave zelo dobro adhezijo. Imamo pa materiale, ki imajo med sabo slabšo adhezijo, takrat se substrat obdela, da omogočimo mehansko vezavo med komponentami. Tako nadomestimo potrebo po kemijski vezi in zagotovimo dovolj dobro adhezijo [5].

2.3 Dodajalna izdelava

Dodajalna izdelava, znana tudi kot 3D tiskanje, je proces izdelave izdelkov z nanosom materiala v plasteh, namesto tradicionalnega odvzemanja materiala, kot pri oblikovanju s struženjem ali rezkanjem. 3D tiskanje zahteva 3D model izdelka, ki ga razrežemo na plasti, ki se nanašajo ena za drugo in tako nastane izdelek [2].

Dodajalna izdelava se je komercialno pojavila prvič leta 1987 kot stereolitografija (ang. stereolithography (SLA)). Čeprav se je dodajalna izdelava pojavila par desetletij nazaj, se je standardizirala šele v zadnjem desetletju in jo lahko razvrstimo na sedem kategorij: (1) kapljično nanašanje veziva, (2) nalaganje z usmerjeno energijo, (3) ekstruzija materiala, (4) kapljično nanašanje materiala, (5) spajanje v praškasti postelji, (6) laminacija pol in (7) fotopolimerizacija v kadi. Odvisno od vrste dodajalne izdelave je lahko material, ki se uporablja, v obliki smole, filamenta ali prahu. Pri različnih tehnologijah se uporabljajo različne oblike materiala. Med najbolj pogosto uporabljenimi materiali za 3D tiskanje so akrilonitril butadien stiren (ABS), polimlečna kislina (PLA), polivinil alkohol (PVA), TPU in poliamid (PA) V zadnjem času se je pojavilo veliko zanimanje za uporabo materialov z različno trdoto (od mehkih do zelo trdih materialov), ki se lahko uporabljajo na različnih področjih [2].

Izdelke zahtevnih geometrij je težko narediti s konvencionalnimi tehnologijami in je lahko zelo drago. Pred dodajalno izdelavo so se termoplastični izdelki izdelovali večinoma z brizganjem. Problem pri brizganju je, da ni smiselno brizgati majhnih serij, ker je strošek prevelik. Za majhne serije se pogosto uporablja dodajalna izdelava, saj ni potrebno izdelovati orodja. Proizvajalci uporabljajo obe tehnologiji odvisno od tega, koliko izdelkov želijo izdelati. Velike serije se običajno brizga, za majhne serije pa se uporabi dodajalna izdelava. Danes lahko z dodajalno izdelavo izdelamo zelo zahtevne izdelke z veliko natančnostjo in ponovljivostjo. Za geometrijsko najbolj zahtevne izdelke se pogosto uporablja svetlobno občutljiva akrilna in epoksidna smola [2].

Dodajalna izdelava se uporablja na zelo različnih področjih. Zelo lahki izdelki se uporabljajo v podmorniški in letalski industriji, v medicini se dodajalna izdelava uporablja za izdelavo organov in tkiv. Uporablja se tudi v zobozdravstvu za izdelavo protetičnih izdelkov, skrajša čas izdelave izdelka iz nekaj tednov na nekaj ur. Čeprav ima dodajalna izdelava veliko prednosti se moramo zavedati, da ima tudi svoje slabosti. V najbolj zahtevnih inženirskih strokah morajo biti izdelki brezhibni in zdržati velike sile, temperature in pritiske. Posledično morajo biti izdelki brez napak ter v primeru 3D tiskanja zelo dobro izdelani. Probleme predstavljajo predvsem unikatne geometrije izdelkov, heterogenost materiala, strukturna stabilnost ter trdnost [2].

2.4 Hibridne dodajalne tehnologije

Kljub hitremu razvoju dodajalnih tehnologij v zadnjih desetletjih, se le-te še vedno ne uporabljajo množično za industrijske namene. Vzroka sta počasna izdelava izdelkov in nižja kvaliteta. Da bi odpravili slabosti dodajalnih tehnologij, se poskuša pri izdelavi izdelkov uporabiti še druge tehnologije. Hibridizacija tehnologij je lahko rešitev za odpravo omenjenih izzivov in povečanje uporabe dodajalnih tehnologij v industriji [6].

Glavne slabosti hibridne dodajalne tehnologije izhajajo iz dodajalne tehnologije same. To sta počasna izdelava in slaba površina, ki ju lahko z uporabo drugih tehnologij odpravimo. Površino lahko po tiskanju obdelamo in na ta način dobimo boljši izdelek.

Kljub različnim možnostim se hibridne dodajalne tehnologije trenutno skoraj izključno uporabljajo za prototipiranje izdelkov [6].

Ker se material nanaša po plasteh, se to na izdelku odraža v slabši površini, zato se hibridne dodajalne tehnologije osredotočajo predvsem na izboljšanje le-te. V ta namen se uporabljajo dodatne tehnologije, ki pogladijo ter izboljšajo površino izdelkov [6].

2.5 Pretisk

V današnjem času sta brizganje plastike in 3D tiskanje med najbolj pomembnimi procesi za izdelavo plastičnih izdelkov. Vsaka tehnologija ima svoje prednosti in slabosti. Pri brizganju je velika prednost v tem, da se lahko v kratkem času nabrizga velike količine izdelkov in je zato brizganje cenovno ugodno. Pri brizganju plastike se mora za vsak izdelek posebej izdelati orodje, s tem pa so povezani tudi stroški. Kompleksna orodja so lahko zelo velik strošek za podjetje, zato se pri brizganju izdelkov po navadi izdelajo le za velike serije. Brizganje je tudi omejeno s samo geometrijo končnega izdelka, saj so lahko določeni izdelki preveč kompleksni in jih enostavno s tehnologijo brizganja ne moremo narediti. Pri 3D tiskanju je velika prednost v tem, da ne potrebujemo nobenega orodja, torej nimamo stroškov z izdelavo orodja. Prav tako nas geometrija ne ovira pri dizajniranju izdelka, saj se pri 3D tisku izdelek izdelava z nanašanjem materiala po plasteh in je lahko končni izdelek poljubne oblike. Res je, da so včasih potrebne podporne strukture, odvisno od izbrane tehnologije 3D tiska, vendar je to zanemarljivo, saj se lahko podporne strukture po končanem tiskanju odstranijo. 3D tiskanje se uporablja predvsem za izdelavo individualnih izdelkov ali manjših serij, saj je za izdelavo enega izdelka v primerjavi z brizganjem potrebno veliko več časa. 3D tiskanje se uporablja na različnih področjih, kjer pridejo prav prednosti te tehnologije. Čeprav ima 3D tehnologija kar nekaj prednosti pred brizganjem, se moramo zavedati, da je za industrijsko rabo še vedno okrnjena, predvsem zaradi dolgotrajne izdelave izdelkov ter slabših mehanskih in vizualnih lastnosti kot pri brizganih kosih. V industriji se trenutno uporablja skoraj izključno za izdelavo konceptnih prototipov ter za hitro prototipiranje, saj ni potrebno izdelati orodja, preden lahko izdelek nabrizgamo [7].

Pretisk je hibridna tehnologija, ki združuje dobre lastnosti brizganja in dobre lastnosti 3D tiskanja. Temelji na principu, da se en del končnega izdelka nabrizga, kar omogoči visoko količino izdelkov, nato se na brizgan kos pretisne manjkajoči del, ki je geometrijsko preveč zahteven za brizganje. Na ta način odpravimo slabosti posameznih tehnologij. Zaradi brizganja prve komponente končnega produkta lahko zagotovimo veliko količino izdelkov, po drugi strani pa lahko s 3D tiskanjem ostalih komponent naredimo končni izdelek zahtevnih geometrij, ki jih z brizganjem ne bi bilo možno izdelati [6].

Pri 3D tiskanju je težava v tem, da je izdelek narejen iz plasti in lahko pride do napak na površinah med plastmi. Če ne zagotovimo dobre adhezije med plastmi, se lahko

izdelek razplasti in postane neuporaben, zato je potrebno dobro znanje o 3D tisku, da lahko izdelamo kakovostne izdelke [6].

2.6 Polimerne medpovršine in adhezija

Adhezija je interatomska in intermolekularna interakcija na stiku površin. Gre za multidisciplinaren pojav, ki ga opisujeta kemija in fizika. Adhezija med dvema materialoma potrebuje močno površinsko interakcijo, ki jo lahko izboljšamo tako, da uporabimo takšne kemijske skupine, ki med sabo reagirajo in tvorijo kovalentne, Wan der Waalove ali vodikove vezi. Obstaja več modelov in teorij o mehanizmih adhezije, vendar še vedno ni popolnoma razumljena. Iz raziskav je razvidno, da ni samo enega odgovora na to vprašanje, ampak na adhezijo vpliva skupek večih dejavnikov [8].

Medpovršina je pojem, ki se uporablja za površino, ki je med dvema slojema ali med površino nabrizgane komponente in površino natisnjene komponente. Pri pretisku si želimo čim boljše interakcije med površinami, saj lahko na ta način zagotovimo dobro adhezijo med komponentama in tako naredimo dober izdelek. Adhezija lahko poteka po različnih mehanizmih [8]. Poznamo sledeče mehanizme:

- Mehansko spenjanje. Deluje na principu, da adheziv zapolni nepravilnosti na površini substrata, kar povzroči adhezijo. Pri mehanskem spenjanju je razlog za adhezijo hrapavost površine in fizično prepletanje plasti med sabo.
- Molekulsko povezovanje je največkrat uporabljena razlaga za adhezijo med dvema površinama. Zaradi medmolekulskih interakcij med substratom in adhezivom, kot so Wan der Waalove sile, interakcije med dipoli in kemijske interakcije, pride do adhezije med površinami. Za kemijsko povezovanje morajo biti površine zelo blizu, saj drugače do teh interakcij ne pride. Bližina še ne zagotavlja dobre adhezije, saj lahko zaradi napak na površini ali napačnih kemijskih skupin pride do slabe adhezije, kljub bližnjemu stiku površin.
- Termodinamična adhezija temelji na predpostavki, da vsi materiali želijo znižati svojo energijo ter da je posledično interakcija med takšnimi površinami vzrok za adhezijo. Mehanskemu spenjanju in molekulskemu povezovanju pripisuje zanemarljivo majhno vlogo pri adheziji [9].

