



SURFACE ROUGHNESS OF SAMPLES OBTAINED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES WITH REGARD TO LAYER THICKNESS AND SURFACE INCLINE, AND INFLUENCE ON ECONOMIC PROFITABILITY

HRAPAVOST POVRŠINE UZORAKA DOBIVENIH ADITIVNIM TEHNOLOGIJAMA S OBZIROM NA DEBLJINU SLOJA I NAGIB POVRŠINE, TE UTJECAJ NA EKONOMSKU ISPLATIVOST

Kostadin, Tihana, *Veleučilište u Karlovcu, RH, tihana.kostadin@vuka.hr*

Šimunić, Nikola, *Veleučilište u Karlovcu, RH, nikola.simunic@vuka.hr*

Feketić, Zvonimir, *Veleučilište u Karlovcu, RH, zvonimir.feketic@gmail.com*

Abstract: This paper studies the influence of surface inclination and layer thickness on the surface roughness of the produced test samples. Two AM technologies or processes (FDM and SLS) were used, with the use of three different materials (PLA, PETG and PA12) and two subsequent treatments (compressed air and glass bead blasting). Surface roughness parameters (R_a , R_z and R_{max}) were measured and analyzed after different manufacturing conditions. Their variability and statistical analysis are presented. From the obtained results, it is evident that with increasing slope (from 0° to 90°) the values increase to a maximum (between 10° and 40°), after which they decrease (from 50° to 90°), while increasing the thickness of the layer causes higher values of roughness parameters. Also, the aim of the paper is to determine the economic profitability of the used procedures, that is, the impact of the manufacturing procedures on the price of the product.

Keywords: additive technologies, surface roughness, costs, economic aspect, sustainable development

Sažetak: Ovaj rad proučava utjecaj nagiba površine i debljine sloja na hrapavost površine izrađenih probnih uzoraka. Korištene su dvije AM tehnologije odnosno postupka (FDM i SLS), uz upotrebu tri različita materijala (PLA, PETG i PA12) i dvije naknadne obrade (komprimirani zrak i staklarenje). Mjereni su i analizirani parametri hrapavosti površine (R_a , R_z i R_{max}), nakon različitih uvjeta izrade. Prikazana je njihova varijabilnost i statistička analiza. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da sa povećanjem nagiba (od 0° prema 90°) vrijednosti rastu do maksimalne (između 10° i 40°), nakon čega se smanjuju (od 50° do 90°), dok povećanje debljine sloja uzrokuje više vrijednosti parametara hrapavosti. Također, rad ima za cilj utvrditi ekonomsku isplativost korištenih postupaka, odnosno utjecaj postupaka izrade na cijenu proizvoda.

Ključne riječi: aditivne tehnologije, hrapavost površine, troškovi, ekonomski aspekt, održivi razvoj.

1. Uvod

Aditivna proizvodnja ili trodimenzionalni (3D) ispis kontrolirano je dodavanje materijala, provedeno uzastopnim nanošenjem slojeva materijala dok se ne formira unaprijed definirani oblik. Omogućuje izradu predmeta različite složenosti i veličine.

Ovaj sustavni pristup omogućuje brzu izradu prototipova i prilagodbu proizvoda, jer je moguća izrada različitog dizajna kako bi zadovoljili pojedinačne specifikacije. Za razliku od tradicionalnih postupaka poput injekcijskog prešanja, glodanja ili lijevanja, koji koriste pristup odozgo prema dolje (top down), kod aditivnih tehnologija prisutan je obrnuti princip, odozdo prema gore (bottom up). (Badiru, Valencia i Liu, 2017.)

Aditivna tehnologija uključuje sljedeće korake: izrada CAD modela, pretvaranje CAD modela u STL datoteku, prebacivanje STL datoteke na AM stroj, podešavanje parametara AM stroja, izrada prototipa, uklanjanje prototipa, naknadna obrada (ako je potrebna), uporaba. (Gibson, Rosen i Stucker, 2015.)

