

ПРИМЕНА 3Д КОМПАТИБИЛНИХ МАТЕРИЈАЛА У ГРАЂЕВИНАРСТВУ

Драгица Јевтић¹
Никола Мирковић²

УДК: 69.057.1 : 655.3.066.51

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.038

Резиме: У раду су представљени основни принципи примене 3Д штампача у грађевинарству, који се заснивају на технологији стереолитографије – процесу стварања објеката где се материјал наноси слој по слој и формира жељене облике и форме. Приказани су такође и идејни концепти тренутно актуелних 3Д система који се користе у области грађевинарства као и њихове основне карактеристике, могућности и специфичности. Посебан акценат у раду је стављен на нанокмпозите - материјале који се добијају у лабораторијама применом 3Д технологије штампе, као и на материјале који се примењују у процесу 3Д штампе - 3Д компатибилни материјали. Најпознатији 3Д компатибилни материјали су: антигравитациони материјали, структурално модификовани ситнозрни бетони, многи други композитни материјали који применом 3Д штампе налазе све већу примену у области грађевинарства.

Кључне речи: 3Д штампачи, стереолитографија, 3Д компатибилни материјали, нанокмпозити, антигравитациони материјали.

1. УВОД

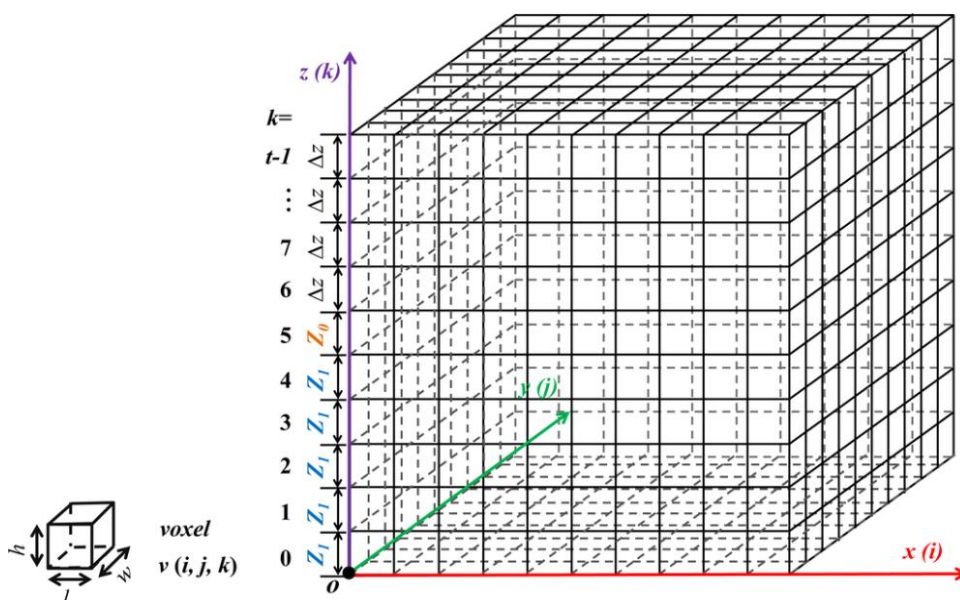
Идеја о тродимензионалним штампачима (енг. 3D printers) који би једног дана могли израђивати предмете одавно није новост, но углавном се радило о концептима или раним прототиповима врло ограниченог деловања. Захваљујући брзом напретку технологије, њихова садашња примена значајно се повећала у грађевинарству, дизајну, медицини и индустрији. У почетку су се примењивали за израду модела у производњи, док се данас користе у прављењу коначних производа, попут кућа, па чак и зграда са неколико спратова. Тродимензионално исписивање (енг. 3D printing) нова је технологија брзе израде прототипова којом се на уређајима заснованим на патентираној 3Д технологији МИТ универзитета (енг. Massachusetts Institute of Technology) "исписују", тј. директно из неког од 3Д програма израђују физички предмети у простору.