Adhezijo med površinami lahko tudi izboljšamo s predhodno obdelavo s kemijskimi snovmi ali s plazmo. S tema metodama se na površinah pojavijo nove funkcionalne skupine ali radikali, ki omogočajo tvorbo novih vezi med površinami in tako omogočijo boljšo adhezijo [8].

2.7 Termoplastičen poliuretan (TPU)

Termoplastični poliuretan (TPU) je vrsta polimernega materiala, ki spada v skupino termoplastov. Nastane pri poliadiciji diizocianata in enega ali več diolov. Prvič je bil sintetiziran leta 1937, je zelo raznolik po lastnostih in uporabi. Posebnost TPU-ja je v tem, da ima zelo različne lastnosti, odvisno od uporabljenih diizocianatov in diolov.

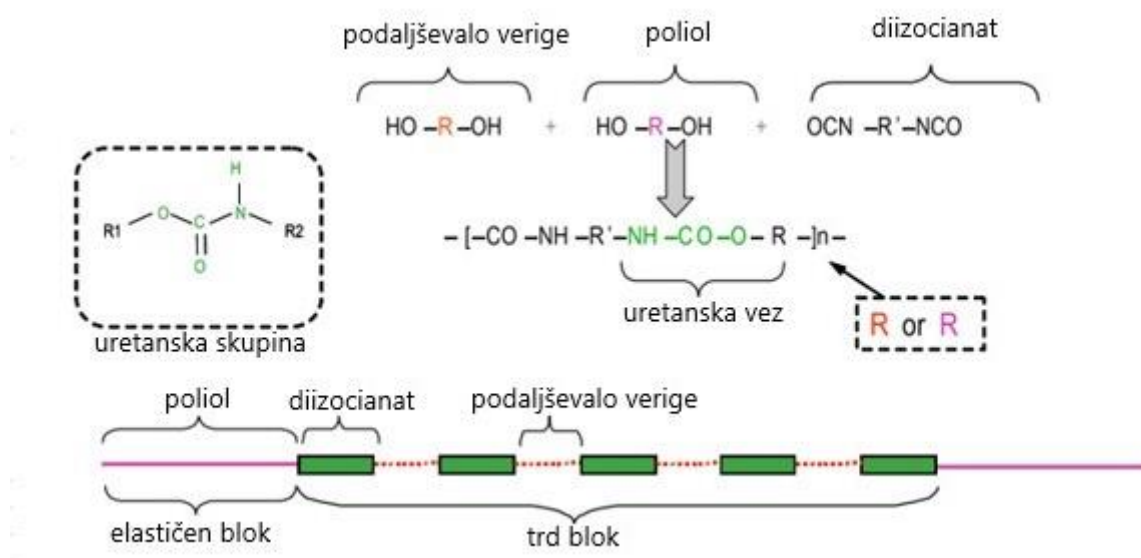
Lahko ga večkrat predelamo in ne izgubi strukturnih lastnosti. Uporabi se lahko kot inženirski polimer, ki ga enostavno deformiramo, ali služi kot nadomestilo za trdo gumo. Je zelo fleksibilen material, ki ga lahko predelujemo z brizganjem in ekstruzijo. Uporablja se za izdelavo obutve, kablov, žic, cevi, itd. Poznamo tri glavne vrste TPU:

- Poliester TPU je kompatibilen s PVC-jem in drugimi polarnimi polimeri. V takšni obliki so odporni na olja in kemikalije ter na obrabo.
- Polieter TPU se manj uporablja, kot ostale vrste, vendar ima dobro odpornost na obrabo. Prav tako je odporen na mikrobe in zelo odporen na hidrolizo, zato je primeren za uporabo v vodnem okolju.
- Polikaprolakton TPU ima dobre mehanske lastnosti kot poliester TPU in veliko odpornost na hidrolizo kot polieter TPU. Je idealen material za hidravlične in pnevmatske izdelke [9].

TPU je večfazni blokkopolimer, ki nastane, ko združimo tri materiale na določen način. Posamezne komponente za sintezo TPU-ja so:

- poliol ali dolgoverižni diol,
- podaljševalo verige ali kratkoverižni diol,
- diizocianat.

Na sliki 1 je prikazana sestava TPU-ja.



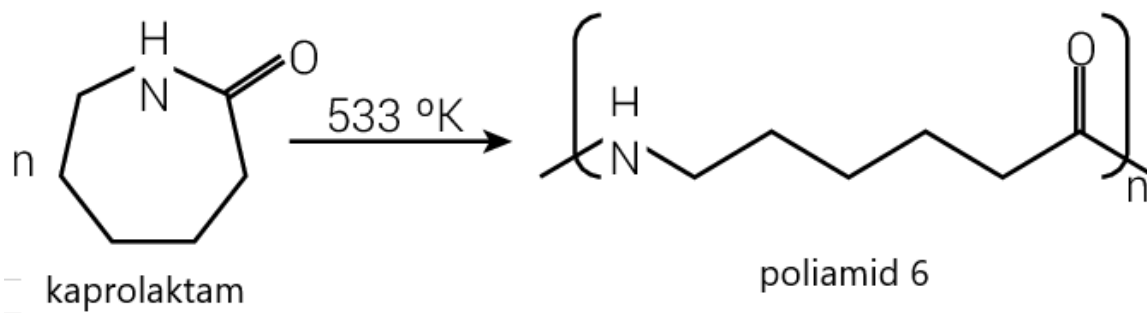
Slika 1: Sestava TPU

TPU ima zelo dobre fizikalne lastnosti. Zanimivost pri TPU-ju je, da lahko njegova trdota sega od materiala, podobnega gumi, in vse do polioksimetilena (POM). Ima visoko elastičnost, torej se po prenehanju sile povrne v prvotno stanje. Zato se TPU pogosto uporablja v elastičnih trakovih, zapestnicah in športni opremi. Uporablja se tudi v drugih industrijah, kot so avto industrija, medicina, tekstilna industrija. Kemijska odpornost na kisline in baze ni pretirano dobra, odporen je samo na razredčene

raztopine kislin ali baz. Zelo odporen je na olja, masti in lubrikante, v katerih obdrži svoje mehanske lastnosti. Glavna pomanjkljivost TPU-ja je slaba UV obstojnost. Ob podaljšanem izpostavljenosti UV svetlobi postane material krhek in izgubi svoje mehanske lastnosti. Slabost je tudi zahtevna reciklaža TPU-ja, ker je sestavljen iz kombinacije različnih polimerov, ki jih je med sabo težko ločiti [9].

