

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Владимир Р. Кањевац

**Примена 3Д штампе за израду делова од
керамичког праха**

мастер рад

Крагујевац, 2014.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Информатика у инжењерству

Предмет: Брза израда прототипова

Број индекса: 353/2011

Владимир Р. Кањевац

**Примена 3Д штампе за израду делова од
керамичког праха**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Ненад Грујовић-ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да проучи препоручену, као и ширу литературу која се односи на 3Д штампање. На бази усвојеног знања кандидат треба кроз практичан рад да примени керамички прах у процесу 3Д штампе. На одштампаним узорцима урадити димензиону анализу и испитивање тврдоће.

Препоручена литература:

- [1] М. Трајановић, Н. Грујовић, Ј. Миловановић, В. Миливојевић „*Рачунарски подржане брзе производне технологије*“, Крагујевац, 2008
- [2] Grant Marchelli, Mark Ganter and Duane Storti, “New material systems for 3D ceramic printing”, University of Washington, Searle, WA 98195 rewied, accepted September 15, 2009
- [3] Paul F. Jacobs, David T. Reid, “Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography“, Society of Manufacturing Engineers, 2003

Крагујевац, Октобар 2014

ментор: др Ненад Грујовић

Резиме рада

У новије време инжењерске науке се не могу ограничити у потпуности од других дисциплина попут медицине, уметности, зато имамо велики број случајева када се различите дисциплине међусобно преплићу и допуњују. Повезивање наизглед врло различитих, али у суштини веома сродних материјала, као што су прах на бази гипса и керамички прах, дају једну сасвим нову димензију у примени 3Д штампања. У овом раду је описан експериментални тест примене некомерцијалног материјала у 3Д штампању.

Кључне речи: 3Д штампа, керамика, керамички прах, процес печења керамике, скенирање површине

Abstract:

In recent years, engineering sciences can not be restricted completely from other disciplines such as medicine, the arts, because we have a large number of cases where different disciplines intertwine and complement each other. Connecting seemingly very different, but in essence very similar materials, such as powder and ceramic powder, giving a whole new dimension in the application of 3D printing. This paper describes the application of an experimental test of non-commercial material 3D printing.

Key words: 3D printing, ceramics, ceramics powder, heating ceramics, scanning surface

Садржај

1. Увод.....	3
2. Основе РП технологија.....	5
2.1. Улазни подаци	6
2.2. Метод.....	7
2.3. Примена РП технологија	8
2.4. Користи од употребе РП технологија	9
3. 3Д штампа применом ZCorp штампача	10
3.1. Принцип рада.....	10
3.2. Поступак штампања.....	10
3.3. Примене делова израђених 3Д штампањем.....	13
3.4. 3Д штампач ZPrinter 310	18
3.5. 3Д штампа са глином	20
4. Експериментална примена 3Д штампе за израду делова од керамичког праха	22
4.1. Керамика	24
4.2. Керамички прах за 3Д штампу.....	25
4.3. Везивно средство.....	26
4.4. Припрема 3Д штампача за рад.....	27
4.5. Процес штампања.....	30
4.6. Поступак печења керамике.....	34
4.7. Могућност коришћења других материјала у праху.....	38
5. Димензионо и механичко испитивање узорака израђених 3Д штампом	40
5.1. Димензиона анализа	40
5.2. Испитивање тврдоће узорака.....	43
5.2.1. Склероскопска метода.....	43
5.3. Резултати мерења тврдоће	44
6. Закључак	46
Литература.....	47

1. Увод

Сврха свих техника израде прототипова је да помогне дизајнерима, инжењерима, инвеститорима и било коме ко учествује у одређеном пројекту, да визуализују објекат који се развија. Посматрањем физичког модела могу се уочити конструктивне грешке и могуће потешкоће у изради и склапању. Самим тим, измене у дизајну могу се вршити у првим фазама производног процеса чиме се штеди новац.