Hrapavost površine je u općem smislu mikro geometrijska nepravilnost površine, koja nastaje tijekom postupaka obrade ili drugih utjecaja. Hrapavost površine u određenim slučajevima bitno utječe na radna svojstva strojnih dijelova, posebno na mjestima međusobnog spoja pojedinih elemenata (trenje, zračnost, podmazivanje...). Općenito, strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju veću dinamičku čvrstoću, veću otpornost na koroziju, veću sposobnost nalijeganja, bolje prenose toplinu itd. Kako je postizanje niskog stupnja hrapavosti uvijek povezano s duljim i skupljim postupcima obrade, ono ima za posljedicu povećanje cijene strojnog dijela. Glavni cilj ovog rada je ocjenjivanje i istraživanje primarnih čimbenika AM proizvodnje u smislu kvalitete i hrapavosti površine na temelju probnih uzoraka. U ovom radu se mjere parametri hrapavosti površine: R_a , R_z i R_{max} . (Feketić, 2022.)

Također, obrađuje se i aspekt ekonomske isplativosti primjene obrađenih postupaka, te se nakon analize dobivenih rezultata, donose glavni zaključci.

2. Teorijska razrada

Danas se aditivna proizvodnja jako razvila, te ima široku uporabu, a time i korišteni materijali dobivaju na sve većem značaju.

Kako su materijali i njihova odabrana svojstva podložni stalnim poboljšanjima i brzim promjenama, teško je praćenje njihovih klasifikacija. Važno je napomenuti da materijal samo djelomično određuje rezultat AM procesa, a na ukupnu kvalitetu tvorevina utječu različiti parametri. Tako je uz sami izbor optimalnog materijala, bitno voditi računa o odabranom procesu aditivne proizvodnje te konstrukcijskom rješenju.

Kod aditivne proizvodnje, koja se izvodi u slojevima, dolazi do prepoznatljive razlike svojstava. U tom slučaju, govori se o anizotropiji, odnosno da svojstva variraju u različitim smjerovima i vrijednostima. Slojevito orijentirana proizvodnja, pomognuta AM procesima zapravo generira anizotropne tvorevine. Stupanj anizotropije može varirati; od jedva prepoznatljivog do stupnja koji ima značajan utjecaj na stabilnost. Iako uglavnom ovisi o AM procesu, orijentacija dijela u izradi i konstrukcijsko rješenje također igraju važnu ulogu. (Gebhardt, 2012.)

Za posebne primjene, AM tvorevine obično se naknadno obrađuju kako bi se poboljšala mikrostruktura, smanjila poroznost i poboljšala kvaliteta površine, smanjila hrapavost i zadovoljile geometrijske tolerancije.

Danas AM omogućuje obradu materijala svih klasa, odnosno polimera, metala i keramike, te njihove kombinacije u obliku kompozita.

Troškovima, odnosno ekonomskoj isplativosti izrade, uvijek treba dati posebnu važnost, pa se iz tog razloga i istražuju novi materijali i tehnologije.

Prva skupina materijala koja se koristila u aditivnoj proizvodnji su polimerni materijali, koji su i danas najzastupljeniji.

Za selektivno lasersko sinteriranje (SLS) poželjni materijali su poliamidi (PA). Iako se poliamidi često upotrebljavaju za injekcijsko brizganje, oni se značajno razlikuju od onih koji se koriste u AM postupcima. Prvenstveno, čak ako bi materijal bio kemijski identičan, krajnje tvorevine jako bi se razlikovale. Materijal koji je potpuno rastaljen i ubrizgan u kalup pod visokim tlakom pokazuje drugačija svojstva u odnosu na isti onaj koji je lokalno rastaljen pod atmosferskim tlakom, te se taloži u slojevima i učvršćuje toplinskom vodljivošću. Industrijski proizvodi tipično se izrađuju od PA6, dok se kod SLS-a uglavnom koristi PA11 ili PA12.

U usporedbi s drugim metodama FDM tehnologija ima svojih prednosti poput raznolikosti izrade te niskih troškova materijala zbog čega je i najčešće korištena metoda. (Šančić i Tomašić, 2022.)

Za FDM postupke, osnovni materijal je akrilonitril/butadien/stiren (ABS). Budući da se ABS često koristi kao materijal za injekcijsko brizganje, smatra se standardnim inženjerskim materijalom.

Kako razvoj i proizvodnja novih proizvoda iziskuje visokokvalitetne polimerne materijale, na tržištu su se pojavili materijali poput polifenilsulfona (PPSF / PPSU) i polietereeterketona (PEEK). PEEK ima izvrsna kemijska svojstva, otporan je na plamen i visoku temperaturu, lagan je i ima visoku vlačnu čvrstoću. Također, materijali dolaze u različitim bojama, međutim korištenje je jednostavnije kod AM postupaka koji imaju dobavu materijala iz posebnog spremnika (npr. FDM postupak). Razlog tomu je potreba za zamjenom cijelog materijala pohranjenog u stroju i izrada tvorevine upravo iz određene boje kod postupaka koji materijal skladište unutar komore za izradu (npr. SLS postupak). (Gebhardt, 2012.)