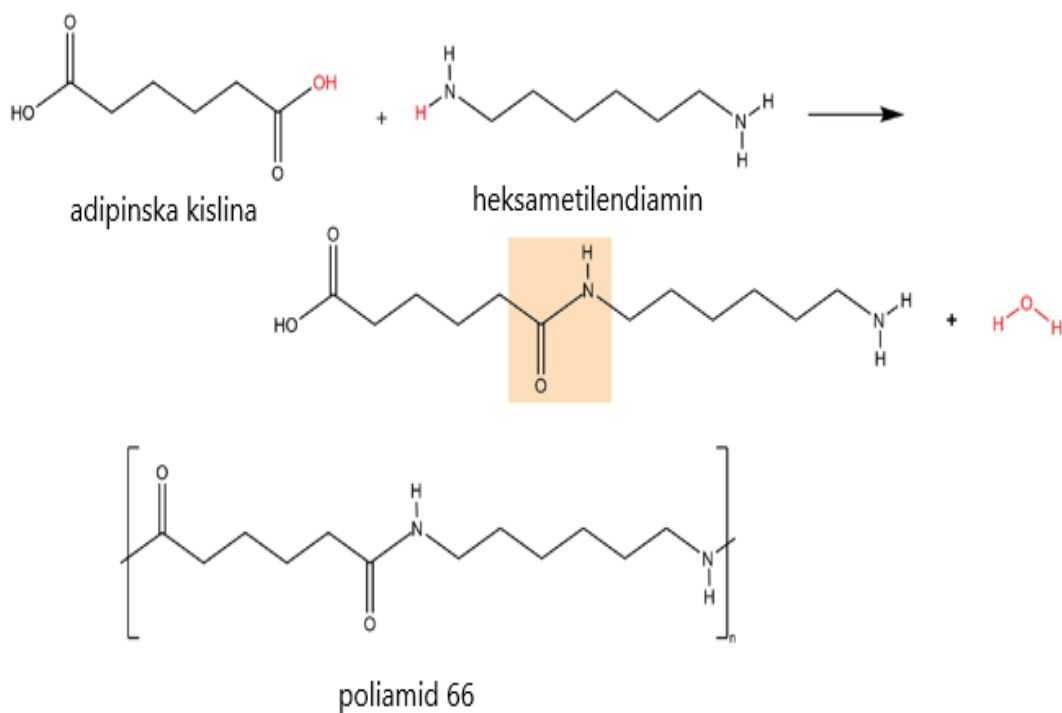
2.8 Poliamid

Leta 1938 so v DuPont-u iz poliamida naredili ščetine za zobne krtačke. To je bil prvi komercialni izdelek iz poliamida. Od petdesetih let prejšnjega stoletja vse do leta 2000 je rastla vsakoletna uporaba poliamida za izdelavo plastičnih slamice. Slamice iz poliamida so v tem obdobju predstavljale več kot 25 % delež vsega uporabljenega poliamida. Poliamidi so bili prve inženirske plastike in še danes so med najbolj pomembnimi materiali tega tipa. Zaradi izjemno dobrih mehanskih in toplotnih lastnosti se uporabljajo na najbolj zahtevnih področjih, kjer pogosto nadomestijo kovinske dele. Poznamo več vrst poliamidov, odvisno, iz katerih monomerov so sestavljeni. Čeprav je več vrst, sta zagotovo največ v uporabi poliamid 6,6 in poliamid 6, ki skupaj obsegata 90 % vseh uporabljenih poliamidov. Ko se je razvijal material, sprva poliamid 6,6 in nato poliamid 6, so bile v ospredju predvsem njegove izjemne fizikalne lastnosti. Namen tega materiala je bil, da bi iz njega naredili vlakna, ki bi jih lahko uporabili za izdelavo oblačil. V ta namen so bile najbolj pomembne lastnosti trdota, elastičnost in visoka zmogljivost obarvanja. Hitro je postalo jasno, da ima ta material številne lastnosti, ki so zaželeno v industriji plastike. Visoka trdnost, visoko tališče in dobra kemijska odpornost omogočijo širok razpon uporabe. Pri izbiri materiala je pomembno, iz katerih monomerov sintetiziramo polimer, saj na ta način reguliramo lastnosti končnega materiala. Visoka temperaturna odpornost je posledica močnih vodikovih vezi v polimeru in njegove delno kristalinične strukture. Zaradi dobre termične stabilnosti so se začeli poliamidi vedno več uporabljati v avto industriji, kjer zamenjujejo kovinske dele, ki morajo zdržati visoke temperature. Zelo značilna lastnost poliamidov je ta, da zelo dobro absorbirajo vodo. Vzrok za dobro absorpcijo je prisotnost polarnih amidnih skupin, okoli katerih se lahko vežejo molekule vode. Če poliamid vsebuje več vlage, potem je bolj prožen, če pa vsebuje manj vlage, pa je bolj tog. Zaradi delno kristalinične strukture ima večina poliamidov zelo visoko trdnost. Slabost poliamida je slaba odpornost na abrazijo in drgnjenje, prav tako je slabo obstojen pod UV svetlobo. Ker dobro absorbira vodo, lahko pride do poslabšanja mehanskih lastnosti materiala. Končnemu izdelku omogoči močno podlago in tako poskrbi za dobro odpornost proti deformacijam, kar zagotovi dober končni izdelek. Poznamo več vrst poliamidov, odvisno od monomernih enot, iz katerih je sestavljen polimer. Tako je na primer poliamid 6,6 sintetiziran iz heksametilendiamina in adipinske kisline. Poimenovaje poliamidov se nanaša na število ogljikovih atomov v monomerni enoti. S spreminjanjem monomernih enot se spreminjajo tudi lastnosti poliamida. Poliamid 6 pa se sintetizira iz ene vrste monomera, in sicer iz kaprolaktama [10]. Pri polimerizaciji se molekula razkrene in preide iz ciklične strukture v linearno. Shematski prikaz je na sliki 2.



Slika 2: Sinteza poliamida 6 iz kaprolaktama

Na sliki 3 je prikazana sinteza in kemijska struktura poliamida 6,6 [11].



Slika 3: Sinteza in kemijska struktura poliamida 6,6

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Materiali

Pri pretisku smo uporabili TPU filament, ki ga izdelujejo v Plastika Trček, d.o.o. Po podatkih proizvajalca ima TPU trdoto po Shore-u 89A. Priporočeni parametri tiska so:

- temperatura šobe: 230 °C - 250 °C,
- temperatura podlage: 20 °C - 60 °C,
- hitrost tiskanja: 10 mm/s - 30 mm/s.

Filament smo natisnili na poliamidne plošče (oblika skladna s standardom ISO 294-4), ki so bile predhodno nabrizgane v orodne votline z različnimi teksturami (oznake R6, R18 in R30 po standardu VDI 3400) in so imele različne hrapavosti. Material je bil Akulon K222-D natural, proizvaja ga DSM Engineering Materials, Nizozemska. Lastnosti materiala so sledeče:

- indeks tečenja: 185 cm³/10min (5 kg, 275 °C),
- gostota: 1130 kg/m³,
- temperatura taljenja: 220 °C.

Dimenzije nabrizganih plošč so bile 60 mm x 60 mm x 4,5 mm.

3.2 Pretisk plošč

Glavni cilj diplomske naloge je bil pretisk TPU na poliamidne plošče in ugotavljanje adhezije med njima. Sam eksperimentalni del je bil sestavljen tako, da smo spremljali, kako parametri brizganja vplivajo na adhezijo. Zato smo naredili trinajst vzorcev iste hrapavosti ter dva vzorca različne hrapavosti, pri katerih smo uporabili različne parametre pretiska. Spreminjali smo temperaturo taline (T_{talina}) ter temperaturo plošče ($T_{plošča}$) in hitrost tiska začetnih slojev (v_{isk}). Pretisk je potekal na 3D printerju Creality Ender 3 V2 Neo, prikazan na sliki 4, uporabljena programska oprema je bila UltiMaker Cura 5.3.0.



Slika 4: 3D tiskalnik Creality Ender 3-neo

Poliamidne plošče smo na podlago pritrdili z uporabo lepila v spreju. Na sredini podlage smo označili mesto, na katerega smo pritrdili ploščice. Tako smo zagotovili, da se rebra vedno natisnejo na sredino plošče.

Parametre brizganja smo določili po Box-Behnken metodi. Za načrtovanje eksperimenta in interpretacijo rezultatov smo uporabili program Minitab v19.2020.1. Območje za nastavitve parametrov pretiska smo določili glede na lastnosti uporabljenega TPU filameta. Konstantni parametri 3D tiska so podani v tabeli 1. Na podlagi vnosa robnih pogojev parametrov, je programska oprema podala različne parametre pretiska za naših trinajst vzorcev pri isti hrapavosti. Vzorce, ki so bili izdelani na ploščah različnih hrapavosti, smo natisnili pod srednjimi vrednostmi variranih parametrov. V tabeli 2 je prikazan seznam vzorcev, izdelanih pod različnimi parametri 3D tiska.

Tabela 1: Konstantni parametri 3D tiska

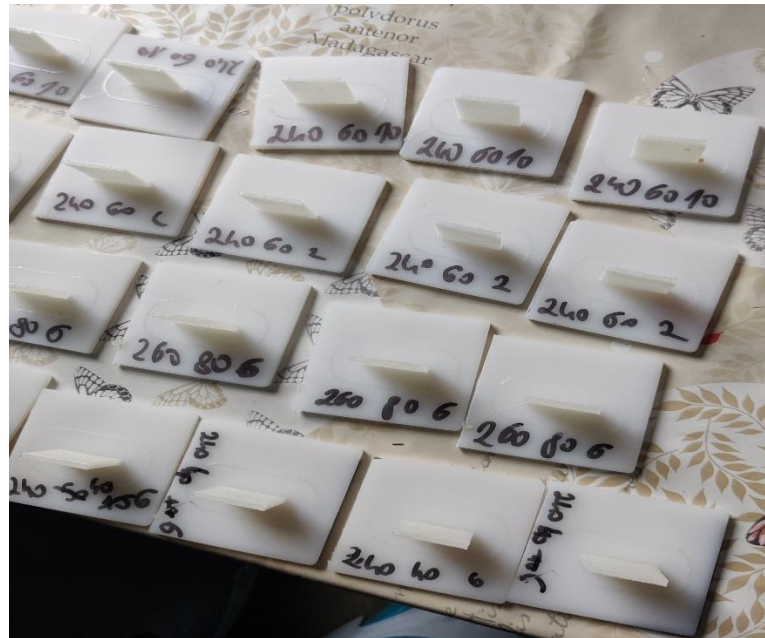
Procesni parameter	Vrednosti in enote
Premer šobe	0,4 mm
Višina plasti	0,28 mm
Gostota polnila	100 %
Vzorec polnila	Črte
Širina črte	0,4 mm
Debelina stene	0,8 mm
Ventilator	Izklopljen
Hitrost tiska nadaljnjih	20 mm/s
Število začetnih slojev	2

Tabela 2: Seznam vzorcev, izdelanih pod različnimi parametri 3D tiska

Št. vzorca	Oznaka hrapavosti	Temperatura taline (°C)	Temperatura plošče (°C)	Hitrost tiska (mm/s)
1	R6	240	40	6
2	R6	250	60	6
3	R6	250	40	10
4	R6	250	80	2
5	R6	260	80	6
6	R6	240	80	6
7	R6	240	60	2
8	R6	260	60	10
9	R6	250	40	2
10	R6	260	40	6
11	R6	260	60	2
12	R6	240	60	10
13	R6	250	80	10
14	R18	250	60	6
15	R30	250	60	6

Pred začetkom pretiska smo poliamidne plošče namestili na podlago ter ploščo segrevali tako dolgo, dokler ni dosegla predpisane temperature. Temperaturo PA plošč

smo preverili z brezkontaktnim infrardečim termometrom RAY 31.1136 (TFA Dostmann GmbH & Co. KG). Tako smo zagotovili pravilne parametre pretiska. Vsako ploščo smo označili, pod kakšnimi parametri je bila pretisnjena, da ne bi prišlo do zmešnjave. Označene pretisnjene plošče so vidne na sliki 5.



