

ULOGA ADITIVNIH TEHNOLOGIJA U OBRAZOVANJU MAŠINSKIH INŽENJERA

Dejan Movrin¹, Dragiša Vilotić², Mladomir Milutinović³, Plavka Skakun⁴, Marko Vilotić⁵,
Ljiljana Stefanović⁶

^{1,2,3,4,5,6}Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

¹movrin@uns.ac.rs, ²vilotic@uns.ac.rs, ³mladomil@uns.ac.rs, ⁴plavkas@uns.ac.rs, ⁵markovil@uns.ac.rs,
⁶ljiljanastefanovic@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Aditivne tehnologije/aditivna proizvodnja (AT/AM) danas predstavljaju osnovni alat pri projektovanju proizvoda i alata. Isprva su se ove tehnologije koristile samo za izradu prototipova (Rapid Prototyping) dok se danas AT izrađuju i gotovi delovi u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji.

Na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, aditivne tehnologije su uvedene u nastavu kroz predmet Brza izrada prototipova i alata 2005. godine. Od 2009. sa nabavkom prve opreme za AT, uređaja za vezivnu 3D štampu, uvedene su i laboratorijske vežbe na kojima studenti samostalno rade od prve ideje (računarskog 3D modela) do izrade fizičkog dela na uređaju. Do 2020. godine preko međunarodnih projekata nabavljeni su uređaji za deponovanje istopljenog filameta (FDM) i stereolitografiju (SLA), koji su takođe uključeni u nastavu.

Ključne reči: Aditivne tehnologije, Vezivna 3D štampa, FDM, SLA

THE ROLE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN EDUCATION OF MECHANICAL ENGINEERS

Abstract: Additive technologies/additive manufacturing (AT/AM) are today irreplaceable step in the products and tools design. Initially, these technologies were used only for prototypes (Rapid Prototyping), while today AT are also used in manufacturing, at individual and small-batch production. At the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, additive technologies were introduced through the rapid prototyping and rapid tooling teaching course in 2005. Since 2009, with the purchase of the first equipment for AT, device for 3D binder printing have been introduced and included in exercises, where students work independently, from the first design (3D computer model) to the manufacturing of physical parts on the device. By 2020, fuse deposition modeling (FDM) and stereolithography (SLA) devices have been purchased through international projects, and included in the teaching course.

Key Words: Additive technology, Binder 3D printing, FDM, SLA

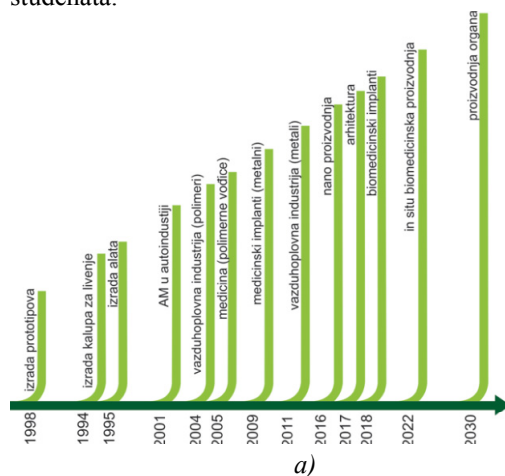
1. UVOD

Aditivne tehnologije (Additive Technologies) predstavljaju postupke spajanja materijala sa ciljem formiranja radnog predmeta na osnovu digitalnog 3D modela, najčešće sloj po sloj. S početka korišćene samo za brzu izradu prototipova (Rapid Prototyping), sa razvojem tehnologije i materijala, tehnologije za aditivnu proizvodnju su evoluirale do stepena koji omogućava izradu završnih, funkcionalnih proizvoda (Additive Manufacturing) [1] ili finalnih alata [2, 3] (Rapid Tooling). Prvi postupak AT razvijen je sredinom 1980. nakon čega je i nastala prva mašine za stereolitografiju, koju je razvila kompanija 3D Systems. Vrlo brzo je nastao i drugi postupak vezivne 3D štampe (1989. godine na MIT, USA), nakon čega je krenuo ubrzani razvoj ovih tehnologije. S obzirom na vrlo kratak vremenski period od nastanka prvog uređaja pa do danas (oko 30 godina), ove tehnologije su prešle veliki put, što se može videti na slici 1. Inicijalno korišćene samo za izradu prototipova, vrlo brzo su dostigle upotrebu u u industriji, zatim u izradi implanata u hirurgiji, a prema predikciji u bliskoj budućnosti će biti korišćene i za proizvodnju ljudskih organa, što bi isključilo donorski sistem transplantacija.