Zaključno se može reći da je sve veća raznolikost polimernih materijala koji se mogu koristiti u aditivnoj proizvodnji.

Ispitivani parametri hrapavosti [u μm] u ovom radu su: R_a (srednje aritmetičko odstupanje profila), R_z (najveća visina profila) i R_{max} (najveća visina neravnina).

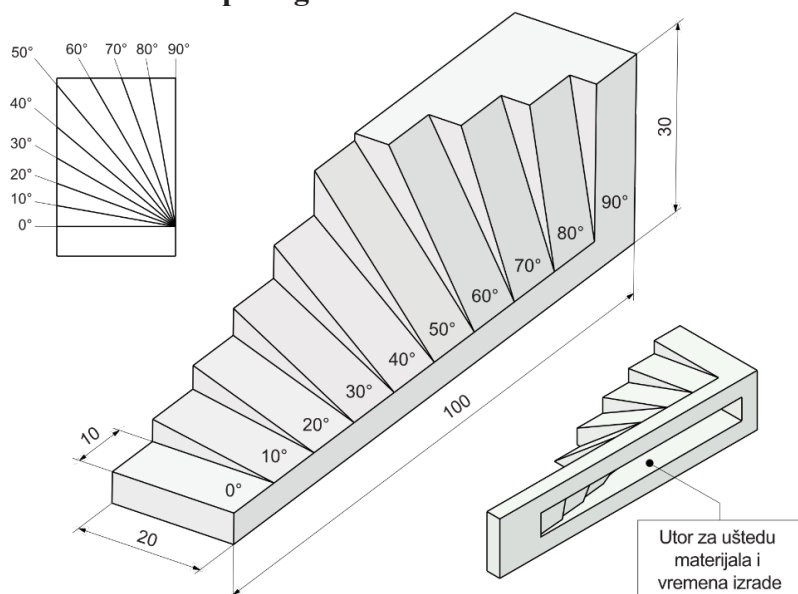
Površinska hrapavost rezultat je nepravilnosti na površini koja je svojstvena postupku obrade, a ne stroja, ali koja ne uključuje valovitost, odstupanje od oblika i površinske greške. Hrapavost uključuje kratkovalne nepravilnosti površine. Općenito je posljedica proizvodnog procesa. Kvantificira se vertikalnim odstupanjima stvarne površine od njenog idealnog oblika. Ako su ta odstupanja velika - površina je gruba, a ako su mala - površina je glatka.

3. Materijali i metode

Uzorak je kreiran pomoću softvera CATIA V5-6R2019 (Dassault Systèmes), a konačni 3D model izvezen je u obliku STL datoteke, koja omogućuje uvoz u program za rezanje slojeva, povezan sa AM strojem.

Uzorak se sastoji od bloka kvadratnog oblika dimenzije 100x20x30 mm (šxdxv) koji je podijeljen na deset jednakih ploha pod nagibom od 0° do 90° prema horizontalnoj ravnini, u koracima od 10°, kako prikazuje slika 1. (Feketić, 2022.)

Slika 1 Prikaz ispitnog uzorka



Na uzorku je na taj način postignuto deset jednostavnih projektnih konfiguracija površina, koje se mogu ispitivati sa gornje strane. Oblaganje sa donje strane služi kao potpora i sprječava deformiranje tijekom vremena upotrebe, koje je ograničeno karakteristikama materijala.