Slika 5: Označene pretisnjene plošče

3.3 Karakterizacija

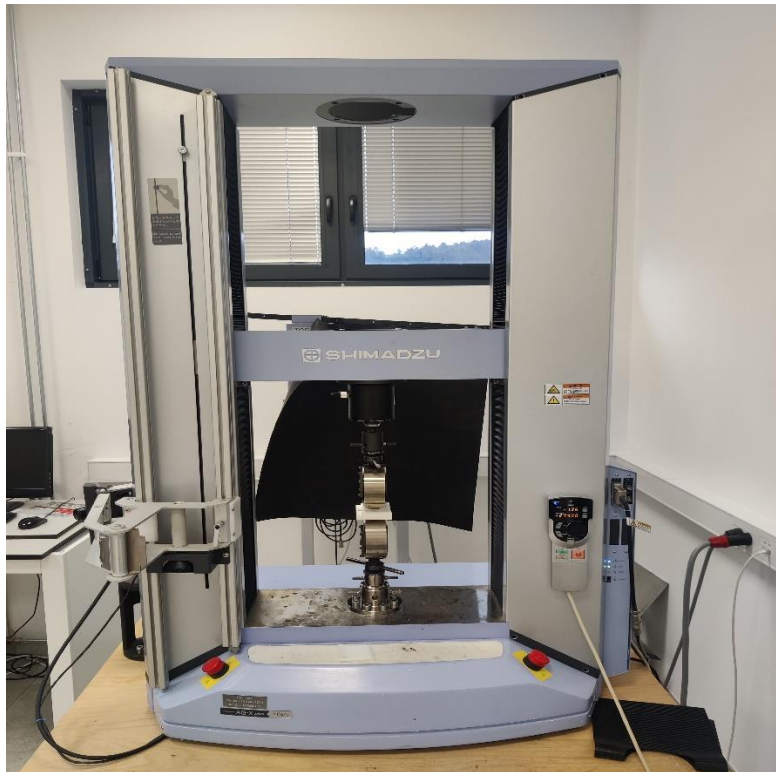
Za karakterizacijo naših vzorcev smo uporabili dve tehniki. To sta bili trgalni test in optična mikroskopija.

3.3.1 Trgalni test

Je temeljni mehanski preizkus, pri katerem preizkušane raztezamo, običajno do porušitve in pri tem spremljamo nastalo silo ter pomik. S trgalnim testom lahko spremljamo lastnosti materiala, kot so raztezek ob pretrgu, natezna trdnost, napetost ob pretrgu in elastični modul. Za večino preizkušancev se uporabi enoosna napetost za izvedbo testa [11].

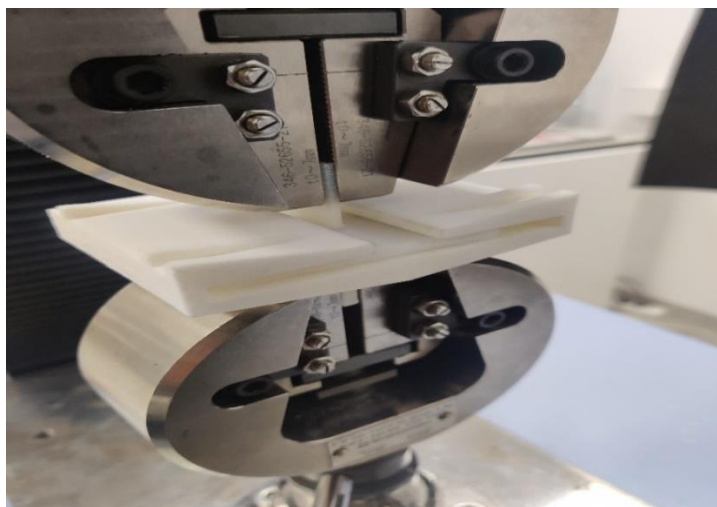
Vzorci, ki se uporabljajo pri testu, so narejeni po standardu in so odvisni od metode testiranja. Pri vzorcih je najbolj pomemben konstanten sredinski presek. Tako oblikovani vzorci omogočajo, da se pretrgajo na sredinskem ožjem delu [11].

Test se je izvajal na trgalnem stroju Shimadzu AG-X Plus 10 kN, to je napredni instrument, ki se uporablja za testiranje mehanskih lastnosti materialov. Na sliki 6 je prikazan trgalni stroj Shimadzu AG-X Plus 10kN.



Slika 6: Trgalni stroj Shimadzu AG-X Plus 10 kN

Vzorci smo v trgalni stroj vpeli s pomočjo priprave, v katero smo vstavili vzorce. Nato smo pripravo vpeli v stroj, v spodnjo čeljust smo vpeli pripravo, v zgornjo čeljust pa pretisnjeno rebro. Vpetje vzorcev je prikazano na sliki 7. Vzorec smo vpeli tako, da je bila rebra na sredini čeljusti, da je lahko sila delovala enakomerno. Uporabljena razdalja med podporami je bila 25 mm. Pri testiranju smo uporabili prednapetje s silo 0,5 N in s tem zagotovili, da so bili vsi vzorci enakomerno vpeti in pripravljeni na merjenje. Pri preizkusu nas je zanimala predvsem napetost pretrga, saj smo iz te vrednosti lahko ugotovili, kako se potrebna sila pretrga spreminja glede na parametre.



Slika 7: Vpetje priprave in vzorca v trgalnem stroju

3.3.2 Digitalna optična mikroskopija

Digitalna optična mikroskopija (DOM) je revolucionirala analiziranje različnih vplivov na površino izdelkov. Zaradi sposobnosti pridobivanja in obdelave visokokakovostnih slik s pomočjo računalnika lahko boljše interpretiramo dobljene rezultate različnih vplivov na izdelek. S pomočjo digitalne mikroskopije lahko določimo, kakšna je površina izdelka, če je prisotna kakšna nepravilnost in prav tako nam pomaga pri ugotavljanju vzroka nepravilnosti. Lahko pogledamo površino ob poružitvi izdelkov ter ugotavljamo, kje in zakaj pride na določenem mestu do poružitve, ter kakšen vpliv ima le-ta na mikrostrukturo izdelka. Digitalna optična mikroskopija je nepogrešljiva tehnika pri analiziranju izdelkov in materiala [12].

Digitalna optična mikroskopija (DOM) deluje na principu potovanja svetlobnega žarka skozi zaporedje optičnih elementov z uporabo matrice. Pridobljeni rezultati se s pomočjo računalnika in uporabe algoritmov dodatno obdelajo. Tako dobimo boljše ostrino slike in možnost spreminjanja jakosti osvetlitve. Prednost je tudi v obdelavi slike s pomočjo računalnika in v hitrem shranjevanju dobljenih rezultatov [12].

Za karakterizacijo smo uporabili tudi mikroskopijo, in sicer digitalni optični mikroskop Keyence VHX 7000, prikazan je na sliki 8. To je digitalni mikroskop, ki s pomočjo leče VH-ZST omogoča povečave od 20x do 2000x. Za karakterizacijo smo uporabili 20x povečavo. Mikroskop nam omogoča tudi različne vrste osvetlitve naših vzorcev. Uporabili smo odbojno svetlobo ter spreminjali smer svetlobe, da so bili vzorci različno osvetljeni. To nam je omogočilo boljše karakterizacijo naših vzorcev, saj smo lepše videli nalaganje plasti ter morebitne napake na rebrih.



Slika 8: Digitalni mikroskop Keyence VHX 7000

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

4.1 Vpliv hrapavosti substrata na adhezijo

Pri hrapavosti površine smo predpostavili, da večja, kot je hrapavost, boljša je adhezija med TPU in poliamidom. Zaradi hrapave površine je na enakem območju večja stična površina kot pri gladki površini, kar izboljša adhezijo. Zaradi hrapavosti lahko pride med materialoma tudi do mehanskega spenjanja, kjer se deli materiala prepletejo med sabo in tako dodatno izboljšajo adhezijo. Večja, kot je stična površina med materialoma, večje medsebojne sile lahko nastanejo. Če je med materialoma prostor zaradi nepravilnosti, lahko tja zaidejo tujki, ki lahko slabo vplivajo na adhezijo med materialoma. V teh prostorih se nahaja zrak, ki lahko oksidira polimerni medpovršini in na ta način spremeni kemijsko strukturo polimera in tako povzroči slabo adhezijo. Iz eksperimentalnega dela je razvidno, da smo imeli tri vzorce, ki so se razlikovali v hrapavosti. Iz tabele 3 je razviden vpliv hrapavosti na povprečno napetost pri pretrgu ter standardno deviacijo. Iz tabele vidimo, da smo pri vzorcih dobili malenkost višjo adhezijo pri najnižji hrapavosti, in sicer 0,372 MPa pri hrapavosti R6. Napetosti pri pretrgu sta bila pri hrapavosti R18 in R30 skoraj identična, in sicer sta znašali 0,328 oz. 0,324 MPa. Ta rezultat je v nasprotju s pričakovanimi rezultati, saj smo pričakovali, da bo pri višji hrapavosti boljša adhezija. Se pa moramo zavedati, da je razlika v adheziji zelo majhna, prav tako moramo biti pozorni na standardni odklon. Kot lahko vidimo, so standardni odkloni pri naših meritvah zelo visoki, zaradi tega naše meritve nimajo statistične pomembnosti. Iz dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da pri pretisku TPU-ja na PA plošče hrapavost nima bistvene vloge pri adheziji.