У току развоја производа, цена промене дизајна је различита, зависно од фазе у којој се промена врши. Што је производ ближи финалној производњи, то су и промене у дизајну скупље. Зато је важно уочити недоследности и проблеме у раним фазама развоја. Са напретком рачунарске технике, а посебно CAD софтвера који ради са параметризованим објектима, промене у основном дизајну могу се вршити уз најмањи напор. Израдом прототипова се осигурава да ће производ одговарати замисли дизајнера. Тако неће доћи до непотребних трошкова промене дизајна у фази производње [1].

Већи део трошкова у развоју производа отпада на израду концепта и проверу дизајна. Током тих фаза пуно времена се троши на дизајнирање и редизајнирање производа. Прототипови се праве и процењују, врше се измене и цео процес се одвија испочетка. На крају, дизајн производа је коначан и иде се даље у фазу производње. Више од половине трошкова развоја отпада на почетне фазе, па је јасно да би уштеде начињене у том периоду биле значајне.

Развој производа може се дефинисати као процес стварања нечега што не постоји у циљу задовољења одређених потреба. То је сложен процес који се састоји од више корака, где сваки корак зависи од више фактора (време, ресурси, комплексност производа и сл.). Уз то, глобална економија захтева бржи темпо развоја производа, уз ниже трошкове.

Поменуте фазе су следеће:

1. *Идеја – ментална слика производа*
2. *Концепција – почетна идеја дизајна*
3. *Прототип – први прототип дизајна*
4. *Главни дизајн – примарни дизајн за производњу*
5. *Прототип – главна провера дизајна*
6. *Финални дизајн – оптимизација дизајна*
7. *Нулта серија – производња малог обима*
8. *Серијска производња – производња великог обима*

Кључ успеха у развоју производа су помоћна средства која се за то користе. То су специјални поступци који умањују цену и време потребно да производ прође циклус развоја. Међу њима су водећи: брза израда прототипова и брза израда алата.

2. Основе РП технологија

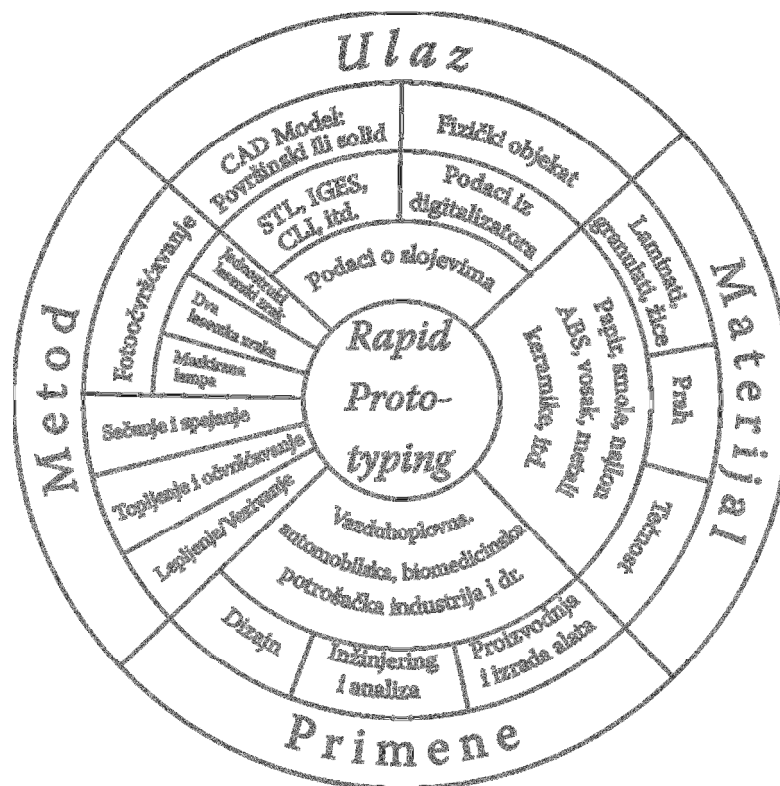
Брза израда прототипова је најчешће коришћен назив за скуп повезаних технологија које се користе за израду физичких објеката директно од CAD модела.

