

Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa

Pilipović, Ana

Doctoral thesis / Disertacija

2012

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:460411>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-30**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ANA PILIPOVIĆ

**UTJECAJ PARAMETARA IZRADE NA
SVOJSTVA POLIMERNOGA PROTOTIPA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2012.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

ANA PILIPOVIĆ

**INFLUENCE OF PROCESSING
PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF
POLYMER PROTOTYPE**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2012.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ANA PILIPOVIĆ

**UTJECAJ PARAMETARA IZRADE NA
SVOJSTVA POLIMERNOGA PROTOTIPA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Zagreb, 2012.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

ANA PILIPOVIĆ

**INFLUENCE OF PROCESSING
PARAMETERS ON THE PROPERTIES OF
POLYMER PROTOTYPE**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Zagreb, 2012.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 678.0

Ključne riječi: aditivni postupci, apsorpcija vode, dimenzijska točnost, hrapavost, masa, mehanička svojstva, parametri prerade, selektivno lasersko srašćivanje – SLS, starenje

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsstvo

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb

Mentor rada: Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Broj stranica: 225

Broj slika: 125

Broj tablica: 131

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 77

Datum obrane: 03.10.2012.

Povjerenstvo: Dr. sc. Dorian Marjanović, red. prof (FSB, Zagreb)

Dr. sc. Mladen Šercer, red. prof. (FSB, Zagreb)

Dr. sc. Đurđica Španiček, prof. u mirovini (FSB, Zagreb)

Dr. sc. Igor Drstvenšek, red. prof. (Fakulteta za strojništvo, Maribor)

Dr. sc. Pero Raos, red. prof. (Strojarski fakultet, Sl. Brod)

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje,
Sveučilište u Zagrebu

ZAHVALA

Ovom se prilikom želim zahvaliti:

Mentoru prof. dr. sc. Mladenu Šerceru na stručnom vođenju, savjetima i pomoći u tijeku izrade rada.

Posebno se zahvaljujem prof. dr. sc. Igoru Drstvenšku, dr. sc. Bogdanu Valentanu i mr. sc. Tomažu Brajlihu s *Fakulteta za strojništvo*, Maribor, Slovenija koji su mi omogućili izradu prototipa aditivnim postupcima i prenijeli svoja znanja na tom području, i *Hrvatskoj zakladi za znanost* za stipendiju bez koje bi istraživanja bilo nemoguće provesti.

Zahvaljujem se i kolegama s *Katedre za materijale i tribologiju*, prof. dr. sc. Đurđici Španiček, doc. dr. sc. Tatjani Haramini, Vesni Đurđi i Božidaru Bušetinčanu, zatim *Zavodu za kvalitetu* prof. dr. sc. Sanjinu Mahoviću i Tomislavu Habeku, *Zavodu za zavarene konstrukcije* prof. dr. sc. Ivanu Juragi, doc. dr. sc. Vesni Alar, dr. sc. Ivanu Stojanoviću i dr. sc. Vinku Šimunoviću na pomoći prilikom provedbe raznih ispitivanja.

Posebno se zahvaljujem i *Katedri za eksperimentalnu mehaniku* prof. dr. sc. Janošu Kodvanju, doc. dr. sc. Anti Bakiću i Gordanu Plačku za pristup njihovom laboratoriju i pomoći pri ispitivanju mehaničkih svojstava i te kolegi dr. sc. Nenadu Drvaru.

Ovom se prilikom želim zahvaliti i kolegama na svojoj Katedri, *Katedri za preradu polimera i drva* doc. dr. sc. Damiru Godecu, mr. sc. Maji Rujnić-Sokele, Miodragu Kataleniću, Sunčici Tucman i prof. dr. sc. Igoru Čatiću što su mi pomogli tijekom studiranja i pri rješavanju različitih problema.

A najviše želim zahvaliti svojim roditeljima Milanu i Radici, sestri Jeleni i Jerku na strpljenu i što su uvijek bili uz mene tijekom studiranja i pisanja ovog rada.

I svima koji su na bilo koji način pridonijeli uspješnom završetku rada.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stećena tijekom studija na Fakultetu te stručnu literaturu i raspoloživu opremu.

Aditivni postupci: Šta vidiš, to napraviš (e. What You See Is What You Build)

Ian Gibson

SADRŽAJ

PREDGOVOR	I
SAŽETAK	II
KLJUČNE RIJEČI	II
SUMMARY	III
KEYWORDS	III
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	IX
POPIS OZNAKA	XIV
POPIS KRATICA	XVII
1. UVOD	1
2. HIPOTEZA RADA	2
3. RAZVOJ I PRIMJENA ADITIVNIH POSTUPAKA PROIZVODNJE POLIMERNIH PROTOTIPOVA	4
3.1. Povijest AM postupaka.....	4
3.2. Razvoj, podjela i primjena AM postupaka.....	5
4. ADITIVNI POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH PROTOTIPOVA	10
4.1. Faze izrade prototipova.....	10
4.2. Stereolitografija (e. <i>Stereolithography – SLA</i>).....	12
4.3. PolyJet postupak.....	16
4.4. Selektivno lasersko srašćivanje (e. <i>Selective laser sintering – SLS</i>).....	19
4.5. 3D tiskanje (e. <i>3D Printing – 3DP</i>).....	24
4.6. Taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling – FDM</i>).....	28
4.7. Proizvodnja laminiranih objekata (e. <i>Laminated Object Manufacturing – LOM</i>).....	33
4.8. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom.....	36
5. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU SELEKTIVNOG LASERSKOG SRAŠĆIVANJA	40
6. MATERIJALI I UREĐAJI ZA PROVEDBU ISPITIVANJA	44
6.1. Oblici ispitnih tijela.....	44
6.1.1. Oblik ispitnog tijela za određivanje rasteznih svojstava.....	44
6.1.2. Oblik ispitnog tijela za određivanje savojnih svojstava.....	47
6.2. Materijal ispitnih tijela.....	49

6.3. Uređaj za izradu prototipova SLS postupkom.....	51
6.4. Uređaj za mjerenje mehaničkih svojstava.....	52
6.5. Određivanje apsorpcije vode.....	54
6.6. Ispitivanje starenja – metoda izlaganja izvorima svjetla.....	55
6.7. Ispitivanje izmjera i hrapavosti površine.....	56
6.8. Određivanje tvrdoće s pomoću tvrdomjera.....	60
7. KARAKTERISTIKE POSTUPKA SELEKTIVNOG LASERSKOG SRAŠĆIVANJA.....	61
7.1. Parametri lasera.....	62
7.1.1. Snaga lasera.....	62
7.1.2. Brzina laserske zrake (brzina skeniranja).....	63
7.1.3. Promjer laserske zrake.....	63
7.1.4. Razmak između putanje laserske zrake.....	63
7.1.5. Pomak zrake.....	64
7.1.6. Kompenzacija brzine laserske zrake (e. skywriting).....	65
7.2. Strategija izrade prototipa.....	66
7.2.1. Kontura i jezgra prototipa.....	66
7.2.2. Smjer skeniranja laserske zrake.....	67
7.2.3. Strategija izrade – Sorted.....	67
7.2.4. Strategija izrade – Unsorted.....	68
7.2.5. Strategija izrade – Skincore.....	68
7.2.6. Strategija izrade – Mesh 2D.....	69
7.2.7. Strategija izrade – UpDownskin.....	69
7.2.8. Strategija izrade – Edges.....	70
7.3. Prosijavanje i regeneracija praha.....	71
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	73
8.1. Predpokusi.....	74
8.1.1. Centralno kompozitni plan pokusa.....	74
8.1.2. Predpokus – rastezna čvrstoća.....	78
8.1.3. Predpokus – savojna čvrstoća.....	81
8.1.4. Predpokus – vrijeme izrade.....	83
8.2. Utjecaj parametara stroja na svojstva prototipa.....	86
8.2.1. Ista gustoća energije i faktor preklapanja.....	86
8.2.2. Različita gustoća energije.....	88
8.2.3. Različita gustoća energije i faktor preklapanja.....	91
8.2.4. Vrijeme izrade.....	97
8.2.5. Debljina sloja.....	100
8.2.6. Izmjere u ovisnosti o gustoći energije.....	102
8.3. Usporedba svojstava kod različite vrste materijala i orijentacije	

prototipa u izradbenom prostoru.....	102
8.3.1. <i>Određivanje apsorpcije vode</i>	103
8.3.2. <i>Izmjere prototipa</i>	107
8.3.3. <i>Hrapavost ispitnih tijela</i>	110
8.3.3.1. <i>Hrapavost originalnog materijala</i>	110
8.3.3.2. <i>Hrapavost miješanog materijala</i>	112
8.3.3.3. <i>Hrapavost recikliranog materijala</i>	114
8.3.3.4. <i>Hrapavost obrađene površine</i>	116
8.3.3.5. <i>Usporedba hrapavosti svih vrsta materijala</i>	117
8.3.4. <i>Tvrdoća prototipova</i>	118
8.3.5. <i>Rastezna svojstva prototipova</i>	120
8.3.5.1. <i>Rastezna svojstva originalnog materijala</i>	120
8.3.5.2. <i>Rastezna svojstva miješanog materijala</i>	123
8.3.5.3. <i>Rastezna svojstva 100 % recikliranog materijala</i>	124
8.3.5.4. <i>Komentar rasteznih svojstava</i>	125
8.3.5.4.1. <i>Usporedba rasteznih svojstava svih vrsta materijala</i>	125
8.3.5.4.2. <i>Usporedba rasteznih svojstava kod različitih orijentacija u izradbenom prostoru stroja</i>	126
8.3.6. <i>Savojna svojstva prototipa</i>	128
8.3.6.1. <i>Savojna svojstva originalnog materijala</i>	128
8.3.6.2. <i>Savojna svojstva miješanog materijala</i>	130
8.3.6.3. <i>Savojna svojstva 100 % recikliranog materijala</i>	131
8.3.6.4. <i>Komentar savojnih svojstava svih vrsta materijala</i>	132
9. RASPRAVA REZULTATA	134
9.1. <i>Rasprava predpokusa</i>	134
9.2. <i>Rasprava o parametrima koji utječu na svojstva prototipa</i>	134
9.3. <i>Rasprava o utjecaju različite vrste materijala i položaja prototipa u izradbenom prostoru stroja</i>	136
9.3.1. <i>Rasprava o apsorpciji vode</i>	136
9.3.2. <i>Rasprava o izmjerama prototipa</i>	137
9.3.3. <i>Rasprava o hrapavosti materijala</i>	137
9.3.4. <i>Rasprava o utjecaju atmosferskih uvjeta na mehanička svojstva</i>	138
9.3.4.1. <i>Rasprava o tvrdoći</i>	138
9.3.4.2. <i>Rasprava o rasteznim svojstvima</i>	138
9.3.4.3. <i>Rasprava o savojnim svojstvima</i>	139
9.4. <i>Usporedba svojstava tvorevine načinjene klasičnim postupkom prerade polimera i SLS postupkom</i>	140
9.5. <i>Kritika vlastitog rada i smjerovi budućih istraživanja</i>	141
10. ZAKLJUČAK	143

11. LITERATURA	145
12. PRILOZI	149
ŽIVOTOPIS	224
BIOGRAPHY	225

PREDGOVOR

Aditivni postupci počeli su se razvijati 1980-tih godina i tada su se primjenjivali samo za izradu prototipa. Visoki zahtjevi tržišta koji se orijentiraju na izradu komplicirane tvorevine u što kraćem vremenu postavili su na aditivne postupke nove zahtjeve u pogledu njihovih svojstava. Svojstva tvorevina (mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost, izgled površine, postojanost na atmosferilije, itd.) još uvijek se dosta razlikuju od tvorevina načinjenih nekim klasičnim postupcima prerade polimera (npr. injekcijskim prešanjem ili ekstrudiranjem). Stoga se nameće potreba za poboljšanjem materijala i strojeva, ali i za mijenjanjem raznih parametara koji mogu poboljšati ta svojstva.

Analizom dostupne literature utvrđeno je da nisu određeni svi parametri izrade kojima se mogu poboljšati svojstva prototipa što je bio temeljni poticaj u pisanju doktorskog rada. Također će se definirati smjernice za izbor odgovarajućih parametara izrade i utvrditi najutjecajniji ulazni parametri u cilju postizanja traženih mehaničkih i drugih svojstava materijala.

U prvom dijelu rada prikazan je kratki povijesni razvoj aditivnih postupaka prerade prototipa, zatim su opisani najznačajniji postupci, sa glavnim prednostima i nedostacima, ali i vrstama materijala koja se mogu upotrijebiti u određenim postupcima. U drugom dijelu rada opisan je detaljnije princip rada selektivnog laserskog srašćivanja (SLS) i parametri prerade. I konačno u zadnjem dijelu opisani su svi potrebni uređaji za provedbu pokusa i provedena je analiza utjecaja parametara izrade na svojstva polimernoga prototipa (tj. mehanička svojstva, izgled površine, dimenzijska postojanost, apsorpcija vode i stabilnost prema UV zračenjima).

Zagreb, rujan 2012.

Ana Pilipović, dipl. ing. strojarstva

SAŽETAK

Brza proizvodnja prototipova (e. *Rapid Prototyping - RP*) počela se razvijati početkom 1980 - tih godina i nije bila orijentirana na masovnu proizvodnju, već na potrebe i zahtjeve kupaca. Prema normi ASTM F42, 2009. godine primjenjuje se izraz aditivna proizvodnja (e. *Additive Manufacturing - AM*). To su postupci kojima je moguće izraditi relativno komplicirane geometrije na temelju računalnog 3D modela tvorevine u relativno kratkom vremenu. Pritom se zahtjeva da odgovarajuća tvorevina bude dobre kvalitete, dobrih mehaničkih svojstava, dimenzijske točnosti i preciznosti. No broj raspoloživih materijala koje je moguće upotrijebiti za proizvodnju prototipova je ograničen i njihova svojstva se mogu dosta razlikovati od svojstava materijala konačne tvorevine. Stoga je za optimalnu primjenu prototipova pri razvoju tvorevine potrebno poznavati svojstva materijala prototipova, posebice ako se s pomoću njih provode funkcijska ispitivanja.

U okviru doktorskog rada izrađena su ispitna tijela uz podešavanje različitih parametara (položaj ispitnog tijela u izradbenom prostoru stroja, brzina izrade, unešena energija tijekom izrade, debljina sloja materijala i snaga lasera). Zatim je analiziran izgled površine (hrapavost), mehanička svojstva dobivenih ispitnih tijela, te utjecaj atmosferilija (UV zračenja, upojnost vode) na njihova svojstva. Konačno, na temelju sistematiziranih podataka dobivenih ispitivanjem svojstava ispitaka, dan je kritički osvrt na podatke o svojstvima materijala koje navode njihovi proizvođači.

KLJUČNE RIJEČI

Aditivni postupci, apsorpcija vode, dimenzijska točnost, hrapavost, masa, mehanička svojstva, parametri prerade, selektivno lasersko srašćivanje – SLS, starenje

SUMMARY

Rapid prototyping began to develop in early 1980 th and was not focused on mass production, but on demands and needs of customers. According to standard ASTM F42 from 2009., *Additive Manufacturing – AM* is applied. With AM it is possible to create physical models, prototypes, components, tools and functional parts from 3D data constructed using the computer (CAD), with complicated geometry in relatively short time, which is very difficult or even impossible to do with other manufacturing technologies. At the same time requirement is product of good quality, good mechanical properties, dimensional accuracy and precision. There are also many restrictions, primarily in the number of available materials and their properties which may differ quite considerably from the properties of the end-user products materials. Therefore, for optimal use of prototypes in product development it is necessary to know the material properties, and how the various parameters of the machine influence on them, especially if it is used on carry out functional tests.

Within doctoral thesis adequate test specimens will be prepared and it will be tested how the machine parameters (orientation of test specimen, energy density, speed and power of laser, and layer thickness of materials) influence the roughness, mechanical properties of product and resistance to atmospheric conditions (UV radiation and absorption of water). Finally, based on the systematized data obtained by testing of properties of the test specimen, it will be provided a critical commentary regarding the data stipulated by their producers.

KEYWORDS

Ageing, additive manufacturing, dimensional accuracy, mass, mechanical properties, procesing parameters, roughness, selective laser sintering – SLS, water absorption

POPIS SLIKA

Slika 3.1.	Usporedba vremena izrade tvorevine između dva postupka: CNC glodanje i PolyJet postupak.....	4
Slika 3.2.	Povijesni razvoj tehnologija.....	5
Slika 3.3.	Podjela aditivnih postupaka.....	6
Slika 3.4.	Područja primjene AM postupaka u 2012. godini.....	6
Slika 3.5.	Primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2012. godini.....	7
Slika 4.1.	Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a.) prikaz slaganja slojeva, b.) 3D tvorevina.....	10
Slika 4.2.	Faze AM postupaka.....	11
Slika 4.3.	Tvorevina: a.) 3D model, b.) STL datoteka.....	11
Slika 4.4.	Postupak stereolitografije.....	13
Slika 4.5.	Prototipovi izrađeni SLA postupkom: a.) ventilacijska rešetka, b.) kaciga.....	15
Slika 4.6.	PolyJet postupak.....	16
Slika 4.7.	Prototipovi izrađeni PolyJet postupkom: a.) Digital – držači britvica, b.) FullCure 720 - kralježnica, c.) VeroBlue u kombinaciji s Tango - četkica, d.) Tango – kotač.....	18
Slika 4.8.	Postupak selektivnog laserskog srašćivanja.....	20
Slika 4.9.	Prototipovi dobiveni SLS postupkom: a.) proteza, b.) zaštitni poklopac motora (PA sa staklenim česticama), c.) svjetiljka, d.) violina, e.) potplat cipele, f.) obuća.....	23
Slika 4.10.	3D tiskanje.....	25
Slika 4.11.	Faze postupka 3D tiskanje.....	25
Slika 4.12.	Prototip s kombinacijom više boja tvrtke <i>ZCorp</i> ; primjena u: a.) strojarstvu – radilica i klip motora, b.) građevini – kuća, c.) medicini – kralježnica, d.) automobilske industriji – ovjes vozila.....	26
Slika 4.13.	Postupak taložnog očvršćivanja.....	29
Slika 4.14.	Struktura pčelinjih saća.....	30
Slika 4.15.	Prototipovi izrađeni FDM postupkom: a.) ABS kutija za alat, b.) PC-ABS ručka alata, c.) PC aparat za tople napitke, d.) PPSF kućište zupčanika.....	32
Slika 4.16.	Proizvodnja laminiranih objekata.....	33
Slika 4.17.	Postupak odvajanja viška materijala.....	34
Slika 4.18.	Tvorevine napravljene LOM postupkom: a.) kućište ventila, b.) kućište motora, c.) zupčanik, d.) kosti šake.....	35
Slika 4.19.	Model DLP postupka sa jednim čipom.....	37
Slika 4.20.	Model DLP postupka sa tri čipa.....	37
Slika 4.21.	Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom: a.) shema	

	postupka, b.) tvorevina na radnoj podlozi.....	38
Slika 4.22.	Primjena postupka očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom: a.) u medicini, b.) za izradu nakita.....	39
Slika 6.1.	Tipične krivulje rasteznog naprezanja – istežanja.....	44
Slika 6.2.	Oblik ispitnog tijela za rastezna ispitivanja.....	46
Slika 6.3.	Tipične krivulje savojnog naprezanja – istežanja i progib S	47
Slika 6.4.	Oblik ispitnog tijela za savojna ispitivanja.....	48
Slika 6.5.	Ispitna tijela dobivena SLS postupkom.....	50
Slika 6.6.	Orijentacija slojeva.....	50
Slika 6.7.	<i>Formiga P100</i>	52
Slika 6.8.	Kidalica.....	52
Slika 6.9.	Čeljusti za ispitivanje rasteznih svojstava.....	53
Slika 6.10.	Čeljusti za ispitivanje savojnih svojstava.....	53
Slika 6.11.	Vaga za mjerenje mase proizvođača <i>Tehtnica – Železniki, Slovenija</i>	54
Slika 6.12.	Komora za ispitivanje izlaganja izvorima svjetla.....	55
Slika 6.13.	Terenska ispitivanja utjecaja atmosferilija.....	56
Slika 6.14.	Uređaj za ispitivanje hrapavosti površine.....	56
Slika 6.15.	Parametri hrapavosti površine.....	57
Slika 6.16.	Mjesta ispitivanja hrapavosti površine.....	59
Slika 6.17.	Durometar i izgled igle za mjerenje prema Shore-u D.....	60
Slika 7.1.	Utjecaj laserske zrake na materijal.....	61
Slika 7.2.	Odabir snage ovisno o debljini sloja.....	62
Slika 7.3.	Fizikalni d i efektivni promjer d_e laserske zrake.....	63
Slika 7.4.	Razmak između dvije putanje laserske zrake.....	64
Slika 7.5.	Pomak zrake kod izrade konture i jezgre sloja.....	64
Slika 7.6.	Kompenzacija brzine laserske zrake.....	65
Slika 7.7.	Strategija izrade jednostavnog prototipa.....	66
Slika 7.8.	Izrada konture i jezgre prototipa; 1 – kontura prototipa, 2 – jezgra prototipa, 3 - razmak između putanje laserske zrake.....	67
Slika 7.9.	Smjer skeniranja; a.) x os, b.) y os, c.) kombinacija xy, d.) naizmjenično...	67
Slika 7.10.	Strategija izrade sorted; a.) prva faza, b.) druga faza.....	68
Slika 7.11.	Strategija izrade unsorted.....	68
Slika 7.12.	Strategija izrade skincore.....	69
Slika 7.13.	Strategija izrade mesh 2D.....	69
Slika 7.14.	Strategija izrade updownskin.....	70
Slika 7.15.	Strategija izrade edges: a.) $w > 2d_k$ – kontura, b.) $w < 2d_k$ – kontura, c.) $w = 2d_k$ - kontura, d.) $w < 2d_k$ – rubovi.....	70
Slika 7.16.	Stroj za prosijavanje praha.....	71
Slika 7.17.	Uređaj za miješanje praha.....	71

Slika 8.1.	Rastezna svojstva ovisno o podešavanju parametara za konturu prototipa..	73
Slika 8.2.	Modeli pokusa: a.) centralno kompozitni plan pokusa za tri faktora, b.) potpuni faktorski pokus 3^k	75
Slika 8.3.	Ovisnost rastezne čvrstoće o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake pri konstantnoj snazi.....	79
Slika 8.4.	Ovisnost savojne čvrstoće o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake pri konstantnoj snazi.....	82
Slika 8.5.	Ovisnost vremena izrade o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake pri konstantnoj snazi.....	85
Slika 8.6.	Dijagram rasteznog naprezanja – istežanja s istim unosom energije.....	87
Slika 8.7.	Dijagram savojnog naprezanja – istežanja s istim unosom energije.....	88
Slika 8.8.	Dijagram rasteznog naprezanja – istežanja kod različitog unosa energije....	90
Slika 8.9.	Dijagram savojnog naprezanja – istežanja kod različitog unosa energije.....	91
Slika 8.10.	Dijagram rasteznog naprezanja – istežanja kod promjene faktora preklapanja.....	93
Slika 8.11.	Dijagram savojnog naprezanja – istežanja kod promjene faktora preklapanja.....	94
Slika 8.12.	Izgled ispitnih tijela.....	95
Slika 8.13.	Masa u odnosu na faktor preklapanja laserske zrake.....	95
Slika 8.14.	Shema skeniranja čestica praha: a.) $h < d$, b.) $h > d$ i c.) $h = d$	96
Slika 8.15.	Određivanje parametara SLS postupka kod debljine sloja 0,1 mm i gustoće energije $ED = 0,05 \text{ J/mm}^2$	97
Slika 8.16.	Ovisnost vremena izrade o snazi lasera.....	98
Slika 8.17.	Ovisnost vremena izrade o brzini laserske zrake.....	98
Slika 8.18.	Ovisnost vremena izrade o razmaku između putanje laserske zrake.....	99
Slika 8.19.	Ovisnost vremena izrade o gustoći energije.....	99
Slika 8.20.	Rastezna čvrstoća u ovisnosti o gustoći energije za debljinu sloja 0,2 mm..	100
Slika 8.21.	Određivanje parametara SLS postupka pri konstantnom razmaku između putanje laserske zrake h	101
Slika 8.22.	Utjecaj unosa energije na izmjere prototipa.....	102
Slika 8.23.	Ljuštenje prvog sloja prototipa s 100 % originalnog materijala.....	103
Slika 8.24.	Ispitivanje apsorpcije vode.....	104
Slika 8.25.	Apsorpcija vode kod originalnog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	105
Slika 8.26.	Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod originalnog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	105
Slika 8.27.	Apsorpcija vode kod miješanog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	105
Slika 8.28.	Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod miješanog materijala:	

	a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	106
Slika 8.29.	Apsorpcija vode kod recikliranog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	106
Slika 8.30.	Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod recikliranog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	106
Slika 8.31.	Apsorpcija vode kod sve tri vrste materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	107
Slika 8.32.	Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod sve tri vrste materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	107
Slika 8.33.	Odstupanje od nazivnih izmjera kod originalnog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	108
Slika 8.34.	Odstupanje od nazivnih izmjera kod miješanog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	108
Slika 8.35.	Odstupanje od nazivnih izmjera kod recikliranog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	109
Slika 8.36.	Odstupanje od nazivnih izmjera – usporedba vrste materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	109
Slika 8.37.	Odstupanje od nazivnih izmjera u x, y i z osi kod različite vrste materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	110
Slika 8.38.	Hrapavost površine ispitnih tijela načinjenih od originalnog materijala.....	112
Slika 8.39.	Hrapavost površine ispitnih tijela načinjenih od miješanog materijala.....	114
Slika 8.40.	Hrapavost površine ispitnih tijela načinjenih od recikliranog materijala.....	116
Slika 8.41.	Hrapavost površine ispitnih tijela obrađenih sa staklenim česticama.....	117
Slika 8.42.	Hrapavost površine ispitnih tijela svih vrsta materijala.....	117
Slika 8.43.	Usporedba srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a kod svih vrsta materijala.....	118
Slika 8.44.	Usporedba tvrdoće originalnog materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	118
Slika 8.45.	Usporedba tvrdoće miješanog materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	119
Slika 8.46.	Usporedba tvrdoće recikliranog materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	119
Slika 8.47.	Usporedba tvrdoće kod sve tri vrste materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela.....	120
Slika 8.48.	Dijagram rasteznog naprezanja – istežanja ispitnih tijela s upotrebom originalnog materijala pri UV zračenju: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	121
Slika 8.49.	Usporedba različitih atmosferskih uvjeta (suha, normalna i 100 % vlažna atmosfera): a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	122

Slika 8.50.	Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja kod apsorpcije vode: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	123
Slika 8.51.	Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na miješani materijal: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	124
Slika 8.52.	Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na reciklirani materijal: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	125
Slika 8.53.	Utjecaj atmosferskih uvjeta na rasteznu čvrstoću kod različitih vrsta materijala.....	126
Slika 8.54.	Utjecaj atmosferskih uvjeta na modul rastezljivosti kod različitih vrsta materijala.....	126
Slika 8.55.	Vrsta loma prilikom rastezanja SLS ispitnih tijela.....	127
Slika 8.56.	Utjecaj temperature radne komore na rastezna svojstva.....	127
Slika 8.57.	Dijagram savojnog naprezanja – istezanja ispitnih tijela s upotrebom originalnog materijala pri UV zračenju: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	128
Slika 8.58.	Usporedba različitih uvjeta atmosfere (suha, normalna i 100 % vlažna atmosfera): a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	129
Slika 8.59.	Dijagram savojnog naprezanja – istezanja kod apsorpcije vode: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	130
Slika 8.60.	Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na miješani materijal: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	131
Slika 8.61.	Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na reciklirani materijal: a.) orijentacija L_{xy} , b.) orijentacija P_{xy} , c.) orijentacija P_z	132
Slika 8.62.	Utjecaj atmosferskih uvjeta na savojnu čvrstoću kod različitih vrsta materijala.....	133
Slika 8.63.	Utjecaj atmosferskih uvjeta na modul savitljivosti kod različitih vrsta materijala.....	133
Slika 9.1.	Određivanje parametara izrade kod SLS postupka.....	136

POPIS TABLICA

Tablica 3.1.	Pregled nekih proizvođača AM strojeva kod prerade polimernih materijala.....	7
Tablica 3.2.	Materijali u AM postupcima.....	9
Tablica 4.1.	Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju stereolitografijom.....	16
Tablica 4.2.	Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom laserskog srašćivanja.....	24
Tablica 4.3.	Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom 3D tiskanja.....	28
Tablica 4.4.	Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom taložnog očvršćivanja materijala.....	32
Tablica 4.5.	Tehnička svojstva LOM tvorevina.....	35
Tablica 6.1.	Dimenzije rastezних ispitnih tijela.....	45
Tablica 6.2.	Svojstva materijala PA 12 (PA 2200).....	51
Tablica 7.1.	Regeneracija praha.....	72
Tablica 8.1.	Odnos parametara za podešavanje konture prototipa i mehaničkih svojstava.....	73
Tablica 8.2.	Faktori i njihove razine.....	76
Tablica 8.3.	Rezultati mjerenja.....	77
Tablica 8.4.	Rezultati analize varijance – rastezna čvrstoća.....	78
Tablica 8.5.	Pregled statističkih podataka o modelu za rasteznu čvrstoću.....	79
Tablica 8.6.	Koeficijenti regresije za rasteznu čvrstoću.....	80
Tablica 8.7.	Kodirane vrijednosti za faktore pokusa A, B i C.....	80
Tablica 8.8.	Rezultati analize varijance – savojna čvrstoća.....	81
Tablica 8.9.	Pregled statističkih podataka o modelu za savojnu čvrstoću.....	81
Tablica 8.10.	Koeficijenti regresije za savojnu čvrstoću.....	83
Tablica 8.11.	Rezultati analize varijance – vrijeme izrade.....	84
Tablica 8.12.	Pregled statističkih podataka o modelu za vrijeme izrade.....	84
Tablica 8.13.	Koeficijenti regresije za vrijeme izrade.....	86
Tablica 8.14.	Parametri izrade kod iste gustoće energije.....	87
Tablica 8.15.	Rastezna svojstva s istim unosom energije.....	87
Tablica 8.16.	Savojna svojstva s istim unosom energije.....	88
Tablica 8.17.	Parametri izrade kod različitog unosa energije i istog faktora preklapanja.....	89
Tablica 8.18.	Rastezna svojstva s različitim unosom energije.....	89
Tablica 8.19.	Savojna svojstva s različitim unosom energije.....	90
Tablica 8.20.	Utjecaj faktora preklapanja laserske zrake.....	92
Tablica 8.21.	Rastezna svojstva ispitnih tijela s promjenjenim faktorom preklapanja	92

Tablica 8.22.	Svojna svojstva ispitnih tijela s promjenjenim faktorom preklapanja..	93
Tablica 8.23.	Odabir gustoće energije ovisno o debljini sloja.....	101
Tablica 8.24.	Parametri hrapavosti L_{xy} ispitnih tijela od originalnog materijala.....	110
Tablica 8.25.	Parametri hrapavosti P_{xy} ispitnih tijela od originalnog materijala.....	111
Tablica 8.26.	Parametri hrapavosti P_z ispitnih tijela od originalnog materijala.....	111
Tablica 8.27.	Parametri hrapavosti ML_{xy} ispitnih tijela od miješanog materijala.....	112
Tablica 8.28.	Parametri hrapavosti MP_{xy} ispitnih tijela od miješanog materijala.....	113
Tablica 8.29.	Parametri hrapavosti MP_z ispitnih tijela od miješanog materijala.....	113
Tablica 8.30.	Parametri hrapavosti RL_{xy} ispitnih tijela od recikliranog materijala.....	114
Tablica 8.31.	Parametri hrapavosti RP_{xy} ispitnih tijela od recikliranog materijala.....	115
Tablica 8.32.	Parametri hrapavosti RP_z ispitnih tijela od recikliranog materijala.....	115
Tablica 8.33.	Parametri hrapavosti kod ispitnog tijela obrađenog sa staklenim česticama.....	116
Tablica 9.1.	Svojstva PA 12 načinjena klasičnim postupcima prerade i selektivnim laserskim srašćivanjem dobivenih od proizvođača i provedenim ispitivanjima.....	141
Tablica 12.1.	Podaci za stanje pokusa: 1; $P = 15 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$..	152
Tablica 12.2.	Podaci za stanje pokusa: 2; $P = 9 \text{ W}$, $v = 1500 \text{ mm/s}$ i $h = 1,3 \text{ mm}$	152
Tablica 12.3.	Podaci za stanje pokusa: 3; $P = 15 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,16 \text{ mm}$..	152
Tablica 12.4.	Podaci za stanje pokusa: 4; $P = 4,91 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$..	153
Tablica 12.5.	Podaci za stanje pokusa: 5; $P = 21 \text{ W}$, $v = 1500 \text{ mm/s}$ i $h = 1,3 \text{ mm}$	153
Tablica 12.6.	Podaci za stanje pokusa: 6; $P = 15 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$..	153
Tablica 12.7.	Podaci za stanje pokusa: 7; $P = 21 \text{ W}$, $v = 2900 \text{ mm/s}$ i $h = 1,3 \text{ mm}$	154
Tablica 12.8.	Podaci za stanje pokusa: 8; $P = 15 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$..	154
Tablica 12.9.	Podaci za stanje pokusa: 9; $P = 15 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$..	154
Tablica 12.10.	Podaci za stanje pokusa: 10; $P = 21 \text{ W}$, $v = 2900 \text{ mm/s}$ i $h = 0,45 \text{ mm}$..	155
Tablica 12.11.	Podaci za stanje pokusa: 12; $P = 25,09 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$	155
Tablica 12.12.	Podaci za stanje pokusa: 13; $P = 9 \text{ W}$, $v = 1500 \text{ mm/s}$ i $h = 0,45 \text{ mm}$	155
Tablica 12.13.	Podaci za stanje pokusa: 14; $P = 15 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$..	156
Tablica 12.14.	Podaci za stanje pokusa: 15; $P = 21 \text{ W}$, $v = 1500 \text{ mm/s}$ i $h = 0,45 \text{ mm}$..	156
Tablica 12.15.	Podaci za stanje pokusa: 16; $P = 15 \text{ W}$, $v = 3377,25 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$	156
Tablica 12.16.	Podaci za stanje pokusa: 17; $P = 9 \text{ W}$, $v = 2900 \text{ mm/s}$ i $h = 0,45 \text{ mm}$	157
Tablica 12.17.	Podaci za stanje pokusa: 18; $P = 15 \text{ W}$, $v = 2200 \text{ mm/s}$ i $h = 1,59 \text{ mm}$..	157
Tablica 12.18.	Podaci za stanje pokusa: 19; $P = 15 \text{ W}$, $v = 1022,75 \text{ mm/s}$ i $h = 0,88 \text{ mm}$	157
Tablica 12.19.	Vrijednosti mase u ovisnosti o faktoru preklapanja laserske zrake.....	158

Tablica 12.20.	Usporedba vremena izrade kod različite snage.....	158
Tablica 12.21.	Usporedba vremena izrade kod različite brzine laserske zrake.....	159
Tablica 12.22.	Usporedba vremena izrade kod različitog razmaka između putanje laserske zrake.....	159
Tablica 12.23.	Usporedba vremena izrade kod različite gustoće energije.....	160
Tablica 12.24.	Mehanička svojstva kod debljine sloja 0,2 mm.....	160
Tablica 12.25.	Apsorpcija vode <i>c</i> kod rastezних ispitnih tijela – originalni materijal.....	161
Tablica 12.26.	Apsorpcija vode <i>c</i> kod savojnih ispitnih tijela – originalni materijal.....	162
Tablica 12.27.	Apsorpcija vode <i>c</i> kod rastezних ispitnih tijela – miješani materijal.....	163
Tablica 12.28.	Apsorpcija vode <i>c</i> kod savojnih ispitnih tijela – miješani materijal.....	164
Tablica 12.29.	Apsorpcija vode <i>c</i> kod rastezних ispitnih tijela – reciklirani materijal....	165
Tablica 12.30.	Apsorpcija vode <i>c</i> kod savojnih ispitnih tijela – reciklirani materijal....	166
Tablica 12.31.	Izmjere rastezних ispitnih tijela od originalnog materijala.....	167
Tablica 12.32.	Izmjere savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala.....	168
Tablica 12.33.	Izmjere rastezних ispitnih tijela od miješanog materijala.....	169
Tablica 12.34.	Izmjere savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala.....	170
Tablica 12.35.	Izmjere rastezних ispitnih tijela od recikliranog materijala.....	171
Tablica 12.36.	Izmjere savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala.....	172
Tablica 12.37.	Tvrdoća rastezних ispitnih tijela od originalnog materijala.....	173
Tablica 12.38.	Tvrdoća rastezних ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 500 h.....	174
Tablica 12.39.	Tvrdoća rastezних ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 1000 h.....	175
Tablica 12.40.	Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala.....	176
Tablica 12.41.	Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 500 h.....	177
Tablica 12.42.	Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 1000 h.....	178
Tablica 12.43.	Tvrdoća rastezних ispitnih tijela od miješanog materijala.....	179
Tablica 12.44.	Tvrdoća rastezних ispitnih tijela od miješanog materijala nakon starenja od 1000 h.....	180
Tablica 12.45.	Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala.....	181
Tablica 12.46.	Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala nakon starenja od 1000 h.....	182
Tablica 12.47.	Tvrdoća rastezних ispitnih tijela od recikliranog materijala.....	183
Tablica 12.48.	Tvrdoća rastezних ispitnih tijela od recikliranog materijala nakon starenja od 1000 h.....	184
Tablica 12.49.	Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala.....	185
Tablica 12.50.	Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala nakon	186

	starenja od 1000 h.....	
Tablica 12.51.	Rastezna svojstva originalnog materijala pri sobnoj atmosferi.....	187
Tablica 12.52.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 500 h.....	188
Tablica 12.53.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 1000 h.....	189
Tablica 12.54.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod prirodnog starenja.....	190
Tablica 12.55.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod sušenja 2 h pri 100 °C.....	191
Tablica 12.56.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 1 dan.....	192
Tablica 12.57.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 4 dana...	193
Tablica 12.58.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 7 dana...	194
Tablica 12.59.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 14 dana.	195
Tablica 12.60.	Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 28 dana.	196
Tablica 12.61.	Rastezna svojstva miješanog materijala pri sobnoj atmosferi.....	197
Tablica 12.62.	Rastezna svojstva miješanog materijala kod starenja u UV komori 1000 h.....	198
Tablica 12.63.	Rastezna svojstva miješanog materijala kod prirodnog starenja.....	199
Tablica 12.64.	Rastezna svojstva miješanog materijala kod apsorpcije vode 28 dana...	200
Tablica 12.65.	Rastezna svojstva recikliranog materijala pri sobnoj atmosferi.....	201
Tablica 12.66.	Rastezna svojstva recikliranog materijala kod starenja u UV komori 1000 h.....	202
Tablica 12.67.	Rastezna svojstva recikliranog materijala kod prirodnog starenja.....	203
Tablica 12.68.	Rastezna svojstva recikliranog materijala kod apsorpcije vode 28 dana.	204
Tablica 12.69.	Rastezna svojstva pri različitim temperaturama komore.....	205
Tablica 12.70.	Svojna svojstva originalnog materijala pri sobnoj atmosferi.....	206
Tablica 12.71.	Svojna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 500 h.....	207
Tablica 12.72.	Svojna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 1000 h.....	208
Tablica 12.73.	Svojna svojstva originalnog materijala kod prirodnog starenja.....	209
Tablica 12.74.	Svojna svojstva originalnog materijala kod sušenja 6 h pri 100 °C.....	210
Tablica 12.75.	Svojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 1 dan.....	211
Tablica 12.76.	Svojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 4 dana.....	212
Tablica 12.77.	Svojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 7 dana.....	213
Tablica 12.78.	Svojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 14 dana...	214
Tablica 12.79.	Svojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 28 dana...	215
Tablica 12.80.	Svojna svojstva miješanog materijala pri sobnoj atmosferi.....	216
Tablica 12.81.	Svojna svojstva miješanog materijala kod starenja u UV komori 1000 h.....	217

Tablica 12.82.	Svojna svojstva miješanog materijala kod prirodnog starenja.....	218
Tablica 12.83.	Svojna svojstva miješanog materijala kod apsorpcije vode 28 dana.....	219
Tablica 12.84.	Svojna svojstva recikliranog materijala pri sobnoj atmosferi.....	220
Tablica 12.85.	Svojna svojstva recikliranog materijala kod starenja u UV komori 1000 h.....	221
Tablica 12.86.	Svojna svojstva recikliranog materijala kod prirodnog starenja.....	222
Tablica 12.87.	Svojna svojstva recikliranog materijala kod apsorpcije vode 28 dana..	223

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	površina
A_0	mm^2	početna površina
b	mm	širina
b_0, \dots, b_k		koeficijenti
b_1	mm	širina uskog dijela, tj. ispitnog dijela
b_2	mm	širina dijela koji se steže u čeljusti uređaja
c	%	apsorpcija vode
d	mm	promjer laserske zrake
d_e	mm	efektivni promjer srašćivanja
d_{ej}	mm	efektivni promjer srašćivanja jezgre
d_{ek}	mm	efektivni promjer srašćivanja konture
DF		stupnjevi slobode
d_k	mm	pomak laserske zrake
E	MPa	modul rastezljivosti
ED	J/mm^2	gustoća energije (e. <i>energy density</i>)
E_f	MPa	modul savitljivosti
F		varijabla
F		broj faktorskih stanja
F	N	sila
F_m	N	maksimalna sila
F_{\max}	N	maksimalna sila
F_s	N	savojna sila
h	mm	debljina
h	mm	razmak između putanje laserske zrake
H	Shore D	tvrdća prema Shoru D
H_o		rizik odbacivanja hipoteze
HRC	Rockwell M	tvrdća prema Rockwellu M
k		broj promatranih faktora
l	mm	duljina
l	μm	mjerna duljina hrapavosti površine
l_1	mm	duljina uskog paralelnog dijela
l_2	mm	udaljenost između proširenog paralelnog dijela
l_3	mm	ukupna duljina
L	mm	razmak oslonaca
L	mm	početna udaljenost između čeljusti uređaja
L_0	mm	početna mjerna duljina

L_0	mm	nominalna dimenzija CAD modela
L_n	mm	dimenzija izrađenog prototipa
L_t	mm	referentna duljina
m		srednja referentna linija profila neravnina
m	kg	masa
m_1	g	masa prije uranjanja u vodu
m_2	g	masa nakon uranjanja u vodu
Min		minimalna vrijednost
Max		maksimalna vrijednost
n		broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine
P	W	snaga lasera
P_t	μm	ukupna visina primarnog profila
r	mm	polumjer
r^2		koeficijent determiniranosti
R	MPa	rastežno naprezanje
R		raspon
R_1	mm	polumjer opterećenja
R_2	mm	polumjer oslonca
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila – mjera hrapavosti površine
R_m	MPa	rastezna čvrstoća
R_{max}	μm	maksimalna visina najvišeg vrha i najnižeg dola profila
R_p	MPa	prekidna čvrstoća
R_p	μm	najveća visina vrha profila
R_{pm}	μm	prosječna najveća visina vrha profila
R_t	μm	ukupna visina profila
R_v	μm	najveća dubina dola profila
R_z	μm	srednja visina neravnina
R_x	MPa	konvencionalna granica razvlačenja
S	%	devijacija po određenoj dimenziji
S	mm	progib
S		procijenjeno standardno odstupanje
S_C	mm	dogovoreni progib
S_{max}	mm	maksimalni progib
SKO		suma kvadrata odstupanja
t	min	vrijeme izrade
T_m	K	talište
T_g	K	staklište
v	mm/s	brzina laserske zrake
v	mm/min	brzina ispitivanja

$z(x), z_i$	μm	visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu liniju
z_{pi}	μm	visina i-tog najvišeg vrha
z_{vi}	μm	udubina i-te najniže udoline
x	μm	dužina uzduž mjerne duljine
x		faktor prekrivanja
x_1, x_2, x_3		faktori
\bar{x}		aritmetička sredina
w	mm	širina uskog područja za srašćivanje
W_t	μm	ukupna visina valovitosti
α		osna udaljenost (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa)
α	$^\circ$	kut izrade
β	$^\circ$	kut izrade
$\dot{\gamma}$	$1/\text{s}$	smična brzina
δ	$\%$	konačno istezanje, istegnuće
ΔL_0	mm	produljenje
ε	$\%$	rastezno istezanje
ε_f	$\%$	savojno istezanje
ε_{fm}	$\%$	savojno istezanje pri savojnoj čvrstoći
ε_{fp}	$\%$	prekidno savojno istezanje
ε_K	$\%$	konačno istezanje, istegnuće
ε_p	$\%$	prekidno istezanje
ε_u	$\%$	ukupno istezanje
η		smična viskoznost
λ_c	mm	granična vrijednost GS električnog filtra (granična valna dužina za profil hrapavosti)
ρ	g/cm^3	gustoća
σ		standardno odstupanje
σ_f	MPa	savojno naprezanje
σ_{fC}	MPa	dogovorena (konvencionalna) granica savijanja
σ_{fm}	MPa	savojna čvrstoća
σ_{fp}	MPa	prekidno savojno naprezanje
τ	N/mm^2	smično naprezanje

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
2D	dvodimenzionalno
3DP	trodimenzionalno tiskanje (e. <i>3D Printing</i>)
3D	trodimenzionalno
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
AM	aditivna proizvodnja, aditivni postupci (e. <i>Additive Manufacturing</i>)
AMF	datoteka modela pri primjeni za aditivne postupke (e. <i>Additive Manufacturing File</i>)
Ar	argon
C	ugljik
C ₃ H ₃ N	akrilonitril
C ₄ H ₆	butadien
C ₈ H ₈	stiren
CAD	konstruiranje pomoću računala (e. <i>Computer Aided Design</i>)
CAM	računalna izrada (e. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CIM	računalno integrirana izrada (e. <i>Computer Integrated Manufacturing</i>)
CMYK boje	plava, crvena, žuta i crna boja (e. <i>cyan, magenta, yellow i black</i>)
CNC	računalno numeričko upravljanje (e. <i>Computer Numerical Control</i>)
CO ₂	ugljik dioksid
D	donji sloj
DLP	Digitalno obrađen svjetlosni signal (e. <i>Digital Light Processing</i>)
DMD	digitalna mikroogledala (e. <i>Digital Micromirror Devices</i>)
EP	epoksidna smola
EtO	plin etilen oksid (e. <i>ethylene oxide gas</i>)
FDM	taložno očvršćivanje (e. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
FMS	sustav prilagodljive proizvodnje (e. <i>Flexible Manufacturing System</i>)
G	gornji sloj
H	vodik
He-Cd	helij - kadmij
LOM	proizvodnja laminiranih objekata (e. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
Lxy	orijentacija u ravnini xy s visinom u z smjeru 4 mm
GF	staklena vlakna (e. <i>Glass Fibre</i>)
M	miješani materijal
MFR	maseni protok taljevine (e. <i>Melt Flow Rate</i>)
N	dušik
NC	numeričko upravljanje (e. <i>Numerical Control</i>)
O	kisik

P	prijelazno područje
P	hrapavost (primarni (nefiltrirani) profil)
PA	poliamid
PA 6	poliamid na osnovi ϵ kaprolaktama
PA 11	poliamid na osnovi aminoundekanske kiseline
PA 12	poliamid na osnovi dodekanske kiseline
PA 66	poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline
PA GF	poliamid ojačan staklenim česticama ili vlaknima
PBT	poli(butilen - tereftalat)
PC	polikarbonat
PCL	polikaprolakton
PE	polietilen
PE-HD	polietilen visoke gustoće
PE-LD	polietilen niske gustoće
PLA	polilaktid
PMMA	poli(metil-metakrilat)
PP	polipropilen
PPSF/PPSU	poli(fenilen-sulfon)
PS	polistiren
PUR	poliuretan
PVA	poli(vinil-amid)
PVC	poli(vinil-klorid)
Pz	orijentacija u smjeru z osi s visinom 80 mm ili 150 mm
Pxy	orijentacija u ravnini xy s visinom u z smjeru 10 mm
R	radikal
R	hrapavost (filtrirani profil)
R	reciklirani materijal
RGB boje	crvena, zelena, plava boja (e. <i>red, green, blue</i>)
RM	brza (izravna) proizvodnja (e. <i>Rapid Manufacturing</i>)
RP	brza proizvodnja prototipa (e. <i>Rapid Prototyping</i>)
RT	brza proizvodnja kalupa ili alata (e. <i>Rapid Tooling</i>)
RTV	umreživanje kaučuka pri sobnoj temperaturi (e. <i>Room Temperature Vulcanisation</i>)
SLA/SL	stereolitografija (e. <i>Stereolithography</i>)
SLS	selektivno lasersko srašćivanje (e. <i>Selective Laser Sintering</i>)
.STL	triangulizacijska datoteka (e. <i>Standard Tessellation Language</i>)
TIR	totalna unutarnja refleksija (e. <i>total internal reflection</i>)
U	unutrašnji sloj
UV	ultravioletno zračenje

z os	koordinatna os
x os	koordinatna os
X - zrake	rendgenske zrake
y os	koordinatna os
W	hrapavost (valovitost)

1. UVOD

Aditivni postupci su postupci izrade modela, prototipova, dijelova kalupa i alata i gotovih tvorevina komplicirane geometrije u kratkom vremenu. Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi proizvode tvorevine dodavanjem materijala sloj po sloj. Glavna prednost aditivnih postupaka je ta što ti procesi izrađuje tvorevinu u jednom koraku, izravno iz modela. Aditivni postupci ne zahtjevaju planiranje toka procesa, izradu kalupa, specifičnu opremu za rad s materijalima, transport između radnih mjesta, itd. Međutim, glavni nedostatak tih postupaka je taj, što su trenutno ograničeni na određene materijale. No sve se više nastoji poboljšati te postupke, tako da se prototipovi mogu primjeniti i kao funkcionalne i konačne tvorevine, pa je zbog toga potrebno poznavati svojstva materijala, npr. mehanička, toplinska i električna.

Zbog toga je potrebno za bolje razumijevanje radnih mogućnosti i ograničenja izraditi bazu svojstava dostupnih materijala kod različitih aditivnih postupaka. Znanje o mehaničkim svojstvima tih materijala može pomoći u boljem odabiru pogodnijeg postupka i izrade za zahtjevne primjene, kao npr. u medicini, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji.

AM postupci mogu se podijeliti prema četiri glavna čimbenika: vrsti materijala, izvoru energije, postupku oblikovanja sloja i obliku završne tvorevine. Ti čimbenici imaju utjecaj na kvalitetu završne površine, dimenzijsku točnost, mehanička svojstva, vrijeme i cijenu ukupne proizvodnje.

U aditivnim postupcima razlikuju se tri koraka: rezanje modela u slojeve, slaganje i kombiniranje slojeva. Zato AM postupci zahtjevaju samo reprezentativne podatke za proizvodnju fizikalnih objekata.

AM može skratiti vrijeme i sniziti trošak potreban da se napravi nova tvorevina od početnog koncepta do proizvodnje. Aditivni postupci mogu pomoći u prepoznavanju osnovnih pogrešaka na tvorevinama koje su u kasnijim fazama njihove proizvodnje skupe za ispravljanje. Međutim, AM dijelovi nisu jeftini (na njihovu cijenu utječe: vrijeme izrade, cijena samog stroja i kasnije održavanje, rad operatera – tijekom izrade, naknadne obrade i čišćenja, cijena materijala i cijena materijala za potpurnu strukturu) i ponekad je teško odlučiti koliko ih izraditi da se dobije maksimalna korist od njih.

2. HIPOTEZA RADA

Aditivni postupci (AM) izrade tvorevina sve se više primjenjuju u projektima razvoja od početne ideje do gotove tvorevine. Razlozi su višestruki, ali valja istaknuti mogućnost relativno brze proizvodnje tvorevina komplicirane geometrije na temelju računalnog 3D modela tvorevine.

AM postupci mogu se općenito podijeliti na postupke koje primjenjuju materijal na bazi krutine (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevine i praha. Neki od značajnih postupaka koji primjenjuju čvrsti materijal su *Taložno očvršćivanje* (e. *Fused Deposition Modeling - FDM*) i *Proizvodnja laminiranih objekata* (e. *Laminated Object Manufacturing - LOM*), postupci koji primjenjuju kapljevine materijale su *Stereolitografija* (e. *Stereolithography - SLA*), *Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom* (e. *Digital Light Processing*) i *PolyJet* postupak, dok u postupke koji primjenjuju prah su npr. *Selektivno lasersko srašćivanje* (e. *Selective Laser Sintering - SLS*) i *3D tiskanje* (e. *3D Printing – 3DP*).

Aditivni postupci sve se više razvijaju od izrade prototipova do završnih funkcionalnih tvorevina. Međutim, njihov brzi razvoj sa sobom povlači i razvoj novih materijala i njihovih svojstava, završnih obrada, novih ispitivanja, itd. U uspješnu primjenu tvorevina načinjenih AM postupcima potrebno je voditi računa o specifičnim parametrima procesa.

Najčešće se upotrebljavaju polimerni materijali, kao akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PC), poli(metil-metakrilat) (PMMA), poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani, epoksidne smole, ali i čelik, aluminij, titan i druge lake legure. Za izbor materijala najvažniji čimbenici su: mehanička svojstva i pogodnost za korištenje kao završna tvorevina, jednostavnost završne obrade, niža cijena materijala i olakšano rukovanje i skladištenje materijala.

Postoje i mnogobrojna ograničenja prvenstveno u broju dostupnih materijala i njihovih svojstava, koja se mogu dosta razlikovati od svojstava materijala gotove tvorevine. Stoga je potrebno poznavati svojstva materijala prototipova, posebno ako se primjenjuju za neke funkcionalne tvorevine.

Hipoteza rada polazi od činjenice da pri AM postupcima na mehanička svojstva materijala utječe postupak izrade i parametri proizvodnje. U radu su ispitani materijali i parametri postupka selektivnog laserskog srašćivanja (SLS). Tijekom SLS postupaka moguće je podešavati parametre izrade; položaj otpreska u izradbenom prostoru (može utjecati na mehanička svojstva i estetski izgled prototipa), debljina sloja (utječe na mehanička svojstva), vrsta ojačavala (npr. staklena vlakna), maksimalno popunjavanje izradbenog prostora stroja (osim minimalne udaljenosti od rubova i od drugih prototipova, potrebno je komoru popuniti sa čim više dijelova, u protivnom ostaje neupotrebljenog materijala), brzina izrade i snaga lasera. Pravilnim izborom

parametara izrade mogu se postići povišena svojstva prototipa (izgled površine - hrapavost, dimenzijska točnost i mehanička svojstva (rastezna svojstva, savojna svojstva i tvrdoća ispitnih tijela)).

Premda nije najvažniji čimbenik, cijena materijala igra značajnu ulogu prilikom analiziranja ukupne, tj. završne cijene tvorevine, te zbog toga recikliranje materijala postaje sve važniji čimbenik, ali i isto tako i odluka o omjeru miješanja originalnog i već upotrebljenog materijala.

U praksi se ne može izbjeći upotreba tvorevina u različitim atmosferskim uvjetima (UV zračenje i vlažna okolina) namjerno ili nenamjerno. UV svjetlost, čiji je najčešći izvor sunce, te prosječna vlažnost u različitim dijelovima svijeta može biti približno od 20 % do 90 %, ovisno o vremenu, danu i geografskom položaju. Radi toga potrebno je ustanoviti kako apsorpcija vode i UV svjetlost nakon dužeg vremena izlaganja utječu na svojstva prototipne tvorevine.

Na temelju navedenih činjenica i definicije problema postavlja se sljedeća hipoteza doktorskog rada:

Podešavanjem parametara izrade u postupku selektivnog laserskog srašćivanja, kombiniranjem upotrebe čistog i već upotrebljenog materijala, te izlaganjem gotove tvorevine atmosferskim utjecajima, uz pomoć statističke obrade, matematičke i eksperimentalne analize, moguće je skratiti vrijeme izrade i poboljšati svojstva tvorevine koja su usporediva sa svojstvima tvorevine načinjene klasičnim postupcima prerade polimernih materijala.

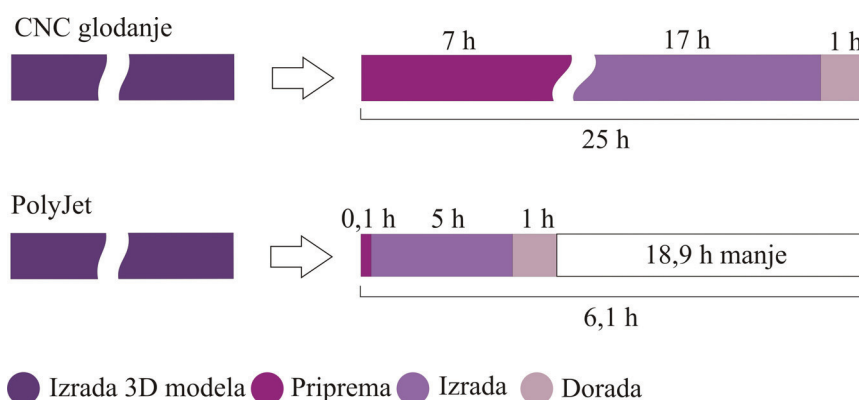
Hipoteza će se provjeravati nizom pokusa na SLS ispitnim tijelima, a dobivene spoznaje omogućiti će definiranje novih parametara i izbor odgovarajućih parametara postupka za najbolja svojstva prototipova.

Takvim dobivenim spoznajama izabrati će se odgovarajući parametri i s njima izraditi ispitna tijela od originalnog (čistog), miješanog i 100 % recikliranog materijala i izložiti ih utjecajima UV zračenja i vode. Nakon izlaganja atmosferskim uvjetima ispitati će se dimenzijska točnost, hrapavost, mehanička svojstva i usporediti ta svojstva s referentnim (početnim) ispitnim tijelima.

3. RAZVOJ I PRIMJENA ADITIVNIH POSTUPAKA PROIZVODNJE POLIMERNIH PROTOTIPOVA

Aditivnim postupcima proizvodnje prototipova moguće je izraditi fizičke modele, prototipove, dijelove kalupa i alata i funkcionalne dijelove iz 3D računalnog modela tijekom konstruiranja s pomoću računala (CAD), komplicirane geometrije koje je teško ili uopće nije moguće napraviti nekim drugim postupcima. [1]

Na slici 3.1 prikazana je usporedba vremena izrade tvorevine na CNC glodalici i PolyJet postupkom.



Slika 3.1. Usporedba vremena izrade tvorevine između dva postupka: CNC glodanje i PolyJet postupak [2]

3.1. Povijest AM postupaka

Prva industrijska upotreba AM postupaka bila je 1987. godine s postupkom stereolitografije proizvođača *3D Systems* u kojem se tanki sloj kapljevito polimera skrućuje s pomoću UV lasera. 1988. godine tvrtke *3D Systems* i *Ciba-Geigy* proizvele su prvu generaciju akrilnih smola. [1]

Postupak 3D tiskanja razvijen je 1989. godine u SAD-u na MIT sveučilištu. Tvrtka *3D Systems*, osam godina nakon izrade prvih strojeva za stereolitografiju, načinila je stroj za 3D tiskanje (*Actua 2100*) koji se zasniva na nanošenju voska sloj po sloj korištenjem inkjet postupka. Iste godine, tvrtka *Z Corp* predstavlja svoj 3D printer *Z402* koji radi prototipove od škroba, gipsa u obliku praha i kapljevito veziva. [1]

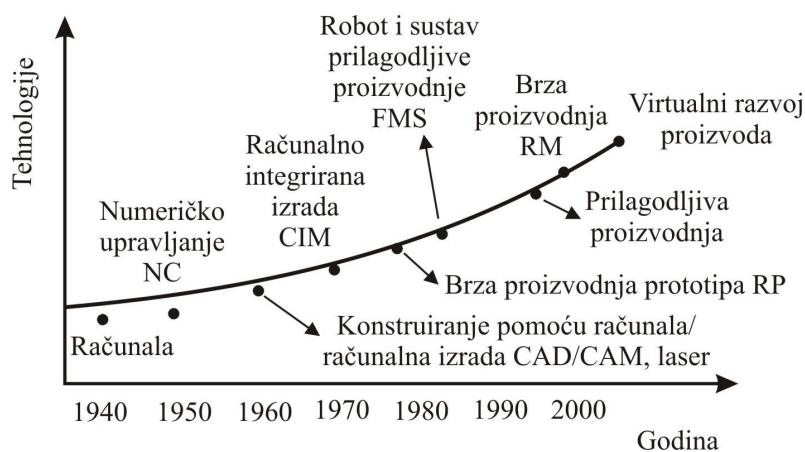
3. Razvoj i primjena aditivnih postupaka proizvodnje polimernih prototipa

Godine 1991. pojavili su se i drugi AM postupci, uključujući FDM tvrtke *Stratasys* i LOM tvrtke *Helisys*. U FDM-u prototip nastaje ekstrudiranjem slojeva plastomernih materijala, dok LOM postupak lijepi i reže slojeve papira ili folije. [1]

Tvrtka *DTM* (danas je u sklopu *3D Systems*) stavlja 1992. godine na tržište strojeve koji sračuju polimerne prahove toplinom lasera - SLS postupak. [1]

Slijede proizvodnje različitih materijala i strojeva raznih tvrtki.

Na slici 3.2 prikazan je povijesni razvoj proizvodnih tehnologija. Na y osi označena su imena tehnologija, dok na x osi godina razvoja određene tehnologije.

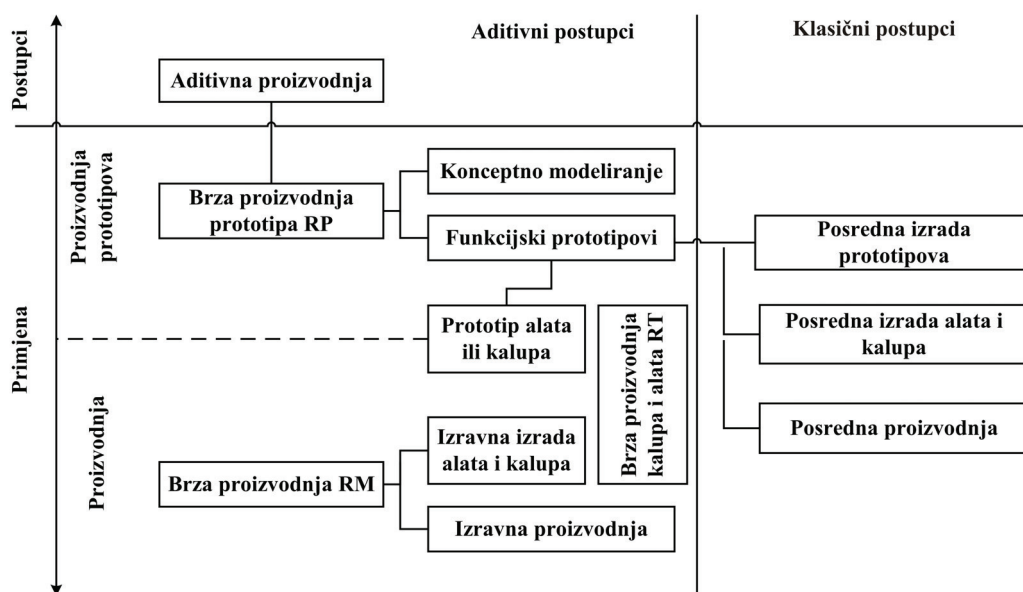


Slika 3.2. Povijesni razvoj tehnologija [3]

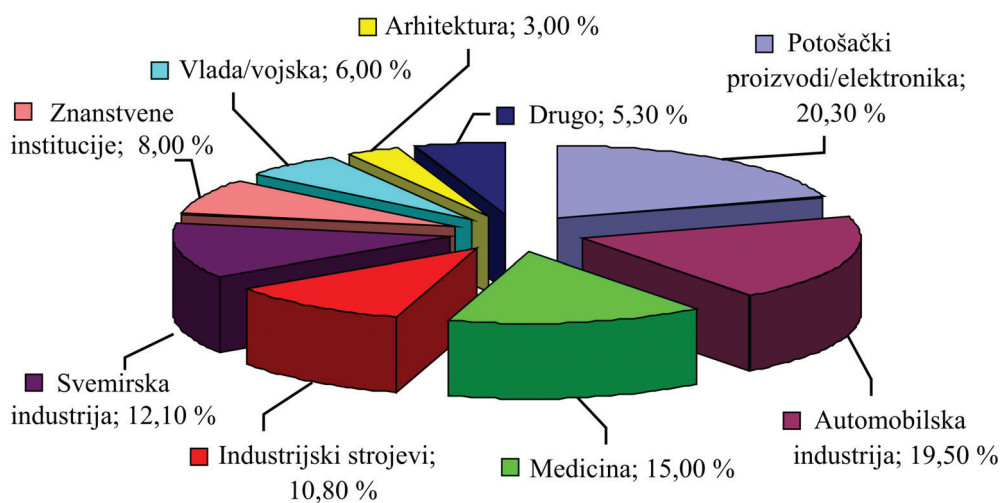
3.2. Razvoj, podjela i primjena AM postupaka

Podjela aditivnih postupaka prikazana je na slici 3.3 od izrade prototipova slojevitim postupcima do posredne primjene tih prototipova u klasičnim postupcima prerade. Kako su se tehnologije razvijale, postupci su našli sve veću primjenu na različitim područjima. Najviše se upotrebljavaju za proizvodnju potrošačkih proizvoda/elektronike, zatim u automobilskoj industriji i medicini, dok najmanje u arhitekturi (slika 3.4). Slika 3.5 prikazuje strukturu primjene prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina.

3. Razvoj i primjena aditivnih postupaka proizvodnje polimernih prototipa

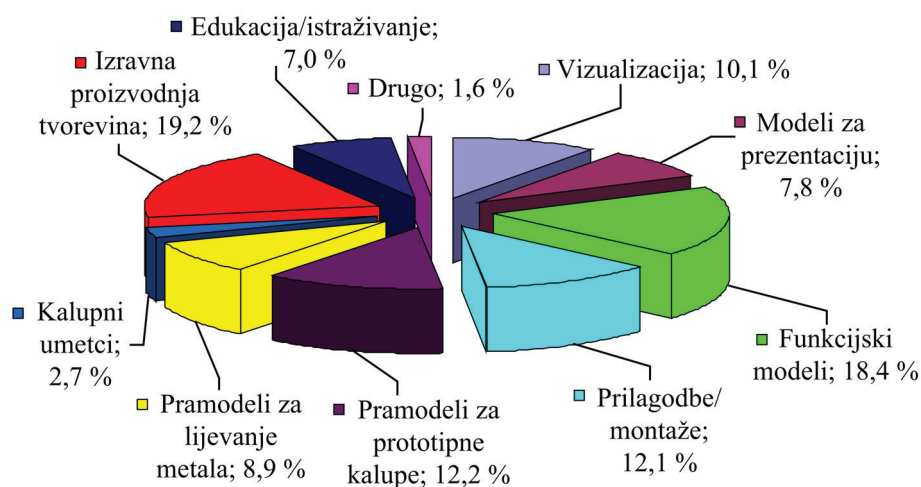


Slika 3.3. Podjela aditivnih postupaka [4]



Slika 3.4. Područja primjene AM postupaka u 2012. godini [5]

3. Razvoj i primjena aditivnih postupaka proizvodnje polimernih prototipa



Slika 3.5. Primjena prototipova pri razvoju i proizvodnji tvorevina u 2012. godini [5]

U tablici 3.1 prikazan je pregled poznatijih proizvođača AM strojeva pri preradi polimernih materijala, a u tablici 3.2 vrste materijala koje se upotrebljavaju u određenom postupku.

Tablica 3.1. Pregled nekih proizvođača AM strojeva kod prerade polimernih materijala [1, 2, 6, 7, 8]

Postupak	Tvrtka	Materijali	Opis
SLA	<i>3D Systems</i> , SAD	fotoosjetljiva polimerna smola	Debljina sloja od 0,05 mm do 0,15 mm, visoka kvaliteta površine.
	<i>DWS</i> , Italija	vosak, fotoosjetljiva polimerna smola	Debljina sloja od 0,01 mm do 0,15 mm. Najčešća upotreba u stomatologiji i za izradu nakita.
	<i>DMEC</i> , Japan	fotoosjetljiva polimerna smola	Debljina sloja 0,1 do 0,3 mm, točnost 0,1 do 0,2 mm
	<i>CMET</i> , Japan	fotoosjetljiva polimerna smola	Točnost 0,05 mm
Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom	<i>EnvisionTEC</i> , Njemačka	fotoosjetljiva polimerna smola	Za očvršćivanje se ne rabi laserska zraka, već UV svjetlo, čime je omogućeno očvršćivanje cijelog sloja tvorevine odjednom
PolyJet	<i>Objet Geometries Ltd.</i> , Israel	fotoosjetljiva polimerna smola	Za očvršćivanje se primjenjuje UV svjetlo, debljina sloja 16 μm.

