

Ispitivanje udarne radnje loma termoplastike

Patrik Radolović^a, Luka Žužić^b, Ener Špada^c, Deni Vale^d

^a Bacc. ing. mech., student, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, pradolovi@iv.hr

^b Bacc. ing. mech., student, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, luzic@iv.hr

^c Bacc. ing. mech., student, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, espada@iv.hr

^d Mag. phys., predavač, Istarsko Veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeve 9D, 52100 Pula, Hrvatska, dvale@iv.hr

Sažetak

U ovom radu je predstavljeno ispitivanje udarne radnje loma odabranih termoplastičnih filamenata koji se najčešće koriste u aditivnoj proizvodnji metodom modeliranja taložnim očvršćivanjem. Fokus ispitivanja stavljen je na usporedbu udarne žilavosti odabranih filamenata Charpy-jevom metodom prema normi HRN EN ISO 148-1. Ispitivanje je uključivalo sedam popularnih termoplastičnih filamenata: PLA, PETG, ABS, ASA, TPU, PA, PP. Svi uzorci korišteni u ispitivanju izrađeni su na istom uređaju za 3D ispis, pri identičnim uvjetima proizvodnje kako bi isključili vanjske faktore i osigurali što precizniju usporedbu svojstava samih materijala. Rezultati ispitivanja pružaju vrijedne podatke o razlici u otpornosti na udarna opterećenja između ispitivanih filamenata, što značajno doprinosi odabiru optimalnog materijala za konkretne inženjerske projekte, s ciljem povećanja pouzdanosti, sigurnosti i učinkovitosti konačnih proizvoda izrađenih tehnologijom aditivne proizvodnje.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja, 3D ispis, mehanička svojstva, termoplastika, ispitivanje materijala

1. Uvod

Aditivna proizvodnja, poznatija kao “3D Printanje” predstavlja tehnološki napredak koji omogućuje jednostavnu transformaciju digitalno izrađenih modela u fizičke objekte. Početak aditivne proizvodnje kreće iz 1980-ih godina, kad je Chuck Hull razvio stereolitografiju (engl. *Stereolithography*, SLA), prvu komercionalno uspješnu metodu baziranu na fotopolimerizaciji UV (engl.

Ultraviolet radiation) svjetlom. 1987. godine tvrtka 3D Systems lansirala je prvi industrijski stroj za izradu prototipa, čime se komercijalizira brzo prototipiranje korištenjem aditivne proizvodnje, iako su ovi objekti bili neprecizni bili su korisni za izradu ranih prototipova proizvoda (Slusarczyk, 2025). Metoda modeliranja taložnim očvršćivanjem (engl. *Fused Deposition Modeling*, FDM) prvi put se spominje 1991. godine kad tvrtka Stratasys patentira istoimenu tehnologiju, dok su se u istom vremenskom periodu paralelno razvijale metode

selektivnog laserskog sinteriranja i laminacije listova (Figiel, 2022). Ključan trenutak dogodio se 2009. godine, kad je prvi put uveden termin "Aditivna proizvodnja" (*engl. Additive manufacturing*), normizacija ovog pojma označila je prelazak iz metode prototipiranja u prihvaćenu metodu proizvodnje gotovih proizvoda čime je omogućena šira primjena u industriji (Stucker, 2012). Ključna razlika aditivne proizvodnje od tradicionalnih subtraktivnih metoda, koje uključuju rezanje, glodanje ili brušenje sirovog materijala, aditivna proizvodnja gradi objekte sloj po sloj bazirano na prije određenom digitalnom modelu, bez potrebe za posebne kalupe ili ikakve dodatne alate (Gibson, Rosen i Stucker, 2015). Mehanička svojstva proizvedenih dijelova i dalje predstavljaju jedan od ključnih aspekata pri razmatranju različitih metoda aditivne proizvodnje. Općenito mehanička svojstva uključuju čvrstoću, tvrdoću, žilavost, elastičnost i otpornost na trošenje materijala, svako od ovih svojstva izravno ovisi o izabranom materijalu, tehnologiji ispisa, te parametrima modela i okoline. Radi temelja aditivne proizvodnje, odnosno izrade modela sloj po sloj, aditivno proizvedeni objekti imaju slojevitú strukturu, te je često prisutna anizotropija svojstava, što znači da čvrstoća i izdržljivost značajno variraju ovisno o smjeru primjene opterećenja (Ahn i sur. 2002). Optimizacijom parametara kao što su temperatura ispisa, orijentacija objekta, gustoća ispune, debljina sloja i postavljanje "zidova", moguće je značajno utjecati na konačna mehanička svojstva proizvoda (Gao i sur. 2015), čime se omogućava prilagodba specifičnim zahtjevima primjene i cijene. Iako objekti proizvedeni aditivnom proizvodnjom često pokazuju nižu čvrstoću u usporedbi s dijelovima izrađenima konvencionalnim metodama kao što su injekcijska prešanja i strojna obrada, njihova jedinstvena mogućnost izrade objekata kompleksne geometrije omogućuje dizajn koji kompenzira navedene nedostatke (Verdejo de Toro i sur. 2020). U današnje vrijeme, FDM se zbog široke dostupnosti 3D pisača u različitim cjenovnim rangovima, te širokom spektrumu termoplastičnih filamenata postavila kao najpopularnija metoda 3D ispisa među hobistima (Protolabs Network, bez dat.). Razlog tome je jednostavna izrada raznih objekata, ali i praktičnost u industrijskoj i široj primjeni za izradu prototipova i maloserijskih proizvoda (Berman, 2012). U ovom radu je nakon ispitivanja Charpyjevom metodom