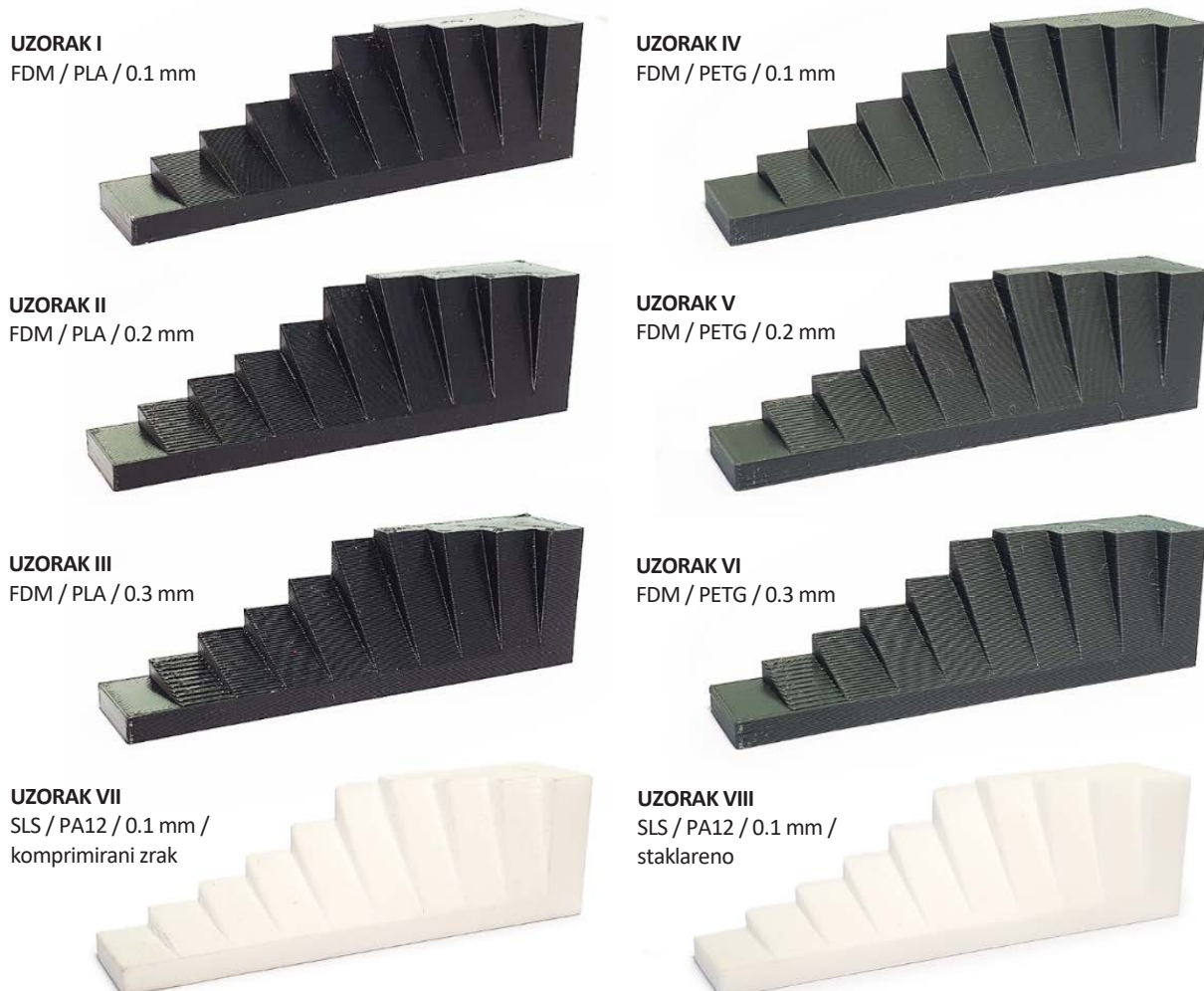
Sa stražnje strane postavljen je utor radi uštede materijala i vremena izrade, a također ne zahtijeva upotrebu potporne strukture i kasnije njeno uklanjanje. Dimenzijski je dovoljno velik kako bi bio omogućen dobar pristup za ispitivanje hrapavosti kontaktnim metodama, te dopušta ponovljivost mjerenja.

Od opreme je korištena pomoćna naprava i uređaj za mjerenje hrapavosti površine, a nakon mjerenja rezultati su statistički obrađeni i analizirani.

Korišteni materijali su: PLA – polilaktična kiselina – biopolimer koji se proizvodi od obnovljivih i prirodnih sirovina poput kukuruznog škroba i šećerne trske, zatim PETG (polietilen tereftalat glikol) – koji ima dobra fizička svojstva i izdržljivost i PA12 (poliamid) – poznatiji kao najlon, koji je inženjerski plastomer za funkcionalnu izradu prototipa i proizvodnju za krajnju upotrebu.

Na slici 2 su prikazani uzorci s karakteristikama za provedbu mjerenja, dok su u tablici 1 navedene karakteristike ispitnih uzoraka. (Feketić, 2022.)