Основни приступ заједнички за све РП технике је следећи:

1. Предмет или неки његов део се моделира у CAD/CAM софтверу. Модел који се тако добије мора бити представљен затвореним површинама које одређују запремину предмета. То значи да подацима морају бити дефинисани унутрашњост, спољашњост и границе предмета. Овај услов је испуњен уколико је предмет моделиран солидима, јер сваки исправан солид представља ограничену запремину. Тако је обезбеђено да сви хоризонтални пресеци буду затворене површине, што је суштински важно за исправност РП процеса.

2. Добијени модел се затим претвара у STL (StereoLitography) фајл формат. То је приближан опис модела дефинисан полигонима. То значи да је за закривљене површине потребан велики број полигона, што резултује великим фајловима. Као алтернатива овом формату у употреби су и други: CLI, IGES или VRML.

3. Посебан софтвер анализира полигонални модел и претвара га у низ попречних пресека. Ови пресеци се секвенцијално израђују у виду слојева добијених било очвршћавањем флуида или везивањем прашкастог материјала. Постоје и друге методе израде, као што је сечење и спајање ламината.



Слика 1. Четири главна аспекта РП технологија [1]

На основу приказаног могу се уочити четири кључна аспекта РП технологија:

- улазни подаци,
- метод,
- материјал израде и
- примена

Слика 1 приказује ове аспекте са најчешћим видовима реализације у пракси.

2.1. Улазни подаци

Улазни подаци се односе на електронске информације које описују физички предмет у три димензије. Могућа су два извора: компјутерски модел или физички модел. Први је створен у CAD софтверу и може бити површински модел или солид, а други се добија мерењем стварног физичког објекта. Овај потоњи је резултат процеса реверзног инжењеринга у коме се мере и облик предмета преносе у грубој форми на рачунар уз

помоћ специјалне опреме, као што су CMM (Coordinate Measuring Machine) или ласерски дигитализатори, а затим се обрађују у CAD софтверу до жељене тачности.

2.2. Метод

Иако тренутно има на десетине произвођача РП система, могу се уочити опште категорије према методу који се примењује: фото-очвршћавање, сечење и лепљење, топљење и очвршћавање, и везивање. За фото-очвршћавање се користе следећи извори светлости: једноструки ласерски зрак, двоструки ласерски зрак, и маскирана лампа.

Све технологије у основи користе метод израде слој по слој, али се разликују према стању полазног материјала. Тако можемо приказати комплетно стабло РП технологија, подељено на поступке који користе у свом раду течне, чврсте и прашкасте материјале, и остале који не припадају наведеним [1].

- ТЕЧНИ - фотоочвршћавајући флуиди:

Пројектовањем светла кроз маску: Solid Ground Curing (SGC), Design-Controlled Automated Fabrication (DESCAF), Rapid Micro Product Development (RMPD), Microstereolithography.

Видљивим ласером: Mark 1000

УВ ласером (једним ласером): StereoLithography (SLA), Stereos, LMS, Solid Laser Diode Plotter System (SLP), Solid Creation System(SCS)

- ЧВРСТИ - екструдирањем топљеног материјала:

Екструдирањем пластике: Fused Deposition Modeling (FDM), Melted Extrusion Manufacturing (MEM), Contour Crafting (CC)

Екструдирањем и глодањем различитих материјала: Shape Deposition Manufacturing (SDM)

- ПРАШКАСТИ - топљењем праха:

Синтеровањем ласером: Selective Laser Sintering (SLS), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Sintering of Ceramics, Direct Metal Fabrication (DMF), Compacted-powder SLS.

2.3. Примена РП технологија

Данашњи аутоматизовани РП системи могу директно израђивати функционалне делове у малим серијама. Овако добијени делови углавном имају слабије карактеристике од делова који су израђени класичним машинским поступцима. Ипак, новији напредни системи могу произвести делове који уз евентуално постпроцесирање које је и крајњи корак ланца РП процеса. У фази постпроцесирања, углавном су потребне мануелне операције, па је и ризик од оштећења делова прилично висок. Стога, оператер у овом кораку има велику одговорност за успешну реализацију процеса. **Error! Reference source not found.** приказује неопходне операције постпроцесирања за важније РП системе.