uspoređeno mehaničko svojstvo udarnog rada loma najčešće korištenih i cjenovno pristupačnih filamenata za FDM ispis. Svi uzorci proizvedeni su u istim uvjetima na istom FDM 3D pisaču kako bi se osigurala vjerodostojnost i usporedivost rezultata. Na taj način eliminiran je utjecaj razlika u procesu izrade, stoga izmjerena mehanička svojstva izražavaju razlike svojstava različitih materijala. Cilj ovih ispitivanja je izrada baze podataka, odnosno pružanje pouzdanih i ispitanih podataka o mehaničkim svojstvima različitih filamenata, što će inženjerima značajno olakšati izbor odgovarajućih materijala za različite zahtjeve projekata.

2. Materijali

U ovom radu pripremljeni su ispitni uzorci sedam termoplastičnih filamenata često korištenih u FDM 3D ispisu: polilaktična kiselina (*engl. Polylactic acid*, PLA), polietilen-tereftalat glikol (*engl. Polyethylene Terephthalate Glycol*, PETG), akrilonitril-buta-dien-stiren (*engl. Acrylonitrile Butadiene Styrene*, ABS), akrilonitril-stiren-akrilat (*engl. Acrylonitrile Styrene Acrylate*, ASA), termoplastični poliuretan (*engl. Thermoplastic Polyurethane*, TPU), poliamid odnosno najlon (*engl. Polyamide*, PA), polipropilen (*engl. Polypropylene*, PP). Cilj je pružiti jasan pregled u kemijska i mehanička svojstva svakog filameta budući da karakteristike objekata izrađenih tehnologijom 3D ispisa ne ovise samo o parametrima ispisa poput temperature i brzine, već i o strukturi samog materijala na molekularnoj razini. Primjerice, polimeri poput PA6.6 mogu izdržati udarce (udarnu žilavost) bolje od drugih polimera koji nemaju uređene lance molekula (tzv. amorfni polimeri) (Lay i sur. 2019). Hibridni materijali poput PETG-CF (PETG ojačan karbonskim vlaknima) kombiniraju karakteristike dvaju materijala: izdržljivi su poput karbonskih vlakana i otporni na kemikalije kao i poliester (eSUN, 2024).

2.1. PLA

PLA (polilaktična kiselina) je termoplastični polimer iz skupine alifatnih poliesterâ koji je postao vrlo popularan izbor materijala u 3D ispisu radi svoje jednostavnosti ispisa, zadovoljavajuće kvalitete i biorazgradivosti. Molekularna struktura PLA se temelji na ponavljajućim jedinicama laktidnih

monomera povezanih ester vezama, što znači da materijal ima relativno visoku krutost i tvrdoću, uz ograničenu fleksibilnost i žilavost. Među nedostacima PLA su slab otpor prema vlazi, te niska temperaturna otpornost, što znači da nije primjenjiv u područjima gdje bi bio izložen vlazi i visokim temperaturama, odnosno vanjskim uvjetima (Armani, 2017). Najčešće se koristi za izradu prototipova, dekoracija i raznih objekata.