3. Razvoj i primjena aditivnih postupaka proizvodnje polimernih prototipa

Tablica 3.1. Pregled nekih proizvođača AM strojeva kod prerade polimernih materijala - nastavak [1, 2, 6, 7, 8]

SLS	<i>3D Systems, SAD</i>	ABS, PVC, PA, PA - GF, PC, PS, pijesak	Dobra mehanička svojstva tvorevina. Primjena materijala u medicini, automobilske industriji, elektrotehnici, za izradu obuće, brtvi, itd.
	<i>EOS, Njemačka</i>	PA 12, PA - GF, metali	Za srašćivanje se primjenjuje laser, debljina slojeva 0,1 mm, dobra mehanička svojstva.
3DP	<i>Z Corp, SAD</i>	polimerni prahovi	Za izradu tvorevine ink-jet glava izbacuje vezivo i spaja čestice praha. Potrebna je dodatna obrada površine i očvršćivanje slojeva sa raznim smolama.
	<i>VoxelJet, Njemačka</i>	PMMA, pijesak	Radni prostor najvećeg pisača VX800 je 850-450-500 mm, što znači da se njime mogu načiniti vrlo velike prototipne tvorevine u jednom dijelu
FDM	<i>Stratasys, SAD</i>	ABS, vosak, PE, PP, PA, PC, ABS/PC	Debljina stjenke ovisi o promjeru mlaznice ekstrudera. Nemoguće izraditi oštre rubove. Moguće je ekstrudirati biokompatibilne materijale.
LOM	<i>Solido, Izrael</i>	PVC folija	Ovisno o kompliciranosti prototipa, potrebno je značajno vrijeme odstranjivanja viška materijala.
	<i>Mcor, Irska</i>	papir, PVA ljepilo	Rezolucija u x-y osi je 0,05 mm, a u z osi određena je debljinom papira. Boja ovisi o upotrebljenom papiru, prototip se može ojačati cijanoakrilatnim ljepilima i naknadno obrađivati pjeskarenjem i bojanjem. Upotrebljavaju se u arhitekturi, medicini i stomatologiji.
	<i>Helisys, SAD</i>	premazan papir, metal	Debljina sloja i točnost 0,1 mm
	<i>Kira, Japan</i>	običan papir za kopiranje	Loša mehanička svojstva, visoka apsorpcija vode

3. Razvoj i primjena aditivnih postupaka proizvodnje polimernih prototipa

Tablica 3.2. Materijali u AM postupcima [9, 10, 11]

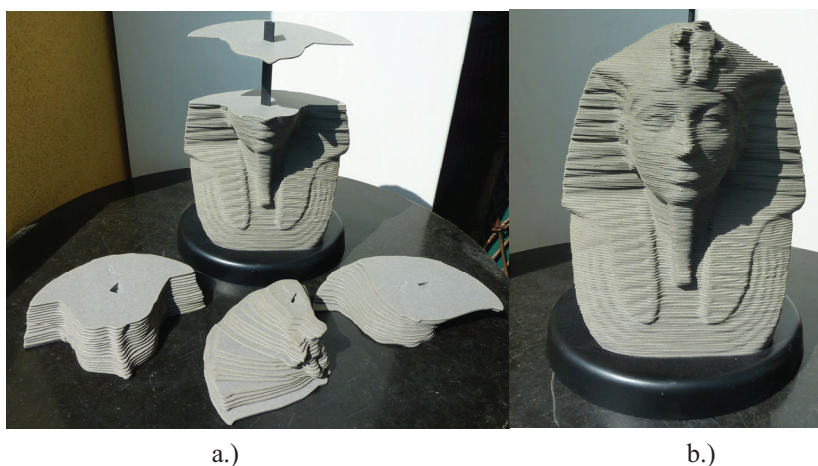
Postupak	Materijal
Stereolitografija – SLA	fotoosjetljiva polimerna smola, akrilne i epoksidne smole (npr. PMMA, EP, PE-HD), keramika
PolyJet	fotoosjetljiva polimerna smola
Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom	fotoosjetljiva polimerna smola
Selektivno lasersko srašćivanje – SLS	polimeri (PA, PS, PMMA), ojačani polimeri (npr. sa staklom), polimeri sa raznim punilima, keramika, metali
3D tiskanje – 3DP	polimeri, keramika, škrob, gips, metali
Taložno očvršćivanje – FDM	plastomeri (ABS, PE-HD, PE-LD, PP, PC, PPSU), PLA, keramika
Proizvodnja laminiranih objekata – LOM	polimer u obliku folija (PVC), papir, metalne ploče

4. ADITIVNI POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH PROTOTIPOVA

AM postupci upotrebljavaju se za izradu prototipova od metala, keramike i polimera u obliku kapljevine, praha, žica, folija, itd. Prema vrsti materijala dijele se na:

- kapljeviti materijali (npr. SLA, PolyJet, Očvršćivanje digitalno obrađenim svjet. signalom)
- materijal u obliku praha (npr. SLS, 3D tiskanje)
- kruti materijali (npr. FDM, LOM)

Princip aditivne proizvodnje prototipa može se shvatiti kao što je prikazano na slici 4.1, tj. iz 3D modela konstruiranog s pomoću računala izrežu se slojevi podjednake debljine i slažu se jedan na drugi. Rezultat takvog slaganja je stepenasti izgled površine. [4]

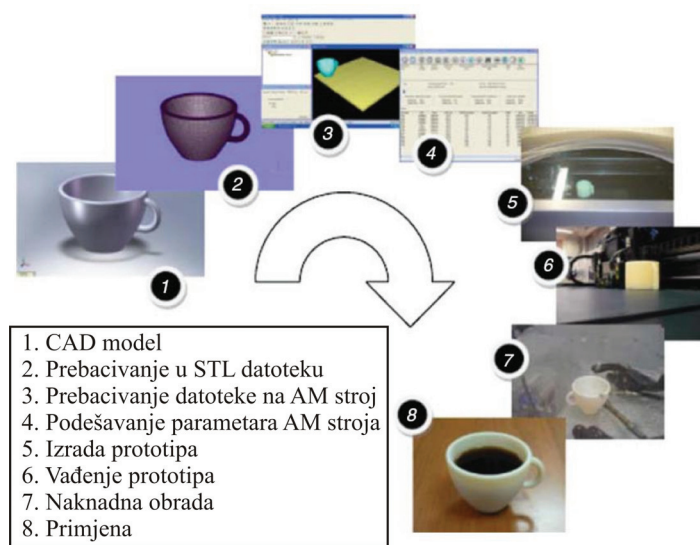


Slika 4.1. Princip aditivnih postupaka proizvodnje prototipova: a.) prikaz slaganja slojeva, b.) 3D tvorevina

4.1. Faze izrade prototipova

U svim postupcima proizvodnje prototipa faze izrade su iste i sastoje se od (slika 4.2) [12]:

- izrada CAD modela
- pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- prebacivanje STL datoteke na AM stroj
- podešavanje parametara AM stroja
- izrada prototipa
- vađenje prototipa
- naknadna obrada, ako je potrebna
- primjena



Slika 4.2. Faze AM postupaka [12]

Prvi korak svih AM postupaka, je izrada trodimenzionalnog geometrijskog modela u nekom CAD programu. Takav model sprema se u različitim formatima, no već od 1987. godine tvrtka *3D Systems* uvodi STL datoteku (e. *Standard Tessellation Language*) koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokuta (slika 4.3). STL datoteka nema boje (slika 4.3.b), pa je 2009. godine uvedena AMF datoteka (e. *Additive Manufacturing File*) koja uz STL postaje standard za AM postupke i čini osnovu za rezanje u slojeve na čemu se temelje AM postupci. AMF datoteka predstavlja jedan ili više objekata raspoređenih u vektore. Svaki objekt je opisan kao grupa nepreklopljenih volumena koji su opisani kao mreža trokuta koje povezuje grupu točaka. Te točke se mogu podijeliti između volumena. AMF datoteka može dati opis materijala i boje pojedinog volumena i boju svakog trokuta u mreži. [3, 7]



Slika 4.3. Tvorevina: a.) 3D model, b.) STL datoteka [7]

U nekim postupcima (npr. SLA, FDM, PolyJet) potrebno je izgraditi potpurnu strukturu, koja bi trebala slijediti obod donjeg sloja prototipa, uključujući njegove uglove. Podupiranjem, cijelo područje dna prototipa sprječava vitoperenje tvorevine tijekom izrade slojeva. [7]

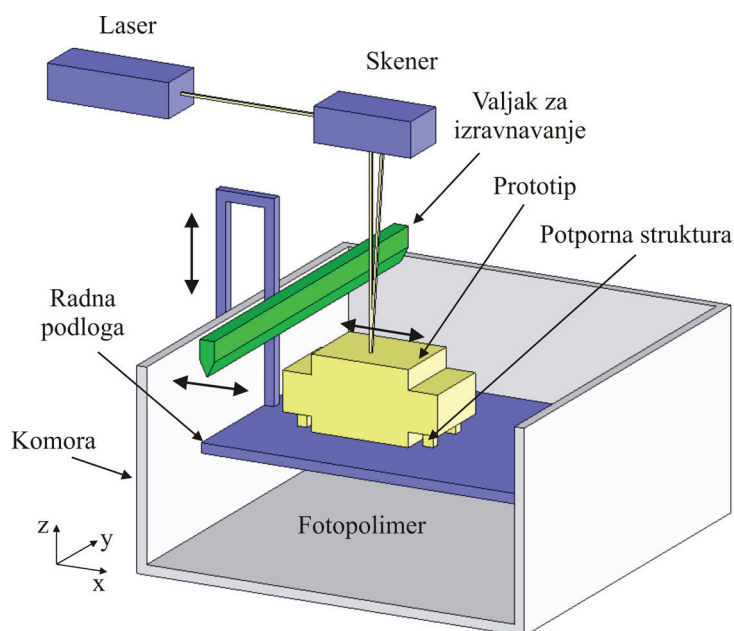
Nakon podešavanja parametra stroja (debljina sloja, snaga, brzina, itd.) slijedi izrada prototipa i nakon završetka zadnjeg sloja vađenje gotovog prototipa. Prilikom vađenja potrebno je paziti da je temperatura u radnom prostoru stroja dovoljno niska za sigurno rukovanje sa prototipom. U nekim postupcima (npr. stereolitografija, 3DP) potrebno je naknadno umreživanje da se završi proces polimerizacije, i poboljšaju mehanička svojstva, jer unutarnji dijelovi slojeva možda nisu u potpunosti očvršćeni. Slijedi naknadno obrađivanje (čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture, bojanje, itd.). [12]

4.2. Stereolitografija (e. *Stereolithography – SLA*)

Kasnih 1970-ih i ranih 1980-ih godina, A. Herbert iz *3M Korporacije* u Minneapolisu, H. Kodame iz *Nagoya Prefecture istraživačkog instituta* u Japanu i C. Hull s laboratorija *Ultra-Violet Products UVP-a*, California, radili su nezavisno na konceptu brze proizvodnje prototipova koji se temeljio na selektivnom umreživanju površinskog sloja fotopolimera i izradi trodimenzionalnih objekata sa uzastopnim slojevima. Herbert i Kodama su zaustavili svoj rad prije proizvodnje komercijalnih tvorevina zbog nedostatka financijske pomoći. Zadržavajući kontinuiranu pomoć UVP-a, Hull je proizveo sustav koji može automatski izgraditi detaljne tvorevine. Hull je postupak nazvao stereolitografija, temelj *3D Systems* - a, te 1987. počela je proizvodnja prvih stereolitografskih strojeva. [10]

SLA-1, prvi komercijalni stroj za brzu proizvodnju prototipova, konstruiran u *3D Systems* - u, predstavljen je javnosti na *AUTOFACT* izložbi u Detroitu u studenom 1987. [7]

Postupak stereolitografije prikazan je na slici 4.4.



Slika 4.4. Postupak stereolitografije [13]

Princip stereolitografije je da se fotopolimer skrućuje kada je izložen izvoru svjetlosti. Radna podloga smještena je samo jedan sloj debljine ispod vrha površine kapljevito polimera. Helij - kadmijski (He-Cd) ili argonski (Ar) laser generira i fokusira UV svjetlost i skenira sloj polimera iznad podloge koji očvršćuje. Taj korak počinje s najdonjim presjekom tvorevine. Radna podloga se zatim spušta prema dolje za debljinu idućeg sloja. Valjak za izravnavanje kapljevine fotopolimera služi za izbjegavanje mjehurića zraka u prototipovima. Kako se prototipovi proizvode u kapljevini, potrebno je osigurati položaj prototipa s pomoću potpore strukture, koja se uklanja nakon završetka postupka. Postupak se ponavlja do konačne proizvodnje prototipa. Prototip se vadi iz kapljevito polimera, a višak polimera se ispire u otapalu, čime nastaje tzv. "zelena faza". Naknadno umreživanje odvija se minimalno 1 sat izlaganjem naknadnom zračenju. Taj korak potreban je zbog toga što se neka kapljevita područja mogu zadržati u slojevima. [3, 12, 14, 15]

Fotopolimeri mogu očvrnuti elektromagnetskom radijacijom (γ -zrake, X-zrake, UV i elektronskim zrakama). Najčešći oblik očvršćivanja kod SLA postupka je s pomoću UV zračenja. Fotopolimerizacija je spajanje malih molekula (monomera) u velike molekule (polimer). Vinil monomer ima dvostruku vezu ugljika $C = C$ na koju se vežu slobodni radikali R. U smoli monomerne skupine su međusobno slabo povezane van der Waalsovima silama. Pod utjecajem lasera veza $C = C$ se prekida i spaja sa drugom i stvara dugački lanac. Time se kapljevina pretvara u krutinu, povisuje se gustoća i smična čvrstoća. Iako je vinil monomer već umrežen, stvaranjem jake, kovalentne veze među lancima postaje još čvršći. [3, 6]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

Prednosti SLA postupka su: kombinacija brzine, preciznosti (0,04 mm) i kvalitete završne površine, proizvode se vrlo fini detalji (visoka razlučivost), strojevi proizvode vrlo tanke slojeve debljine 0,05 mm do 0,15 mm, visoka proizvodnost. [3, 13]

Nedostaci postupka su: visoka cijena materijala, potrebno je naknadno umreživanje fotopolimera, upotreba potporne strukture (najčešće se upotrebljava vosak kao potporna struktura), materijali moraju biti pravilno skladišteni da ne dođe do prerane polimerizacije, mogućnost upotrebe uske skupine materijala (samo fotopolimeri), stezanje polimera nakon očvršćenja uzrokuje vitoperenje prototipa, prototip može biti dosta krhak, u prototipovima sa zatvorenom površinom može ostati zarobljena kapljevina, potreban je poseban prostor za uređaj jer fotopolimeri razvijaju štetne plinove, potrebno je naknadno uklanjanje potporne strukture, skupo održavanje lasera. [2, 3, 13, 14, 16]

Tvorevine izrađene stereolitografijom primjenjuju se kao prototipovi, tvorevine, RT modeli, modeli za kalupe za injekcijsko prešanje i modele za fino lijevanje oko keramičke ljuske (e. *investment casting*) i pješćani lijev. [3]

Materijali koji se primjenjuju u postupku stereolitografije [17]:

Akriлни poli(metil-metakrilat) - PMMA (poznat kao pleksiglas) je amorfan, plastomerni materijal sa dobrim optičkim svojstvima (proziran je poput stakla i propušta 92 % sunčeve svjetlosti). PMMA je čvrst, krut, lako se polira. Otporan je na razne atmosferilije (npr. sunce).

Epoksidna smola (EP) je čvrst i vrlo postojan duromer na utjecaj skoro svih kiselina i otapala, koja ne sadrže klor. Primjenjuje se kao vezivo za popunjavanje praznina otpreska. Mnogi kompozitni materijali ojačani su epoksidom.

U stereolitografiji se upotrebljavaju i materijali svojstava sličnih:

Polietilen visoke gustoće (PE – HD) je čvršći, viših mehaničkih svojstava i nešto veće mase od PE niske gustoće, ali je manje duktilan. Lakši je od vode i može se primjeniti kod injekcijskog prešanja, za strojnu obradu i spajati zavarivanjem, no teško se lijepi. Izgledom je sličan vosku, neproziran i bez sjaja. Primjenom UV stabilizatora (crnog ugljika) može mu se poboljšati postojanost na utjecaj atmosferilija, ali postaje crn. Neke vrste PE - HD mogu se primjeniti u kontaktu sa hranom.

Polipropilen (PP) ima veliku savitljivost uz zadržavanje početnog oblika, dobre rezolucije i točnosti, podnosi visoke brzine izrade. Upotrebljava se za tvorevine, modele kalupa za injekcijsko prešanje, modele za silikonske RTV kalupe, igračke i elektroničke komponente. [18]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

Poliamid 66 (PA 66) je postojan pri visokim temperaturama, ima odličnu žilavost, malo skupljanje, tvorevine ostaju krute i kada su izložene vlazi i primjenjuju se za ispitivanja pri visokim temperaturama i analizi oblika i dimenzija. [18]

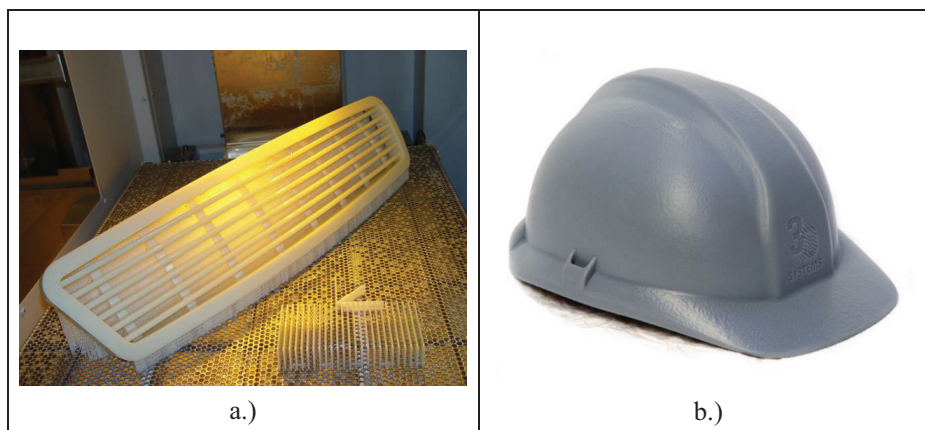
Akilonitril/butadien/stiren (ABS) se upotrebljava i za funkcionalne prototipove i modele za kalup. Materijal ima malo naknadno skupljanje, moguće je s njim izrađivati tankostjene tvorevine, ima izvrsnu završnu površinu, što smanjuje potrebu za završnom obradom. Gotovi prototipovi imaju visoku točnost s malim vitoperenjem. Primjenjuje se za unutrašnje dijelove automobila, u elektronici, za modele kod lijevanja uretana i funkcionalne prototipove. [18]

Polikarbonat (PC) zbog svoje visoke prozirnosti upotrebljava se kod analize strujanja fluida i kao vizualizacijski modeli. Također se upotrebljava u automobilskoj industriji, elektronici, medicini, itd. [18]

Poli(butilen - tereftalat) (PBT) je fotopolimer na osnovi epoksida koji ima nisku apsorpciju vlage (0,24 %), u vlažnim uvjetima zadržava dobra mehanička svojstva i mogu se provoditi neka jednostavna ispitivanja. [19]

Nano-kompoziti upotrebljavaju se u automobilskoj i svemirskoj industriji, za tvorevine koje su izložene povišenim temperaturama, za kućišta kod elektroničkih i mehaničkih sklopova, za pumpe, itd. Materijal se odlikuje visokom krutošću, postojanošću pri visokim temperaturama (do 250 °C) i apsorpciji vlage, te maloj deformaciji pri visokom opterećenju. [18]

Na slici 4.5 prikazane su neke tvorevine izrađene postupkom stereolitografije. Na slici 4.5.a prikazana je velika tvorevina kod koje je posebno zahtjevno optimalno riješiti potpurnu konstrukciju.



Slika 4.5. Prototipovi izrađeni SLA postupkom [18]: a.) ventilacijska rešetka, b.) kaciga

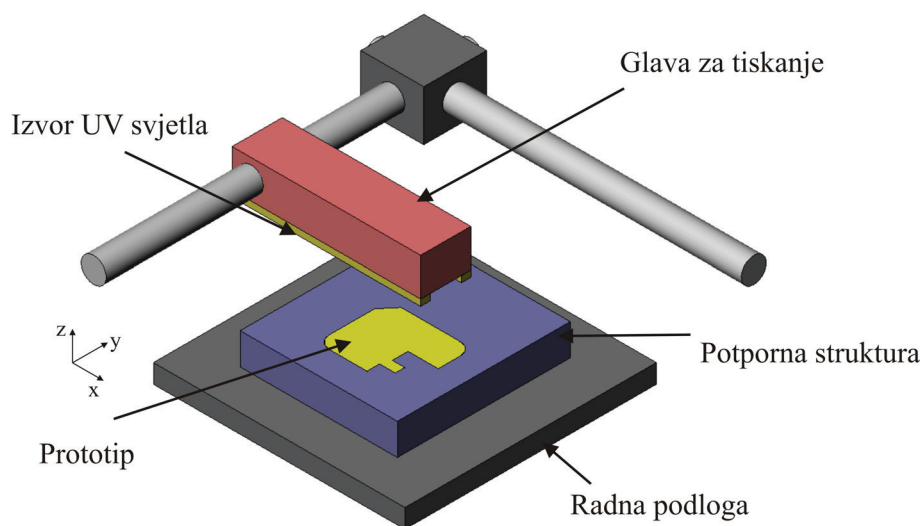
Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom stereolitografije navedene su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju stereolitografijom [19]

Svojstva	Vrijednosti
Masa m , kg	0,1 - 20
Maksimalne dimenzije, mm	10 - 580
Debljina presjeka, mm	0,5 - 100
Promjer provrta, mm	0,4 - 20
Minimalni polumjer zakrivljenosti, mm	0,4 - 1
Tolerancije, mm	0,1 - 2
Hrapavost, μm	100 - 125

4.3. PolyJet postupak

Tvrtna *Objet Geometries* razvila je PolyJet (mreža mlaznica) postupak 2000. godine, sjedinjujući dobre strane stereolitografije (SLA) i 3D tiskanja [2] (slika 4.6).



Slika 4.6. PolyJet postupak [14]

Mreža mlaznica kliže naprijed – nazad u smjeru y – osi i nanosi/tiska sloj fotoosjetljivog polimernog materijala na radnu podlogu, debljine $16 \mu\text{m}$, što je otprilike $1/5$ debljine

4. Aдитivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

stereolitografskog sloja. Svaki sloj fotoosjetljivog polimera očvršćuje pod djelovanjem UV svjetlosti, odmah nakon tiskanja, tvoreći potpuno umrežen prototip, bez naknadnog umreživanja. Primjenjuju se dva različita materijala: jedan za model, a drugi kao potporna struktura, tj. pola mreže mlaznica nanosi materijal za model, a druga polovica za potporna strukturu. Nakon završenog prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu sljedećeg sloja i glava za tiskanje započinje izradu tog sljedećeg sloja. Nakon izrade prototipa potporna struktura (materijal u obliku gela) se lako uklanja sa vodom pri tlaku od 40 bara ili ručno, što zavisi od oblika prototipa. Tankostjene i male tvorevine čiste se s nižim tlakovima, dok robusne s visokim tlakovima čime je skraćeno vrijeme čišćenja. [2, 12, 13, 20, 21]

Mala debljina sloja osigurava izradu prototipova s vrlo glatkom površinom zbog čega nije potrebna naknadna obrada. Gotove tvorevine mogu se obrađivati mlazom čestica, polirati, brusiti, bojati, itd. Prototipovi se mogu primjeniti kao modeli za proizvodnju silikonskih kalupa za podtlačno lijevanje upotrebom specijalne komore za izgaranje modela. [21]

Prednosti postupka su: visoka kvaliteta (zbog vrlo tankog sloja prototipovi su vrlo precizni i imaju jako glatku završnu površinu), mogućnost izrade sitnih detalja i tankih stijenki, primjena u uređima (nema dodira sa smolom i potporna struktura se uklanja s vodom), postupak je brz, nije potrebno naknadno umreživanje i moguće je upotrebljavati različite *FullCure* materijale koji omogućuju različitu geometriju, mehanička svojstva i boju. [20]

PolyJet postupak se primjenjuje u automobilskoj industriji, elektronici, za proizvodnju igračaka, obuće, potrošačkih dobara i za izradu nakita. [2]

PolyJet postupkom moguće je i miješati materijal (*Digital Materials*) kojim se postižu ciljana svojstva gotove tvorevine (slika 4.7.a). Postupak se temelji na načelu *PolyJet Matrix*. No nedostatak takvog postupka je visoka cijena uređaja. [8]

Materijali koji se primjenjuju u *PolyJet* postupku su:

FullCure fotopolimerni akrilni materijali koji omogućuju izradu 3D modela visoke preciznosti i finih detalja. Velika različitost smola u FullCure-u, uključuje prozirnost, obojenost, neprozirnost, savitljivost i krutost. Postoje *FullCure 720* (slika 4.7.b), *VeroBlue* (slika 4.7.c), *VeroWhite*, *VeroGray*, *VeroBlack*, *DurusWhite*, *TangoPlus*, *TangoBlackPlus*, *TangoGray* i *TangoBlack* (slika 4.7.d) materijali. [20]

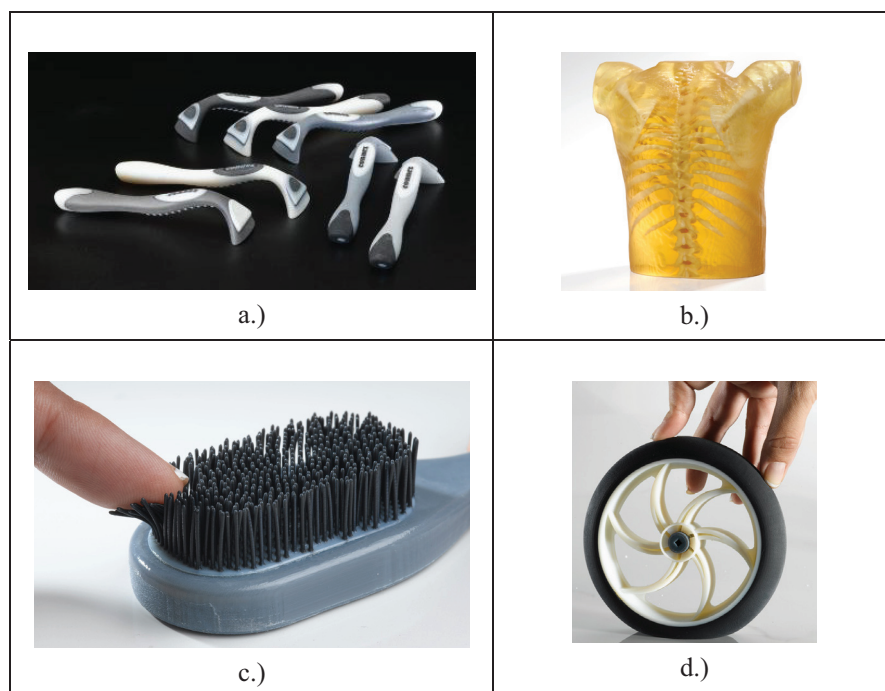
FullCure 720 je proziran akrilni fotopolimer koji je prikladan za krute modele. Prednosti tog materijala su: nije potrebna naknadna obrada, prekidno istezanje je 20 %, dobra savojna žilavost i mogućnost strojne obrade, bušenja i kromiranja. [20]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

Vero materijali su neprozirni materijali u boji, koji omogućuju izradu finih detalja i smanjuju potrebu za bojanjem. Imaju izvrsnu savojnu žilavost i modul savitljivosti. *VeroBlack* je materijal s visokim modulom savitljivosti i visokom postojanošću na vlagu, što ga čini pogodnim za mnoge primjene. Neprozirna crna boja omogućava upotrebu u elektronici. *VeroGray* ima izvrsnu dimenzijsku točnost, nisku apsorpciju vode, visoku savojnu čvrstoću (95 MPa) i modul savijanja. Primjenjuje se u automobilske industriji, za izradu igračaka, u medicini, elektronici, itd. [20]

DurusWhite je materijal koji ima svojstva slična polipropilenu i ima dobru savitljivost, čvrstoću i žilavost. [20]

Tango materijali imaju izvrsno prekidno istežanje (> 50 %), savitljivost i elastičnost. Postoje *TangoBlack*, koji omogućuje maksimalnu elastičnost sa tvrdoćom od 61 Shore-a, *TangoGray*, koji je malo tvrdi (75 Shore-a) i *TangoPlus* kod kojeg je prekidno istežanje 218 %. [8, 20]



Slika 4.7. Prototipovi izrađeni PolyJet postupkom: a.) Digital – držači britvica, b.) FullCure 720 - kralježnica, c.) VeroBlue u kombinaciji s Tango - četkica, d.) Tango – kotač [20]

4.4. Selektivno lasersko srašćivanje (e. *Selective Laser Sintering – SLS*)

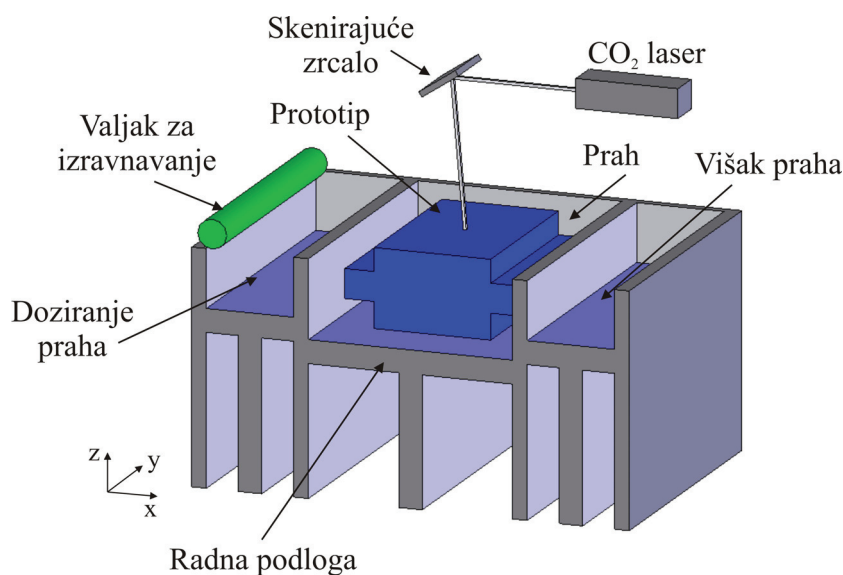
Selektivno lasersko srašćivanje (slika 4.8) jedan je od najvažnijih postupaka izrade prototipova. Tim je postupkom moguće upotrebljavati gotovo sve vrste materijala koji su preradljivi u praškastom obliku [14]. Postupak je razvijen na University of Texas, Austin i komercijalizirala ga je tvrtka *DTM* 1989. godine u SAD-u. [16]

SLS postupak prvenstveno je zamišljen za proizvodnju polimernih prototipova, ali je proširen i na metalne i keramičke tvorevine. [12]

Čitav postupak odvija se u temperiranoj komori ispunjenoj inertnim plinom, npr dušikom, da se izbjegne oksidacija površine i potencijalno izgaranje čestica praškastog materijala. [12, 14]

Radna podloga smještena je na visini koja je potrebna da se položi sloj praškastog materijala i dobije željena debljina sloja. Praškasti materijal nanosi se iz komore koja sadrži materijal za obradu, s pomoću valjka ili ravne ploče za izravnavanje. Prah u radnoj komori održava se pri temperaturi neposredno ispod tališta T_m (kod kristalastih plastomera, najčešće PA) i/ili staklišta T_g (što je tipično za amorfne plastomere, kao što je PC). Kristalasti i kristalni plastomeri imaju bolja mehanička svojstva od amorfnih, pa je primjena kristalnih i kristalastih plastomera ograničena za izradu modela za fino lijevanje oko keramičke ljuske (e. *investment casting*). Sloj praha skenira se i grije toplinskom energijom laserske zrake, te dolazi do međusobnog srašćivanja čestica materijala. CO_2 laser skenira i oblikuje prah u željenom presjeku. To počinje s donjim presjekom. Radna komora se grije i time se može smanjiti snaga lasera koja je potrebna za izradu nekog prototipa i spriječi vitoperenje prototipa tijekom postupka izrade uslijed nehomogene toplinske rastezljivosti i skupljanja. [7, 12, 22]

Radna podloga se snizuje do sloja debljine koji dopušta da se položi novi sloj praha. Novi sloj se skenira, prilagođuje slijedećem gornjem presjeku i prijanja prethodnom sloju. To se ponavlja dok i najgornji sloj prototipa nije proizveden. Naknadno umreživanje može biti potrebno za neke materijale. [7]



Slika 4.8. Postupak selektivnog laserskog srašćivanja [13]

Potporna struktura nije potrebna jer su praznine popunjene neobrađenim prahom u svakom sloju. Osim toga, SLS postupak moguće je upotrebljavati sa svakim prahom (poliamid (PA), PA sa staklenim vlaknima (PA GF), polistiren (PS), polikarbonat (PC), poli(vinil-klorid) (PVC), elastomeri, keramika, voskovi), pa čak i metalnim ako je laser dovoljne snage. [2, 12, 14]

Nakon izrade cijelog prototipa, potrebno ga je ostaviti da se hladi do sobne temperature (zbog lakšeg rukovanja). Prerano izlaganje okolnoj temperaturi i atmosferi može uzrokovati degradaciju polimera i nepoželjno skupljanje. Kad se prototip ohladi potrebno ga je očistiti od viška praha i ako je potrebno dodatno obraditi. [12]

Tijekom dobave praha [12]:

- u spremnik materijala mora se stati dovoljna količina materijala da se može izraditi maksimalna visina prototipa bez zaustavljanja stroja
- točna količina materijala mora se dobiti na radnu podlogu (da se pokrije prijašnji sloj)
- poravnavanje praha na radnoj podlozi ne smije stvarati pretjerane smične sile koje utječu na prethodni sloj

Na stroju za selektivno lasersko srašćivanje potrebno je također voditi računa o [12]:

- kako se veličina čestica praha smanjuje tako se povećava trenje i električnost između čestica, te materijal gubi tečivost

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

- kako se povećava omjer oplošja i volumena čestice, povećava se površinska energija i postave reaktivna. Za neke materijale to znači da se u prisutnosti kisika mogu zapaliti ukoliko postoji iskra. Zato materijali moraju tijekom postupka biti u inertnoj atmosferi i prilikom rukovanja ne smije se izazvati iskra
- u radnoj komori može doći do stvaranja oblaka sitnih čestica koje mogu onečistiti optičke dijelove, smanjiti osjetljivost lasera, uzrokovati otklon laserske zrake i oštetiti pomične dijelove stroja
- sitne čestice praha daju bolju hrapavost površine, dimenzijsku točnost i tanje slojeve.

Prilikom srašćivanja praha mogu se stvoriti zrnca na neobrađenom prahu koji služi kao potporna struktura. Takav materijal može se reciklirati (prosijati), smiješati sa originalnim materijalom i ponovno upotrijebiti. No potrebno je dobro smiješati materijal, jer prototip može u protivnom imati različita svojstva na različitim mjestima. Jedna od metoda je određivanje masenog protoka taljevine – MFR rabljenog materijala i njihove smjese. Na temelju iskustva odredi se MFR te smjesa rabljenog materijala mora postići taj MFR. [12]

Vrijeme izrade ovisi o veličini i visini prototipa. Prosječan stroj za SLS može u jednom satu napraviti 12 mm do 25 mm visoki prototip ovisno o poprečnom presjeku. [23]

Prednosti selektivnog laserskog srašćivanja su: izrada tvorevina, brz postupak, mala zaostala naprezanja, mogućnost izrade vrlo malenih tvorevina, mogućnost primjene velikog broja materijala, nije potrebna potporna struktura i moguće je ponovno upotrijebiti neupotrebljen materijal. [2, 23, 24]

Nedostaci postupka: kvaliteta površine i preciznost nije tako dobra kao u postupku stereolitografije, tvorevine su porozne i gustoća se može jako razlikovati (npr. PC ima gustoću 75 % - 92 % gustoće tvorevine dobivene injekcijskim prešanjem, a PA 87 % - 93 %), dugo je vrijeme hlađenja velikih prototipova (čak do dva dana), kod nekih materijala potrebna je primjena zaštitne atmosfere zbog pojave štetnih plinova, skupa su početna ulaganja u opremu i održavanje, zamijena materijala zahtjeva detaljno čišćenje stroja što je mehanički kompliciranije od drugih AM postupaka. [2, 3, 23, 24]

Materijali koji se primjenjuju u postupku selektivnog laserskog srašćivanja su:

Poliamid (PA) ima dobru kvalitetu površine, toplinski i kemijski je postojan, malo upija vlagu i može se polirati, bojati i naknadno obrađivati. Upotrebljava se u medicini, automobilskoj industriji i za prototipove sa boljom kvalitetom površine i složenijim detaljima. [16, 18]

Poliamid 12 (PA 12). Primjenjuje se za funkcionalne prototipove koji mogu izdržati visoka mehanička i toplinska opterećenja. Moguće ga je primjenjivati za tvorevine koje su u doticaju sa

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

hranom, biokompatibilan je, dobrih mehaničkih svojstava i moguće ga je bojati pri visokim temperaturama i prevlačiti metalnim prevlakama. [25]

PA sa staklenim vlaknima je više krutosti, dobre završne površine, toplinske postojanosti i mehaničke čvrstoće, može se bojati i lakirati pri visokim temperaturama, glatke površine, visoke dimenzijske točnosti i primjenjuje se za zupčanike i tvorevine opterećene pri visokim temperaturama. Postojan na vlagu, ali nije savitljiv. Zbog dodatka staklenih vlakana poboljšano je izotropno skupljanje materijala. [18, 25]

Čestice od nehrđajućeg čelika koje su prevučene polimernim vezivom. Ti materijali su idealni za proizvodnju metalnih prototipova ili alata. Tijekom srašćivanja vezivo izgara i infiltrira se bronca tako da se dio sastoji od 54 % čelika i 46 % bronce. Tvorevine je moguće zavarivati i imaju dvostruko veću toplinsku provodnost od čelika. [19]

Smjesa poliamida i aluminijska. Tvorevine imaju izvrsnu točnost dimenzija, visoke krutosti, dobre završne površine. Može se dodatno obrađivati (brusiti, polirati, prevlačiti, glodati i bušiti). Primjenjuje se tako gdje je potreban izgled metala, npr. automobilska industrija, za kalupne umetke kod injekcijskog prešanja, itd. [25]

Poliamid s dodatkom ugljičnih vlakana koji ima odlična mehanička svojstva (prvenstveno krutost i čvrstoću) i električnu provodnost. Primjenjuje se za funkcionalne prototipove (npr. zračne tunele). [25]

Polistiren (PS) izvrsne dimenzijske točnosti i površine. niskog sadržaja pepela (< 0,02 %) primjenjuje se za izradu kalupa za precizno lijevanje titana, aluminijska, magnezija i cinka i kalupa složenih oblika bez potrebne dodatne strojne obrade. Nije pogodan za izradu funkcionalnih prototipova. Najčešće se primjenjuje kao model za podtlačno lijevanje, i lijevanje u gips i oko keramičke ljuške. Vijek trajanja ako se skladišti na suhome je oko 12 mjeseci. [18, 19, 25]

Polipropilen (PP) je materijal sa visokom žilavošću i trajnošću, izvrsne kemijske postojanosti, savitljiv i dobrih dinamičkih svojstava. [18]

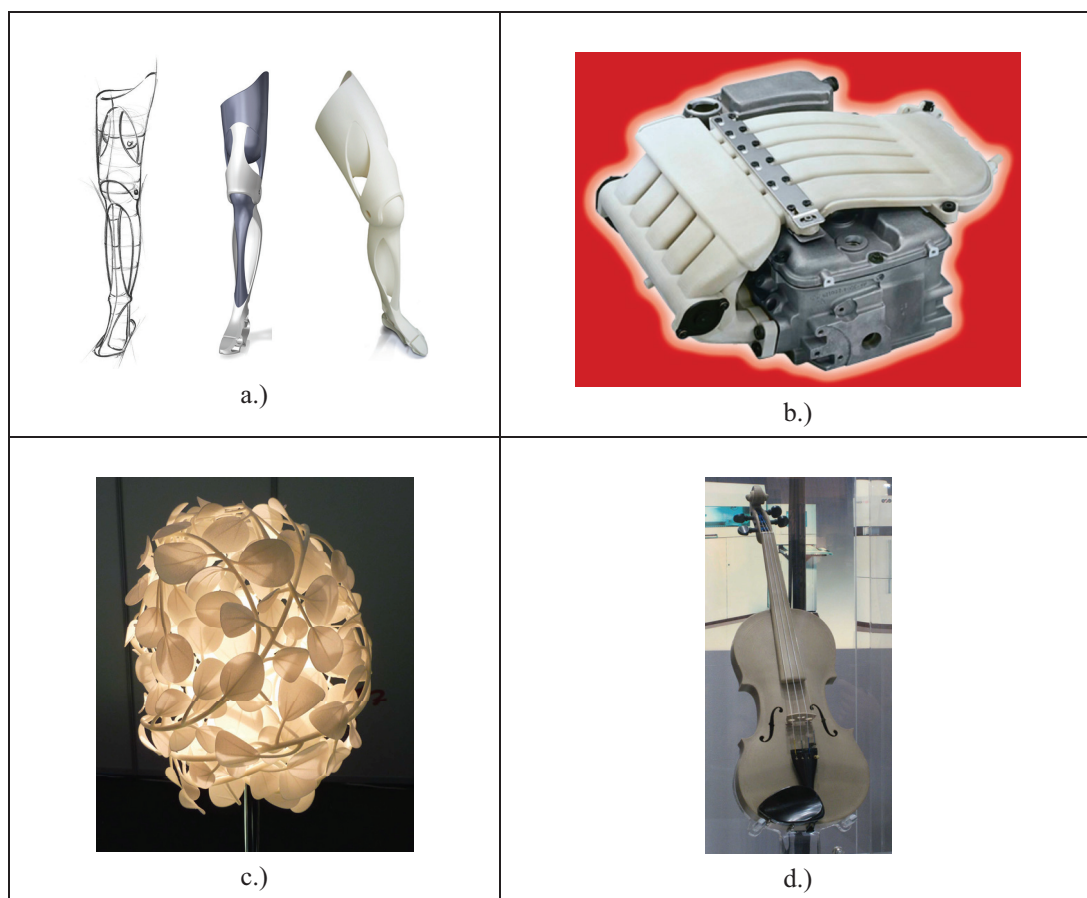
Elastoplastomeri su materijali s izvrsnom trajnošću, savitljivošću, toplinskom postojanošću, kemijskom postojanošću i dobrom dimenzijskom točnošću. Može se bojati standardnim infiltrantima. Zahtijeva minimalnu završnu obradu i skraćuje vrijeme i troškove lijevanja, strojne obrade i dr. Primjenjuje se npr. u automobilskoj industriji, za izradu obuće, brtve, crijeva i gdje god je potrebna visoka savitljivost. Dodatkom poliuretana (PUR) poboljšava mu se izgled površine i postojanost trošenju. Primjenjuje se za izradu brtvi, crijeva. [18]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

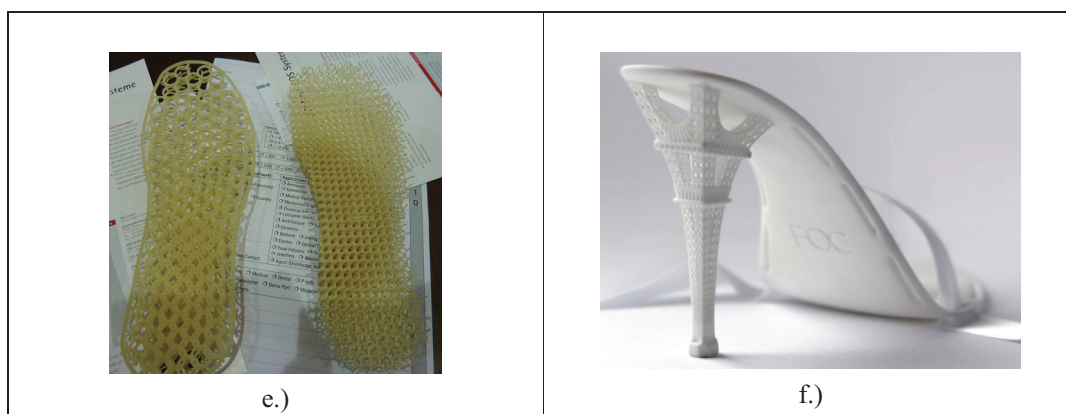
SLS prototipovi primjenjuju se za izradu implantata, u automobilskoj i svemirskoj industriji, za izradu modela za RT (e. *rapid tooling* – brza proizvodnja alata), itd. [26]

Tvrtka *Rhodia* patentirala je 2011. godine i postupak dobivanja praha poliamida 6 (PA 6) sferičnih čestica za aditivne postupke proizvodnje postupkom sinteriranja i laserskoga srašćivanja. [27]

Slika 4.9 prikazuje neke tvorevine dobivene postupkom selektivnog laserskog srašćivanja.



Slika 4.9. Prototipovi dobiveni SLS postupkom: a.) proteza, b.) zaštitni poklopac motora (PA sa staklenim česticama) [14, 28], c.) svjetiljka, d.) violina



Slika 4.10. Prototipovi dobiveni SLS postupkom - nastavak: e.) potplat cipele, f.) obuća [25]

Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom laserskog srašćivanja navedene su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom laserskog srašćivanja [19]

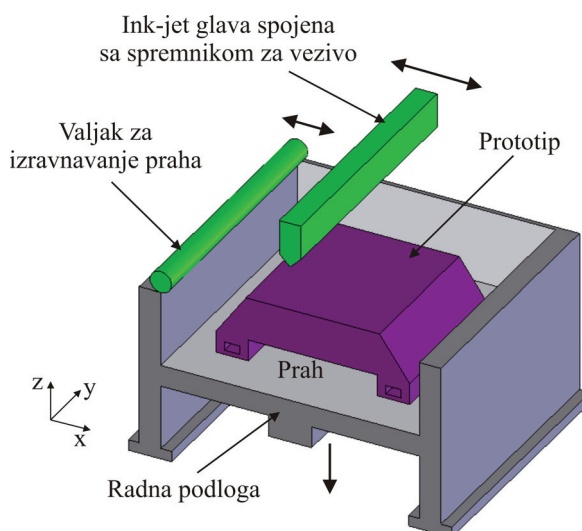
Svojstva	Vrijednosti
Masa m , kg	0,1 - 20
Maksimalne dimenzije, mm	10 - 380
Debljina presjeka, mm	0,8 - 100
Promjer provrta, mm	0,4 - 20
Minimalni polumjer zakrivljenosti, mm	0,4 - 1
Tolerancije, mm	0,1 - 2
Hrapavost, μm	100 - 125

4.5. 3D tiskanje (e. 3D Printing – 3DP)

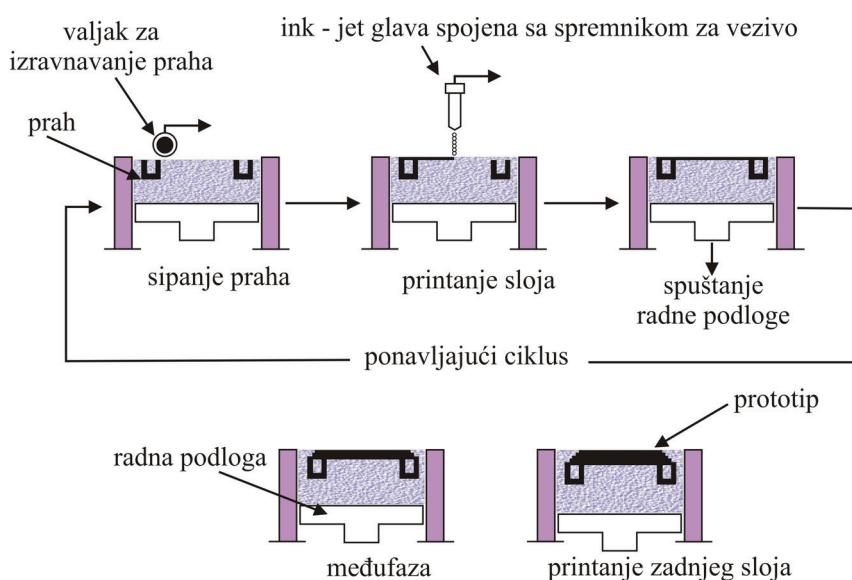
3D tiskanje naziva se tako zbog sličnosti sa ink - jet tiskanjem. Postupak je razvijen 1989. godine u SAD-u na MIT sveučilištu. U 3D tiskanju (slika 4.10), umjesto tinte izbacuje se vezivo ili ljepilo. Kako se vezivo i prah nanose u slojevima, prototip se izrađuje sloj – po - sloj. [12]

Radna podloga smještena je na visini potrebnoj da se sloj praha stavi na podlogu do željene debljine. Obično se nanosi približno 30 % više praha po sloju da se osigura dobra pokrivenost s prahom na radnoj podlozi. Sloj praha selektivno se skenira sa glavom printera koja oslobađa kapljevito vezivo i uzrokuje da slojevi prijanjaju jedni uz druge. Glava s mlaznicama skenira prah u željeni oblik presjeka. To počinje s donjim poprečnim presjekom. Radna podloga se

snizuje do sloja debljine koji dopušta novom sloju praha da se nataloži. Novi sloj se skenira, prilagođuje obliku slijedećeg gornjeg presjeka i prijanja na prethodni sloj. Postupak se ponavlja sve dok se najgornji sloj ne napravi (slika 4.11). Vrijeme izrade ovisi o visini tvorevine, približno 25 mm/h do 50 mm/h (tvrtka *Z Corporation*). Nakon izrade prototip se ostavlja neko vrijeme u komori s prahom da postigne potrebnu čvrstoću, zatim se vadi van i pomoću zraka odstranjuje višak praha. Naknadni proces temperiranja (10 minuta pri 95 °C) [16] i infiltriranja voska, epoksida ili cijanoakrilata primjenjuje se da bi prototip očvrstnuo. [2, 7, 12, 22]



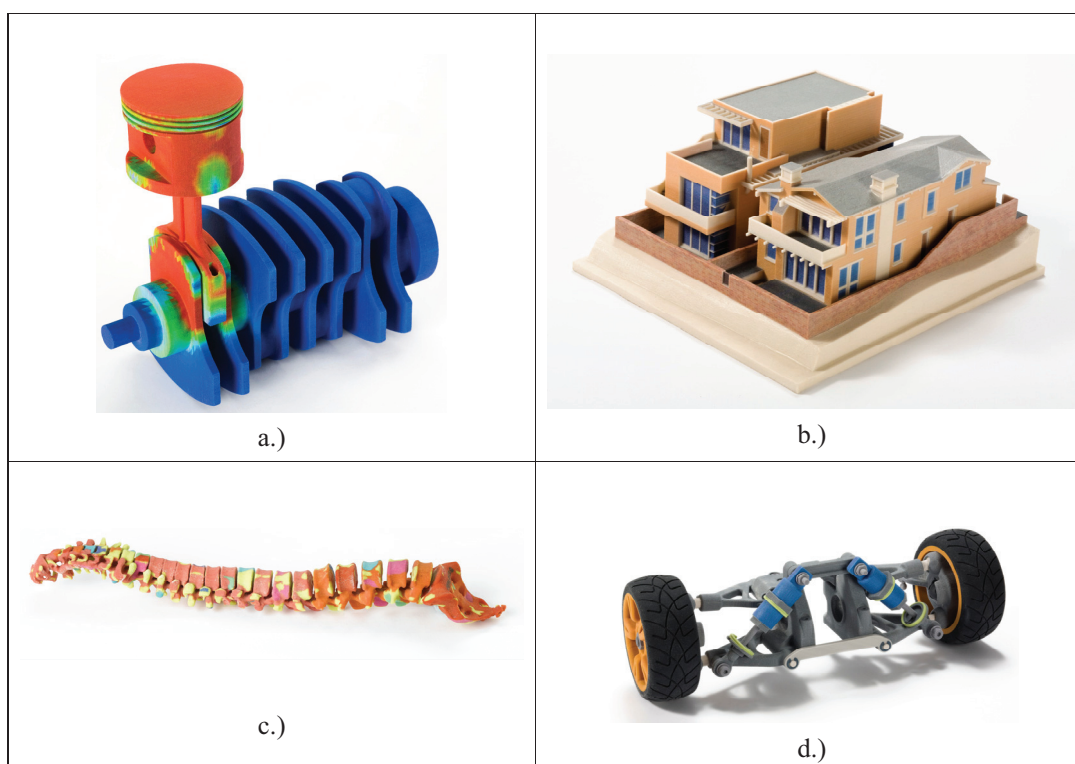
Slika 4.10. 3D tiskanje [7]



Slika 4.11. Faze postupka 3D tiskanja [7]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

Značajna prednost 3D tiskanja je mogućnost izrade prototipova u boji. Slično kao i kod 2D tiskanja, računalo pretvara RGB boje (crvena, zelena, plava - e. *red, green i blue*) u CMYK boje (e. *cyan, magenta, yellow i black*). Primjenjujući te četiri tinte, uređaj kombinira nekoliko točaka u svaki tiskani pixel za izradu izgleda tisuću boja. Isti princip je i kod 3D tiskanja, odnosno vezivo se može štrcati iz glave koja se sastoji od više mlaznica, s tim da u svakoj mlaznici je drugačiji materijal, tj. boja (slika 4.12). [12]



Slika 4.12. Prototip s kombinacijom više boja tvrtke *ZCorp*; primjena u: a.) strojarstvu – radilica i klip motora, b.) građevini – kuća, c.) medicini – kralježnica, d.) automobilskoj industriji – ovjes vozila [29]

Rezultat postupka su tvorevine s gotovo potpunom gustoćom koje se mogu naknadno obrađivati ili polirati, ako je potrebno. [19]

Prednosti postupka 3D tiskanja: visoka brzina rada stroja, mogućnost primjene strojeva u uredima (neotrovni materijali), visoka preciznost uređaja, dobre dimenzijske tolerancije prototipa, vrlo glatka površina prototipa, mogućnost tiskanja materijala u boji, mogućnost izrade vrlo tankih slojeva, niska cijena, nije potrebna upotreba potporne strukture, nije potrebna visoka energija za izradu, već korišteni materijal može se ponovno upotrijebiti. [12, 14]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

Nedostaci postupka su: ograničene izmjere prototipa, ograničen broj primjenjenih materijala i brzina izrade prototipa, kod prototipova velikih dimenzija lošija je točnost u usporedbi s drugim postupcima, visoka hrapavost pa je potrebna dodatna strojna obrada, potrebno je neko vrijeme za čišćenje prototipova. [12, 14, 16, 22]

Materijali koji se primjenjuju u postupku 3D tiskanja su:

Kompoziti s metalnom matricom nastali infiltriranjem bronce u nehrđajući čelik. Imaju vrlo dobra mehanička svojstva i niska im je nabavna cijena. Primjenjuju se za izradu konstrukcijskih tvorevina. [19]

Nikal ima izvrsnu kemijsku postojanost i primjenjuje se pri povišenim temperaturama. [19]

Epoksid ima vrlo dobru čvrstoću, dimenzijsku točnost, iznimnu postojanost utjecaju vlage i toplinsku postojanost. [19]

Poliuretan visoke čvrstoće i savitljivosti. Postojan je na udarna opterećenja. [19]

Kompozitni materijali mogu se primjeniti za tvorevine sa sitnim detaljima. Moguće ih je tiskati u raznim bojama. Materijal se sastoji od polimera sa nekoliko dodataka koji povišuju kvalitetu završne površine, razlučivost, žilavost i čvrstoću tvorevine. Taj materijal idealan je za: osjetljive i tankostijene tvorevine, obojene tvorevine, točno predočavanje detalja i tamo gdje se zahtijeva visoka čvrstoća. [29]

Materijali za fino lijevanje primjenjuju se za proizvodnju tvorevina koja se mogu umakati u vosak. Materijal se sastoji od smjese celuloze, posebnih vlakana i drugih dodataka koji omogućuju točnost dimenzija tvorevine dok se povećava upijanje voska i smanjuje ostatak tijekom postupka izgaranja. [29]

Materijal za izravno lijevanje upotrebljava se za izradu pješčanih kalupa za neželjezne materijale, te kalupa u koji se može izravno lijevati metalni materijal, što je brže i jeftinije u usporedbi s klasičnim postupcima lijevanja metala. Taj materijal je smjesa pijeska, gipsa i drugih dodataka koji zajedno rezultiraju kalupima visoke čvrstoće sa dobrom završnom površinom. Materijali izdržavaju temperature potrebne za lijevanje polimera. [29]

Elastomerni materijal omogućava izradu elastičnih dijelova tvorevine. Materijal se sastoji od smjese celuloze, specijalnih vlakana i drugih dodataka koji omogućuju izradu preciznih elastičnih dijelova. [29]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

Jedan od vodećih proizvođača 3D printera je *Z – Corporation* koji 2011. godine postao dio tvrtke *3D Systems*. *Z – Corporation* nudi nekoliko materijala za zadovoljavanje različitih potreba. Različite karakteristike materijala dopuštaju potrošačima primjenu u različitim industrijama, osim toga i povećanje prikladnosti *Z - Corp* 3D printera. Svaki materijal nudi visoku brzinu tiskanja i nisku cijenu.

Punjenje novog materijala u 3D printer je brz i jednostavan postupak. Svi neupotrebjeni materijali mogu se reciklirati, smanjujući cijenu prototipa.

Tehničke karakteristike tvorevina koje se izrađuju postupkom 3D tiskanja navedene su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom 3D tiskanja [19]

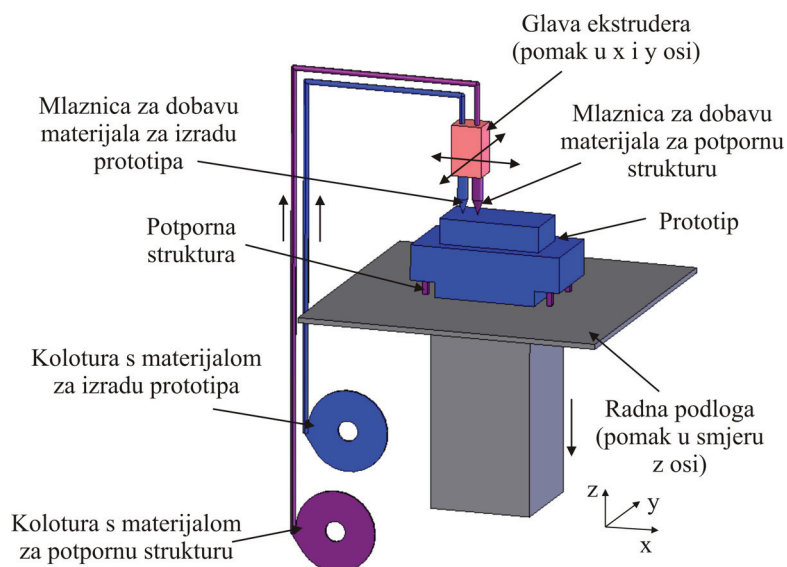
Karakteristike	Vrijednosti
Masa m , kg	0,1 - 10
Maksimalne dimenzije, mm	10 - 250
Debljina presjeka, mm	1,2 - 100
Promjer provrta, mm	0,4 - 20
Minimalni polumjer zakrivljenosti, mm	0,4 - 1
Tolerancije, mm	0,3 - 2
Hrapavost, μm	75 - 100

3D tiskanjem mogu se uspješno proizvoditi prototipovi, tvorevine, kalupi i alati vrlo složenih oblika. Tim je postupkom prvi put napravljen kalup od keramičkih prahova. Prilikom izrade kalupa i alata od metalnih prahova postižu se značajne uštede vremena izrade i troškovi skupe naknadne obrade. [19]

4.6. Taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling – FDM*)

Taložno očvršćivanje materijala (slika 4.13) aditivni je postupak koji je originalno razvijen u tvrtci *Advanced Ceramics Research (ACR)* u Tucson, Arizona, ali ga je značajno poboljšala tvrtka *Stratasys*, Minnesota, SAD. Postupak započinje od 3D CAD modela, koji je računalnim programom podijeljen u vodoravne slojeve. Polimerni materijal u obliku žice (npr. ABS) ili vosak prolazi kroz mlaznicu, koja je upravljana s pomoću računala. Materijal napušta mlaznicu u omekšanom stanju i pri sobnoj temperaturi brzo očvršćuje, pa je zbog toga potrebno održavati temperaturu kapljevitog materijala malo iznad temperature očvršćivanja. Cijeli sustav je u temperiranoj okolini (pri temperaturi neposredno ispod tališta materijala), pa se smanjuje

potrošnja energije. Nakon izrade prvog sloja, radna podloga spušta se za debljinu novog sloja i ekstrudira se novi sloj. [2, 12, 23]

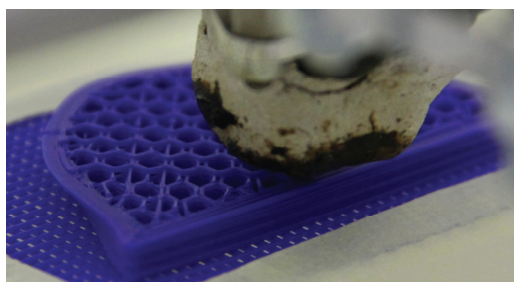


Slika 4.13. Postupak taložnog očvršćivanja [13]

U tvorevini se prilikom izrade mogu javiti mjehurići zraka, koji se otklanjaju ekstrudiranjem veće količine materijala u određenim područjima, ali time se snižava točnost gotove tvorevine. [12]

Kod složenije geometrije prototipa može se upotrijebiti potporna struktura. Tada se upotrebljava dvostruka glava ekstrudera. U jednoj mlaznici nalazi se materijal, a u drugoj vosak za podupiranje. Kada je prototip završen, potporna struktura se vrlo jednostavno uklanja (npr. otapanjem u vodenoj otopini ili lomljenjem). S potpornom strukturom topljivom u vodenoj otopini postižu se bolje završne površine prototipa. [2, 30]

Tvorevinama se najprije izrađuje vanjska kontura, te zatim unutrašnjost. Za proizvodnju debelostjenih tvorevina unutrašnjost stijenke može biti popunjena različitim strukturama: puna struktura, mrežasta struktura (krugovi, linije, pravokutnici) i optimalna struktura pčelinjih saća (šesterokutna struktura) (slika 4.14). [31]



Slika 4.14. Struktura pčelinjih saća [31]

Debljina sloja ovisi o otvoru mlaznice, doziranju materijala i brzini glave ekstrudera. Obično iznosi 0,18 mm do 0,26 mm. Varijacije u promjerima mlaznice mogu uzrokovati klizanje materijala u pojedinom sloju. [12, 32]

Prednosti FDM postupka su: brzina i sigurnost rada strojeva koji ne primjenjuju otrovne materijale pa nije potreban poseban prostor, postupak izrade je brži nego kod SLA, nije potrebno čišćenje prototipa, nema vitoperenja prototipa, nije potrebno hlađenje, prototipove je moguće pjeskariti, bušiti, bojati, galvanizirati, moguće je ekstrudirati PE-HD, PE-LD, PP, čokoladu, biokompatibilne i/ili biorazgradljive materijale (npr. polikaprolakton (PCL)) i elastomere, a moguće je izraditi istovremeno više prototipova. [23, 30, 31]

Nedostaci FDM postupka su: potrebna je naknadna obrada, vrlo često je nužna potporna struktura, nepredvidivo skupljanje materijala, oscilacije temperature mogu dovesti do raslojavanja prototipa, vidljive su linije između slojeva, čvrstoća prototipa je snižena u smjeru okomitom na smjer izrade slojeva prototipa, niska dimenzijska točnost (može se povećati s debljinom sloja od 0,078 mm koja je dostupna kod skupih strojeva, s tim da se povećava vrijeme izrade). Mlaznice su kružnog presjeka, te je zbog toga nemoguće izraditi oštre rubove. Stvaran oblik ovisi o mlaznici i viskoelastičnom ponašanju materijala prilikom očvršćivanja. Brzina ovisi o mogućnostima doziranja materijala kroz mlaznicu. Pri povećanju protoka taljevine može doći do povećanja mase tvorevine. Mehanička svojstva ovise o položaju prototipa na radnoj podlozi, pogotovo u smjeru z osi. [2, 12, 14]

Materijali koji se primjenjuju u postupku taložnog očvršćivanja su:

U FDM postupcima radije se upotrebljavaju amorfni polimerni materijali. Amorfni polimeri nemaju tako jasno talište, omekšavaju i viskoznost se snizuje povišenjem temperature. Viskoznost s kojom se amorfni polimeri mogu ekstrudirati pri određenom tlaku je dosta visoka i omogućuje zadržavanje oblika nakon ekstrudiranja i brzo očvršćivanje. Nadalje, novi sloj dobro se spaja s prethodnim. [12]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

ABS (akrilonitril/butadien/stiren) je mješavina amorfno plastomera. Sadrži 15 % do 35 % akrilonitrila (C_3H_3N), 5 % do 30 % butadiena (C_4H_6) i 40 % do 60 % stirena (C_8H_8). U slučaju miješanja različitih udjela sastojaka, moguće je dobiti materijal različitih svojstava. Primjenjuje se u automobilske industriji i elektronici. Dostupan je u različitim bojama (bijela, crna, crvena, plava, zelena, siva, žuta) (slika 4.15.a) [17, 33]

Svojstva pojedinih sastojaka daju karakteristike ABS materijalu. Akrilonitril je toplinski i kemijski postojan, gumi sličan butadien daje duktilnost i savojnu žilavost, a stiren sjajnu površinu i omogućuje lakšu obradu materijala i nižu cijenu. [17]

Općenito, ABS ima dobru savojnu žilavost pri sniženoj temperaturi, zadovoljavajuću krutost i dimenzijsku točnost, sjajnu površinu. Ako mu se još dodaju UV stabilizatori može služiti za vanjsku primjenu. [17]

PC-ABS (slika 4.15.b) je mješavina polikarbonata (PC) i ABS-a. Ta mješavina kombinira čvrstoću i postojanost pri visokim temperaturama PC-a sa savitljivošću ABS-a. Ima izvrsna toplinska i mehanička svojstva i značajno je čvršći od ABS-a. Obično se primjenjuje za izradu prototipova u automobilske, električne, telekomunikacijske industriji i u izradi igračaka. [34]

Polikarbonat (PC) je materijal kojemu je čvrstoća viša za 60 % do 80 % od PC-a upotrebljavanog u postupcima injekcijskog prešanja. Moguće ga je primjenjivati u proizvodnji ambalaže za prehrambenu industriju (slika 4.15.c), za lijekove, u automobilske industriji i za medicinske uređaje. Kao potporna struktura ne upotrebljavaju se topljivi materijali. Postoji i biokompatibilni PC koji se primjenjuje u proizvodnji ambalaže za prehrambenu industriju (npr. spremnici za razne napitke) i u medicini. [12, 13, 34]

PPSF/PPSU (poli(fenilen-sulfon)) je materijal postojan pri visokim temperaturama i kemijski postojan. Kao potporna struktura ne upotrebljavaju se topljivi materijali. Primjenjuje se u svemirskoj i automobilske industriji, te medicini (slika 4.15.d). Može se sterilizirati u parnom autoklavu, etilen oksidnom (EtO) sterilizatoru (e. *ethylene oxide - EtO*), plazmi i kemijskom sterilizatoru ili radijacijom. [12, 34]

Primjenjuju se još i elastomer na osnovi poliestera i vosak za lijevanje.

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova



Slika 4.15. Prototipovi izrađeni FDM postupkom: a.) ABS kutija za alat, b.) PC-ABS ručka alata, c.) PC aparat za tople napitke, d.) PPSF kućište zupčanika [35]

Tehničke karakteristike tvorevina koje se izrađuju postupkom taložnog očvršćivanja materijala navedene su u tablici 4.4.