РП технологије					
Постпроцесирање	SLS	SLA	3DP	FDM	LOM
1. Чишћење	да	да	да	не	да
2. Очвршћавање	не	да	по потреби	не	не
3. Финиширање	да	да	да	да	да

Табела 1. Важне операције постпроцесирања за разне РП процесе [1]

Операција чишћења подразумева уклањање сувишног материјала са готовог дела. Тако, на пример, за SLA делове ово се односи на уклањање заробљене течности из рупа, и уклањање ослонаца. Слично томе, код SLA и 3DP делова уклања се вишак праха. За делове добијене FDM поступком ова се операција изоставља јер нема вишка основног материјала а ослонци се лако уклањају, док код LOM поступка треба уклонити блокове ламината који имају улогу ослонаца.

Као што се може видети из табеле 1, SLA поступак захтева највише операција у постпроцесирању. Чак се и тачност израђених предмета мења у зависности од квалитета ових операција. Може се јавити деформација дела у току чишћења, јер се за то користи разређивач, а ово се посебно јавља код претерано ретких шрафура или јаких разређивача.

Операција очвршћавања је неопходна за SLA поступак, али може бити потребна у одређеним случајевима и за 3Д поступак. Ту се могу јавити деформације делова који имају танке зидове, јер је материјал након вађења предмета из машине још увек влажан, тј. може бити потребно додатно сушење. Уколико се такав предмет у операцији финиширања инфилтрира лепком на бази цијаноакрилата, услед нагле полимеризације лепка у контакту са влагом ослобађа се велика количина топлоте, која може довести до деформисања или пуцања танких зидова.

Сама операција финиширања односи се на секундарне процесе као што су пескарење или бојење, чија је намена пре свега да побољшају естетске и механичке карактеристике делова. Такође, ту спадају и могуће машинске обраде дела као што су бушење, урезивање навоја и глодање.

Иако већина делова добијених РП процесима захтевају постпроцесирање примене су разноврсне, и могу се груписати у три категорије: дизајн; инжењеринг, анализа и планирање; израда алата и производња. Разне гране индустрије као што су аутомобилска, војна, машинска, могу имати директне користи од РП технологија.

2.4. Користи од употребе РП технологија

Данашњи аутоматизовани РП системи могу директно израђивати функционалне делове у малим серијама. Предузећа која употребљавају РП системе имају бројне користи од њих. Једна од најважнијих је могућност да се експериментише са физичким објектима произвољне комплексности уз релативно мали утрошак времена. На пример, у аутомобилској индустрији је у задњих 30 година видан напредак у комплексности облика каросерије. За појединца у предузећу РП системи могу имати различит значај, зависно од улоге у развоју производа. Зависно од обима производње, уштеде у времену и цени могу бити од 50% до 90% уколико се користе РП системи. Тако на пример делови који су произведени SLS методом имају боље карактеристике од класичних делова који су израђени на стандарним CNC машинама. Такође РП технологије се у великој мери примењују и у медицини за израду импланта, па се неки импланти могу одмах користити након РП процеса. Још већу важност има чињеница да се време од тренутка када је готов CAD модел до тренутка када је готов прототип мери сатима

3. 3Д штампа применом ZCorp штампача

Компанија ZCorporation је основана 1994.године у Масачусетсу, САД. На основу патентиране технологије, која је развијена на Институту за технологију, Масачусетс (MIT), ова компанија је развила и комерцијализовала 1997. године свој први 3Д штампач, Z402 sistem. Ова технологија спада у поступке са прашкастим материјалом, а користи принцип везивања честица праха адхезивима.