2.2. PETG

PETG (polietilen-tereftalat glikol) je termoplastični poliester koji nastaje kompolimerizacijom etilen glikola i tereftalne kiseline uz dodavanje glikolnih modifikatora, što značajno povećava elastičnost materijala i otpornost na lomljenje u usporedbi sa čistim PET materijalom. Kao i PLA, PETG je veoma popularan izbor za 3D ispis radi jednostavnosti ispisa koja je veoma slična kao i kod PLA, ali uz nešto veću temperaturu. U usporedbi s PLA, PETG ima odličnu otpornost na udarce, visoku otpornost na UV zrake i vlagu, poboljšanu fleksibilnost i žilavost. Iako je njegova čvrstoća niža u usporedbi, to nadoknađuje boljom elastičnošću i mogućnošću deformacije prije puknuća materijala. Ove karakteristike čine PETG široko primjenjivim u raznim okruženjima, te se tako od njega mogu izrađivati funkcionalni prototipovi, dijelovi strojeva, boce, spremnici za hranu i mnogi drugi proizvodi (Khaled, 2025).

2.3. ABS

ABS (akrilonitril-butadien-stiren) je amorfni termoplastični polimer koji se sastoji od tri monomera: akrilonitrila, butadiena i stirena. ABS spada među najstarije i najpoznatije materijale korištene u industrijskom 3D ispisu, te se koristi za izradu objekata koji zahtijevaju visoku mehaničku čvrstoću, otpornost na udarce i nisko trošenje. Mehanička svojstva su glavna prednost ABS-a nad većinom drugih materijala, ima odličnu otpornost na udarce, dobru čvrstoću, visoku razinu žilavosti, visoku temperaturnu otpornost. Iako ima odlična mehanička svojstva, nedostaci ABS-a proizlaze iz težine ispisa, naime ABS zahtijeva visoku temperaturu mlaznice, postolja, te strogo kontrolirane uvjete okoline u kojoj se vrši ispis radi sprječavanja deformacije i nastajanja pukotina. Njegova svojstva

ga čine izvrsnim za primjenu u područjima koja zahtijevaju trajnost i otpornost na mehanička naprezanja, primjerice u izradi dijelova za automobile, zaštitnih kućišta za elektroniku i alate, te raznih mehaničkih komponenti (Vidakis i sur. 2020).

2.4. ASA

ASA (akrilonitril-stiren-akrilat) je amorfni termoplastični kopolimer sastavljen od akrilonitrila, stirena i akrilata. Po sastavu je veoma sličan prije spomenutom ABS-u, no prisutnost akrilata značajno povećava otpornost na vanjske utjecaje kao što su UV zrake i oksidativno starenje. Budući da je sličan ABS-u, to naravno znači da su mu i mehanička svojstva odlična, naime, ima visoku otpornost na udarce, odličnu trajnost, visoku temperaturnu otpornost, te veću čvrstoću, žilavost, bolje kemijske otpornosti i bolja otpornost na UV zrake od ABS-a. Radi svojih odličnih mehaničkih svojstava, ASA je primjenjiva u svim područjima gdje i ABS, ali uz dodatnu prednost od znatno bolje otpornosti na vanjske uvjete. Također, proces ispisa ASA materijala je znatno jednostavniji od ABS-a budući da uglavnom nije potrebna kontrola temperature okoline (osim kod ispisa većih objekata), već samo visoka temperatura mlaznice i postolja (MatterHackers, 2025).

2.5. TPU

TPU (termoplastični poliuretan) je elastomerni polimer koji pripada grupi termoplastičnih poliuretana nastalih reakcijom diizocijanata, poliola i produživača lanaca. Ova kombinacija materijalu daje odličnu fleksibilnost, otpornost na habanje, visoku elastičnost i dobru kemijsku otpornost, posebno na ulja i masti. Zbog ovih svojstava TPU se najčešće koristi za izradu fleksibilnih dijelova kao što su brtve, maskice za telefone i remenje. Naravno budući da je materijal izrazito elastičan i fleksibilan, ima relativno nisku čvrstoću u odnosu na filamente manje elastičnosti i fleksibilnosti, ali njegova sposobnost istezanja i vraćanja oblika čini ga jedinstvenim materijalom sa specifičnim poljem primjene. Postupak ispisa je relativno jednostavan, ne zahtijeva visoke temperature niti kontrolu temperature okoline kao ABS. Međutim, zbog elastičnosti i slabijeg prijanjanja slojeva, potrebno je koristiti sporije brzine ispisa te posebno voditi

računa o dobroj adheziji prvog sloja na podlozi, te se preporučuje korištenje teksturirane podloge (Massivit3D, 2022).