¹ Проф. др Драгица Јевтић, дипл. инж. технол., редовни професор у пензији, Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, e-mail: dragica@imk.grf.bg.ac.rs

² Никола Мирковић, дипл. инж. грађ., студент докторских студија, Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, e-mail: nick5308.mir@gmail.com

Најзначајнији параметар 3Д штампача јест његова резолуција. Резолуција представља величину најмањег елемента који 3Д штампач може исписати. Овде можемо говорити о дебљини слоја и величини воксела.

Воксел није ништа друго него тродимензионални еквивалент пиксела, приказано на слици 1. Као што се отисак из класичног дводимензионалног штампача састоји од малих 2Д тачкица - пиксела, тако се и тродимензионални отисак из 3Д штампача састоји од малих 3Д тачкица - воксела. Осе које се додељују објектима означавају се словима Z за висину, X за ширину и Y за дубину.



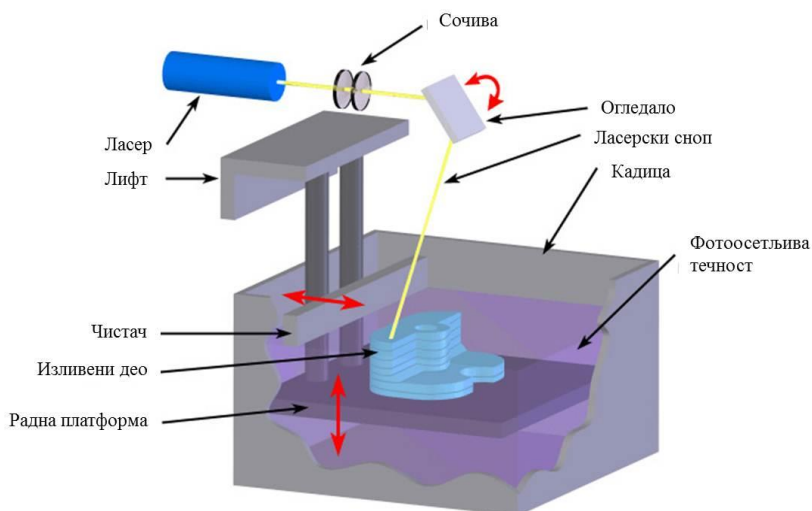
Слика 1 Приказ изолованог воксела и тродимензионалне мреже са ознакама координатног система XYZ

Постоји више различитих метода исписа. Међутим, сврха им је изградити тродимензионални објекат, тако што се један по другом наносе слојеви одређених врста материјала. Поступак почиње креирањем дигиталне датотеке објекта (енг. STL file) у неком од програма за тродимензионално моделирање. Да би се из таквих дигиталних датотека добиле наредбе које 3Д штампач разуме, софтвер дели модел на стотине или хиљаде хоризонталних слојева – (енг. G code), а затим штампач чита такву датотеку и наставља креирање сваког слоја. Они потом постају једна целина без видљивих граница, те као резултат имамо тродимензионалну грађевину.

Касних осамдесетих почели су се примењивати термини адитивне производње (енг. Additive manufacturing) или стереолитографије (енг. Stereolithography), да би их касније све заменио израз 3Д штампа (енг. 3D printing).

2. ПРИМЕНА СТЕРЕОЛИТОГРАФИЈЕ У ГРАЂЕВИНАРСТВУ

Енрико Дини (енг. Enrico Dini), инжењер из Тоскане, провео је целу каријеру у сектору механике, аутоматике и роботике, проучавајући примену стереолитографије на производњу већих предмета. Стереолитографија је технологија стварања објеката попут макета и прототипова мањих димензија у процесу где ултраљубичаста светлост (енг. ultraviolet light) прелази преко базена са фотоосетљивом течношћу и тако формира жељене облике и форме материјала у финалне производе, приказано на слици 2. У току израде модел се спушта у кадицу слој по слој, док се не добије финални производ. Још једна предност ове врсте технологије 3Д штампе је висок ниво детаља и обраде завршне површине. Једна од главних предности таквог штампања је сама брзина израде, тако да се исти модели производе и до 5 пута брже него у свим осталим техникама.