Tabela 3: Odvisnost povprečne napetosti trganja in standardnega odklona od hrapavosti

Hrapavost	Povprečna napetost pri pretrgu (MPa)	Standardni odklon (MPa)
R6	0,372	0,140
R18	0,328	0,119
R30	0,324	0,166

4.2 Vpliv parametrov 3D tiska na adhezijo

Predpostavili smo, da bodo parametri 3D tiska vplivali na adhezijo med materialoma. Poleg vpliva nas zanimajo tudi najboljši parametri za pretisk in kakšen je vpliv posameznih parametrov na pretisk. V tabeli 4 so razvidni posamezni vzorci, njihove povprečne vrednosti in standardni odkloni. Iz dobljenih rezultatov v tabeli je razvidno, da se povprečne vrednosti in standardni odkloni spreminjajo, torej iz tega sklepamo, da so spremembe danih parametrov vplivale na adhezijo. Če pogledamo povprečne vrednosti trganja, vidimo, da imamo precej večjo vrednost pri vzorcih 4 in 11. Če pogledamo parametre, pri katerih sta bila pretisnjena, vidimo, da sta bila oba vzorca tiskana pri hitrosti 2 mm/s in temperaturi 260 °C. Vzorci z najnižjo povprečno napetostjo trga so bili pretisnjeni pri višjih hitrostih in nižjih temperaturah taline. Pri standardnem

odklonu vidimo, da izstopa vzorec 11, ki ima najvišjo povprečno vrednost. Vzrok za visok odklon je lahko v visokih vrednostih povprečne napetosti trganja. Določeni vzorci so imeli dobro adhezijo in visoke vrednosti napetosti pri pretrgu, medtem ko so se lahko pri nekaterih vzorcih pojavile napake pri tisku prvega sloja, kar se je odražalo v nižjih vrednostih za določene preizkušance in posledično visok standardni odklon. Iz rezultatov je razvidno, da spremembe v parametrih povzročijo spremembo v adheziji.

Tabela 4: Povprečna napetost trganja in standardni odklon vzorcev

Številka vzorca	Povprečna napetost pri pretrgu (MPa)	Standardni odklon (MPa)
1	0,250	0,049
2	0,325	0,166
3	0,301	0,114
4	0,841	0,252
5	0,611	0,304
6	0,208	0,117
7	0,493	0,090
8	0,486	0,148
9	0,539	0,055
10	0,367	0,164
11	0,831	0,368
12	0,224	0,052
13	0,367	0,097

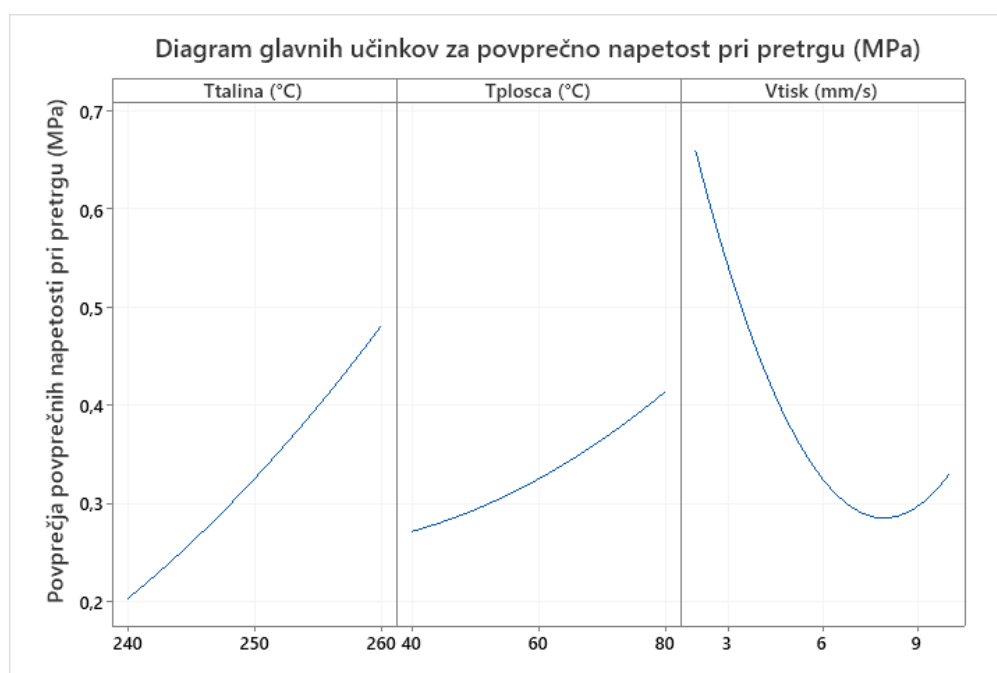
4.2.1 Vpliv parametrov na povprečno napetost trganja

Pri vplivu parametrov nas zanima, kateri faktorji (parametri) imajo statistično pomemben vpliv na adhezijo in kakšen je vpliv statistično pomembnih faktorjev. Za določitev statistično pomembnih faktorjev smo izvedli analizo variance. Stopnja značilnosti (α) je znašala 0,05. Tabela 5 predstavlja stopnje pomembnosti (P-vrednosti) za posamezne faktorje. Podatke iz tabele se interpretira sledeče. Na levi strani tabele vidimo vse faktorje, ki smo jih preučevali. Poleg tega tabela poda tudi možnosti kombinacij vpliva faktorjev (interakcije) na adhezijo. Vsi faktorji, pri katerih je P-vrednost manjša od 0,05 so statistično pomembni. Iz tega sledi, da so temperatura taline, temperatura plošče in hitrost tiska parametri, ki vplivajo na adhezijo, in so statistično pomembni. Prav tako je iz tabele 5 razvidno, da imamo kombinacije različnih vplivov in njihovo statistično pomembnost. Vidimo, da imata od kombinacije parametrov statistični pomen hitrost tiska*hitrost tiska in temperatura taline*temperatura plošče. Ostale kombinacije parametrov za nas nimajo statističnega pomena, saj je njihova P-vrednost višja od 0,05. Vidimo, da vsi posamezni parametri vplivajo na adhezijo, pri kombinaciji parametrov pa nimajo vsi statističnega pomena. Prav tako vidimo, da ne vplivajo vsi parametri v enaki meri.

Tabela 5: Vpliv parametrov tiskanja na povprečno napetost trganja

Parameter	P-vrednost
Temperatura taline (°C)	0,003
Temperatura plošče (°C)	0,019
Hitrost tiska (mm/s)	0,002
Temperatura taline (°C) * Temperatura taline (°C)	0,598
Temperatura plošče (°C) * Temperatura plošče (°C)	0,579
Hitrost tiska (mm/s) * Hitrost tiska (mm/s)	0,010
Temperatura taline (°C) * Temperatura plošče (°C)	0,046
Temperatura taline (°C) * Hitrost tiska (mm/s)	0,394
Temperatura plošče (°C) * Hitrost tiska (mm/s)	0,072

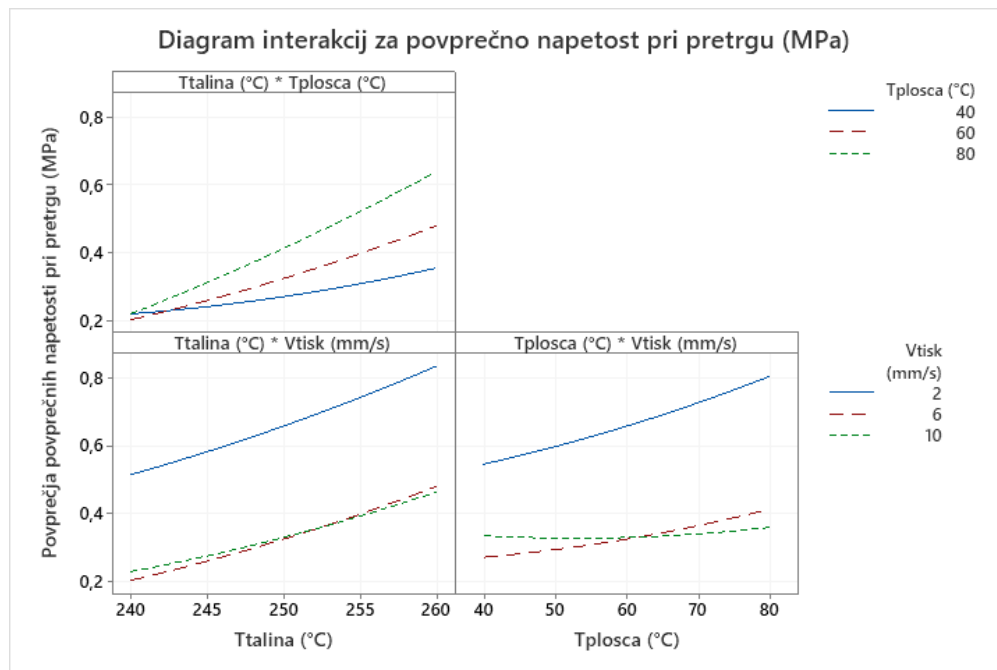
Iz tabele 5 so razvidne P-vrednosti parametrov, nižja kot je ta vrednost, večjo statistično pomembnost ima parameter. Torej, če pogledamo tabelo 5, vidimo, da ima hitrost tiska največjo pomembnost, skoraj enako pomembnost ima temperatura taline, najmanjšo pa ima temperatura podlage. Spreminjanje vrednosti parametrov sovпада z našimi predpostavkami, kako parametri vplivajo na adhezijo. Vpliv parametrov je razviden s slike 9.