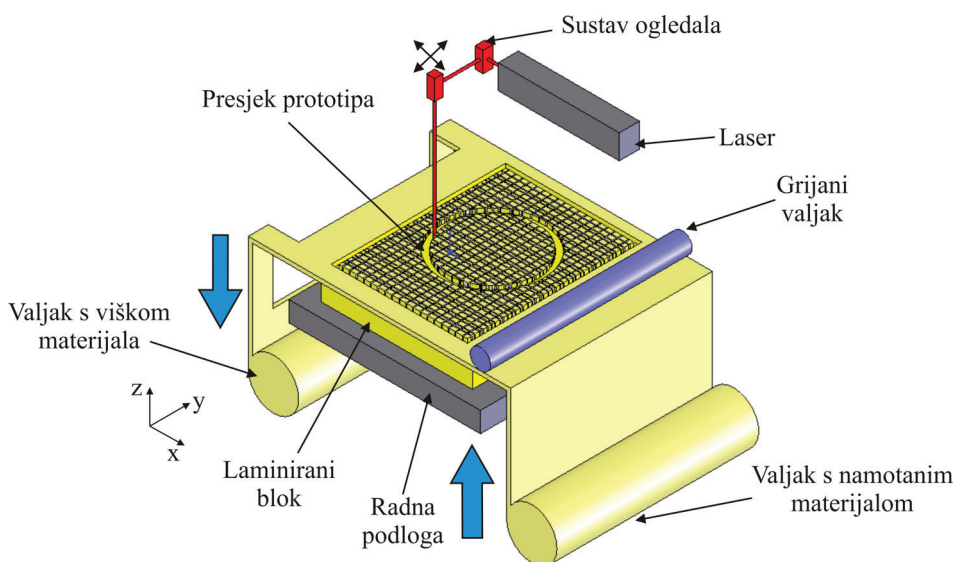
Tablica 4.4. Tehnička svojstva tvorevina koje se izrađuju postupkom taložnog očvršćivanja materijala [19]

Karakteristike	Vrijednosti
Masa m , kg	0,1 - 15
Maksimalne dimenzije, mm	10 - 250
Debljina presjeka, mm	0,5 - 100
Promjer provrta, mm	0,4 - 20
Minimalni polumjer zakrivljenosti, mm	0,4 - 1
Tolerancije, mm	0,127 - 2
Hrapavost, μm	100 - 125

4.7. Proizvodnja laminiranih objekata (e. *Laminated Object Manufacturing – LOM*)

Postupak proizvodnje laminiranih objekata razvijen je 1985-te godine u tvrtci *Helisys*, SAD. Njime se proizvodi prototip laminiranjem i laserskim dovršavanjem (rezanjem) materijala od papira, polimernih filmova i folija, te od metalnih ploča. S polimernim folijama postižu se bolja mehanička svojstva u usporedbi s papirom. Ploče se laminiraju u čvrste blokove povezivanjem: ljepilom, stezanjem i ultrazvučnim zavarivanjem. [2, 7, 12]

Primjenjujući toplinu i tlak svaka se ploča, folija ili papir spaja na blok i formira novi sloj. Materijal se dobavlja s pomoću valjka na jednoj strani stroja i odmotava do druge strane (slika 4.16). Zagrijani valjak osigurava tlak i toplinu potrebnu da se novi sloj lijepi na već izrađeni dio prototipa. Radna podloga spuštена je za debljinu folije, koja je obično debljine od 0,07 mm do 0,2 mm. [2, 7, 12]



Slika 4.16. Proizvodnja laminiranih objekata [12]

Nakon što se sloj (folija) staložio, laserskom zrakom izrezuje se dio materijala u oblik konačne tvorevine. Obično se primjenjuje CO₂ laser snage 25 W ili 50 W. Tvrtka *Solido* iz Izraela u svom postupku proizvodnje laminiranih objekata primjenjuje film na koji se nanosi sloj lijepila, koji zatim nož izreže u odgovarajući oblik. Zatim se nanosi sloj "anti-glue" na određenim mjestima gdje se ne nalazi prototip, tj. neutralizira se ljepilo. Nanosi se sljedeći sloj filma koji se zalijepi na prethodni i prototip se izrađuje sve do završnog sloja. Kao i u drugim postupcima, proces počinje sa donjim poprečnim presjekom. Kada je završen najgornji sloj prototipa, višak materijala ručno se odvaja od prototipa (slika 4.17). Površina prototipova ručno se doraduje kako

bi se izbjegla slojevita struktura nastala slaganjem slojeva. Nastale tvorevine mogu se pjeskariti, polirati, bojati i strojno obrađivati. [2, 7, 12, 14]



Slika 4.17. Postupak odvajanja viška materijala [12]

Prisutnost pomoćnog materijala oko prototipa ima prednosti i nedostatke. Prvo, vanjska potporna struktura nije potrebna. Pri proizvodnji prototipa unutar potpornog materijala, cijela geometrija je u toku izrade zaštićena od deformacija uslijed vlastite mase. LOM izbjegava potrebu za izradom posebnih potpornih struktura koje drže izolirane konture. Odstranjivanje nepotrebnog materijala nakon što je prototip izrađen nije jednostavna zadaća. Pažljiv ručni postupak čišćenja potreban je da se ne oštete osjetljivi dijelovi i osigura samo odstranjivanje nepotrebnog materijala. Nadalje, šuplja struktura sa zatvorenom površinom ne može se obrađivati kao zaseban dio zbog viška materijala koji je zapeo između rubova kalupa. Teškoća odstranjivanja neželjenog materijala odnosi se na sve tvorevine s uskim prolazima, unutarnje šupljine s ograničenim pristupom, udubine itd. Također, taj materijal ostaje s neprekinutom trakom (folijom) ili završava kao potporni materijal, koji se baca nakon izrade. Cijena takvog otpada važna je ako se upotrebljavaju materijali koji su skuplji od papira. Nadalje, uz svoje prednosti i nedostatke, LOM postupak ima ove karakteristike: [7]

- Tvori slojeve koji oduzimaju materijal (npr. materijal se izrezuje da se stvori sloj koji ima potrebni presjek). Svi ostali AM postupci tvore slojeve s pomoću dodavanja materijala. LOM je potencijalno najbrži postupak za izradu tvorevina velikih volumena.
- Prototip je oblikovan od izmjeničnih slojeva materijala i ljepila, pa su fizička svojstva nehomogena i anizotropna.
- Potencijalna preciznost LOM postupka je visoka. Zbog toga što se bilo koji proizvoljno tanki listovi mogu primjeniti u LOM-u, zadržana je dobra razlučivost smjera u izradi prototipa. Zapravo, proizvodnja tankog monodisperznog folijskog materijala nije teška i skupljanje tijekom laminiranja nije problem jer se konture režu nakon što je skupljanje dovršeno.
- Iako je postupak potencijalno primjenjiv na mnoge materijale, uključujući polimere, kompozite i metale, papirni listovi i PVC folije su trenutno najpopularniji materijali. [7, 36]

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova

Prednosti LOM postupka su: malo skupljanje, nisko zaostalo naprezanje i vitoperenje, brza izrada velikih tvorevina, strojevi ne primjenjuju otrovne materijale pa nije potreban poseban prostor, niske cijene uređaja i materijala u usporedbi s drugim AM postupcima. [2, 12, 16]

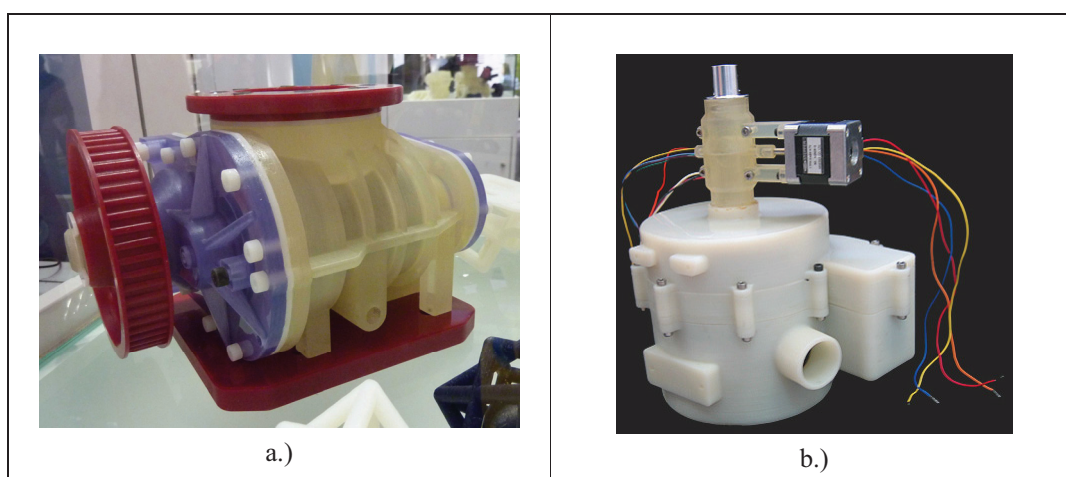
Nedostaci LOM postupka: papir zahtjeva upotrebu zaštitnih premaza uslijed apsorpcije vlage i trošenja, uslijed bubrenja i neujednačene debljine folije materijala otežana je kontrola točnosti dimenzija u z osi, mehanička i toplinska svojstva su nehomogena zbog upotrebe ljepila između slojeva, prilikom odstranjivanja neupotrebljenog materijal mogu se oštetiti tvorevine malih izmjera, nemogućnost izrade šupljih tvorevina. [12, 23, 37]

Tehničke karakteristike tvorevina koje se izrađuju postupkom laminiranja navedene su u tablici 4.5.

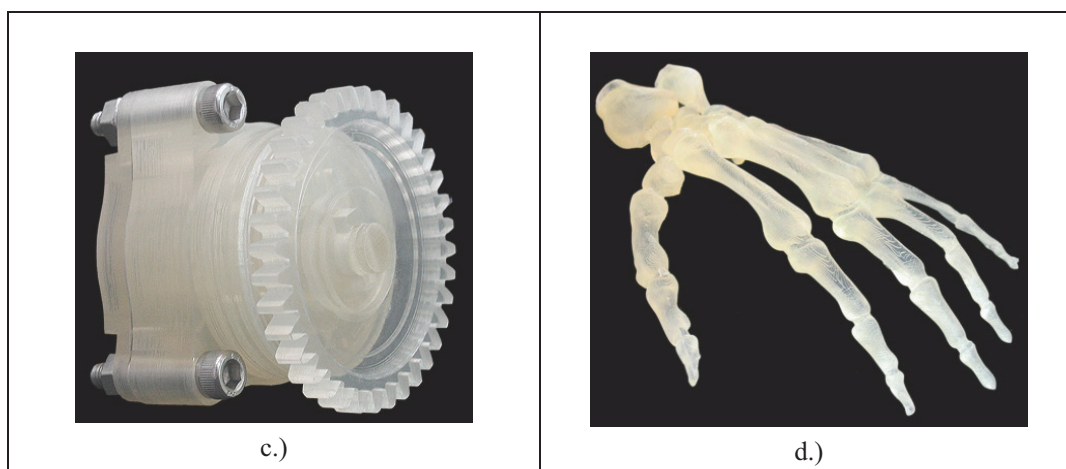
Tablica 4.5. Tehnička svojstva LOM tvorevina [19]

Karakteristike	Vrijednosti
Masa m , kg	0,1 - 50
Maksimalne dimenzije, mm	10 - 800
Debljina presjeka, mm	1 - 100
Promjer provrta, mm	0,4 - 20
Minimalni polumjer zakrivljenosti, mm	0,4 - 1
Tolerancije, mm	0,25 - 2
Hrapavost, μm	100 - 140

Slika 4.18 prikazuje tvorevine napravljene LOM postupkom.



Slika 4.18. Tvorevine napravljene LOM postupkom: a.) kućište ventila, b.) kućište motora

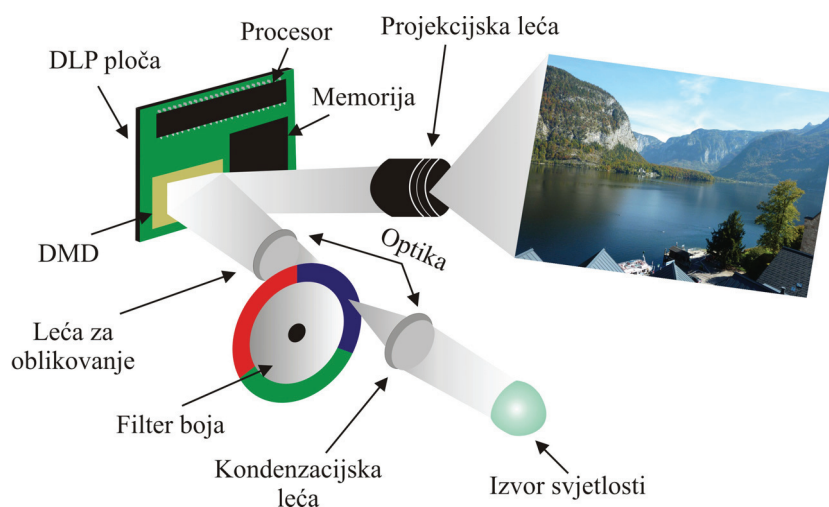


Slika 4.18. Tvorevine napravljene LOM postupkom - nastavak: c.) zupčanik, d.) kosti šake [32, 36]

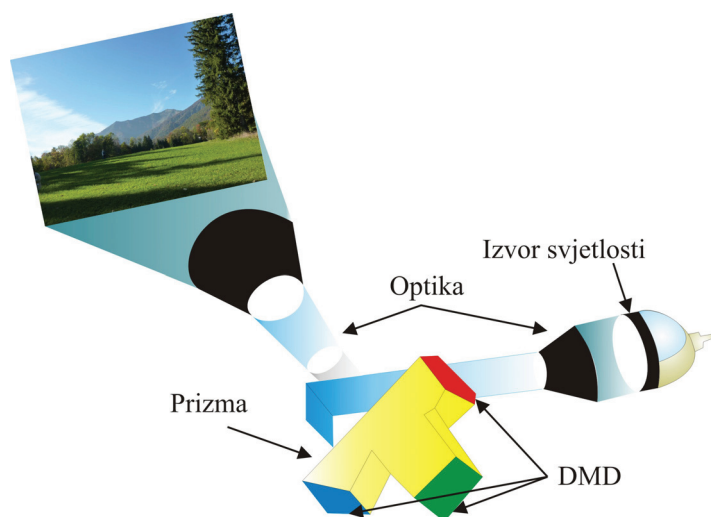
4.8. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom

Tvrtka *EnvisionTEC* iz Njemačke uvela je izradu 3D modela s pomoću fotoosjetljive akrilne smole i *Digital Light Processing* - DLP postupka. Projicirana slika iz DLP izvora svjetlosti predstavlja presjek tvorevine koji očvršćuje u polimernoj smoli. Vidljiva svjetlost se projicira ispod radne podloge, tako da se radna površina nalazi iznad nje. Uređaj osvjetli cijeli sloj odjednom [4] čime se skraćuje ukupno vrijeme ciklusa (10 s do 15 s ovisno o polimeru). [38]

DLP postupak razvio je dr. Larry Hornbeck iz tvrtke *Texas Instruments* 1987. godine. Sustav se sastoji od jednog, dva ili tri velika digitalna čipa koji se sastoje od preko milijun mikroogledala (e. *Digital Micromirror Devices* – DMD). DMD se može jednostavno opisati kao svjetlosni prekidač tj. optički poluvodič, koji se može paliti i gasiti 1000 puta u sekundi što omogućava reprodukciju u boji i sivim tonovima. Mikroogledala su smještena na DMD integrirani sklop, tj. čip, čiji zglobovi ogledala se može zakretati od -10° do $+10^\circ$. Sustav sa jednim čipom (slika 4.19) propušta bijelu početnu svjetlost kroz rotirajući disk u boji koji šalje sekvencijalnim redoslijedom crvenu-zelenu-plavu (e. *red-green-blue RGB*) boju na DMD čip. U DLP sustavu sa tri čipa (slika 4.20) svjetlost prolazi kroz prizmu, koja tvori odvojeno crvenu, zelenu i plavu zraku svjetlosti. Svaka zraka se šalje do njezinog odgovarajućeg DMD čipa (tj. crvenog, zelenog ili plavog). Model sa jednim čipom prikazuje 16 milijuna boja, dok model sa tri čipa 35 trilijuna boja. [39, 40]



Slika 4.19. Model DLP postupka sa jednim čipom [39]



Slika 4.20. Model DLP postupka sa tri čipa [40]

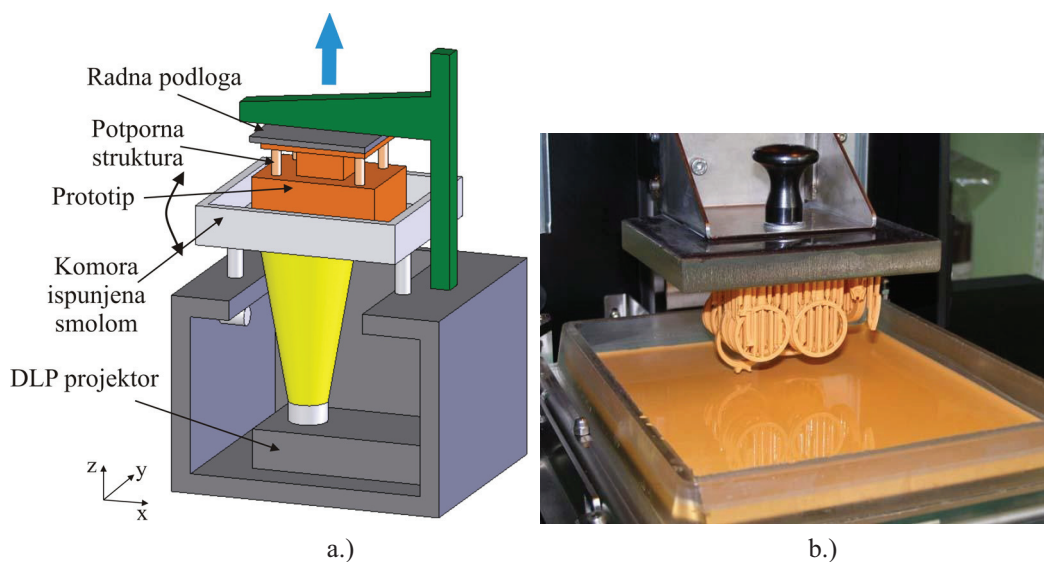
Izvedba s jednim čipom je najbolja i primjenjuje se tamo gdje se zahtijeva manji intenzitet osvjetljenja. Sustav sa dva čipa ima jači intenzitet osvjetljenja, ali je primarno namijenjen da nadoknadi manjak boje koji proizlazi iz spektralno nejednakih lampi (npr. manjak crvene boje u metal-halogenim lampama). Za najjači intenzitet svjetlosti potreban je sustav s tri čipa. [39]

DMD uređaji imaju jednostavni raspored reflektivnih svjetlosnih prekidača pa nije potreban polarizator. Svjetlost od metal-halogenih ili ksenonskih lampi sakuplja se preko kondenzirajućih leća. Za dobar rad DMD svjetlosnih prekidača, ta svjetlost mora biti usmjerena pod kutem od 20° u odnosu na normalu DMD čipa. Za postizanje toga, kao i uklanjanja mehaničkih smetnji između osvjetljenja i optike za projiciranje, između leće projektora i DMD umeće se prizma s

unutarnjom refleksijom (e. *total internal reflection* - *TIR*). Prizma upotrebljava filtre koji odvajaju svjetlost s pomoću refleksije i prenose ga na crvenu, zelenu i plavu komponentu. Crvena i plava prizma zahtjevaju dodatnu refleksiju od TIR površine kako bi usmjerila svjetlo pod odgovarajućim kutem do crvenog i plavog DMD-a. Reflektirana svjetlost sa DMD zrcala usmjerava se natrag preko prizme i boje se rekombiniraju. Kombinirana svjetlost zatim prolazi kroz TIR prizmu u leću projektor. [39]

Postupak je komercijaliziran pod nazivom *Perfection* od tvrtke *Envisiontec*. [4]

Projektor je smješten ispod radne podloge. Smola se nalazi u komori načinjenoj od stakla i prekriva projektor. Prvi sloj tvorevine izrađuje se na donjoj površini smole koja očvršćava s pomoću svjetlosti projicirane iz projektor. Radna podloga podiže se za debljinu novog sloja i postupak počinje ispočetka (slika 4.21). [4]



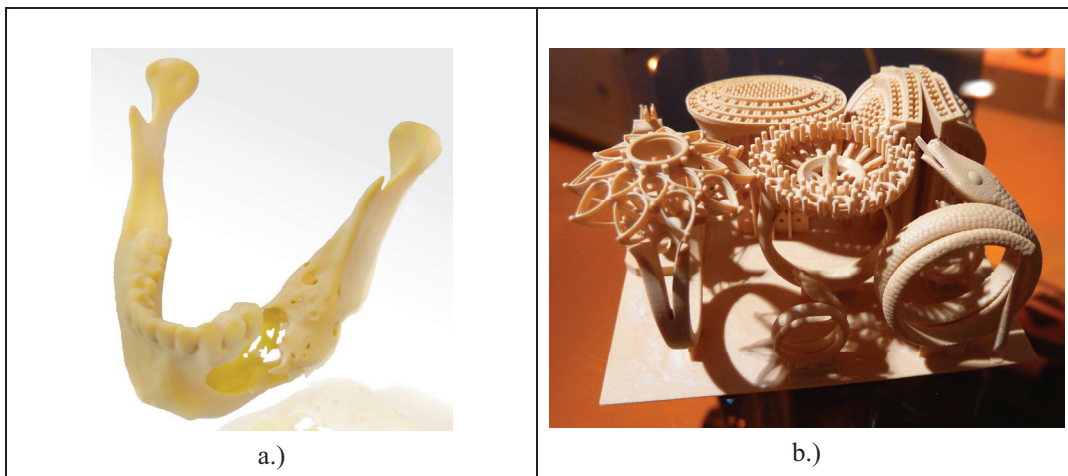
Slika 4.21. Očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom: a.) shema postupka, b.) tvorevina na radnoj podlozi [41, 42]

Prednosti postupka su: brza i jednostavna izmjena materijala, mogućnost primjene velike količine fotoosjetljivih materijala, kao i biokompatibilnih materijala. [4]

Nedostaci postupka su: s obzirom na male dimenzije komore postupak je pogodan za tvorevine malih izmjera, potrebna je potporna struktura. [4]

Najčešća primjena postupka je u stomatologiji, medicini i za izradu nakita (slika 4.22).

4. Aditivni postupci proizvodnje polimernih prototipova



Slika 4.22. Primjena postupka očvršćivanja digitalno obrađenim svjetlosnim signalom: a.) u medicini [43], b.) za izradu nakita

5. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU SELEKTIVNOG LASERSKOG SRAŠĆIVANJA

Aditivnom izradom prototipova moguće je izraditi dijelove vrlo složenih oblika čija je izradba do pojave tih postupaka bila ograničena. Aditivni postupci intenzivno se razvijaju iz dana u dan. Pri tom je ograničavajući broj dostupnih materijala i njihova svojstva, koja se bitno razlikuju od svojstava materijala gotovih proizvoda. Zbog toga je potrebno poznavati mehanička svojstva materijala prototipova. [44] Prilikom izbora postupka prerade potrebno je uzeti u obzir četiri kriterija: željeni materijal, veličinu i broj tvorevina, vrijeme izrade i trošak proizvodnje. [45]

U radu je proučen postupak selektivnog laserskog srašćivanja (SLS) i obrađena su istraživanja na području izrade polimernih tvorevina.

Od samog početka nastanka aditivnih postupaka proizvodnje prototipova nedostaci svih postupaka su točnost dimenzija i mehanička svojstva nastalog prototipa, izbor odgovarajućeg materijala i postupka, te svojstvo viskoznosti η , tj. sposobnost tečenja koje moraju imati materijali koji se primjenjuju u aditivnim postupcima.

Točnost i učinkovitost svih aditivnih postupaka proizvodnje prototipova ovisi o tome kako je prototip smješten u komori. Izbor orijentacije prototipa u komori za izradu, pogotovo ako se tvorevina izrađuje s velikom debljinom sloja ($> 0,25$ mm) i ako je izražena jaka anizotropija materijala, imati će utjecaj na vrijeme izrade, rezoluciju prototipa i završnu obradu površine. Smanjenje visine geometrije smanjiti će broj potrebnih slojeva i skratiti vrijeme izrade. Ovisno o eventualnoj primjeni tvorevine, može se žrtvovati minimum vremena izrade u korist povećane rezolucije prototipa ili točnosti. Veliki nedostatak aditivnih postupaka je ponovljivost rezultata točnosti i mehaničkih svojstava. Tolerancije izmjera ne mogu se unaprijed odrediti jer ovisе o mnogim parametrima, ali i o materijalu. [7]

Polimerizacija vodi do porasta gustoće materijala i smanjenja volumena prototipa. Prema tome nužno je povećati prototip do stanovitog opsega za nadoknadu skupljanja koje se pojavljuje poslije očvršćivanja i/ili hlađenja. Opseg povećanja je specificiran faktorom naknadnog skupljanja pribavljenih od proizvođača. Određivanje faktora skupljanja izrazito je teško, jer zahtjeva pažljivo računanje i iskustvo, a za svaku je tvorevinu i postupak drukčije. [7]

Kao što je naglašeno u hipotezi rada prototipovi načinjeni *selektivnim laserskim srašćivanjem - SLS* sve se više upotrebljavaju kao tvorevine, što znači da moraju imati visoku dimenzijsku točnost. No točnost je teško predvidjeti, jer ovisi o mnogim parametrima: točnost STL modela kod pretvorbe iz CAD modela, rezanje u slojeve, rezoluciji stroja, poravnavanje laserske zrake (e. *beam offset*), debljini sloja, skupljanju materijala, brzini laserske zrake, snazi lasera,

5. Dosadašnja istraživanja na području selektivnog laserskog srašćivanja

temperaturi radne podloge i razmaku između putanje laserske zrake (e. *hatch distance*). No jedan od najvećih uzroka netočnosti prototipova je skupljanje materijala koje je drukčije u različitim smjerovima (x, y i z smjeru). Također se skupljanje povećava srašćivanjem pri višoj temperaturi i kod tankostijenih prototipova. Tijekom kristalizacije molekule se same slažu tako da zauzimaju manji volumen, što dovodi do skupljanja materijala. [11, 46, 47]

Za poboljšavanje svojstava može se srašćivanje sloja s obzirom na radnu podlogu odvijati u x ili y smjeru. Srašćivanje jednog sloja može se odvijati i u oba smjera ili naizmjenično (svaki drugi sloj srašćuje se u istom smjeru) dok se ne završi i zadnji sloj. [12, 48]

Tijekom zagrijavanja prototip se širi zbog toplinske rastezljivosti i onda prilikom hlađenja neravnomjerno steže u svim smjerovima. U većini literature pretpostavlja se da je skupljanje neovisno o geometriji i poziciji tvorevine u izradbenoj komori. [46] No u stvarnosti skupljanje jako ovisi o strategiji izrade – poziciji na radnoj podlozi, orijentaciji prototipa, smjeru laserske zrake i obliku modela koji se izrađuje.

Parametrima lasera se može utjecati na postupak srašćivanja i na svojstva izrađene tvorevine. Kvaliteta površine, mehanička svojstva, dimenzijska točnost i vrijeme izrade najčešći su razlog za potrebom mijenjanja parametara. Promjena parametara može se vršiti posebno za konturu (vanjske slojeve) odnosno jezgru prototipa (unutrašnjost tvorevine). Na bolju povezanost čestica (srašćivanje), ali i na mehanička svojstva utječe gustoća energije (e. *energy density*) laserske zrake ne samo na vanjskim slojevima, nego i u unutrašnjosti. Gustoća enegije prema mnogim dosadašnjim istraživanjima ovisi o snazi i brzini laserske zrake, te o razmaku između putanje laserske zrake (e. *hatch distance*) ili o promjeru laserske zrake, koja se računa prema jednadžbi: [11, 49, 50, 51, 52, 53]

$$ED = \frac{P}{v \cdot h} \quad \text{ili} \quad ED = \frac{P}{v \cdot d} \quad (5.1)$$

gdje je: ED [J/mm^2] – gustoća energije, P [W] – snaga lasera, v [mm/s] – brzina laserske zrake, h [mm] - razmak između putanje laserske zrake, d [mm] – promjer laserske zrake.

Iznos snage lasera tijekom postupka srašćivanja ovisi o vrsti materijala, te debljini sloja koji se nanosi valjkom za izravnavanje. Snaga lasera i brzina laserske zrake prilikom izrade konture nešto su niže u odnosu na snagu i brzinu tijekom izrade jezgre pojedinog sloja. Promjenom brzine laserske zrake mijenja se unos energije u materijalu i vrijeme izrade tvorevine. [10, 50, 51, 52, 53]

Premda nije najvažniji čimbenik, ali cijena materijala igra signifikantnu ulogu prilikom analiziranja ukupne, tj. završne cijene tvorevine, te uslijed toga recikliranje materijala postaje sve

važniji čimbenik, ali isto tako i omjer udjela miješanja originalnog i već upotrebljenog materijala. S obzirom da u SLS postupku kao potporna struktura služi prah, moguće je taj neiskorišteni prah ponovno upotrijebiti. Moguće je miješati materijal u omjeru 67 % korištenog i 33 % originalnog praha kod PA2200, [54] ali se ne spominje mogućnost upotrebe samo 100 % korištenog materijala koji je već prošao nekoliko ciklusa, te kako on utječe na svojstva tvorevine. Prah je potrebno prije miješanja prosijati radi odstranjivanja neželjenih nečistoća i mogućih grudica nakupina praha. [26] Mnogi autori preporučuju upotrebu samo originalnog praha, jer dodavanjem već korištenog materijala dobije se lošija kvaliteta površine. U literaturi [55] ustanovljeno je da je hrapavost površine povezana s masenim protokom taljevine MFR, te se prihvatljiva površina kod materijala PA 12 postiže pri MFR-u 18 g/10 min.

Najčešće upotrebljavani materijal u SLS postupku je poliamid. Poliamid upija vlagu, što utječe na mehanička svojstva i bubrenje tvorevine. Apsorpcija vlage povezuje se sa sniženjem temperature staklišta T_g . Higroskopna priroda poliamida je objašnjena kroz strukturu poliamida, koja je uglavnom kristalna sa amorfnim područjima. Polarna amidna skupina (-NHCO-) oblikuje kristalna područja; no nisu svi elektroni jednoliko raspoređeni između atoma, što vodi do privlačenja nabijenih područja i povezivanja polimernih lanaca. Međutim, voda je također polarna molekula i kad poliamid apsorbira vlagu, molekula vode miješa se sa područjima u polimernim lancima i slabo spaja sa C=O i H-N vezama. To smanjuje polarnost između lanaca uzrokujući povećanje pokretljivosti lanaca, koja vodi do sniženja čvrstoće i više savitljivosti. Apsorbirana voda se prema tome ponaša kao omekšavalno. Kao rezultat povećanja pokretljivosti lanaca, staklišta T_g se snižuje, uzrokujući također smanjenje amorfnih područja oko T_g i na taj način povećava kristalasta područja. (Npr. poliamid 6 (PA 6) skladišten u suhim uvjetima ima T_g oko 60 °C, dok kod skladištenja u vlažnim uvjetima T_g se snižuje na sobnu temperaturu ili niže). Količina apsorpcije vode ovisi o koncentraciji amidne skupine u molekulnim lancima. Kod uobičajenih SLS postupaka upotrebljava se PA 11 ili PA 12 (maksimalna apsorpcija vode tvorevine izrađene klasičnim postupcima izrade je 0,7 % do 0,8 % [56]) koji apsorbiraju manje vlage od ostalih poliamida, kao PA 6 (maksimalna apsorpcija je 9,5 % - 10,5 % [56]). [57] Većina literature vezana uz apsorpciju vode/vlage obrađena je za PA 6, tek malo nje za PA 12. No u radovima [57, 58] objašnjava se da iako apsorpcija vode uzrokuje sniženje čvrstoće PA 6, povisuje rasteznu čvrstoću PA 12. No ispitna tijela ispitana su nakon samo 24 sata, što u praksi nije slučaj, pa je potrebno ustanoviti do kojeg maksimalnog iznosa se povećava masa ispitnog tijela, te koliki postotak vode apsorbiraju nakon dužeg perioda.

Što je viši stupanj kristalnosti, odnosno s porastom stupnja središtenosti strukture manja je apsorpcija vode i manji je utjecaj vlage na svojstva polimera. Što je više polarnih skupina prisutno u polimernoj matrici to će njen apsorpcijski afinitet biti veći. Upijanje vode uzrokuje omekšavanje, naročito amorfnog dijela poliamida. [59]

5. Dosadašnja istraživanja na području selektivnog laserskog srašćivanja

Starenje je promjena, ovisna o vremenu, u amorfnim polimerima ili amorfnoj fazi u kristalastim polimerima kao rezultat pokretljivosti polimernih lanaca. [57] Prilikom hlađenja polimera s temperature više od T_g na temperaturu nižu od T_g , teži se postizanju stvarnog volumena (tj. dimenzija). No ako se polimer brzo hladi, kao u slučaju laserskog srašćivanja, ne može se skupiti dovoljno brzo da zadrži ravnotežni volumen i zbog toga, postupak se mora nastaviti sporo dok se ne postigne ravnoteža. Istovremeno se pokretljivost polimernih lanaca drastično smanjuje u usporedbi pri povišenoj temperaturi, no molekule ipak imaju malu pokretljivost i na taj način polako postižu ravnotežno stanje. Uobičajeni efekt starenja je povišenje gustoće, modula elastičnosti i smanjenje duktilnosti, prekidnog istezanja i puzanja. Starenje u amorfnim polimerima se dešava ispod T_g , a kristalastima iznad T_g amorfne faze. [57] U laserskom srašćivanju taljenje i kristalizacija može se javiti tijekom postupka, pa je na kraju potrebno daljnje hlađenje.

6. MATERIJALI I UREĐAJI ZA PROVEDBU ISPITIVANJA

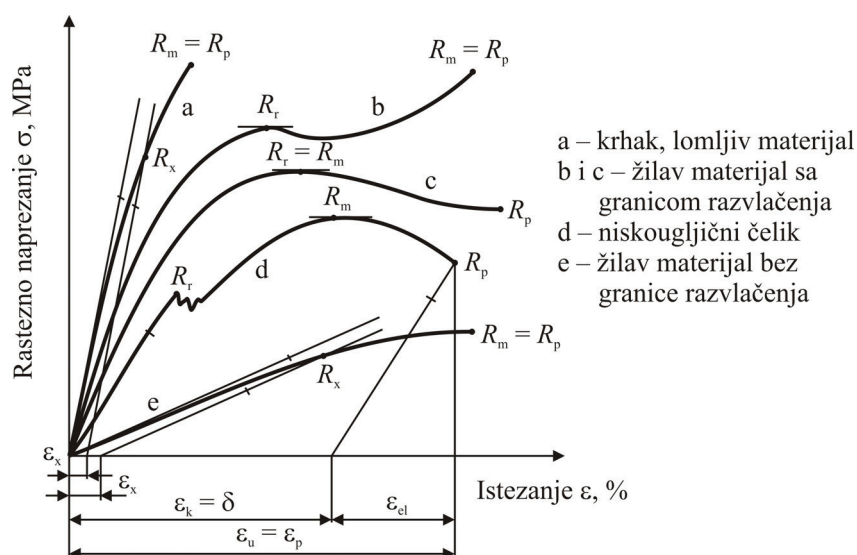
Ispitivanje je moguće podijeliti u nekoliko koraka:

1. izrada ispitnih tijela od materijala poliamida 12 (PA 12) postupkom selektivnog laserskog sraščivanja na stroju *Formiga P100* prema normama za ispitivanje savojnih svojstava HRN EN ISO 178:2008 i ispitivanje rasteznih svojstava ISO 527:1993 uz podešavanje parametara izrade
2. izrada ispitnih tijela od originalnog (čistog), miješanog i 100 % recikliranog praha
3. izlaganje ispitnih tijela utjecajima UV zračenja (prema normi HRN EN ISO 4892:2004) i vode (norma HRN EN ISO 62:2008). Nakon izlaganja atmosferskim uvjetima ispitana su dimenzijska točnost, hrapavost i mehanička svojstva (tvrdoća, rastezna i savojna svojstva)

6.1. Oblici ispitnih tijela

6.1.1. Oblik ispitnog tijela za određivanje rasteznih svojstava

Prema normi HRN EN ISO 527: 2012 određuju se rastezna svojstva plastomera. Normom su definirane sljedeća veličine (slika 6.1): [60, 61, 62]



Slika 6.1. Tipične krivulje rasteznog naprezanja – istezanja [60]

- mjerna duljina L_0 [mm] – je početna udaljenost između umjerne crte na središnjem dijelu ispitnog tijela

6. Materijali i uređaji za provedbu ispitivanja

- *brzina ispitivanja* v [mm/min] – je brzina kidalice tijekom ispitivanja
- *rastežno naprezanje* R [MPa] – je rastezna sila po jedinici površine na presjeku unutar mjerne duljine, provedena na ispitnom tijelu u bilo kojem trenutku
- *granica razvlačenja* R_r [MPa] – je naprezanje što ga izaziva sila razvlačenja na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *konvencionalna granica razvlačenja* R_x [MPa] - je naprezanje koje izaziva unaprijed dogovorenu vrijednost trajnog istezanja od x %. Određuje se kod materijala koji ne pokazuju granicu razvlačenja. Dogovorena vrijednost trajnog istezanja kod polimera je 0,1 % ili 1 %
- *rastezna čvrstoća* R_m [MPa] – je naprezanje što ga izaziva maksimalna sila na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *prekidna čvrstoća* R_p [MPa] – je naprezanje što ga izaziva prekidna sila na početnu površinu presjeka ispitnog tijela
- *konačno istezanje, istegnuće* $\varepsilon_K = \delta$ [%] – je omjer između konačnog produljenja i početne mjerne duljine ispitnog tijela
- *prekidno ili ukupno istezanje* $\varepsilon_p = \varepsilon_u$ [%] – je omjer prekidnog (ukupnog) produljenja i početne mjerne duljine epruvete
- *modul rastezljivosti* E [MPa] – modul rastezljivosti je omjer naprezanja $R_2 - R_1$ s odgovarajućim istezanjem $\varepsilon_2 = 0,25$ % - $\varepsilon_1 = 0,05$ %.

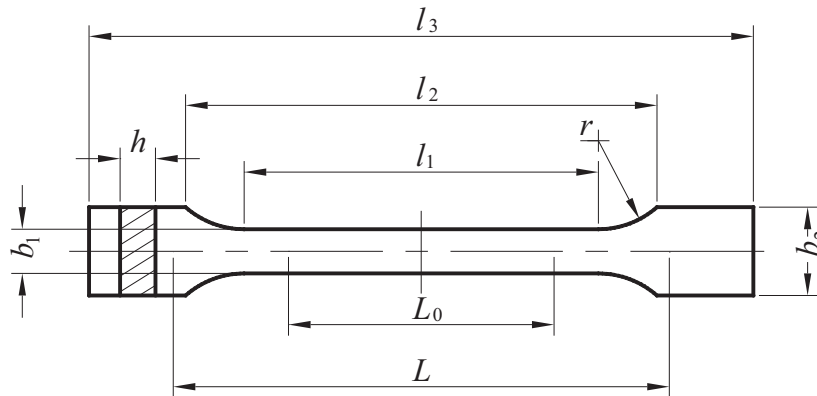
Dimenzije ispitnih tijela navedene su u tablici 6.1 i prikazane na slici 6.2.

Tablica 6.1. Dimenzije rasteznih ispitnih tijela [62]

	Dimenzije [mm]
Tip ispitnog tijela	1A
l_3 – ukupna duljina	$\geq 150^{(1)}$
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2
r – polumjer	$20 \div 25$
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104 \div 113^{(2)}$
b_2 – širina dijela koji se steže u čeljusti uređaja	$20 \pm 0,2$
b_1 – širina uskog dijela, tj. ispitnog dijela	$10 \pm 0,2$
h – debljina	$4 \pm 0,2$
L_0 – mjerna duljina	$50 \pm 0,5$
L – početna udaljenost između čeljusti uređaja	115 ± 1

(1) Za neke materijale duljina se mora povećati (npr. $l_3 = 200$ mm) da se izbjegne lomljenje ili klizanje u čeljustima kidalice

(2) U zavisnosti o l_1 , r , b_1 i b_2 , ali u granicama tolerancije.



Slika 6.2. Oblik ispitnog tijela za rastezna ispitivanja [62]

Za rastezna svojstva potrebno je odrediti rastezna naprezanja, istežanja i modul rastezljivosti.

Rastezno naprezanje računa se prema izrazu: [62]

$$R = \frac{F}{A} \quad (6.1)$$

gdje su: R [MPa] - rastezno naprezanje, F [N] – sila, A [mm²] - površina

Istežanje se računa prema izrazu: [62]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6.2)$$

gdje su: ε [%] – istežanje, Δl [mm] – produljenje, l_0 [mm] – početna mjerna duljina ispitnog tijela

i modul rastezljivosti: [62]

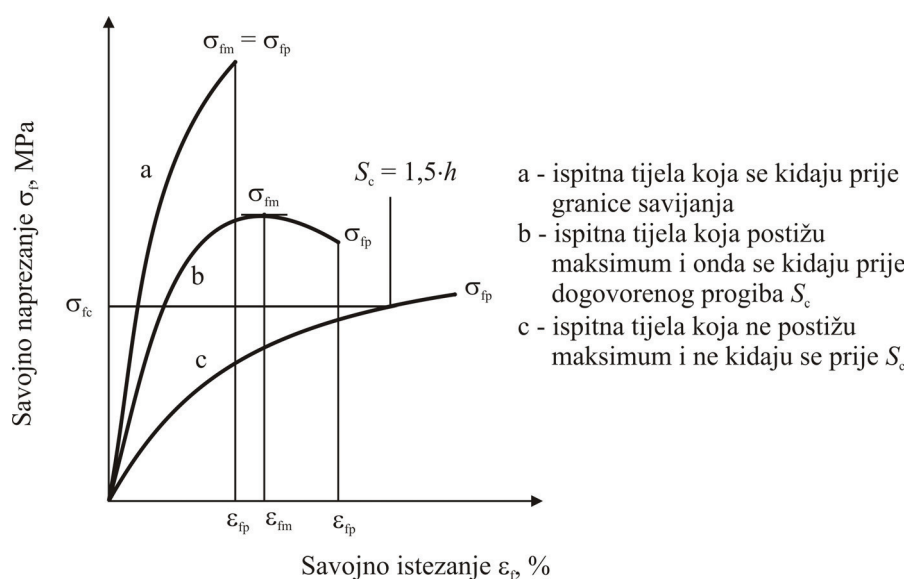
$$E = \frac{R_2 - R_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (6.3)$$

gdje su: R_2 i R_1 – rastezna naprezanja za istežanja ε_2 i ε_1 ($\varepsilon_2 = 0,25$ %, $\varepsilon_1 = 0,05$ %).

6.1.2. Oblik ispitnog tijela za određivanje savojnih svojstava [63]

Prema normi HRN EN ISO 178:2011 određuju se savojna svojstva krutih i polukrutih polimera u definiranim uvjetima.

Potrebno je odrediti slijedeća svojstva (slika 6.3):



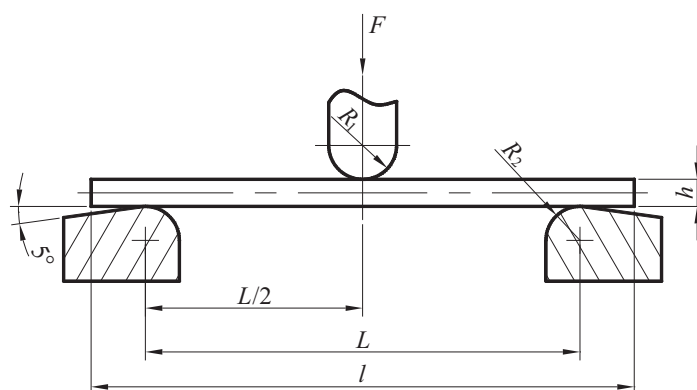
Slika 6.3. Tipične krivulje savojnog naprezanja – istezanja i progib S

- savojno naprezanje σ_f [MPa] – je nominalno naprezanje vanjskog ruba površine ispitnog tijela mjereno na sredini ispitnog tijela
- prekidno savojno naprezanje σ_{fp} [MPa] – savojno naprezanje kad prekida ispitnog tijela
- savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa] – je maksimalno savojno naprezanje na ispitnom tijelu tijekom ispitivanja
- dogovorena (konvencionalna) granica savijanja σ_{fc} [MPa] – je dogovorena granica savijanja kod dogovorenog progiba S_c
- progib S [mm] – razmak kod koje gornja ili donja površina ispitnog tijela na sredini odstupa od originalnog dijela tijekom savojnog ispitivanja
- dogovoreni progib S_c [mm] – je progib koji je jednak 1,5 puta debljina h ($1,5 \cdot h$) ispitnog tijela. Razmak oslonaca $L = 16 \cdot h$, dogovoreni progib odgovara savojnom istezanju od 3,5 %
- savojno istezanje ε_f [%] – je nominalna promjena duljine na sredini vanjske površine ispitnog tijela
- prekidno savojno istezanje ε_{fp} [%] - savojno istezanje kad kidanja ispitnog tijela

6. Materijali i uređaji za provedbu ispitivanja

- *savojno istežanje pri savojnoj čvrstoći* ε_{im} [%] – je savojno istežanje pri maksimalnom savojnom naprezanju
- *modul savitljivosti* E_f [MPa] – je omjer naprezanja $\sigma_{f2} - \sigma_{f1}$ i istežanja $\varepsilon_{f2} = 0,25\%$ - $\varepsilon_{f1} = 0,05\%$. Modul savitljivosti je približna vrijednost modula rastezljivosti.

Primjenjuje se trotočkasto ispitivanje, tj. ispitno tijelo (slika 6.4) mora biti oslonjeno na dva oslonca i opterećeno na sredini silom F , dok ispitno tijelo ne pukne ili dok progib ne postigne dogovorenu vrijednost S_c .



Slika 6.4. Oblik ispitnog tijela za savojna ispitivanja

Polumjer opterećenja R_1 i polumjeri oslonca R_2 su:

$$R_1 = 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$$

$$R_2 = 2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm} - \text{ za ispitna tijela debljine } \leq 3 \text{ mm}$$

$$R_2 = 5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm} - \text{ za ispitna tijela debljine } > 3 \text{ mm} - \text{ koji će se primjeniti tijekom ispitivanja u eksperimentalnom dijelu rada}$$

Dimenzije ispitnih tijela:

$$\text{duljina ispitnog tijela } l = 80 \pm 2 \text{ mm}$$

$$\text{širina ispitnog tijela } b = 10 \pm 0,2 \text{ mm}$$

$$\text{debljina ispitnog tijela } h = 4 \pm 0,2 \text{ mm.}$$

Za savojna svojstva potrebno je izračunati prema jednadžbama:

Savojno naprezanje:

$$\sigma_f = \frac{3F \cdot L}{2b \cdot h^2} \quad (6.4)$$

gdje su: σ_f [MPa] - savojno naprezanje, F [N] – sila, $L = 16h = 16 \cdot 4 = 64$ [mm] – mjerna duljina, tj. razmak oslonaca, b [mm] – širina, h [mm] – debljina

Savojno istezanje:

$$\varepsilon_f = \frac{6S \cdot h}{L^2} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_f = \frac{600S \cdot h}{L^2} \% \quad (6.6)$$

gdje su: ε_f [%] - savojno istezanje, S [mm] – progib, h [mm] – debljina, L [mm] – mjerna duljina (tj. razmak oslonaca).

Za proračun modula savitljivosti, upotrebljavaju se progibi S_1 i S_2 koji odgovaraju vrijednostima savojnih istezanja $\varepsilon_{f1} = 0,05$ % i $\varepsilon_{f2} = 0,25$ % primjenjujući jednadžbe:

$$S_i = \frac{\varepsilon_{fi} \cdot L^2}{6h} \quad i = 1, 2 \quad (6.7)$$

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (6.8)$$

gdje su: S [mm] – progib, ε_f [%] - savojno istezanje, L [mm] – mjerna duljina (razmak oslonaca), h [mm] – debljina, E_f [MPa] – modul savitljivosti, σ_{f1} [MPa] - savojno naprezanje mjereno na progibu S_1 , σ_{f2} [MPa] - savojno naprezanje mjereno na progibu S_2 .

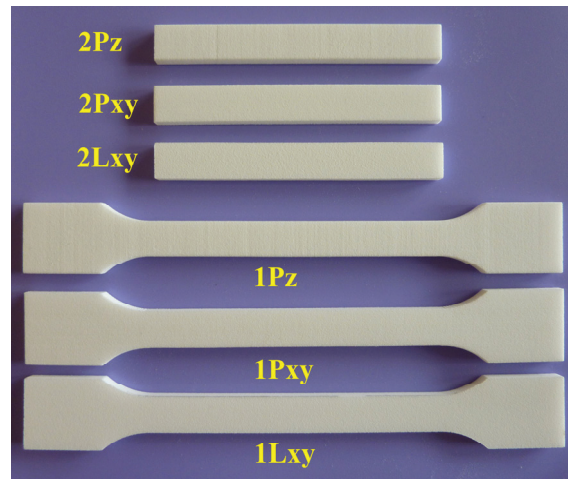
6.2. Materijal ispitnih tijela

Ispitna tijela napravljena SLS postupkom izrađena su od poliamida 12 naziva PA 2200, (slika 6.5) u tri različite orijentacije u izradbenom prostoru (slika 6.6):

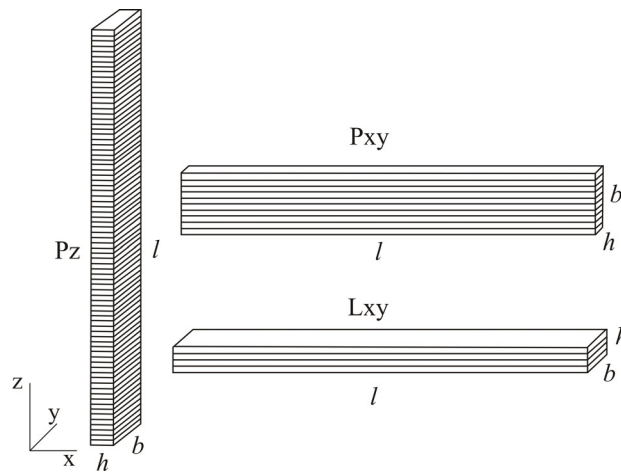
- Lxy – ispitno tijelo u ravnini xy s visinom u z smjeru 4 mm
- Pxy – ispitno tijelo u ravnini xy s visinom u z smjeru 10 mm
- Pz – ispitno tijelo u smjeru z osi s visinom 80 mm i 150 mm ovisno da li je ispitno tijelo za rastezna ili savojna ispitivanja.

Ispitivanja orijentacije provedena su sa tri različita omjera upotrebljenog materijala:

- 100 % originalnog poliamida
- miješanog originalnog i recikliranog u omjeru 50 % : 50 %
- 100 % recikliranog materijala nakon 3. ciklusa upotrebe.



Slika 6.5. Ispitna tijela dobivena SLS postupkom



Slika 6.6. Orijentacija slojeva

U tablici 6.2 prikazana su svojstva materijala dobivena od proizvođača.

Tablica 6.2. Svojstva materijala PA 12 (PA 2200) [26]

Svojstva	Vrijednosti
	PA 2200
Prosječna veličina zrna, μm	60
Nasipna gustoća ρ , g/cm^3	0,435 – 0,445
Gustoća izrađene tvorevine ρ , g/cm^3	0,9 – 0,95
Modul rastezljivosti E , MPa	1700 \pm 150
Rastezna čvrstoća R_m , MPa	45 \pm 3
Prekidno istezanje ϵ_p , %	20 \pm 5
Modul savitljivosti E_f , MPa	1240 \pm 130
Savojna žilavost po Charpyju, kJ/m^2	53 \pm 3,8
Rastezna žilavost po Izodu, J/m	32, 8 \pm 3,4
Zarezna žilavost po Izodu, J/m	4,4 \pm 0,4
Tvrdoća utiskivanjem kuglice	77, 6 \pm 2
Tvrdoća po Shore D	75 \pm 2
Talište T_m , °C	172 - 180
Temperatura omekšavanja po Vicatu B/50, °C	163
Temperatura omekšavanja po Vicatu A/50, °C	181

6.3. Uređaj za izradu prototipova SLS postupkom

Kod SLS postupka prototipovi su izrađeni na stroju *Formiga P100* proizvođača *EOS*, Njemačka koji posjeduje *Fakulteta za strojništvo, Katedra za proizvodno strojništvo* u Mariboru, Slovenija.

Formiga P100 (slika 6.7) može izrađivati prototipove komplicirane geometrije za medicinu, ali i visokokvalitetne širokoprimjenjive tvorevine od poliamida i polistirena.

Karakteristike uređaja *Formiga P100*: [26]

- radna površina: 200 mm x 250 mm x 330 mm
- mogućnost izrade funkcionalnih prototipova, modela za lijevanje u gips i podtlačno lijevanje od PA i PS
- standardna debljina sloja: 0,1 mm
- minimalna debljina sloja: 0,05 mm
- rezolucija: 0,005 mm
- CO₂ laser
- nominalna snaga lasera: 30 W

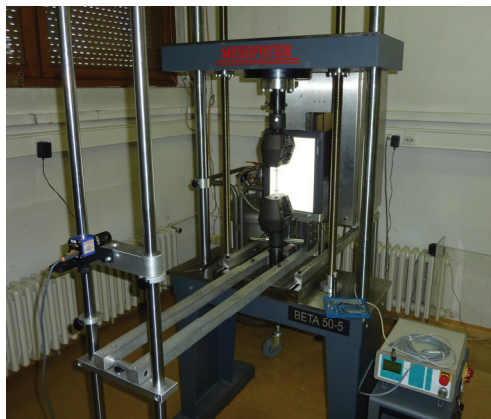
- valna duljina lasera: 10,2 – 10,8 μm
- promjer laserske zrake: $\sim 0,42$ mm
- površina izložena zračenju (e. *exposure area*): 220 mm x 270 mm
- nominalna snaga stroja za rad: 5 kW



Slika 6.7. Formiga P100

6.4. Uređaj za mjerenje mehaničkih svojstava

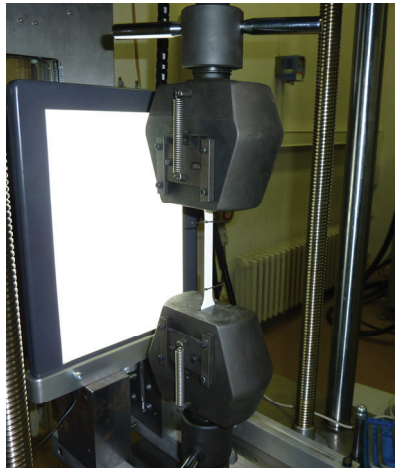
Za određivanje mehaničkih svojstava primjenjuje se kidalica *Messphysik Beta 50 - 5* (slika 6.8). Upravljačka jedinica je EDC 100, maksimalne sile opterećenja 50 kN. Rastezna svojstva ispituju se videoekstenziometrom.



Slika 6.8. Kidalica

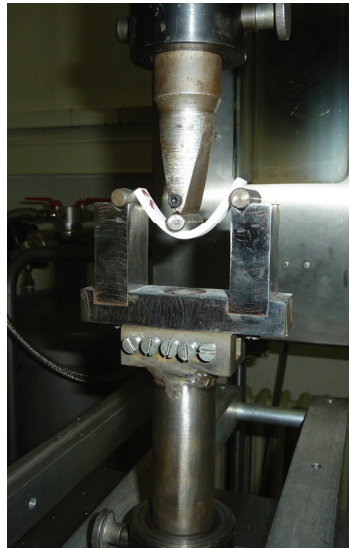
Ispitivanja se provode pri sobnoj temperaturi od 23 °C.

Za određivanje rasteznih svojstava ispitno tijelo se stegne u čeljusti kidalice (slika 6.9) i rasteže se silom F , pri brzini $v = 5$ mm/min.



Slika 6.9. Čeljusti za ispitivanje rasteznih svojstava

Za ispitivanje savojnih svojstava čeljusti (slika 6.10) se razlikuju, jer je ispitno tijelo potrebno osloniti na dva oslonca i u sredini opterećivati silom F . Brzina ispitivanja $v = 5$ mm/min.



Slika 6.10. Čeljusti za ispitivanje savojnih svojstava

6.5. Određivanje apsorpcije vode

Apsorpcija vode mjerila se na ispitnim tijelima za rastezna i savojna svojstva, da bi se moglo odmah na njima izvršiti ispitivanje mehaničkih svojstava i vidjeti utjecaj apsorpcije vode. Ispitivanje apsorpcije vode provodi se prema normi HRN EN ISO 62:2008.

Na ispitnim tijelima prije uranjanja u vodu mjeri se masa m_1 , zatim se uranjaju u destiliranu vodu pri sobnoj temperaturi. Nakon određenog perioda ispitna tijela se vade iz vode i brišu čistom maramicom, te im se mjeri masa m_2 i računa postotak apsorpcije vode prema jednadžbi: [64]

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\% \quad (6.9)$$

gdje je: c [%] – apsorpcija vode, tj. promjena u masi, m_1 [g] – masa ispitnog tijela prije uranjanja u vodu, m_2 [g] – masa ispitnog tijela nakon uranjanja u vodu.

Određivanje je potrebno izvršiti na najmanje 3 ispitna tijela. [64]

Na slici 6.11 prikazana je vaga proizvođača *Tehtnica – Železniki*, Slovenija, koja mjeri masu u gramima na 4 decimalna mjesta.



Slika 6.11. Vaga za mjerenje mase proizvođača *Tehtnica – Železniki*, Slovenija

6.6. Ispitivanje starenja – metoda izlaganja izvorima svjetla

Mnogi polimerni materijali moraju se zaštititi od okolišnih uvjeta; npr. izvora topline, kisika, vode i pogotovo UV svjetla. Premda mnogi polimeri ne apsorbiraju direktno ultravioletnu radijaciju, površina tvorevine sadrži neke komponente koji mogu apsorbirati UV svjetlo, i time potaknuti oksidacijsku razgradnju polimera. Najčešći izvor UV zračenja je sunce koje uzrokuje smanjenje trajnosti i nepoželjne promjene u svojstvima materijala. Umjetna svjetlost može također utjecati na svojstva. UV radijacija može uzrokovati pucanje lanaca u strukturi materijala. Taj kemijski proces naziva se fotooksidacija i sastoji se od dva različita procesa: fotoliza – koja uključuje apsorpciju UV svjetlosti i oblikovanje slobodnih radikala prilikom pucanja molekularnih veza. [65]

Izlaganje izvorima svjetla u laboratoriju provodi se prema normi HRN EN ISO 4892:2004 na uređaju *SOLARBOX 1500e*, proizvođača *Erichsen* bez ovlaživanja uzoraka (slika 6.12), I radijacije 550 W/m^2 kod valne duljine od 300 nm do 800 nm, temperatura komore $65 \text{ }^\circ\text{C}$. [66]



Slika 6.12. Komora za ispitivanje izlaganja izvorima svjetla

U komoru su stavljena ispitna tijela za rastezna i savojna svojstva, da bi se nakon 1000 h provednih u komori mogla na njima izvršiti ispitivanja mehaničkih svojstava i vidjeti utjecaj ubrzanog starenja na svojstva.

U Europi, prema normi ASTM D3-424, 1 h laboratorijskog ispitivanja u UV komori odgovara 24 sata prirodnog izlaganja UV svjetlosti. Ispitivanje provedeno nakon 1000 h u komori odgovara 1000 dana prirodnog izlaganja, odnosno 2,8 godina.

Za usporedbu provedena su i terenska ispitivanja u trajanju od 120 dana (slika 6.13).



Slika 6.13. Terenska ispitivanja utjecaja atmosferilija

6.7. Ispitivanje izmjera i hrapavosti površine

Izmjere ispitnih tijela određivane su digitalnim pomičnim mjerilom *Mitutoyo*, mjernog područja 0 – 150/0,01 mm.

Za ispitivanje hrapavosti površine primjenjuje se *Mahr Perthometer S8P* (slika 6.14), serijski broj 0265. Mjerenja su provedena s pomoću ticala s vanjskim vođenjem FRW – 750, radijusa igle ticala 10 μm i kuta igle ticala 90°. Bitne vrijednosti uređaja su:

- granična vrijednost GS električnog filtra (granična valna duljina za profil hrapavosti)
 $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$
- referentna duljina $L_t = 5,6 \text{ mm}$

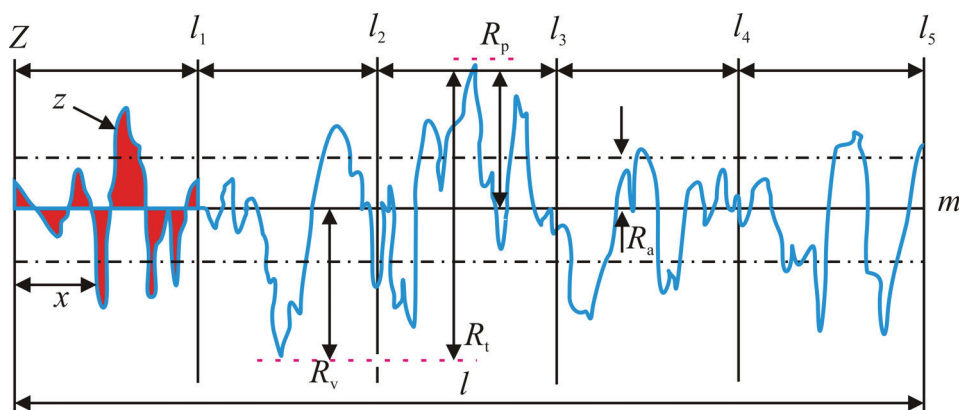


Slika 6.14. Uređaj za ispitivanje hrapavosti površine

Uređajem se mjere hrapavost (filtrirani profil) R, valovitost W i primarni (nefiltrirani) profil P.

Hrapavost R površine je mikrogeometrijska nepravilnost površine, koja nastaje tijekom postupaka obrade ili drugih utjecaja. Hrapavost površine u određenim slučajevima bitno utječe na radna svojstva tvorevine, posebno na mjestima međusobnog spoja pojedinih elemenata (trenje, zračnost, podmazivanje, itd.). Općenito, strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju veću dinamičku čvrstoću, veću postojanost koroziji, veću sposobnost nalijeganja, bolje prenose toplinu itd. [67] Kako je postizanje niskog stupnja hrapavosti uvijek povezano s duljim i skupljim postupcima obrade, ono ima za posljedicu povećanje cijene tvorevine.

Veličina hrapavosti obično se mjeri obzirom na srednju referentnu liniju profila neravnina m , koja dijeli profil tako da je unutar mjerne duljine l veličina svih kvadrata odstupanja profila od te crte najmanja (slika 6.15). Mjerna duljina l ovisna je o vrsti i kvaliteti obrade, te o metodi mjerenja. [67]



Slika 6.15. Parametri hrapavosti površine [68]

Za procjenjivanje hrapavosti površine najčešće se upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila R_a , koje je jednako srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini l . [67]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| \cdot dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (6.10)$$

gdje su: R_a [μm] – srednje aritmetičko odstupanje, l [μm] – mjerna duljina hrapavosti površine, $z(x)$, z_i [μm] – visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu liniju, x [μm] – dužina uzduž mjerne duljine, n – broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine.

Kao parametar hrapavosti često se upotrebljava srednja visina neravnina R_z , koja je jednaka zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti visine pet najviših vrhova i aritmetičke sredine

apsolutnih vrijednosti pet najnižih dubina udolina na mjernoj duljini l , tj. visina neravnina u deset točaka. [67]

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |z_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |z_{vi}| \right) \quad (6.11)$$

gdje su: R_z [μm] – srednja visina neravnina, z_{pi} [μm] – visina i -tog najvišeg vrha, z_{vi} [μm] – udubina i -te najniže udoline.

Važan parametar hrapavosti je i ukupna visina profila R_t , koja je definirana kao udaljenost između dva pravca paralelna sa srednjom linijom profila m , povučena tako da u granicama mjerne duljine dodiruju najvišu, odnosno najnižu točku profila. [68]

$$R_t = R_p + R_v \quad (6.12)$$

gdje su: R_t [μm] – ukupna visina profila, R_p [μm] – najveća visina vrha profila, R_v [μm] – najveća dubina dola profila.

Zatim se određuju još parametri hrapavosti: [69]

R_{\max} [μm] – maksimalna visina najvišeg vrha i najnižeg dola profila u pojedinim referentnim duljinama od $l_1 \div l_5$,

R_{pm} [μm] – prosječna najveća visina vrha profila

$$R_{\text{pm}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{pi} \quad (6.13)$$

Valovitost W obično nastaje zbog grešaka u postupku izrade, kao što su nepravilnosti u brusnoj ploči ili zbog namjernih radnji u postupku izrade. Valovitost ima dulju valnu duljinu od hrapavosti koja je superponirana hrapavosti. [69]

Od parametara valovitosti određuje se: [69]

W_t [μm] - ukupna visina valovitosti

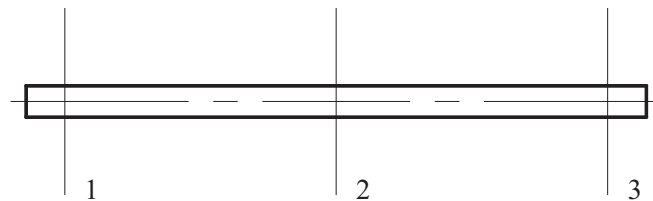
Primarni profil P je generalni oblik površine u kojem se zanemaruju varijacije koje nastaju hrapavošću i valovitošću. Odstupanja od primarnog oblika mogu biti uzrokovana mnogim čimbenicima: [69]

- ako se predmet drži prečvrsto ili ne dovoljno čvrsto
- netočnosti u vodilicama i kliznicima strojeva
- posljedica naprezanja u tvorevinama.

Od parametara primarnog profila određuje se:

P_t [μm] - ukupna visina primarnog profila.

Hrapavost površine određuje se okomito na smjer izrade. Mjerenje se provodi na tri mjesta (na početku, sredini i kraju ispitnog tijela), kako je prikazano na slici 6.16.



Slika 6.16. Mjesta ispitivanja hrapavosti površine

Od dobivenih vrijednosti parametara hrapavosti površine kao i ostalih podataka mjerenih u eksperimentu potrebno je izračunati i odrediti: [70]

- aritmetičku sredinu \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad (6.14)$$

- procijenjeno standardno odstupanje S :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (6.15)$$

Standardno odstupanje $\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$ nije upotrebljiva za mjerenje zbog beskonačnosti.

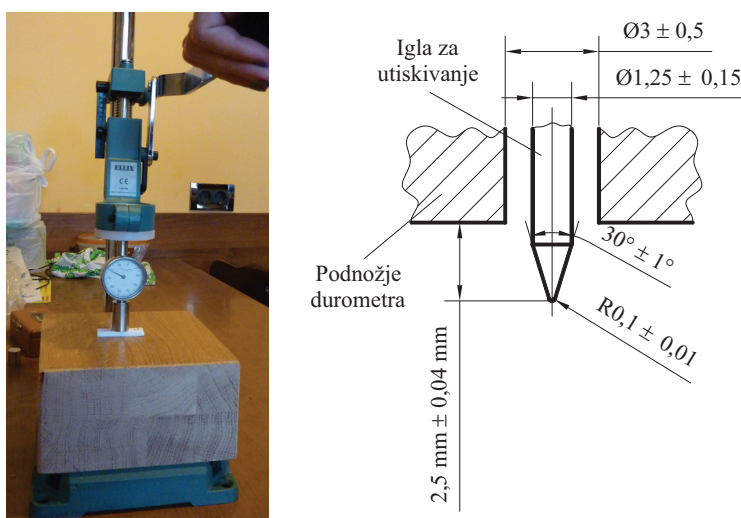
- raspon R , maksimalnu (Max) i minimalnu vrijednost (Min):

$$R = Max - Min \quad (6.16)$$

6.8. Određivanje tvrdoće s pomoću tvrdomjera

Određivanje utisne tvrdoće s pomoću tvrdomjera (tvrdoća prema Shoreu) vrši se na temelju norme HRN EN ISO 868:2008.

Tvrdoća se određuje tako da se specijalna igla tipa D utiskuje u ispitno tijelo (slika 6.17) u definiranim uvjetima prema normi i mjeri se dubina prodiranja igle u tijelo. [71]



Slika 6.17. Durometar i izgled igle za mjerenje prema Shore-u D [71]

Ispitivanje tvrdoće nije razorna metoda, pa je mjerenje moguće na ispitnim tijelima napravljenim za ispitivanje rasteznih i savojnih svojstava.

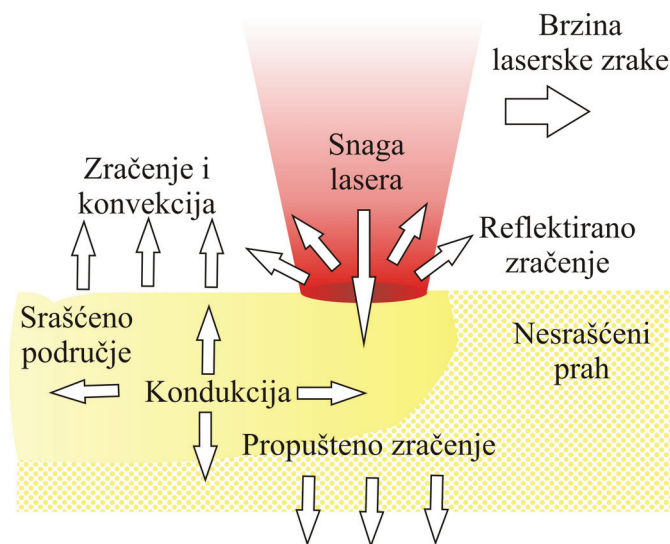
Najmanja debljina ispitnog tijela mora biti $h = 4$ mm. Durometar je potrebno postaviti okomito na podlogu koja se ispituje i držati ga utisnuto 15 ± 1 s prije očitavanja. Na jednom ispitnom tijelu potrebno ja napraviti 5 mjerenja na različitim pozicijama i odrediti srednju vrijednost. [71]

7. KARAKTERISTIKE POSTUPKA SELEKTIVNOG LASERSKOG SRAŠĆIVANJA

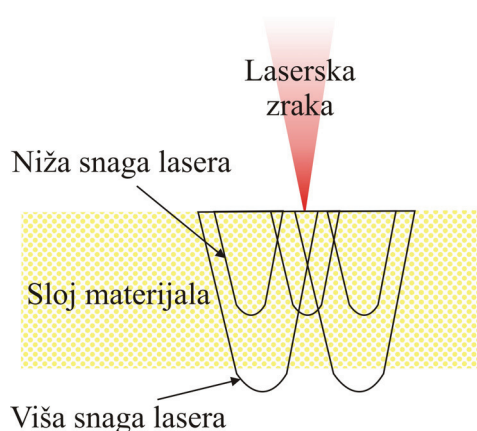
Kod SLS postupka laserska zraka usmjerava se zrcalom i ocrtava presjek prototipa po praškastom materijalu smještenom na radnoj podlozi. Pod djelovanjem toplinske energije laserske zrake praškasti materijal omekšava te dolazi do međusobnog srašćivanja čestica materijala i spajanja novo nanesenog sloja praha s prethodno srašćenim slojem. [14, 26, 50]

Laser utječe samo na one čestice materijala koje je ozračio. Debljine, nanesenog sloja praha, koje se trenutno mogu ostvariti SLS postupkom kreću se od 0,05 mm do 0,3 mm. [72]

Laserska zraka u idućem sloju osim taljenja novih čestica praha istodobno mora povezati taj novi sloj s već postojećim. Zbog različitih debljina slojeva i mogućnosti upotrebe više vrsta materijala drugačije toplinske provodnosti na SLS opremi, potrebno je osigurati odgovarajuću gustoću energije (ED) unesenu laserskom zrakom da bi uopće moglo doći do taljenja materijala te povezivanja istog s predhodnim slojem (slika 7.1). S obzirom da je debljina sloja na stroju *Formigi P100* 0,1 mm laserska zraka tali nešto veći sloj praha i to svaki put u svakom sloju. Pri taljenju prahu se smanji volumen. Pri tome je također potrebno podesiti odgovarajuću snagu za debljine slojeva da ne dođe do prevelikog srašćivanja (slika 7.2).



Slika 7.1. Utjecaj laserske zrake na materijal [72]



Slika 7.2. Odabir snage ovisno o debljini sloja

Kada se nanosi završni sloj prototipa, valjkom za izravnavanje nanosi se nekoliko zaštitnih slojeva praha (5 mm). Radna komora sa prototipom ostavlja se u stroju oko 2 h, kako bi se postupno ohladila. Prototip nije još pogodan za rukovanje, pa se ostavlja u prahu izvan stroja dok se potpuno ne ohladi do sobne temperature. Time se utječe na dimenzijsku točnost i sniženje toplinskih deformacija. Hlađenje prototipa treba trajati koliko i izrada. Nakon što je prototip ohlađen može se izvaditi i očistiti od viška praha. [26, 51]

7.1. Parametri lasera

Parametarima lasera se može utjecati na postupak srašćivanja i na svojstva prototipa. Kvaliteta površine, mehanička svojstva, dimenzijska točnost i vrijeme izrade prototipa najčešći su razlog za mijenjanje parametara. Parametri se mogu podešavati posebno za konturu i unutrašnjost (jezgru) prototipa. Parametri za jezgru isti su parametrima za konturu uz različite postavke. [51]

7.1.1. Snaga lasera

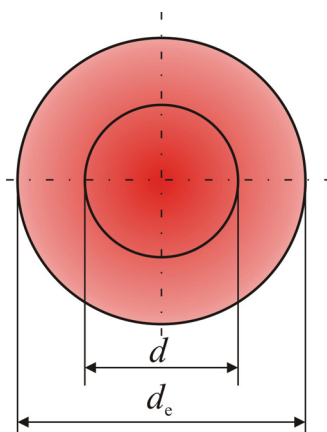
Iznos snage lasera P [W] tijekom procesa srašćivanja ovisi o vrsti materijala te debljini sloja koji se nanosi valjkom za izravnavanje. Prilikom izrade konture snaga lasera nešto je manja (otprilike za 5 W) u odnosu na snagu tijekom izrade jezgre sloja. [51]

7.1.2. Brzina laserske zrake (brzina skeniranja)

Brzina laserske zrake v [mm/s] je također parametar koji se može regulirati s obzirom na izradu konture ili jezgre prototipa. Kod izrade konture brzina laserske zrake je manja nego kod izrade jezgre. Promjenom brzine laserske zrake mijenja se unos energije u materijal i vrijeme izrade prototipa. [51]

7.1.3. Promjer laserske zrake

Kod SLS postupaka laserska zraka usmjerena je prema dolje određenim promjerom i zrači površinu praha. Promjer zrake d stroja *Formiga P 100* tvrtke *EOS* iznosi 0,42 mm. Međutim, promjer područja u kojem se čestice sraščuju nešto je veći od fizikalnog promjera zrake (efektivni promjer sraščivanja d_e) (slika 7.3). [51]

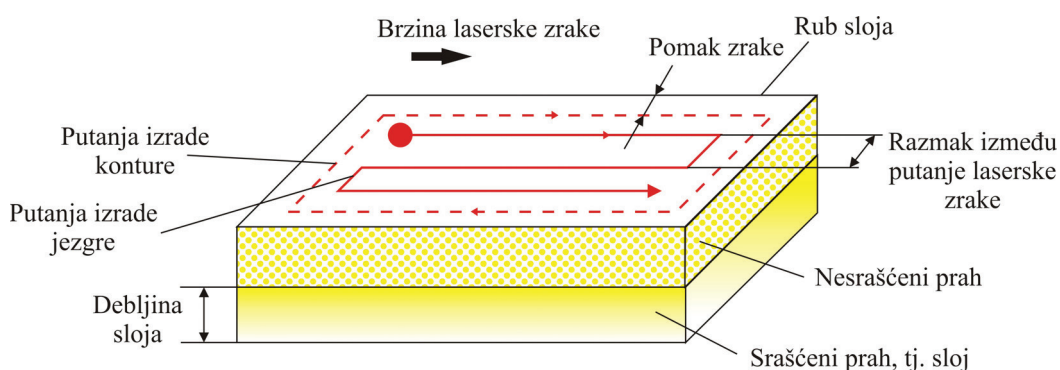


Slika 7.3. Fizikalni d i efektivni promjer d_e laserske zrake [51]

Kako su snaga lasera i brzina laserske zrake različite kod izrade konture odnosno jezgre prototipa, tako je različiti i d_e konture odnosno jezgre ($d_{ek} \neq d_{ej}$). Zbog lakšeg predočenja, efektivni i fizikalni promjer laserske zrake predstavljaju se kao krug. Njihov stvaran izgled ovisi o x i y zakretanju skenirajućeg zrcala. [51]

7.1.4. Razmak između putanje laserske zrake

Razmak između putanje laserske zrake (e. *hatching distance* - h) prikazan je na slici 7.4. Ako je razmak veći od promjera laserske zrake između prolaza lasera ostaje nesraščeni materijal.