Slika 2 Uzorci s karakteristikama za provedbu mjerenja



Tablica 1 Karakteristike ispitnih uzoraka

Uzorak	Tehnologija / Postupak / Stroj	Materijal	Debljina sloja (mm)	Naknadna obrada
I	Ekstrudiranje materijala ME / Taložno očvršćivanje FDM / Prusa i3 MK2	PLA	0.1	Nije korištena
II			0.2	
III			0.3	
IV		PETG	0.1	
V			0.2	
VI			0.3	
VII	Spajanje praškastog materijala u slojevima PBF / Selektivno lasersko sinteriranje SLS / Eos Formiga P110	PA12	0.1	Komprimirani zrak
VIII				Staklarenje

4. Rezultati i analiza

U nastavku su rezultati ispitivanja za sva tri ispitivana materijala (PLA, PETG i PA12). (Feketić, 2022.)

Tablica 2 Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom za materijal PLA

Nagib površine	<i>Parametri hrapavosti (µm) / Standardna devijacija</i>								
	UZORAK I <i>Debljina sloja: 0.1 mm Materijal: PLA</i>			UZORAK II <i>Debljina sloja: 0.2 mm Materijal: PLA</i>			UZORAK III <i>Debljina sloja: 0.3 mm Materijal: PLA</i>		
	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}
0°	4,138	17,796	22,254	5,913	25,920	29,498	5,573	25,073	28,179
	0,131	0,399	0,879	0,078	1,646	2,550	0,125	0,468	0,589
10°	15,382	79,819	83,394	14,421	83,216	112,400	14,007	82,192	142,910
	0,965	3,034	4,645	0,293	5,011	0,521	0,705	1,141	6,475
20°	20,978	79,385	82,362	25,384	113,857	122,507	21,783	116,467	128,720
	0,319	0,981	2,445	1,512	3,806	4,833	1,252	5,013	1,908
30°	18,151	73,683	79,962	30,769	116,300	121,880	31,423	130,947	139,570
	0,795	2,237	3,195	1,321	2,283	5,573	2,225	4,866	15,411
40°	13,866	64,254	72,286	26,039	106,163	110,250	29,363	127,570	144,653
	0,302	0,471	4,744	0,681	2,504	3,349	1,210	5,032	22,878
50°	11,821	62,536	67,320	20,016	88,950	95,063	25,842	116,417	131,080
	0,235	1,006	2,730	0,471	0,635	2,469	0,526	2,501	13,479
60°	9,511	49,078	56,005	17,265	77,309	80,952	23,546	102,980	110,027
	0,214	1,287	1,196	0,234	2,564	4,088	0,424	2,176	6,387
70°	8,605	43,856	51,840	14,457	66,167	72,206	21,490	95,244	103,289
	0,342	1,644	4,317	0,371	2,822	5,806	0,405	2,482	5,949
80°	8,596	42,933	52,609	13,817	63,119	68,340	19,758	88,532	94,025
	0,295	0,870	7,730	0,162	0,648	2,007	0,216	1,260	2,163
90°	7,565	39,155	44,054	13,562	62,206	65,151	19,301	85,415	91,008
	0,162	1,724	3,897	0,208	1,829	2,296	0,624	0,844	2,969

Tablica 3 Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih FDM postupkom za materijal PETG

Nagib površine	Parametri hrapavosti (μm) / Standardna devijacija								
	UZORAK IV Debljina sloja: 0.1 mm Materijal: PETG			UZORAK V Debljina sloja: 0.2 mm Materijal: PETG			UZORAK VI Debljina sloja: 0.3 mm Materijal: PETG		
	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}
0°	3,577	15,306	20,157	5,622	24,999	29,737	4,560	22,877	27,086
	0,297	0,189	0,418	0,112	1,306	4,882	0,183	0,929	0,725
10°	13,610	72,041	83,020	14,548	87,346	121,977	15,850	88,768	145,510
	0,764	6,544	0,652	0,206	0,107	4,308	1,167	7,729	1,781
20°	21,641	81,345	85,434	26,253	121,110	126,127	23,659	133,907	150,257
	0,157	0,610	3,925	0,417	2,098	2,960	0,135	12,294	4,457
30°	18,569	73,462	77,423	30,445	116,857	120,103	26,071	126,023	128,190
	0,201	1,498	1,606	0,431	0,637	0,067	0,738	2,620	3,044
40°	14,779	69,360	76,742	28,161	109,513	116,130	29,804	125,207	128,880
	0,150	2,439	1,655	0,248	3,782	3,068	0,180	0,701	2,121
50°	11,496	59,903	70,124	23,744	98,318	106,193	27,862	118,010	121,583
	0,230	3,322	10,336	0,322	2,202	4,774	0,920	1,747	1,789
60°	9,926	53,390	60,739	18,576	84,806	90,549	25,944	110,023	116,097
	0,604	2,060	7,154	0,101	0,197	4,027	0,224	1,357	3,577
70°	8,357	41,740	46,733	16,913	77,036	81,029	22,955	100,520	103,983
	0,455	3,115	6,915	0,308	1,442	1,849	0,142	0,519	2,237
80°	8,208	40,802	47,479	14,954	66,937	70,801	21,231	94,095	98,529
	0,581	2,502	7,909	0,301	1,162	3,089	0,294	1,779	1,828
90°	7,839	39,154	44,674	14,030	64,071	66,900	20,647	91,938	96,014
	0,440	2,236	0,282	0,064	1,473	2,439	0,150	0,753	1,758