2.6. PA

PA (poliamid) je termoplastični polimer koji nastaje reakcijom diamina i dikarboksilnih kiselina ili polimerizacijom aminokiselina. Postoji par vrsta poliamida, ali najčešće se koriste PA6 (primijenjen u ovom radu) i PA12, od kojih svaki posjeduje različita svojstva. Poliamidi su poznati po svojim izvrsnim mehaničkim svojstvima kao što su visoka žilavost, visoka čvrstoća, odlična otpornost na habanje, visoka otpornost na kemikalije, te dobar otpor na kontinuirano dinamičko opterećenje. Radi svojih svojstava iznimno je popularan u automobilske, zrakoplovnoj i tekstilnoj industriji, gdje se koristi za izradu funkcionalnih komponenti kao što su: zupčanci, klizni ležajevi, spojni elementi, te fleksibilni dijelovi koji podnose visoka opterećenja. Proces ispisa smatra se prilično zahtjevnim, naime, materijalu je potrebna visoka temperatura mlaznice, stroga kontrola temperature okoline kao kod ABS-a, ali uz sve to potrebna je i podloga napravljena od stakla, premazana specijaliziranim ljepljivom za adheziju prvog sloja i umanjenja opasnosti od savijanja ili deformacije objekata (Immould, 2025).

2.7. PP

PP (polipropilen) je termoplastični polimer dobitven polimerizacijom propilenskih monomera, s polukristalnom strukturom koja mu daje svojstva visoke kemijske inertnosti i odlične otpornosti na vlagu. Polipropilen je karakteriziran svojom visokom fleksibilnošću, otpornošću na zamor materijala i odličnu kemijsku otpornost, ali i relativno niskom čvrstoćom u usporedbi s drugim, ne fleksibilnim materijalima. Radi ovih karakteristika, PP se često koristi za izradu ambalaže, spremnika za agresivne kemikalije, u spremnicima, u medicinskim uređajima, te automobilske industriji. Međutim, proces ispisa polipropilena veoma je zahtjevan. Potrebna je niska brzina ispisa, stroga

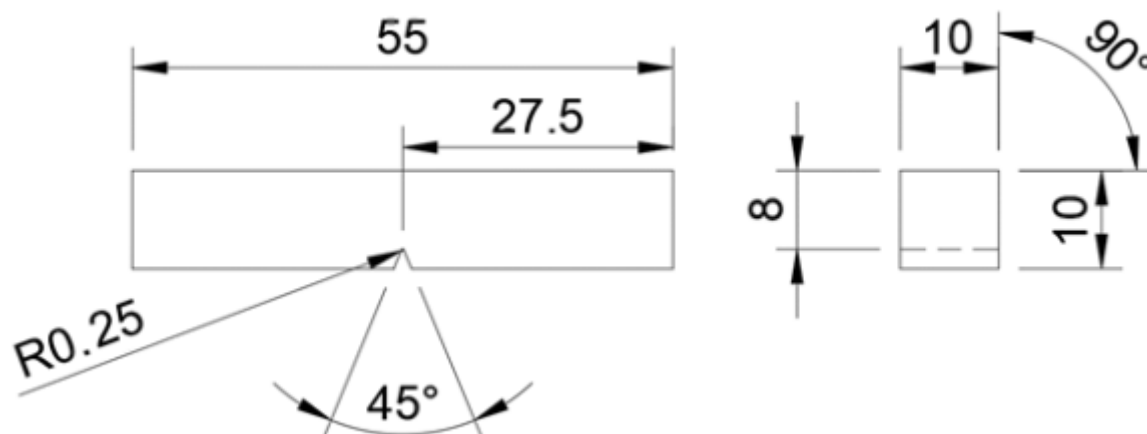
kontrola temperature okoline, visoka temperatura podloge, te je također potrebna ili specijalizirana podloga ili ljepljiva traka radi adhezije prvog sloja (McClements, 2022).