Slika 9: Diagram glavni učinki za povprečno napetost pri pretrgu

Iz diagrama na sliki 9 je razviden vpliv posameznih parametrov na adhezijo. Bolj, kot je graf strm in večja, kot je razlika med povprečnimi vrednostmi, večji je vpliv parametra na adhezijo. Če se najprej osredotočimo na hitrost tiska, smo ugotovili, da je pri manjši hitrosti tiska večja adhezija. Ta rezultat je smiseln, ker je pri manjši hitrosti tiska, material dlje časa izpostavljen grelnim elementom, kar omogoči, da se material pravočasno segreje na željeno temperaturo, in je ob nanosu na podlago prave

temperature. Zaradi nižje hitrosti premikanja se lahko sloji lepše nanašajo eden na drugega, in ne pride pri nanosu do napak. Z diagrama je lepo razvidno, kako adhezija pada z višanjem hitrosti. Je pa zanimiv rezultat viden od hitrosti 8mm/s dalje, saj se adhezija začne večati. Menimo, da je pri rezultatih prišlo najverjetneje do napake, saj bi se adhezija morala vedno manjšati. Pri temperaturi taline vidimo, da ima manjši vpliv na adhezijo kot hitrost tiska. Vidimo, da je pri višji temperaturi taline boljše adhezija, razlogov za to je več. Talina pri višji temperaturi, ki pride v stik s polimerno podlago, lahko površino ob stiku raztali. Če pride do talitve polimerne podlage, se lahko talina in podlaga boljše spojita med sabo. Tako pride do višje molekulske difuzije in prepletanja. Prav tako je bolj segreti talina manj viskozna, to ji omogoča, da lahko ob stiku s podlago bolje zapolni morebitne luknje in nepravilnosti na podlagi. Posledično pride do boljšega mehanskega stika, kar izboljša adhezijo. Podobni razlogi, kot pri temperaturi taline, držijo tudi za temperaturo podlage. Če ima polimerna podlaga višjo temperaturo, se bo ob stiku s talino lažje raztalila, kar bo omogočilo boljše adhezijo. V našem eksperimentu je imela polimerna podlaga manjši vpliv, ker je bila temperatura površine bistveno manjša od temperature taline. Vidimo, da če znižamo hitrost tiska, se adhezija poveča, če povečamo temperaturo taline in temperaturo podlage, se nam prav tako adhezija poveča. Pri visoki hitrosti in nizki temperaturi taline in podlage je adhezija slabša. Iz diagrama je tudi razvidno, da sta temperatura taline in temperatura podlage v linearni korelaciji z adhezijo, torej višja, kot je temperatura, višja je adhezija. Pri hitrosti tiska pa je adhezija nelinearno odvisna od hitrosti. To pomeni, da ne moremo nedvoumno predpostaviti, da je pri nižji hitrosti vedno boljše adhezija. Iz dobljenih rezultatov lahko trdimo, da je adhezija linearno odvisna od hitrosti tiska do hitrosti 6 mm/s. Dobljeni rezultati so potrdili našo hipotezo o najboljših parametrih za pretisk. Če želimo imeti dobro adhezijo in posledično uspešen pretisk, moramo izdelke tiskati pri nizki hitrosti in pri visoki temperaturi. Poleg posamičnega vpliva parametrov na adhezijo, lahko iz tabele razberemo tudi medsebojni vpliv parametrov na pretisk. Pri teh vplivih pride zaradi kombinacije parametrov do boljše adhezije, kot bi prišlo sicer. Pri danih kombinacijah vidimo, da imata statistični vpliv samo kombinacija temperature taline in temperature podlage ter kvadrat hitrosti tiska, ker je P-vrednost pod 0,05. Ta interakcija med parametri je tudi smiselna, kot smo že prej omenili, se lahko adhezija poveča z višjo temperaturo, saj se takrat polimera raztalita, in pride do boljše prepletenosti ter kemijske interakcije. Na sliki 10 je prikazan diagram interakcij parametrov med sabo in njihov vpliv na adhezijo.



Slika 10: Diagram interakcij za povprečno napetost pri pretrgu

Iz diagrama na sliki 10 je razvidno, kateri parametri vplivajo eden na drugega in kateri ne. Na zgornjem levem diagramu na sliki 10 je prikazan vpliv interakcij med temperaturo taline in temperaturo plošče na napetost pri pretrgu. Višja, kot je temperatura plošče pri enaki temperaturi taline, višja bo adhezija. Zanimivo je, da je pri nizki temperaturi taline najvišja adhezija pri nizki temperaturi plošče, nato pa se z višanjem temperature taline vzpostavi takšno razmerje, kot smo ga pričakovali. Na sliki 10 je na spodnjem levem diagramu prikazan vpliv interakcij med temperaturo taline in hitrostjo tiska, na desni pa med temperaturo plošče in hitrostjo 3D tiska. Obe interakciji imata P-vrednosti nad 0,05, kar pomeni, da nista statistično pomembni.

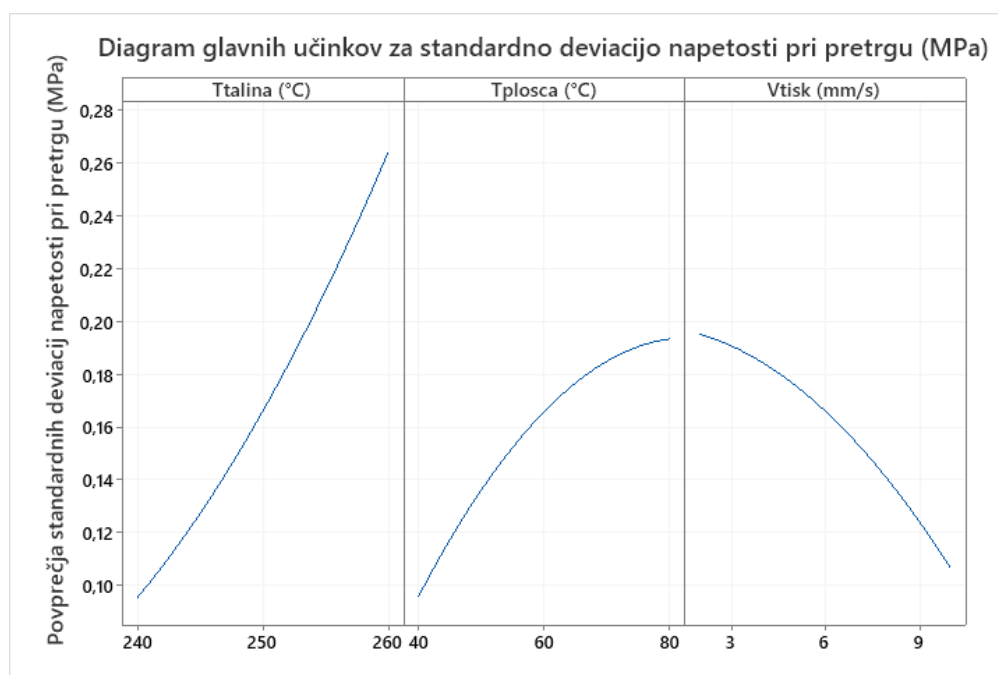
4.2.2 Vpliv parametrov 3D tiskanja na standardni odklon

Pri preučevanju vpliva parametrov pa ne smemo gledati samo na povprečne vrednosti napetosti trganja, ampak moramo vzeti v obzir tudi standardni odklon pri meritvah. Standardni odklon daje vpogled v odstopanja med tiskanimi kosi, kako ponovljiv je proces, ter če pride med samim procesom do velikih nihanj med izdelki. Tako kot pri povprečni vrednosti, moramo tudi pri standardnem odklonu preučiti vpliv posameznih parametrov. Zanima nas, če vsi parametri vplivajo na raztros, ter kako močno vplivajo posamezni parametri. Iz tabele 6 je razviden standardni odklon posameznih vzorcev v odvisnosti od parametrov tiskanja. P-vrednost nam pove, kateri parametri imajo statistični pomen. Da je vpliv parametra statistično uporaben, mora biti njegova P-vrednost manjša od 0,05.

Tabela 6: Vpliv parametrov tiskanja na standardni odklon vzorcev

Parameter	P-vrednost
Konstanta	0,020
Temperatura taline (°C)	0,007
Temperatura plošče (°C)	0,033
Hitrost tiska (mm/s)	0,042
Temperatura taline (°C) * Temperatura taline (°C)	0,610
Temperatura plošče (°C) * Temperatura plošče (°C)	0,447
Hitrost tiska (mm/s) * Hitrost tiska (mm/s)	0,579
Temperatura taline (°C) * Temperatura plošče (°C)	0,401
Temperatura taline (°C) * Hitrost tiska (mm/s)	0,090
Temperatura plošče (°C) * Hitrost tiska (mm/s)	0,062

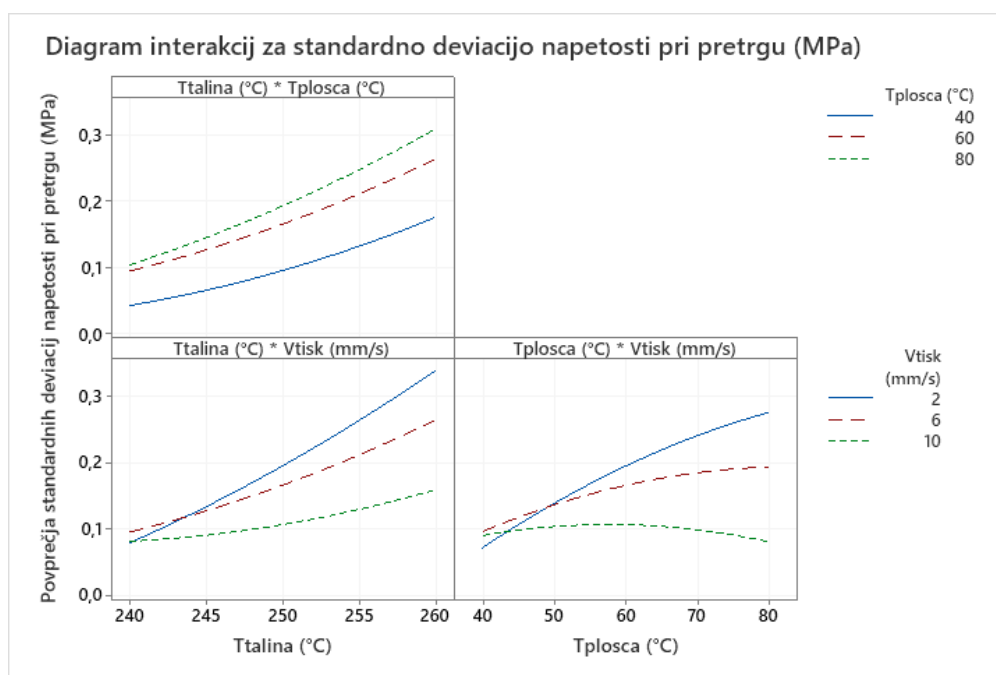
Iz tabele 6 je razvidno, da imajo naši parametri vsi P-vrednost pod 0,05 in so zato statistično pomembni ter vplivajo na adhezijo. S slike 11 je razviden vpliv posameznih parametrov na adhezijo.