3.1. Принцип рада

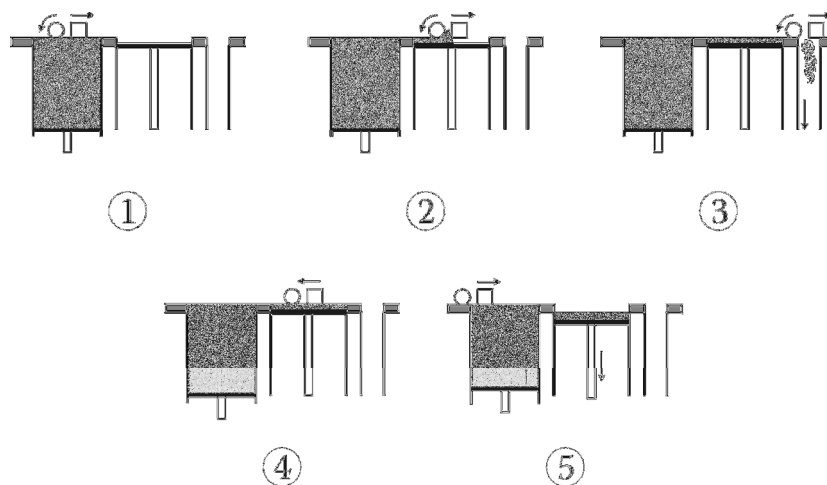
Основни принцип рада је детаљно описан у одељку 3.2. Везивно средство наноси се на прах кроз главу за штампање. Ситне капљице везива се избацују кроз отворе главе термалним инкјет поступком. То поставља одређена ограничења у избору везивних средстава, али сам принцип израде је довољно свестран да се нове примене стално појављују. Са друге стране, аналогно 2Д инкјет штампачима, овакав систем може израђивати и предмете у боји. Наиме, уместо једне главе са везивним средством, могуће је применити четири главе са различито обојеним везивима (по једна за цијаноплаву, љубичасту, жуту и црну), па се, употребом прашкастог материјала беле боје, добија штампа у пуном колору. Ово је јединствена могућност у свету РП техника.

3.2. Поступак штампања

Слика 2. приказује поступак штампања једног слоја. На шематском приказу треба уочити следеће делове: са леве стране је спремиште праха и клип за додавање материјала, ваљак је приказан као круг поред кога је квадратом приказан покретни мост, у средини је радна комора са платформом, а са десне стране је отвор за прихватање вишка материјала. Мост може да се креће у оба смера, а глава се креће дуж моста, тако да је омогућено наношење везива у хоризонталној равни.

У првој операцији покретни мост који носи ваљак и главу за штампање креће се са лева на десно. Ваљак се окреће у смеру приказаном на слици и односи одређену количину праха. Затим тај прах у другом кораку развлачи у танак слој преко претходно израђеног слоја на платформи радне коморе. На крају хода удесно, ваљак односи вишак праха до

отвора који га прихвата и спроводи у спремиште. У следећем кораку, мост се креће са десна на лево, а притом глава штампа актуелни попречни пресек. При доласку моста у крајњи леви положај, клип за додавање материјала се подиже за један корак, док се платформа спушта за дебљину слоја, и све је спремно за поновни циклус.



Слика 2. Поступак 3Д штампе [1]

Прах на који није нането везивно средство служи уједно као ослонац, док је део направљен од праха који је премазан везивним средством. Када је поступак штампања готов, израђени део се налази у невезаном праху док се израђени део не осуши у спремишту. Тек након сушења део је довољно чврст и платформа радне запремине се подиже, и део се вади из сувишног праха. Вишак материјала се усисава и просејава и поново употребљава за следећи модел.

За одређене примене, такав део може се употребити уз краће сушење. За употребе дела у сврхе провере дизајна и функционалности, потребно је постпроцесирање. Оно се своди на инфилтрирање модела цијаноакрилатним лепком, или за издржљивије моделе, епокси лепком, и то само код модела који су израђени од гипса. Код модела који се израђују од пластике као постпроцесирање врше се само шмирглање површине как оби коначан модел имао што лепшу површину. Тако ојачани делови могу се пескарити, бојити или метализирати ради бољег визуелног ефекта. Са одређеном комбинацијом основног материјала и инфилтранта у виду уретана могу се добити и савитљиви делови.