Слика 2 Шематски приказ процеса стереолитографије

Након четири године истраживања и развоја, Дини је 2007. године успешно тестирао прототип машине величине 6 x 6 m, која је могла да производи зграде од бетона у пуној величини и без људске интервенције, употребљавајући стереолитографски процес коме је за рад потребан само песак и неорганско везивно средство. Овакав концепт подразумева процес градње који је сличан испису где машина убризгава везивно средство на слој песка, слично као и ink jet штампач. На тај начин инжењери могу стварати комплексне конструкцијске системе, а као пример наводи се структура названа Radiolaria – зракаш, једноћелијски еукариотски организам, коју је пројектовао архитект Andrea Morgante (Shiro Studio, London). Radiolaria представља прву примену класичне стереолитографије у грађевинској индустрији, приказано на слици 3. То је два метра висока монолитна конструкција од песка "одштампана" у слојевима који су

повезани неорганским везивним средством. CAD-CAM софтвер води цео грађевински процес, а главни део штампача постављен је на алуминијској конструкцији. Процес траје без прекида, од темеља до крова, укључујући стубове, спољашње и унутрашње зидове, конкавне и конвексне површине, као и отворе за инсталације. При изливању сваког слоја "конструкцијско мастило" се убризгава на песок. Процес очвршћавања траје 24 сата. Штампање почиње на дну конструкције и пење се у висину у слојевима од 5 до 10 mm. Контактима песка и неорганског везива почиње процес очвршћавања након чега се додаје нови слој. Нови се материјал потом испитује на притисак и савијање. Вештачки песок има одлична механичка својства, врло слична мрамору.



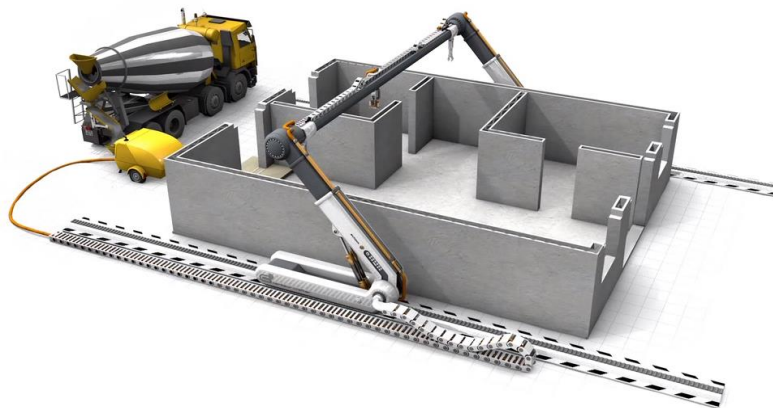
Слика 3 Radiolaria - Прва примена стереолитографије у грађевинарству

Дини тврди да везивно средство које се примењује у процесу трансформише било који тип песка у материјал попут мрамора са својствима супериорним цементу у толикој мери да није потребно армирати конструкције. Осим тога, процес је прихватљив како у еколошком тако и у финансијском смислу, јер не користи цемент, арматуру, оплату, скелу и људски рад. [1]