Slika 11: Diagram glavnih učinkov za standardno deviacijo napetosti pri pretrgu

Vidimo lahko, da je standardni odklon pri temperaturi taline najvišji. Prav tako opazimo, da standardni odklon linearno narašča z višanjem temperature. To pomeni, da je višji odklon pri višjih temperaturah. Razlog za to je v povprečnih vrednostih napetosti pri pretrgu. Ker smo videli, da imajo vzorci pri višji temperaturi taline višjo povprečno vrednost, iz tega sledi, da je posledično tudi standardni odklon višji. Če imamo enak procentualni standardni odklon, bomo pri višji povprečni vrednosti dobili višji odklon, čeprav bo procentualno enak, kot bi bil odklonu pri nižjih temperaturah. Opazimo tudi, da ima prav temperatura taline najvišji vpliv na standardni odklon, enako kot na povprečno vrednost. Pri temperaturi plošče vidimo, da imamo pri višji temperaturi višji

standardni odklon, razlog za to je enak kot pri temperaturi taline. Vendar iz diagrama vidimo, da nam pri temperaturi plošče standardni odklon ne raste linearno, ampak se nam naklon počasi manjša. Iz tega lahko sklepamo, da čeprav se nam standardni odklon do določene temperature večja, doseže pri temperaturi okoli 80°C svoj maksimum in predpostavljamo, da bi pri višji temperaturi podlage standardni odklon bil podoben. Pri hitrosti tiska vidimo podobno kot pri temperaturi podlage. Ker imamo pri nižjih temperaturah višjo silo ob pretrgu, je tudi standardni odklon višji. Pregledati pa moramo še medsebojni vpliv parametrov na standardni odklon. Na sliki 12 je viden diagram interakcij za standardno deviacijo napetosti pri pretrgu. Vse interakcije imajo P-vrednost nad 0,05 in niso statistično pomembne. Najnižjo P-vrednosti (0,062) ima interakcija med temperaturo plošče in hitrostjo tiska, ki je prikazana na desnem spodnjem diagramu. Kljub temu, da analiza variance ni pokazala statistične pomembnosti glede na izbrano vrednost α , se nakazuje trend, da pri višjih vrednostih temperature plošče standardna deviacija napetosti pri pretrgu narašča z nižanjem hitrosti tiska. Možna razlaga za to je, da imajo določeni preizkušanci pri teh pogojih relativno visoke vrednosti napetosti pri pretrgu zaradi močne adhezije, medtem ko je pri določenih preizkušancih prišlo do predčasnega pretrga zaradi napak med sloji.

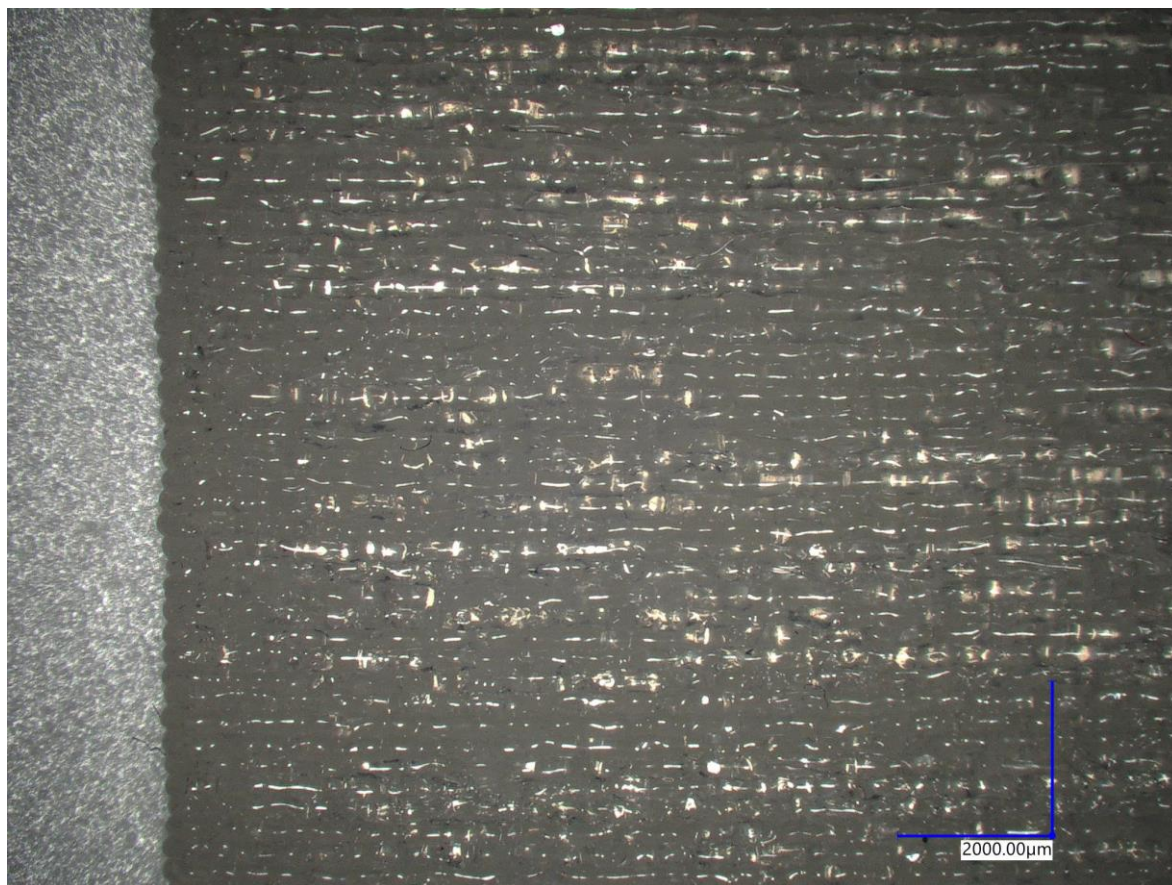


Slika 12: Diagram interakcij za standardno deviacijo napetosti pri pretrgu

4.3 Digitalna optična mikroskopija

Zaradi odlične povečave mikroskopa je bilo omogočeno podrobno pregledati rebro in ugotovljati morebitne napake pri tiskanju. Ugotovili smo, da se pri nižjih temperaturah tiskanja material lepše zloga po plasteh, lepo je razvidno, kje je posamezna plast. Ker so temperature materiala nižje, se lahko predhodna plast dovolj ohladi, da ob nanosu naslednja plast ne steče mimo, ampak ostane na mestu. Vzrok je tudi večja viskoznost

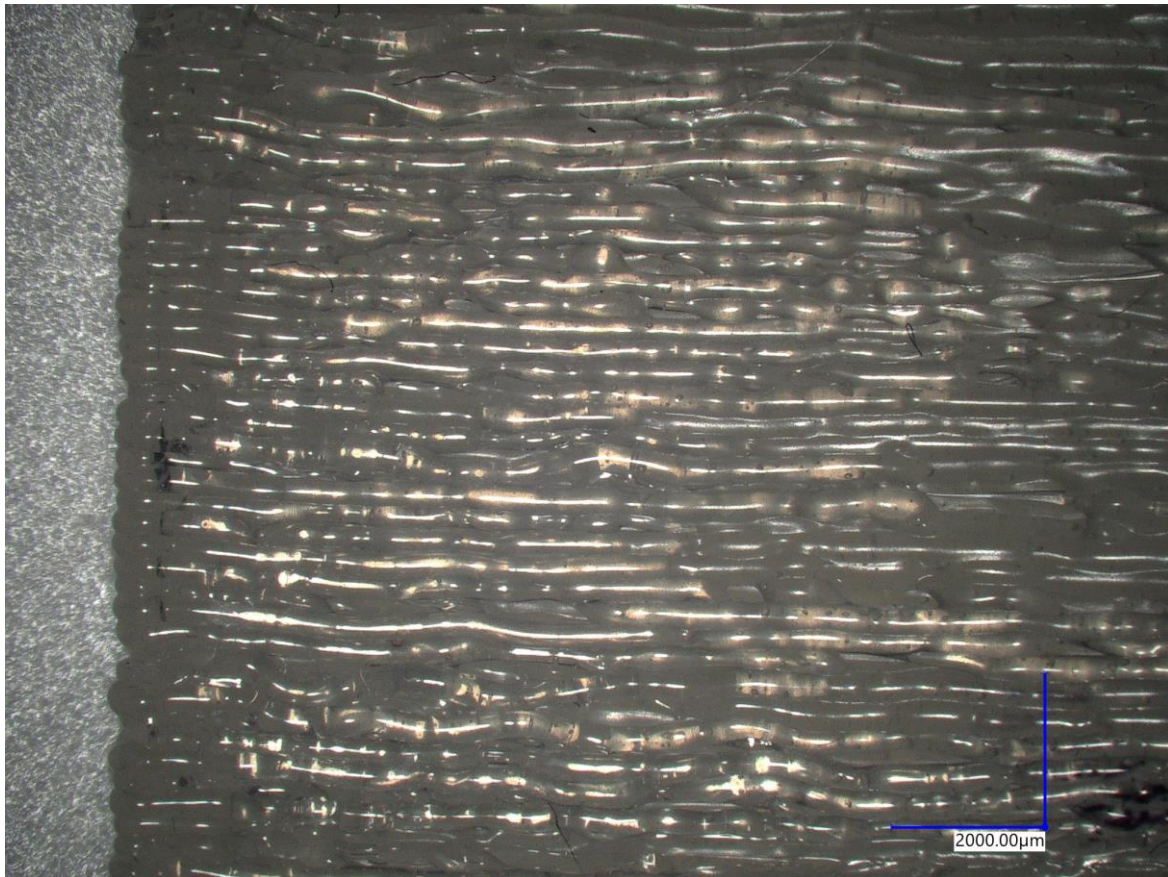
taline pri nižjih temperaturah. Nalaganje plasti vzorca brizganega pri 240 °C je lepo razvidno s slike 13.