Tablica 4 Rezultati mjerenja uzoraka izrađenih SLS postupkom za materijal PA12

Nagib površine	Parametri hrapavosti (μm) / Standardna devijacija					
	UZORAK VII Debljina sloja: 0.1 mm Materijal: PA12 Naknadna obrada: Komprimirani zrak			UZORAK VIII Debljina sloja: 0.1 mm Materijal: PA12 Naknadna obrada: Staklarenje		
	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}
0°	11,923	62,793	75,747	6,979	33,830	44,334
	0,191	5,368	7,197	0,192	2,402	5,954
10°	16,643	87,230	106,670	15,874	72,896	94,029
	0,471	2,238	6,601	1,124	6,061	2,252
20°	14,451	79,353	90,776	16,367	73,269	90,220
	0,587	1,218	3,112	0,184	1,400	5,340

Nagib površine	Parametri hrapavosti (μm) / Standardna devijacija					
	UZORAK VII Debljina sloja: 0.1 mm Materijal: PA12 Naknadna obrada: Komprimirani zrak			UZORAK VIII Debljina sloja: 0.1 mm Materijal: PA12 Naknadna obrada: Staklarenje		
	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}	\bar{R}_a σ_{Ra}	\bar{R}_z σ_{Rz}	\bar{R}_{max} σ_{Rmax}
30°	13,874	75,144	89,814	13,904	59,927	78,846
	0,665	5,100	7,539	1,487	3,855	0,599
40°	12,854	67,782	87,609	11,846	52,503	66,163
	0,655	4,787	14,674	0,872	2,931	5,834
50°	12,432	69,802	83,594	9,290	45,860	64,911
	1,216	7,307	5,627	0,139	2,444	6,696
60°	12,372	70,346	82,140	8,788	42,756	53,433
	1,551	11,804	14,152	0,255	2,915	2,044
70°	12,841	70,551	88,172	8,445	39,342	50,853
	0,888	4,309	12,018	0,453	2,490	2,753
80°	12,891	71,141	87,774	7,853	40,093	57,378
	1,055	4,176	3,821	0,756	4,531	16,175
90°	11,511	65,375	79,023	6,844	35,655	48,780
	0,835	2,459	0,282	0,074	3,394	6,836

Analizom i uspoređivanjem rezultata na temelju korištenih AM tehnologija, vidljivo je da SLS postupak ima puno manju ovisnost o nagibu površine, što se tiče utjecaja na hrapavost, u usporedbi s FDM-om. Tako je raspon između maksimalne i minimalne vrijednosti parametra R_a , za sve kutove nagiba i debljine sloja, kod SLS postupka između 5.132 - 9.523 μm , dok kod FDM postupka on iznosi 16.840 – 25.850 μm . Isto vrijedi za parametre R_z i R_{max} .

To znači da je kod SLS postupka smanjenja varijacija hrapavosti, odnosno moguće je neovisno o kutu nagiba postići donekle približne rezultate, za razliku od FDM postupka gdje je rasipanje razmjerno veće.

Najbolje minimalne vrijednosti hrapavosti očekivano su se ostvarile pod kutovima nagiba od 0° ili 90°. Kod FDM postupka rezultati prikazuju najbolje vrijednosti pri 0°, a zatim ih slijede oni dobiveni pri 90° ili 10°. Njihov raspon je poprilično velik, pa tako za R_a parametar iznosi 3.427 – 11.290 μm . Usporedno, SLS postupak ostvaruje najbolje vrijednosti pri 90°, zatim pri 0°, gdje je raspon jako mali te iznosi 0.136 – 0.412 μm . Sličnost je uočena i za parametre R_z i R_{max} . Analizom ovih podataka uočava se utjecaj odabrane orijentacije tvorevine, koja je izraženija u primjeni FDM postupka. (Feketić, 2022.)