3. 3Д СИСТЕМИ И 3Д КОМПАТИБИЛНИ МАТЕРИЈАЛИ

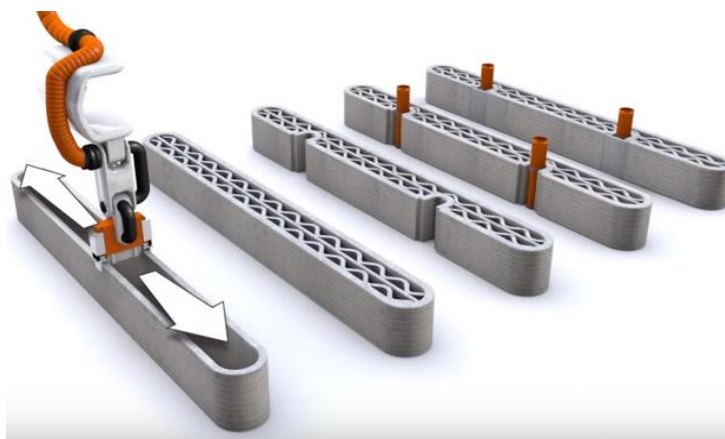
Пре двадесетак година проф. др Берлок Кошневис (енг. Behrokh Khoshnevis), инжењер са Универзитета у Јужној Калифорнији, започео је са концепирањем 3Д штампаних кућа примењујући тада релативно непознат принцип адитивне технологије. Његова технологија под називом Contour Crafting, приказана на слици 4, не пружа само једноставну и брзу израду стамбених и других садржаја, већ полако задаје озбиљан ударац грађевинарима, јер ће израда таквих грађевина бити знатно јефтинија у односу на класичну градњу. Највећу препреку за израду таквог штампача донедавно је стварала бризгалица бетона, коју је научник успешно решио.

Contour Crafting је компјутерски управљан систем који кроз млазницу истискује смесу вискозног бетона слој по слој. Млазница се креће према унапред дефинисаним координатама у XY равни, а исписом једног слоја поново се диже за 25,4 mm по Z оси и исписује нови слој. Брзина полагања материјала је 7,5 m/min.



Слика 4 Концептуално решење Contour Crafting система

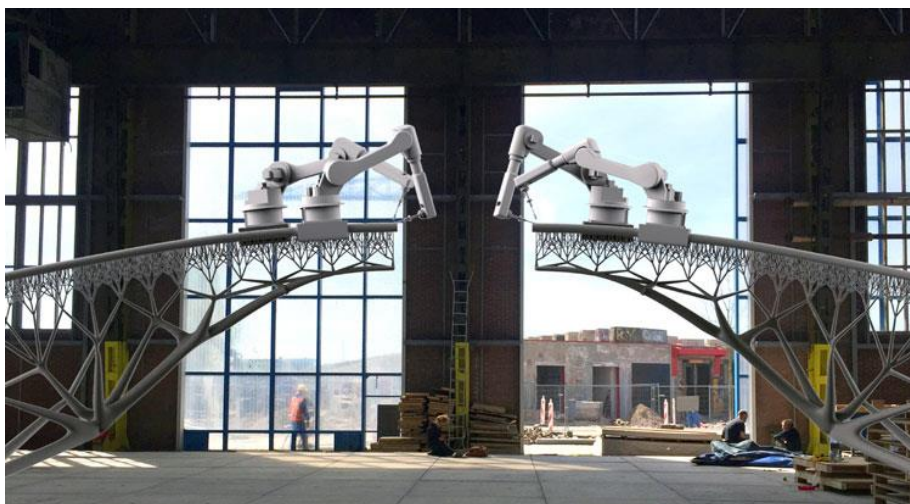
У прототип машине уложено је 30.000 долара, а 2005. године је пребачен у NASA-ин центар како би се истражиле могућности, ограничења и употреба 3Д штампаних елемената од реголита и водом модификованих стена од очврслих наслага, познатих и под називом "месечева прашина". Првобитна идеја је била да се такав робот користи за ванземаљске апликације, тј. градњу инфраструктуре на лицу места (на Марсу или Месецу). Димензије прототипа машине су (XYZ) 1,8 x 1,8 x 2,5 m. Материјали који се разматрају су реголит (мрвљени материјал који се састоји од седимената) и дробљене стене са примесама разних влакана и везива.