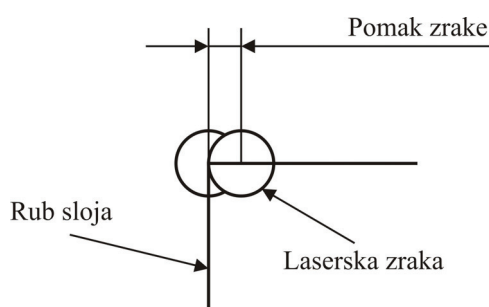


Slika 7.4. Razmak između dvije putanje laserske zrake [46]

7.1.5. Pomak zrake

Tijekom skeniranja slojeva putanja centra laserske zrake nikad ne dolazi do ruba sloja, već se zaustavlja za udaljenost polumjera zrake prije ruba sloja. Taj razmak između centra laserske zrake i ruba sloja naziva se pomak zrake (*e. beam offset*) (slika 7.5). Kod SLS postupka podešavanje pomaka zrake se može vršiti posebno za konturu odnosno jezgru prototipa.

Da bi prah na rubu sloja bio u potpunosti izložen utjecaju laserske zrake, kod izrade konture vrijednost pomaka zrake, (d_k), mora biti postavljena na pola d_{ek} . U slučaju da je pomak zrake veći ili manji od polovice efektivnog promjera zrake, postoji mogućnost da će doći do srašćivanja praha van konture sloja odnosno da prah neće biti u potpunosti srašćen unutar konture sloja, što bi moglo značajno utjecati na dimenzijsku točnost prototipa. [51]



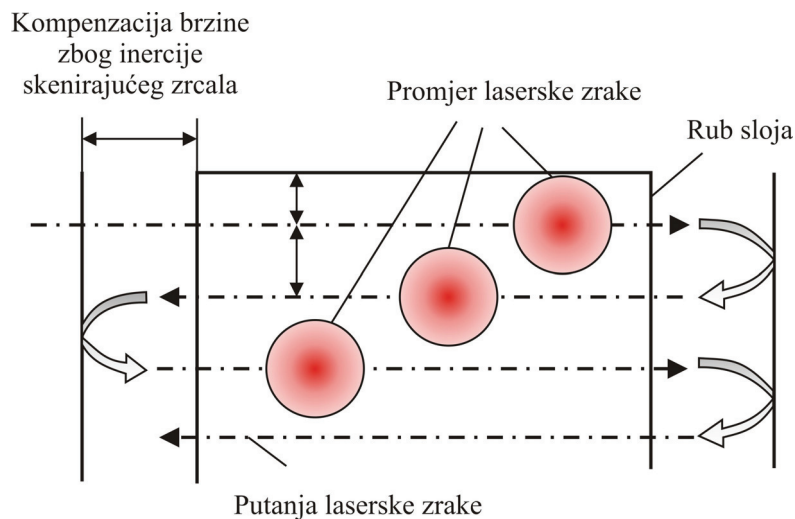
Slika 7.5. Pomak zrake kod izrade konture i jezgre sloja

Tijekom izrade jezgre, početna vrijednost pomaka zrake također se definira s obzirom na rub sloja (koji mora biti veći od onoga kod izrade konture), međutim pomak u ovom slučaju mora onemogućiti pojavu nesrašćenih dijelova između putanje lasera prilikom izrade konture i putanje

lasera prilikom izrade jezgre. Dakle, pomak zrake kod izrade jezgre mora biti izabran na takav način, kako bi oblikovao uska područja preklapanja između putanje laserske zrake tijekom izrade konture i putanje laserske zrake tijekom izrade jezgre. Preklapanje ne treba biti preveliko da ne bi došlo do presrašćivanja. [51]

7.1.6. Kompenzacija brzine laserske zrake (e. skywriting)

Tijekom skeniranja postoji mogućnost mijenjanja brzine laserske zrake. Ubrzanja odnosno usporenja skenirajućeg zrcala kada zraka dolazi do rubova sloja razlog su toj promjenjivosti. Takav način prolaza lasera ima utjecaj na ujednačenost unosa energije u materijal i samim time na svojstva izrađenog prototipa. Da bi se to izbjeglo radi se kompenzacija brzine laserske zrake (slika 7.6). [46]

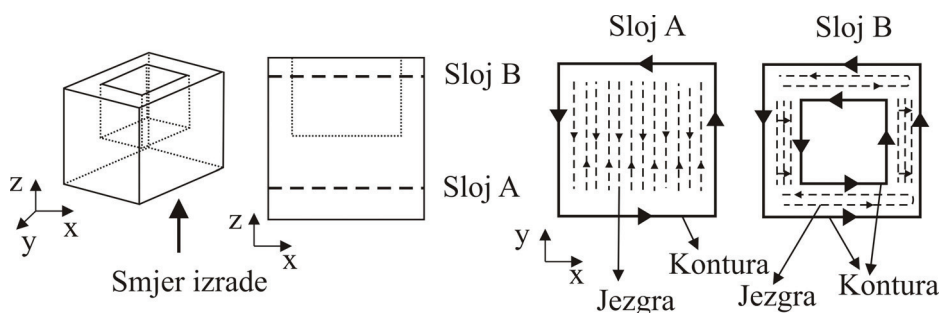


Slika 7.6. Kompenzacija brzine laserske zrake [46]

Da bi postiglo konstantnu brzinu skenirajuće zrcalo počinje se gibati prije samog ruba sloja. Dolaskom do ruba sloja uključuje se laserska zraka i prolazi po sloju konstantnom brzinom. Dolaskom do drugog ruba sloja laserska zraka se isključuje i tako isključena izlazi van ruba. Zraka se pomiče za određeni razmak između putanji i nastavlja dalje, na isti način, srašćivati dok ne iscrta cijeli sloj. [46]

7.2. Strategija izrade prototipa

Proizvođači SLS opreme nude razne strategije izrade. Strategije izrade razlikuju se ovisno o tipu stroja i proizvođaču. Strategija izrade je vrlo bitan čimbenik i njezinim pravilnim odabirom može se znatno utjecati na svojstva izrađenog prototipa. Dimenzijska točnost, kvaliteta površine, mehanička svojstva i vrijeme izrade prototipa, neki su od razloga za odabir različite strategije izrade. Slika 7.7 prikazuje strategiju izrade jednostavnog prototipa. [51]

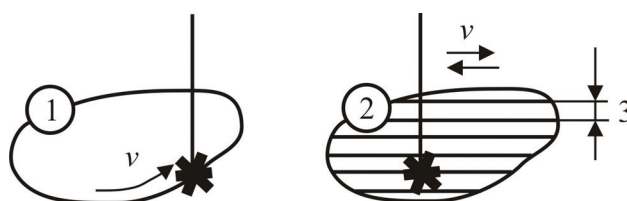


Slika 7.7. Strategija izrade jednostavnog prototipa [51]

U sloju A laserska zraka najprije izrađuje konturu, nakon izrade konture slijedi izrada jezgre sloja. Kod skeniranja jezgre laserska zraka se giba između prethodno izrađene konture, nekom od mogućih strategija izrade (u ovom primjeru gibanje se vrši najjednostavnijom putanjom laserske zrake). Kod sloja B također se najprije izrađuje kontura, a razlika između sloja A i sloja B je u tome što kod sloja B postoji kontura i sa unutarnje strane. Kompleksnost sloja B je na višoj razini pa pravilan odabir strategije izrade može imati značajan utjecaj. [51]

7.2.1. Kontura i jezgra prototipa

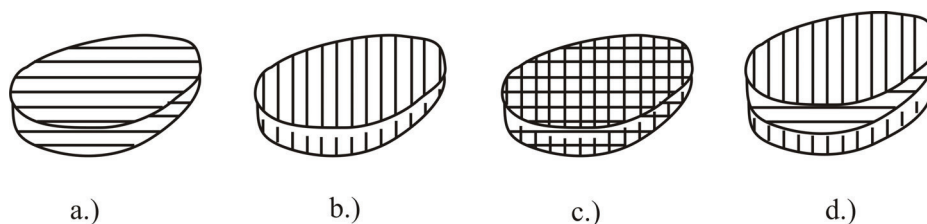
Izrada prototipa može se podijeliti na dva dijela: izradu konture i izradu jezgre (slika 7.8). Kod izrade konture i jezgre upotrebljavaju se isti parametri s različitim postavkama. Izrada prototipa može se odvijati i bez opcije izrade konture, što ima i svoje posljedice. Dimenzijska točnost i kvaliteta površine biti će znatno lošije. [48]



Slika 7.8. Izrada konture i jezgre prototipa; 1 – kontura prototipa, 2 – jezgra prototipa, 3 - razmak između putanja laserske zrake [48]

7.2.2. Smjer skeniranja laserske zrake

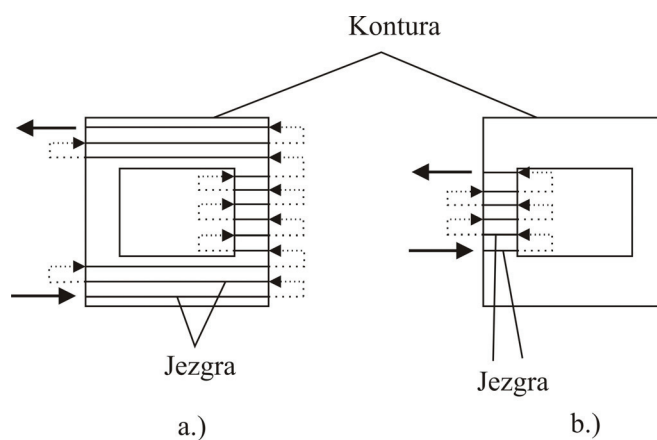
Kretanje laserske zrake kod srašćivanja slojeva, (jezgra prototipa), može se odvijati u dva smjera, kako je prikazano na slici 7.9.a i b. Ovisno o potrebi i željenim svojstvima može se odrediti da li će se srašćivanje sloja s obzirom na radnu podlogu odvijati u x ili y smjeru. Srašćivanje jednog sloja može se odvijati i u oba smjera (slika 7.9.c), ali i naizmjenično (e. *alternating*) (slika 7.9.d), tj. svaki drugi sloj srašćuje u istom smjeru. Odabirom smjera srašćivanja može se značajno utjecati na svojstva prototipa. [48]



Slika 7.9. Smjer skeniranja; a.) x os, b.) y os, c.) kombinacija xy, d.) naizmjenično [48]

7.2.3. Strategija izrade – Sorted

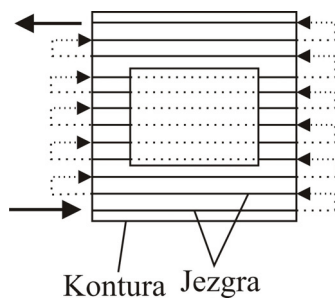
Strategija izrade *sorted* (slika 7.10), koja će se primjeniti u eksperimentalnom dijelu rada, odnosi se na izradu pojedinih slojeva prototipa. Slojevi prototipa rade se najkraćim putem, a putanja se razvrstava s obzirom na rubne konture što znatno utječe na vrijeme izrade. Kao što je prikazano na slici 7.10 izrada sloja se može odvijati u više faza, ovisno o dizajnu prototipa. Prilikom izrade druge faze (slika 7.10.b) na spojevima s prvom fazom mogu nastati praznine ili udubine što je ujedno i loša strana te strategije izrade. Ti nedostaci mogu značajno utjecati na svojstva prototipa. [48]



Slika 7.10. Strategija izrade sorted; a.) prva faza, b.) druga faza [48]

7.2.4. Strategija izrade – Unsorted

Strategija izrade *unsorted* (slika 7.11) za razliku od strategije *sorted* ne sraščuje slojeve prototipa najkraćim putem već se putanja laserske zrake razvrstava s obzirom na vanjsku konturu sloja, dakle najdužim putem. Kada se sloj izrađuje tom strategijom vrijeme izrade je nešto duže nego kod *sorted*, ali se uklanjaju nedostaci spomenuti kod prethodne strategije. Ta strategija se također odnosi na izradu pojedinog sloja. [48]

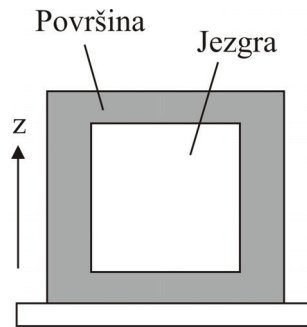


Slika 7.11. Strategija izrade unsorted [48]

7.2.5. Strategija izrade – Skincore

Strategija izrade *Skincore* (slika 7.12) daje iznimno dobra svojstva površine prototipa uz znatnu uštedu vremena izrade jezgre prototipa. Ta strategija izrade, za razliku od prethodne dvije,

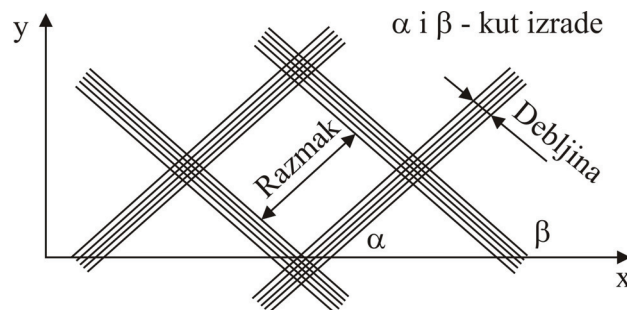
usmjerena je na cjelokupan prototip, a ne na pojedinačni sloj. Površina se izrađuje s jednim parametrima, dok jezgra s drugim. [48]



Slika 7.12. Strategija izrade skincore [48]

7.2.6. Strategija izrade – Mesh 2D

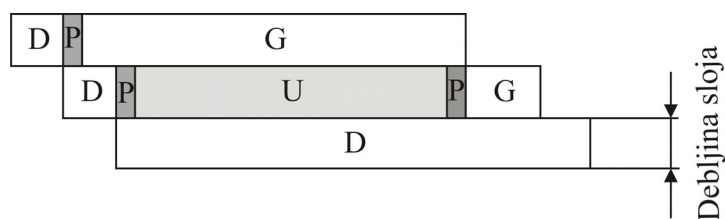
Strategija izrade *mesh 2D* (slika 7.13) služi za izradu mrežastih struktura. Strukture se mogu izrađivati pod različitim kutovima, različitim razmakom te različitom debljinom. [48]



Slika 7.13. Strategija izrade mesh 2D [48]

7.2.7. Strategija izrade – UpDownskin

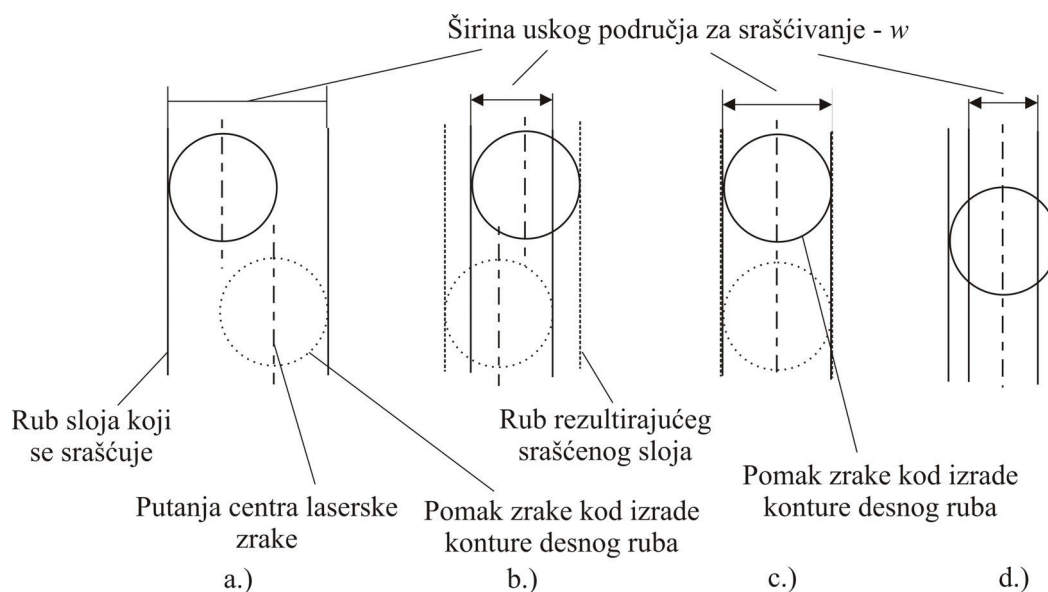
UpDownskin je strategija izrade (slika 7.14) koja prototip dijeli na gornji sloj G, donji sloj D te unutrašnje slojeve U. Postoji mogućnost pojave prijelaznih područja P gdje se također može definirati dali je riječ o gornjem ili donjem sloju. Donji sloj D je sloj na kojeg se dalje nanose slojevi, a gornji sloj G je sloj iznad kojega više nema područja za izradu. [48]



Slika 7.14. Strategija izrade updownskin [48]

7.2.8. Strategija izrade – Edges

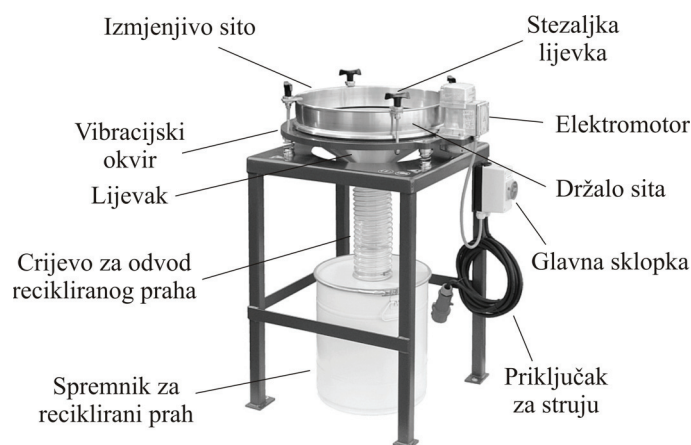
Strategija izrade *edges* upotrebljava se kod izrade vrlo uskih dijelova (slika 7.15), pogotovo kada je riječ o dijelovima koji su dimenzijski manji od $2 \cdot d_k$ (d_k – pomak zrake kod konture). Softver bez opcije *edges* generira rubove dijelova kao granice područja za srašćivanje. Rezultat toga je da pomak zrake kod konture poštiva obje granice, a laserska zraka usko područje skenira dva puta (posebno za svaku granicu). Takav prolaz laserske zrake rezultira širim područjem srašćivanja, nego što je trenutno skenirani sloj prototipa. Sam stroj tim načinom neće izraditi uske dijelove već će ih ostaviti nesrašćenima. Da bi se to izbjeglo mora se primjeniti opcija *edges*. Kada se u softveru uključi opcija *edges* laserska zraka po uskim dijelovima prolazi samo jednom što znatno smanjuje širinu srašćenog područja i poboljšava dimenzijsku točnost. [51]



Slika 7.15. Strategija izrade *edges*: a.) $w > 2d_k$ – kontura, b.) $w < 2d_k$ – kontura, c.) $w = 2d_k$ - kontura, d.) $w < 2d_k$ – rubovi [51]

7.3. Prosijavanje i regeneracija praha

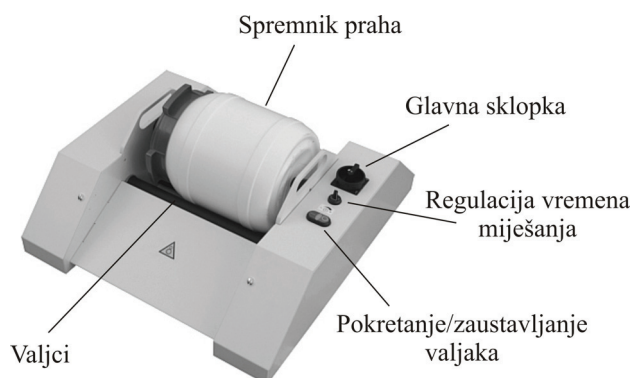
Prah izvađen iz radne komore stroja i odstranjen od izrađenih prototipova mora se obavezno prosijavati i tako reciklirati. Prah se prosijava radi odstranjivanja neželjenih nečistoća i mogućih grudica nakupina praha. Prosijavanje praha se vrši s pomoću sita (veličina otvora 245 μm) prikazanog na slici 7.16. Tek takav prosijani prah se može podvrgnuti daljnjoj upotrebi ili regeneraciji odnosno miješanju s potpuno novim prahom. [26]



Slika 7.16. Stroj za prosijavanje praha [26]

Regeneracija praha se provodi na način da se reciklirani prah miješa, na uređaju za miješanje (slika 7.17), s potpuno novim prahom. Postupak miješanja traje 15 min. Proizvođač praha EOS preporuča regeneraciju praha prema jednadžbi: [26]

$$\text{Novi prah [kg]} = \text{reciklirani prah [kg]} \times \text{faktor regenerata} \quad (7.1)$$



Slika 7.17. Uređaj za miješanje praha [26]

7. Karakteristike postupka selektivnog laserskog srašćivanja

Iz tablice 7.1 može se zaključiti da postoji nekoliko vrsta udjela regenerata u osnovnom materijalu, a prema proizvođaču optimalna je 50 % regenerata.

Tablica 7.1. Regeneracija praha [26]

Omjer udjela regenerata, %	Faktor regenerata
10	0,11
20	0,25
30	0,43
40	0,67
50	1,0
60	1,5
70	2,33
80	4,0

Prosijavanje i miješanje praha može uzrokovati elektrostatički naboj praha. Takav prah ne preporučuje se odmah upotrijebiti već je potrebno učiniti slijedeće: [26]

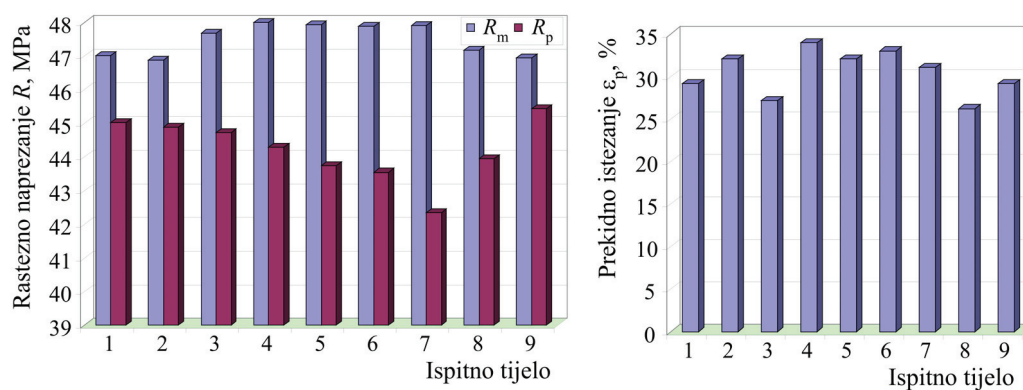
- uskladištiti prah u otvorenim spremnicima
- skladištiti minimalno 24 h pri temperaturi okoline 24 °C i vlazi zraka od 50 % do 60 %,
- zaštititi prah od onečišćenja
- zatvoriti spremnike praha nakon 24 h, ako se prah neće odmah upotrijebiti.

8. EKSPERIMENTALNI DIO

U poglavlju 7. objašnjeno je da se parametri mogu podešavati posebno za konturu i posebno za jezgru prototipa. U prvoj fazi mijenjani su parametri (tablica 8.1) za konturu prototipa i ustanovljen je utjecaj tih parametara na rasteznu čvrstoću, prekidnu čvrstoću i prekidno istežanje. Iz ispitivanja se (slika 8.1) zaključuje da se mehanička svojstva neznatno mijenjaju, pri čemu je zaključeno da zbog veće površine (odnosno volumena) veći utjecaj na svojstva prototipa imaju parametri jezgre, a ne konture. Ispitna tijela izrađena su s debljinom sloja 0,1 mm.

Tablica 8.1. Odnos parametara za podešavanje konture prototipa i mehaničkih svojstava

Br.	Snaga lasera P , W	Brzina laserske zrake v , mm/s	Rastezna čvrstoća R_m , MPa	Prekidna čvrstoća R_p , MPa	Prekidno istežanje ε , %
1	16	1000	47,01	45,01	29,13
2	16	1500	46,87	44,89	32,04
3	14	1500	47,67	44,73	27,18
4	15	1500	47,99	44,28	33,98
5	17	1500	47,93	43,74	32,04
6	18	1500	47,88	43,55	33,01
7	19	1500	47,90	42,35	31,07
8	20	1500	47,18	43,95	26,21
9	16	2000	46,93	45,44	29,13



Slika 8.1. Rastezna svojstva ovisno o podešavanju parametara za konturu prototipa

8.1. Predpokusi

Prema dostupnoj literaturi, opisanoj u poglavlju 5.1. glavni parametar jezgre koji utječe na svojstva prototipa je gustoća energije ED , koja se računa prema jednadžbama 5.1.

Zbog oprečnog mišljenja u proučavanoj literaturi napravljeni su predpokusi kojima se želi ustanoviti ovisnost pojedinih parametara.

Za pokus je odabran centralno kompozitni plan koji omogućuje modeliranje polinoma II. stupnja i oblik odzivne površine. U pokusu je ustanovljen utjecaj tri parametra (snaga lasera, brzina laserske zrake i razmak između putanje laserske zrake) na mehanička svojstva (rastezna i savojna čvrstoća) i vrijeme izrade prototipa dobivena SLS postupkom. Upotrebljen je softverski program *DesignExpert* modulom ANOVA (analiza varijance).

Pokusi su načinjeni sa materijalom PA 12, tj. PA 2200, pri ostalim parametrima prerade:

- temperatura komore 172 °C
- debljina sloja je 0,1 mm
- pomak zrake 0,15 mm
- skupljanje materijala po x osi 3,4 %, po y osi 3,4 %, po z osi na 0 mm 2,2 % do z osi na 300 mm 1,6 %
- naizmjenični smjer skeniranja
- uključena kompenzacija brzine laserske zrake

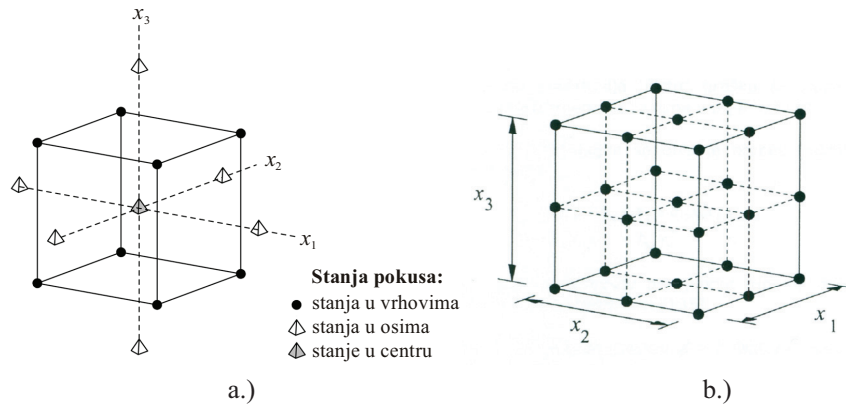
8.1.1. Centralno kompozitni plan pokusa

Centralno kompozitni pokus ubraja se u skupinu pokusa višeg reda, tzv. metoda odzivne površine. Metoda odzivne površine obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Mjerljiva veličina kvalitete tvorevine ili procesa naziva se odziv. Poznavanje odzivne površine s dovoljnom preciznošću, točnošću i pouzdanošću dopušta predviđanje budućih rezultata u okviru područja analiziranih faktora, te daje uvid u čitav proces. [73]

Centralno kompozitni pokus je model pokusa I. reda (2^k) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima kako bi se omogućila procjena parametara modela II. reda. Centralno kompozitni model pokusa sastoji se od 2^k stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osima i stanja u centru pokusa (k - broj promatranih faktora) - $2^k + 2k + k$. [73]

Za npr. $k = 3$ (faktori su x_1, x_2 i x_3), (slika 8.2.a) prikazan je model centralno kompozitnog pokusa za koji je potrebno 17 stanja pokusa ($2^3 + 2 \cdot 3 + 3$). U slučaju potpunog faktorskog pokusa

(slika 8.2.b), bilo bi potrebno 27 stanja pokusa.



Slika 8.2. Modeli pokusa: a.) centralno kompozitni plan pokusa za tri faktora, b.) potpuni faktorski pokus 3^k [73]

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotabilnošću pokusa. Pokus je ortogonalan ukoliko je zbroj produkata kodiranih stanja bilo koje dvije kolone u matrici pokusa jednak nuli. Rotabilnost centralno kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotabilnost ovisi o tzv. osnovj udaljenosti α (udaljenosti stanja pokusa u osima od centra pokusa). [73]

Pokus je rotabilan ukoliko je:

$$\alpha = \sqrt[k]{F} \quad (8.2)$$

gdje je: F - broj faktorskih stanja ($F = 2^k$).

U slučaju dva faktora $\alpha = 2^{2/4} = 2^{1/2} = 1,414$, a u slučaju tri faktora, $\alpha = 2^{3/4} = 1,682$.

Dodatna stanja u centru pokusa služe kako bi se moglo usporediti vrijednosti mjerenja zavisne varijable u centru pokusa s aritmetičkom sredinom za ostatak pokusa. Ukoliko je aritmetička sredina centra pokusa signifikantno različita od ukupne aritmetičke sredine svih ostalih stanja pokusa, tada se može zaključiti da veza između faktora pokusa i zavisne varijable nije linearna. Ukoliko se pokus barem djelomično ponavlja, moguće je procijeniti pogrešku pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Kako se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, procjena pogreške pokusa iz tih podataka nezavisna je o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan, te sadrži li interakcije višeg reda. Tako procijenjena

pogreška pokusa predstavlja čistu pogrešku (e. *pure error*), odnosno ona je posljedica samo nepouzdanosti mjerenja zavisne varijable. [73]

Jednadžba (polinom II. stupnja) kojim se opisuje proces (odzivna funkcija) za općeniti slučaj glasi (slučaj k faktora pokusa):

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (8.3)$$

Pri tome se koeficijenti b_0, \dots, b_k određuju s pomoću metode minimalne sume kvadrata odstupanja računskih od stvarnih vrijednosti.

Prije ispitivanja napravljen je predpokus kojim su određene donja i gornja granica faktora:

A – snaga lasera, $P = 5$ do 25 W

B – brzina laserske zrake, $v = 1000$ do 3333 mm/s

C – razmak između putanje laserske zrake, $h = 0,15$ do $1,6$ mm.

Potrebno je provesti 19 stanja pokusa (stanje u središtu ponavljalo se pet puta). Razine faktora (tablica 8.2) određene su prema matrici stanja pokusa za centralno kompozitni plan pokusa sa dva faktora. U tablici 8.3 prikazani su rezultati vremena izrade i srednje vrijednosti mehaničkih svojstava (rezultati svih mjerenja nalaze se u prilogu 12.1 - 12.18). Kao aproksimacijska krivulja odabrana je linearna krivulja za sva svojstva.

Tablica 8.2. Faktori i njihove razine

Razine	Snaga lasera P , W	Brzina laserske zrake v , mm/s	Razmak između putanje laserske zrake h , mm
-1,682	5	1023	0,16
-1	9	1500	0,45
0	15	2200	0,88
1	21	2900	1,30
1,682	25	3377	1,59

Tablica 8.3. Rezultati mjerenja

Stanje pokusa	Faktor A: Snaga lasera P [W]	Faktor B: Brzina laserske zrake v [mm/s]	Faktor C: Razmak između putanje laserske zrake h [mm]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]	Vrijeme izrade t [min]
1	15	2200	0,88	3,76	8,00	56,32
2	9	1500	1,30	2,12	3,56	56,01
3	15	2200	0,16	36,1	45,09	83,25
4	5	2200	0,88	2,05	3,39	56,37
5	21	1500	1,30	3,50	7,59	56,01
6	15	2200	0,88	4,08	8,45	56,37
7	21	2900	1,30	2,43	6,55	53,15
8	15	2200	0,88	3,80	8,23	53,15
9	15	2200	0,88	3,85	8,12	53,15
10	21	2900	0,45	19,01	33,00	58,72
11	9	2900	1,30			
12	25	2200	0,88	5,12	9,57	56,37
13	9	1500	0,45	18,56	32,67	67,08
14	15	2200	0,88	4,00	8,01	56,37
15	21	1500	0,45	43,1	62,32	67,08
16	15	3377	0,88	3,08	7,31	54,23
17	9	2900	0,45	5,15	9,88	58,72
18	15	2200	1,59	1,95	3,20	53,25
19	15	1023	0,88	8,52	15,60	63,37

Valja napomenuti da vrijeme izrade ovisi o količini prototipa koji se izrađuju u jednom ciklusu. U ispitivanju je upotrebljeno 9 ispitnih tijela za rastezna svojstva orijentacije L_{xy} , gdje je visina zajedno sa početnim i završnim slojevima 14 mm. Kasnije je provedeno ispitivanje utjecaja parametara za veći broj prototipa izrađenih u jednom ciklusu.

Također pokus pod rednim brojem 11 je odmah isključen iz analize jer ispitno tijelo nije moguće napraviti s tim parametrima, tj. tako niskom gustoćom energije.

Pokusi pod rednim brojem 3 i 15 isključeni su iz daljnje analize jer je analiza pokazala da odziv u tim točkama ne odgovara modelu, odnosno prevelika su odstupanja vrijednosti čvrstoća od ostalih podataka.

8.1.2. Predpokus – rastezna čvrstoća

U tablici 8.4 prikazani su rezultati obrade za rasteznu čvrstoću R_m . U tom slučaju faktor C - razmak između putanje laserske zrake je signifikantni faktor (tj. on utječe na promjenu rastezne čvrstoće). Da bi neki faktor utjecao na promjenu trebala bi vrijednost u tablici 8.4 u zadnjem stupcu biti manja od 0,05.

U tablici 8.5 prikazani su osnovni statistički podaci o modelu. Koeficijent determiniranosti r^2 (e. *R-squared*) je mjera odstupanja od aritmetičke sredine koja je objašnjena modelom. Što je r^2 bliži 1, to model bolje slijedi podatke. Računa se prema jednadžbi: [73]

$$r^2 = 1 - \frac{\text{SKOostatka}}{\text{SKOmodela} + \text{SKOostatka}} \quad (8.4)$$

gdje je: r^2 - koeficijent determiniranosti, SKO – suma kvadrata odstupanja.

Tablica 8.4. Rezultati analize varijance – rastezna čvrstoća

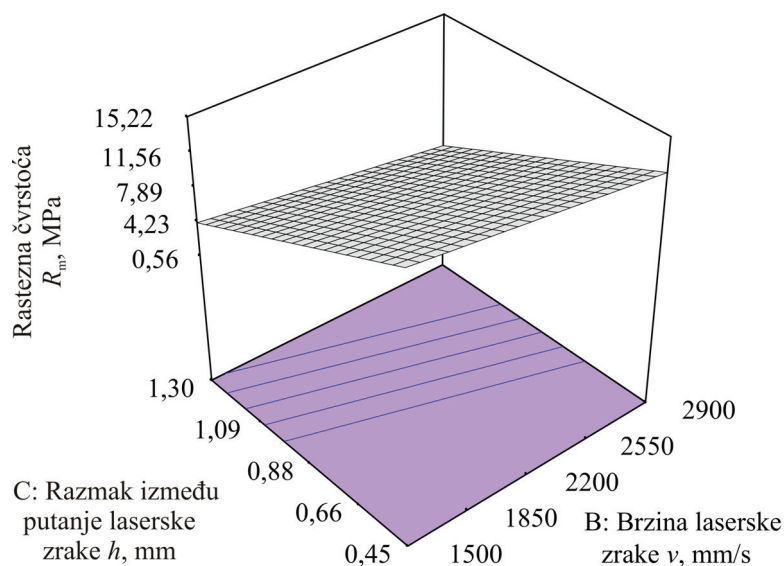
	Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>)	Stupnjevi slobode DF	Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean Square</i>)	Varijabla <i>F</i> (e. <i>F Value</i>)	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>)
Model	245,43	3	81,81	5,32	0,0146
A	28,11	1	28,11	1,83	0,2014
B	34,71	1	34,71	2,26	0,1589
C	238,93	1	238,93	15,53	0,0020
Ostatak (e. <i>Residual</i>)	184,60	12	15,38		
Odstupanje od modela (e. <i>Lack of fit</i>)	184,53	8	23,07	1238,77	< 0,0001 značajno
Pogreška (e. <i>Pure error</i>)	0,074	4	0,019		
Ukupno (e. <i>Cor Total</i>)	430,03	15			

Iz tablice se može zaključiti da odstupanje od modela je jako veliko, odnosno postoji samo 0,01 % da odgovarajuća analiza prati model.

Tablica 8.5. Pregled statističkih podataka o modelu za rasteznu čvrstoću

	Rastezna čvrstoća
Standardno odstupanje (e. <i>Standard deviation</i>)	3,92
Aritmetička sredina (e. <i>Mean</i>)	5,69
Koeficijent determiniranosti r^2 (e. <i>R-squared</i>)	0,5707

Slika 8.3 prikazuje ovisnost rastezne čvrstoće o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake. Snaga koja je iz ispitivanja pokazala da najmanje utječe na rasteznu čvrstoću uzeta je kao konstanta i iznosi $P = 21$ W. Grafički prikaz ovisnosti rastezne čvrstoće o snazi lasera i razmaku između putanje laserske zrake sličan je dijagramu na slici 8.3 pa nije posebno prikazan.



Slika 8.3. Ovisnost rastezne čvrstoće o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake pri konstantnoj snazi

Iz slike 8.3 se zaključuje da se sniženjem brzine laserske zrake i razmaka između putanje laserske zrake povisuje rastezna čvrstoća, iako koeficijent determiniranosti pokazuje da model u potpunosti ne slijedi podatke, odnosno na rasteznu čvrstoću utječu i neki drugi utjecajni faktori koji nisu obuhvaćeni ovim predpokusom.

Prema koeficijentima regresije navedenima u tablici 8.6, model za rasteznu čvrstoću može se opisati jednadžbom 8.5 u kodiranom obliku, a jednadžbom 8.6 u stvarnim faktorima:

$$y = 6,27 + 1,62 \cdot A - 1,81 \cdot B - 5,53 \cdot C \quad (8.5)$$

$$y = 19,257 + 0,271 \cdot snaga - 2,579 \cdot 10^{-3} \cdot brzina - 13,003 \cdot razmak \quad (8.6)$$

pa će npr. za $A = 21$ W (kodirana vrijednost = 1), $B = 2667$ mm/s (kodirana vrijednost = 0,67) i $C = 0,45$ mm (kodirana vrijednost = -1), očekivana vrijednost rastezne čvrstoće bit će 12,21 MPa.

Tablica 8.6. Koeficijenti regresije za rasteznu čvrstoću

Faktori	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultatu 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	6,27	0,99	4,11	8,43
A – snaga lasera	1,62	1,2	- 0,99	4,24
B – brzina laserske zrake	- 1,81	1,2	- 4,42	0,81
C – razmak između putanje laserske zrake	- 5,53	1,4	- 8,58	- 2,47

U tablici 8.7 navedene su kodirane vrijednosti faktora pokusa za ispitivano područje

Tablica 8.7. Kodirane vrijednosti za faktore pokusa A, B i C

Snaga lasera – A		Brzina laserske zrake – B		Razmak između putanje laserske zrake – C	
Stvarna vrijednost, W	Kodirana vrijednost	Stvarna vrijednost, mm/s	Kodirana vrijednost	Stvarna vrijednost, mm	Kodirana vrijednost
9	-1	1500	-1	0,45	-1
11	-0,67	1733	-0,67	0,59	-0,67
13	-0,33	1967	-0,33	0,73	-0,33
15	0	2200	0	0,88	0
17	0,33	2433	0,33	1,02	0,33
19	0,67	2667	0,67	1,16	0,67
21	1	2900	1	1,30	1

8.1.3. Predpokus – savojna čvrstoća

U tablici 8.8 prikazani su rezultati obrade za savojnu čvrstoću. Iz tablice se može zaključiti da je i u ovom slučaju jedini utjecajni faktor razmak između putanje laserske zrake, dok snaga lasera i brzina laserske zrake imaju isti utjecaj. Ali također kao i u slučaju rastezne čvrstoće odstupanje od modela je preveliko i potreban je neki drugi model ili neki drugi parametri koji mogu smanjiti odstupanje. U tablici 8.9 prikazani su statistički podaci.

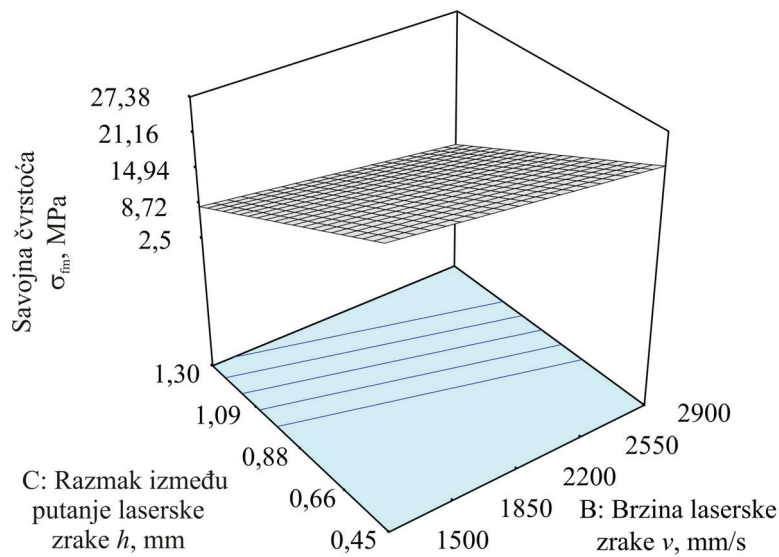
Tablica 8.8. Rezultati analize varijance – savojna čvrstoća

	Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>)	Stupnjevi slobode DF	Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean Square</i>)	Varijabla F (e. F Value)	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. $Prob > F$)
Model	734,93	3	244,98	5,85	0,0106
A	103,38	1	103,38	2,47	0,1420
B	88,90	1	88,90	2,12	0,1706
C	714,38	1	714,38	17,07	0,0014
Ostatak (e. <i>Residual</i>)	502,16	12	41,85		
Odstupanje od modela (e. <i>Lack of fit</i>)	502,02	8	62,75	1810,00	< 0,0001 značajno
Pogreška (e. <i>Pure error</i>)	0,14	4	0,035		
Ukupno (e. <i>Cor Total</i>)	1237,10	15			

Tablica 8.9. Pregled statističkih podataka o modelu za savojnu čvrstoću

	Savojna čvrstoća
Standardno odstupanje	6,47
Aritmetička sredina	10,82
Koeficijent determiniranosti r^2	0,5941

Slika 8.4 prikazuje ovisnost savojne čvrstoće o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake. I u ovom slučaju uzeta je konstantna snaga $P = 21$ W. Grafički prikaz ovisnosti savojne čvrstoće o snazi lasera i razmaku između putanje laserske zrake sličan je dijagramu na slici 8.4 pa nije posebno prikazan.



Slika 8.4. Ovisnost savojne čvrstoće o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake pri konstantnoj snazi

Iz slike 8.4 se zaključuje da se sniženjem brzine laserske zrake i razmaka između putanje laserske zrake povisuje savojna čvrstoća, iako i u ovom slučaju koeficijent determiniranosti pokazuje da model u potpunosti ne slijedi podatke, odnosno na savojnu čvrstoću utječu i neki drugi utjecajni faktori koji nisu obuhvaćeni ovim predpokusom.

Prema koeficijentima regresije navedenima u tablici 8.10, model za savojnu čvrstoću može se opisati jednadžbom 8.7 u kodiranom obliku, a jednadžbom 8.8 u stvarnim faktorima:

$$y = 11,83 + 3,12 \cdot A - 2,89 \cdot B - 9,56 \cdot C \quad (8.7)$$

$$y = 32,79 + 0,52 \cdot snaga - 4,13 \cdot 10^{-3} \cdot brzina - 22,48 \cdot razmak \quad (8.8)$$

pa će npr. za $A = 21$ W (kodirana vrijednost = 1), $B = 1500$ mm/s (kodirana vrijednost = -1) i $C = 0,45$ mm (kodirana vrijednost = -1), očekivana vrijednost savojne čvrstoće bit će 27,4 MPa.

Kodirane vrijednosti faktora pokusa za savojnu čvrstoću iste su kao i za rasteznu, prema tablici 8.7.

Tablica 8.10. Koeficijenti regresije za savojnu čvrstoću

Faktori	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultatu 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	11,83	1,64	8,26	15,39
A – snaga lasera	3,12	1,98	-1,20	7,43
B – brzina laserske zrake	-2,89	1,98	-7,21	1,43
C – razmak između putanje laserske zrake	-9,56	2,31	-14,60	-4,52

Da se smanji odstupanje od modela i za rasteznu i savojnu čvrstoću provedene su mnoge analize, no niti jedna se nije pokazala kao odgovarajuća, iz čega se može zaključiti da parametri ovise jedan o drugome, tj. da je za mehanička svojstva prototipa postoje faktori koji nisu obuhvaćeni ovim modelom.

8.1.4. Predpokus – vrijeme izrade

U tablici 8.11 prikazani su rezultati obrade za vrijeme izrade 9 ispitnih tijela za rastezna svojstva. Iz tablice se može primjetiti da utjecajni faktor su brzina laserske zrake i razmak između putanje laserske zrake.

Tablica 8.11. Rezultati analize varijance – vrijeme izrade

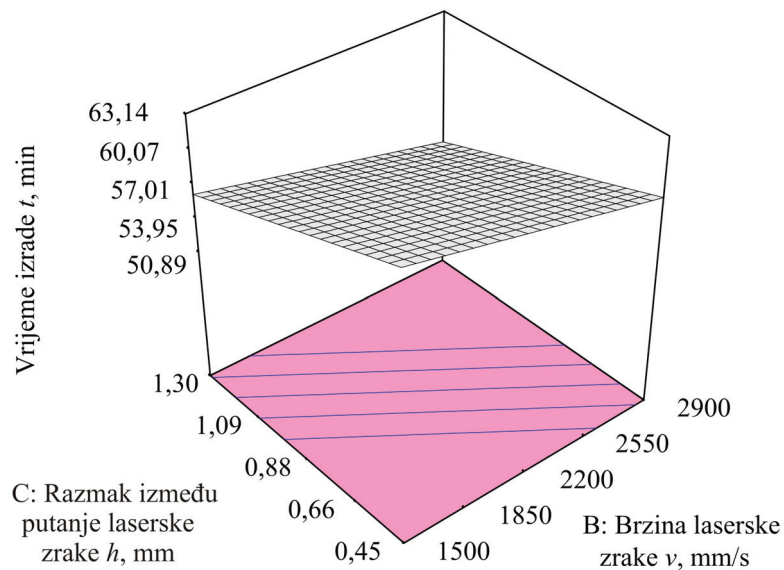
	Suma kvadrata odstupanja (e. <i>Sum of Squares</i>)	Stupnjevi slobode DF	Srednji kvadrat odstupanja (e. <i>Mean Square</i>)	Varijabla F (e. <i>F Value</i>)	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 (e. <i>Prob > F</i>)
Model	153,23	3	51,08	9,51	0,0017
A	0,22	1	0,22	0,042	0,8418
B	73,38	1	73,38	13,67	0,0031
C	95,72	1	95,72	17,83	0,0012
Ostatak (e. <i>Residual</i>)	64,44	12	5,37		
Odstupanje od modela (e. <i>Lack of fit</i>)	52,12	8	6,52	2,12	0,2446 neznačajno
Pogreška (e. <i>Pure error</i>)	12,32	4	3,08		
Ukupno (e. <i>Cor Total</i>)	217,66	15			

U tablici 8.12 prikazani su statistički podaci o modelu.

Tablica 8.12. Pregled statističkih podataka o modelu za vrijeme izrade

	Vrijeme izrade
Standardno odstupanje	2,32
Aritmetička sredina	56,79
Koeficijent determiniranosti r^2	0,7040

Slika 8.5 prikazuje ovisnost vremena izrade o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake. I u ovom slučaju uzeta je konstantna snaga $P = 21$ W, jer je jedini faktor koji ne utječe na vrijeme izrade. Grafički prikaz ovisnosti vremena izrade o snagi lasera i razmaku između putanje laserske zrake sličan je dijagramu na slici 8.5 pa nije posebno prikazan.



Slika 8.5. Ovisnost vremena izrade o brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake pri konstantnoj snazi

Iz slike 8.5 se zaključuje da povišenje brzine laserske zrake i razmaka između putanje laserske zrake skraćuje vrijeme izrade, što je bilo i za očekivati jer je premalo preklapanje laserske zrake, zbog čega ostaje nesrašćenog praha.

Prema koeficijentima regresije navedenima u tablici 8.13, model za vrijeme izrade može se opisati jednadžbom 8.9 u kodiranom obliku, a jednadžbom 8.10 u stvarnim faktorima:

$$y = 57,16 - 0,14 \cdot A - 2,62 \cdot B - 3,50 \cdot C \quad (8.9)$$

$$y = 72,97 - 0,024 \cdot snaga - 3,75 \cdot 10^{-3} \cdot brzina - 8,23 \cdot razmak \quad (8.10)$$

pa će npr. za $A = 21$ W (kodirana vrijednost = 1), $B = 2900$ mm/s (kodirana vrijednost = 1) i $C = 1,30$ mm (kodirana vrijednost = 1), očekivana vrijednost vremena izrade bit će 50,9 min.

Kodirane vrijednosti faktora pokusa za vrijeme izrade iste su kao i za rasteznu čvrstoću, prema tablici 8.7.

Tablica 8.13. Koeficijenti regresije za vrijeme izrade

Faktori	Koeficijent regresije	Standardna greška	Interval povjerenja u rezultatu 95 %	
			Donja granica	Gornja granica
Konstanta	57,16	0,59	55,88	58,43
A – snaga lasera	-0,14	0,71	-1,69	1,40
B – brzina laserske zrake	-2,62	0,71	-4,17	-1,08
C – razmak između putanje laserske zrake	-3,50	0,83	-5,30	-1,69

8.2. Utjecaj parametara stroja na svojstva prototipa

Iz provedenog predpokusa ustanovljeno je da su parametri zavisni jedan o drugome i da postoje još neki faktori koji utječu na mehanička svojstva prototipa, pa se može zaključiti da je potrebno postaviti novu jednadžbu za računanje gustoće energije. Jednadžbu gustoće energije ED treba proširiti za faktor preklapanja x koji u sebi uključuje promjer laserske zrake i razmak između putanje laserske zrake:

$$ED = \frac{P}{v \cdot h} \cdot x \quad (8.11)$$

gdje je: ED [J/mm^2] – gustoća energije, P [W] – snaga lasera, v [mm/s] – brzina laserske zrake, h [mm] – razmak između putanje laserske zrake, x – faktor preklapanja laserske zrake koji se računa prema:

$$x = \frac{d}{h} \quad (8.12)$$

gdje je: d [mm] – promjer laserske zrake. Na stroju *Formiga P100* na kojem su rađena ispitivanja d je konstantan i iznosi 0,42 mm.

8.2.1. Ista gustoća energije i faktor preklapanja

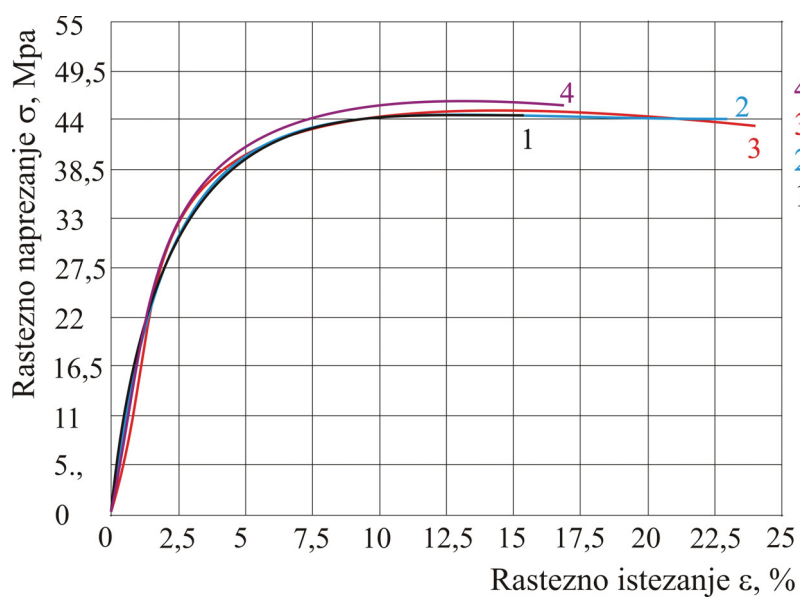
Kad je gustoća energije ista (tablica 8.14), prema novoj jednadžbi za računanje gustoće energije ED , a mijenjaju se parametri snaga lasera i brzina laserske zrake mehanička svojstva ostaju ista (tablica 8.15 i 8.16, slika 8.6 i 8.7). Ispitna tijela izrađena su s debljinom sloja 0,1 mm.

Tablica 8.14. Parametri izrade kod iste gustoće energije

Br.	Snaga lasera P , W	Brzina laserske zrake v , mm/s	Razmak između putanje laserske zrake h , mm	Faktor preklapanja laserske zrake x	Gustoća energije ED , J/mm ²
1	15	2000	0,25	1,68	0,05
2	25	3333	0,25	1,68	0,05
3	7,5	1000	0,25	1,68	0,05
4	22,5	3000	0,25	1,68	0,05

Tablica 8.15. Rastezna svojstva s istim unosom energije

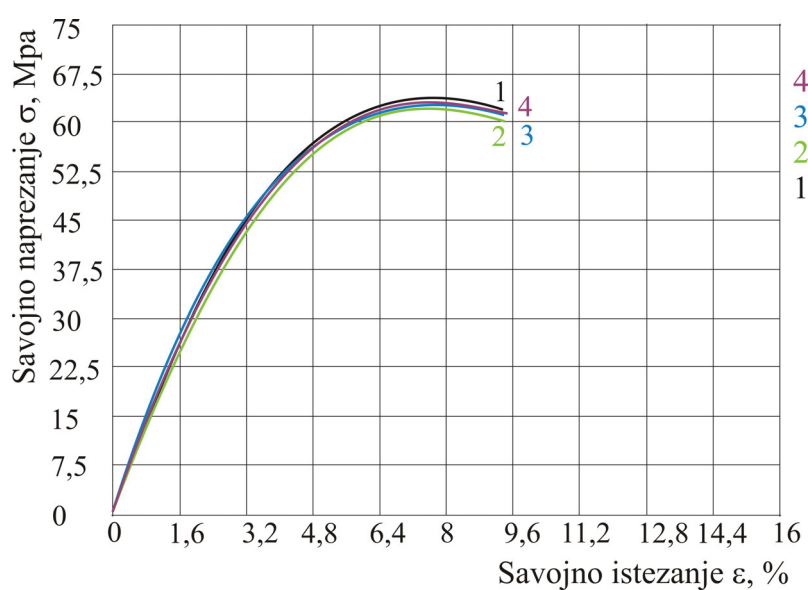
Br.	h , mm	b_1 , mm	A_0 , mm ²	F_m , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ϵ_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1	3,94	10,26	40,42	1828,8	45,24	35,56	15,79	42,54	1,634
2	3,96	10,20	40,39	1840,3	45,56	36,49	23,26	43,02	1,734
3	3,90	10,18	39,70	1813,2	45,67	36,37	24,26	42,98	1,623
4	3,91	10,24	40,04	1859,4	46,44	37,68	16,89	42,50	1,642



Slika 8.6. Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja s istim unosom energije

Tablica 8.16. Savojna svojstva s istim unosom energije

Br.	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fM} , MPa	ε_{fM} , %	S_{\max} , mm	E_f , GPa
1	3,94	10,21	40,23	106,8	64,72	7,02	12,17	1,449
2	3,95	10,19	40,25	105,8	63,85	7,45	12,87	1,515
3	4,02	10,19	40,96	110,3	64,27	7,32	12,43	1,388
4	4,03	10,15	40,90	111,3	64,85	7,59	12,85	1,539



Slika 8.7. Dijagram savojnog naprezanja – istezanja s istim unosom energije

8.2.2. Različita gustoća energije

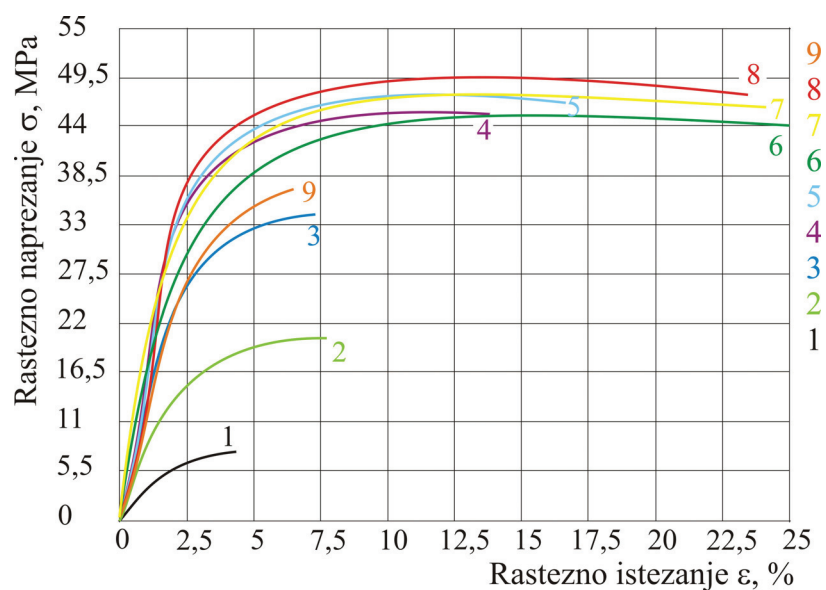
U tablici 8.17 prikazani su parametri izrade s različitim unosom energije. U tablici 8.18 i na slici 8.8 prikazana su rastezna, a u tablici 8.19 i na slici 8.9 savojna svojstva materijala. Ispitna tijela izrađena su s debljinom sloja 0,1 mm.

Tablica 8.17. Parametri izrade kod različitog unosa energije i istog faktora preklapanja

Br.	Snaga lasera P , W	Brzina laserske zrake v , mm/s	Razmak između putanje laserske zrake h , mm	Faktor preklapanja laserske zrake x	Gustoća energije ED , J/mm ²
1	7	3000	0,25	1,68	0,016
2	10,5	3000	0,25	1,68	0,024
3	14	3000	0,25	1,68	0,031
4	18	3000	0,25	1,68	0,040
5	21	3000	0,25	1,68	0,047
6	22	3000	0,25	1,68	0,049
7	22,5	3000	0,25	1,68	0,050
8	25	3000	0,25	1,68	0,056
9	22	1000	0,25	1,68	0,148

Tablica 8.18. Rastezna svojstva s različitim unosom energije

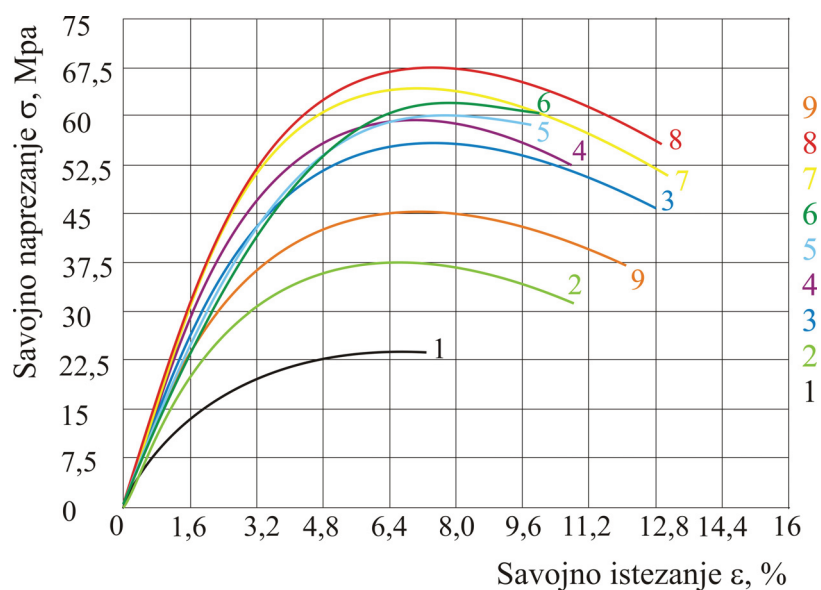
	h , mm	b_1 , mm	A_0 , mm ²	F_m , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1	3,95	10,48	41,40	316,0	7,63	6,57	4,30	7,61	0,392
2	3,93	10,14	39,85	816,5	20,49	15,58	8,56	20,43	0,945
3	3,92	10,08	39,51	1354,1	34,27	28,92	7,32	34,21	1,333
4	3,93	10,09	39,65	1807,4	45,58	37,25	13,78	45,43	2,023
5	3,99	10,15	40,50	1920,8	47,43	39,46	16,72	46,40	1,835
6	4,00	10,22	40,88	1841,2	45,04	32,38	25,62	42,62	1,707
7	3,90	10,20	39,78	1851,4	46,54	37,03	24,11	37,01	1,752
8	4,00	10,18	40,72	1995,3	49,00	40,96	23,83	46,29	1,862
9	5,57	11,59	64,56	2330,5	36,10	29,53	6,55	36,05	1,285



Slika 8.8. Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja kod različitog unosa energije

Tablica 8.19. Savojna svojstva s različitim unosom energije

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fM} , MPa	ε_{fM} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
1	3,92	10,4	40,77	39,40	23,67	5,71	9,95	7,82	23,6	0,835
2	3,95	10,03	39,62	61,85	37,94	6,06	10,47	10,81	30,33	1,106
3	3,95	10,04	39,66	93,35	57,21	7,49	12,95	12,85	45,47	1,589
4	3,94	9,98	39,32	96,70	59,92	6,01	10,42	11,09	45,8	1,724
5	4,01	10,26	41,14	102,30	61,00	6,72	11,56	9,37	59,66	1,638
6	4,06	10,22	41,49	109,10	62,17	6,89	11,59	9,66	60,26	1,462
7	4,00	10,08	40,32	109,10	64,94	6,26	10,68	13,12	50,21	1,729
8	4,04	10,16	41,05	116,90	67,70	7,90	13,34	12,97	54,68	1,818
9	4,43	11,00	39,82	74,25	45,09	6,63	11,41	12,37	37,1	1,182



Slika 8.9. Dijagram savojnog naprezanja – istežanja kod različitog unosa energije

Iz dijagrama se može zaključiti što je veći unos energije rastu i mehanička svojstva. No također se može zaključiti da zbog posljedice prevelikog unosa energije $ED = 0,148 \text{ J/mm}^2$ (ispitno tijelo broj 9) svojstva se snižavaju. No u prvom dijelu pokusa mijenjani su samo snaga lasera i brzina laserske zrake, ali prema jednadžbama 8.11 i 8.12 faktor koji značajno utječe na mehanička svojstva je i faktor preklapanja laserske zrake x , što je zaključeno iz predpokusa.

8.2.3. Različita gustoća energije i faktor preklapanja

Da bi se ustanovio utjecaj faktora preklapanja, u sljedećem eksperimentu snaga lasera i brzina laserske zrake ostaju konstantni, a mijenja se razmak između putanje laserske zrake (tablica 8.20).

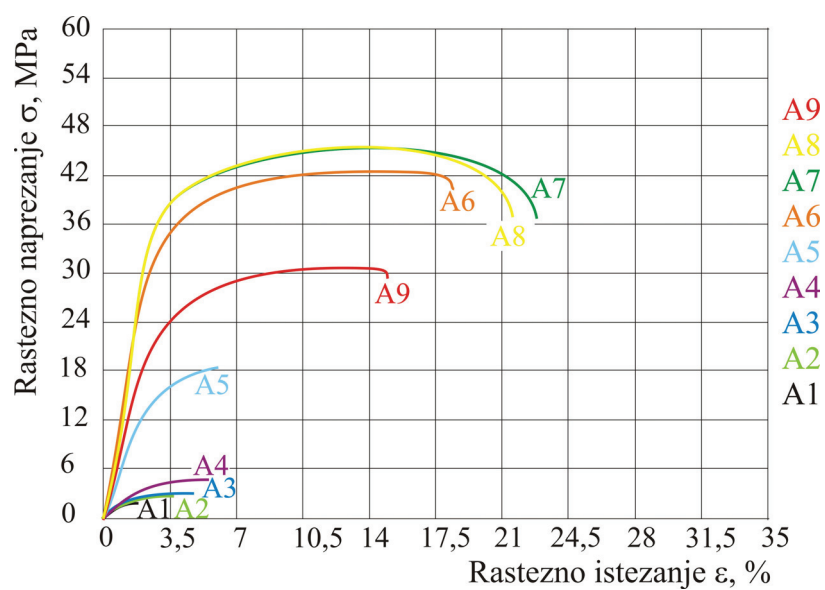
Tablica 8.20. Utjecaj faktora preklapanja laserske zrake

Br.	Snaga lasera P , W	Brzina laserske zrake v , mm/s	Razmak između putanje laserske zrake h , mm	Faktor preklapanja laserske zrake x	Gustoća energije ED , J/mm ²
A1	21	2500	1,50	0,28	0,0016
A2	21	2500	1,25	0,34	0,0023
A3	21	2500	1,00	0,42	0,0035
A4	21	2500	0,75	0,56	0,0063
A5	21	2500	0,50	0,84	0,0141
A6	21	2500	0,33	1,27	0,0324
A7	21	2500	0,27	1,56	0,0484
A8	21	2500	0,23	1,83	0,0667
A9	21	2500	0,15	2,80	0,1568

U tablici 8.21 i na slici 8.10 prikazana su rastezna svojstva, a u tablici 8.22 i na slici 8.11 savojna svojstva ispitnih tijela prilikom mijenjanja faktora preklapanja laserske zrake.

