

Снежана Ђирић Костић  
Небојша Богојевић



# ПРИНЦИПИ И ПРИМЕНА АДИТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ



Факултет за машинство  
и грађевинарство  
у Краљеву Универзитета у Крагујевцу



УНИВЕРЗИТЕТ  
У КРАГУЈЕВЦУ

**АУТОРИ**

ДР СНЕЖАНА М. ЋИРИЋ КОСТИЋ, ДОЦЕНТ  
ДР НЕБОЈША М. БОГОЛЕВИЋ, ДОЦЕНТ

**ПРИНЦИПИ И ПРИМЕНА АДТИВНЕ ПРОИЗВОДЊЕ**

I ИЗДАЊЕ

**ISBN 978-86-81412-05-3**

**РЕЗЕНЗЕНТИ**

ДР МИРОСЛАВ ТРАЈАНОВИЋ, РЕДОВНИ ПРОФЕСОР  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У НИШУ

ДР МИЛОСАВ ОГЊАНОВИЋ, ПРОФЕСОР ЕМЕРИТУС  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

**Издавач**

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ  
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ  
ДОСИТЕЈЕВА 19, 36000 КРАЉЕВО

**За издавача**

Проф. др Миле Савковић, декан

**Одобрено за штампу**

ОДЛУКОМ НАСТАВНО-НАУЧНОГ ВЕЋА ФАКУЛТЕТА ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ БРОЈ 299 ОД 24.03.2020.

**ТИРАЖ**

200 ПРИМЕРАКА

---

*ЗАБРАЊЕНО ПРЕШТАМПАВАЊЕ И ФОТОКОПИРАЊЕ - СВА ПРАВА ЗАДРЖАВАЈУ ИЗДАВАЧ И АУТОР*

## САДРЖАЈ

---

<b>1</b>	<b>Увод .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Основни принцип адитивне производње .....</b>	<b>10</b>
2.1	Дефиниција и основни појмови (Шта је адитивна производња?).....	10
2.2	Зашто адитивна производња? (Предности АМ) .....	13
<b>3</b>	<b>Структура ланца АМ процеса .....</b>	<b>17</b>
3.1	Концепција адитивне производње .....	17
3.2	Кораци у адитивној производњи.....	19
3.2.1	Генерисање тродимензионалног модела производа .....	21
3.2.1.1	Реверзно инжењерство.....	22
3.2.2	Конверзија у STL формат.....	25
3.2.3	Пренос података до машине и провера STL датотеке.....	27
3.2.4	Припрема и избор параметара за производњу .....	29
3.2.5	Процес изградње по слојевима .....	36
3.2.6	Уклањање и чишћење .....	38
3.2.7	Завршна обрада .....	40
3.2.7.1	Побољшање квалитета површине .....	44
3.2.7.2	Побољшање тачности димензија.....	48
3.2.7.3	Естетска побољшања.....	52

3.2.7.4	Побољшање механичких карактеристика.....	56
3.2.8	Примена.....	59
<b>4</b>	<b>Развој и врсте адитивних технологија .....</b>	<b>61</b>
4.1	Историјски развој адитивне производње.....	61
4.2	Класификација АМ поступака .....	66
4.2.1	Фотополимеризација у кади .....	67
4.2.2	Директна 3Д штампа (Material jetting) .....	71
4.2.3	Везивна 3Д штампа (Binder jetting ).....	75
4.2.4	Екструдирање материјала (Material extrusion).....	78
4.2.5	Фузија прашкастог супстрата (Powder Bed Fusion) .....	82
4.2.6	Ламинација фолија (Sheet Lamination).....	89
4.2.7	Наношење материјала применом усмерене енергије (енгл. Direct energy deposition) .....	92
<b>5</b>	<b>Примена адитивних технологија .....</b>	<b>97</b>
5.1	Области - нивои примене АМ .....	99
5.1.1	Погодности примене АМ технологија.....	101
5.1.2	Брза израда прототипа .....	104
5.1.2.1	Класе физичких модела - прототипова.....	105
5.1.2.2	Утицај примене брзе израде прототипа на циклус развоја производа .....	111
5.1.2.3	Индијектни поступци за израду прототипа.....	112
5.1.3	Брза израда алата .....	113
5.1.3.1	Директни поступци за брзу израду алата.....	115
5.1.3.1.1	Директна израда алата .....	115
5.1.3.1.2	Директна израда алата за прототипове .....	123
5.1.3.1.3	Директна израда помоћних алата и прибора.....	126
5.1.3.2	Индијектни поступци за брзу израду алата.....	132
5.1.3.2.1	Пример израде калупа од силиконске гуме .....	135