Слика 5 Изглед носећих и конструктивних зидова Contour Crafting система

Сврха таквих грађевина је првенствено заштита скупе опреме у свемиру. Неки од планираних садржаја који би се изградили су плато за слетање свемирских бродова, објекти за заштиту од прашине и радијације, саобраћајнице, заштитни хангари за опрему (заштита од микрометеорита), топлотни штитови и контролни торањ. Досадашња тестирања различитих конструкција показала су да носиви зидови морају бити израђени од два реда материјала са ојачањем у средини у виду троугаоне решеткасте испуне, приказано на слици 5. Остали зидови се израђују од једног реда материјала. Већина зидова је шупља и предодређена за накнадну уградњу изолације и инсталација. [2]

Упоредо са развојем Contour Crafting система у Америци, позната холандска компанија MX3D специјализована за 3Д штампу дошла је на идеју да гради челичне мостове на један потпуно другачији начин - роботизованим 3Д штампачима, приказано на слици 6. Градња мостова на овај начин повољна је и са еколошке стране. Наиме, грађевински отпад и потрошња материјала свде се на минимум јер уградњу контролише рачунар.



Слика 6 Конструкција првог челичног пешачког моста направљеног роботизованим 3Д штампачима

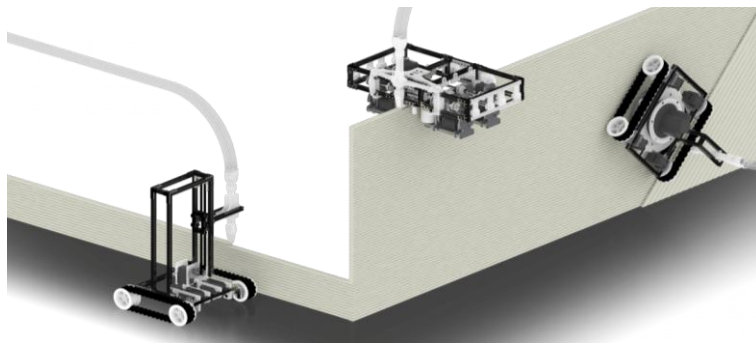
Завршен мост ће бити дугачак око 24 m, и користиће се за бициклички и пешачки саобраћај у Амстердаму. Имаће и необичан, футуристички дизајн који је наглашенији него код већине данашњих мостовима, јер 3Д штампа омогућава прецизну контролу детаља коју индустријска производња не може да испрати. За разлику од већине данашњих 3Д штампача који користе смоле или пластику за изградњу објеката, овај мост ће бити направљен од нове челичне легуре која је развијена на Универзитету у Делфту, за примену у 3Д штампи. Такав челик ће се у процесу 3Д штампе уграђивати методом кап по кап (енг. drop by drop) чиме ће се добити веома компактна структура материјала који по физичким, механичким и хемијским карактеристикама не одступа од стандардног челика, слика 7.



Слика 7 Легура челика која се уграђује применом 3Д методе кап по кап

За разлику од свих осталих 3Д штампача који се тренутно развијају за потребе у грађевинарству, 3Д штампач компаније МХ3Д се суштински разликује од њих јер је способан сам да се помера дуж конструкцији у току њене изградње. Он заправо сам може одштампати стазе испред себе по којима ће се кретати. [3]

За разлику од прва два система, пројекат Minibuilders је скуп више штампача који су сви међусобно повезани и који штампају објекте знатно веће од себе, приказано на слици 8. Први робот назван је Foundation Robot, и он прави првих 15 слојева, који представљају темељ финалне структуре. Остатак објекта је фабрикован другим, Grip Robotom, који има способност качења на већ одштампане темеље помоћу четири ролера. Једно од главних ограничења данашњих 3Д штампача је повезано са оријентацијом смера слојева материјала, а овај проблем решава трећи, Vacuum Robot. Он има специјално дизајнирани вакуум систем који му омогућава да се креће по свим површинама, чак и по плафону.