Zbog specifičnih zahteva tržišta, odnosno sve veće potrebe za izradom pojedinačnih, prilagođenih proizvoda, danas se ove tehnologije sve više primenjuju kako u izradi alata za proizvodnju (alati za brizganje plastike, alati za deformisanje, kalupi za livenje, itd.) tako i za izradu završnih proizvoda, najčešće u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji.

Zbog svog mesta u savremenoj industriji, ove tehnologije su morale naći i svoj prostor u obrazovanju mašinskih inženjera, pa su zbog toga uvedene na master studijama proizvodnog mašinstva na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu još 2003 godine, a zatim je i objavljena prva knjiga Brza izrada prototipova, modela i alata, autora prof. Miroslava Plančaka. Od 2009. godine počela je i nabavka opreme, prvenstveno uređaja za vezivnu 3D štampu (Z 310 plus, Z Corporation, USA), zatim 2012. FDM uređaja Makrer Bot Replicator 2 (USA), krajem 2018 i savremenog uređaja za stereolitografiju Form2 (FormLabs, USA) i početkom 2019 još jednog FDM uređaja Prusa Mk3 (Prusa Research, Prag, Češka republika). Svi uređaji su smešteni u Laboratoriji za aditivnu i virtuelnu

proizvodnju (slika 1b) i uključeni su potpuno u nastavni proces na svim nivoima studija, na četiri različita studijska programa. Osim izučavanja i primene AT kroz nastavu, studentima je omogućeno i izučavanje i upotreba uređaja i tehnologija kroz vannastavne projekte različitih tematskih oblasti, a koji se realizuju sa interdisciplinarnim timovima studenata.



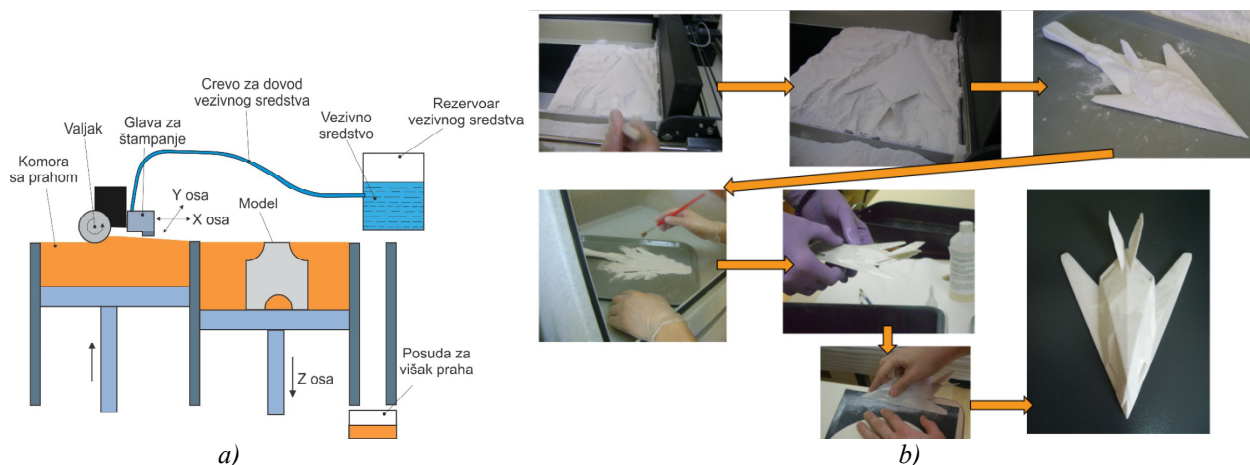
Slika 1 Razvoj aditivnih tehnologija (a) [4]; Laboratorija za aditivnu i virtuelnu proizvodnju (b)

2. VEZIVNA 3D ŠTAMPA

Vezivna 3D štampa je postupak koji je razvijen na Massachutes Institute of Technology (MIT) 1989. i predstavlja jedan od prvih procesa brze izrade prototipova koji je razvijen. Zbog sličnosti sa ink-jet štampom vrlo često se u literaturi može pronaći i naziv ink-jet 3D štampa. Razlika u odnosu na klasičnu ink-jet štampu je ta što se umesto mastila kroz glavu štampača izbacuje vezivno sredstvo (en. binder) koje se deponuje na praškastu osnovu. Na slici 2a šematski je prikazan uređaj za vezivnu 3D štampu sa osnovnim elementima.