3. Ispitivanje udarne radnje loma prema Charpy-ju

Procjena žilavosti materijala, odnosno njegove sposobnosti apsorbirati energiju i oduprijeti se lomu pod naglim opterećenjem, ključna je u raznim inženjerskim primjenama, posebice u sektorima poput građevinarstva, automobilske industrije i zrakoplovstva gdje sigurnost i pouzdanost ovise o otpornosti materijala na iznenadna mehanička opterećenja (udarce). Za procjenu žilavosti materijala korišten je Charpyjev udarni test, te je provedeno ispitivanje prema HRN EN ISO 148-1 normi. Iako je izvorno razvijena za metale, Charpy metoda se uspješno primjenjuje i na ispitivanje polimera, keramike i kompozita (Pacorr Testing Instruments, 2023). Ova metodologija koristi standardizirani uzorak, oblika pravokutne epruvete s točno izrađenim V-urezom čija je svrha stvoriti kontroliranu koncentraciju naprezanja i potaknuti lom na točno određenom mjestu. Epruveta dimenzija 55x10x10 mm s V-urezom kuta 45°, dubine 2 mm, s polumjerom zaobljenja vrha ureza od 0,25 mm (kao što je prikazano na slici 1.) (ISO, 2016).

Sam postupak ispitivanja započinje postavljanjem uzorka na specijalizirani uređaj za ispitivanje udarne radnje loma. Uzorak je smješten na dva oslonca, tako da je V-urez okrenut suprotno od strane udara. Charpyjev bat, koji ima jasno definiranu masu i visinu početnog položaja, oslobađa se gravitacijom i ostvaruje udarac na sredinu uzorka, neposredno iza položaja ureza. Kinetička energija čekića prenosi se na uzorak, uzrokujući koncentraciju naprezanja na vrhu ureza, što rezultira njegovim lomom. Mjerenje količine energije koju je uzorak apsorbirao tijekom ovog procesa, a koja je potrebna za nastanak loma, izražava se u džulima (*engl. Joule, J*).

Slika 1. Nacrt epruvete



4. Metoda izrade ispitnih epruveta i postavke ispisa

Uređaj za izradu epruveta je 3D printer marke Creality K1C, koji koristi FDM metodu izrade. Konfiguracija printera je standardni "CoreXY". Veličina podloge za ispis je 220x220x250 mm. Ekstruder koristi novu vrstu mlaznice naziva "Unicorn", gdje su "hladni" i "topli" dio spojeni te time smanjuju mogućnost začepjenja. Mlaznica je standardnog promjera 0,4 mm. Sam printer je zatvorenog formata što omogućava printanje zahtjevnijih materija zbog konstantne temperature, te je opremljen ventilacijom s ugljenim filterom za smanjenje čestica u zraku (Creality, n.d.-b). Kako bi se osigurala kvaliteta pri ispisu korištena je sušilica za filament

Creality Space Pi. Sušenje je ključni korak u ovoj vrsti aditivne proizvodnje, potrebno je ukloniti vlagu iz filamenata kako bi se osigurala kvaliteta proizvoda i produžio životni vijek samog materija (Creality, bez. dat.-a). Važno je napomenuti kako su sve epruvete izrađene od 100% ispune sastavljene od zidova što osigurava bolju žilavost. Da bi se osigurala dimenzije epruveta navedenih normom odabrane su postavke preciznosti i rezolucije na srednje do najveće. Korištena je podloga s teksturom za poboljšanje prijanjanja prvog sloja tijekom 3D ispisa i posebno ljepilo za prijanjanje modela. Za svaki filament potrebni su posebni uvjeti sušenja i printanja. U tablici 1. u nastavku prikazane su karakteristike za svaki materijal kao i postavke printera i sušilice.

Tablica 1. Parametri printanja i sušenja filamenata

Filament	Temp. mlaznice [°C]	Temp. podloge [°C]	Brzina ispisa [mm/s]	Temp. sušenja [°C]	Trajanje sušenja [h]
PLA	230	50	200-300	50	4-8
PETG	250	70	200-300	60	4-8
ABS	260	100	200-300	65	8-12
ASA	260	100	200-300	65	8-12
TPU	230	35	200-300	55	4-8
PA	260	50	200-300	65	≥12
PP	240	60	200-300	55	4-8