Slika 13: Mikroskopska slika TPU rebre natisnjene pri 240°C

S slike vidimo, kako se plasti nalagajo ena na drugo, opazimo lahko, da se na določenih mestih pojavlja preliv plasti. Vidimo tudi, da je rob rebre lepo natisnjen in so majhna odstopanja v širini.

Pri vzorcu, natisnjenem pri višjih temperaturah, vidimo, kako material teče in je težje določiti plasti, saj se zaradi nizke viskoznosti material razlije po predhodni plasti. Digitalni mikroskop Keyence omogoča tudi različno osvetljenje našega izdelka, zato lahko lepše vidimo vzorec ter pod različno svetlobo opazujemo druge podrobnosti. Tako lahko boljše karakteriziramo morebitne napake na kosu ter kaj bi lahko bil vzrok za razliko v adheziji. Na sliki 14 je vzorec natisnjen pri temperaturi 260°C, na rebri se vidijo napake na izdelku.



Slika 14: Mikroskopska slika TPU rebre natisnjene pri 260°C

S slike vidimo, da v je vzorec v primerjavi z vzorcem, natisnjenem pri 240°C, bolj prelit. Vidimo, da se plasti slabše nalagajo ena na drugo in da se ob nanosu nove plasti ta delno razlije čez rob predhodne plasti. Prav tako vidimo, da je na levem robu rebre večje odstopanje v širini.

Pod mikroskopom smo si ogledali tudi vzorce, ki so imeli drugačno hrapavost od ostalih. Ti vzorci so bili natisnjeni pri enakih parametrih, razlika med njimi je bila le v hrapavosti. Ko smo pogledali plošče pod mikroskopom, ko se je TPU rebra odtrgala, smo ugotovili, da se na vzorcih ne vidi nobene bistvene razlike, glede na hrapavost.

5 SKLEP

Glavni namen diplomskega dela je bil preučevanje vpliva parametrov 3D tiskanja na adhezijo med termoplastičnim poliuretanom in poliamidom.

Na začetku smo si zastavili hipotezo, da bodo najboljši parametri za dobro adhezijo visoka temperatura taline, visoka temperatura podlage in nizka hitrost tiskanja. Z dobljenimi rezultati smo svojo hipotezo potrdili. Izkazalo se je, da je adhezija res najboljša pri teh parametrih. To smo dokazali s trgalnim testom, pri katerem smo dobili povprečne vrednosti napetosti ob trgu. Iz meritev se je izkazalo, da je pri teh parametrih največja povprečna vrednost napetosti ob trgu. Vzrok za boljšo adhezijo pri višjih temperaturah je v boljšemu spajanju ter prepletanju materialov med sabo. Če sta oba materiala vroča, se lahko pretalita en v drugega in tako tvorita močne mehanske in kemijske interakcije, ki povečajo adhezijo. Pri nizki hitrosti se material dlje časa nahaja ob grelnih enotah, kar povzroči, da se material boljše raztali in zaradi tega lepše teče in omogoča lepšo in bolj čvrsto nalaganje po slojih. Na podlagi pridobljenih rezultatov bi postavili dodatno hipotezo, da bi ob višji temperaturi podlage dosegli še boljšo adhezijo.

V diplomski nalogi smo odkrili, da je pri pretisku najbolj pomemben parameter za zagotavljanje adhezije hitrost tiskanja. Opazili smo, da če želimo imeti dobre izdelke z dobro adhezijo, je potrebno imeti ustrezno segret material, najbolj idealno je, če sta oba materiala čimbolj segreta.

Iz rezultatov precej jasno vidimo, kakšni so vplivi parametrov. Se pa pojavi vprašanje, kako močno bi vplivala površinska obdelava materialov na adhezijo. Zanimivo bi bilo preizkusiti, kako močan vpliv na adhezijo imajo različne vrste površinske obdelave ter kako močno bi se spremenila adhezija pri enakih parametrih. Če bi bila adhezija primerljiva s trenutnimi meritvami ali bi bila bistvena razlika v meritvah. Prav tako bi bilo zanimivo, če bi s površinsko obdelavo lahko pridobili pri najslabših parametrih primerljivo adhezijo kot pri trenutnih najboljših parametrih. Primerjali bi lahko, če je adhezija pri kemijski obdelavi površine podobne vrednosti, kot če bi površino obdelali tako, da bi povečali fizikalne interakcije med površinama.

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] O. Ogorodnyk, K. Martinsen, Monitoring and Control for Thermoplastics Injection Molding A Review, *Procedia CIRP*. 67 (2018) 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.229>.
- [2] S.D. Nath, S. Nilufar, An Overview of Additive Manufacturing of Polymers and Associated Composites, *Polymers (Basel)*. 12 (2020) 2719. <https://doi.org/10.3390/polym12112719>.
- [3] Yang, Y., Chen, X., Lu, N., & Gao, F. (2016). Injection Molding: Background. Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization, 1-37. <https://doi.org/10.3139/9781569905937.001>
- [4] McCrum G. N., Buckley P.C., Buckmal B.C. Principles of polymer engineering, 2nd edition. New York: Oxford University Press Inc., 1997
- [5] Overmolding, [Citirano 2023 Jul 10] Dostopno na: <https://www.iqsdirectory.com/articles/plasti-injection-molding/overmolding.html>
- [6] U.M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, M. Dolen, Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 113 (2021) 623–648. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06688-1>.
- [7] Boros, R., Kannan Rajamani, P., & Kovacs, J. G. (2019). Combination of 3D printing and injection molding: Overmolding and overprinting. *Express Polymer Letters*, 13(10), 889--897. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.77>
- [8] F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, P.J. Pigram, Adhesion of polymers, *Prog Polym Sci*. 34 (2009) 948–968. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007>.
- [9] Huntsman, A guide to thermoplastic polyurethanes (TPU). [Citirano 2023 Jul 10] Dostopno na: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://huntsman-pimcore.equisolve-dev.com/Documents/PU_Elastomers_Guide_to_TPU.pdf&ved=2ahUKEwjnkY6PpdWAAxUqgv0HHSBRB8YQFnoECBUQAQ&usg=AOvVaw1P90_KEDjxbgMj8eMDt21-
- [10] R.J. Palmer, Polyamides, Plastics, in: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2001: pp. 618–643. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst251>.
- [11] Chao Cai, Kun Zhou, Metal additive manufacturing, *Digital Manufacturing* (2022) 247-298. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95062-6.00005-X>
- [12] Statnik, E.S., Salimon, A. I., & Korsunsky, A. M. (2020). On the application of digital optical microscopy in the study of materials structure and deformation. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.600>

SEZNAM SLIK

Slika 1: Sestava TPU	8
Slika 2: Sinteza poliamida 6 iz kaprolaktama	10
Slika 3: Sinteza in kemijska struktura poliamida 66	10
Slika 4: 3D tiskalnik Creality Ender 3-neo	11
Slika 5: Označene pretisnjene plošče	13
Slika 6: Trgalni stroj Shimadzu AG-X Plus 10 kN	14
Slika 7: Vpetje priprave in vzorca v trgalnem stroju	14
Slika 8: Digitalni mikroskop Keyence VHX 7000	15
Slika 9: Diagram glavnih učinkov za povprečno napetost pri pretrgu (MPa)	18
Slika 10: Diagram interakcij za povprečno napetost pri pretrgu (MPa).....	20
Slika 11: Diagram glavnih učinkov za standardno deviacijo napetosti pri pretrgu (MPa)	21
Slika 12: Diagram interakcij za standardno deviacijo napetosti pri pretrgu (MPa)	22
Slika 13: Mikroskopska slika TPU rebre natisnjene pri 240°C	23
Slika 14: Mikroskopska slika TPU rebre natisnjene pri 260°C	24

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Konstantni parametri 3D tiska	12
Tabela 2: Seznam vzorcev, izdelanih pod različnimi parametri 3D tiska	12
Tabela 3: Odvisnost povprečne napetosti trganja in standardnega odklona od hrapavosti	16
Tabela 4: Povprečna napetost trganja in standardni odklon vzorcev	17
Tabela 5: Vpliv parametrov tiskanja na povprečno napetost trganja	18
Tabela 6: Vpliv parametrov tiskanja na standardni odklon vzorcev	21

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

$t(z)$ - čas zapiranja orodja (s)

$t(t)$ - čas delovanja brizgalnega tlaka in čas delovanja naknadnega tlaka (s)

$t(h)$ - čas dodatnega hlajenja izdelka v orodju (s)

$t(iz)$ - čas odpiranja in izmetavanja izdelka iz orodja (s)

T_{talina} - temperatura taline

$T_{plošča}$ - temperatura plošče

v_{tisk} - hitrost tiska

(α) - stopnja značilnosti

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

TPU - termoplastični poliuretan

SLA - stereolitografija

FDM - ekstruzija materiala

SLS - spajanje v praškasti postelji

LOM - laminacija

ABS - akrilonitril butadien stiren

PLA - polimlečna kislina

PVA - polivinil alkohol

UV - ultravijolično valovanje

PA - poliamid

PVC - polivinil klorid