Tablica 5 prikazuje maksimalne i minimalne vrijednosti parametara hrapavosti. (Feketić, 2022.)

Tablica 5 Maksimalne i minimalne vrijednosti parametara hrapavosti

Uzorak	Parametar hrapavosti (μm)								
	<i>R_a</i>			<i>R_z</i>			<i>R_{max}</i>		
	Nagib površine		Razlika	Nagib površine		Razlika	Nagib površine		Razlika
	MIN	MAX		MIN	MAX		MIN	MAX	
I	0°	20°	16,840	0°	10°	62,023	0°	10°	61,140
	4,138	20,978		17,796	79,819		22,254	83,394	
II	0°	30°	24,856	0°	30°	90,380	0°	20°	93,009
	5,913	30,769		25,920	116,300		29,498	122,507	
III	0°	30°	25,850	0°	30°	105,874	0°	40°	116,474
	5,573	31,423		25,073	130,947		28,179	144,653	
IV	0°	20°	18,063	0°	20°	66,039	0°	20°	65,277
	3,577	21,641		15,306	81,345		20,157	85,434	
V	0°	30°	24,823	0°	20°	96,111	0°	20°	96,390
	5,622	30,445		24,999	121,110		29,737	126,127	
VI	0°	40°	25,244	0°	20°	111,029	0°	20°	123,170
	4,560	29,804		22,877	133,907		27,086	150,257	
VII	90°	10°	5,132	0°	10°	24,437	0°	10°	30,923
	11,511	16,643		62,793	87,230		75,747	106,670	
VIII	90°	20°	9,523	0°	20°	39,439	0°	10°	49,696
	6,844	16,367		33,830	73,269		44,334	94,029	

Također sa ekonomskog aspekta treba reći da je bitno istražiti mogućnosti pojedinih materijala i aditivnih tehnologija za postizanje što nižih vrijednosti parametara površinske hrapavosti, jer se tako smanjuju troškovi eventualne naknadne obrade, što povoljno utječe, kako na kvalitetu, tako i na konačnu cijenu proizvoda.

5. ZAKLJUČAK

Aditivnim tehnologijama izrađuju se proizvodi određene kvalitete površine, što proizlazi iz karakteristika procesa, s obzirom da se radi o slaganju materijala sloj po sloj, odnosno principu odozdo prema gore.

Geometrijski 3D model ne uključuje površinske nedostatke, ali oni proizlaze iz procesa proizvodnje, ovisno o tehnološkim parametrima.

Vrlo je bitno ispitati i analizirati hrapavost površine pri izradi tvorevina aditivnim tehnologijama, kako bi se dobili proizvodi najviše kvalitete, bez potrebe za naknadnom obradom, što će povoljno utjecati na smanjenje troškova, odnosno ekonomsku isplativost opisanih postupaka.

U ovom radu je provedeno ispitivanje parametara hrapavosti površine (R_a , R_z i R_{max}) probnih uzoraka, koji su izrađeni korištenjem FDM i SLS postupka iz tri različita materijala: PLA, PETG i PA12. Korištene su dvije vrste naknadne obrade: komprimirani zrak i stakljenje. Pri tome se promatra utjecaj nagiba površine i debljine sloja.

Rezultati su prikazani i napravljena je statistička obrada i analiza, nakon čega su doneseni sljedeći zaključci i preporuke za daljnja istraživanja.

Postoji potreba za daljnjim poboljšanjem kvalitete površine za aditivnu proizvodnju.

Potrebno je provesti daljnja eksperimentalna istraživanja kao odgovor na industrijske potrebe, uz standardizaciju mjerenja hrapavosti i probnih uzoraka za različite AM tehnologije i postupke.

Utjecaj debljine sloja uzrokuje pogoršanje kvalitete površine sa povećanjem istog.

Postoji jasna međusobna povezanost sa geometrijskom značajkom nagiba površine, odnosno porastom debljine pomiče se kut nagiba gdje se ostvaruje kritična vrijednost hrapavosti. Porastom nagiba (od 0° prema 90°) vrijednosti dostižu maksimalne od 10° do 40°, nakon čega se smanjuju daljnjim povećanjem nagiba od 50° prema 90°.