Izvor: <https://www.creality.com/products/creality-space-pi-filament-dryer>

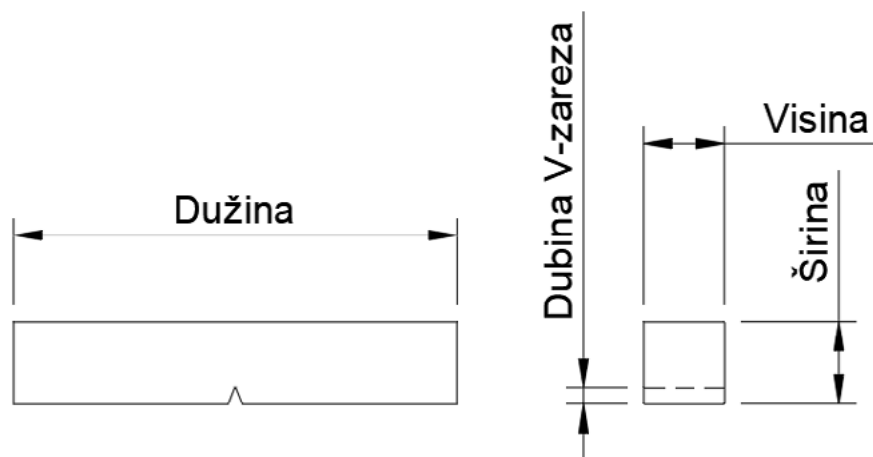
5. Opis provedbe ispitivanja udarne radnje loma

5.1. Priprema uzoraka i uređaja

Prije samog ispitivanja potrebno je odrediti dimenzije epruveta te podesiti sam stroj. Za svaku vrstu

filamenta izrađene su po 3 (tri) epruvete čije su dimenzije izmjerene kalibriranim mjerilom. U tablici 2. su prikazane srednje vrijednosti dimenzija izrađenih epruveta, te je na slici 2. prikazana skica koja ukazuje na koju veličinu se odnose izmjerene vrijednosti.

Slika 2. Prikaz dimenzijskih vrijednosti epruveta



Tablica 2: Dimenzije epruveta

Filament	Dužina [mm]	Visina [mm]	Širina [mm]	Dubina V-zareza [mm]
PLA	54,74	9,88	10,30	1,60
PETG	54,75	9,87	10,08	1,68
ABS	54,64	9,91	10,04	1,64
ASA	54,60	9,83	10,01	1,68
TPU	54,47	9,84	9,97	1,65
PA	54,79	10,08	10,86	1,67
PP	54,19	9,66	9,91	2,23

Korišteni uređaj za udarni test je Charpy njihalo Zwick RPK450. Sam uređaj ima energiju udarca od 450 J. Razlika između energije udarca i apsorbirane energije prenesene na epruvetu predstavlja žilavost materijala. Kako bi se preciznije očitali rezultati korišten je digitalni mjerač uparen s batom (ZwickRoell, bez dat.). Po smjernicama norme je potrebno izmjeriti gubitke zbog trenja bata. Dobiveni rezultati se obilježavaju kao K1, K2 i K3. Pomoću njih se izračunava faktor P koji ne smije prelaziti 0,5% nominalne energije stroja. Tijekom priprema je utvrđeno da su koeficijenti:

- K1=1,4
- K2=1,3
- K3=12

Izračunom dobivenih koeficijenata dobiva se da je kp kao gubitak energije 1,17 što zadovoljava uvjete za početak ispitivanja. Kao zadnji korak bitno je utvrditi temperaturu prostorije u kojoj se obavlja samo ispitivanje, ona je iznosila 22°C.

5.2. Provedba ispitivanja

Kako bi se započelo ispitivanje potrebno je postaviti bat u početni položaj te resetirati mjerni uređaj. Zatim se pripremljene epruvete postavljaju u prihvat pomoću samocentrirajućih hvataljki propisanih normom te sigurnosnim mjerama. Nakon toga zatvore se vrata uređaja i pričekava se zeleni indikator za početak. Ispitivanja su provedena na ukupno 3 (tri) epruvete od istog materijala, odnosno ukupno na 21 (dvadeset i jednoj) epruveti.

6. Rezultati

Nakon provedenih ispitivanja i prikupljanja ostataka ispitnih epruveta, provedena je analiza dobivenih rezultata. U nastavku su prikazane izmjerene vrijednosti apsorbirane energije loma (KV) za svaki ispitani filament te njihove srednje vrijednosti.