Tablica 8.21. Rastezna svojstva ispitnih tijela s promjenjenim faktorom preklapanja

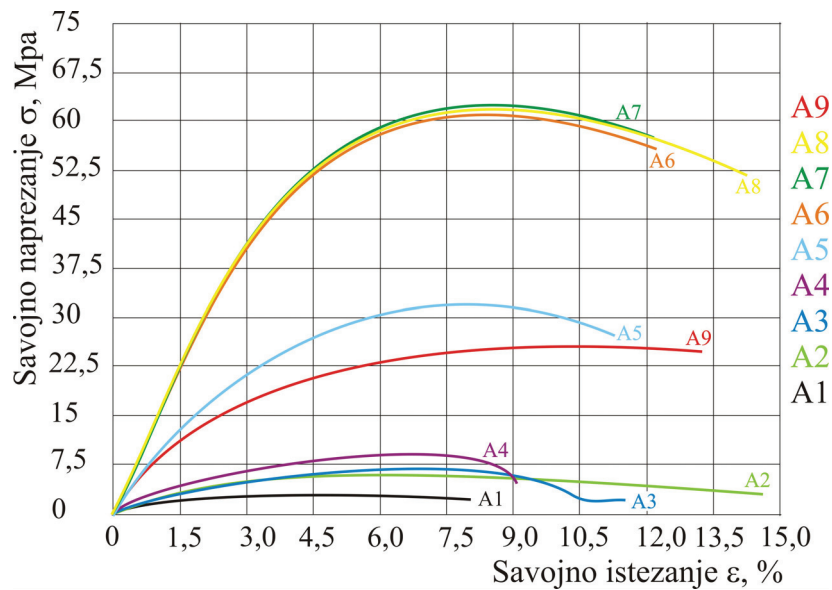
Oznaka	h , mm	b_1 , mm	A_0 , mm ²	F_m , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
A1	4,17	9,92	41,37	92,2	2,23	-	1,60	1,55	-
A2	4,22	9,88	41,69	128,2	3,08	-	3,58	3,02	-
A3	4,30	9,87	42,44	148,5	3,50	-	4,65	3,39	-
A4	4,36	9,82	42,82	220,4	5,15	4,33	5,46	1,79	0,307
A5	4,07	9,85	40,09	748,9	18,68	15,60	5,92	18,59	0,825
A6	4,08	9,91	40,43	1742,7	43,10	36,01	18,36	40,77	1,485
A7	4,13	10,00	41,30	1893,6	45,85	39,05	22,81	36,64	1,595
A8	4,21	10,13	42,65	1943,0	45,56	37,60	21,46	37,36	1,801
A9	4,92	10,90	53,63	1663,0	31,01	24,21	14,86	29,92	1,084



Slika 8.10. Dijagram rasteznog napreznja – istežanja kod promjene faktora preklapanja

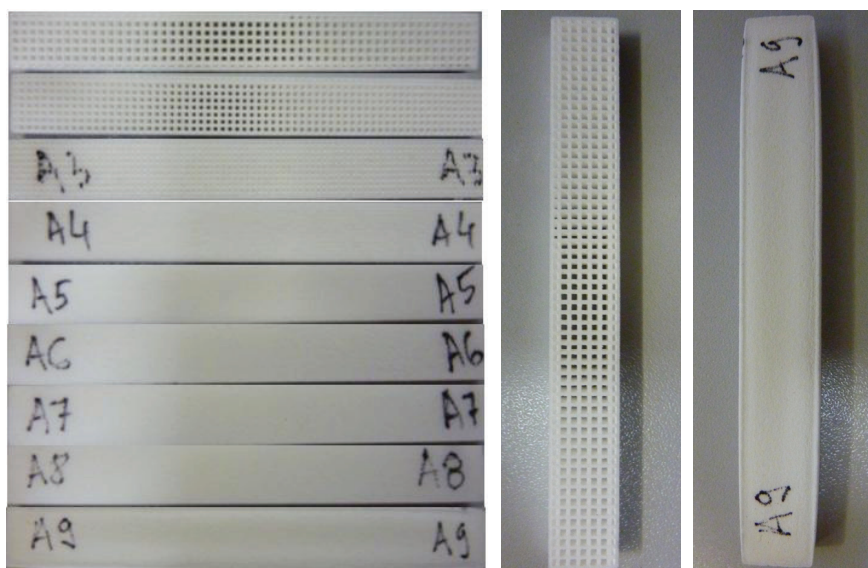
Tablica 8.22. Savojsna svojstva ispitnih tijela s promjenjenim faktorom preklapanja

Oznaka	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fM} , MPa	ε_{fM} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
A1	4,20	9,92	41,66	6,8	3,70	3,01	4,89	8,80	0,00	0,010
A2	4,24	9,90	41,98	13,6	7,31	7,50	12,07	14,70	3,08	0,193
A3	4,35	9,82	42,72	14,7	7,59	5,79	9,09	11,66	2,35	0,128
A4	4,35	9,86	42,89	19,2	9,88	6,23	9,77	9,44	0,62	0,239
A5	4,05	9,85	39,89	55,2	32,77	7,82	13,18	11,52	0,71	0,830
A6	4,06	9,99	40,56	106,9	62,32	7,48	12,58	12,34	55,76	1,141
A7	4,16	10,12	42,10	114,8	62,90	7,45	12,22	12,27	57,97	1,428
A8	4,28	10,29	44,04	122,7	62,46	7,69	12,26	14,37	52,15	1,350
A9	5,60	11,55	64,68	99,0	26,24	9,46	11,53	13,35	24,75	0,490

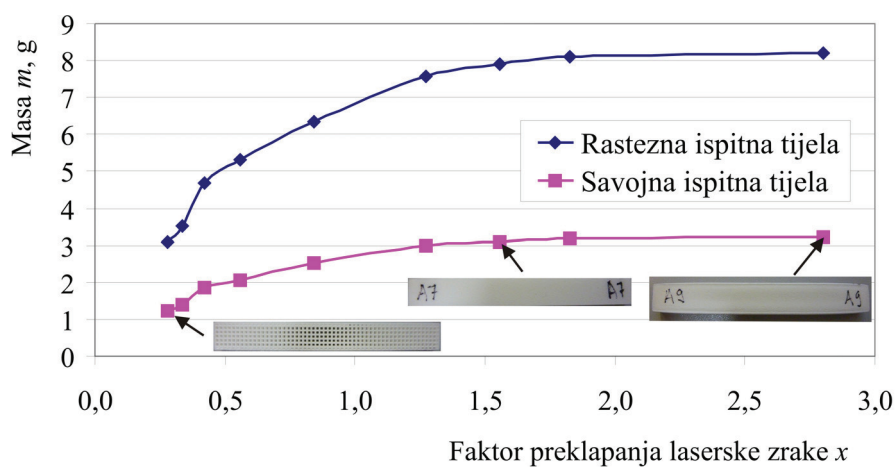


Slika 8.11. Dijagram savojnog naprezanja – istežanja kod promjene faktora preklapanja

Iz tablica i slika zaključuje se da kao i u slučaju mijenjanja snage lasera i brzine laserske zrake, povećanjem faktora preklapanja, te povišenjem unosa energije mehanička svojstva i izmjere rastu, ali do određene vrijednosti unosa energije od $0,0484 \text{ J/mm}^2$ i $0,0667 \text{ J/mm}^2$ (ispitno tijelo oznake A7 i A8), a zatim mehanička svojstva počinju padati, dok izmjere nastavljaju rasti. No osim na mehanička svojstva faktor preklapanja laserske zrake x utječe i na izgled prototipa, što nije slučaj kod mijenjanja snage lasera i brzine laserske zrake. S manjim faktorom, tj. većim razmakom putanje laserske zrake postiže se mrežasta struktura – ispitna tijela A1 i A2, odnosno ostaje nesrašćenog praha (slika 8.12), što ujedno znači i manju masu (slika 8.13), no kod ispitnog tijela A9 gdje je razmak putanje laserske zrake najniži, tj. najviši faktor preklapanja laserske zrake x i unos energije ED izmjere ispitnog tijela značajno odstupaju od nazivnih koje propisuje norma zbog prevelikog unosa energije i širenja topline u nepoželjno područje koje izlazi iz granica izmjera prototipa.



Slika 8.12. Izgled ispitnih tijela

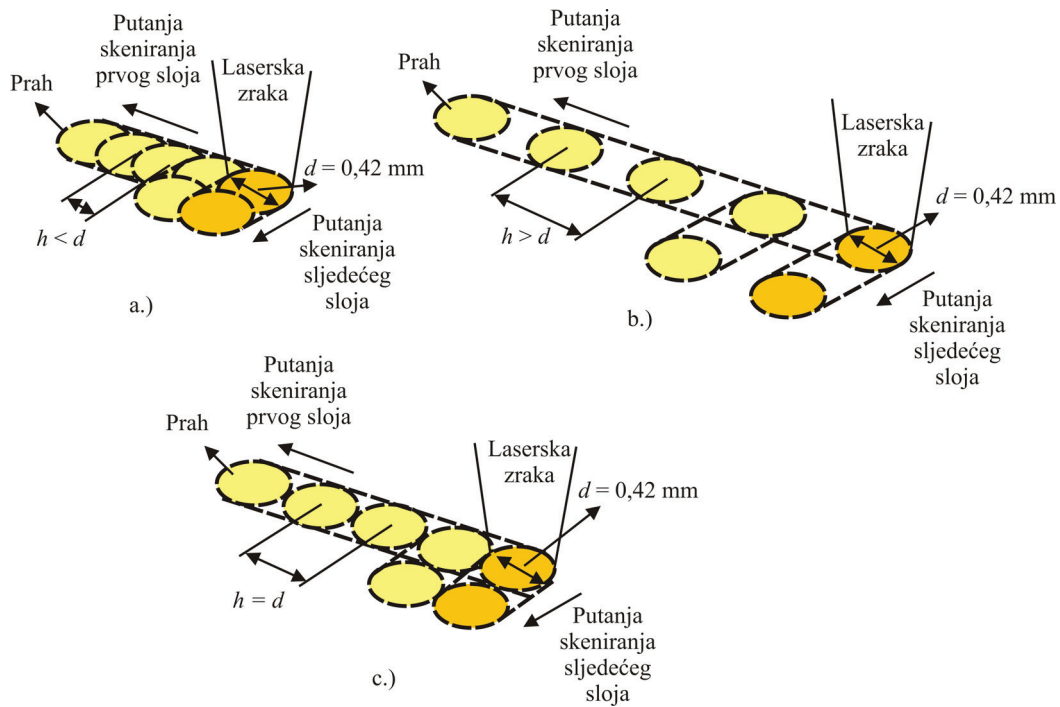


Slika 8.13. Masa u odnosu na faktor preklapanja laserske zrake

Iz slike 8.13 zaključuje se da masa postiže svoj maksimum do faktora preklapanja $x = 1,8$ na približnu vrijednost od 8,2 g za rastezna ispitna tijela i 3,2 g za savojna svojstva i dalje ostaje konstantna. Podaci o masi u ovisnosti o faktoru preklapanja prikazani su u prilogu 12.19.

Na slici 8.14 prikazana je shema skeniranja čestica praha laserskom zrakom na kojoj su ucrtani promjer laserske zrake d i razmak između putanje laserske zrake h . Pri $h < d$ (slika 8.14.a) dolazi do prevelikog preklapanja (veći faktor x), pri čemu je i vrijednost gustoće energije previsoka i

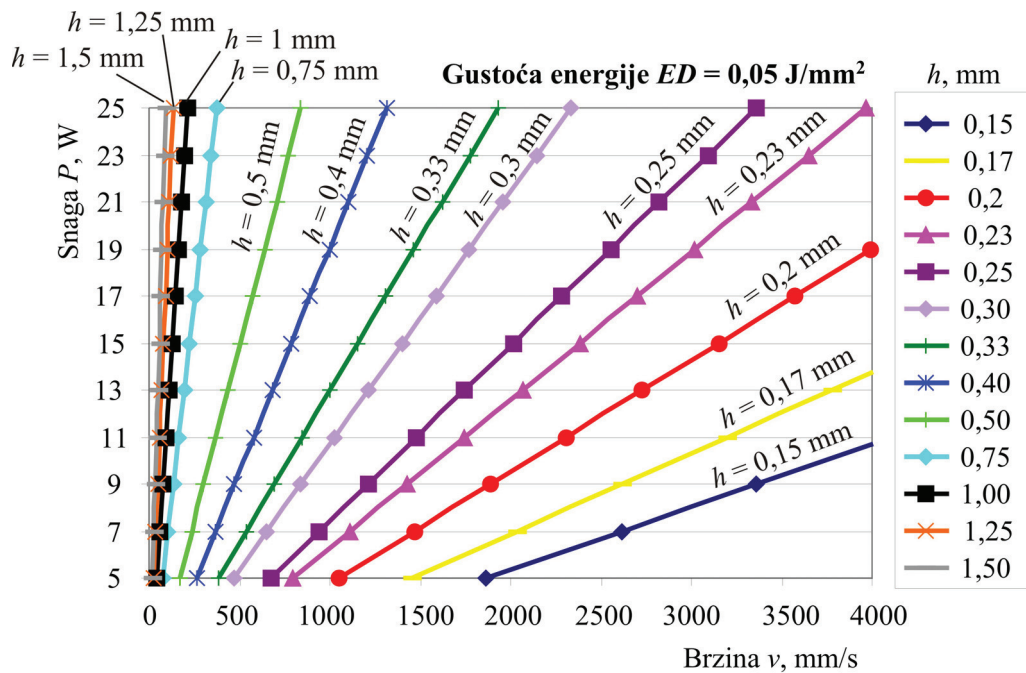
dolazi do sniženja mehaničkih svojstava, no pri $h > d$ (slika 8.14.b) ostaje nesrašćenog praha i postiže se mrežasta struktura, pa je bolji slučaj veći faktor preklapanja, odnosno manji razmak između putanje laserske zrake. Također faktor preklapanja ne bi smio biti prevelik jer je onda i duže vrijeme izrade (što je prikazano na dijagramima 8.18 i 8.19).



Slika 8.14. Shema skeniranja čestica praha: a.) $h < d$, b.) $h > d$ i c.) $h = d$

Na temelju provedenih pokusa predlaže se na stroju *Formiga P100* uzeti vrijednost gustoće energije $ED = 0,05 \text{ J/mm}^2$ za proizvodnju prototipova dobrih mehaničkih svojstava debljine sloja $0,1 \text{ mm}$.

No teško je izabrati koji iznos snage lasera, brzine laserske zrake i razmaka putanje laserske zrake treba uzeti da se dobije odgovarajuća gustoća energije ED . Tako je na slici 8.15 prikazan prijedlog izbora parametra kod gustoće energije $0,05 \text{ J/mm}^2$ za *Formigu P100*, koji se također može primjeniti i za ostale strojeve za SLS postupak.

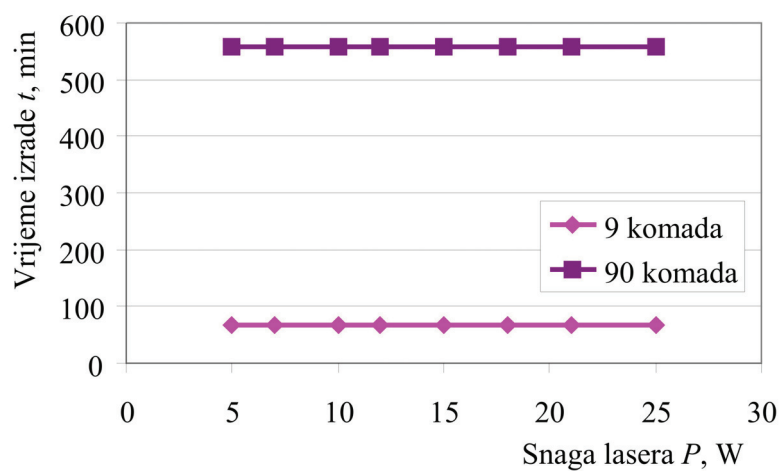


Slika 8.15. Određivanje parametara SLS postupka kod debljine sloja 0,1 mm i gustoće energije $ED = 0,05 \text{ J/mm}^2$

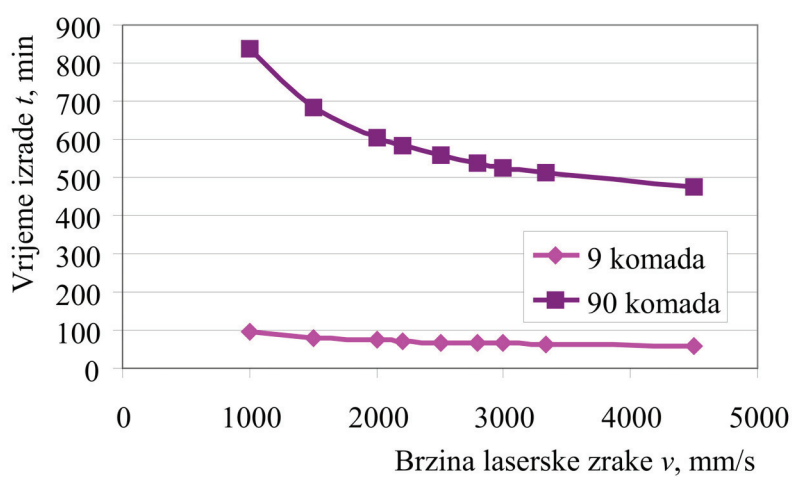
8.2.4. Vrijeme izrade

S različitim iznosima parametara moguće je također utjecati i na vrijeme izrade. Međutim vrijeme izrade ne ovisi samo o unosu energije, snazi lasera, brzini laserske zrake i razmaku između putanje laserske zrake nego i o popunjenosti komore i visine u smjeru osi z. Kod *Formige P100* u jednoj ravnini moguće je staviti 9 komada rastezljivih ispitnih tijela orijentacije Lxy. Na slikama 8.16, 8.17, 8.18 i 8.19 prikazana je usporedba vremena izrade s različitim parametrima prilikom izrade 9 komada (ukupna visina 9 mm) i 90 komada ispitnih tijela (ukupna visina 90 mm). Rezultati su prikazani u prilogu 12.20, 12.21, 12.22 i 12.23. Na dijagramima 8.16, 8.17 i 8.18 dva parametra ostaju konstantna, dok se jedan mijenja. Parametri su: $P = 21 \text{ W}$, $v = 2500 \text{ mm/s}$, $h = 0,25 \text{ mm}$, dok su podaci za dijagram 8.19 uzeti iz predpokus iz poglavlja 8.1.1.

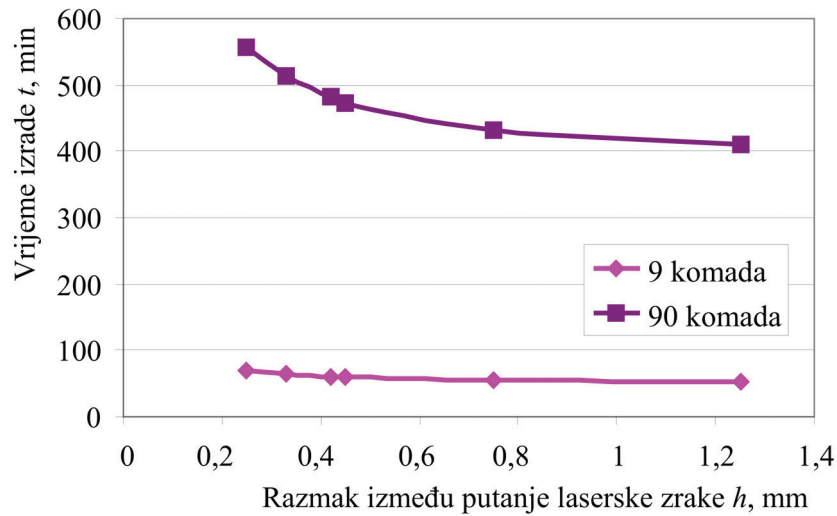
Na dijagramima je vrijeme izrade prikazano u minutama zbog prakse i bolje preglednosti.



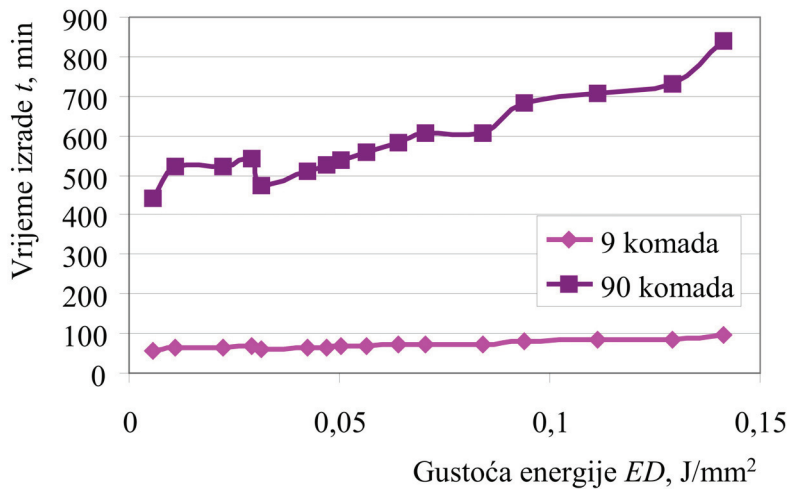
Slika 8.16. Ovisnost vremena izrade o snazi lasera



Slika 8.17. Ovisnost vremena izrade o brzini laserske zrake



Slika 8.18. Ovisnost vremena izrade o razmaku između putanje laserske zrake



Slika 8.19. Ovisnost vremena izrade o gustoći energije

Iz prikazanih dijagrama zaključuje se da je vrijeme izrade kraće ako su brzina i razmak veći, dok je snaga implicitan parametar. Budući da s povećanjem razmaka padaju mehanička svojstva i dobije se mrežasta struktura, takva ispitna tijela trebalo bi naknadno obraditi kemijskim obradama. Kombinacijom tih parametara trebalo bi se zadržati na što nižoj gustoći energije ako se želi skratiti ukupno vrijeme ciklusa proizvodnje.

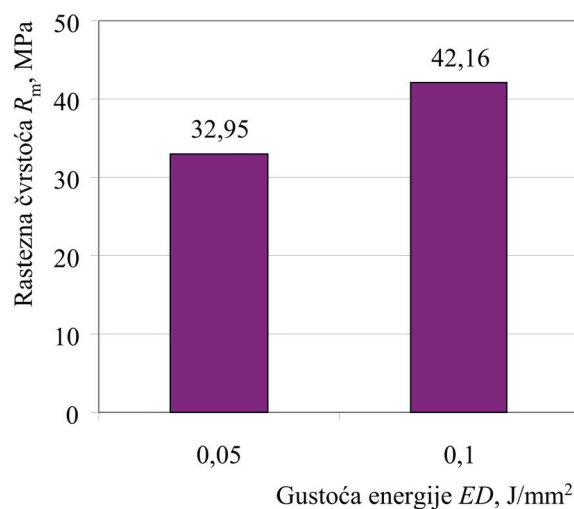
8.2.5. Debljina sloja

Do sada su sva ispitivanja provedena s debljinom sloja 0,1 mm, pa se postavlja pitanje šta se dešava ako se uzme druga debljina sloja. Za primjer je ispitana dvostruko veća debljina sloja; 0,2 mm. Iz do sada izloženoga može se zaključiti da je potrebno za tu debljinu uzeti dvostruko višu gustoću energije, $ED = 0,1 \text{ J/mm}^2$, da se dobiju dobra mehanička svojstva (slika 8.20). Vrijednosti mehaničkih svojstava prikazani su u prilogu 12.24.

Izabrani su parametri:

- $ED = 0,1 \text{ J/mm}^2$
- $P = 21 \text{ W}$
- $v = 1250 \text{ mm/s}$
- $h = 0,25 \text{ mm}$

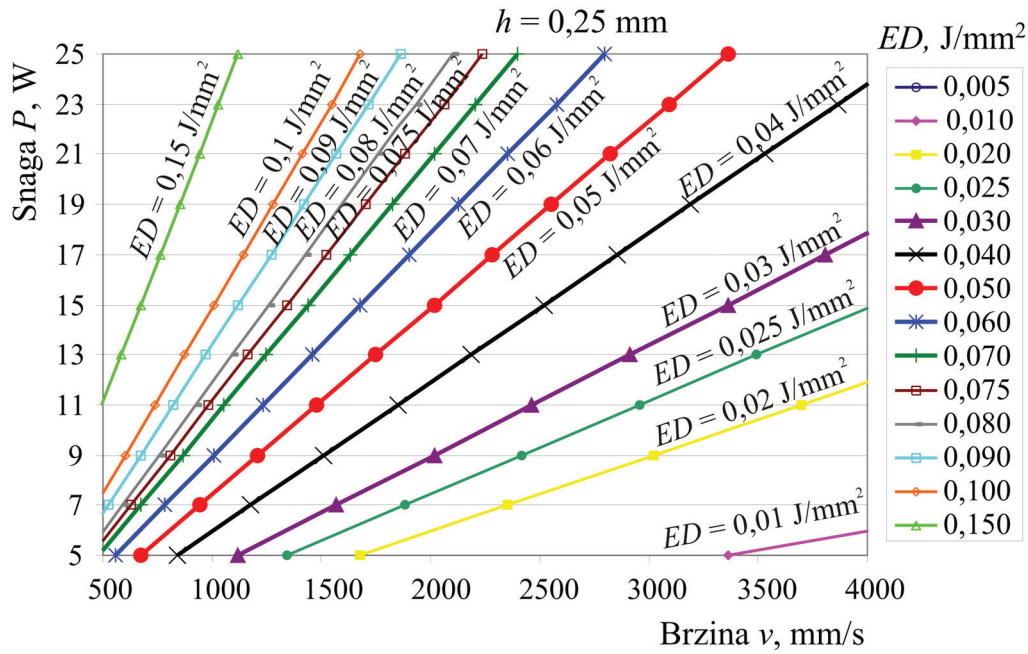
Za usporedbu su ispitana i mehanička svojstva prototipa kod gustoće energije ($ED = 0,05 \text{ J/mm}^2$) koja je dovoljna za sloj debljine 0,1 mm.



Slika 8.20. Rastezna čvrstoća u ovisnosti o gustoći energije za debljinu sloja 0,2 mm

Sa povećanjem debljine sloja laser značajno gubi snagu (odnosno sposobnost za taljenje materijala), pa bi bilo bolje uzeti veću snagu i povišiti brzinu, jer pri višim brzinama i većim debljinama sloja dobije se tvorevina dobrih mehaničkih svojstava u kraćem vremenu, ali na stroju *Formiga P100* ograničavajući faktor je maksimalna snaga od 25 W. Niža rastezna čvrstoća kod $ED = 0,05 \text{ J/mm}^2$ uzrok je premalo unesene energije za dobro spajanje debljih slojeva. No opet je pitanje izbora različitih kombinacija parametara. Tako je na slici 8.21 prikazan prijedlog izbora parametra snage i brzine uz konstantni razmak između putanje laserske zrake

$h = 0,25$ mm za različite gustoće energije koji se također može primjeniti i za različite debljine slojeva i za ostale SLS strojeve.



Slika 8.21. Određivanje parametara SLS postupka pri konstantnom razmaku između putanje laserske zrake h

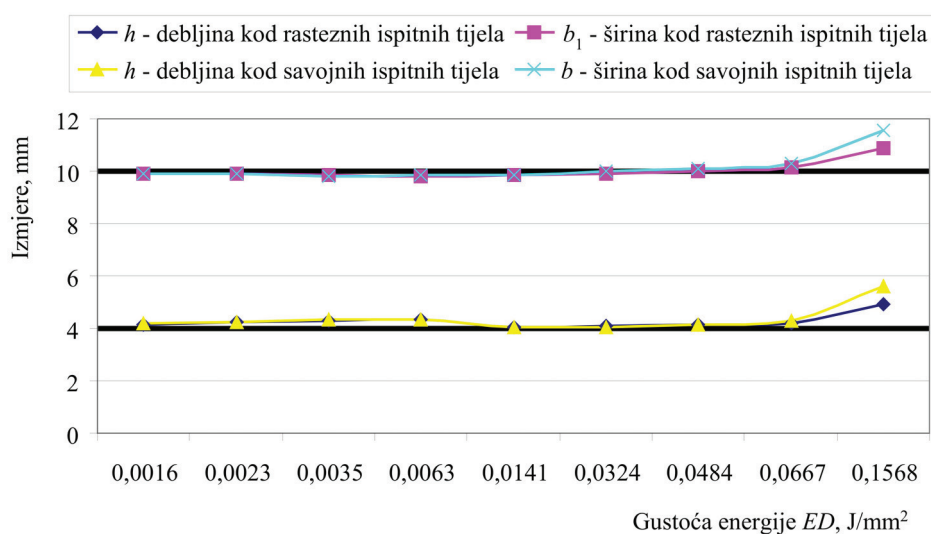
Za debljine slojeva 0,1 mm, osim gustoće energije $0,05 \text{ J/mm}^2$, preporučuje se uzeti i gustoću energije od $0,03 \text{ J/mm}^2$ do $0,07 \text{ J/mm}^2$ koje su na slici 8.21 označene debljim linijama. U tim granica postižu se zadovoljavajuća mehanička svojstva. Za ostale debljine slojeva treba primjeniti tablicu 8.23.

Tablica 8.23. Odabir gustoće energije ovisno o debljini sloja

Debljina sloja, mm	Gustoća energije ED , J/mm^2
0,05	0,025
0,10	0,05
0,15	0,075
0,20	0,10
0,30	0,15

8.2.6. Izmjere u ovisnosti o gustoći energije

Osim na mehanička svojstva unos energije utječe i na izmjere tvorevine, tj. točnost (slika 8.22). Do energije od $0,0063 \text{ J/mm}^2$ izmjere (debljina h i širina b) malo odstupaju od nazivne vrijednosti (označene na dijagramu $h = 4 \text{ mm}$ i $b = 10 \text{ mm}$), pogotovo debljina h , no što je još uvijek u granicama koje propisuje norma ($\pm 0,2 \text{ mm}$), zatim do energije od $0,0484 \text{ J/mm}^2$ su najmanja odstupanja, a nakon energije od $0,0484 \text{ J/mm}^2$ izmjere počnu rasti i izlaze iz tolerancija koje propisuje norma. Iz slike se zaključuje da su izmjere za rastezna i savojna svojstva približno ista.



Slika 8.22. Utjecaj unosa energije na izmjere prototipa

8.3. Usporedba svojstava kod različite vrste materijala i orijentacije prototipa u izradbenom prostoru

Kod daljnjih ispitivanja pokušao se ustanoviti utjecaj orijentacije prototipa u izradbenom prostoru stroja i vrste upotrijebljenog materijala pri različitim atmosferskim uvjetima:

- 100 % originalnog poliamida,
- miješanog originalnog i recikliranog u omjeru 50 % : 50 % (oznaka M) i
- 100 % recikliranog materijala nakon 3. ciklusa upotrebe (oznaka R).

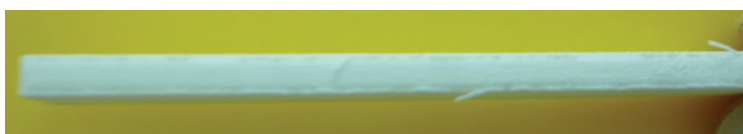
Izabrani parametri su:

- gustoća energije $ED = 0,0564 \text{ J/mm}^2$
- snaga $P = 21 \text{ W}$

- brzina laserske zrake $v = 2500$ mm/s
- razmak između putanje laserske zrake $h = 0,25$ mm

Za dobru kvalitetu površine proizvođači preporučuju upotrebu 50 % ili više originalnog praha, no time se određena količina već rabljenog materijala baca. Tijekom upotrebe većih količina originalnog materijala prema literaturi [47] dolazi do vitoperenja i uvijanja.

Ispitivanja su pokazala da jedino kod prvog sloja prototipa od 100 % originalnog praha dolazi do ljuštenja, ali ne i do vitoperenja tvorevine (slika 8.23).

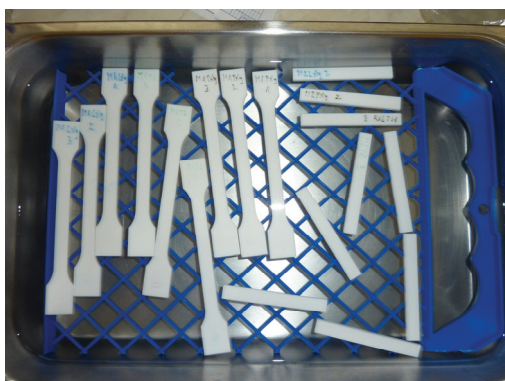


Slika 8.23. Ljuštenje prvog sloja prototipa od 100 % originalnog materijala

8.3.1. Određivanje apsorpcije vode

Apsorpcija vode c , određivana promjenom mase (u postocima), je količina vode koju neko tijelo može upiti u određenom vremenskom razdoblju. Apsorpcija vode ovisi o debljini ispitnog tijela, kapljevini u kojoj se nalazi, temperaturi, itd.

Ispitivanja su provedena na ispitnim tijelima za određivanje rasteznih i savojnih svojstava, kako bi se kasnije mogao ustanoviti utjecaj apsorbirane vode na njihova mehanička svojstva. Ispitnim tijelima od sve tri vrste materijala i sve tri orijentacije (L_{xy} , P_{xy} i P_z) mjerena je masa nakon 1 dan, 4 dana, 7 dana, 14 dana i 28 dana provedenih u vodi. Ispitna tijela uronjena su u destiliranu vodu pri sobnoj temperaturi (slika 8.24). Nakon 7 dana L_{xy} i P_{xy} ispitna tijela od originalnog i miješanog materijala potonula su, tj. njihova gustoća je nakon apsorpcije vode postala viša od vode, tj. od 1 g/cm^3 , pa ih je bilo potrebno postaviti na rešetku, tako da mogu dalje apsorbirati vodu sa svih strana. Orijehtacija P_z je potonula tek nakon 21. dana. No ispitna tijela od recikliranog materijala ponašala su se drukčije, tj. tek nakon 14 dana potonula su samo ispitna tijela s orijentacijom L_{xy} , dok P_{xy} i P_z su i nakon 28 dana ispitivanja ostala plutati (gustoća im je ostala niža od gustoće vode).

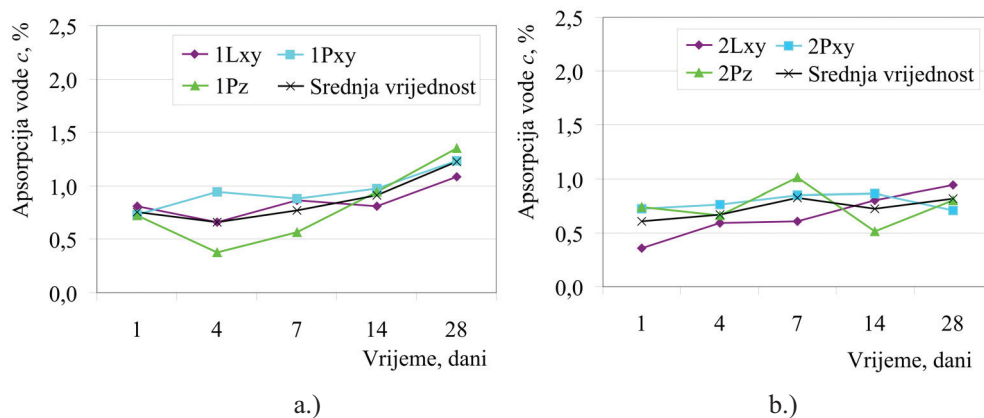


Slika 8.24. Ispitivanje apsorpcije vode

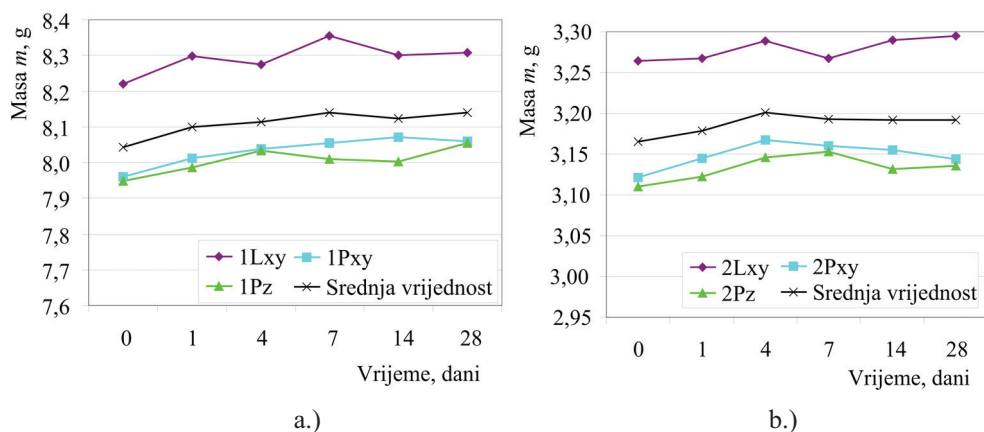
Na slikama 8.25, 8.27 i 8.29 prikazana je količina apsorbirane vode c (u %) za različite vrste materijala u ovisnosti o različitim orijentacijama ispitnih tijela. Na slikama se može uočiti da najviše vode apsorbira orijentacija Pz, a materijal reciklirani (originalni materijal $c \approx 1,23$ %, miješani materijal $c \approx 1,75$ % i reciklirani materijal $c \approx 1,93$ %). Sedmi dan svi materijali pokazuju pad apsorpcije.

Na slikama 8.26, 8.28 i 8.30 prikazana je promjena mase tijekom cijelog razdoblja apsorpcije vode (0 – 28 dana) iz kojih se uočava da do 4. dana masa linearno raste, zatim u vremenu od 4. dana do 7. dana postiže maksimalnu vrijednost nakon koje masa neznatno raste što je posebno izraženo u slučaju miješanog i reciklirang materijala (nakon 28 dana masa rasteznih ispitnih tijela je za originalni materijal $m = 8,1407$ g, za miješani $m = 8,0884$ g i za reciklirani $m = 7,9154$ g, dok je kod savojnih ispitnih tijela originalni materijal $m = 3,1914$ g, miješani $m = 3,1831$ g i reciklirani $m = 3,1072$ g). Najveći prirast mase ima orijentacija Lxy kod originalnog materijala te ona nakon 28 dana iznosi 8,3085 g, a kod savojnih 3,2947 g. Na dijagramu su ucrtane i srednje vrijednosti u ovisnosti o sve tri orijentacije zajedno. Izračunate srednje vrijednosti apsorpcije vode nalaze se u prilogu od 12.25. do 12.30.

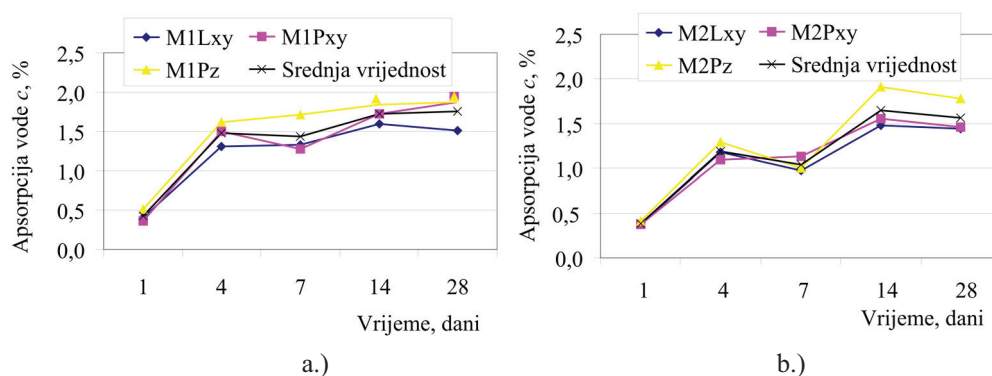
Takva velika raznolikost u postotku apsorpcije vode može se protumačiti različitom strukturom materijala uzrokovanom upotrebom različitog postotka već korištenog materijala (materijal je nakon prve izrade izvađen iz komore stroja i skladišten na sobnoj temperaturi) te zbog toga i različitom sposobnošću apsorpcije vode.



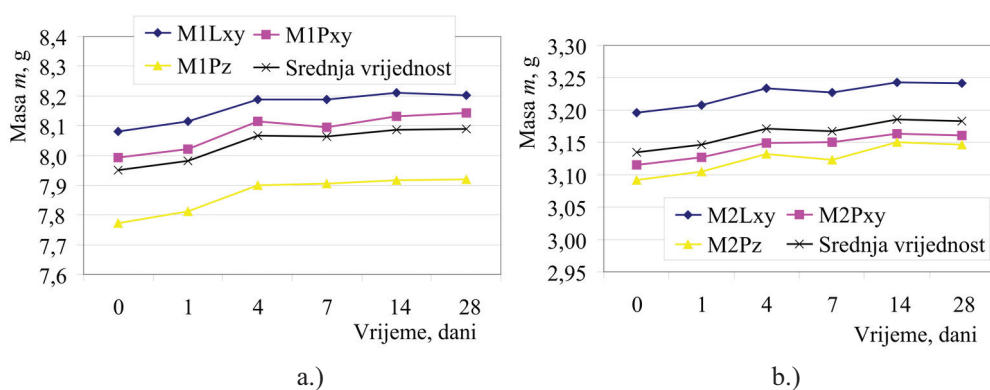
Slika 8.25. Apsorpcija vode kod originalnog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela



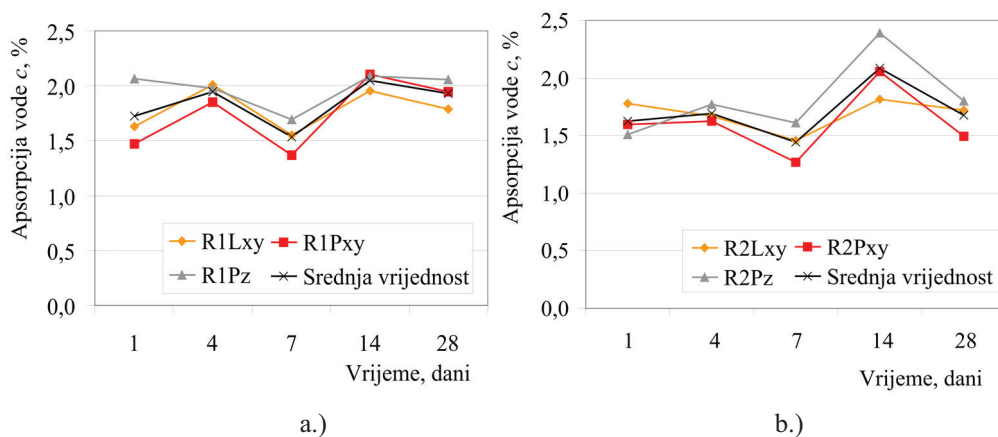
Slika 8.26. Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod originalnog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela



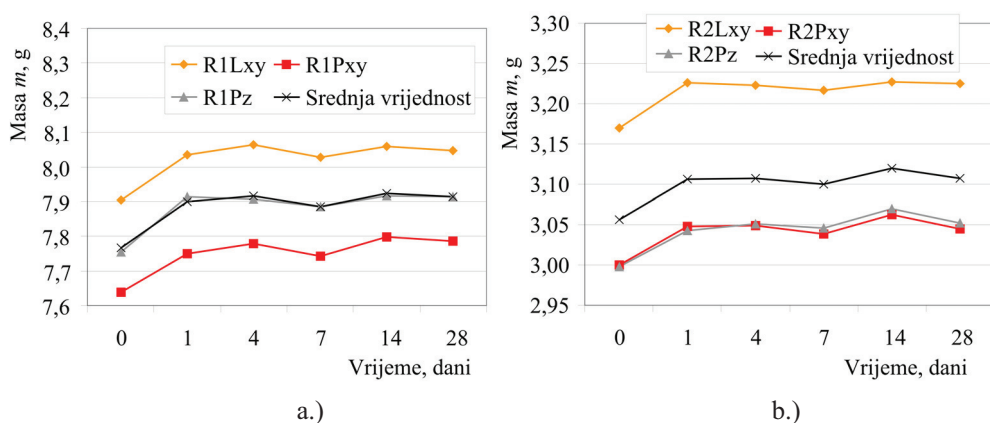
Slika 8.27. Apsorpcija vode kod miješanog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela



Slika 8.28. Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod miješanog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

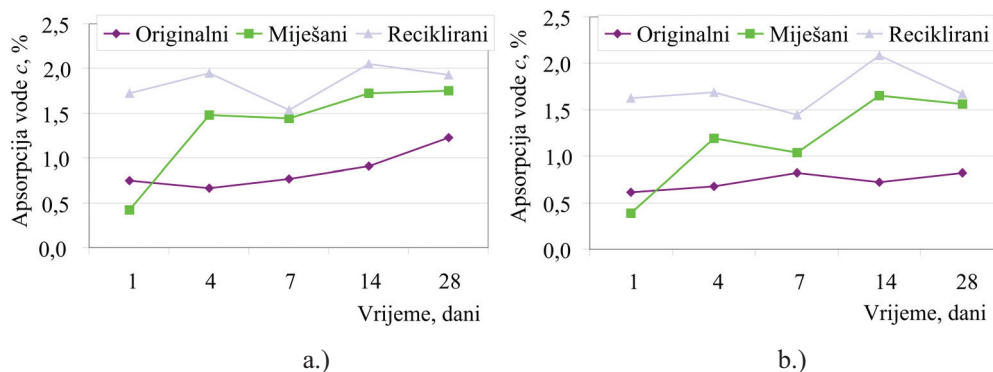


Slika 8.29. ApSORPCIJA vode kod recikliranog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

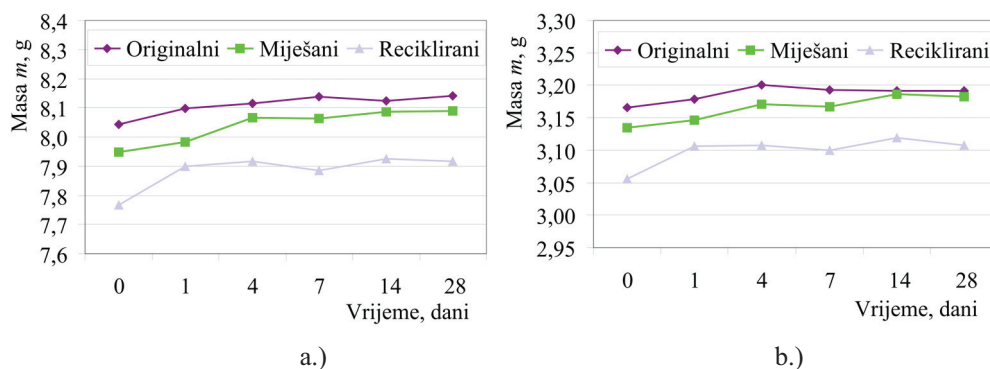


Slika 8.30. Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod recikliranog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

Ovisno o vrsti materijala najmanju masu tijekom cijelog razdoblja apsorpcije imaju ispitna tijela načinjena od recikliranog materijala, no oni ujedno i apsorbiraju najviše vode što je prema jednadžbi 6.9 posljedica početne mase (slike 8.31 i 8.32).



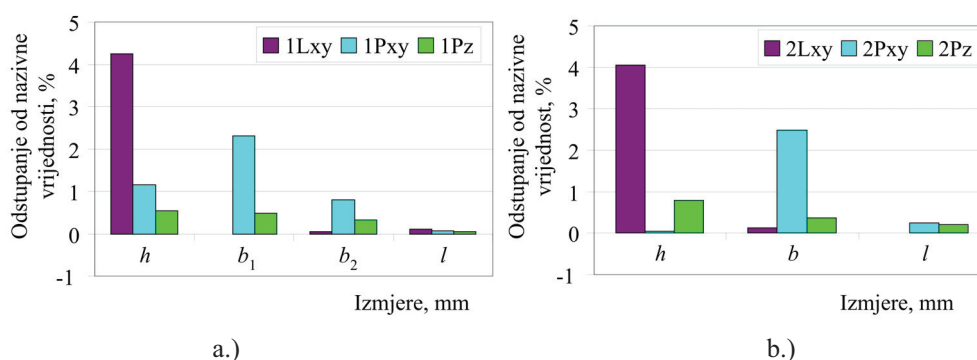
Slika 8.31. Apsorpcija vode kod sve tri vrste materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela



Slika 8.32. Promjena mase tijekom apsorpcije vode kod sve tri vrste materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

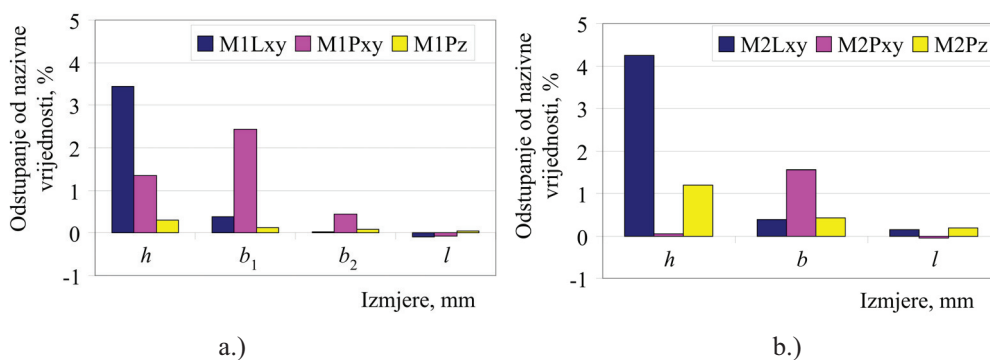
8.3.2. Izmjere prototipova

U prilogu 12.31 do 12.36 prikazani su podaci o vrijednostima izmjera rasteznih i savojnih ispitnih tijela i njihova odstupanja od nazivnih vrijednosti kod originalnog, miješanog i recikliranog materijala. Na slikama 8.33 do 8.35 prikazana je usporedba odstupanja od nazivnih izmjera kod različitih orijentacija, odnosno na slici 8.36 odstupanja od nazivnih izmjera u usporedbi s različitim vrstama materijala za rastezna i savojna ispitna tijela.



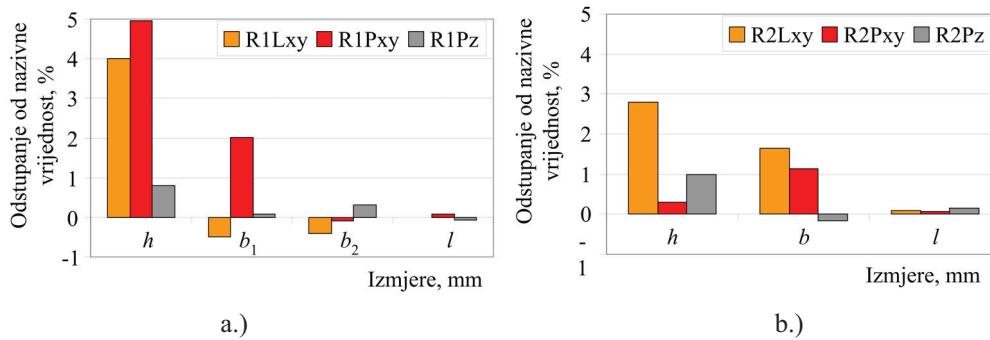
Slika 8.33. Odstupanje od nazivnih izmjera kod originalnog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

Kod 100 % originalnog praha najveća odstupanja su kod orijentacije Lxy u smjeru osi z, tj. debljina h , te kod orijentacije Pxy također u smjeru osi z, tj. širina b . Kod SLS postupka prilikom hlađenja dolazi do skupljanja materijala - u x i y osi skupljanje je 3,4 %, a po z osi se kompenzira od 0 mm za 2,2 % do visine 300 mm za 1,6 %, što preporuča proizvođač. Što je manja visina tvorevine u smjeru osi z odstupanja su veća, u odnosu na više tvorevine, što se može primjetiti na orijentaciji Pz (tj. visina l) (slika 8.33).



Slika 8.34. Odstupanje od nazivnih izmjera kod miješanog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

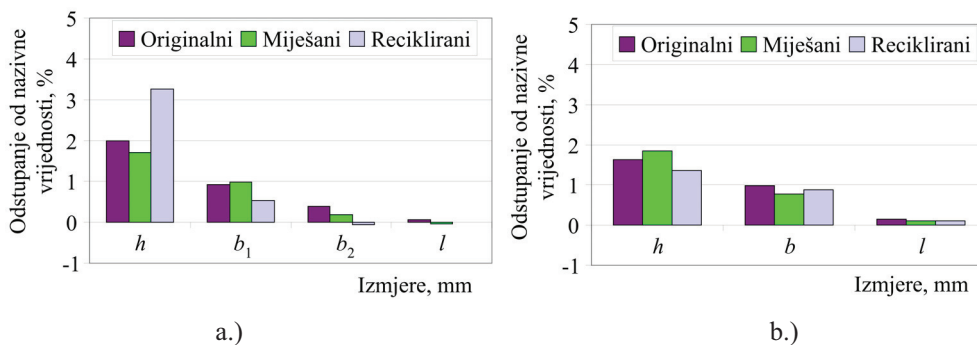
Odstupanja od nazivnih izmjera kod miješanog materijala (slika 8.34) slična su kao i kod originalnog materijala. Odnosno, odstupanja se dešavaju u smjeru osi z pri manjim izmjerama (orijentacija Lxy $\rightarrow h = 4$ mm, orijentacija Pxy $\rightarrow b = 10$ mm). Prema normi tolerancije moraju biti u granicama $\pm 0,2$ mm, što u smjeru z, bilo kod orijentacije Lxy ili Pxy, izmjere odstupaju.



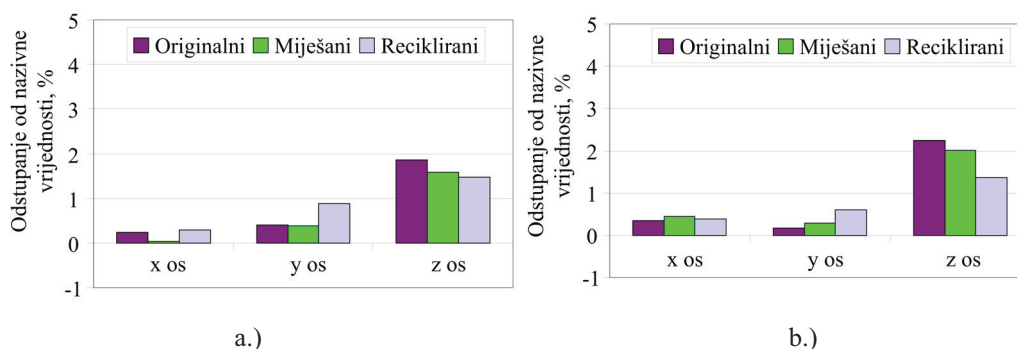
Slika 8.35. Odstupanje od nazivnih izmjera kod recikliranog materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

Kod recikliranog materijala najveća su odstupanja u smjeru osi z, kao što je i slučaj kod originalnog i miješanog materijala, jedino tu dolazi do velikih odstupanja i u y osi, što nije slučaj kod prethodne dvije vrste materijala (orijentacija Lxy \rightarrow $b = 10$ mm kod savojnih ispitnih tijela, orijentacija Pxy \rightarrow $h = 4$ mm kod rasteznih ispitnih tijela) (slika 8.35).

Kad bi se sva odstupanja usporedila s različitim vrstama materijala, vidjela bi se velika raznolikost, što upućuje na zaključak da izmjere nisu ovisne o tome koji se materijal upotrebljava, već ovise o orijentaciji prototipa u izradbenom prostoru (slika 8.36). Najveća odstupanja su u z smjeru kod sve tri vrste materijala, a u x i y smjeru malo veća odstupanja su kod recikliranog materijala (slika 8.37).



Slika 8.36. Odstupanje od nazivnih izmjera – usporedba vrste materijala: a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela



Slika 8.37. Odstupanje od nazivnih izmjera u x, y i z osi kod različite vrste materijala:
a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

8.3.3. Hrapavost ispitnih tijela

8.3.3.1. Hrapavost originalnog materijala

U tablicama 8.24 do 8.26 prikazani su parametri hrapavosti ispitnih tijela načinjenih od originalnog materijala.

Tablica 8.24. Parametri hrapavosti Lxy ispitnih tijela od originalnog materijala

Lxy	N = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	S	R	Max	Min
R_{max}	50,15	6,23	11,54	57,27	45,72
R_z	45,51	3,32	6,52	49,14	42,62
R_a	8,41	1,23	2,42	9,73	7,31
R_p	27,80	6,35	12,25	34,88	22,64
R_{pm}	22,27	2,40	4,79	24,55	19,76
W_t	22,20	5,97	11,76	28,69	16,93
R_t	55,61	11,25	20,91	68,45	47,54
P_t	66,55	11,50	20,71	79,79	59,07

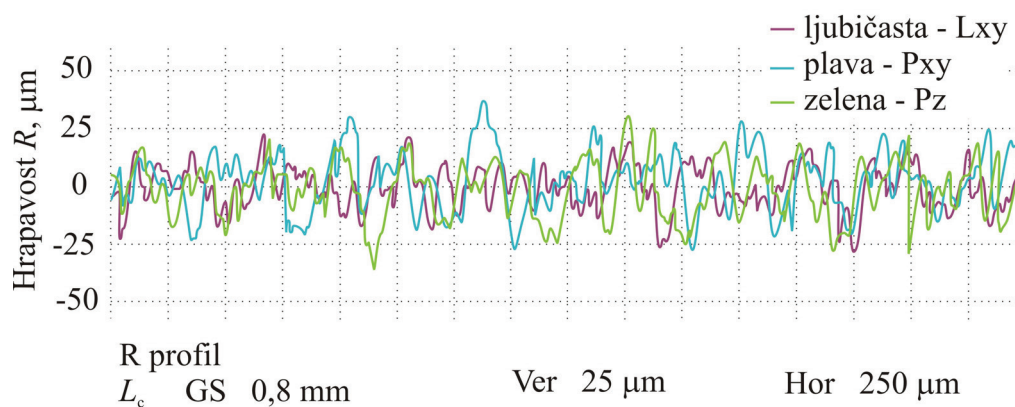
Tablica 8.25. Parametri hrapavosti Pxy ispitnih tijela od originalnog materijala

Pxy	N = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	S	R	Max	Min
R_{max}	62,94	5,20	10,10	67,27	57,17
R_z	53,00	4,01	7,80	57,44	49,64
R_a	10,04	1,14	2,17	11,32	9,16
R_p	33,22	4,16	8,03	36,61	28,57
R_{pm}	26,59	4,04	7,65	31,16	23,51
W_t	29,15	5,87	10,49	32,88	22,38
R_t	64,82	3,33	6,24	67,27	61,03
P_t	81,99	9,26	17,63	89,17	71,54

Tablica 8.26. Parametri hrapavosti Pz ispitnih tijela od originalnog materijala

Pz	N = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	S	R	Max	Min
R_{max}	66,99	11,28	22,55	78,18	55,63
R_z	52,89	4,99	9,70	58,42	48,72
R_a	9,44	0,82	1,59	10,10	8,51
R_p	36,03	3,59	7,12	39,33	32,21
R_{pm}	26,17	1,41	2,79	27,66	24,86
W_t	20,41	7,38	13,68	25,65	11,97
R_t	70,97	6,24	11,01	78,18	67,17
P_t	76,68	5,44	10,74	82,53	71,79

Na slici 8.38 prikazana je hrapavost površine kod ispitnih tijela načinjenih od originalnog materijala s vertikalnim povećanjem od $25 \mu\text{m} \cong 10 \text{ mm}$ i horizontalnim povećanjem od $250 \mu\text{m} \cong 10 \text{ mm}$. Najmanji R_a ima ispitno tijelo orijentacije Lxy ($R_a = 8,41 \mu\text{m}$), dok najveću orijentacija Pxy = $10,04 \mu\text{m}$.



Slika 8.38. Hrapavost površine ispitnih tijela načinjenih od originalnog materijala

8.3.3.2. Hrapavost miješanog materijala

U tablicama 8.27 do 8.29 prikazani su parametri hrapavosti ispitnih tijela načinjenih od miješanog materijala.

Tablica 8.27. Parametri hrapavosti MLxy ispitnih tijela od miješanog materijala

MLxy	N = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	S	R	Max	Min
R_{max}	54,97	5,08	9,84	60,61	50,77
R_z	44,93	1,81	3,62	46,71	43,09
R_a	7,99	0,43	0,86	8,40	7,54
R_p	29,73	1,67	3,33	31,48	28,14
R_{pm}	21,25	1,31	2,54	22,69	20,15
W_t	21,50	6,43	11,99	28,83	16,85
R_t	58,66	2,29	4,47	60,61	56,14
P_t	64,78	4,18	8,16	68,34	60,17

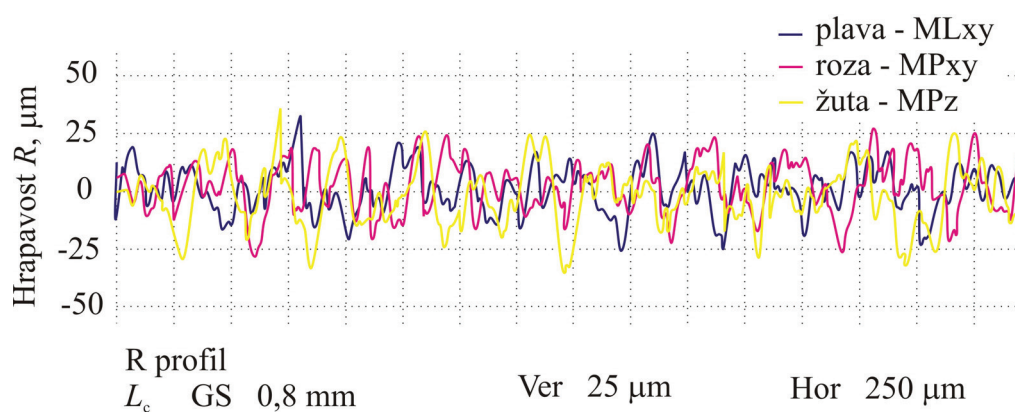
Tablica 8.28. Parametri hrapavosti MPxy ispitnih tijela od miješanog materijala

MPxy	<i>N</i> = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>
R_{max}	59,63	8,08	14,48	64,8	50,32
R_z	48,85	2,02	3,59	50,11	46,52
R_a	9,47	0,36	0,69	9,86	9,18
R_p	32,24	6,48	11,32	36,08	24,76
R_{pm}	23,68	2,62	4,90	25,59	20,69
W_t	22,39	6,04	11,51	27,09	15,58
R_t	63,60	7,47	14,79	70,39	55,60
P_t	73,81	5,79	11,53	79,25	67,72

Tablica 8.29. Parametri hrapavosti MPz ispitnih tijela od miješanog materijala

MPz	<i>N</i> = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>
R_{max}	60,95	5,79	11,55	66,47	54,92
R_z	53,58	6,87	13,33	59,27	45,94
R_a	9,65	1,11	2,20	10,66	8,46
R_p	33,70	6,77	11,73	37,62	25,89
R_{pm}	26,88	3,96	7,47	29,85	22,38
W_t	23,55	2,58	4,83	25,44	20,61
R_t	65,17	9,02	17,02	71,95	54,92
P_t	75,29	7,56	14,37	81,12	66,75

Iz statističke analize hrapavosti vidi se da kao što je slučaj i za originalni materijal, najmanji R_a ima orijentacija Lxy ($R_a = 7,99 \mu\text{m}$). Usporedba profila hrapavosti za sve tri orijentacije kod miješanog materijala prikazana je na slici 8.39.



Slika 8.39. Hrapavost površine ispitnih tijela načinjenih od miješanog materijala

8.3.3.3. Hrapavost recikliranog materijala

U tablicima 8.30 do 8.32 prikazani su parametri hrapavosti ispitnih tijela načinjenih od recikliranog materijala.

Tablica 8.30. Parametri hrapavosti RLxy ispitnih tijela od recikliranog materijala

RLxy	N = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	S	R	Max	Min
R_{max}	71,07	1,89	3,36	73,25	69,89
R_z	59,98	1,16	2,25	60,94	58,69
R_a	11,36	0,64	1,17	11,80	10,63
R_p	37,04	3,91	7,81	40,82	33,00
R_{pm}	28,97	2,31	4,52	30,94	26,43
W_t	41,88	18,97	36,52	57,17	20,65
R_t	76,13	5,55	10,64	80,54	69,89
P_t	99,69	17,85	31,46	110,5	79,09

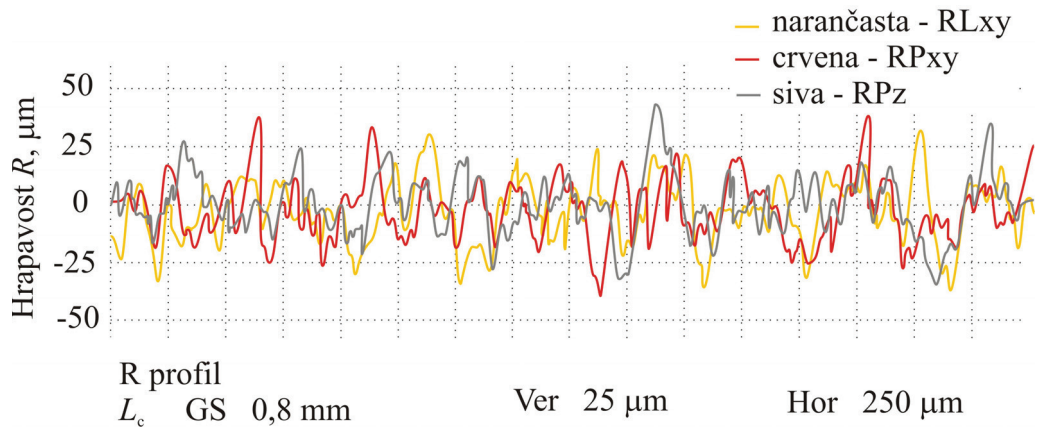
Tablica 8.31. Parametri hrapavosti RPxy ispitnih tijela od recikliranog materijala

RPxy	<i>N</i> = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>
R_{max}	64,91	4,67	8,32	67,83	59,52
R_z	56,64	4,33	8,38	60,20	51,82
R_a	10,51	0,60	1,14	11,18	10,04
R_p	39,29	8,19	15,69	45,77	30,08
R_{pm}	29,43	3,38	6,76	32,85	26,09
W_t	39,90	4,72	8,97	45,23	36,25
R_t	75,09	10,78	18,86	81,51	62,65
P_t	98,54	11,59	22,94	111,0	88,04

Tablica 8.32. Parametri hrapavosti RPz ispitnih tijela od recikliranog materijala

RPz	<i>N</i> = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>
R_{max}	71,85	4,35	8,33	75,29	66,96
R_z	57,89	3,61	6,94	60,78	53,84
R_a	10,55	0,68	1,32	11,31	9,99
R_p	38,19	5,13	10,25	43,51	33,26
R_{pm}	31,24	3,37	6,72	34,49	27,77
W_t	37,53	12,18	22,58	51,47	28,89
R_t	73,95	5,78	10,96	78,38	67,41
P_t	99,39	20,06	47,88	127,6	79,73

U slučaju recikliranog materijala drukčiji su parametri hrapavosti. Tako je kod orijentacije Lxy R_a najviši, tj. iznosi $R_a = 11,3 \mu\text{m}$, dok je kod orijentacije Pxy najniži ($R_a = 10,5 \mu\text{m}$) (slika 8.40).



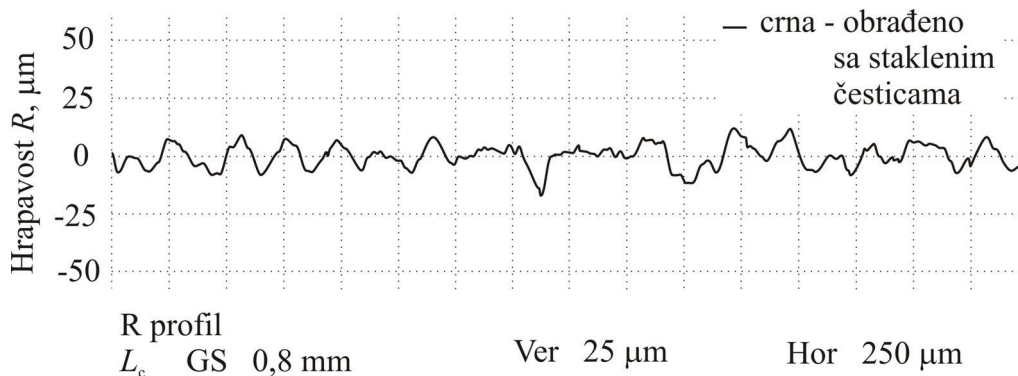
Slika 8.40. Hrapavost površine ispitnih tijela načinjenih od recikliranog materijala

8.3.3.4. Hrapavost obrađene površine

Da se poboljša hrapavost površine, površina se dodatno obrađuje sa staklenim česticama što je preporuka proizvođača (tablica 8.33 i slika 8.41). Ispitna tijela obrađena staklenim česticama pokazuju izrazito veliko sniženje srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a , tj. snižen je za 60 % u odnosu na ispitna tijela koja nisu obrađena staklenim česticama, jer se tom obradom skida sa površine određeni sloj praha.

Tablica 8.33. Parametri hrapavosti kod ispitnog tijela obrađenog sa staklenim česticama

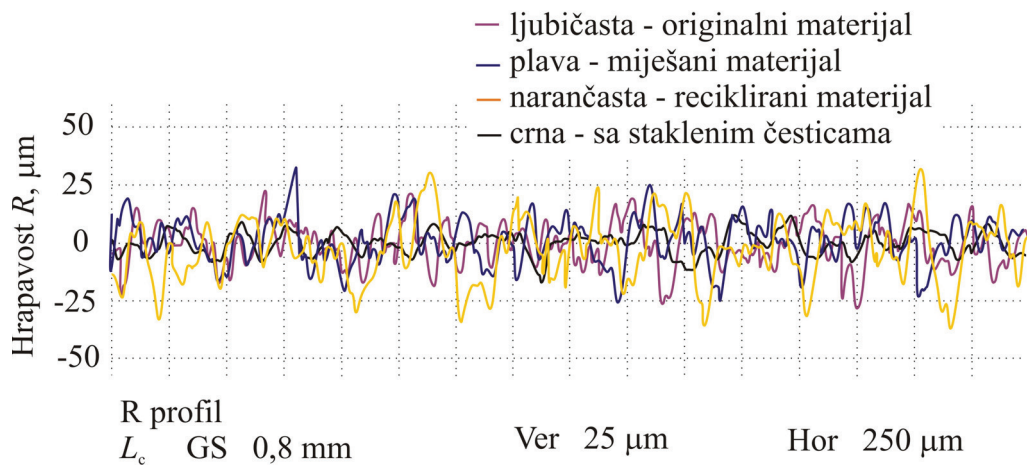
RPz	N = 3				
Parametri hrapavosti, [μm]	\bar{x}	S	R	Max	Min
R_{\max}	23,78	1,06	2,11	24,84	22,73
R_z	19,88	0,41	0,82	20,32	19,50
R_a	3,91	0,33	0,59	4,11	3,52
R_p	11,69	0,60	1,20	12,27	11,07
R_{pm}	9,46	0,34	0,65	9,71	9,06
W_t	11,97	2,05	4,10	14,06	9,96
R_t	26,06	3,21	6,41	29,14	22,73
P_t	32,11	2,25	4,49	34,29	29,80



Slika 8.41. Hrapavost površine ispitnih tijela obrađenih sa staklenim česticama

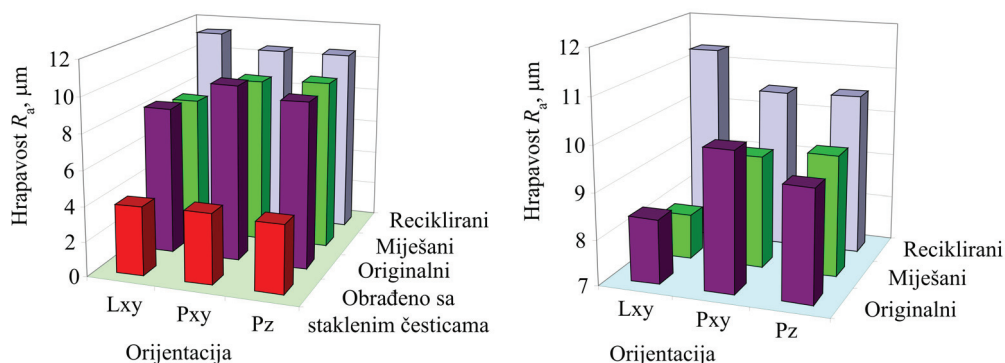
8.3.3.5. Usporedba hrapavosti svih vrsta materijala

Usporedba svih vrsta materijala u odnosu na obradu staklenim česticama prikazana je na slici 8.42.



Slika 8.42. Hrapavost površine ispitnih tijela svih vrsta materijala

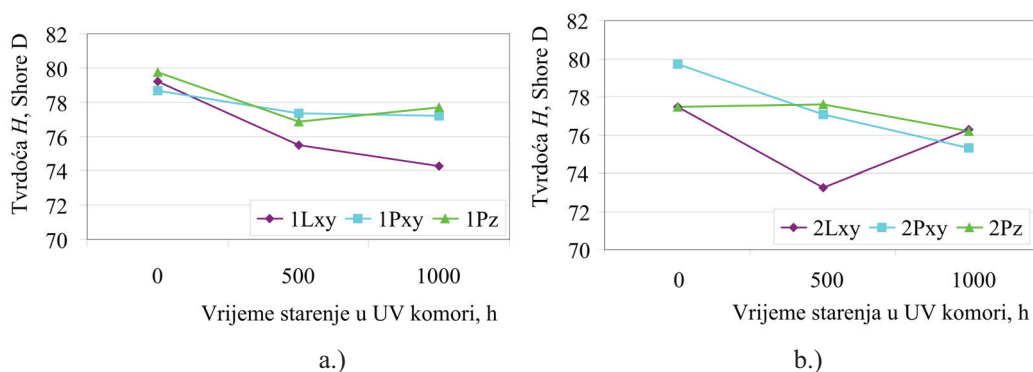
Na slici 8.43 prikazana je dijagramom usporedba sve tri vrste materijala. Može se zaključiti da upotrebom recikliranog materijala hrapavost površine, tj srednje aritmetičko odstupanje profila R_a je najviše, čak do 11,36 μm , dok su najniže vrijednosti kod upotrebe miješanog materijala $\cong 9,5 \mu\text{m}$. No ukoliko je potrebna niža hrapavost, ispitna tijela od sve tri orijentacije potrebno je obraditi staklenim česticama. Hrapavost površine kod naknadne obrade staklenim česticama ovisi koliko dugo se određeni dio površine obrađuje. Dužom obradom skida se veći sloj praha i R_a postaje niži, ali ujedno dolazi do većeg odstupanja izmjera.