Kao kriterij za poboljšanje kvalitete površine u FDM postupku, preporuča se korištenje smanjenih vrijednosti debljine sloja i izbjegavanje korištenja nagiba površina od 10° do 40° za umanjivanje efekta stepenica i smanjenje oscilacija između minimalne i maksimalne vrijednosti hrapavosti. Korištenjem PETG materijala ostvaruju se bolji rezultati u odnosu na PLA materijal.

Postupkom SLS dobivaju se tvorevine bolje kvalitete, umanjenog efekta stepenica i smanjene varijacije hrapavosti, usporedno s FDM postupkom tj. postizanje donekle približnih rezultata hrapavosti neovisno o nagibu površine. Za poboljšanje kvalitete površine također treba izbjegavati korištenje nagiba od 10° do 40° uz korištenje naknadne obrade (komprimirani zrak, staklarenje i ostale). Staklarenjem su u prosjeku ostvareni 21% – 32% bolji rezultati parametra hrapavosti. (Feketić, 2022.)

Zaključno, tehnike aditivne proizvodnje pružaju ogroman potencijal jer se dobro prilagođavaju geometrijskoj složenosti i dizajnu tvorevine koja se izrađuje.

Prednosti su mnogobrojne, kao primjerice: lakši i ergonomski prihvatljiviji proizvodi, proizvodi od više materijala, kratki ciklusi proizvodnje, manje pogrešaka pri montaži što rezultira nižim povezanim troškovima, niži troškovi ulaganja u alate, kombinacija različitih proizvodnih procesa, optimalna upotreba materijala i održiva proizvodnja. Konvencionalna proizvodnja uglavnom je ograničena veličinom i geometrijskom složenošću tvorevina, uz često korištenje procesa i alata koji podižu konačnu cijenu proizvoda.

S druge strane, nedostaci aditivne proizvodnje su: završna obrada složenih površina može biti iznimno gruba, dugo vrijeme izrade, materijali s ograničenim mehaničkim i toplinskim svojstvima koji ograničavaju performanse pod naprezanjem te veće tolerancije nego kod drugih metoda proizvodnje, kao primjerice one temeljene na uklanjanju materijala.

Međutim, bez obzira na sva ograničenja, aditivna proizvodnja može se primijeniti u mnogim sektorima gdje se lako prilagođava zahtjevima svakog od njih. Oblikovanje i izrada pomoću 3D ispisa smatra se jednom od najvećih industrijskih revolucija u posljednjih nekoliko godina, a u budućnosti se predviđa sve veća upotreba.

Zaključno je potrebno naglasiti ekonomske aspekte primjene opisanih postupaka. Prije svega treba istaknuti niže troškove alata. Također, postizanjem niže površinske hrapavosti, koja se dobiva kod AM tvorevina, smanjuje se potreba za naknadnom obradom, što smanjuje cijenu proizvoda. Kako su materijali korišteni u FDM postupku također jeftiniji, to također doprinosi ekonomskoj isplativosti, pa se i to može pridodati ranije opisanim prednostima aditivne proizvodnje.

Ovaj rad daje doprinos u istraživanju novih, suvremenih i inovativnih tehnologija i materijala, te njihovih svojstava.

Upotrebom novih i inovativnih materijala i tehnologija, utječemo također na održivi razvoj, koji govori o tome da trebamo kvalitetno zadovoljiti svoje potrebe, istovremeno vodeći računa da generacije koje dolaze iza nas također imaju tu mogućnost, odnosno da generacijama iza nas ostavimo kvalitetno mjesto za život.

6. LITERATURA

1. Badiru, A. B., Valencia, V. V., Liu, D. (2017) Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry, Zbornik pozvanih radova, CRC Press - Taylor & Francis Group, Boca Raton.
2. Feketić, Z. (2022) Utjecaj debljine sloja i nagiba površine na hrapavost probnih uzoraka dobivenih aditivnim tehnologijama, Diplomski rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac.
3. Gebhardt, A. (2012) Understanding Additive Manufacturing, Carl Hanser Verlag, München.
4. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2015) Additive Manufacturing Technologies - 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, Springer-Verlag, New York.
5. Šančić, T., Tomašić A. (2022) Ispitivanje mehaničkih svojstava materijala proizvedenih taložnim srašćivanjem, 8th International Conference „Vallis Aurea“ 2022, Požega.