Rezultati se mogu povezati sa svojstvima i sastavom ispitivanih materijala. Svi analizirani čvrsti materijali pokazali su relativno slične vrijednosti, pri čemu se jedino termoplastični poliuretan (TPU) značajnije razlikovao od prosjeka. Naime, jedino uzorci izrađeni od TPU-a nisu doživjeli kritični zamor prilikom ispitivanja, nego su apsorbirali dio energije udarca savijanjem, iako je zabilježeno manje napuknuće pri korijenju V-zareza. Među neelastičnim uzorcima najveću vrijednost apsorpcije energije je pokazao materijal ASA, sa srednjom vrijednošću od 5,7 J. Na temelju dobivenih rezultata i prethodno navedenih svojstava materijala, može se pretpostaviti da ASA pokazuje poželjna mehanička svojstva, uzimajući u obzir ograničenja metode ispitivanja. Unatoč visokoj cijeni po kilogramu, ASA pruža najkvalitetnija mehanička svojstva među ispitivanim materijalima. S druge strane, popularni filament PLA i PETG pokazali su nešto slabije rezultate, no zbog svoje povoljne cijene i dostupnosti i dalje ostaju preferirani izbor među većinom korisnika. Iako se poliamid (PA) i polipropilen (PP) uobičajeno svrstavaju među tehničke polimere koji inače pokazuju dobra mehanička svojstva, u ovom istraživanju njihova relativno niska udarna žilavost može biti posljedica specifičnosti procesa aditivne proizvodnje. Možda problem leži u slojevitosti i međusobnoj adheziji istih slojeva.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Filament	KV [J]	Srednja vrijednost
PLA	1,9 1,9 1,8	1,87
PETG	1,8 1,8 1,8	1,8
ABS	4,3 4,5 4,5	4,43
ASA	6,2 5,5 5,4	5,7
TPU	8,3 8,9 8,3	8,5
PA	1,7 1,6 1,7	1,67
PP	2,8 2 1,9	2,23

7. Zaključak

U ovome radu provedeno je ispitivanje udarne radnje loma sedam različitih termoplastičnih filamenta (PLA, PETG, ABS, ASA, TPU, PA i PP) primjenom Charpyjeve metode, prema normi HRN EN ISO 148-1. Temeljem dobivenih rezultata utvrđene su značajne razlike među promatranim materijalima, što jasno ukazuje na različite mogućnosti njihove primjene u tehnologiji aditivne proizvodnje. Rezultati su pokazali da je najvišu vrijednost udarne radnje loma ostvario filament TPU (8,5 J), zahvaljujući specifičnoj molekularnoj strukturi koja mu pruža veliku elastičnost i sposobnost deformacije bez potpunog loma. Također se istaknuo filament ASA, s prosječnom vrijednošću od 5,7 J, koji osim dobre otpornosti na udar karakterizira i velika otpornost prema vanjskim vremenskim uvjetima, što ga čini pogodnim za izradu funkcionalnih dijelova koji će biti izloženi raznim atmosferskim utjecajima. Najniže vrijednosti izmjerene su za materijale PA (1,67 J) i PETG (1,8 J), što upućuje na njihovu

ograničenu primjenu kod komponenti izloženih većim udarnim opterećenjima.

Međutim, ovi filamenti zbog svojih povoljnih proizvodnih karakteristika, ekonomičnosti i dostupnosti ostaju prikladni za izradu dijelova koji ne zahtijevaju visoku otpornost na udar. Materijali koji se u tehničkoj praksi smatraju mehanički izdržljivima, poput poliamida (PA) i polipropilena (PP), pokazali su slabije rezultate od očekivanih, pri čemu je PA ostvario vrijednost od 1,67 J, a PP 2,23 J. Razlog ovih nižih vrijednosti moguće je pripisati specifičnostima procesa aditivne proizvodnje, osobito slabijoj međuslojnoj povezanosti koja može negativno utjecati na sposobnost materijala apsorbirati energiju udara. Zaključno, rezultati ovog rada pružaju jasne pokazatelje o razlici u vrijednostima udarne radnje loma različitih vrsta termoplastike korištene u aditivnoj proizvodnji, čime olakšavaju odabir prikladnog materijala ovisno o specifičnim zahtjevima budućih inženjerskih projekata. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti prema detaljnijoj analizi utjecaja parametara ispiisa, kako bi se dodatno optimizirali procesi aditivne proizvodnje.