Princip funkcionisanja ove tehnologije se može objasniti preko više koraka. Valjak za nanošenje i raspoređivanje praha zajedno sa glavom za štampanje se kreće od komore sa prahom, koja je podignuta u odnosu na njega po z osi, dok je komora modela spuštена za debljinu sloja. Na taj način valjak vrši raspoređivanje praha po radnoj komori gde se deo izrađuje. Nakon nanošenja sloja valjak sa glavom se vraća ka početnoj poziciji pri čemu glava vrši štampanje tekućeg sloja. Upravljanjem glave se vrši preko upravljačkog programa izrađenog na osnovu 3D računarskog modela (CAD modela). Vezivno sredstvo omogućava spajanje čestica praha kako u tekućem sloju tako i spajanje dva susedna sloja. Vraćanjem valjka sa glavom u početni položaj, komora sa modelom se spušta za zadatu debljinu sloja dok se istovremeno komora sa prahom podiže i proces se ponavlja sve dok kompletan deo ne bude izrađen.

Nakon štampe model je okružen prahom i vadi se iz radne komore štampača korišćenjem različitih dodataka za usisivač, kompresora, četke i drugog pomoćnog pribora, a zatim se prebacuje u reciklator, koji predstavlja zatvorenu komoru u kojoj se višak praha uklanja uz pomoć struje vazduha. Uklonjeni prah se usisava i nakon prosejavanja kroz sita određene granulacije ponovo vraća u proces (slika 2b).



Slika 2 Osnovni delovi uređaja za vezivnu 3D štampu a) [5], šema procesa od vađenja dela do finalnog dela

Deo je nakon vađenja iz radnog prostora štampača veoma porozan, loših mehaničkih karakteristika i veoma

osetljiv na vlagu. Kako bi se dobile finalne karakteristike i mogućnost upotrebe izrađenih delova potrebno je izvršiti infiltraciju, tj. nanošenje tečnih hemijskih jedinjenja po dubini modela. Najčešće korišćeni infiltranti su: voskovi, cijanoakrilati, epoksidne smole, vodeni rastvori sa dodatkom Epsom soli itd.

S obzirom na složenost procedure, potrebnu pažnju prilikom rada kako ne bi došlo do oštećenja modela pa i do ljudske povrede ova tehnologija se praktično izvodi samo na master i doktorskim nivoima studijama. Sama kompleksnost procesa studentima daje dodatnu motivaciju za samostalan rad uz kontrolu nastavnika (slika 3), a primena različitih načina postporcesiranja otvara mogućnost za izradu master i doktorskih radova.

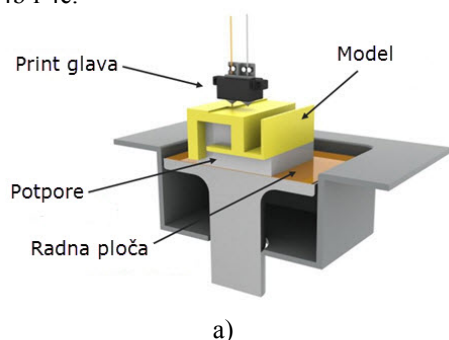


Slika 3 Samostalan rad studenata

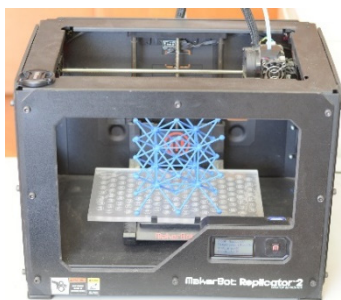
3. DEPONOVANJE ISTOPLJENOG FILAMENTA (FDM)

Tehnologija modelovanja deponovanjem istopljenog filameta (u daljem tekstu FDM) koristi ekstruzionu glavu za topljenje i deponovanje polimernog filameta na radnu ploču, pri čemu model nastaje u slojevima. Ekstruzionu glavu je pokretna u više pravaca, u zavisnosti od tipa uređaja, i na sebi ima mlaznicu kroz koju se ekstrudira istopljeni filament, a čiji se prečnik može kretati između 0.1 i 1 mm. Materijal filameta se zagreva na temperaturu vrlo blisku temperaturi topljenja i očvršćava vrlo brzo nakon deponovanja. Deponovane staze istopljenog polimera vezuju se međusobno, u horizontalnom i vertikalnom pravcu, stvarajući kompaktnu očvrslu celinu (slika 4a). Neke FDM mašine raspolažu sa dve mlaznice, od kojih jedna deponuje osnovni, gradivni materijal, dok druga deponuje materijal za oslonce. Pri tom je materijal koji služi za gradnju oslonaca, slabijih mehaničkih karakteristika i u većini slučajeva topljiv u određenim rastvaračima (voda, limonen, deterdženti, itd.), što omogućava njegovo lakše uklanjanje u fazi postprocesiranja.