5.1.3.2.2	Пример примене индиректних поступака за брзу израду алата у златарству .....	136
5.1.4	Брза производња .....	145
5.1.4.1	Дизајн комплексне геометрије.....	150
5.1.4.2	Дизајн интегрисане геометрије.....	160
5.1.4.3	Дизајн интегрисаних функционалности (директна производња склопова) .....	163
5.1.4.4	Дизајн за побољшање функције и перформанси .....	167
5.1.4.5	Дизајн и прилагођавање – дизајн по мери корисника .....	169
5.1.4.6	Ограничења која прате брзу производњу.....	172
5.1.5	Индиректни поступци за брзу производњу.....	173
5.2	Могућности и трошкови .....	173
<b>6</b>	<b>Библиографија.....</b>	<b>176</b>
<b>7</b>	<b>Додатак.....</b>	<b>199</b>
7.1	Речник појмова.....	199
7.2	АМ стандарди .....	204

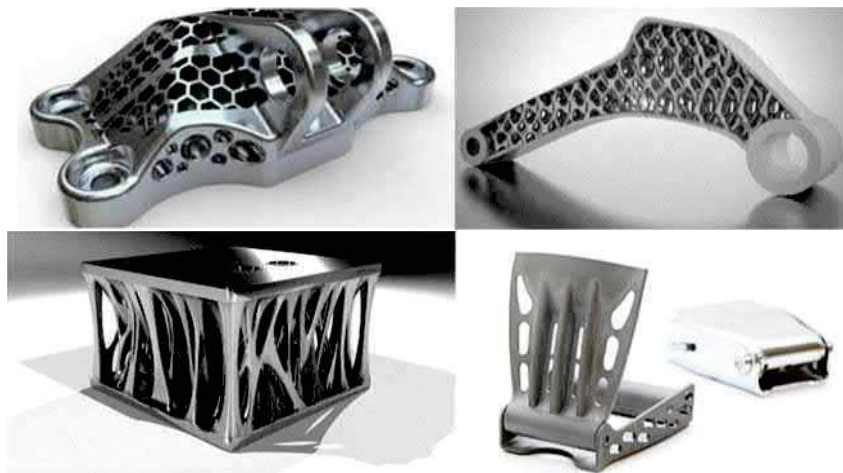
## 1 УВОД

---

У брзо развијајућој области адитивне производње (AM - additive manufacturing, енгл.), последњих година фокус се помера са брзе израде прототипова на производњу функционалних делова, и то са акцентом на израду компоненти високих перформанси. Адитивна производња отвара нове могућности за иновативност у дизајну, и постаје процес погодан за производњу делова комплексне геометрије (Слика 1). Оптимизација геометрије заснована на методологији конструисања за адитивну производњу - *дизајн за AM*, обухвата нова подручја: *дизајн за смањење масе делова* („light-weight design“, енгл.) почев од облика инспирисаних природом (*бионички дизајн*) као што је структура бамбуса до разноврсних облика решетки и мрежастих структура; *дизајн за функционалност*; *дизајн за мулти-функционалност* интегрисану обликом, *дизајн за тополошку оптимизацију* и др.

Адитивна производња представља озбиљан потенцијал за индустријску револуцију [1] у различитим индустријским секторима као што су аутомобилска и авио индустрија, производња енергетских постројења, алата, електронских уређаја, робе широке потрошње, у медицини, стоматологији и др. Израда компоненти, практично без геометријских ограничења, нуди нове начине за унапређење перформанси производа или успостављање нових процеса. Штавише, адитивна производња дозвољава нова производна решења (нпр. производња у склопу, постизање оптималне цене при малим серијама производа, производња на захтев, близу купаца, израда производа од два или више материјала у једном производном циклусу и др.) убрзавајући процес развоја производа. Сматра се да адитивне производне технологије оснажују

транзицију од масовне производње до масовног прилагођавања појединцу у неколико водећих сектора [2]. Ова дигитална индустријска револуција обећава повећану флексибилност у производњи, масовно прилагођавање, повећање брзине процеса развоја производа, побољшање квалитета, брзи одговор на тренутне потребе и повећану продуктивност.