Слика 8 Minibuilders – Мини роботи грађевинари који пркосе гравитацији

Концепт Minibuilders је много више од ова четири робота која су до сада представљена; то је сваки робот за себе у грађевинарству који може да прави структуре веће од себе. [4]

Такође, развој антигравитационих материјала је радикално изменио начин примене 3Д штампача који сада могу да штампају на било којој површини, без обзира на угао штампе или (не)глаткоћу, приказано на слици 9. То значи да овај штампач може да се бори са гравитацијом док штампа - и да побеђује. Главна иновација која ово омогућава је термосет двокомпонентног епоксида уместо термопластике која се користи у постојећим 3Д штампачима.

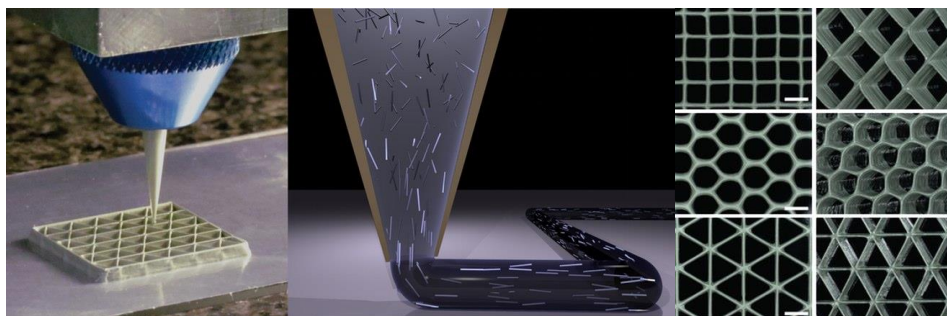


Слика 9 Антигравитациони материјал у процесу 3Д штампе

Наравно, овде је тренутно највећи проблем цена материјала. Епоксид који се користи за справљање овог материјала направљен је у лабораторији и трошкови његове израде су велики. Из тог разлога је јако битно да се развој 3Д штампача укључује у иновације на пољу нових материјала — у супротном би квалитет готовог објекта остао исти. Потребно је донети иновације и на другим пољима, попут смањења утрошеног материјала, енергетске ефикасности, конструктивних карактеристика и естетских ефеката уградних материјала. Замислите само бетонски стуб у коме је могуће контролисати порозност (густину) у зависности од конструктивних карактеристика тог елемента. Било би могуће уштедети и до 30 % количине утрошеног материјала. Та количина не изгледа велика уколико се гледа мали блок, али би на нивоу града то била значајна уштеда. У ближој будућности захваљујући развој нових материјала, уместо изолације, прозора, врата и других компоненти наше куће функционисаће као јединствено тело, попут организама које можемо наћи у природи. [5]

Истраживачи са Харварда развили су начин да штампају целуларни композит са рекордном лакоћом и изразитом крутошћу користећи епоксидне смоле, приказано на слици 10. Ово је први пут да се епоксид користи у 3Д штампи, и унапред може да доведе до развоја нових лаганих форми за ефикасније ветроелектране, брже аутомобиле и лакше авионе. Ако су узму сви материјали познати човеку, без обзира да ли су природни или вештачки, и посматрају њихова релативна својстава, убрзо ће се уочити врло јасан образац: густина и чврстоћа материјала увек иду руку под руку. Тако на пример, лагана пена је изразито слаб материјал, а на другом крају спектра, тешки материјали попут челика и других метала су међу најјачим.

Постоји међутим и неколико изузетака. Један такав пример је дрво Балса (енг. Balsa tree), које има јако ниску густину од 40 kg/m^3 , али је и даље веома јако, захваљујући његовој микроструктури коју карактерише изузетно ефикасна комбинација целулозних влакана и лигнина. Балса дрво се стога користи у ситуацијама где се захтева лака али јака структура конструкције, као на пример код елипси на ветрогенераторима, на шасијама неких модела авиона и хеликоптера. Међутим, постоје озбиљни проблеми у снабдевању овом сировином, јер преко 95% светских резерви Балса дрвета долази из једне земље - Еквадор.