Citirani izvori

- Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Armani, M. (2017, May 1). What's the difference between PLA, ABS, and nylon? *Machine Design*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.machinedesign.com/buyers-journey/consideration/article/21835444/whats-the-difference-between-pla-abs-and-nylon>
- Berman, B. (2012). 3D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Crealty. (n.d.-a). Crealty Space Pi Filament Dryer. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.crealty.com/products/creality-space-pi-filament-dryer>
- Crealty. (n.d.-b). K1C Carbon 3D Printer. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.crealty.com/products/k1c-carbon-3d-printer>
- eSUN. (2024, December 3). The carbon fiber material family expands: Introducing PETG CF! Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://esun3dstore.com/blog/detail/the-carbon-fiber-material-family-expands-introducing-petg-cf>
- Figiel, M. (2022, June 13). The history of 3D printing – where did it start? *Botland Blog*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://botland.store/blog/the-history-of-3d-printing-where-did-it-start/>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies* (2. izd.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Immould. (2025). Nylon vs ABS: Comparison guide. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.immould.com/nylon-vs-abs/>
- International Organization for Standardization. (2016). *Metallic materials — Charpy pendulum impact test — Part 1: Test method (ISO 148-1:2016)*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.iso.org/standard/63802.html>
- Khaled, S. (2025, April 13). PLA vs ABS vs PETG: The main differences. *All3DP*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://all3dp.com/2/pla-vs-abs-vs-petg-differences-compared/>
- Lay, M., Thajudin, N. L. N., Hamid, Z. A. A., Rusli, A., Abdullah, M. K., & Shuib, R. K. (2019). Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107341. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107341>
- Massivit3D. (2022, June 9). TPU filament – the good, the bad, and the ugly. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.massivit3d.com/blog/tpu-filament-the-good-the-bad-and-the-ugly>
- MatterHackers. (2025, February 11). ABS vs ASA filament in 3D printing: Durability, UV resistance and applications. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.matterhackers.com/articles/abs-vs-asa-filament-in-3d-printing>
- McClements, D. (2022, May 4). All about PP 3D printing filament: Materials, properties, definition. *Xometry Resources*. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/pp-3d-printing-filament/>

- Pacorr Testing Instruments. (2023, July 29). Benefits of using Charpy impact tester for impact test. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.pacorr.com/blog/using-charpy-impact-tester-for-impact-test/>
- Protolabs Network. (n.d.). What is FDM 3D printing? Hubs Knowledge Base. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- Slusarczyk, P. (2025, March 11). 03 11 1986: Chuck Hull was granted a patent for stereolithography. The 3D Printing Journal. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://3dprintingjournal.com/2025/03/11/chuck-hull-stereolithography-patent>
- Stucker, B. (2012). Additive manufacturing technologies: Technology introduction and business implications. U R. J. Grosh, G. G. Herman, K. L. Majeski i L. C. Schmidt (ur.), *Frontiers of engineering: Reports on leading edge engineering from the 2011 symposium* (str. 5–16). National Academies Press. <https://nap.nationalacademies.org/read/13274/chapter/4>
- Verdejo de Toro, E., Coello Sobrino, J., Martínez Martínez, A., Miguel Eguía, V., & Ayllón Pérez, J. (2020). Investigation of a short carbon fibre reinforced polyamide and comparison of two manufacturing processes: Fused deposition modelling (FDM) and polymer injection moulding (PIM). *Materials*, 13(3), 672. <https://doi.org/10.3390/ma13030672>
- Vidakis, N., Petousis, M., Maniadi, A., Koudoumas, E., Liebscher, M., & Tzounis, L. (2020). Mechanical properties of 3D printed acrylonitrile-butadiene-styrene TiO₂ and ATO nanocomposites. *Polymers*, 12(7), 1589. <https://doi.org/10.3390/polym12071589>
- ZwickRoell. (n.d.). Pendulum impact testers for tests on metals. Preuzeto 22. travnja 2025. s <https://www.zwickroell.com/products/products-for-impact-testing/pendulum-impact-testers-for-tests-on-metals/>

Impact fracture testing of thermoplastics

Summary

This paper reports an investigation of the impact toughness behavior of several thermoplastic filaments that are among the most widely used in additive manufacturing by fused deposition modeling. The focus of the test was on comparing the impact toughness of selected filaments using the Charpy method according to the HRN EN ISO 148-1 standard. The test included seven popular thermoplastic filaments: PLA, PETG, ABS, ASA, TPU, PA, PP. All samples used in the test were manufactured on the same 3D printing device, under identical production conditions to exclude external factors and ensure the most accurate comparison of the properties of the materials themselves. The test results provide valuable data on the difference in impact load resistance between the tested filaments, which significantly contributes to the selection of the optimal material for specific engineering projects, with the aim of increasing the reliability, safety and efficiency of final products manufactured using additive manufacturing technology.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, mechanical properties, thermoplastics, material testing