Слика 1: Примери „light-weight“ дизајна

Адитивна производња је препозната [2] као технологија која би могла да поседује способност да генерише нове приходе и развије нове пословне моделе, и да истовремено региону Европе омогући индустријско лидерство. Последњих неколико година Европска Унија (ЕУ) кроз подршку развојним истраживачким пројектима, улаже велики напор како би се ојачале технолошке могућности у адитивним производним технологијама и убрзало њихово увођење на тржиште. Од 2013. године, половина региона ЕУ поставила је "напредну производњу" као један од кључних приоритета у оквиру својих регионалних стратегија развоја, при чему је велика већина оних који се посебно фокусирају на адитивну производњу. Европска комисија је поред тога покренула и „паметну“ (енгл. smart) платформу за модернизацију индустрије у јуну 2016. године, која има за циљ да подржи напоре европских региона за заједничко улагање у модернизацију индустрије.

Примена адитивних технологија за израду производа високих перформанси је данас ограничена и користи се у највећој мери у водећим светским компанијама у области авио и аутомобилске индустрије, којима ће са повећавањем обима производње бити потребни високо ефикасни добављачи.

С друге стране, примена адитивне производње у малим и средњим предузећима је врло ограничена услед недостатка знања о овим технологијама [3]. Технологије су релативно нове и данашњи инжењери и менаџери, навикнути на технолошка ограничења која постављају конвенционалне производне технологије, не поседују довољна знања о могућностима примене, посебно о могућностима унапређења перформанси постојећих компоненти, производа и алата. Очекивани прогрес у овој области може се десити када се технологија буде „ставила у руке“ сваком појединцу, почев од студената, инжењера, индустријских дизајнера, менаџера, до корисника. Неопходно је да знања из те области постану доступна широкој јавности и буду представљена на начин који се једноставно може користити. Према извештају ЕУ [4] обуке и вештине за примену адитивних производних технологија представљају интерес у најмање половини региона Европске Уније, са потребом да се развију методе за обуку запослених у индустрији и обезбеди литература који ће заједно омогућити прилагодљивост радне снаге и бржи пренос знања. Стварање потражње за иновативним вештинама и развој нових наставних планова сматрају се критичним елементима у стратегији развоја адитивне производње. Да би се искористио сав потенцијал који пружају адитивне производне технологије за израду компоненти високих перформанси неопходно је познавати могућности и ограничења која намеће свака од АМ технологија, као и правила дизајна и механичко понашање расположивих материјала.

У складу са претходним, мотивација за објављивање овог универзитетског уџбеника је жеља да се студентима Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу (ФМГ) обезбеди литература неопходна за савладавање градива из предмета Дигиталне технологије за развој производа, као и да се седмогодишње искуство у пружању услуга адитивне производње индустрији региона пренесе на што шири круг корисника. Од изградње капацитета 2012. године, истраживачко-развојни центар за примену дигиталних технологија за развој производа, „ЗД Импулс“ даје допринос популаризацији адитивне производње, сарађује са привредом реализујући мноштво малих пројеката којима помаже стални развој нових и унапређење постојећих производа. Искуство у изради преко пет стотина прототипова, алата или производа за привреду региона, обуке одржане за предузећа широм земље, као и рад са студентима и дизајнерима указују да знања и примена адитивних технологија у Србији заостају за Европом и САД. До прошле године у највећој мери се примена адитивних производних технологија углавном



заснивала на брзој изради прототипова, док је интересовање за израду алата и производа показао мањи број предузећа оријентисаних извозу. Аутори овим уџбеником желе да обезбеде литературу на српском језику за студенте техничких факултета и примењеног дизајна као и за стручњаке који желе да науче више о адитивној производњи. Уџбеник је конципиран тако да се може користити и без предзнања о адитивним технологијама, тако што читаоца најпре уводи у принцип рада на коме се заснива адитивна производња, затим систематски приказује постојеће АМ технологије, истиче њихове предности и недостатке, приказује расположиве материјале и могућности примене у различитим фазама у развоју производа и производње, да би на крају кроз приказ реализованих пројеката подстакао рађање нових иновативних решења.