Слика 10 3Д штампани композит израђен по изору на структуру Балса дрвета

Истраживачи су инспирацију нашли у микроскопској структури дрвета Балсе, која је углавном шупља и у којој само зидови ћелија носе терет.

Они су произвели нови композит коришћењем смоле епоксида које садрже примесе наноглина за повећање вискозности, као и још две врсте пунила - силицијум карбид и графитна влакна. Једна веома занимљива особина је чињеница да истраживачи могу контролисати тачну крутост материјала променом оријентације пунила по потреби. Оријентишући силицијум карбид управно на правац који ће се суочити са највише оптерећења чини материјал јачим - из истог разлога је лакше сецкање дрвета уздужно, а не под правим углом на правац пружања влакана. Ова прилагодивост значи да дизајнери сада могу дигитално утицати на крутост и жилавост материјала, и да га могу справљати према жељеним спецификацијама. Главни истраживач Jennifer A. Levis напомиње да њихова истраживања представљају значајан корак, јер отварају пут примени 3Д штампача, користећи материјале као што су епоксиди. Levis и његове колеге су добили композите који су крући од дрвета, и до 20 пута чвршћи од комерцијалних 3Д штампаних полимера. [6]

4. ЗАКЉУЧАК

Нову револуцију у данашњем грађевинарству представљају велики 3Д штампачи који штампају делове зграда који се потом састављају на градилишту. Како се чини, ускоро би из нових 3Д штампача могли излазити и цели небодери. Све те методе улазе у трку доказивања јефтине и брзе методе грађења, али постоји још

много недоумица око стабилности, економичности и брзине градње, флексибилности измена дизајна у процесу и сл., али и онај најважнији и помало дискутабилни део, а то је губитак радних места. Време је добар показатељ, па ваља причекати и видети која су решења, могућности и последице градње кућа и зграда са овом новом и изазовном технологијом. Такође, упоредо са развојем 3Д технологије штампања објеката, треба радити и на развоју нових савремених грађевинских материјала који ће бити супериорнији, енергетски ефикаснији у односу на данашње материјале и лако уградиви применом 3Д штампача. Јер без развоја нових материјала, нема ни напретка у усавршавању конструкција и објеката, а самим тим и квалитета живота људи у њима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B.: *Additive Manufacturing: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, London, **2010**.
- [2] Khoshnevis B., Bukkapatnam S., Kwon H., & Saito J.: Experimental Investigation of Contour Crafting using Ceramics Materials, *Rapid Prototyping Journal*, **2001**., бр. 7-1, стр. 32-41.
- [3] <http://3dprint.com/1167/mx3d-metal-anti-gravity-3d-printer-unveiled>, преузето 01.03.2016.
- [4] <http://monograph.io/iaac/minibuilders>, преузето 01.03.2016.
- [5] <http://www.material.com>, преузето 01.03.2016.
- [6] <http://3dprint.com/7390/3d-print-balsa-wood>, преузето 01.03.2016.

USE OF 3D COMPATIBLE MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING

Summary: This paper presents the basic principles use of 3D printers in civil engineering, which is based on the technology of stereolithography - the process of creating objects where the material is applied layer by layer and form the desired shape. It's also shown preliminary concepts currently available 3D systems used in construction as well as their basic characteristics, features and specifications. Special emphasis in this paper is placed on nanocomposites - materials that are obtained in the laboratory by using 3D printing technology and the materials that are used in the process of 3D printing - 3D compatible materials. The most famous 3D compatible materials are: antigravity materials, structurally modified fine-grained concrete, many other composite materials using the 3D printing are increasing application in the construction sector.

Keywords: 3D printers, stereolithography, 3D compatible materials, nanocomposites, antigravity materials.