Slika 8.43. Usporedba srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a kod svih vrsta materijala

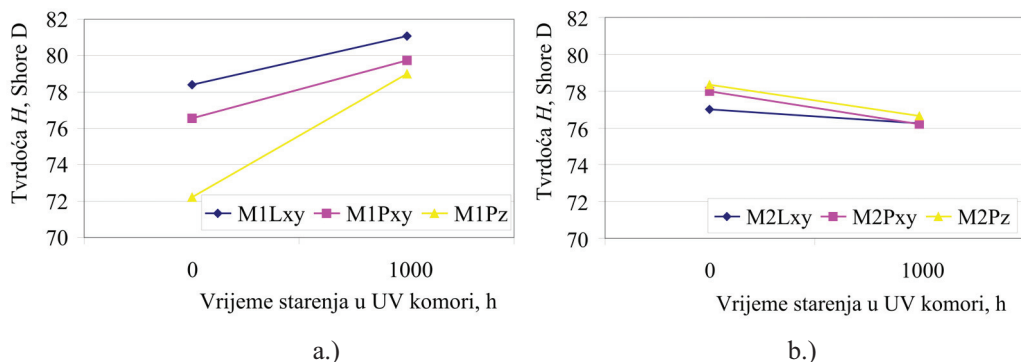
8.3.4. Tvrdoća prototipova

Tvrdoća ispitnih tijela provedena je prema HRN EN ISO 868:2008 i određuje se kako je objašnjeno u poglavlju 6. Tvrdoća je ispitana prije i nakon UV zračenja. Rezultati ispitivanja prikazani su u prilogu 12.37 do 12.50.

Usporedbom tvrdoće rasteznih i savojnih ispitnih tijela kod originalnog materijala prije starenja i poslije starenja pod UV svjetlom nakon 500 h i 1000 h može se primjetiti da tvrdoća pada. Kod ispitnih tijela položaja Lxy tvrdoća nakon dužeg vremena izlaganja UV svjetlosti je najniža (slika 8.44). Iako tvrdoća varira u malim granicama od 80 Shore D do 73 Shore D, orijentacija ispitnog tijela neznatno, ali ipak utječe na tvrdoću pogotovo nakon dužeg vremena starenja.

Slika 8.44. Usporedba tvrdoće originalnog materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti:
a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

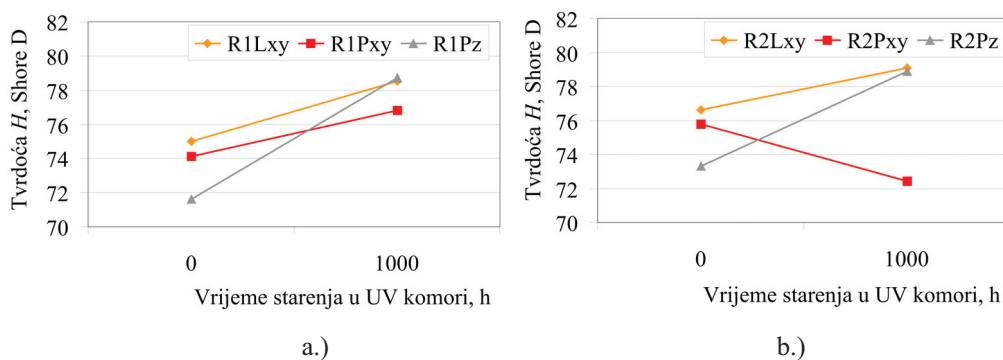
Kad se uspoređi tvrdoća rastezних i savojnih ispitnih tijela načinjenih s miješanim materijalom, tj. nakon izlaganja UV svjetlosti tvrdoća kod rastezних ispitnih tijela raste, dok kod savojnih ispitnih tijela se snižava (slika 8.45).



Slika 8.45. Usporedba tvrdoće miješanog materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti:

a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

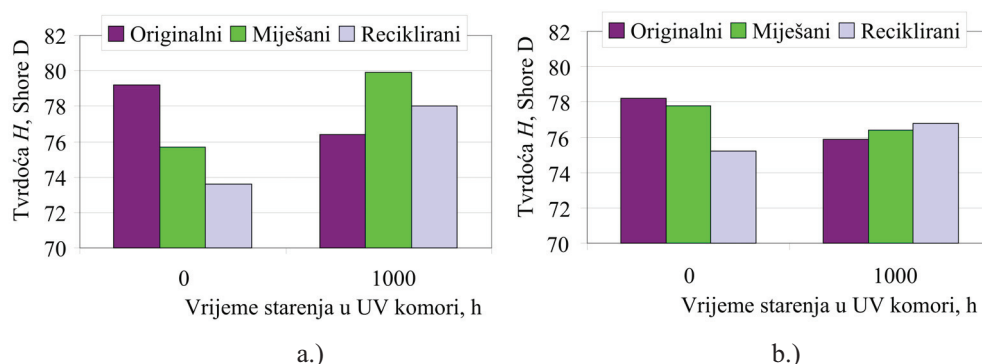
Upotrebom recikliranog materijala tvrdoća nakon dužeg vremena izlaganja UV svjetlosti kod rastezних ispitnih tijela kod sve tri orijentacije raste, dok kod savojnih ispitnih tijela raste kod orijentacije Lxy i Pz, dok kod orijentacije Pxy pada (slika 8.46).



Slika 8.46. Usporedba tvrdoće recikliranog materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti:

a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

Kada se uspoređi tvrdoća originalnog, miješanog i recikliranog materijala, tj. njihove srednje vrijednosti u sve tri orijentacije može se zaključiti (slika 8.47) da se tvrdoća kod originalnog materijala snižava, dok kod miješanog i recikliranog materijala tvrdoća nakon 1000 h UV zračenja raste. Na početku prije starenja najviše vrijednosti tvrdoće ima originalni materijal, a najniže reciklirani materijal, ali nakon 1000 h najvišu tvrdoću ima reciklirani materijal.



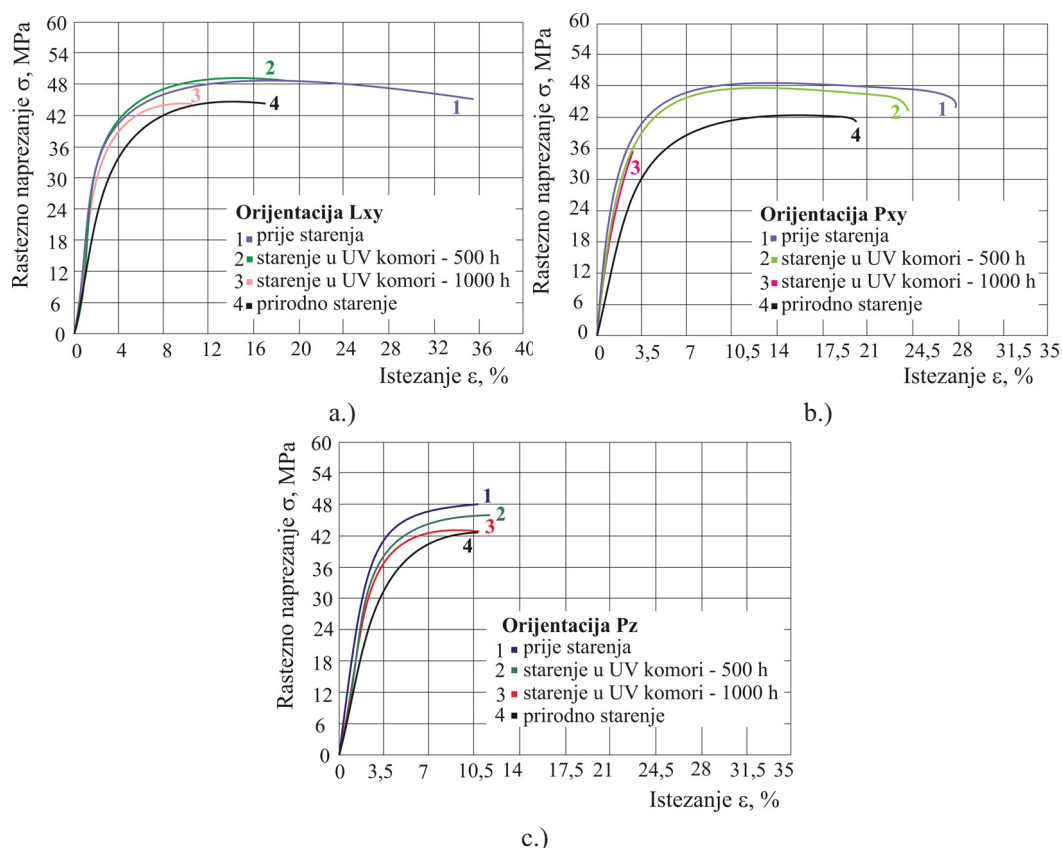
Slika 8.47. Usporedba tvrdoće kod sve tri vrste materijala prije i nakon izlaganja UV svjetlosti:

a.) rastezna ispitna tijela, b.) savojna ispitna tijela

8.3.5. Rastezna svojstva prototipova

8.3.5.1. Rastezna svojstva originalnog materijala

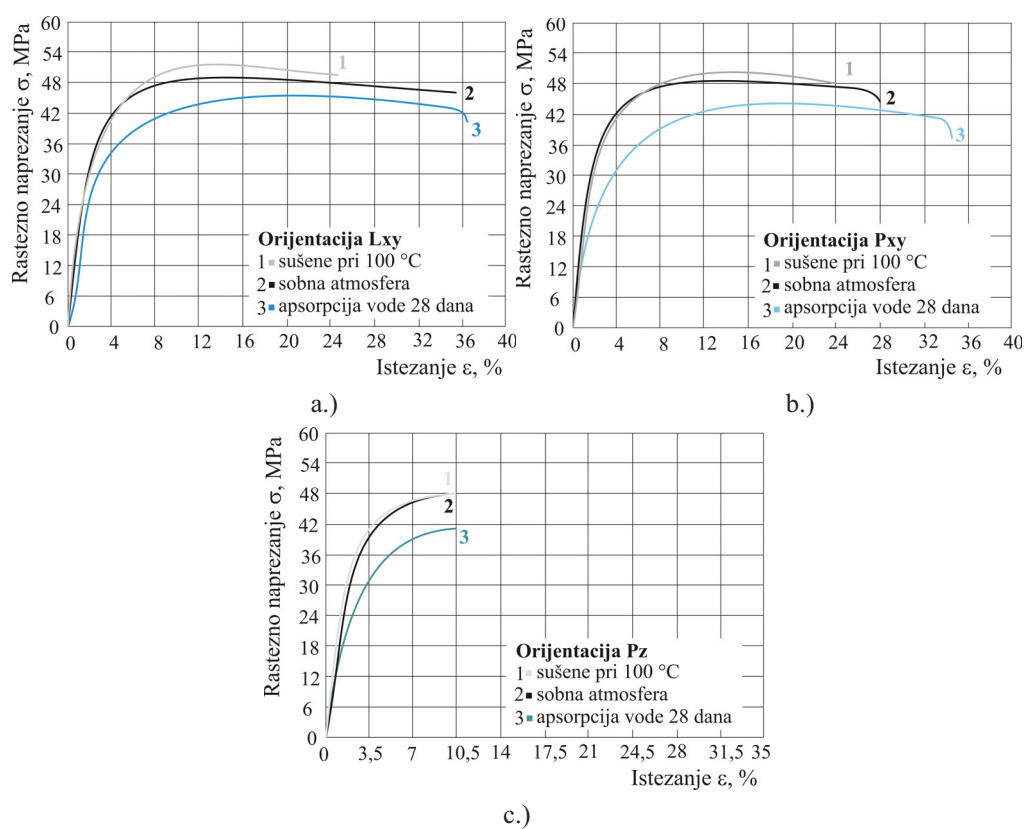
Duljim izlaganjem ispitnih tijela UV svjetlosti kod 100 % originalnog poliamida rastezna svojstva se snižavaju (slika 8.48) kod sve tri orijentacije. Zanimljivo je da kod orijentacije Pz prekidno istežanje ostaje isto nakon 500 h i 1000 h provedenih u komori, te nakon prirodnog starenja, dok se kod orijentacije Lxy i Pxy snižuje za 70 % do 90 %. Odnosno duljim izlaganjem UV svjetlosti snižuje se istežanje kod orijentacija Lxy i Pxy.



Slika 8.48. Dijagram rasteznog naprezanja – istezanja ispitnih tijela s upotrebom originalnog materijala pri UV zračenju: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

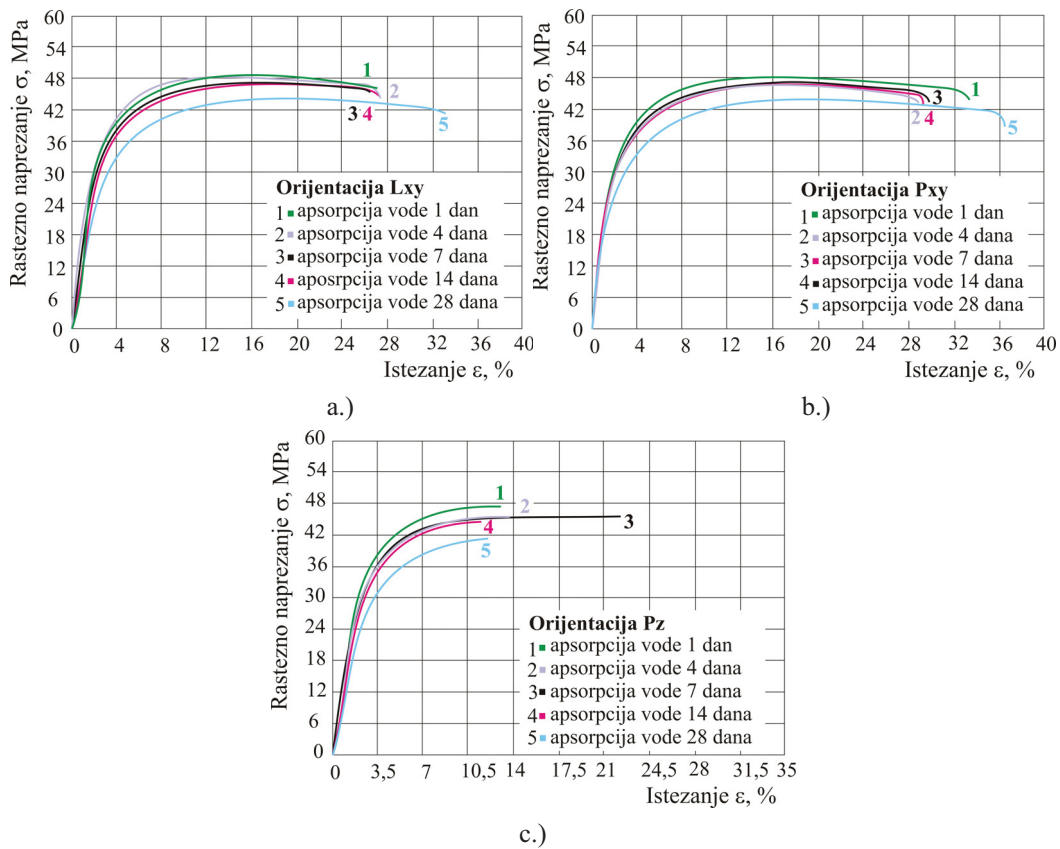
Iz slike se nadalje može zaključiti da ispitna tijela izložena prirodnim atmosferilijama (kiša, vjetar, UV zračenja) zadržavaju dobra svojstva. Rastezna čvrstoća R_m se snižava samo za 10 %, dok se istezanje i modul rastezljivosti kod orijentacija Lxy i Pxy snižuje za skoro pola vrijednosti u usporedbi prije izlaganja atmosferskim uvjetima.

U praksi je puno tvorevina izloženo kišnim uvjetima, tj. vlažnoj atmosferi. Apsorpcijom vode nakon 28 dana pri sobnoj temperaturi kod sve tri orijentacije snižuje se rastezna i prekidna čvrstoća, ali raste prekidno istezanje i to samo kod orijentacija Pxy s 28 % na 35 %. Za usporedbu načinjeno je ispitivanje s ispitnim tijelima koja su prije kidanja temperirana u peći pri 100 °C u vremenu od 2 h. Takva ispitna tijela pokazala su obratnu situaciju – rastezna i prekidna čvrstoća rastu, ali se snižuje prekidno istezanje i to kod orijentacija Lxy i Pxy, dok kod orijentacije Pz prekidno istezanje ostaje isto (slika 8.49).



Slika 8.49. Usporedba različitih atmosferskih uvjeta (suha, normalna i 100 % vlažna atmosfera):
a.) orientacija Lxy, b.) orientacija Pxy, c.) orientacija Pz

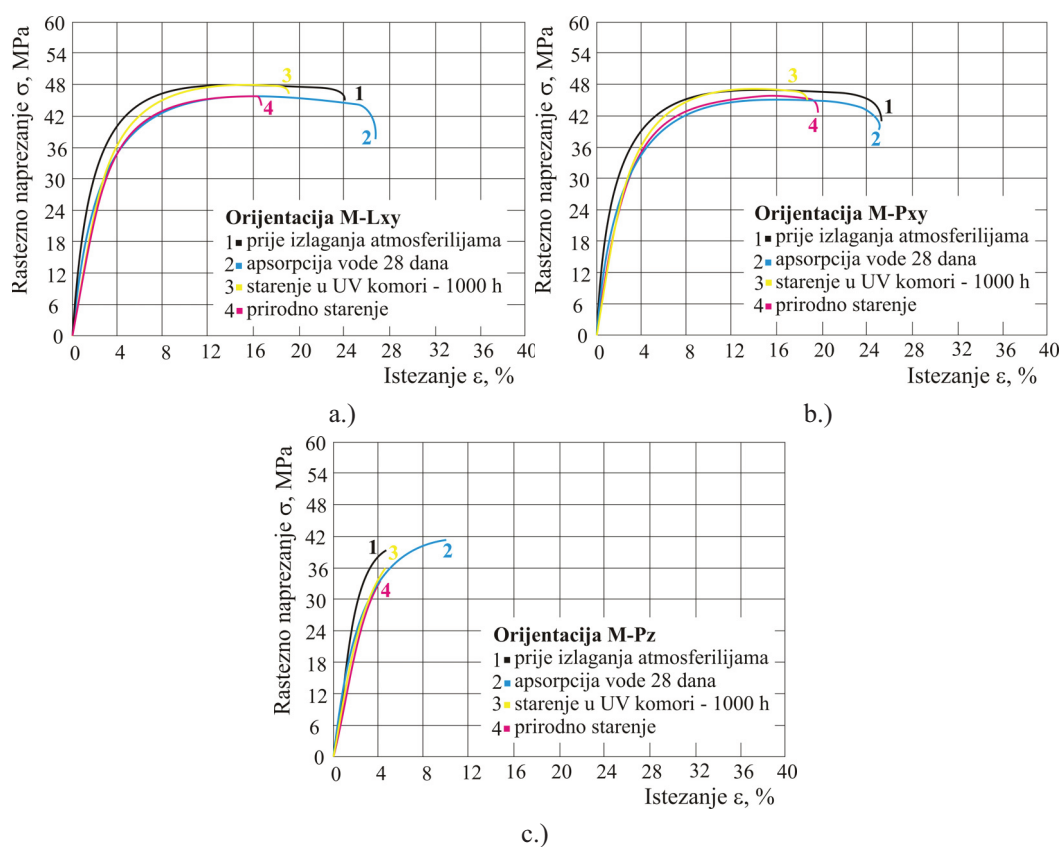
No kada se uspoređi apsorpcija vode u vremenskom razdoblju od 1, 4, 7, 14 i 28 dana primjećuje se da u vremenu do 14 dana ispitna tijela zadržavaju ista svojstva, tek se nakon 28 dana primjećuje sniženje naprezanja (slika 8.50). Vrijednosti svih rastezanih svojstava nalaze se u prilogu 12.51 - 12.60.



Slika 8.50. Dijagram rasteznog napreznja – istezanja kod apsorpcije vode: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

8.3.5.2. Rastezna svojstva miješanog materijala

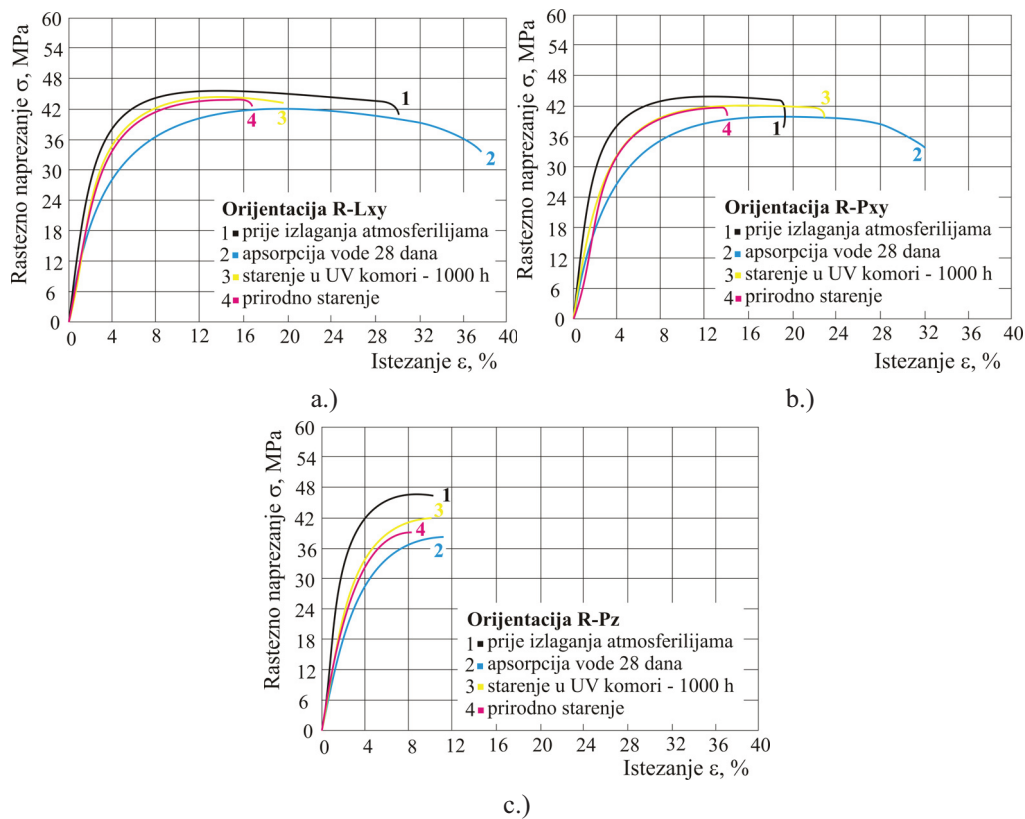
Kod raznih atmosferskih uvjeta (vlažna atmosfera, starenje) miješani materijal zadržava približno iste vrijednosti napreznja, dok se istezanje snižava za oko 50 %. Rastezna čvrstoća kod orijentacije Pz je niža od 42 MPa, dok je kod druge dvije orijentacije (Lxy i Pxy) oko 48 MPa. Istezanje značajno ovisi o orijentaciji tvorevine, jer je kod Pz istezanje svega 5 %, u usporedbi sa orijentacijom Lxy kod koje je istezanje 25 % (slika 8.51). Modul rastezljivosti kod različitih orijentacija ostaje približno isti, ali na njega utječu atmosferski uvjeti, pa starenje snižava početni modul rastezljivosti sa 1,8 GPa na 1,2 GPa. Vrijednosti svih rastezних svojstava se nalaze u prilogu 12.61 - 12.64.



Slika 8.51. Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na miješani materijal: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

8.3.5.3. Rastezna svojstva 100 % recikliranog materijala

Rastezna čvrstoća najniža je nakon izlaganja 100 % vlažnoj atmosferi (tj. apsorpcije vode nakon 28 dana), međutim kod orijentacije Lxy i Pxy voda povisuje prekidno istezanje. Vrijednosti mehaničkih svojstava kod laboratorijskog i prirodnog starenja ne razlikuju se značajno (slika 8.52). Modul rastezljivosti utjecajem raznih atmosferskih uvjeta snizuje se sa početnih 1,7 GPa na 1,1 GPa, te se ponaša isto kao i kod miješanog materijala. Vrijednosti svih rastezних svojstava se nalaze u prilogu 12.65 - 12.68.

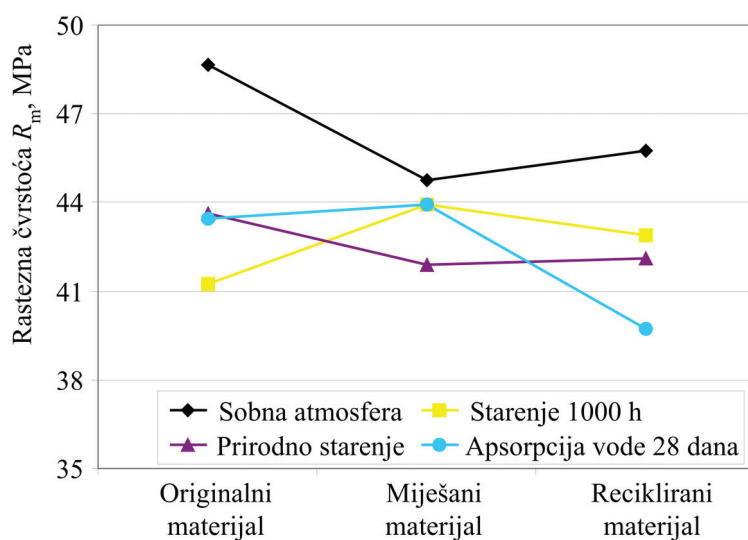


Slika 8.52. Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na reciklirani materijal: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

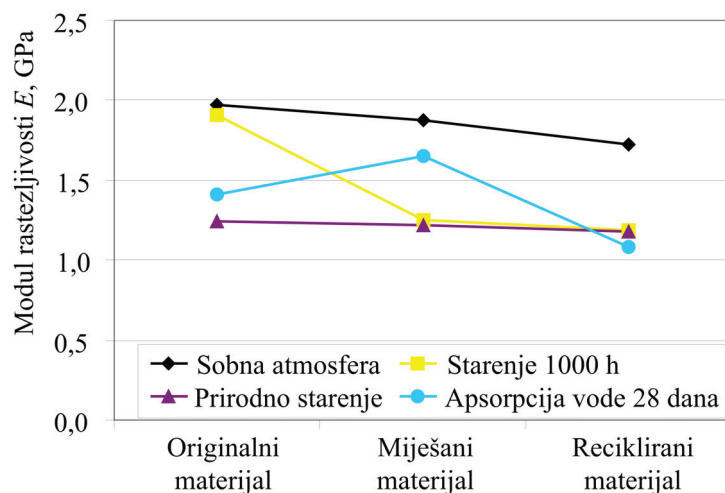
8.3.5.4. Kometa rasteznih svojstava

8.3.5.4.1. Usporedba rasteznih svojstava svih vrsta materijala

Na slikama 8.53 i 8.54 prikazana je usporedba različitih vrsta materijala za neka mehanička svojstva (rastezna čvrstoća R_m i modul rastezljivosti E). Rastezna čvrstoća i modul rastezljivosti najviši su pri upotrebi samo originalnog materijala, dok se vrijednosti miješanog i recikliranog ne razlikuju. Zanimljivo je primjetiti da kod miješanog materijala raste rastezna čvrstoća nakon duljeg vremena UV zračenja, a modul rastezljivosti pri apsorpciji vode.



Slika 8.53. Utjecaj atmosferskih uvjeta na rasteznu čvrstoću kod različitih vrsta materijala

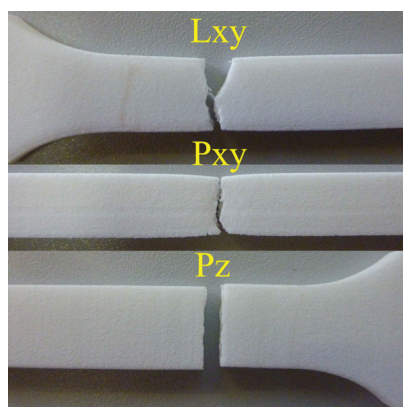


Slika 8.54. Utjecaj atmosferskih uvjeta na modul rastezljivosti kod različitih vrsta materijala

8.3.5.4.2. Usporedba rasteznih svojstava kod različitih orijentacija u izradbenom prostoru stroja

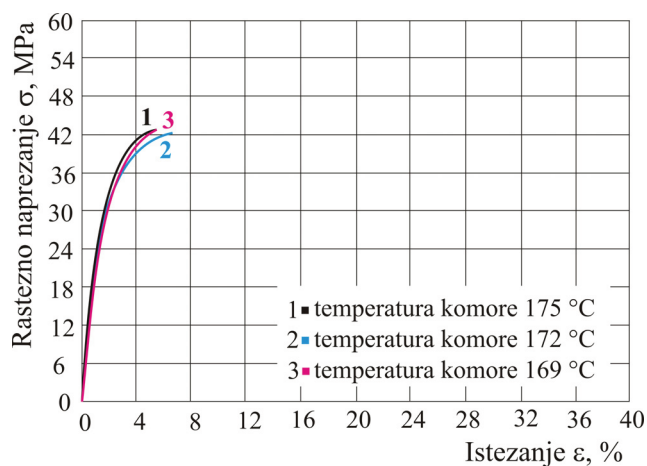
Iz provedenog ispitivanja rasteznih svojstava može se zaključiti da orijentacija okomita na podlogu (P_z) ima najniže vrijednosti prekidnog istežanja, što se ujedno može primjetiti i na vrsti loma prototipa (slika 8.55). Tako se kod orijentacija L_{xy} i P_{xy} , koje omogućuju istežanje i djelomično sređivanje makromolekulnih lanaca u smjeru djelovanja sile, pojavljuje suženje prije

loma, dok u slučaju orijentacije ispitnog tijela u smjeru Pz to nije moguće, pa se javlja linija loma po sloju.



Slika 8.55. Vrsta loma prilikom rastezanja SLS ispitnih tijela

Parametar koji se može podešavati je i temperatura radne komore. Pri upotrebi poliamida ona je ograničena na granice od 169 °C do 175 °C, jer izvan tih granica nije moguće dobro sinterirati slojeve ispitnog tijela. Ispitivanja su pokazala da temperatura radne komore ne utječe na rastezna svojstva prototipa. Rastezno i prekidno naprezanje, kao i prekidno istežanje ostaje isto, dok modul rastezljivosti pri temperaturi 175 °C viši je za 200 MPa. Primjer je prikazan na orijentaciji Pz koja ujedno ima i najniže vrijednosti prekidnog istežanja (slika 8.56).



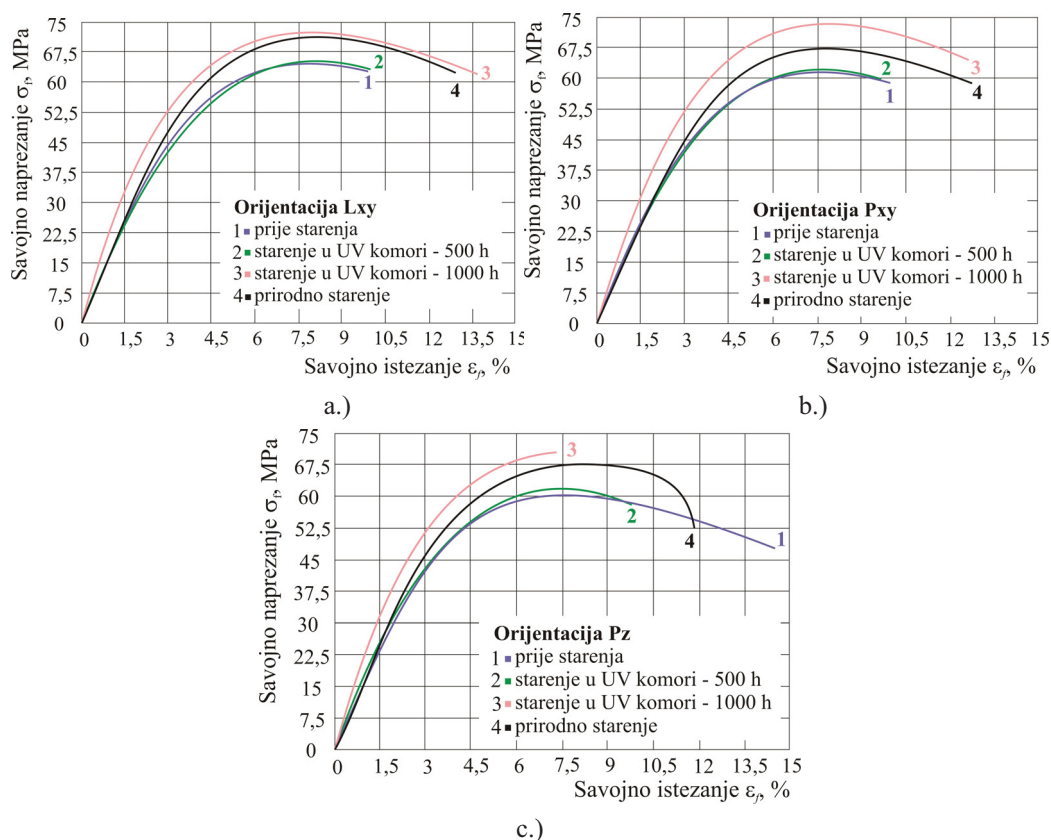
Slika 8.56. Utjecaj temperature radne komore na rastezna svojstva

Iz ispitivanja se može zaključiti da optimalna temperatura pri upotrebi poliamida kod stroja *Formiga P 100* je u ispitanim granicama. Vrijednosti svih svojstava prikazani su u prilogu 12.69.

8.3.6. Savojna svojstva prototipova

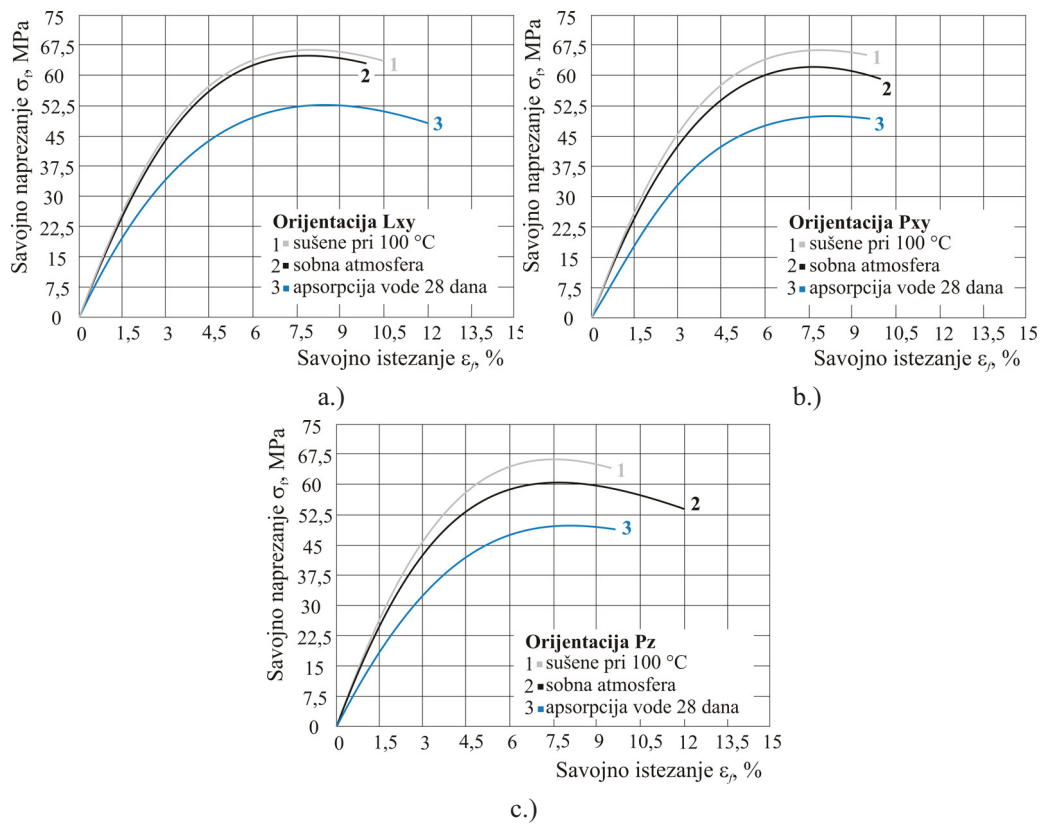
8.3.6.1. Savojna svojstva originalnog materijala

Izlaganjem UV svjetlosti sva savojna svojstva se povišuju (naprezanje, istežanje i modul savitljivosti). Nakon samo 500 h pod UV svjetlom nisu primjećene značajne promjene kod orijentacija prototipa Lxy i Pxy, dok se kod orijentacije Pz savojno prekidno istežanje snizilo za 32 %. Nakon dužeg izlaganja od 1000 h UV svjetlosti kod orijentacija Lxy i Pxy savojna čvrstoća, prekidna savojna čvrstoća, prekidno savojno istežanje i modul savitljivosti rastu, dok kod orijentacija Pz prekidno savojno istežanje nastavlja padati, ali čvrstoće rastu (slika 8.57).



Slika 8.57. Dijagram savojnog naprezanja – istežanja ispitnih tijela s upotrebom originalnog materijala pri UV zračenju: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

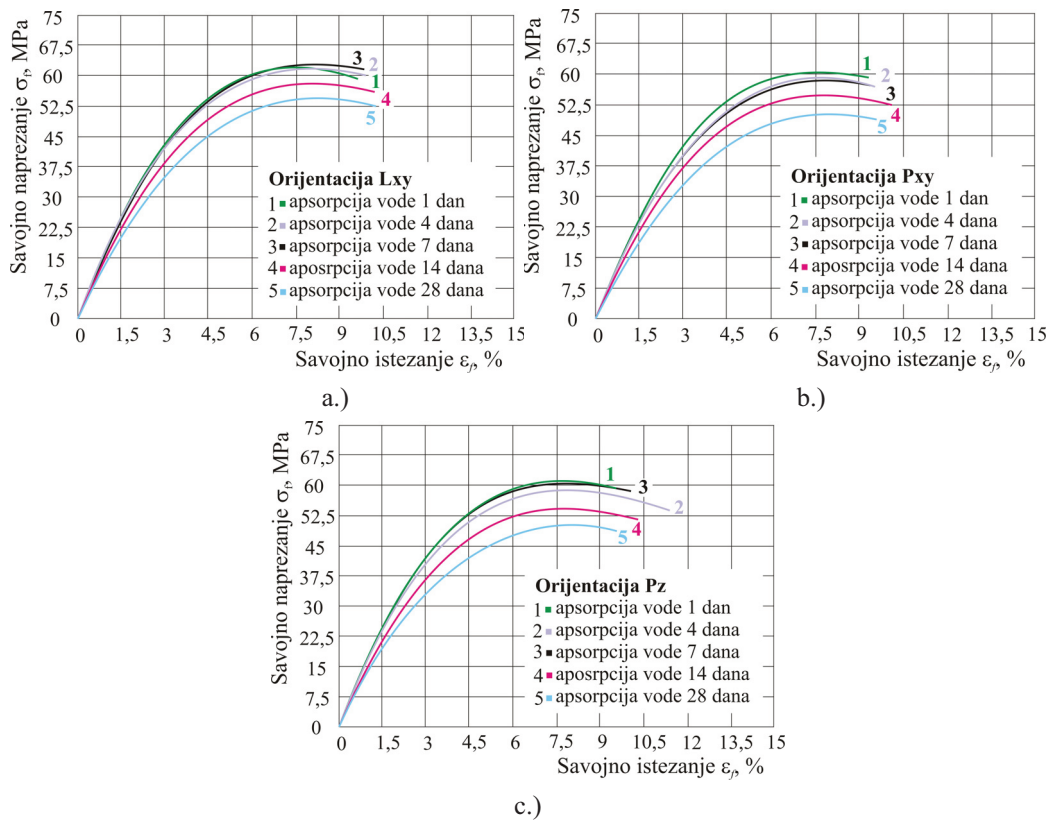
U vlažnoj atmosferi značajno se snižuju savojna svojstva, pogotovo savojna čvrstoća i modul savitljivosti. Zanimljivo je primjetiti da prekidno savojno istežanje ostaje isto (slika 8.58). Kao i kod rasteznih svojstava sušenjem pri 100 °C približno 6 h savojna svojstva, tj. savojna čvrstoća povišuje se za 1 MPa do 5 MPa ovisno od orijentacije prototipa.



Slika 8.58. Usporedba različitih atmosferskih uvjeta (suha, normalna i 100 % vlažna atmosfera):

a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

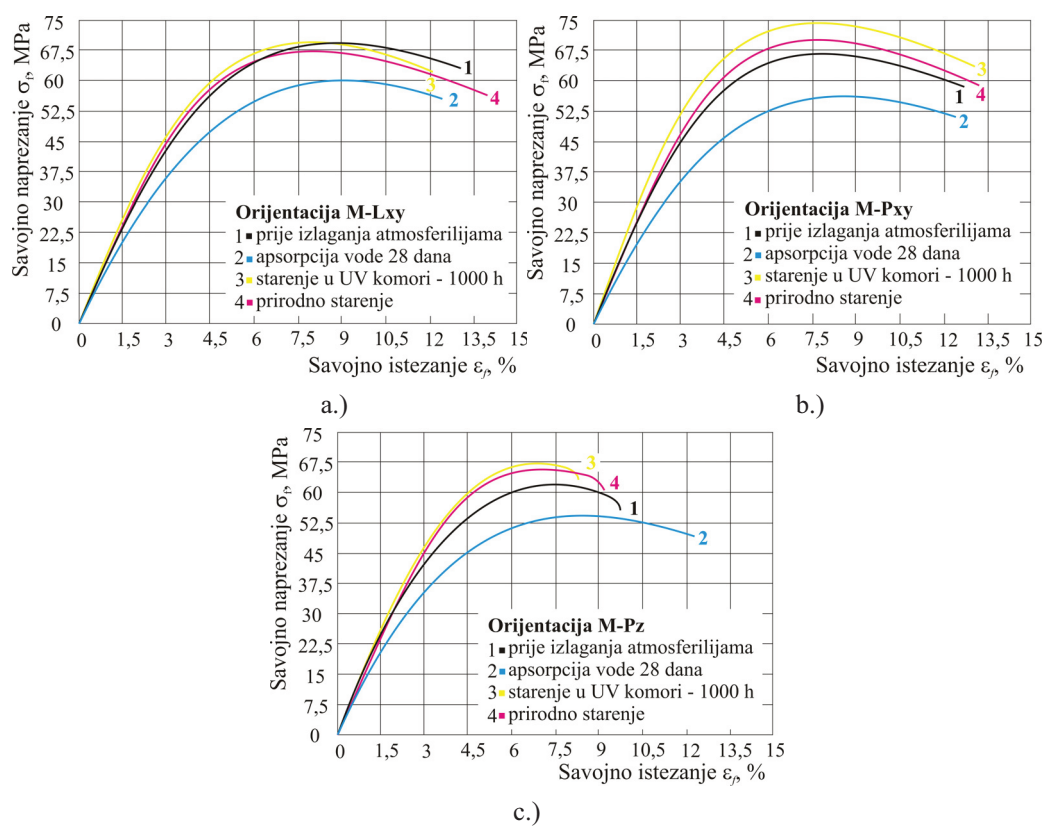
No kad bi se promatralo postepeno sniženje savojnih svojstava u vlažnoj atmosferi, po danima (1, 4, 7, 14 i 28 dana) primjetilo bi se da od 1. dana do 7. dana savojna čvrstoća se neznajčajno snizuje, i tek nakon toga (na slici 8.59 razdoblje od 14 dana i 28 dana) se uočava značajniji pad čvrstoće i modula savitljivosti. No za razliku od čvrstoće i modula, prekidno savojno istezanje ostaje isto tijekom cijelog vremena držanja prototipova u 100 % vlažnoj atmosferi (slika 8.59). Dakle može se zaključiti da većim postotkom upijanja vode modul savitljivosti i savojna čvrstoća se snižavaju, najvjerojatnije uslijed efekta mekšanja uzrokovanim molekulama vode na materijal.



Slika 8.59. Dijagram savojnog naprezanja – istezanja kod apsorpcije vode: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

8.3.6.2. Savojna svojstva miješanog materijala

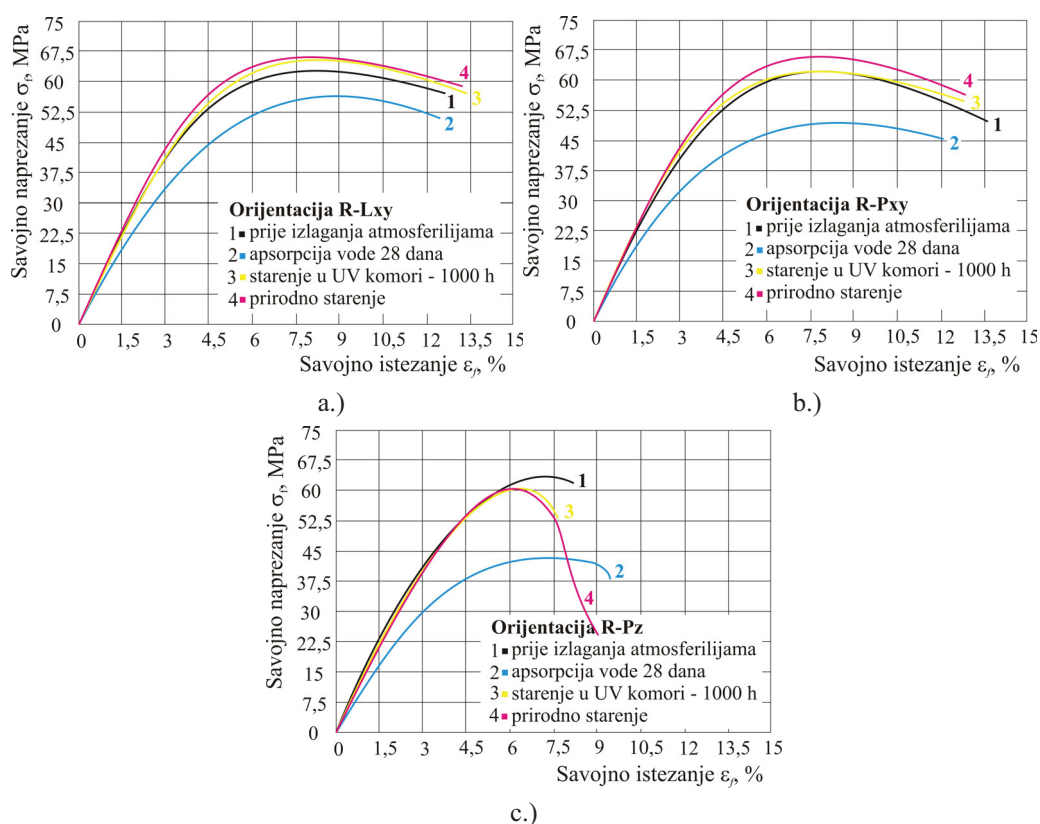
Na slici 8.60 prikazan je dijagram savojno naprezanje – istezanje za miješani materijal. Iz dijagrama je vidljivo da kao i kod originalnog materijala najlošija svojstva su nakon 28 dana apsorpcije vode prototipa u 100 % vlažnoj atmosferi kod sve tri orijentacije. Prekidno savojno istezanje ostaje isto i prije izlaganja atmosferskim uvjetima i nakon UV zračenja i apsorpcije vode.



Slika 8.60. Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na miješani materijal: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

8.3.6.3. Savojna svojstva 100 % recikliranog materijala

Na slici 8.61 prikazana su savojna svojstva pri upotrebi 100 % recikliranog materijala kod sve tri orijentacije.

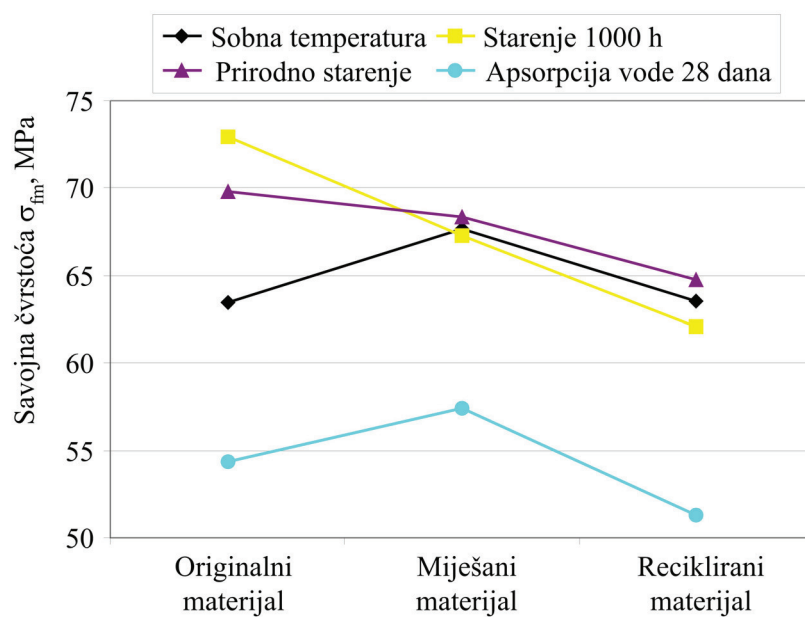


Slika 8.61. Utjecaj raznih atmosferskih uvjeta na reciklirani materijal: a.) orijentacija Lxy, b.) orijentacija Pxy, c.) orijentacija Pz

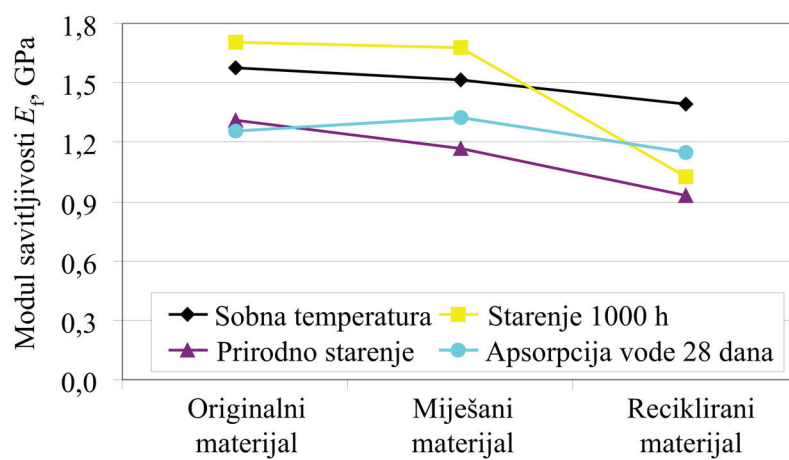
Na slici se može uočiti da se UV zračenjima, bilo to u komori ili prirodno povisuju savojne čvrstoće (savojna čvrstoća i savojna prekidna čvrstoća) i modul savitljivosti E_f , a savojno prekidno istezanje ostaje isto. No prilikom apsorpcije vode čvrstoća se počinje snižavati za 15 % - 16 % ovisno o orijentaciji prototipa.

8.3.6.4. Kometar savojnih svojstava svih vrsta materijala

Usporedbom različitog udjela originalnog materijala primijećuje se da reciklirani materijal ima najnižu savojnu čvrstoću σ_{fm} i modul savitljivosti E_f , dok najviše vrijednosti su kod materijala miješanog u omjeru 50:50 originalnog i recikliranog pri raznim atmosferskim uvjetima (slike 8.62 i 8.63).



Slika 8.62. Utjecaj atmosferskih uvjeta na savojnu čvrstoću kod različitih vrsta materijala



Slika 8.63. Utjecaj atmosferskih uvjeta na modul savitljivosti kod različitih vrsta materijala

9. RASPRAVA REZULTATA

9.1. Rasprava predpokusa

Tijekom izrade prototipne tvorevine, postupkom selektivnog laserskog srašćivanja moguće je podesiti različite parametre koji utječu na svojstva gotove tvorevine. Tijekom izrade se tako mogu podešavati posebno parametri koji izrađuju konturu i jezgru tvorevine. Iz provedene analize može se uočiti da na mehanička svojstva veći utjecaj imaju parametri za podešavanje jezgre tvorevine.

Dosadašnja ispitivanja temeljila su se na jednadžbi za jezgru 5.1 koja povezuje gustoću energije sa snagom lasera, brzinom laserske zrake i razmakom između putanje laserske zrake.

Primjenom centralnog kompozitnog plana pokusa načinjena je analiza iz koje se primjećuje da je kod mehaničkih svojstava jedini utjecajni faktor razmak između putanje laserske zrake, dok je za vrijeme izrade osim razmaka bitna i brzina. No kod mehaničkih svojstava jako je veliko odstupanje od svih modela i koeficijenti determiniranosti ne slijede u potpunosti podatke ($r^2 = 0,5$). Da se smanji odstupanje od modela i za rasteznu i savojnu čvrstoću provedene su mnoge analize, no niti jedna se nije pokazala kao odgovarajuća, iz čega se može zaključiti da parametri (snaga, brzina i razmak između putanje laserske zrake) ovise jedan o drugome, tj. da je jedini mjerodavan parametar za svojstava prototipa gustoća energije i da postoje faktori koji nisu obuhvaćeni tim modelom (npr. promjer laserske zrake, pomak zrake, koeficijent skupljanja, strategija izrade, itd. – poglavlje 7.1.).

9.2. Rasprava o parametrima koji utječu na svojstva prototipa

S obzirom na princip rada SLS postupka (poglavlje 7.1.), osim parametara snage, brzine i razmaka između putanje laserske zrake, na svojstva utječe i promjer laserske zrake, pa je dosadašnju jednadžbu za računanje gustoće energije potrebno proširiti novim faktorom, faktorom preklapanja x :

$$ED = \frac{P}{v \cdot h} \cdot x \quad (9.1)$$

gdje je: ED [J/mm^2] – gustoća energije, P [W] – snaga lasera, v [mm/s] – brzina laserske zrake, h [mm] – razmak između putanje laserske zrake, x – faktor preklapanja laserske zrake je omjer promjera laserske zrake i razmaka između putanje laserske zrake, odnosno on uzima u obzir

najutjecajni faktor dobiven predpokusom – razmak između putanje laserske zrake i promjer koji se kod svakog stroja za SLS mijenja:

$$x = \frac{d}{h} \quad (9.2)$$

gdje je: d [mm] – promjer laserske zrake. Na stroju *Formiga P100* na kojem su rađena ispitivanja d je konstantan i iznosi 0,42 mm.

Ako je razmak između putanje laserske zrake manji od promjera laserske zrake ($h < d$) faktor preklapanja i gustoća energije su preveliki te se snižavaju mehanička svojstva, dolazi do velikih odstupanja od nazivnih izmjera, a i vrijeme izrade je duže. Pri obrnutom slučaju, kad je razmak između putanje laserske zrake veći od promjera laserske zrake ($h > d$), ostaje nesrašćenog materijala i postiže se mrežasta struktura. Takva struktura u nekim tvorevinama ima pozitivno svojstvo (npr. nižu masu), ali sve tvorevine trebalo bi dodatno ojačati nekim postupcima, jer mehanička svojstva nisu zadovoljavajuća.

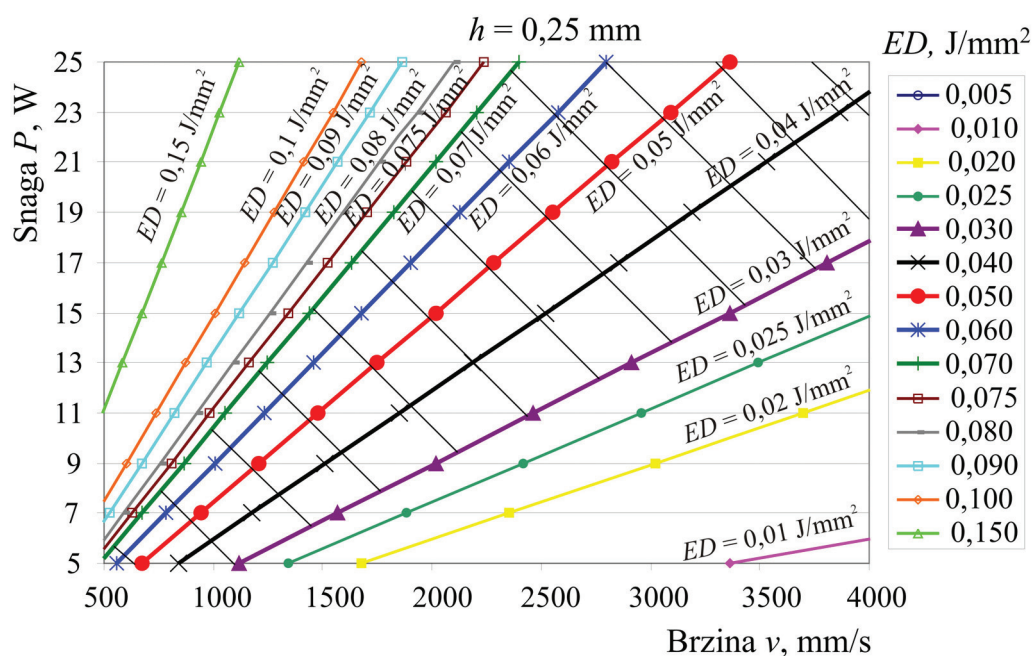
Visoka mehanička svojstva ostvaraju se pri visokoj gustoći energije. No gustoća energije ne smije biti viša od $ED = 0,7 \text{ J/mm}^2$, jer pri tome dolazi do pregrijavanja materijala i snižavanja mehaničkih svojstava. Pri toj vrijednosti i masa postiže svoj maksimum za rastezna ispitna tijela $m = 8,2 \text{ g}$, a za savojna svojstva $m = 3,2 \text{ g}$.

Vrijeme izrade ne ovisi samo o unosu energije, snazi, brzini i razmaku između putanje laserske zrake nego i o popunjenosti komore i visine u smjeru osi z . Vrijeme izrade kraće je ako su brzina i razmak između putanje laserske zrake viši, ali povišenjem parametra h padaju mehanička svojstva. Kombinacijom svih tih parametara trebalo bi se zadržati na što nižoj gustoći energije ako se želi skratiti ukupno vrijeme ciklusa proizvodnje.

Iz čega proizlazi da je optimalna gustoća energije za proizvodnju prototipova dobrih mehaničkih svojstava, debljine sloja 0,1 mm, na stroju *Formiga P100* $ED = 0,05 \text{ J/mm}^2$, no osim te gustoće energije, preporučuje se uzeti i vrijednosti gustoće energije od $0,03 \text{ J/mm}^2$ do $0,07 \text{ J/mm}^2$, koje su na dijagramu 9.1 prikazane unutar šrafiranog područja. U tim granicama postižu se zadovoljavajuća mehanička svojstva i ne dolazi do promjena izmjera tvorevine.

No postavlja se pitanje šta se dešava ako se debljina sloja povisi ili snizi sa standardnih 0,1 mm. Sa višim debljinama sloja laser jako gubi snagu (odnosno sposobnost za taljenje materijala), pa se treba uzeti viša snaga i brzina, jer pri višim brzinama i višim debljinama sloja dobije se tvorevina dobrih mehaničkih svojstava u kraćem vremenu.

Dijagram za odabir parametara stroja prikazan je na slici 9.1.



Slika 9.1. Određivanje parametara izrade kod SLS postupka

9.3. Rasprava o utjecaju različite vrste materijala i položaja prototipa u izradbenom prostoru stroja

Velika prednost selektivnog laserskog srašćivanja je i mogućnost ponovne upotrebe već korištenog materijala. Materijal je potrebno obavezno prosijati, odnosno odvojiti eventualne veće nakupine srašćenog praha ili nečistoća koje se mogu pojaviti nakon izrade. Primjenom samo originalnog praha prvi sloj se ljušti.

Prototip je moguće u izradbeni položaj stroja postaviti u više orijentacija: xy (Lxy), xz, xy (Pxy) ravninu, sa što višom visinom s obzirom na z os (Pz) ili pod nekim kutem. Ovisno o tome mijenjaju se i mehanička svojstva, izmjere, postojanost na atmosferske uvjete, itd.

9.3.1. Rasprava o apsorpciji vode

Nakon 7 dana Lxy i Pxy ispitna tijela od originalnog i miješanog materijala potonula su, tj. njihova gustoća je nakon apsorpcije vode postala viša od gustoće vode. Ispitna tijela s orijentacijom Pz su potonula tek nakon 21. dana. Ispitna tijela od recikliranog materijala s

orijentacijom Lxy su tek nakon 14 dana potonula, dok Pxy i Pz su i nakon 28 dana ispitivanja ostala plutati (gustoća im je ostala niža od gustoće vode).

Apsorpcijom vode c materijali mijenjaju masu. Kod poliamida koji se upotrebljava u SLS postupku do 4. dana masa linearno raste, do 7. dana postiže maksimalnu vrijednost (nakon 28 dana masa rasteznih ispitnih tijela je za originalni materijal $m = 8,1407$ g, za miješani $m = 8,0884$ g i za reciklirani $m = 7,9154$ g, dok je kod savojnih ispitnih tijela originalni materijal $m = 3,1914$ g, miješani $m = 3,1831$ g i reciklirani $m = 3,1072$ g). Najvišu masu ima orijentacija Lxy kod originalnog materijala te ona nakon 28 dana iznosi $8,3085$ g, a kod savojnih $3,2947$ g. Ovisno o vrsti materijala najmanju masu tijekom cijelog perioda apsorpcije imaju ispitna tijela načinjena od recikliranog materijala, no oni ujedno i apsorbiraju najviše količine vode (originalni materijal $c \approx 1,28$ %, miješani materijal $c \approx 1,75$ % i reciklirani materijal $c \approx 1,93$ %). Također najviše vode apsorbira orijentacija Pz (kod recikliranog materijala $c \approx 2$ %).

Higroskopna priroda poliamida je važan faktor koji se mora uzeti u obzir za određenu primjenu tvorevine. Iz analize proizlazi da poliamid 12 koji se najčešće upotrebljava u selektivnom laserskom srašćivanju ima višu apsorpciju vode u usporedbi s tvorevinom izrađenom klasičnim postupkom izrade polimera, npr. injekcijskim prešanjem.

Takva velika raznolikost u postotku apsorpcije vode može se protumačiti različitom strukturom materijala uzrokovanom upotrebom različitog postotka već upotrebljenog materijala te zbog toga i različitom sposobnošću apsorpcije vode.

9.3.2. Rasprava o izmjerama prototipa

Prilikom hlađenja prototipa dolazi do skupljanja materijala PA 12. Prema proizvođaču trebalo bi izmjere povećati u x i y osi za 3,4 %, a u z osi se kompenzira od 0 mm do visine 300 mm od 2,2 % do 1,6 % da se dobiju tražene izmjere. Takva kompenzacija ne dovodi svaki put do željenih tolerancija, te uslijed toga dolazi do velikih odstupanja u z osi. Što je viša visina, izmjere izlaze iz tolerancija koje prema normi iznose $\pm 0,2$ mm. Preporučuje se, ako je moguće, orijentirati prototip sa što manjom visinom (os z). Vrsta materijala ne utječe na izmjere.

9.3.3. Rasprava o hrapavosti materijala

Hrapavost materijala R_a kod originalnog ($R_a = 8,41$ μm) i miješanog materijala ($R_a = 7,99$ μm) najniža je kod orijentacije Lxy, dok je kod recikliranog materijala najniža hrapavost kod orijentacije Pxy ($R_a = 10,5$ μm). Najviša hrapavost kod originalnog materijala ima orijentacija

Pxy ($R_a = 10,04 \mu\text{m}$), kod miješanog orijentacija Pz ($R_a = 9,65 \mu\text{m}$), a kod recikliranog orijentacije Lxy ($R_a = 11,36 \mu\text{m}$). Iz navedenog može se primjetiti da hrapavost materijala je nešto viša ako se upotrebljava reciklirani materijal, što je i logično jer takav materijal je više puta prerađivan. Ono što preporučuje proizvođač je obrada površine staklenim česticama, jer se srednje aritmetičko odstupanje profila R_a snizi na vrijednost od $4 \mu\text{m}$, ali tu treba biti jako pažljiv jer se prilikom toga odstranjuje određeni površinski sloj praha.

9.3.4. Rasprava o utjecaju atmosferskih uvjeta na mehanička svojstva

9.3.4.1. Rasprava o tvrdoći

Tvrdoća kod originalnog materijala nakon 1000 h UV zračenja se snižava, dok kod miješanog i recikliranog materijala tvrdoća raste. Prije izlaganja UV svjetlosti najviše vrijednosti tvrdoće ima originalni materijal, a najniže reciklirani materijal, ali nakon 1000 h najvišu tvrdoću ima reciklirani materijal (81 Shore D). Tvrdoća se kod različitih orijentacija prije i poslije UV svjetlosti mijenja u granicama od 71 Shore D do 81 Shore D, pa se može zaključiti da i položaj prototipa u izradbenom prostoru ima mali utjecaj na tvrdoću.

9.3.4.2. Rasprava o rasteznim svojstvima

Originalni materijal: Duljim izlaganjem UV svjetlosti kod originalnog materijal rastezna svojstva se snižavaju kod sve tri orijentacije. Kod orijentacije Pz prekidno istezanje ostaje isto nakon 500 h i 1000 h provedenih u komori, te nakon prirodnog starenja, dok kod orijentacije Lxy i Pxy snižuje se za 70 % - 90 %. Odnosno duljim izlaganjem UV svjetlosti kod orijentacija Lxy i Pxy snižava se istezanje materijala.

Apsorpcijom vode nakon 28 dana pri sobnoj temperaturi kod sve tri orijentacije snižuje se rastezna i prekidna čvrstoća, ali raste prekidno istezanje i to samo kod orijentacija Pxy s 28 % na 35 %. Ali sušenjem prototipa pri $100 \text{ }^\circ\text{C}$ u vremenu od 2 h rastezna i prekidna čvrstoća rastu, ali se snižuje prekidno istezanje i to kod orijentacija Lxy i Pxy, dok kod orijentacije Pz prekidno istezanje ostaje isto. Ista rastezna svojstva pri vlažnoj atmosferi prototip zadržava sve do 28 dana.

Miješani materijal: Miješani materijal kod raznih atmosferskih uvjeta (vlažna atmosfera, UV zračenje) zadržava približno isto naprezanje, dok istezanje se snižava za oko 50 %. Rastezna čvrstoća kod orijentacije Pz je niža od 42 MPa, dok je kod druge dvije orijentacije (Lxy i Pxy) oko 48 MPa. Istezanje također jako ovisi o orijentaciji tvorevine, jer je kod Pz istezanje svega 5 %, u usporedbi sa orijentacijom Lxy kod koje je istezanje 25 %. Modul rastezljivosti kod

različitih orijentacija ostaje približno isti, ali se starenjem početni modul rastezljivosti snižava s 1,8 GPa na 1,2 GPa.

Reciklirani materijal: Rastezna čvrstoća najniža je nakon izlaganja 100 % vlažnoj atmosferi (tj. apsorpcije vode nakon 28 dana), međutim kod orijentacije L_{xy} i P_{xy} voda povisuje prekidno istezanje zbog povećane orijentiranosti makromolekula. Modul rastezljivosti utjecajem raznih atmosferskih uvjeta snizuje se sa početnih 1,7 GPa na 1,1 GPa, te se ponaša isto kao i kod miješanog materijala.

Vrsta materijala kao i orijentacija imaju veliki utjecaj na rastezna svojstva. Miješani i reciklirani materijal ima pri UV zračenju skoro jednaku rasteznu čvrstoću i modul rastezljivosti. No pri apsorpciji vode najlošija svojstva ima reciklirani materijal, jer on i najviše vode upije. U narednim ispitivanjima trebalo bi ponoviti ispitivanja apsorpcije vode kod recikliranog materijala i provjeriti postotak upijanja. Prije izlaganja atmosferskim uvjetima, bilo UV zračenju ili apsorpciji vode, najbolja rastezna svojstva imaju prototipovi načinjeni samo od originalnog materijala, no nakon određenog vremena izlaganja atmosferilijama dolazi do poboljšanja nekih svojstva kod miješanog i recikliranog materijala. To se vjerojatno može pripisati tzv. efektu iscjeljivanja koji je uobičajen u početnim fazama djelovanja fizikalno aktivnih medija. Ulaženje molekula apsorbirane vode, prije svega u amorfnu područja, omogućuje napuštanje unutarnjih naprezanja nastalih npr. uslijed postupaka pripreme materijala i djelomično sređivanje makromolekula u mikropodručja, što dovodi do poboljšanja svojstava. [74]

Obzirom na orijentaciju prototipa može se zaključiti da se čvrstoće ne razlikuju previše, ali prekidno istezanje je kod orijentacije P_z niskih vrijednosti u usporedbi sa druge dvije orijentacije, svega 5 %. Do toga dolazi jer prilikom razvlačenja ispitno tijelo kod orijentacije P_z točno pukne između dva sloja.

9.3.4.3. Rasprava o savojnim svojstvima

Originalni materijal: Izlaganjem UV svjetlosti sva savojna svojstva se povisuju (naprezanje, istezanje i modul savitljivosti), dok se nakon apsorpcije vode od 28 dana snižavaju, pogotovo savojna čvrstoća i modul savitljivosti. Zanimljivo je primjetiti da prekidno savojno istezanje ostaje isto. Kao i kod rasteznih svojstava sušenjem na 100 °C približno 6 h savojna čvrstoća povisuje se za do 5 MPa ovisno o orijentaciji prototipa.

Tek nakon 7 dana apsorpcije vode uočava se značajniji pad čvrstoće i modula savitljivosti. No za razliku od čvrstoće i modula, prekidno savojno istezanje ostaje isto tijekom cijelog perioda držanja prototipova u 100 % vlažnoj atmosferi, iz čega se može zaključiti da većim postotkom upijanja vode modul savitljivosti i savojna čvrstoća se snižavaju, najvjerojatnije uslijed efekta mekšanja uzrokovanim molekulama vode na materijal.