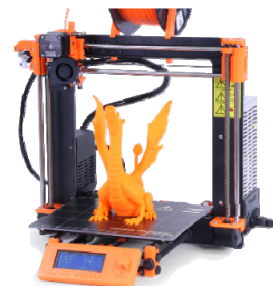
U Laboratoriji za Aditivnu i virtuelnu proizvodnju se nalaze dva uređaja za FDM tehnologiju i prikazani su na slici 4b i 4c.



a)



b)



c)

Slika 4 Glavni elementi FDM uređaja (a), uređaj Maker Bot Replicator 2 (b) i uređaj Prusa Mk3 (c)

FDM tehnologija trenutno predstavlja najrasprostranjeniju AT, a sami uređaji i potrošni materijal imaju vrlo nisku cenu. Npr. kućni uređaji koji se isporučuju u delovima i krajnji korisnik ih samostalno sklupa se kreću već od 150€ dok je cena 1kg potrošnog materijala od 15€. Sama konstrukcija uređaja i kretanja su slični malim konvencionalnim CNC glodalicama i mašinama za graviranje, pa je stoga u okviru Laboratorije za aditivne i virtuelne tehnologije i IDEAlab-a formiran tim studenata koji kroz vannastavni projekat imaju za zadatak da od početka konstruišu i naprave FDM uređaj sa dve glave. Osim projektovanja i montaže delova, studentski tim samostalno izvršava zadatak nabavke materijala i delova za uređaj U sledećoj iteraciji uređaj će se korigovati tako da postane modularna mašina za 3D štampu, lasersko graviranje i CNC graviranje. Uređaj u trenutnoj fazi izrade prikazan je na slici 5.



Slika 5 Studentski projekat izrade 3D štampača

4. STEREOLITOGRAFIJA (SLA)

Stereolitografija (SLA) predstavlja prvi razvijeni postupak brze izrade prototipova. Bazira se na očvršćavanju tečnog fotoosetljivog polimera pod uticajem zračenja. Fotopolimerizacioni procesi koriste tečnost, polimerizujuće smole ili fotopolimere kao primarne materijale. Većina fotopolimera reaguje na zračenje u ultraljubičastom (UV) spektru talasnih dužina, ali se koriste i sistemi vidljive svetlosti. Nakon izlaganja zracima, ovi materijali prolaze hemijsku reakciju da bi postali čvrsti. Ova reakcija se naziva fotopolimerizacija. Ova tehnologija pripada grupi najpreciznijih tehnologija, gde se kvalitet površine i mehaničke karakteristike delova mogu porediti sa delovima uzrađenim injekcionim presovanjem. Uređaj koji se nalazi u Laboratoriji prikazan je na slici 6.



Slika 6 SLA uređaj Form 2, proizvođača Form Labs, USA

S obzorm da je uređaj nabavljen nabavljen pre godinu dana, još uvek je u početku uvođenja u nastavni proces, pa su studentski radovi i projekti tek na početku sa stanovišta istraživanja ove tehnologije.

5. ZAKLJUČAK

Kroz Laboratoriju za aditivnu i virtuelno proizvodnju uvedene su tehnologije aditivne proizvodnje u nastavu kroz praktične zadatke i projekte. U današnje vreme veliki broj firmi iz oblasti mašinstva poseduje uređaje za aditivnu proizvodnju, pa je kroz studije na Fakultetu tehničkih nauka i predmete koji se bave samo ovom problematikom zaokruženo školovanje prvenstveno mašinskih inženjera, a poslednjih godina se ovi kursevi održavaju i na drugim studijskim programima.

S obzirom da laboratorija poseduje uređaje iz tri različite grupe tehnologija koje su trenutno najrasprostranjenije u industrijskoj praksi, osposobljavanje je izvedeno ne samo preko teorijskih osnova nego i praktičnom obukom budućih inženjera.

6. LITERATURA

- [1] Gibson I, Rosen DW., Stucker B *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer
- [2] Marciniec A, Markowski T, Budzik G, Trytek A, Kozik B, Bernaczek J, Pacana J, Matysiak H, Banaś A *Application of ZP131 powder for manufacture of casting molds using ZCast technology for Al-alloys castings*, Archives of foundry engineering, Vol.83, No 1, 2010.
- [3] Zhou JG, Kokkengada M, He Z, Kim YS, Tseng A *Low temperature polymer infiltration for rapid tooling*, Materials and Design, Vol. 25, 2004.
- [4] *Additive manufacturing: opportunities and constraints*, Summary of a Roundtable Forum. Royal Academy of Engineering, London, UK, 2013
- [5] Dejan Movrin, *Optimizacija parametara postprocesiranja u tehnologiji vezivne 3D štampe*, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, 2017.