Miješani materijal: Kod miješanog materijala kao i kod originalnog materijala najniža svojstva su nakon 28 dana apsorpcije vode prototipa u 100 % vlažnoj atmosferi kod sve tri orijentacije. Prekidno savojno istežanje ostaje isto i prije izlaganja atmosferskim uvjetima i nakon UV zračenja i apsorpcije vode.

Reciklirani materijal: UV zračenjima, u komori ili prirodno, kod recikliranog materijala povisuju se savojna čvrstoća i savojna prekidna čvrstoća i modul savitljivosti E_f , a savojno prekidno istežanje ostaje isto. No prilikom apsorpcije vode čvrstoća se počinje snižavati za približno 16 % ovisno o orijentaciji prototipa.

Usporedbom različitog udjela originalnog materijala primjećuje se da reciklirani materijal ima najnižu savojnu čvrstoću σ_f i modul savitljivosti E_f , dok najviše vrijdnosti su kod materijala miješanog u omjeru 50:50 originalnog i recikliranog pri raznim atmosferskim uvjetima.

Dodatno očvršćivanje UV zračenjem povisuje savojnu čvrstoću budući da su molekule polimera zajedno povezane u lance, međutim rastezna čvrstoća se snižava jer dolazi do smanjene pokretljivosti lanaca.

Ukupnom usporedbom rasteznih i savojnih svojstava, pri UV zračenjima, primjećuje se da se prototip ponaša suprotno, rastezna svojstva se snižuju, dok savojna svojstva se povisuju. Zanimljivo je da takvo ponašanje ima i najlošija orijentacija Pz. Najviša rastezna čvrstoća R_m od 51 MPa postiže se sušenjem tvorevine nakon izrade, minimalno 2 h pri 100 °C, a najviša savojna čvrstoća od 74 MPa izlaganjem UV zračenjima od 1000 h.

Iz provedenih ispitivanja vezanih za vrstu materijala može se zaključiti da se svojstva snižavaju upotrebom samo recikliranog materijala, ali ona ipak ostaju u zadovoljavajućim granicama, pa preporuka je da se materijal koji je bio upotrebljavan više puta, ne baca, nego primjenjuje za neke manje zahtjevne tvorevine.

9.4. Usporedba svojstava tvorevine načinjene klasičnim postupkom prerade polimera i SLS postupkom

Pravilnim mijenjanjem parametara kod postupka selektivnog laserskog srašćivanja svojstva prototipa mogu se približiti svojstvima tvorevina koja su načinjena klasičnim postupcima prerade. U tablici 9.1 dana je usporedba svojstava materijala PA 12 načinjena s injekcijskim prešanjem, selektivnim laserskom srašćivanjem dobivenih od proizvođača i provedenim ispitivanjima.

Tablica 9.1. Svojstva PA 12 načinjena klasičnim postupcima prerade i selektivnim laserskim srašćivanjem dobivenih od proizvođača i provedenim ispitivanjima

Svojstva	Injekcijsko prešanje [74]	SLS – proizvođač [26]	Najbolji rezultati dobiveni ispitivanjem
Gustoća ρ , g/cm ²	1,01	0,9 – 0,95	0,96
Apsorpcija vode pri 23 °C i 100 % vlažnosti c , %	1,5	-	0,71
Rastezna čvrstoća R_m , MPa	40	45 ± 3	51
Prekidno istežanje ε_p , %	50 – 350	20 ± 5	35,27
Modul rastezljivosti E , MPa	2400	1700 ± 150	2366
Savojna čvrstoća σ_{fm} , MPa	60	-	74
Modul savitljivosti E_f , MPa	2450	1240 ± 130	1793
Tvrdoća H , Shore D	72	-	81,1
Hrapavost neobrađenog prototipa R_a , μm	-	-	7,99

Provedenim ispitivanjima povisila se rastezna i savojna čvrstoća za približno 10 MPa i snizila se apsorpcija vode. Modul rastezljivosti je isti kao i kod injekcijskog prešanja, dok SLS proizvođač daje i modul rastezljivosti i modul savitljivosti dosta niži nego što je dobiveno ispitivanjima. Nažalost provedenim ispitivanjem nije dobiveno visoko prekidno istežanje, no ono je ipak više nego što garantira proizvođač.

9.5. Kritika vlastitog rada i smjerovi budućih istraživanja

U radu je proučavan utjecaj snage lasera, brzine laserske zrake, promjera laserske zrake i razmaka između putanje laserske zrake na svojstva tvorevine. U daljnjim istraživanjima trebalo bi ustanoviti utjecaj i ostalih parametara karakterističnih za postupak selektivnog laserskog srašćivanja (pomak zrake, koeficijent skupljanja materijala i strategija izrade) na mehanička svojstva, izmjere, hrapavost površine i vrijeme izrade.

U cilju smanjenja otpadnog materijala, u istraživanjima su ispitana mehanička svojstva tvorevine načinjene s miješanjem materijala u omjeru 50 % recikliranog i 50 % originalnog, te 100 % recikliranog nakon 3. ciklusa upotrebe, ali trebalo bi ispitati i druge omjere i nakon koliko ciklusa je moguće primjenjivati takav materijal. Pri ispitivanju ponovljivosti rezultata sa različitim omjerima recikliranog i originalnog praha trebalo bi se osvrnuti na maseni protok taljevine MFR koji ima veliki utjecaj na hrapavost površine.

Apsorpcija vode ispitana je na gotovim tvorevinama od poliamida 12 (PA 12) koji se sastoji od amorfnih i kristalnih područja. Molekula vode miješa se sa područjima u polimernim lancima i snižava temperaturu staklišta T_g i čvrstoću. Ali isto tako sušenjem tvorevine mehanička svojstva se povisuju. Istraživanje bi trebalo proširiti i na sušenje materijala prije izrade tvorevina i ustanoviti kako se ponaša temperatura staklišta i kako to utječe na mehanička svojstva.

Nadalje, ispitivanje bi trebalo proširiti i na druge vrste materijala koji su dostupni za postupak selektivnog laserskog srašćivanja, a ne samo na PA 12, ali i na materijale koji se primjenjuju u klasičnim postupcima prerade polimera sa raznim dodacima te ustanoviti utjecaj parametara na njihova svojstva. Pritom treba paziti na veličinu zrna materijala.

U radu je analiziran samo jedan aditivni postupak proizvodnje tvorevina. Osim primjenjenog selektivnog laserskog srašćivanja trebalo bi ustanoviti kako na svojstva gotove tvorevine načinjene drugim aditivnim postupcima utječu parametri izrade i atmosferilije (UV zračenje i apsorpcija vode). Na temelju takve opširnije baze podataka moglo bi se donijeti odluka koji materijal i postupak upotrijebiti za određenu tvorevinu i koje parametre izrade primjeniti.

10. ZAKLJUČAK

U radu su opisani najzastupljeniji aditivni postupci proizvodnje prototipova, odnosno gotovih, funkcionalnih tvorevina. Ti postupci predstavljaju znatne uštede vremena i troškova jer otklanjaju neke skupe faze konstruiranja: izrada kalupa/alata, toplinska obrada, završna obrada površine, itd. Neovisno o kompliciranosti geometrije oblika aditivnim postupcima moguće je napraviti tvorevinu u jednom koraku, koji ne zahtijeva upotrebu kalupa, CNC strojeva ili ručnu izradu. U radu je također pokazano, da je stvaranje jedne nove tvorevine multidisciplinarni posao koji se brine ne samo o tehničkoj strani tvorevine već i o ostalim aspektima proizvodnje.

Aditivnim postupcima moguće je izraditi tvorevine vrlo složenih oblika čija je izrada do pojave aditivnih postupaka bila ograničena.

Za sve tvorevine najvažnija je trajnost, bez obzira odnosi li se to na oblik (dimenzijska stabilnost), mehanička svojstva (rastezna i savojna čvrstoća ili tvrdoća) ili postojanost na atmosferske uvjete (starenje ili apsorpcija vode).

Budući da su mehanička svojstva važna za funkcionalne tvorevine, ključno je poznavati utjecaj raznih proizvodnih parametara na mehanička svojstva tako da se mogu napraviti poboljšanja kroz odabir najboljih postavki stroja. Kod selektivnog laserskog srašćivanja na svojstva prototipa osim dosadašnjih parametara (gustoća energije, snaga lasera, brzina laserske zrake, razmak između putanje laserske zrake) provedenim ispitivanjima utvrđeni su novi parametri (promjer laserske zrake, faktor preklapanja, vrsta materijala i orijentacija prototipa u izradbenom prostoru) koji utječu na mehanička svojstva čime je potvrđena glavna hipoteza rada.

Kratko vrijeme izrade je u aditivnim postupcima jako bitan čimbenik, koji se postiže s niskom gustoćom energije.

Tvorevine izrađene SLS postupkom pokazuju dobra mehanička svojstva izložena raznim atmosferskim uvjetima (apsorpcija vode i UV zračenja). Svojstva se snižavaju, ali treba imati na umu da su ispitivanja provedena nakon skoro 3 godine prirodnog izlaganja, nakon kojih bi i neke tvorevine načinjene klasičnim postupcima prerade polimera pokazale gubitak nekih svojstava. Kod savijanja prekidno savojno istezanje kod svih vrsta materijala i sve tri orijentacije se ne mijenja izlaganjem svim atmosferilijama.

Apsorpcija vode nepovoljno utječe na mehanička svojstva, bilo to rastezna ili savojna. Čvrstoće se snižavaju što dulje prototip ostane u vlažnoj atmosferi, zato što su molekule poliamida podložne upijanju različitog postotka vode ovisno o orijentaciji i udjelu originalnog tj. recikliranog materijala što ujedno znači i višu masu.

Mnogi proizvođači tvrde da treba izbjegavati izradu prototipova od samo recikliranog materijala i u z smjeru (orijentacija Pz), no analiza je pokazala da mehanička svojstva ne odstupaju značajno od druge dvije orijentacije i vrste materijala, jedino treba paziti na izmjere prilikom hlađenja prototipa (tj. skupljanje u osi z) i hrapavost.

Razvoj aditivnih postupaka proizvodnje prototipova i kalupa intenzivno se razvija i širi iz dana u dan, te u budućnosti sve više poboljšanja aditivnih postupaka u brzini, preciznosti, primjeni novih vrsta materijala i svojstvima materijala donijeti će upotrebu tvorevina za konačnu primjenu, a ne samo kao prototip.

U budućim istraživanjima bilo bi potrebno načiniti slične analize s nekim drugim vrstama materijala koji su dostupni kod SLS postupka, te tako stvoriti veću bazu znanja o tome kako parametri utječu na svojstva prototipa. Istodobno istraživanje je moguće proširiti i na poboljšanje materijala dodavanjem nekih dodataka koji mogu utjecati na duži vijek trajanja tvorevina (npr. pri raznim atmosferskim uvjetima) i naravno time i na svojstva prototipa.

11. LITERATURA

1. Wohlers, T.T.: *Wohlers Report 2009 – State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Colorado, SAD, 2009.
2. Liou, F.W.: *Rapid Prototyping and Engineering applications: A Toolbox for Prototype Development*, CRC Press – Taylor & Francis Group, SAD, 2008.
3. Noorani, R.: *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, John Wiley & Sons Inc., SAD, 2006.
4. Gebhardt, A.: *Understanding Additive Manufacturing, Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, München, 2012.
5. Wohlers, T.T.: *Wohlers Report 2012 – Additive Manufacturing, State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., Fort Collins, Colorado, SAD, 2012.
6. http://www.additive3d.com/com3_lks.htm, 19.05.2010.
7. Kunwoo, L.: *Principles of CAD/CAM/CAE Systems*, Addison – Wesley Longman Inc., Reading, Massachusetts, 1999, ISBN 0-201-38036-6.
8. Drstvenšek, I., Godec, D.: *EUROMOLD 2008 – svjetski sajam broj 1 za brzu proizvodnju, alatničarstvo i razvoj proizvoda*, IRT3000 – inovacijerazvojtehnologije, 6 (1/2009), str. 28-36.
9. Chua, C.K., Leong, K.F., Cheah, C.M., Chua, S.W.: *Development of a Tissue Engineering, Scaffold Structure Library for Rapid Prototyping. Part 1: Investigation and Classification*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2003) 21: 291-301.
10. Pilipović, A.: *Analiza svojstava materijala za brzu proizvodnju prototipova*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
11. Raghunath, N., Pandey, P.M.: *Improving accuracy through shrinkage modelling by using Taguchi method in selective laser sintering*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 985-995.
12. Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, SAD, 2010.
13. XPress 3D, <http://express.redeyeondemand.com/Default.aspx>, 10.06.2010.
14. Godec, D.: *Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog plastomernog otpreska*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
15. Enimco Corporation, www.enimco.com, 10.06.2010.
16. Cooper, K.G.: *Rapid Prototyping Technology: Selection and Application*, Marcel Dekker Inc., SAD, 2001.
17. Design in Site, www.designinsite.dk, 10.06.2010.
18. 3D Systems, <http://www.3dsystems.com>, 11.06.2010.
19. Filetin, T., Kramer, I., Šercer, M.: *SUMAT, Razvoj i primjena suvremenih materijala*, Tehnologijski projekt TP 01/0120-05.
20. Objet, www.objet.com, 05.07.2010.

21. Drstvenšek, I.: Layered Technologies, Fakulteta za strojništvo, Maribor, Slovenija, 2004., ISBN: 86-435-0616-8.
22. Hopkinson, N., Hauge, R.J.M., Dickens, P.M.: *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*, John Wiley and Sons Ltd, Velika Britanija, 2006.
23. Pahole, I., Drstvenšek, I., Ficko, M., Balič, J.: *Rapid prototyping processes give new possibilities to numerical copying techniques*, Journal of Materials Processing Technology, 164-165 (2005), str. 1416-1422.
24. <http://www.gradimo.hr/Brza-izrada-prototipova/hr-HR/8089.aspx>, 06.07.2010.
25. <http://www.eos.info>, 21.05.2010.
26. Drstvenšek, I., Ihan Hren, N., Strojnik, T., Brajljih, T., Valentan, B., Pogačar, V., Županšič Hartner, T.: *Applications of Rapid Prototyping in Cranio-Maxillofacial Surgery Procedures*, International Journal of Biology and Biomedical Engineering, Issue 1, Vol. 2, 2008, str. 29-38.
27. Barić, G.: *Sajam plastike i gume K2010 potvrdio uspješan izlazak iz krize (II. dio)*, Polimeri 32(2011)1, str.42.
28. <http://www.rpm-factories.de/htm/lasersintern.htm>, 20.05.2010.
29. www.zcorp.com, 06.07.2010.
30. <http://www.dimensionprinting.com>, 19.07.2010.
31. Pilipović, A., Šercer, M., Valentan, B.: *Use of low-cost 3D printers and the influence of parameters on the precision and mechanical properties*, 13th International scientific conference on production engineering – CIM 2011, str.187-194, 16-18.06.2011., Biograd na moru, Hrvatska.
32. <http://www.alexdenouden.nl/08/rapprod1.htm>, 19.07.2010.
33. Kamrani, A.K., Nasr, E.A.: *Rapid Prototyping: Theory and Practice*, Springer, SAD, 2005, ISBN: 0-387-23290-7.
34. www.stratasys.com, 19.07.2010.
35. <http://redeyeondemand.com>, 20.07.2010.
36. <http://www.solido3d.com/>, 22.07.2010.
37. Lim, T., Corney, J.R., Ritchie, J.M., Davies, J.B.C.: *RPBlox – a novel approach towards rapid prototyping*, str. 1–8, *Third National Conference on Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing*, edited by: Rennie, A.E.W., Jacobson, D.M., Bocking, C.E., 20-21. June 2002, Buckinghamshire Chilterns University College, Professional Engineering Publishing Limited, London, Velika Britanija, ISBN: 1-86058-374-1.
38. http://printfu.org/read/envisiontec-ddcf.html?f=1qeYpurpn6Wih-SUpOGul6anh7Hd7M7n0dTe5s7RlqHop5emkerZlqPYqqOaqJbQ6uDZ2d_GtdnUypKt3KiloJfTh6fisJmpoofY5t3erpWk5Nzjne3U3NTK4uXK4efV2NbG4NTpk9fX0p-kmZ6nk-Wmm5rf2suWo-I, 15.07.2011.
39. Hornbeck, L.J.: *Digital light processing for high-brithness, high-resolution applications*, <http://www.vxm.com/TIDL.html>, 16.07.2011.
40. Digital Light Processing, <http://www.scribd.com/doc/28982154/Digital-Light-Processing>, 16.07.2011.

41. <http://envisiontec.com.au/technology.htm>, 16.07.2011.
42. <http://www.pattech.pl/produkty/26>, 16.07.2011.
43. <http://www.ossis.co.nz/index.php?page=services>, 16.07.2011.
44. Pilipović, A., Raos, P., Šercer, M.: *Experimental analysis of properties of materials for rapid prototyping*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2009) 40:105–115., DOI 10.1007/s00170-007-1310-7.
45. Valentan, B., Brajljih, T., Drstvenšek, I., Balič, J.: *Development of a Part-Complexity Evaluation Model for Application in Additive Fabrication Technologies*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 57(2011)10, 709-718., DOI:10.5545/sv-jme.2010.057
46. Senthilkumaran, K., Pandey, P.M., Rao, P.V.M.: *Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering*, Materials and Design 30 (2009) 2946-2954.
47. Berce, P., Păcurar, R., Bâlc, N., Păclișan, D.: *SLS parameters optimization using the Taguchi method*, The 2nd International Conference on Additive Technologies; DAAAM Specialized Conference, September, 17th – 18th, 2008, Ptuj, Slovenia.
48. Jain, P. K., Pandey, P. M., Rao, P. V. M.: *Tailoring Material Properties in Layered Manufacturing*, Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol III, WCE 2010, June 30 - July 2, 2010, London, U.K.
49. Caulfield, B., McHugh, P.E., Lohfeld, S.: *Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process*, Journal of Materials Processing Technology 182 (2007) 477-488.
50. Pilipović, A., Valentan, B., Brajljih, T., Haramina, T., Balič, J., Kodvanj, J., Šercer, M., Drstvenšek, I.: *Influence of laser sintering parameters on mechanical properties of polymer products*, Proceedings of the 3rd International Conference on Additive Technologies: iCAT 2010 DAAAM International, 2010.
51. İlkgün, Ö.: *Effects of production parameters on porosity and hole properties in laser sintering rapid prototyping process*, Thesis for Master of Science, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2005.
52. Schmidt, M., Pohle, D., Rechtenwald, T.: *Selective Laser Sintering of PEEK*, Annals of the CIRP Vol. 56/1/2007, 205-208.
53. Yan, C., Shi, Y., Yang, J., Liu, J.: *Preparation and selective laser sintering of nylon-12 coated metal powders and post processing*, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009), 5785–5792.
54. Zarringhalam, H., Hopkinson, N., Kamperman, N.F., de Vlieger, J.J.: *Effects of processing on microstructure and properties of SLS Nylon 12*, Materials Science and Engineering A 435–436 (2006) 172-180.
55. Dotchev, K., Yusoff, W.: *Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process*, Rapid Prototyping Journal, vol. 15, number 3, 2009, 192-203, Emerald Group Publishing Limited, ISSN: 1355-2546.
56. Baschek, G., Hartwig, G., Zahradnik, F.: *Effect of water absorption in polymers at low and high temperatures*, Polymer 40 (1999) 3433-3441.

57. Goodridge, R.D., Hague, R.J.M., Tuck, C.J.: *Effect of long-term ageing on the tensile properties of a polyamide 12 laser sintering material*, Polymer Testing 29 (2010) 483-493.
58. Rajesh, J.J., Bijwe, J., Venkataraman, B., Tewari, U.S.: *Effect of water absorption on erosive wear behaviour of polyamides*. J. Mater. Sci. 37 (2002) 5107-5113.
59. Španiček, Đ.: *Utjecaj medija na deformacijsko ponašanje poliamida 6*, doktorski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije - FKIT, 1994.
60. Čatić, I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2006.
61. Raos, P., Šercer, M.: *Teorijske osnove proizvodnje polimernih tvorevina*, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod/Zagreb, 2010.
62. HRN EN ISO 527: 2012 Plastika – Određivanje rasteznih svojstava (ISO 527: 2012, EN ISO 527: 2012) (Plastic – Determination of tensile properties).
63. HRN EN ISO 178: 2011 Plastika – Određivanje savojnih svojstava (ISO 178: 2010, EN ISO 178: 2010) (Plastic – Determination of flexural properties).
64. HRN EN ISO 62:2008 Plastika – Određivanje apsorpcije vode (ISO 62:2008; EN ISO 62:2008) (Plastics – Determination of water absorption).
65. Tröger, C., Bens, A.T, Bermes, G., Klemmer, R., Lenz, J., Irsen, S.: *Ageing of acrylate-based resins for stereolithography: thermal and humidity ageing behaviour studies*, Rapid Prototyping Journal, vol. 4, number 5, 2008, 305-317, Emerald Group Publishing Limited, ISSN: 1355-2546.
66. HRN EN ISO 4892:2004 Plastika – Metoda izlaganja izvorima svjetla u laboratoriju (ISO 4892:1999, EN ISO 4892:2000) (Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources).
67. www.fesb.hr/~djelaska/documents/, 16.04.2010.
68. www.taylor-hobson.co.jp/product/image/duo.pdf, 16.04.2010.
69. <http://www.predev.com/smg/parameters.htm>, 17.04.2010.
70. Mahović, S.: *Teorija i tehnika mjerenja, predavanja na diplomskom studiju*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
71. HRN EN ISO 868:2008 Plastika i guma (ebonit) – Određivanje utisne tvrdoće pomoću durometra (Tvrdoća prema Shoreu) (ISO 868:2003; EN ISO 868:2003) (Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer – Shore hardness).
72. Franco, A., Lanzetta, M., Romoli, L.: *Experimental analysis of selective laser sintering of polyamide powders: an energy perspective*, Journal of Cleaner Production 18 (2010), str. 1722-1730.
73. Rujnić-Sokele, M.: *Utjecaj parametara razvlačnog puhanja na svojstva PET boca*, Polimeri 28(2007)4:213-292.
74. Privatno priopćenje prof. dr. sc. Đurđica Španiček, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
75. www.prospector.com, 22.11.2011.
76. Čatić, I. i Čatić, R.: *Englesko – hrvatski rječnik polimerstva*, Zagreb, 2002.
77. Čatić, I. i Čatić, R.: *Hrvatsko – engleski rječnik polimerstva*, Zagreb, 2009.

12. PRILOZI

- Tablica 12.1. Podaci za stanje pokusa: 1; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.2. Podaci za stanje pokusa: 2; $P = 9$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 1,3$ mm
Tablica 12.3. Podaci za stanje pokusa: 3; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,16$ mm
Tablica 12.4. Podaci za stanje pokusa: 4; $P = 4,91$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.5. Podaci za stanje pokusa: 5; $P = 21$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 1,3$ mm
Tablica 12.6. Podaci za stanje pokusa: 6; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.7. Podaci za stanje pokusa: 7; $P = 21$ W, $v = 2900$ mm/s i $h = 1,3$ mm
Tablica 12.8. Podaci za stanje pokusa: 8; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.9. Podaci za stanje pokusa: 9; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.10. Podaci za stanje pokusa: 10; $P = 21$ W, $v = 2900$ mm/s i $h = 0,45$ mm
Tablica 12.11. Podaci za stanje pokusa: 12; $P = 25,09$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.12. Podaci za stanje pokusa: 13; $P = 9$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 0,45$ mm
Tablica 12.13. Podaci za stanje pokusa: 14; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.14. Podaci za stanje pokusa: 15; $P = 21$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 0,45$ mm
Tablica 12.15. Podaci za stanje pokusa: 16; $P = 15$ W, $v = 3377,25$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.16. Podaci za stanje pokusa: 17; $P = 9$ W, $v = 2900$ mm/s i $h = 0,45$ mm
Tablica 12.17. Podaci za stanje pokusa: 18; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 1,59$ mm
Tablica 12.18. Podaci za stanje pokusa: 19; $P = 15$ W, $v = 1022,75$ mm/s i $h = 0,88$ mm
Tablica 12.19. Vrijednosti mase u ovisnosti o faktoru preklapanja laserske zrake
Tablica 12.20. Usporedba vremena izrade kod različite snage
Tablica 12.21. Usporedba vremena izrade kod različite brzine laserske zrake
Tablica 12.22. Usporedba vremena izrade kod različitog razmaka između putanje laserske zrake
Tablica 12.23. Usporedba vremena izrade kod različite gustoće energije
Tablica 12.24. Mehanička svojstva kod debljine sloja 0,2 mm
Tablica 12.25. Apsorpcija vode c kod rasteznih ispitnih tijela – originalni materijal
Tablica 12.26. Apsorpcija vode c kod savojnih ispitnih tijela – originalni materijal
Tablica 12.27. Apsorpcija vode c kod rasteznih ispitnih tijela – miješani materijal
Tablica 12.28. Apsorpcija vode c kod savojnih ispitnih tijela – miješani materijal
Tablica 12.29. Apsorpcija vode c kod rasteznih ispitnih tijela – reciklirani materijal
Tablica 12.30. Apsorpcija vode c kod savojnih ispitnih tijela – reciklirani materijal
Tablica 12.31. Izmjere rasteznih ispitnih tijela od originalnog materijala
Tablica 12.32. Izmjere savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala
Tablica 12.33. Izmjere rasteznih ispitnih tijela od miješanog materijala
Tablica 12.34. Izmjere savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala
Tablica 12.35. Izmjere rasteznih ispitnih tijela od recikliranog materijala
Tablica 12.36. Izmjere savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala
Tablica 12.37. Tvrdća rasteznih ispitnih tijela od originalnog materijala

- Tablica 12.38. Tvrdća rastezних ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 500 h
- Tablica 12.39. Tvrdća rastezних ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 1000 h
- Tablica 12.40. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala
- Tablica 12.41. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 500 h
- Tablica 12.42. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 1000 h
- Tablica 12.43. Tvrdća rastezних ispitnih tijela od miješanog materijala
- Tablica 12.44. Tvrdća rastezних ispitnih tijela od miješanog materijala nakon starenja od 1000 h
- Tablica 12.45. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala
- Tablica 12.46. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala nakon starenja od 1000 h
- Tablica 12.47. Tvrdća rastezних ispitnih tijela od recikliranog materijala
- Tablica 12.48. Tvrdća rastezних ispitnih tijela od recikliranog materijala nakon starenja od 1000 h
- Tablica 12.49. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala
- Tablica 12.50. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala nakon starenja od 1000 h
- Tablica 12.51. Rastezna svojstva originalnog materijala pri sobnoj atmosferi
- Tablica 12.52. Rastezna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 500 h
- Tablica 12.53. Rastezna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 1000 h
- Tablica 12.54. Rastezna svojstva originalnog materijala kod prirodnog starenja
- Tablica 12.55. Rastezna svojstva originalnog materijala kod sušenja 2 h pri 100 °C
- Tablica 12.56. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 1 dan
- Tablica 12.57. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 4 dana
- Tablica 12.58. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 7 dana
- Tablica 12.59. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 14 dana
- Tablica 12.60. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 28 dana
- Tablica 12.61. Rastezna svojstva miješanog materijala pri sobnoj atmosferi
- Tablica 12.62. Rastezna svojstva miješanog materijala kod starenja u UV komori 1000 h
- Tablica 12.63. Rastezna svojstva miješanog materijala kod prirodnog starenja
- Tablica 12.64. Rastezna svojstva miješanog materijala kod apsorpcije vode 28 dana
- Tablica 12.65. Rastezna svojstva recikliranog materijala pri sobnoj atmosferi
- Tablica 12.66. Rastezna svojstva recikliranog materijala kod starenja u UV komori 1000 h
- Tablica 12.67. Rastezna svojstva recikliranog materijala kod prirodnog starenja
- Tablica 12.68. Rastezna svojstva recikliranog materijala kod apsorpcije vode 28 dana
- Tablica 12.69. Rastezna svojstva pri različitim temperaturama komore
- Tablica 12.70. Savojna svojstva originalnog materijala pri sobnoj atmosferi
- Tablica 12.71. Savojna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 500 h
- Tablica 12.72. Savojna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 1000 h
- Tablica 12.73. Savojna svojstva originalnog materijala kod prirodnog starenja

Tablica 12.74. Savojna svojstva originalnog materijala kod sušenja 6 h pri 100 °C

Tablica 12.75. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 1 dan

Tablica 12.76. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 4 dana

Tablica 12.77. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 7 dana

Tablica 12.78. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 14 dana

Tablica 12.79. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

Tablica 12.80. Savojna svojstva miješanog materijala pri sobnoj atmosferi

Tablica 12.81. Savojna svojstva miješanog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

Tablica 12.82. Savojna svojstva miješanog materijala kod prirodnog starenja

Tablica 12.83. Savojna svojstva miješanog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

Tablica 12.84. Savojna svojstva recikliranog materijala pri sobnoj atmosferi

Tablica 12.85. Savojna svojstva recikliranog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

Tablica 12.86. Savojna svojstva recikliranog materijala kod prirodnog starenja

Tablica 12.87. Savojna svojstva recikliranog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

Tablica 12.1. Podaci za stanje pokusa: 1; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,20	9,89	41,54	157,84	14,63	3,80	8,05
2	4,10	10,02	41,08	150,77	14,21	3,67	8,10
3	4,02	10,10	40,60	154,69	13,35	3,81	7,85
\bar{x}	4,11	10,00	41,07	154,44	14,06	3,76	8,00
S	0,090	0,106	0,468	3,544	0,654	0,078	0,132

Tablica 12.2. Podaci za stanje pokusa: 2; $P = 9$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 1,3$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,12	10,00	41,20	88,17	6,52	2,14	3,69
2	4,17	10,11	42,16	83,90	6,32	1,99	3,45
3	4,00	10,01	40,04	89,29	5,91	2,23	3,54
\bar{x}	4,10	10,04	41,13	87,12	6,25	2,12	3,56
S	0,087	0,061	1,061	2,846	0,315	0,121	0,121

Tablica 12.3. Podaci za stanje pokusa: 3; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,16$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,01	10,09	40,46	1469,94	75,60	36,33	44,73
2	4,00	10,03	40,12	1443,12	75,79	35,97	45,34
3	4,12	9,99	41,16	1481,72	79,84	36,00	45,20
\bar{x}	4,04	10,04	40,58	1464,93	77,08	36,10	45,09
S	0,067	0,050	0,530	19,784	2,396	0,200	0,320

Tablica 12.4. Podaci za stanje pokusa: 4; $P = 4,91$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	3,99	10,10	40,30	78,18	6,28	1,94	3,75
2	4,01	10,07	40,38	90,05	5,57	2,23	3,30
3	4,10	10,02	41,08	81,34	5,47	1,98	3,12
\bar{x}	4,03	10,06	40,59	83,19	5,77	2,05	3,39
S	0,059	0,040	0,430	6,146	0,442	0,157	0,324

Tablica 12.5. Podaci za stanje pokusa: 5; $P = 21$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 1,3$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,00	10,05	40,20	134,67	13,47	3,35	8,04
2	4,11	10,12	41,59	153,89	13,36	3,70	7,50
3	4,02	9,87	39,68	136,89	12,01	3,45	7,23
\bar{x}	4,04	10,01	40,49	141,82	12,94	3,50	7,59
S	0,059	0,129	0,990	10,518	0,809	0,180	0,412

Tablica 12.6. Podaci za stanje pokusa: 6; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	3,88	10,02	38,88	187,00	14,71	4,81	9,36
2	3,97	9,98	39,62	153,33	13,12	3,87	8,01
3	4,10	9,99	40,96	145,81	13,96	3,56	7,98
\bar{x}	3,98	10,00	39,82	162,05	13,93	4,08	8,45
S	0,111	0,021	1,055	21,934	0,792	0,651	0,788

Tablica 12.7. Podaci za stanje pokusa: 7; $P = 21$ W, $v = 2900$ mm/s i $h = 1,3$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,14	10,02	41,48	94,17	11,95	2,27	6,68
2	4,02	9,95	40,00	103,20	10,89	2,58	6,50
3	4,06	9,96	40,44	98,67	11,06	2,44	6,47
\bar{x}	4,07	9,98	40,64	98,68	11,30	2,43	6,55
S	0,061	0,038	0,762	4,516	0,569	0,155	0,114

Tablica 12.8. Podaci za stanje pokusa: 8; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,20	9,89	41,54	180,69	15,34	4,35	8,44
2	4,10	10,02	41,08	141,73	14,46	3,45	8,24
3	4,02	10,10	40,60	146,17	13,62	3,60	8,01
\bar{x}	4,11	10,00	41,07	156,20	14,47	3,80	8,23
S	0,090	0,106	0,468	21,328	0,860	0,482	0,215

Tablica 12.9. Podaci za stanje pokusa: 9; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Svojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Svojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,13	10,10	41,71	173,53	14,36	4,16	8,00
2	4,02	10,06	40,44	151,25	13,56	3,74	8,01
3	4,08	10,04	40,96	149,52	14,54	3,65	8,35
\bar{x}	4,08	10,07	41,04	158,10	14,15	3,85	8,12
S	0,055	0,031	0,639	13,390	0,517	0,272	0,199

Tablica 12.10. Podaci za stanje pokusa: 10; $P = 21$ W, $v = 2900$ mm/s i $h = 0,45$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,20	9,89	41,54	725,25	59,33	17,46	32,65
2	4,10	10,02	41,08	822,05	58,78	20,01	33,50
3	4,02	10,1	40,60	794,18	55,85	19,56	32,85
\bar{x}	4,11	10,00	41,07	780,49	57,99	19,01	33,00
S	0,090	0,106	0,468	49,828	1,871	1,361	0,444

Tablica 12.11. Podaci za stanje pokusa: 12; $P = 25,09$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,01	10,02	40,18	196,88	16,20	4,90	9,65
2	4,01	10,05	40,30	219,64	16,58	5,45	9,85
3	4,03	10,02	40,38	202,31	15,61	5,01	9,21
\bar{x}	4,02	10,03	40,29	206,28	16,13	5,12	9,57
S	0,012	0,017	0,101	11,885	0,488	0,291	0,327

Tablica 12.12. Podaci za stanje pokusa: 13; $P = 9$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 0,45$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	3,99	10,05	40,10	718,98	53,90	17,93	32,34
2	3,97	10,05	39,90	766,45	54,65	19,21	33,12
3	4,02	10,01	40,24	746,05	54,85	18,54	32,55
\bar{x}	3,99	10,04	40,08	743,83	54,46	18,56	32,67
S	0,025	0,023	0,172	23,811	0,500	0,640	0,404

Tablica 12.13. Podaci za stanje pokusa: 14; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,20	9,89	41,54	179,44	14,76	4,32	8,12
2	4,10	10,02	41,08	169,26	14,44	4,12	8,23
3	4,02	10,10	40,60	144,54	13,06	3,56	7,68
\bar{x}	4,11	10,00	41,07	164,42	14,08	4,00	8,01
S	0,090	0,106	0,468	17,947	0,903	0,394	0,291

Tablica 12.14. Podaci za stanje pokusa: 15; $P = 21$ W, $v = 1500$ mm/s i $h = 0,45$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,01	9,99	40,06	1729,79	100,90	43,18	60,30
2	4,02	9,98	40,12	1735,17	106,04	43,25	63,12
3	3,99	10,01	39,94	1712,22	105,48	42,87	63,54
\bar{x}	4,01	9,99	40,04	1725,73	104,14	43,10	62,32
S	0,015	0,015	0,092	12,001	2,819	0,202	1,762

Tablica 12.15. Podaci za stanje pokusa: 16; $P = 15$ W, $v = 3377,25$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	3,98	10,01	39,84	146,21	12,92	3,67	7,82
2	3,91	10,02	39,18	113,22	11,36	2,89	7,12
3	4,01	10,01	40,14	107,58	11,72	2,68	6,99
\bar{x}	3,97	10,01	39,72	122,34	12,00	3,08	7,31
S	0,051	0,006	0,492	20,868	0,814	0,522	0,446

Tablica 12.16. Podaci za stanje pokusa: 17; $P = 9$ W, $v = 2900$ mm/s i $h = 0,45$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,05	10,01	40,54	221,35	16,25	5,46	9,50
2	4,04	9,97	40,28	200,59	16,98	4,98	10,02
3	4,02	9,98	40,12	201,00	17,00	5,01	10,12
\bar{x}	4,04	9,99	40,31	207,65	16,74	5,15	9,88
S	0,015	0,021	0,213	11,871	0,430	0,269	0,333

Tablica 12.17. Podaci za stanje pokusa: 18; $P = 15$ W, $v = 2200$ mm/s i $h = 1,59$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,20	9,89	41,54	62,31	5,72	1,50	3,15
2	4,10	10,02	41,08	91,61	5,28	2,23	3,01
3	4,02	10,10	40,60	86,08	5,85	2,12	3,44
\bar{x}	4,11	10,00	41,07	80,00	5,62	1,95	3,20
S	0,090	0,106	0,468	15,570	0,298	0,394	0,219

Tablica 12.18. Podaci za stanje pokusa: 19; $P = 15$ W, $v = 1022,75$ mm/s i $h = 0,88$ mm

R.b.	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Površina A [mm ²]	Maksimalna sila F_{\max} [N]	Savojna sila F_s [N]	Rastezna čvrstoća R_m [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fm} [MPa]
1	4,01	10,02	40,18	370,06	26,48	9,21	15,78
2	4,02	10,03	40,32	331,84	25,56	8,23	15,14
3	4,03	10,05	40,50	328,87	27,00	8,12	15,88
\bar{x}	4,02	10,03	40,33	343,59	26,35	8,52	15,60
S	0,010	0,015	0,161	22,971	0,728	0,600	0,401

Tablica 12.19. Vrijednosti mase u ovisnosti o faktoru preklapanja laserske zrake

Oznaka	Faktor preklapanja laserske zrake x	Energija $ED, J/mm^2$	Masa rasteznih ispitnih tijela m, g	Masa savojnih ispitnih tijela m, g
A1	0,28	0,0016	3,0881	1,2325
A2	0,34	0,0023	3,5056	1,4057
A3	0,42	0,0035	4,6968	1,8630
A4	0,56	0,0063	5,3033	2,0652
A5	0,84	0,0141	6,3535	2,5183
A6	1,27	0,0324	7,5819	2,9870
A7	1,56	0,0484	7,8885	3,0972
A8	1,83	0,0667	8,1115	3,1946
A9	2,80	0,1568	8,2123	3,2126

Tablica 12.20. Usporedba vremena izrade kod različite snage

Snaga P, W	Vrijeme izrade t, min za 9 komada	Vrijeme izrade t, min za 90 komada
5	68,53	558,25
7	68,53	558,25
10	68,53	558,25
12	68,53	558,25
15	68,53	558,25
18	68,53	558,25
21	68,53	558,25
25	68,53	558,25

Tablica 12.21. Usporedba vremena izrade kod različite brzine laserske zrake

Brzina v , mm/s	Vrijeme izrade t , min za 9 komada	Vrijeme izrade t , min za 90 komada
1000	96,60	838,88
1500	81,02	683,00
2000	73,22	605,00
2200	71,10	583,83
2500	68,53	558,25
2800	66,53	538,23
3000	65,42	527,05
3333	63,87	511,52
4500	60,22	475,05

Tablica 12.22. Usporedba vremena izrade kod različitog razmaka između putanje laserske zrake

Razmak između putanje laserske zrake h , mm	Vrijeme izrade t , min za 9 komada	Vrijeme izrade t , min za 90 komada
0,25	68,5	558
0,33	64	512,5
0,42	61	482
0,45	60,15	474
0,75	56	432,3
1,25	53,75	410

Tablica 12.23. Usporedba vremena izrade kod različite gustoće energije

Gustoća energije $ED, \text{J/mm}^2$	Vrijeme izrade t , min za 9 komada	Vrijeme izrade t , min za 90 komada
0,005697	56,82	441,083
0,011162	64,77	520,52
0,022324	64,77	520,52
0,029037	67,083	543,77
0,03136	60,22	475,05
0,04234	63,87	511,52
0,04704	65,42	527,05
0,05040	66,53	538,23
0,056448	68,53	558,25
0,064145	71,1	583,83
0,07056	73,22	605,0
0,084008	73,42	606,98
0,09408	81,017	683,0
0,111529	83,25	705,43
0,129241	86,0	732,8
0,14112	96,6	838,88

Tablica 12.24. Mehanička svojstva kod debljine sloja 0,2 mm

$P = 21 \text{ W}, v = 2500 \text{ mm/s}, h = 0,25 \text{ mm}, ED = 0,05 \text{ J/mm}^2$								
R.b.	h , mm	b_1 , mm	A , mm^2	F_m , N	R_m , MPa	R_p , MPa	ϵ_p , %	
1	3,71	9,87	36,62	1158	31,64	34,64	22,38	
2	4,01	9,99	40,06	1200	29,96	31,45	21,14	
3	3,89	10,02	38,98	1452	37,25	31,98	20,98	
\bar{x}	3,87	9,96	38,55	1270	32,95	32,69	21,50	
S	0,151	0,079	1,760	159,009	3,820	1,709	0,766	
$P = 21 \text{ W}, v = 1250 \text{ mm/s}, h = 0,25 \text{ mm}, ED = 0,1 \text{ J/mm}^2$								
R.b.	h , mm	b_1 , mm	A , mm^2	F_m , N	R_m , MPa	R_p , MPa	ϵ_p , %	E , GPa
1	4,38	10,22	44,76	1885	42,11	32,84	24,80	1,075
2	4,30	10,24	44,03	1858	42,20	30,96	25,92	1,106
3	4,33	10,21	44,21	1864	42,16	34,52	28,86	1,141
\bar{x}	4,34	10,22	44,33	1869	42,16	32,77	26,53	1,1073
S	0,040	0,015	0,382	14,177	0,045	1,781	2,097	0,033

Tablica 12.25. Apsorpcija vode c kod rasteznih ispitnih tijela – originalni materijal

	Prije apsorpcije	Poslije apsorpcije									
		1 dan		4 dana		7 dana		14 dana		28 dana	
1Lxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	8,2074	8,2945	0,74	8,2535	0,68	8,3133	0,82	8,2574	0,70	8,3013	1,14
2	8,2347	8,3147	0,73	8,2700	0,61	8,3481	0,91	8,3115	0,81	8,3204	1,04
3	8,2154	8,2865	0,95	8,2967	0,68	8,4072	0,87	8,3318	0,91	8,3039	1,08
\bar{x}	8,2192	8,2986	0,81	8,2734	0,66	8,3562	0,87	8,3002	0,81	8,3085	1,09
S	0,014	0,015	0,123	0,022	0,040	0,047	0,046	0,038	0,105	0,010	0,052
1Pxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	7,9302	8,0165	0,63	8,0475	0,89	8,1050	0,83	8,0725	1,02	8,0326	1,29
2	8,0066	7,9478	0,69	8,0424	0,89	8,0607	1,12	8,0555	0,87	8,0905	1,05
3	7,9442	8,0694	0,88	8,0225	1,06	7,9949	0,68	8,0833	1,04	8,0528	1,37
\bar{x}	7,9603	8,0112	0,73	8,0375	0,95	8,0535	0,88	8,0704	0,98	8,0586	1,24
S	0,041	0,061	0,128	0,013	0,101	0,055	0,220	0,014	0,094	0,029	0,167
1Pz	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	7,9701	7,9633	0,58	8,0695	0,59	8,0331	0,79	8,1085	1,07	8,0756	1,32
2	7,9587	8,0000	0,73	8,0567	0,52	7,9972	0,48	7,9500	0,72	8,0552	1,21
3	7,9140	7,9945	0,85	7,9741	0,03	7,9946	0,43	7,9453	1,03	8,0344	1,52
\bar{x}	7,9476	7,9859	0,72	8,0334	0,38	8,0083	0,56	8,0013	0,94	8,0551	1,35
S	0,030	0,020	0,132	0,052	0,301	0,022	0,197	0,093	0,192	0,021	0,156
Sve orijentacije zajedno											
\bar{x}	8,0424	8,0986	0,75	8,1148	0,66	8,1393	0,77	8,1240	0,91	8,1407	1,23
S	0,153	0,174	0,048	0,137	0,284	0,189	0,178	0,157	0,088	0,145	0,133

Tablica 12.26. Apsorpcija vode c kod savojnih ispitnih tijela – originalni materijal

	Prije apsorpcije	Poslije apsorpcije									
		1 dan		4 dana		7 dana		14 dana		28 dana	
2Lxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,2648	3,2746	0,15	3,2798	0,52	3,2887	0,54	3,3200	0,93	3,3045	1,22
2	3,2535	3,2567	0,46	3,2800	0,56	3,2179	0,68	3,2841	0,66	3,2817	0,87
3	3,2733	3,2717	0,46	3,3078	0,68	3,2945	0,61	3,2644	0,81	3,2978	0,75
\bar{x}	3,2639	3,2677	0,36	3,2892	0,59	3,2670	0,61	3,2895	0,80	3,2947	0,94
S	0,010	0,010	0,181	0,016	0,082	0,043	0,069	0,028	0,139	0,012	0,243
2Pxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,1218	3,1323	0,69	3,1698	0,80	3,1250	0,87	3,1901	1,00	3,1495	0,89
2	3,1204	3,1874	1,07	3,1305	0,64	3,1937	0,75	3,1379	0,72	3,1403	0,64
3	3,1227	3,1158	0,41	3,2018	0,86	3,1606	0,93	3,1359	0,87	3,1416	0,61
\bar{x}	3,1216	3,1452	0,72	3,1674	0,77	3,1598	0,85	3,1546	0,86	3,1438	0,71
S	0,001	0,037	0,334	0,036	0,115	0,034	0,094	0,031	0,141	0,005	0,154
2Pz	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,1365	3,1185	0,55	3,1476	0,61	3,1659	1,19	3,1404	0,41	3,1574	0,67
2	3,1026	3,1206	0,71	3,1648	0,87	3,1519	0,80	3,1137	0,60	3,1313	0,93
3	3,0928	3,1273	0,97	3,1254	0,51	3,1407	1,04	3,1408	0,53	3,1182	0,82
\bar{x}	3,1106	3,1221	0,74	3,1459	0,66	3,1528	1,01	3,1316	0,52	3,1356	0,80
S	0,023	0,005	0,212	0,020	0,183	0,013	0,194	0,016	0,099	0,020	0,130
Sve orijentacije zajedno											
\bar{x}	3,1654	3,1783	0,61	3,2008	0,67	3,1932	0,82	3,1919	0,73	3,1914	0,82
S	0,085	0,078	0,216	0,077	0,089	0,064	0,202	0,085	0,184	0,090	0,118

Tablica 12.27. Apsorpcija vode c kod rasteznih ispitnih tijela – miješani materijal

	Prije apsorpcije	Poslije apsorpcije									
		1 dan		4 dana		7 dana		14 dana		28 dana	
MILxy	m, g	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$
1	8,1145	8,1446	0,37	8,2178	1,27	8,2264	1,38	8,2525	1,70	8,2249	1,36
2	8,0604	8,0924	0,40	8,1825	1,51	8,1443	1,04	8,1824	1,51	8,1907	1,62
3	8,0685	8,1041	0,44	8,1600	1,13	8,1955	1,57	8,1958	1,58	8,1946	1,56
\bar{x}	8,0811	8,1137	0,40	8,1868	1,31	8,1887	1,33	8,2102	1,60	8,2034	1,51
S	0,029	0,027	0,036	0,029	0,193	0,041	0,270	0,037	0,095	0,019	0,135
MIPxy	m, g	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$
1	7,9808	8,0053	0,31	8,0916	1,39	8,0738	1,17	8,1066	1,58	8,1249	1,81
2	8,0349	8,0651	0,38	8,1628	1,59	8,1370	1,27	8,1707	1,69	8,1925	1,96
3	7,9654	7,9962	0,39	8,0867	1,52	8,0755	1,38	8,1164	1,90	8,1131	1,85
\bar{x}	7,9937	8,0222	0,36	8,1137	1,50	8,0954	1,27	8,1312	1,72	8,1435	1,87
S	0,037	0,037	0,043	0,043	0,103	0,036	0,108	0,035	0,162	0,043	0,080
MIPz	m, g	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$	m, g	$c, \%$
1	7,7775	7,8205	0,55	7,9016	1,60	7,9113	1,72	7,9354	2,03	7,9126	1,74
2	7,7788	7,8164	0,48	7,9102	1,69	7,9114	1,70	7,9216	1,84	7,9278	1,92
3	7,7619	7,8002	0,49	7,8834	1,57	7,8948	1,71	7,8900	1,65	7,9149	1,97
\bar{x}	7,7727	7,8124	0,51	7,8984	1,62	7,9058	1,71	7,9157	1,84	7,9184	1,87
S	0,009	0,011	0,038	0,014	0,065	0,010	0,008	0,023	0,190	0,008	0,122
Sve orijentacije zajedno											
\bar{x}	7,9492	7,9828	0,42	8,0663	1,48	8,0633	1,44	8,0857	1,72	8,0884	1,75
S	0,159	0,154	0,079	0,15	0,156	0,144	0,239	0,153	0,121	0,15	0,208

Tablica 12.28. Apsorpcija vode c kod savojnih ispitnih tijela – miješani materijal

	Prije apsorpcije	Poslije apsorpcije									
		1 dan		4 dana		7 dana		14 dana		28 dana	
M2Lxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,1574	3,1707	0,42	3,1956	1,21	3,1874	0,95	3,1978	1,28	3,2021	1,42
2	3,2186	3,2295	0,34	3,2545	1,12	3,2500	0,98	3,2655	1,46	3,2628	1,37
3	3,2109	3,2223	0,36	3,2500	1,22	3,2426	0,99	3,2654	1,70	3,2605	1,54
\bar{x}	3,1956	3,2075	0,37	3,2334	1,18	3,2267	0,97	3,2429	1,48	3,2418	1,44
S	0,033	0,032	0,044	0,033	0,057	0,034	0,019	0,039	0,210	0,034	0,089
M2Pxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,1012	3,1121	0,35	3,1375	1,17	3,1381	1,19	3,1638	2,02	3,1569	1,80
2	3,1213	3,1321	0,35	3,1531	1,02	3,1545	1,06	3,1629	1,33	3,1616	1,29
3	3,1233	3,1364	0,42	3,1576	1,10	3,1595	1,16	3,1645	1,32	3,1639	1,30
\bar{x}	3,1153	3,1269	0,37	3,1494	1,10	3,1507	1,14	3,1637	1,56	3,1608	1,46
S	0,012	0,013	0,041	0,011	0,076	0,011	0,066	0,001	0,400	0,004	0,289
M2Pz	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,1125	3,1244	0,38	3,1640	1,65	3,1475	1,12	3,1706	1,87	3,1616	1,58
2	3,0705	3,0833	0,42	3,1026	1,05	3,1000	0,96	3,1261	1,81	3,1255	1,79
3	3,0919	3,1056	0,44	3,1284	1,18	3,1205	0,92	3,1558	2,07	3,1526	1,96
\bar{x}	3,0916	3,1044	0,41	3,1317	1,29	3,1227	1,00	3,1508	1,91	3,1466	1,78
S	0,021	0,021	0,030	0,031	0,320	0,024	0,106	0,023	0,135	0,019	0,193
Sve orijentacije zajedno											
\bar{x}	3,1342	3,1463	0,39	3,1715	1,19	3,1667	1,04	3,1858	1,65	3,1831	1,56
S	0,055	0,054	0,024	0,054	0,099	0,054	0,088	0,050	0,233	0,051	0,187

Tablica 12.29. Apsorpcija vode *c* kod rasteznih ispitnih tijela – reciklirani materijal

	Prije apsorpcije	Poslije apsorpcije									
		1 dan		4 dana		7 dana		14 dana		28 dana	
R1Lxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	7,9313	8,0500	1,50	8,0800	1,87	8,0385	1,35	8,0781	1,85	8,0638	1,67
2	7,8742	7,9909	1,48	8,0460	2,18	7,9950	1,53	8,0217	1,87	7,9965	1,55
3	7,9092	8,0609	1,92	8,0660	1,98	8,0488	1,77	8,0776	2,13	8,0776	2,13
\bar{x}	7,9049	8,0339	1,63	8,0640	2,01	8,0274	1,55	8,0591	1,95	8,0460	1,78
S	0,029	0,038	0,248	0,017	0,156	0,029	0,207	0,032	0,155	0,043	0,304
R1Pxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	7,6119	7,7275	1,52	7,7178	1,39	7,7146	1,35	7,7478	1,79	7,7569	1,90
2	7,6377	7,7265	1,16	7,7770	1,82	7,7337	1,26	7,8114	2,27	7,7748	1,80
3	7,6630	7,7966	1,74	7,8419	2,33	7,7776	1,50	7,8351	2,25	7,8274	2,15
\bar{x}	7,6375	7,7502	1,47	7,7789	1,85	7,7420	1,37	7,7981	2,10	7,7864	1,95
S	0,026	0,040	0,293	0,062	0,472	0,032	0,120	0,045	0,274	0,037	0,179
R1Pz	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	7,5843	7,7616	2,34	7,7465	2,14	7,7116	1,68	7,7435	2,10	7,7775	2,55
2	7,8628	8,0264	2,08	8,0125	1,90	7,9935	1,66	8,0298	2,12	8,0068	1,83
3	7,8175	7,9565	1,78	7,9646	1,88	7,9538	1,74	7,9767	2,04	7,9570	1,78
\bar{x}	7,7549	7,9148	2,07	7,9079	1,97	7,8863	1,69	7,9167	2,09	7,9138	2,05
S	0,149	0,137	0,280	0,142	0,142	0,153	0,043	0,152	0,045	0,121	0,428
Sve orijentacije zajedno											
\bar{x}	7,7658	7,8997	1,72	7,9169	1,95	7,8852	1,54	7,9246	2,05	7,9154	1,93
S	0,134	0,142	0,306	0,143	0,085	0,143	0,164	0,131	0,083	0,130	0,136

Tablica 12.30. Apsorpcija vode c kod savojnih ispitnih tijela – reciklirani materijal

	Prije apsorpcije	Poslije apsorpcije									
		1 dan		4 dana		7 dana		14 dana		28 dana	
R2Lxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,1737	3,2457	2,27	3,2270	1,68	3,2231	1,56	3,2298	1,77	3,2382	2,03
2	3,1335	3,1858	1,67	3,1864	1,69	3,1739	1,29	3,1882	1,75	3,1844	1,62
3	3,2029	3,2476	1,40	3,2556	1,65	3,2515	1,52	3,2645	1,92	3,2514	1,51
\bar{x}	3,1700	3,2264	1,78	3,2230	1,67	3,2162	1,45	3,2275	1,81	3,2247	1,72
S	0,035	0,035	0,447	0,035	0,023	0,039	0,144	0,038	0,097	0,035	0,273
R2Pxy	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,0073	3,0517	1,48	3,0600	1,75	3,0438	1,21	3,0714	2,13	3,0563	1,63
2	3,0031	3,0426	1,32	3,0507	1,59	3,0448	1,39	3,0757	2,42	3,0537	1,68
3	2,9906	3,0500	1,99	3,0368	1,54	3,0263	1,19	3,0392	1,63	3,0256	1,17
\bar{x}	3,0003	3,0481	1,59	3,0492	1,63	3,0383	1,27	3,0621	2,06	3,0452	1,49
S	0,009	0,005	0,350	0,012	0,110	0,010	0,107	0,020	0,401	0,017	0,282
R2Pz	<i>m, g</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>	<i>m, g</i>	<i>c, %</i>
1	3,0247	3,0641	1,30	3,0759	1,69	3,0577	1,09	3,0854	2,01	3,0638	1,29
2	3,0307	3,0775	1,54	3,0805	1,64	3,0748	1,46	3,0955	2,14	3,0847	1,78
3	2,9385	2,9877	1,67	2,9965	1,97	3,0054	2,28	3,0275	3,03	3,0071	2,33
\bar{x}	2,9980	3,0431	1,51	3,0510	1,77	3,0460	1,61	3,0695	2,39	3,0519	1,80
S	0,052	0,048	0,189	0,047	0,178	0,036	0,607	0,037	0,556	0,040	0,521
Sve orijentacije zajedno											
\bar{x}	3,0561	3,1059	1,63	3,1077	1,69	3,1001	1,44	3,1197	2,09	3,1072	1,67
S	0,099	0,104	0,138	0,100	0,073	0,101	0,171	0,093	0,291	0,102	0,160

Tablica 12.31. Izmjere rasteznih ispitnih tijela od originalnog materijala

1Lxy	Izmjerene vrijednosti [mm]				Odstupanje od nazivne vrijednosti [%]			
	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,19	10,01	20,02	150,22	4,75	0,1	0,10	0,15
2	4,18	9,97	19,96	149,91	4,50	-0,3	-0,20	-0,06
3	4,13	10,02	20,05	150,28	3,25	0,2	0,25	0,19
4	4,16	9,99	19,99	150,17	4,00	-0,1	-0,05	0,11
5	4,19	10,01	20,03	150,21	4,75	0,1	0,15	0,14
\bar{x}	4,17	10,00	20,01	150,16	4,25	0,00	0,05	0,11
S	0,025	0,020	0,035	0,144	0,637	0,200	0,177	0,096
1Pxy	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,02	10,20	20,17	150,12	0,5	2,0	0,85	0,08
2	4,13	10,20	20,17	150,02	3,25	2,0	0,85	0,01
3	4,00	10,26	20,04	150,2	0	2,6	0,20	0,13
4	4,04	10,24	20,17	150,14	1,0	2,4	0,85	0,09
5	4,04	10,25	20,26	149,98	1,0	2,5	1,30	-0,01
\bar{x}	4,05	10,23	20,16	150,09	1,15	2,30	0,81	0,06
S	0,050	0,028	0,079	0,090	1,245	0,283	0,393	0,060
1Pz	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,06	10,09	20,11	150,03	1,5	0,9	0,55	0,02
2	4,01	10,04	20,10	150,02	0,25	0,4	0,50	0,01
3	4,07	10,04	20,05	150,17	1,75	0,4	0,25	0,11
4	3,98	10,03	20,06	150,17	-0,50	0,3	0,30	0,11
5	3,99	10,04	20,00	150,01	-0,25	0,4	0	0,01
\bar{x}	4,02	10,05	20,06	150,08	0,55	0,48	0,32	0,05
S	0,041	0,024	0,044	0,082	1,022	0,239	0,220	0,055
Sve orijentacije zajedno								
\bar{x}	4,08	10,09	20,08	150,11	1,98	0,93	0,39	0,07
S	0,079	0,121	0,077	0,042	1,986	1,213	0,385	0,028

Tablica 12.32. Izmjere savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala

2Lxy	Izmjerene vrijednosti [mm]			Odstupanje od nazivne vrijednosti [%]		
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	4,18	9,97	80,14	4,5	-0,3	0,18
2	4,16	10,02	79,89	4,0	0,2	-0,14
3	4,15	10,02	79,90	3,75	0,2	-0,12
4	4,16	10,01	79,91	4,0	0,1	-0,11
5	4,16	10,04	80,19	4,0	0,4	0,24
\bar{x}	4,16	10,01	80,01	4,05	0,12	0,01
S	0,011	0,026	0,146	0,274	0,259	0,183
2Pxy	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	3,98	10,20	80,19	-0,5	2,0	0,24
2	4,02	10,21	80,24	0,5	2,1	0,30
3	4,00	10,24	80,26	0	2,4	0,33
4	3,98	10,32	80,00	-0,5	3,2	0,00
5	4,03	10,27	80,27	0,75	2,7	0,34
\bar{x}	4,00	10,25	80,19	0,05	2,48	0,24
S	0,023	0,049	0,112	0,570	0,487	0,140
2Pz	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	4,07	10,05	80,17	1,75	0,5	0,21
2	3,98	10,04	80,12	-0,50	0,4	0,15
3	4,05	10,03	80,18	1,25	0,3	0,23
4	4,05	10,06	80,17	1,25	0,6	0,21
5	4,01	10,00	80,19	0,25	0	0,24
\bar{x}	4,03	10,04	80,17	0,80	0,36	0,21
S	0,036	0,023	0,027	0,908	0,230	0,034
Sve orijentacije zajedno						
\bar{x}	4,07	10,10	80,12	1,63	0,99	0,15
S	0,085	0,130	0,101	2,126	1,299	0,126

Tablica 12.33. Izmjere rasteznih ispitnih tijela od miješanog materijala

MILxy	Izmjerene vrijednosti [mm]				Odstupanje od nazivne vrijednosti [%]			
	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,14	10,17	20,02	150,15	3,5	1,7	0,1	0,10
2	4,14	9,98	19,95	149,89	3,5	-0,2	-0,25	-0,07
3	4,14	9,98	20,00	149,80	3,5	-0,2	0	-0,13
4	4,13	10,02	20,00	149,72	3,25	0,2	0	-0,19
5	4,14	10,04	20,05	149,71	3,5	0,4	0,25	-0,19
\bar{x}	4,14	10,04	20,00	149,85	3,45	0,38	0,02	-0,10
S	0,004	0,078	0,036	0,181	0,112	0,782	0,182	0,120
MIPxy	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,05	10,25	20,06	149,8	1,25	2,5	0,3	-0,13
2	4,09	10,26	20,09	149,89	2,25	2,6	0,45	-0,07
3	4,04	10,24	20,13	149,84	1,0	2,4	0,65	-0,11
4	4,03	10,26	20,09	150,08	0,75	2,6	0,45	0,05
5	4,06	10,21	20,07	149,81	1,5	2,1	0,35	-0,13
\bar{x}	4,05	10,24	20,09	149,88	1,35	2,44	0,44	-0,08
S	0,023	0,021	0,027	0,115	0,576	0,207	0,134	0,077
MIPz	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,00	10,02	20,01	150,02	0	0,2	0,05	0,01
2	4,03	10,00	20,06	150,07	0,75	0	0,30	0,05
3	4,00	10,05	20,01	150,07	0	0,5	0,05	0,05
4	4,02	10,01	19,99	150,04	0,50	0,1	-0,05	0,03
5	4,01	9,98	20,01	150,08	0,25	-0,2	0,05	0,05
\bar{x}	4,01	10,01	20,02	150,06	0,30	0,12	0,08	0,04
S	0,013	0,026	0,026	0,025	0,326	0,259	0,130	0,017
Sve orijentacije zajedno								
\bar{x}	4,07	10,10	20,04	149,93	1,70	0,98	0,18	-0,05
S	0,064	0,127	0,045	0,109	1,604	1,271	0,227	0,073

Tablica 12.34. Izmjere savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala

M2Lxy	Izmjerene vrijednosti [mm]			Odstupanje od nazivne vrijednosti [%]		
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	4,13	10,00	80,12	3,25	0	0,15
2	4,23	10,04	79,99	5,75	0,4	-0,0125
3	4,15	9,99	79,95	3,75	-0,1	-0,0625
4	4,21	10,13	80,59	5,25	1,3	0,7375
5	4,13	10,03	79,97	3,25	0,3	-0,0375
\bar{x}	4,17	10,04	80,12	4,25	0,38	0,16
S	0,047	0,055	0,269	1,173	0,554	0,336
M2Pxy	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	3,99	10,17	79,96	-0,25	1,7	-0,05
2	3,98	10,14	79,98	-0,5	1,4	-0,025
3	4,03	10,14	79,96	0,75	1,4	-0,05
4	4,01	10,14	80,08	0,25	1,4	0,10
5	4,00	10,19	79,86	0	1,9	-0,175
\bar{x}	4,00	10,16	79,97	0,05	1,56	-0,04
S	0,019	0,023	0,078	0,481	0,230	0,098
M2Pz	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	4,09	10,10	80,12	2,25	1	0,15
2	4,06	10,04	80,18	1,50	0,4	0,225
3	4,03	10,02	80,17	0,75	0,2	0,2125
4	4,01	9,99	80,16	0,25	-0,1	0,20
5	4,05	10,06	80,14	1,25	0,6	0,175
\bar{x}	4,05	10,04	80,15	1,20	0,42	0,19
S	0,030	0,041	0,024	0,758	0,415	0,030
Sve orijentacije zajedno						
\bar{x}	4,07	10,08	80,08	1,83	0,79	0,10
S	0,087	0,067	0,100	2,170	0,670	0,125

Tablica 12.35. Izmjere rasteznih ispitnih tijela od recikliranog materijala

R1Lxy	Izmjerene vrijednosti [mm]				Odstupanje od nazivne vrijednosti [%]			
	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,16	9,89	19,87	150,09	4	-1,1	-0,65	0,06
2	4,17	10,01	19,99	150,12	4,25	0,1	-0,05	0,08
3	4,16	9,96	20,00	150,00	4,0	-0,4	0	0,00
4	4,20	9,90	19,84	149,86	5,0	-1	-0,8	-0,09
5	4,11	9,99	19,90	149,95	2,75	-0,1	-0,5	-0,03
\bar{x}	4,16	9,95	19,92	150,00	4,00	-0,50	-0,40	0,00
S	0,032	0,053	0,072	0,105	0,810	0,534	0,359	0,070
R1Pxy	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,04	10,22	19,99	150,12	1,0	2,2	-0,05	0,08
2	4,96	10,18	20,02	150,18	24	1,8	0,10	0,12
3	3,96	10,17	19,97	150,15	-1,0	1,7	-0,15	0,10
4	4,01	10,16	19,95	150,02	0,25	1,6	-0,25	0,01
5	4,02	10,28	19,99	150,08	0,5	2,8	-0,05	0,05
\bar{x}	4,20	10,20	19,98	150,11	4,95	2,02	-0,08	0,07
S	0,427	0,049	0,026	0,062	10,675	0,492	0,130	0,042
R1Pz	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>l</i>
1	4,02	10,00	19,98	149,85	0,5	0	-0,10	-0,10
2	4,05	9,99	20,17	149,94	1,25	-0,1	0,85	-0,04
3	4,05	10,02	20,18	149,82	1,25	0,2	0,90	-0,12
4	3,98	9,99	19,99	149,9	-0,5	-0,1	-0,05	-0,07
5	4,06	10,04	20,00	149,91	1,5	0,4	0	-0,06
\bar{x}	4,03	10,01	20,06	149,88	0,80	0,08	0,32	-0,08
S	0,033	0,022	0,102	0,048	0,818	0,217	0,508	0,032
Sve orijentacije zajedno								
\bar{x}	4,13	10,05	19,99	150,00	3,25	0,53	-0,05	0,00
S	0,087	0,132	0,072	0,113	2,174	1,320	0,361	0,075

Tablica 12.36. Izmjere savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala

R2Lxy	Izmjerene vrijednosti [mm]			Odstupanje od nazivne vrijednosti [%]		
	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	4,14	10,04	79,97	3,50	0,4	-0,04
2	4,04	10,28	80,07	1,00	2,8	0,09
3	4,05	10,28	80,09	1,25	2,8	0,11
4	4,18	10,11	80,25	4,50	1,1	0,31
5	4,15	10,11	80,01	3,75	1,1	0,01
\bar{x}	4,11	10,16	80,08	2,80	1,64	0,10
S	0,063	0,110	0,107	1,575	1,097	0,134
R2Pxy	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	3,99	10,09	80,02	-0,25	0,9	0,02
2	4,01	10,12	80,01	0,25	1,2	0,01
3	4,02	10,10	80,06	0,50	1,0	0,08
4	4,05	10,15	80,09	1,25	1,5	0,11
5	3,99	10,11	80,10	-0,25	1,1	0,12
\bar{x}	4,01	10,11	80,06	0,30	1,14	0,07
S	0,025	0,023	0,040	0,622	0,230	0,050
R2Pz	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>
1	4,06	9,99	80,01	1,5	-0,1	0,01
2	3,98	10,00	80,22	-0,5	0	0,27
3	4,07	9,98	80,16	1,75	-0,2	0,20
4	4,04	9,97	80,04	1,0	-0,3	0,05
5	4,05	9,98	80,20	1,25	-0,2	0,25
\bar{x}	4,04	9,98	80,13	1,00	-0,16	0,16
S	0,035	0,011	0,095	0,884	0,114	0,119
Sve orijentacije zajedno						
\bar{x}	4,05	10,09	80,09	1,37	0,87	0,11
S	0,052	0,093	0,036	1,290	0,929	0,045

Tablica 12.37. Tvrdća rasteznih ispitnih tijela od originalnog materijala

Tvrdća H , Shore D							
1Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	79	77	80	78	79	78,6	1,140
2	78	80	79	80	80	79,4	0,894
3	81	80	79	79	79	79,6	0,894
						79,2	0,529
1Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	80	79	79	80	78	79,2	0,837
2	78	78	77	77	78	77,6	0,548
3	79	80	78	80	79	79,2	0,837
						78,7	0,924
1Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	76	78	80	81	80	79,0	2,000
2	80	81	79	80	82	80,4	1,140
3	79	80	81	79	80	79,8	0,837
						79,7	0,702
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						78,2	1,309

Tablica 12.38. Tvrdća rasteznih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 500 h

Tvrdća <i>H</i> , Shore D nakon ispitivanja starenja – 500 h							
1Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	76	76	75	76	73	75,2	1,304
2	73	74	75	75	75	74,4	0,894
3	77	76	74	79	78	76,8	1,924
						75,5	1,222
1Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	79	76	73	75	76	75,8	2,168
2	77	78	79	79	79	78,4	0,894
3	78	78	78	77	78	77,8	0,447
						77,3	1,361
1Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	77	78	76	75	77	76,6	1,140
2	79	77	78	79	77	78,0	1,000
3	76	76	75	76	77	76,0	0,707
						76,9	1,026
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	<i>S</i>
						76,6	0,971

Tablica 12.39. Tvrdća rasteznih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 1000 h

Tvrdća H , Shore D nakon ispitivanja starenja – 1000 h							
1Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	66	74	72	72	74	71,6	3,286
2	75	75	77	77	77	76,2	1,095
3	75	78	73	76	73	75,0	2,121
						74,3	2,386
1Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	77	76	75	74	75	75,4	1,140
2	76	78	71	79	79	76,6	3,362
3	76	80	80	85	77	79,6	3,507
						77,2	2,163
1Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	73	77	79	76	79	76,8	2,490
2	77	78	79	78	78	78,0	0,707
3	79	76	77	80	79	78,2	1,643
						77,7	0,757
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						76,4	1,843

Tablica 12.40. Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala

Tvrdoća H , Shore D							
2Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	76	78	78	78	78	77,6	0,894
2	78	76	76	77	77	76,8	0,837
3	78	78	77	78	79	78,0	0,707
						77,5	0,611
2Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	79	80	77	80	78	78,8	1,304
2	81	80	81	80	81	80,6	0,548
3	80	80	79	80	80	79,8	0,447
						79,7	0,902
2Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	78	77	78	78	77	77,6	0,548
2	79	79	78	77	78	78,2	0,837
3	76	76	77	77	77	76,6	0,548
						77,5	0,808
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						78,2	1,309

Tablica 12.41. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 500 h

Tvrdća <i>H</i> , Shore D nakon ispitivanja starenja – 500 h							
2Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	68	74	74	70	76	72,4	3,286
2	76	77	76	76	77	76,4	0,548
3	71	65	69	72	78	71,0	4,743
						73,3	2,802
2Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	78	78	77	78	78	77,8	0,447
2	77	78	78	73	75	76,2	2,168
3	78	73	78	78	79	77,2	2,387
						77,1	0,808
2Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	78	77	78	78	77	77,6	0,548
2	78	77	78	79	77	77,8	0,837
3	79	77	77	77	77	77,4	0,894
						77,6	0,200
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	<i>S</i>
						76	2,363

Tablica 12.42. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od originalnog materijala nakon starenja od 1000 h

Tvrdća <i>H</i> , Shore D nakon ispitivanja starenja – 1000 h							
2Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	73	77	74	74	76	74,8	1,643
2	78	77	77	78	80	78,0	1,225
3	77	77	72	77	77	76,0	2,236
						76,3	1,617
2Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	77	76	74	74	78	75,8	1,789
2	75	75	72	73	75	74,0	1,414
3	77	77	77	74	76	76,2	1,304
						75,3	1,172
2Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	<i>S</i>
1	74	73	79	77	79	76,4	2,793
2	76	77	77	76	74	76,0	1,225
3	79	78	77	73	74	76,2	2,588
						76,2	0,200
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	<i>S</i>
						75,9	0,521

Tablica 12.43. Tvrdća rasteznih ispitnih tijela od miješanog materijala

Tvrdća H , Shore D							
MILxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	79	75	77	78	78	77,4	1,517
2	81	79	81	81	80	80,4	0,894
3	75	78	78	78	78	77,4	1,342
						78,4	1,732
MIPxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	76	78	79	77	77	77,4	1,140
2	76	78	78	76	74	76,4	1,673
3	73	77	80	73	76	75,8	2,950
						76,5	0,808
MIPz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	73	72	71	76	71	72,6	2,074
2	73	74	74	77	76	74,8	1,643
3	65	75	70	70	66	69,2	3,962
						72,2	2,821
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						75,7	3,181

Tablica 12.44. Tvrdća rasteznih ispitnih tijela od miješanog materijala nakon starenja od 1000 h

Tvrdća H , Shore D nakon ispitivanja starenja – 1000 h							
MILxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	82	81	79	81	80	80,6	1,140
2	81	82	82	82	82	81,8	0,447
3	81	81	81	81	80	80,8	0,447
						81,1	0,643
MIPxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	79	80	79	80	79	79,4	0,548
2	79	79	79	80	80	79,4	0,548
3	80	80	80	81	81	80,4	0,548
						79,7	0,577
MIPz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	78	77	77	79	79	78,0	1,000
2	81	80	80	80	80	80,2	0,447
3	80	78	79	78	79	78,8	0,837
						79,0	1,114
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						79,9	1,048

Tablica 12.45. Tvrdoća savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala

Tvrdoća H , Shore D							
M2Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	77	78	75	78	72	76,0	2,550
2	80	80	78	76	72	77,2	3,347
3	78	76	77	80	78	77,8	1,483
						77	0,917
M2Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	78	76	75	80	80	77,8	2,280
2	80	78	77	78	78	78,2	1,095
3	80	80	78	77	75	78,0	2,121
						78	0,200
M2Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	81	81	81	80	79	80,4	0,894
2	79	80	80	78	79	79,2	0,837
3	77	79	75	75	71	75,4	2,966
						78,3	2,610
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						77,8	0,694

Tablica 12.46. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od miješanog materijala nakon starenja od 1000 h

Tvrdća H , Shore D nakon ispitivanja starenja – 1000 h							
M2Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	74	75	77	76	75	75,4	1,140
2	76	77	77	76	78	76,8	0,837
3	77	79	79	74	74	76,6	2,510
						76,3	0,757
M2Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	77	75	73	77	75	75,4	1,673
2	78	80	75	72	76	76,2	3,033
3	77	76	79	80	73	77,0	2,739
						76,2	0,800
M2Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	78	79	77	74	79	77,4	2,074
2	77	75	74	78	80	76,8	2,387
3	79	74	73	75	78	75,8	2,588
						76,7	0,808
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						76,4	0,252

Tablica 12.47. Tvrdoća rasteznih ispitnih tijela od recikliranog materijala

Tvrdoća H , Shore D							
R1Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	77	75	77	77	72	75,6	2,191
2	77	74	74	75	74	74,8	1,304
3	72	76	75	72	78	74,6	2,608
						75	0,529
R1Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	71	72	71	76	72	72,4	2,074
2	75	75	75	73	70	73,6	2,191
3	76	78	80	74	74	76,4	2,608
						74,1	2,053
R1Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	73	71	69	74	73	72,0	2,000
2	67	72	72	78	70	71,8	4,025
3	77	70	65	72	71	71,0	4,301
						71,6	0,529
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						73,6	1,767

Tablica 12.48. Tvrdća rasteznih ispitnih tijela od recikliranog materijala nakon starenja od 1000 h

Tvrdća H , Shore D nakon ispitivanja starenja – 1000 h							
R1Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	78	77	78	78	79	78,0	0,707
2	79	78	78	79	78	78,4	0,548
3	80	79	78	79	80	79,2	0,837
						78,5	0,611
R1Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	79	79	77	77	78	78,0	1,000
2	75	78	77	79	78	77,4	1,517
3	74	74	75	76	76	75	1,000
						76,8	1,587
R1Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	77	77	77	78	78	77,4	0,548
2	75	79	80	80	81	79,0	2,345
3	80	80	80	80	79	79,8	0,447
						78,7	1,222
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						78,0	1,063

Tablica 12.49. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala

Tvrdća H , Shore D							
R2Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	75	76	77	79	78	77,0	1,581
2	78	78	78	78	73	77,0	2,236
3	73	78	77	77	74	75,8	2,168
						76,6	0,693
R2Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	75	74	76	75	74	74,8	0,837
2	78	79	79	78	74	77,6	2,074
3	73	77	76	74	75	75,0	1,581
						75,8	1,562
R2Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	77	70	71	79	73	74,0	3,873
2	76	72	71	72	77	73,6	2,702
3	81	66	76	64	75	72,4	7,162
						73,3	0,833
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						75,2	1,703

Tablica 12.50. Tvrdća savojnih ispitnih tijela od recikliranog materijala nakon starenja od 1000 h

Tvrdća H , Shore D nakon ispitivanja starenja – 1000 h							
R2Lxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	75	77	79	79	79	77,8	1,789
2	80	79	80	80	79	79,6	0,548
3	79	80	80	80	80	79,8	0,447
						79,1	1,102
R2Pxy	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	75	73	71	72	74	73,0	1,581
2	74	72	73	74	70	72,6	1,673
3	71	70	73	72	72	71,6	1,140
						72,4	0,721
R2Pz	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje	4. mjerenje	5. mjerenje	\bar{x}	S
1	77	79	79	79	80	78,8	1,095
2	78	80	80	79	79	79,2	0,837
3	78	78	78	80	79	78,6	0,894
						78,9	0,306
Sve orijentacije zajedno						\bar{x}	S
						76,8	3,793

Tablica 12.51. Rastezna svojstva originalnog materijala pri sobnoj atmosferi

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,20	10,03	42,13	2077,7	49,32	39,56	26,50	46,17	2,026
2	4,18	10,02	41,88	2030,5	48,48	38,53	26,34	45,04	2,032
3	4,16	10,00	41,60	2038,4	49,00	38,86	35,78	45,62	2,018
\bar{x}	4,18	10,02	41,87	2048,9	48,93	38,98	29,54	45,61	2,025
S	0,020	0,015	0,263	25,249	0,424	0,526	5,405	0,565	0,007
1Pxy									
1	4,02	10,20	41,00	2009,2	49,00	40,14	27,92	43,92	1,845
2	4,00	10,28	41,12	2016,9	49,05	39,69	29,58	45,19	1,964
3	4,01	10,22	40,98	2004,8	48,92	39,52	25,27	46,83	1,909
\bar{x}	4,01	10,23	41,04	2010,3	48,99	39,78	27,59	45,31	1,906
S	0,010	0,042	0,074	6,122	0,066	0,320	2,174	1,459	0,060
1Pz									
1	3,98	10,02	39,88	1915,8	48,04	39,48	10,77	47,84	2,006
2	3,98	9,99	39,76	1946,3	48,95	39,81	12,69	48,78	2,040
3	4,07	10,09	41,07	1942,8	47,31	39,04	10,43	47,17	1,932
\bar{x}	4,01	10,03	40,24	1935,0	48,10	39,44	11,30	47,93	1,993
S	0,052	0,051	0,722	16,680	0,822	0,386	1,219	0,809	0,055

Tablica 12.52. Rastezna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 500 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,17	9,92	41,37	2075,4	50,17	40,54	20,52	46,41	1,736
2	4,14	10,02	41,48	2023,5	48,78	38,03	21,68	47,26	1,857
3	4,17	9,96	41,53	2063,0	49,67	37,45	18,90	48,04	2,095
\bar{x}	4,16	9,97	41,46	2053,9	49,54	38,67	20,37	47,24	1,896
S	0,017	0,050	0,086	27,060	0,704	1,642	1,396	0,815	0,183
1Pxy									
1	4,03	10,34	41,67	1993,1	47,83	38,09	24,28	43,13	1,728
2	4,02	10,29	41,37	1983,1	47,94	38,49	23,97	45,16	1,637
3	3,99	10,20	40,70	2007,6	49,33	38,60	24,15	44,80	1,831
\bar{x}	4,01	10,28	41,24	1994,6	48,37	38,39	24,13	44,36	1,732
S	0,021	0,071	0,497	12,348	0,836	0,268	0,156	1,083	0,097
1Pz									
1	4,06	10,07	40,88	1887,2	46,16	37,87	11,85	45,83	1,599
2	4,08	10,10	41,21	1891,9	45,91	37,07	11,13	45,55	1,665
3	4,06	10,13	41,13	1913,3	46,52	36,93	13,08	46,27	1,754
\bar{x}	4,07	10,10	41,07	1897,4	46,20	37,29	12,02	45,88	1,673
S	0,012	0,030	0,169	13,895	0,307	0,507	0,986	0,363	0,078

Tablica 12.53. Rastezna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,19	10,07	42,19	1911,8	45,31	33,65	10,44	44,72	2,262
2	4,20	9,95	41,79	1947,8	46,61	36,54	13,58	45,77	1,695
3	4,20	9,96	41,83	1495,5	35,75	35,21	4,04	35,75	1,938
\bar{x}	4,20	9,99	41,94	1785,0	42,56	35,13	9,35	42,08	1,965
S	0,006	0,067	0,222	251,397	5,930	1,447	4,862	5,507	0,284
1Pxy									
1	3,99	10,27	40,98	1856,7	45,31	35,81	12,01	44,82	1,815
2	3,98	10,26	40,83	1336,1	32,72	-	2,46	32,72	1,657
3	4,00	10,30	41,20	1469,6	35,67	-	2,88	35,67	1,777
\bar{x}	3,99	10,28	41,00	1554,1	37,90	35,81	5,78	37,74	1,750
S	0,010	0,021	0,184	270,382	6,585	-	5,396	6,309	0,082
1Pz									
1	4,00	10,05	40,20	1755,5	43,67	34,73	7,70	43,50	1,849
2	4,01	10,02	40,18	1729,8	43,05	33,03	6,85	42,93	2,183
3	4,03	10,05	40,50	1752,1	43,26	33,22	10,83	42,82	1,953
\bar{x}	4,01	10,04	40,29	1745,8	43,33	33,66	8,46	43,08	1,995
S	0,015	0,017	0,180	13,995	0,315	0,932	2,095	0,365	0,171

Tablica 12.54. Rastezna svojstva originalnog materijala kod prirodnog starenja

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,16	10,05	41,81	1877,0	44,90	33,76	16,67	43,83	1,203
2	4,17	10,00	41,70	1832,6	43,95	32,98	16,23	43,55	1,225
3	4,13	10,02	41,38	1898,3	45,87	33,65	16,78	43,12	1,198
\bar{x}	4,15	10,02	41,63	1869,3	44,91	33,46	16,56	43,50	1,209
S	0,021	0,025	0,221	33,520	0,962	0,422	0,291	0,358	0,014
1Pxy									
1	4,21	10,30	43,36	1846,0	42,57	31,30	20,15	41,06	1,162
2	4,16	10,27	42,72	1834,1	42,93	31,23	20,23	41,02	1,167
3	4,18	10,20	42,64	1854,5	43,50	31,45	20,01	41,12	1,870
\bar{x}	4,18	10,26	42,91	1844,9	43,00	31,33	20,13	41,07	1,400
S	0,025	0,051	0,397	10,247	0,467	0,112	0,111	0,050	0,407
1Pz									
1	3,99	10,07	40,18	1727,0	42,97	34,10	10,75	42,72	1,123
2	3,98	10,05	40,00	1720,1	43,00	34,20	10,73	42,67	1,143
3	4,00	10,00	40,00	1723,4	43,09	34,23	10,69	42,55	1,118
\bar{x}	3,99	10,04	40,06	1723,5	43,02	34,18	10,72	42,65	1,128
S	0,010	0,036	0,104	3,451	0,059	0,068	0,031	0,087	0,013

Tablica 12.55. Rastezna svojstva originalnog materijala kod sušenja 2 h pri 100 °C

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,15	9,98	41,42	2091,1	50,49	34,82	27,39	48,10	1,696
2	4,20	10,00	42,00	2152,1	51,24	37,59	24,64	49,12	1,756
3	4,18	10,00	41,8	2127,2	50,89	35,97	24,91	47,47	1,789
\bar{x}	4,18	9,99	41,74	2123,5	50,87	36,13	25,65	48,23	1,747
S	0,025	0,012	0,296	30,638	0,375	1,392	1,516	0,833	0,047
1Pxy									
1	4,06	10,22	41,49	2082,1	50,18	39,19	24,37	47,45	1,628
2	4,11	10,31	42,37	2034,8	48,02	36,57	12,23	47,65	1,725
3	4,05	10,21	41,35	2073,3	50,14	39,25	23,03	48,34	1,691
\bar{x}	4,07	10,25	41,74	2063,4	49,45	38,34	19,88	47,81	1,681
S	0,032	0,055	0,554	25,167	1,236	1,530	6,656	0,467	0,049
1Pz									
1	4,09	10,08	41,23	1870,9	45,38	37,44	7,03	45,32	1,799
2	4,05	10,07	40,78	1977,6	48,49	38,11	11,67	48,27	1,881
3	4,03	10,14	40,86	1961,9	48,01	38,11	11,35	47,82	1,854
\bar{x}	4,06	10,10	40,96	1936,8	47,29	37,89	10,02	47,14	1,845
S	0,031	0,038	0,236	57,609	1,674	0,387	2,590	1,589	0,042

Tablica 12.56. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 1 dan

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,17	10,00	41,70	2017,9	48,39	36,64	27,14	45,88	1,973
2	4,20	9,98	41,92	2012,4	48,01	35,76	28,95	44,49	2,112
3	4,18	10,02	41,88	1985,3	47,40	36,74	29,54	43,26	1,863
\bar{x}	4,18	10,00	41,83	2005,2	47,93	36,38	28,54	44,54	1,983
S	0,015	0,020	0,116	17,446	0,499	0,539	1,251	1,311	0,125
1Pxy									
1	3,96	10,18	40,31	1945,9	48,27	37,26	33,48	43,30	1,806
2	3,94	10,30	40,58	1941,4	47,84	36,58	33,04	38,53	1,819
3	3,98	10,27	40,87	1967,3	48,13	36,82	28,22	42,76	1,944
\bar{x}	3,96	10,25	40,59	1951,5	48,08	36,89	31,58	41,53	1,856
S	0,020	0,062	0,281	13,820	0,219	0,345	2,918	2,612	0,076
1Pz									
1	3,98	9,97	39,68	1879,7	47,37	36,89	13,04	47,14	1,890
2	4,07	10,11	41,15	1895,3	46,06	35,86	16,22	45,51	1,863
3	4,06	10,06	40,84	1777,1	43,51	36,13	7,06	43,43	1,829
\bar{x}	4,04	10,05	40,56	1850,7	45,65	36,29	12,11	45,36	1,861
S	0,049	0,071	0,774	64,192	1,963	0,534	4,653	1,860	0,031

Tablica 12.57. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 4 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,17	9,95	41,49	2028,1	48,88	38,10	27,41	44,00	1,794
2	4,20	10,00	42,00	1982,8	47,21	36,39	33,12	42,82	1,824
3	4,21	10,00	42,10	1993,0	47,34	35,38	30,28	44,24	1,970
\bar{x}	4,19	9,98	41,86	2001,3	47,81	36,62	30,27	43,69	1,863
S	0,021	0,029	0,326	23,756	0,929	1,375	2,855	0,760	0,094
1Pxy									
1	3,99	10,38	41,42	1922,1	46,41	34,82	31,33	32,07	1,858
2	4,02	10,29	41,37	1926,8	46,58	35,42	31,42	41,85	1,768
3	4,02	10,30	41,41	1927,9	46,56	34,93	29,03	42,49	1,795
\bar{x}	4,01	10,32	41,40	1925,6	46,52	35,06	30,59	38,80	1,807
S	0,017	0,049	0,027	3,056	0,093	0,319	1,355	5,840	0,046
1Pz									
1	4,10	10,16	41,66	1890,8	45,39	34,87	13,84	45,17	1,782
2	4,14	10,14	41,98	1881,9	44,83	34,54	13,52	37,35	1,777
3	4,09	10,13	41,43	1883,9	45,47	35,22	22,36	44,82	1,676
\bar{x}	4,11	10,14	41,69	1885,5	45,23	34,88	16,57	42,45	1,745
S	0,026	0,015	0,275	4,633	0,349	0,340	5,014	4,417	0,060

Tablica 12.58. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 7 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,19	10,00	41,90	1995,3	47,62	34,96	25,71	43,46	1,769
2	4,22	10,03	42,33	1998,7	47,22	35,21	24,00	45,15	1,638
3	4,26	10,04	42,77	2023,5	47,31	34,75	29,60	45,00	1,812
\bar{x}	4,22	10,02	42,33	2005,8	47,38	34,97	26,44	44,54	1,740
S	0,035	0,021	0,435	15,392	0,210	0,230	2,870	0,935	0,091
1Pxy									
1	3,98	10,34	41,15	1921,0	46,68	34,39	29,82	39,69	1,659
2	3,99	10,17	40,58	1911,2	47,10	35,18	32,61	42,83	1,776
3	3,97	10,21	40,53	1930,2	47,62	35,46	28,40	41,37	1,964
\bar{x}	3,98	10,24	40,76	1920,8	47,13	35,01	30,28	41,30	1,800
S	0,010	0,089	0,346	9,490	0,471	0,555	2,142	1,571	0,154
1Pz									
1	4,07	10,09	41,07	1855,8	45,19	34,09	15,10	41,80	1,720
2	4,06	10,08	40,92	1873,9	45,79	34,52	22,51	45,38	1,743
3	4,06	10,08	40,92	1875,2	45,82	33,72	24,01	44,94	1,975
\bar{x}	4,06	10,08	40,97	1868,3	45,60	34,11	20,54	44,04	1,813
S	0,006	0,006	0,082	10,857	0,355	0,400	4,771	1,952	0,141

Tablica 12.59. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 14 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,18	10,06	42,05	1976,0	46,99	35,56	28,51	44,18	1,776
2	4,18	10,01	41,84	2017,6	48,22	37,41	23,98	45,59	1,604
3	4,19	10,06	42,15	1986,2	47,12	35,01	29,62	44,43	1,555
\bar{x}	4,18	10,04	42,01	1993,3	47,44	35,99	27,37	44,73	1,645
S	0,006	0,029	0,158	21,705	0,676	1,257	2,988	0,752	0,116
1Pxy									
1	3,99	10,28	41,02	1916,3	46,72	34,19	29,31	42,94	1,695
2	4,01	10,29	41,26	1906,3	46,20	33,92	33,08	41,35	1,706
3	4,00	10,27	41,08	1946,8	47,39	34,95	28,52	41,83	1,819
\bar{x}	4,00	10,28	41,12	1923,2	46,77	34,35	30,30	42,04	1,740
S	0,010	0,010	0,128	21,064	0,597	0,534	2,437	0,816	0,069
1Pz									
1	4,09	10,10	41,31	1843,2	44,62	35,43	11,43	44,38	1,439
2	4,08	10,07	41,09	1848,0	44,98	34,12	17,54	44,35	1,615
3	4,06	10,10	41,01	1791,6	43,69	33,98	11,21	43,34	1,594
\bar{x}	4,08	10,09	41,13	1827,6	44,43	34,51	13,39	44,02	1,549
S	0,015	0,017	0,157	31,308	0,666	0,800	3,593	0,592	0,096

Tablica 12.60. Rastezna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
1Lxy									
1	4,18	10,08	42,13	1896,5	45,01	29,95	31,11	41,88	1,507
2	4,19	10,02	41,98	1888,4	44,98	29,99	36,60	40,10	1,544
3	4,20	10,06	42,25	1872,6	44,32	30,13	33,19	39,82	1,488
\bar{x}	4,19	10,05	42,12	1885,8	44,77	30,02	33,63	40,6	1,513
S	0,010	0,031	0,134	12,140	0,390	0,095	2,772	1,117	0,028
1Pxy									
1	3,96	10,35	40,99	1807,5	44,10	27,74	34,66	36,77	1,385
2	4,02	10,33	41,53	1844,6	44,42	28,85	34,55	40,25	1,419
3	4,00	10,31	41,24	1805,1	43,77	30,46	36,59	38,48	1,328
\bar{x}	3,99	10,33	41,25	1819,1	44,10	29,02	35,27	38,50	1,377
S	0,031	0,020	0,270	22,164	0,325	1,368	1,147	1,740	0,046
1Pz									
1	4,12	10,12	41,69	1742,4	41,79	29,66	11,77	41,65	1,391
2	4,11	10,16	41,76	1728,8	41,40	29,70	11,90	41,08	1,369
3	4,05	10,1	40,91	1693,9	41,41	31,35	10,56	40,86	1,263
\bar{x}	4,09	10,13	41,45	1721,7	41,53	30,24	11,41	41,20	1,341
S	0,038	0,031	0,475	25,029	0,222	0,964	0,739	0,408	0,068

Tablica 12.61. Rastezna svojstva miješanog materijala pri sobnoj atmosferi

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
M1Lxy									
1	4,17	10,09	42,08	2033	48,32	38,26	24,08	44,71	1,724
2	4,13	9,99	41,26	1996	48,38	37,33	25,05	43,23	2,057
3	4,15	9,96	41,33	1994	48,24	37,90	24,67	44,37	1,761
\bar{x}	4,15	10,01	41,56	2007,7	48,31	37,83	24,60	44,10	1,847
S	0,020	0,068	0,451	21,962	0,070	0,469	0,489	0,775	0,183
M1Pxy									
1	4,07	10,32	42,00	1985	47,25	37,84	19,51	40,43	1,646
2	4,11	10,27	42,21	1992	47,18	33,42	25,19	40,73	2,435
3	4,07	10,24	41,68	1943	46,62	36,57	24,19	40,69	1,834
\bar{x}	4,08	10,28	41,96	1973,3	47,02	35,94	22,96	40,62	1,972
S	0,023	0,040	0,269	26,502	0,345	2,276	3,032	0,163	0,412
M1Pz									
1	4,01	10,01	40,14	1572	39,16	35,21	6,09	37,62	1,694
2	4,00	10,02	40,08	1683	42,00	34,38	6,17	41,89	2,000
3	4,00	10,00	40,00	1426	35,65	33,71	5,04	28,17	1,739
\bar{x}	4,00	10,01	40,07	1560,3	38,94	34,43	5,76	35,89	1,811
S	0,006	0,010	0,070	128,897	3,181	0,751	0,632	7,021	0,165

Tablica 12.62. Rastezna svojstva miješanog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
M1Lxy									
1	4,16	9,99	41,56	1995	48,00	36,59	19,02	46,10	1,241
2	4,18	10,08	42,13	2010	47,72	36,69	17,12	45,95	1,260
3	4,14	10,00	41,40	1997	48,24	37,03	17,51	46,88	1,319
\bar{x}	4,16	10,02	41,70	2000,7	47,99	36,77	17,88	46,31	1,273
S	0,020	0,049	0,386	8,145	0,260	0,231	1,004	0,499	0,041
M1Pxy									
1	4,09	10,26	41,96	1960	46,70	34,91	17,30	44,96	1,267
2	4,02	10,24	41,16	1951	47,39	36,54	17,76	44,82	1,249
3	4,13	10,27	42,42	2006	47,29	35,67	18,75	44,72	1,256
\bar{x}	4,08	10,26	41,85	1972,3	47,13	35,71	17,94	44,83	1,257
S	0,056	0,015	0,633	29,501	0,373	0,816	0,741	0,121	0,009
M1Pz									
1	3,98	9,97	39,68	1418	35,73	32,70	4,60	35,65	1,208
2	3,98	10,00	39,80	1690	42,46	34,14	7,55	42,15	1,283
3	4,01	10,01	40,14	1274	31,74	31,33	3,76	31,74	1,183
\bar{x}	3,99	9,99	39,87	1460,7	36,64	32,72	5,30	36,51	1,225
S	0,017	0,021	0,238	211,257	5,418	1,405	1,994	5,258	0,052

Tablica 12.63. Rastezna svojstva miješanog materijala kod prirodnog starenja

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
M1Lxy									
1	4,16	9,97	41,48	1898	45,75	34,57	16,74	43,82	1,225
2	4,11	10,00	41,10	1892	46,03	34,23	16,55	43,01	1,234
3	4,09	9,98	40,82	1901	46,57	34,82	17,01	43,76	1,201
\bar{x}	4,12	9,98	41,13	1897,0	46,12	34,54	16,77	43,53	1,220
S	0,036	0,015	0,330	4,583	0,418	0,296	0,231	0,451	0,017
M1Pxy									
1	4,07	10,21	41,55	1909	45,93	34,15	19,59	42,47	1,282
2	4,01	10,19	40,86	1889	46,23	34,25	19,43	42,43	1,279
3	4,05	10,10	40,91	1905	46,57	32,03	19,78	42,53	1,305
\bar{x}	4,04	10,17	41,11	1901,0	46,24	33,48	19,60	42,48	1,289
S	0,031	0,059	0,388	10,583	0,321	1,254	0,175	0,050	0,014
M1Pz									
1	4,01	10,00	40,10	1340	33,41	33,05	4,10	33,38	1,113
2	4,02	10,01	40,24	1332	33,10	32,86	4,01	33,23	1,231
3	4,00	10,01	40,04	1345	33,59	33,20	4,23	33,34	1,110
\bar{x}	4,01	10,01	40,13	1339,0	33,37	33,04	4,11	33,32	1,151
S	0,010	0,006	0,103	6,557	0,248	0,170	0,110	0,078	0,069

Tablica 12.64. Rastezna svojstva miješanog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
M1Lxy									
1	4,16	10,00	41,60	1907	45,84	30,57	23,51	35,68	1,849
2	4,16	9,96	41,43	1909	46,08	31,27	24,08	40,87	1,816
3	4,16	9,98	41,52	1904	45,85	32,07	26,77	37,70	1,503
\bar{x}	4,16	9,98	41,52	1906,7	45,92	31,30	24,79	38,08	1,723
S	0,000	0,020	0,083	2,517	0,136	0,751	1,741	2,616	0,191
M1Pxy									
1	4,04	10,25	41,41	1886	45,53	30,46	23,20	24,08	1,7810
2	4,07	10,24	41,68	1896	45,48	31,18	25,00	39,52	1,5870
3	4,04	10,25	41,41	1863	44,99	31,03	24,95	40,40	1,6010
\bar{x}	4,05	10,25	41,50	1881,7	45,33	30,89	24,38	34,67	1,656
S	0,017	0,006	0,154	16,921	0,298	0,380	1,025	9,179	0,108
M1Pz									
1	4,02	10,00	40,20	1662	41,34	29,91	10,05	41,09	1,492
2	4,01	9,98	40,02	1703	42,56	30,16	12,21	41,89	1,631
3	4,01	10,04	40,26	1517	37,67	28,15	7,16	37,45	1,565
\bar{x}	4,01	10,01	40,16	1627,3	40,52	29,41	9,81	40,14	1,563
S	0,006	0,031	0,125	97,726	2,545	1,095	2,532	2,367	0,070

Tablica 12.65. Rastezna svojstva recikliranog materijala pri sobnoj atmosferi

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
R1Lxy									
1	4,15	9,8	40,67	1867	45,90	38,09	30,31	38,29	1,525
2	4,17	10,06	41,95	1938	46,19	38,33	23,25	38,33	1,605
3	4,17	10,00	41,70	1915	45,92	38,07	20,63	38,00	1,607
\bar{x}	4,16	9,95	41,44	1906,7	46,00	38,16	24,73	38,21	1,579
S	0,012	0,136	0,679	36,226	0,162	0,145	5,007	0,180	0,047
R1Pxy									
1	3,99	10,18	40,62	1816	44,71	36,65	25,32	27,24	1,611
2	4,05	10,25	41,51	1841	44,34	36,34	19,10	37,57	1,631
3	3,98	10,23	40,72	1795	44,08	34,32	20,88	37,81	1,868
\bar{x}	4,01	10,22	40,95	1817,3	44,38	35,77	21,77	34,21	1,703
S	0,038	0,036	0,491	23,029	0,317	1,265	3,203	6,035	0,143
R1Pz									
1	4,08	10,01	40,84	1920	47,02	38,94	10,42	38,65	2,099
2	4,02	10,01	40,24	1901	47,25	40,16	10,19	29,06	1,823
3	4,01	10,00	40,10	1857	46,32	40,06	10,27	44,78	1,728
\bar{x}	4,04	10,01	40,39	1892,7	46,86	39,72	10,29	37,50	1,883
S	0,038	0,006	0,394	32,316	0,484	0,677	0,117	7,923	0,193

Tablica 12.66. Rastezna svojstva recikliranog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
R1Lxy									
1	4,15	9,85	40,88	1817	44,45	33,74	22,47	41,89	1,192
2	4,13	9,89	40,85	1810	44,32	34,03	19,74	41,07	1,168
3	4,14	9,99	41,36	1804	43,61	31,41	24,89	39,37	1,203
\bar{x}	4,14	9,91	41,03	1810,3	44,13	33,06	22,37	40,78	1,188
S	0,010	0,072	0,287	6,506	0,452	1,436	2,577	1,285	0,018
R1Pxy									
1	4,03	10,21	41,15	1728	42,00	30,37	22,99	39,41	1,181
2	4,02	10,2	41,00	1721	41,98	31,02	22,41	39,84	1,159
3	3,99	10,21	40,74	1718	42,17	31,16	23,85	38,06	1,161
\bar{x}	4,01	10,21	40,96	1722,3	42,05	30,85	23,08	39,10	1,167
S	0,021	0,006	0,207	5,132	0,104	0,422	0,725	0,929	0,012
R1Pz									
1	4,08	10,05	41,00	1741	42,45	32,98	10,13	41,87	1,211
2	4,07	10,03	40,82	1739	42,61	31,96	11,21	42,14	1,209
3	4,08	10,04	40,96	1739	42,46	33,25	10,13	41,83	1,207
\bar{x}	4,08	10,04	40,93	1739,7	42,51	32,73	10,49	41,95	1,209
S	0,006	0,010	0,095	1,155	0,090	0,680	0,624	0,169	0,002

Tablica 12.67. Rastezna svojstva recikliranog materijala kod prirodnog starenja

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
R1Lxy									
1	4,09	9,96	40,74	1788	43,90	32,32	16,68	41,72	1,238
2	4,05	9,98	40,42	1775	43,91	32,54	16,21	41,73	1,204
3	4,04	10,01	40,44	1952	48,27	32,01	16,71	41,54	1,245
\bar{x}	4,06	9,98	40,53	1838,3	45,36	32,29	16,53	41,66	1,229
S	0,026	0,025	0,177	98,653	2,518	0,266	0,280	0,107	0,022
R1Pxy									
1	3,93	10,21	40,13	1683	41,93	31,77	13,92	40,14	1,157
2	3,98	10,11	40,24	1657	41,18	31,54	14,02	39,98	1,145
3	3,96	10,19	40,35	1698	42,08	32,00	13,89	40,32	1,160
\bar{x}	3,96	10,17	40,24	1679,3	41,73	31,77	13,94	40,15	1,154
S	0,025	0,053	0,114	20,744	0,482	0,230	0,068	0,170	0,008
R1Pz									
1	4,02	9,99	40,16	1583	39,41	31,80	8,15	38,90	1,155
2	4,01	10,00	40,10	1580	39,40	31,97	8,23	38,62	1,161
3	3,99	10,02	39,98	1556	38,92	31,77	7,98	39,14	1,152
\bar{x}	4,01	10,00	40,08	1573,0	39,24	31,85	8,12	38,89	1,156
S	0,015	0,015	0,092	14,799	0,281	0,108	0,127	0,260	0,005

Tablica 12.68. Rastezna svojstva recikliranog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
R1Lxy									
1	4,19	9,90	41,48	1737	41,87	27,21	36,21	28,91	1,105
2	4,14	9,95	41,19	1724	41,86	26,56	37,73	33,59	1,090
3	4,28	9,85	42,16	1690	40,08	25,94	25,44	33,68	1,050
\bar{x}	4,20	9,90	41,61	1717,0	41,27	26,57	33,13	32,06	1,082
S	0,071	0,050	0,495	24,269	1,031	0,635	6,700	2,728	0,028
R1Pxy									
1	4,03	10,19	41,07	1658	40,38	25,85	39,99	32,33	1,037
2	4,04	10,29	41,57	1661	39,97	25,83	32,02	33,34	1,046
3	4,05	10,32	41,80	1658	39,67	25,79	29,28	32,22	1,011
\bar{x}	4,04	10,27	41,48	1659,0	40,01	25,82	33,76	32,63	1,031
S	0,010	0,068	0,374	1,732	0,356	0,031	5,564	0,617	0,018
R1Pz									
1	3,97	10,00	39,70	1379	34,74	25,12	8,25	33,81	1,081
2	4,04	10,03	40,52	1632	40,28	27,80	11,95	39,36	1,160
3	4,06	10,02	40,68	1576	38,74	26,48	11,08	25,23	1,121
\bar{x}	4,02	10,02	40,30	1529,0	37,92	26,47	10,43	32,80	1,121
S	0,047	0,015	0,526	132,887	2,860	1,340	1,933	7,119	0,040

Tablica 12.69. Rastezna svojstva pri različitim temperaturama komore

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	R_m , MPa	R_x , MPa	ε_p , %	R_p , MPa	E , GPa
175 °C									
1	4,09	5,01	20,49	842,0	41,09	36,67	4,92	40,54	2,048
2	4,07	4,98	20,27	870,1	42,93	36,92	5,57	42,04	2,244
3	4,18	4,99	20,86	849,8	40,74	35,96	5,54	39,83	1,971
\bar{x}	4,11	4,99	20,54	853,97	41,59	36,52	5,35	40,80	2,088
S	0,059	0,015	0,298	14,506	1,176	0,498	0,368	1,128	0,141
172 °C									
1	4,03	5,10	20,55	873,7	42,09	34,54	6,21	41,55	2,053
2	4,10	5,06	20,75	880,4	42,44	35,69	6,80	41,35	2,012
3	4,06	5,09	20,67	868,0	42,00	34,89	6,38	40,48	2,034
\bar{x}	4,06	5,08	20,65	874,03	42,18	35,04	6,46	41,13	2,033
S	0,035	0,021	0,097	6,207	0,232	0,589	0,303	0,569	0,021
169 °C									
1	3,93	4,98	19,57	832,0	42,51	37,09	5,01	41,94	2,275
2	4,00	5,03	20,12	868,0	43,14	35,17	5,54	41,24	2,507
3	4,00	5,00	20,00	864,7	43,23	33,46	5,68	42,28	2,226
\bar{x}	3,98	5,00	19,90	854,9	42,96	35,24	5,41	41,82	2,336
S	0,040	0,025	0,288	19,901	0,392	1,816	0,355	0,530	0,150

Tablica 12.70. Savojna svojstva originalnog materijala pri sobnoj atmosferi

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,20	9,97	41,87	120,3	65,69	7,56	12,29	9,98	63,24	1,584
2	4,17	10,01	41,74	116,9	64,50	7,54	12,34	15,90	41,56	1,504
3	4,15	10,02	41,58	116,9	65,06	6,96	11,45	9,89	63,20	1,493
\bar{x}	4,17	10,00	41,73	118,0	65,08	7,35	12,03	11,92	56,00	1,527
S	0,025	0,026	0,146	1,963	0,595	0,341	0,500	3,444	12,505	0,050
2Pxy										
1	3,97	10,28	40,81	105,7	62,63	7,05	12,13	9,43	59,96	1,541
2	4,00	10,25	41,00	110,2	64,51	7,64	13,05	9,87	61,23	1,690
3	4,01	10,25	41,10	107,9	62,88	8,12	13,83	9,99	58,94	1,567
\bar{x}	3,99	10,26	40,97	107,9	63,34	7,61	13,00	9,76	60,04	1,599
S	0,021	0,017	0,148	2,250	1,021	0,535	0,851	0,294	1,147	0,080
2Pz										
1*	4,00	9,98	39,92	104,6	62,89	7,44	12,69	9,93	56,25	1,629
2*	4,02	10,00	40,20	103,4	61,45	7,15	12,14	10,40	56,01	1,569
3	4,05	10,04	40,66	105,7	61,62	7,31	12,32	14,63	47,19	1,619
\bar{x}	4,02	10,01	40,26	104,6	61,99	7,30	12,38	11,65	53,15	1,606
S	0,025	0,031	0,375	1,150	0,787	0,144	0,280	2,587	5,163	0,032

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.71. Savojna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 500 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,17	10,03	41,83	119,3	65,64	7,98	13,07	10,27	63,16	1,602
2	4,21	9,96	41,93	121,5	66,07	7,58	12,29	10,02	63,00	1,493
3	4,16	10,03	41,72	120,3	66,56	7,17	11,77	9,96	63,47	1,497
\bar{x}	4,18	10,01	41,83	120,4	66,09	7,58	12,38	10,08	63,21	1,531
S	0,026	0,040	0,103	1,102	0,460	0,407	0,654	0,165	0,239	0,062
2Pxy										
1	4,03	10,27	41,39	108,0	62,16	7,44	12,61	9,57	59,57	1,493
2	3,95	10,29	40,65	108,0	64,58	7,46	12,90	10,35	59,85	1,665
3	4,06	10,24	41,57	111,3	63,33	8,37	14,07	9,69	60,77	1,459
\bar{x}	4,01	10,27	41,20	109,1	63,36	7,76	13,19	9,87	60,06	1,539
S	0,057	0,025	0,491	1,905	1,210	0,528	0,773	0,419	0,628	0,110
2Pz										
1	4,07	10,06	40,94	110,3	63,51	7,20	12,08	11,61	56,37	1,483
2*	4,02	10,09	40,56	106,8	62,91	6,93	11,77	11,01	56,25	1,549
3*	4,04	10,04	40,56	105,8	61,95	7,10	12,00	9,98	56,06	1,535
\bar{x}	4,04	10,06	40,69	107,6	62,79	7,08	11,95	10,87	56,23	1,522
S	0,025	0,025	0,221	2,363	0,787	0,137	0,161	0,825	0,156	0,035

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.72. Savojna svojstva originalnog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,17	9,96	41,53	137,3	74,52	8,24	13,35	13,20	64,75	1,612
2	4,22	9,96	42,03	138,4	73,58	7,92	12,73	12,79	66,41	1,606
3	4,15	10,05	41,71	136,2	74,03	7,38	12,02	13,71	61,80	1,749
\bar{x}	4,18	9,99	41,76	137,3	74,04	7,85	12,70	13,23	64,32	1,656
S	0,036	0,052	0,253	1,100	0,470	0,436	0,666	0,461	2,335	0,081
2Pxy										
1	3,97	10,31	40,93	126,1	74,47	7,42	12,76	12,45	65,84	1,832
2	4,01	10,28	41,22	126,1	73,20	7,25	12,33	12,60	64,06	1,719
3	3,99	10,27	40,98	127,2	74,69	7,95	13,60	12,70	64,76	1,828
\bar{x}	3,99	10,29	41,04	126,5	74,12	7,54	12,90	12,58	64,89	1,793
S	0,020	0,021	0,157	0,635	0,804	0,367	0,646	0,126	0,897	0,064
2Pz										
1*	4,05	10,04	40,66	122,7	71,53	7,33	12,36	10,07	64,01	1,810
2*	4,02	10,04	40,36	121,6	71,92	7,15	12,14	7,79	71,92	1,636
3*	4,04	10,02	40,48	117,1	68,71	5,99	10,12	8,96	67,50	1,547
\bar{x}	4,04	10,03	40,50	120,5	70,72	6,82	11,54	8,94	67,81	1,664
S	0,015	0,012	0,152	2,967	1,752	0,731	1,235	1,140	3,964	0,134

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kitalice

Tablica 12.73. Savojna svojstva originalnog materijala kod prirodnog starenja

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,22	10,00	42,20	133,9	72,15	8,03	13,00	13,01	61,86	1,626
2	4,16	10,02	41,68	123,1	71,98	7,98	13,50	13,14	61,40	1,601
3	4,18	10,01	41,84	135,4	73,15	8,12	12,40	12,87	62,55	1,636
\bar{x}	4,19	10,01	41,91	130,8	72,43	8,04	12,97	13,01	61,94	1,621
S	0,031	0,010	0,265	6,710	0,632	0,071	0,551	0,135	0,579	0,018
2Pxy										
1	4,03	10,29	41,47	119,3	68,50	7,19	12,17	12,78	58,79	0,935
2	4,00	10,24	40,96	120,1	68,01	7,01	12,54	12,77	57,89	0,968
3	4,02	10,20	41,00	118,5	69,12	7,34	12,21	12,04	58,56	0,924
\bar{x}	4,02	10,24	41,14	119,3	68,54	7,18	12,31	12,53	58,41	0,942
S	0,015	0,045	0,282	0,820	0,556	0,165	0,203	0,424	0,468	0,023
2Pz										
1*	4,03	10,05	40,50	115,8	68,14	6,97	11,80	12,18	52,50	1,382
2	3,97	10,00	39,70	115,1	68,01	6,51	11,54	12,01	52,87	1,300
3	4,02	10,09	40,56	116,2	68,81	6,35	11,33	12,23	52,01	1,412
\bar{x}	4,01	10,05	40,25	115,7	68,32	6,61	11,56	12,14	52,46	1,365
S	0,032	0,045	0,481	0,557	0,429	0,320	0,235	0,115	0,431	0,058

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.74. Savojna svojstva originalnog materijala kod sušenja 6 h pri 100 °C

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,18	9,98	41,72	119,2	65,62	7,56	12,35	10,40	63,15	1,538
2	4,19	9,97	41,77	122,6	67,24	7,88	12,84	10,47	63,54	1,540
3	4,20	9,98	41,92	121,4	66,23	7,49	12,17	9,95	64,40	1,615
\bar{x}	4,19	9,98	41,80	121,1	66,36	7,64	12,45	10,27	63,70	1,564
S	0,010	0,006	0,103	1,724	0,818	0,208	0,347	0,284	0,640	0,044
2Pxy										
1	4,03	10,25	41,31	110,2	63,55	6,66	11,28	10,09	60,32	1,594
2	3,98	10,27	40,87	112,4	66,36	7,15	12,26	9,53	63,70	1,745
3	4,02	10,26	41,25	115,8	67,08	7,61	12,93	9,54	64,47	1,706
\bar{x}	4,01	10,26	41,14	112,8	65,66	7,14	12,16	9,72	62,83	1,682
S	0,026	0,010	0,234	2,821	1,865	0,476	0,830	0,322	2,208	0,078
2Pz										
1	3,99	10,03	40,02	111,3	66,94	7,12	12,18	9,46	64,24	1,682
2	4,06	10,00	40,60	112,4	65,49	7,99	13,43	9,73	62,87	1,621
3	4,01	10,04	40,26	112,4	66,87	6,97	11,87	9,59	64,87	1,731
\bar{x}	4,02	10,02	40,29	112,0	66,43	7,36	12,49	9,60	63,99	1,678
S	0,036	0,021	0,292	0,635	0,818	0,549	0,826	0,135	1,023	0,055

Tablica 12.75. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 1 dan

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,12	9,95	40,99	116,9	66,47	6,67	11,25	9,66	63,92	1,833
2	4,13	10,02	41,38	111,3	62,55	7,12	11,76	9,67	60,02	1,696
3	4,21	10,13	42,65	112,4	60,13	7,66	12,42	11,81	53,52	1,466
\bar{x}	4,15	10,03	41,67	113,5	63,05	7,15	11,81	10,38	59,15	1,665
S	0,049	0,091	0,864	2,967	3,199	0,497	0,587	1,236	5,254	0,185
2Pxy										
1	3,97	10,22	40,57	102,3	61,00	6,72	11,56	9,37	59,66	1,638
2	3,99	10,29	41,06	101,2	59,30	7,17	12,26	9,42	56,67	1,551
3	3,99	10,22	40,78	103,4	61,04	6,88	11,77	9,51	58,38	1,528
\bar{x}	3,98	10,24	40,80	102,3	60,45	6,92	11,86	9,43	58,24	1,572
S	0,012	0,040	0,243	1,100	0,993	0,225	0,359	0,072	1,500	0,058
2Pz										
1	4,00	9,99	39,96	102,3	61,47	6,78	11,57	9,50	59,43	1,558
2	3,99	9,99	39,86	101,2	61,09	6,60	11,29	9,65	59,06	1,632
3	4,02	9,98	40,12	102,3	60,92	7,46	12,66	10,29	56,90	1,417
\bar{x}	4,00	9,99	39,98	101,9	61,16	6,95	11,84	9,81	58,46	1,536
S	0,015	0,006	0,131	0,635	0,282	0,452	0,724	0,418	1,366	0,109

Tablica 12.76. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 4 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,19	10,05	42,11	114,7	62,41	7,75	12,63	9,90	60,59	1,473
2	4,20	10,09	42,38	112,4	60,65	8,42	13,68	9,99	58,22	1,450
3	4,23	10,14	42,89	116,9	62,53	7,43	12,04	10,67	59,54	1,512
\bar{x}	4,21	10,09	42,46	114,7	61,86	7,86	12,78	10,19	59,45	1,478
S	0,021	0,045	0,398	2,250	1,052	0,505	0,831	0,421	1,188	0,031
2Pxy										
1	4,01	10,26	41,14	102,3	59,56	7,34	12,49	9,53	56,94	1,413
2	4,01	10,27	41,18	100,1	58,19	7,00	11,92	9,66	56,21	1,362
3	4,00	10,28	41,12	103,4	60,38	7,54	12,86	9,46	58,42	1,426
\bar{x}	4,01	10,27	41,15	101,9	59,38	7,29	12,42	9,55	57,19	1,400
S	0,006	0,010	0,032	1,680	1,106	0,272	0,474	0,105	1,126	0,034
2Pz										
1	4,04	10,04	40,56	102,3	59,96	6,94	11,72	9,60	57,97	1,523
2	4,07	10,07	40,98	103,4	59,54	7,06	11,84	11,41	53,72	1,518
3	4,06	10,07	40,88	102,3	59,19	7,68	12,92	9,60	56,59	1,493
\bar{x}	4,06	10,06	40,81	102,7	59,56	7,23	12,16	10,20	56,09	1,511
S	0,015	0,017	0,221	0,635	0,386	0,401	0,661	1,048	2,168	0,016

Tablica 12.77. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 7 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,19	10,04	42,07	114,7	62,47	7,52	12,25	10,07	60,02	1,543
2	4,09	10,03	41,02	107,9	61,77	7,59	12,67	10,02	58,56	1,369
3	4,17	10,02	41,78	114,7	63,20	7,46	12,21	9,86	61,35	1,433
\bar{x}	4,15	10,03	41,62	112,4	62,48	7,52	12,38	9,98	59,98	1,448
S	0,053	0,010	0,540	3,926	0,715	0,065	0,255	0,110	1,396	0,088
2Pxy										
1	3,98	10,25	40,80	100,1	59,19	7,39	12,67	9,44	57,86	1,474
2	3,97	10,28	40,81	102,3	60,64	7,03	12,09	9,47	58,63	1,516
3	3,98	10,25	40,80	100,1	59,19	7,36	12,62	10,13	55,84	1,452
\bar{x}	3,98	10,26	40,80	100,8	59,67	7,26	12,46	9,68	57,44	1,481
S	0,006	0,017	0,010	1,270	0,837	0,199	0,321	0,392	1,441	0,033
2Pz										
1	3,99	10,07	40,18	102,3	61,29	7,50	12,82	9,65	59,25	1,536
2	4,00	10,03	40,12	102,3	61,23	7,36	12,56	10,03	58,53	1,645
3	4,05	10,03	40,62	100,1	58,41	6,81	11,47	9,58	56,43	1,500
\bar{x}	4,01	10,04	40,31	101,6	60,31	7,22	12,28	9,75	58,07	1,560
S	0,032	0,023	0,274	1,270	1,646	0,366	0,716	0,242	1,465	0,076

Tablica 12.78. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 14 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,24	9,99	42,36	109,1	58,29	7,53	12,12	10,87	54,09	1,545
2	4,19	10,07	42,19	110,2	59,84	7,48	12,19	10,76	56,80	1,265
3	4,13	10,06	41,55	104,6	58,52	7,49	12,39	10,25	56,00	1,333
\bar{x}	4,19	10,04	42,03	108,0	58,88	7,50	12,23	10,63	55,63	1,381
S	0,055	0,044	0,428	2,967	0,836	0,024	0,140	0,331	1,392	0,146
2Pxy										
1	4,00	10,29	41,16	95,6	55,74	7,33	12,51	10,13	52,45	1,424
2	3,96	10,26	40,63	94,4	56,36	7,16	12,34	10,10	52,33	1,392
3	4,00	10,23	40,92	93,3	54,75	7,21	12,30	9,94	52,11	1,383
\bar{x}	3,99	10,26	40,90	94,5	55,62	7,23	12,38	10,06	52,30	1,400
S	0,023	0,030	0,266	1,125	0,812	0,089	0,112	0,103	0,172	0,022
2Pz										
1	4,08	10,11	41,25	96,7	55,16	7,45	12,47	10,32	51,97	1,348
2	4,05	10,05	40,70	93,3	54,36	7,49	12,63	10,11	51,74	1,391
3	4,07	10,07	40,98	96,7	55,65	7,82	13,12	10,21	52,43	1,453
\bar{x}	4,07	10,08	40,98	95,6	55,06	7,59	12,74	10,21	52,05	1,397
S	0,015	0,031	0,273	1,934	0,651	0,203	0,339	0,105	0,351	0,053

Tablica 12.79. Savojna svojstva originalnog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
2Lxy										
1	4,21	10,04	42,27	104,6	56,43	7,54	12,22	10,50	54,00	1,238
2	4,23	10,01	42,34	101,3	54,27	8,29	13,38	12,76	46,42	1,169
3	4,22	10,06	42,45	103,5	55,46	7,80	12,62	10,33	53,05	1,336
\bar{x}	4,22	10,04	42,35	103,1	55,39	7,88	12,74	11,20	51,16	1,248
S	0,010	0,025	0,093	1,680	1,082	0,383	0,589	1,357	4,129	0,084
2Pxy										
1	4,02	10,26	41,25	94,5	54,71	7,37	12,52	9,55	52,75	1,291
2	3,98	10,25	40,80	90,0	53,21	7,40	12,69	9,52	50,55	1,226
3	4,00	10,27	41,08	87,8	51,27	8,20	14,00	9,61	49,28	1,203
\bar{x}	4,00	10,26	41,04	90,8	53,06	7,66	13,07	9,56	50,86	1,240
S	0,020	0,010	0,228	3,437	1,725	0,471	0,810	0,048	1,756	0,046
2Pz										
1	4,07	10,09	41,07	93,3	53,62	8,14	13,65	10,84	49,74	1,282
2	4,06	10,06	40,84	87,8	50,80	7,28	12,23	9,63	48,20	1,309
3	4,02	10,04	40,36	88,8	52,57	7,51	12,76	10,56	48,58	1,222
\bar{x}	4,05	10,06	40,76	90,0	52,33	7,64	12,88	10,34	48,84	1,271
S	0,026	0,025	0,361	2,967	1,425	0,447	0,718	0,631	0,802	0,045

Tablica 12.80. Savojna svojstva miješanog materijala pri sobnoj atmosferi

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
M2Lxy										
1	4,16	10,05	41,81	127,1	70,16	7,38	12,11	12,87	60,83	1,463
2	4,17	10,10	42,12	128,2	70,08	8,05	13,19	13,13	62,09	1,300
3	4,14	10,01	41,44	124,8	69,86	7,62	12,57	13,89	59,79	1,538
\bar{x}	4,17	10,00	41,73	118,0	65,08	7,35	12,03	11,92	56,00	1,527
S	0,025	0,026	0,146	1,963	0,595	0,341	0,500	3,444	12,505	0,050
M2Pxy										
1	3,97	10,28	40,81	105,7	62,63	7,05	12,13	9,43	59,96	1,541
2	4,00	10,25	41,00	110,2	64,51	7,64	13,05	9,87	61,23	1,690
3	4,01	10,25	41,10	107,9	62,88	8,12	13,83	9,99	58,94	1,567
\bar{x}	3,99	10,26	40,97	107,9	63,34	7,61	13,00	9,76	60,04	1,599
S	0,021	0,017	0,148	2,250	1,021	0,535	0,851	0,294	1,147	0,080
M2Pz										
1*	4,00	9,98	39,92	104,6	62,89	7,44	12,69	9,93	56,25	1,629
2*	4,02	10,00	40,20	103,4	61,45	7,15	12,14	10,40	56,01	1,569
3	4,05	10,04	40,66	105,7	61,62	7,31	12,32	14,63	47,19	1,619
\bar{x}	4,02	10,01	40,26	104,6	61,99	7,30	12,38	11,65	53,15	1,606
S	0,025	0,031	0,375	1,150	0,787	0,144	0,280	2,587	5,163	0,032

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.81. Savojna svojstva miješanog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
M2Lxy										
1*	4,16	10,07	41,89	75,3	41,51	2,44	4,01	2,71	41,25	1,629
2	4,17	10,15	42,33	129,3	70,33	7,21	11,80	12,14	62,39	1,639
3	4,15	10,05	41,71	131,6	72,96	7,59	12,49	12,16	66,72	1,696
\bar{x}	4,16	10,09	41,97	112,1	61,60	5,75	9,43	9,00	56,79	1,655
S	0,010	0,053	0,317	31,833	17,448	2,867	4,708	5,449	13,628	0,036
M2Pxy										
1	4,00	10,15	40,60	125,9	74,45	7,61	12,98	12,16	65,79	1,689
2	3,99	10,12	40,38	119,3	71,06	7,15	12,23	13,12	58,30	1,720
3	4,04	10,16	41,05	129,4	74,88	7,07	11,94	13,13	63,83	1,705
\bar{x}	4,01	10,14	40,68	124,9	73,46	7,27	12,38	12,80	62,64	1,705
S	0,026	0,021	0,340	5,129	2,092	0,290	0,537	0,557	3,884	0,016
M2Pz										
1*	4,05	10,08	40,82	106,8	62,04	5,58	9,40	7,14	60,00	1,672
2*	4,07	10,08	41,03	118,1	67,90	7,30	12,24	8,50	63,75	1,674
3*	4,00	9,99	39,96	117,0	70,27	7,08	12,09	9,52	59,98	1,682
\bar{x}	4,04	10,05	40,60	114,0	66,74	6,65	11,25	8,39	61,24	1,676
S	0,036	0,052	0,566	6,231	4,237	0,936	1,595	1,192	2,171	0,005

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.82. Savojna svojstva miješanog materijala kod prirodnog starenja

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
M2Lxy										
1	4,18	10,08	42,13	124,8	68,05	7,73	12,63	14,07	55,79	1,416
2	4,12	10,05	41,41	125,1	68,12	7,69	12,78	13,87	55,47	1,400
3	4,20	10,01	42,04	124,3	68,34	7,34	12,03	13,98	55,12	1,398
\bar{x}	4,17	10,05	41,86	124,7	68,17	7,59	12,48	13,97	55,46	1,405
S	0,042	0,035	0,397	0,404	0,151	0,215	0,397	0,100	0,335	0,010
M2Pxy										
1	3,99	10,11	40,34	118,1	70,44	6,82	11,66	13,25	58,36	0,841
2	4,01	10,01	40,14	117,6	70,45	6,54	11,01	13,01	58,26	0,812
3	4,00	10,14	40,56	117,9	70,23	6,24	11,12	13,58	58,01	0,856
\bar{x}	4,00	10,09	40,35	117,9	70,37	6,53	11,26	13,28	58,21	0,836
S	0,010	0,068	0,210	0,273	0,124	0,289	0,348	0,286	0,180	0,022
M2Pz										
1*	4,02	10,00	40,20	112,5	66,83	6,67	11,33	10,53	60,11	1,252
2	4,03	10,01	40,34	112,8	66,14	6,54	11,12	10,12	60,14	1,244
3	4,01	10,01	40,14	111,8	66,25	6,23	11,42	10,29	59,87	1,269
\bar{x}	4,02	10,01	40,23	112,4	66,41	6,48	11,29	10,31	60,04	1,255
S	0,010	0,006	0,103	0,513	0,371	0,228	0,154	0,206	0,148	0,013

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.83. Savojna svojstva miješanog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
M2Lxy										
1	4,12	9,98	41,12	106,8	60,52	8,56	14,18	12,57	53,52	1,333
2	4,19	9,99	41,86	110,2	60,32	8,10	13,20	12,49	55,39	1,257
3	4,20	9,99	41,96	107,9	58,81	7,80	12,67	12,65	53,31	1,367
\bar{x}	4,17	9,99	41,64	108,3	59,88	8,15	13,35	12,57	54,07	1,319
S	0,044	0,006	0,459	1,735	0,935	0,383	0,766	0,080	1,145	0,056
M2Pxy										
1	3,99	10,18	40,62	95,6	56,63	7,21	12,33	12,60	49,28	1,293
2	4,01	10,15	40,70	100,1	58,88	8,01	13,63	12,72	51,58	1,397
3	4,02	10,16	40,84	97,8	57,21	8,13	13,81	12,44	51,28	1,344
\bar{x}	4,01	10,16	40,72	97,8	57,57	7,78	13,26	12,59	50,71	1,345
S	0,015	0,015	0,114	2,250	1,168	0,502	0,808	0,140	1,250	0,052
M2Pz										
1	4,04	10,04	40,56	95,6	56,01	8,10	13,69	12,79	49,42	1,281
2	3,99	9,99	39,86	91,1	54,99	7,49	12,81	12,32	48,86	1,353
3	4,05	10,00	40,50	91,1	53,32	7,72	13,01	12,39	46,73	1,297
\bar{x}	4,03	10,01	40,31	92,6	54,77	7,77	13,17	12,50	48,34	1,310
S	0,032	0,026	0,388	2,598	1,358	0,310	0,461	0,254	1,419	0,038

Tablica 12.84. Savojna svojstva recikliranog materijala pri sobnoj atmosferi

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
R2Lxy										
1	4,17	10,03	41,83	116,9	64,37	8,44	13,81	12,87	58,81	1,416
2	4,18	10,20	42,64	118,1	63,62	8,46	13,81	12,70	57,56	1,319
3	4,13	10,07	41,59	114,7	64,11	7,85	12,98	12,70	56,56	1,243
\bar{x}	4,16	10,10	42,02	116,6	64,03	8,25	13,53	12,76	57,64	1,326
S	0,026	0,089	0,549	1,724	0,381	0,343	0,479	0,098	1,127	0,087
R2Pxy										
1	3,88	10,14	39,34	88,8	55,88	7,50	13,20	12,82	46,66	1,112
2	3,96	10,1	40,00	104,6	63,40	7,24	12,47	13,65	49,76	1,455
3	4,00	10,03	40,12	106,8	63,92	7,49	12,78	12,73	53,81	1,466
\bar{x}	3,95	10,09	39,82	100,1	61,07	7,41	12,82	13,07	50,08	1,344
S	0,061	0,056	0,417	9,790	4,499	0,149	0,366	0,507	3,586	0,201
R2Pz										
1*	4,02	9,98	40,12	106,9	63,63	7,08	12,03	8,60	61,12	1,449
2*	4,08	10,01	40,84	119,3	68,70	7,68	12,86	12,00	61,11	1,646
3*	4,02	9,97	40,08	108,0	64,35	6,97	11,83	8,55	61,23	1,398
\bar{x}	4,04	9,99	40,35	111,4	65,56	7,24	12,24	9,72	61,15	1,498
S	0,035	0,021	0,428	6,864	2,743	0,386	0,546	1,976	0,067	0,131

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.85. Savojna svojstva recikliranog materijala kod starenja u UV komori 1000 h

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
R2Lxy										
1	4,02	10,26	41,25	111,3	64,47	7,43	12,62	13,22	52,75	1,430
2	4,22	10,12	42,71	124,8	66,51	8,67	14,02	13,46	56,92	1,252
3	4,19	10,18	42,65	123,8	66,47	8,00	13,03	13,06	60,43	1,375
\bar{x}	4,14	10,19	42,20	120,0	65,82	8,03	13,22	13,25	56,70	1,352
S	0,108	0,070	0,829	7,522	1,166	0,619	0,720	0,201	3,845	0,091
R2Pxy										
1	4,02	10,12	40,68	108,0	63,40	7,54	12,79	12,86	55,47	1,421
2	4,01	10,12	40,58	109,1	64,36	7,43	12,65	13,63	55,75	0,744
3	3,98	10,13	40,32	99,0	59,23	7,18	12,31	12,97	49,81	0,537
\bar{x}	4,00	10,12	40,53	105,4	62,33	7,38	12,58	13,15	53,68	0,901
S	0,021	0,006	0,188	5,541	2,727	0,183	0,247	0,416	3,352	0,462
R2Pz										
1*	4,05	9,96	40,34	108,0	63,46	6,64	11,19	8,33	49,01	0,691
2*	4,02	9,96	40,04	82,1	48,97	3,96	6,72	6,84	45,00	1,254
3*	4,00	9,95	39,80	102,3	61,72	6,40	10,92	7,93	52,50	0,525
\bar{x}	4,02	9,96	40,06	97,5	58,05	5,67	9,61	7,70	48,84	0,823
S	0,025	0,006	0,270	13,610	7,911	1,483	2,505	0,772	3,753	0,382

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.86. Savojna svojstva recikliranog materijala kod prirodnog starenja

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
R2Lxy										
1	4,17	10,10	42,12	122,6	67,01	7,47	12,23	13,27	58,41	1,404
2	4,20	10,01	42,04	122,1	66,98	7,52	12,01	13,05	58,42	1,412
3	4,12	10,00	41,20	121,8	67,23	7,34	12,12	13,35	58,34	1,435
\bar{x}	4,16	10,04	41,79	122,2	67,07	7,44	12,12	13,22	58,39	1,417
S	0,040	0,055	0,509	0,404	0,137	0,093	0,110	0,155	0,044	0,016
R2Pxy										
1	3,89	10,13	39,41	106,8	66,92	7,49	13,14	12,92	57,05	0,767
2	4,01	10,01	40,14	106,1	66,54	7,12	13,01	12,54	57,10	0,777
3	3,99	10,09	40,26	107,2	66,12	7,25	13,89	13,01	56,98	0,745
\bar{x}	3,96	10,08	39,93	106,7	66,53	7,29	13,35	12,82	57,04	0,763
S	0,064	0,061	0,462	0,557	0,400	0,187	0,475	0,249	0,060	0,016
R2Pz										
1*	4,03	9,96	40,14	102,3	60,74	6,01	10,18	9,06	24,72	0,613
2*	4,01	10,01	40,14	102,0	60,75	5,98	10,01	9,23	24,25	0,599
3*	4,01	9,99	40,06	102,6	60,54	5,89	10,23	8,87	24,58	0,602
\bar{x}	4,02	9,99	40,11	102,3	60,68	5,96	10,14	9,05	24,52	0,605
S	0,012	0,025	0,046	0,300	0,118	0,063	0,115	0,180	0,241	0,007

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanje je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

Tablica 12.87. Savojna svojstva recikliranog materijala kod apsorpcije vode 28 dana

	h , mm	b , mm	A_0 , mm ²	F_{\max} , N	σ_{fm} , MPa	ε_{fm} , %	S_{\max} , mm	ε_{fp} , %	σ_{fp} , MPa	E_f , GPa
R2Lxy										
1	4,18	10,12	42,30	105,7	57,36	8,31	13,58	12,55	51,28	1,146
2	4,15	10,11	41,96	97,8	53,92	8,64	14,22	12,30	48,96	1,083
3	4,24	10,18	43,16	101,2	53,06	9,23	14,86	12,26	48,94	1,054
\bar{x}	4,19	10,14	42,47	101,6	54,78	8,73	14,22	12,37	49,73	1,094
S	0,046	0,038	0,621	3,963	2,275	0,466	0,640	0,157	1,345	0,047
R2Pxy										
1	4,00	10,08	40,32	85,4	50,86	7,45	12,71	12,21	44,82	1,095
2	4,03	10,12	40,78	86,6	50,58	7,91	13,40	12,14	45,33	1,271
3	4,01	10,08	40,42	84,3	49,96	7,98	13,58	12,21	44,63	1,079
\bar{x}	4,01	10,09	40,51	85,5	50,47	7,78	13,23	12,19	44,93	1,148
S	0,015	0,023	0,244	1,125	0,461	0,289	0,459	0,040	0,362	0,107
R2Pz										
1*	4,03	10,01	40,34	89,9	53,12	7,19	12,18	11,23	41,31	1,326
2*	4,04	10,03	40,52	83,2	48,79	6,90	11,66	11,62	41,25	1,257
3*	3,96	9,95	39,40	71,9	44,27	7,30	12,58	9,77	37,50	1,022
\bar{x}	4,01	10,00	40,09	81,7	48,73	7,13	12,14	10,87	40,02	1,202
S	0,044	0,042	0,601	9,093	4,425	0,205	0,461	0,977	2,183	0,159

* ispitno tijelo koje je puknulo prilikom ispitivanja, kod ostalih ispitivanja je prekinuto prije nego je ispitno tijelo upalo u čeljusti kidalice

ŽIVOTOPIS



Ana Pilipović rođena je 14. listopada 1980. godine u Zagrebu, gdje je završila osnovnu školu i potom II. opću gimnaziju u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, smjer strojarstvo upisuje akademske godine 1999./2000. Diplomirala je u srpnju 2006. godine na usmjerenju *Preradba i montaža* s općim uspjehom vrlo dobar s temom diplomskog rada: *Analiza svojstava materijala za brzu proizvodnju prototipova*. Tijekom studiranja nagrađena je Rektorovom nagradom (tema: *Rookie – višenamjensko pomagalo za usavršavanje tehničko-taktičnih elemenata rukometne igre*, lipanj 2002.), te je također bila četiri godine demonstratorica pri Zavodu za tehnologiju, Katedra za preradu polimera.

U studenom 2006. godine upisuje poslijediplomski studij strojarstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, smjer *Strojarske tehnologije*. Od siječnja 2008. godine radi kao znanstvena novakinja - asistentica na Katedri za preradu polimera i drva, Zavoda za tehnologiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Od 2008. godine uključena je u znanstveni projekt *Povišenje učinkovitosti razvoja i preradbe polimernih proizvoda* (120-1521473-1808), koji je dio programa *Brza proizvodnja – od ideje do stvarnosti* financiran od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta, glavni istraživač: prof. dr. sc. Mladen Šercer, a od srpnja 2010. godine na projektu *Dinamička mehanička analiza polimera i kompozita*, glavni istraživač doc. dr. sc. Tatjana Haramina financiranog od Hrvatske zaklade za znanost. Također je uključena od srpnja 2010. godine u FP7 projekt *KARMA – Knowledge Based Process Planning and Design for Additive Layer Manufacturing*, te od studenog 2011. godine na projektu *MarineClean* (277396), u okviru programa *ECO-Innovation*.

Dobitnica je stipendije za izobrazbu doktoranata od Hrvatske zaklade za znanost, koju je odradila na *Fakulteti za strojništvo*, Maribor, Slovenija u trajanju 6 mjeseci.

Područja kojima se bavi su aditivni postupci, postupci proizvodnje polimernih tvorevina, postupci proizvodnje kompozitnih tvorevina, recikliranje polimernih materijala, itd. Aktivno sudjeluje u izvođenju nastave svih kolegija Katedre, te je također uključena u ostale znanstvene i stručne djelatnosti Katedre za preradu polimera. Do sada je objavila kao autor ili koautor 29 znanstvenih i stručnih radova u raznim časopisima i u zbornicima radova u zemlji i inozemstvu. Uključena je u rad znanstvenog časopisa "*Polimeri*", te je član *Društva za plastiku i gumu* i sudjeluje u organizaciji stručnih savjetovanja u sklopu *Društva*.

Vrlo dobro govori i piše engleski jezik.

BIOGRAPHY



Ana Pilipović was born on 14th October 1980 in Zagreb, where she finished primary school and after that II. high school also in Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, field mechanical engineering she started attending in 1999/2000 She graduate in July 2006 in field of specialisation *Manufacturing and Assembly* with very good mark. Her diploma thesis was: *Experimental Analysis of Materials for Rapid Prototyping*. During her studies she was awarded with Rector's Award (thesis: *Rookie – multipurpose tool for improvement of technical-tactical elements of handball*, June 2002), and she was four years demonstrator at Department of Technology, Chair of Polymer Processing.

In November 2006 Ana Pilipović enrolled in the postgraduate study of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, field *Manufacturing Technologies*. Since January 2008 she has been employed as research assistant at the Chair of Polymer Processing, Department of Technology at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb.

From 2008 she is participated in science project *Increasing Efficiency in Polymeric Products and Processing Development* (120-1521473-1808) which is part of program *Rapid Production – From Vision to Reality* financed by the Ministry of Science, Education and Sports, principal researcher prof. dr. sc. Mladen Šercer, and from July 2010 in project *Dinamical Mechanical Analysis of Polymers and Composites*, principal researcher doc. dr. sc. Tatjana Haramina financed by the Croatia Science Foundation. She has participated in FP7 project *KARMA – Knowledge Based Process Planning and Design for Additive Layer Manufacturing* from July 2010 and from November 2011 in project *MarineClean* (277396) which is part of program *ECO-Innovation*.

She is also a winner of a scholarship for education of doctoral students financed by Croatia Science Foundation, which she used during the stay at *Faculty of Mechanical Engineering*, Maribor, Slovenia in period of 6 months.

Her special interest lies in additive manufacturing, polymer processing, composite processing, recycling of polymers, etc. She is included in all work of the Chair for Polymer Processing. Up to now she has published as author and co-author 29 scientific and professional papers in journals and conference proceedings in Croatia and abroad. She participates actively in publishing the scientific journal *Polimeri*, and she is member of the *Society of Plastics and Rubber Engineers*.

She is fluent both in spoken and written English.