Код 3Д штампача ZCorp и употреби су следећи основни материјали:

- Прах на бази скроба. Продају се под ознакама zp14 i zp15e, уз употребу zb51 моделима, а zp15e користи се у комбинацији са уретанским инфилтрантом за савитљиве делове.
- Прах на бази гипса. Ови материјали имају ознаке zp102 i zp250, и користе се са везивним средством zb56. Користе се за израду презентационих модела и функционалних прототипова и немају скупљање приликом сушења.
- Прах за израду калупа. Јединствена могућност 3ДП технологије је израда калупа и језгара за директно ливење обојених метала. Комбинацијом гипса са ливачким песком добијен је прах са добром температурном постојаношћу. Назив ове патентиране технологије ZCast, а материјала је ZCast 500. Користи се са zb56 везивним средством.
- Прах zp14 користи се за прецизно ливење

Главне предности 3ДП технологије су следеће:

1. Велика брзина. Системи са 3ДП технологијом тренутно су најбрже РП машине. Предмети величине фудбалске лопте могу се изградити за два сата.
2. Свестраност. Тренутно се делови израђени 3ДП машинама користе у аутомобилској, ваздухопловној, космичкој и телекомуникационој индустрији, затим у индустрији обуће, медицине и образовању. Сваки сегмент процеса развоја производа може бити покривен оваквим прототиповима, од ревизије дизајна, до умереног функционалног тестирања. Делови се могу инфилтрирати различитим средствима, што уз широк избор основних материјала даје разне могућности за примену.
3. Једноставност употребе. Ови системи су погодни за употребу у канцеларијама, а једноставност употребе значи да није потребно техничко лице за израду дела. Базирани су на стандардним и лако доступним компонентама инкџет штампача, па су лаки за одржавање и поуздани.

4. Нема отпадног материјала. Неискоришћени прах може се употребити у следећој изради. Само се везивно средство не може поново користити.

5. Пун колор. Могућа је употреба боја за израду делова, што је јединствена карактеристика ове технологије. Бојењем је могуће визуелизовати поља величина унутар предмета, што је врло корисно у методи коначних елемената.

Важни недостатци су следећи:

1. Ограничена функционалност делова. У односу на SLS, делови израђени овим системима знатно су слабији, што ограничава употребу у функционалним испитивањима.

2. Ограничен избор материјала. Како је политика компаније ZCorporation да корисници губе право на гаранцију уколико користе материјале који нису одобрени, избор материјала је ограничен на оне које ова компанија тренутно нуди. Употреба средстава за инфилтрацију не подлеже овом ограничењу.

3. Слаб квалитет површине. Делови израђеним 3Д штампом имају релативно грубу површину, па је често потребан неки вид постпроцесирања.

3.3. Примене делова израђених 3Д штампањем

Примене делова израђених 3Д штампом су бројне, и стално се умножавају. С обзиром на разноврсне могућности постпроцесирања, лако је моделу дати жељени изглед и карактеристике. Неке од примена су:

1. Концепцијски модели. Могу се израђивати модели за ревизију идеја, облика и стила дизајна. Делови се могу бојити, галванизирати, учинити савитљивим, не би ли се боље дочарала представа стварног производа.

2. Функционални модели и прототипови. Ови делови могу поднети ограничена функционална тестирања, а делови ојачани епокси инфилтрантом могу се уградити и експлоатисати у склоповима.

3. Шаблони за ливење. Шаблони се производе од праха на бази скроба, затим се поступком прецизног ливења лије метал по жељи. Такође, могу се израђивати од истог материјала и оригинали за ливење са топљивим моделом.

4. Директно ливење обојених метала. Употребом ZCast технологије и материјала, могућа је израда најкомплекснијих калупа и језгара, у које се директно лију обојени метали. Ово је далеко најбржи начин да се добије ливени метални прототип.

5. Израда калупа за RTV формирање. Материјали који имају особину вулканизације на собној температури (Room Temperature Vulcanization, RTV) се користе за изливање пластичних материјала у силиконским калупима, који се формирају на основу дела израђеног на 3D штампачу. Ово је врло исплатив начин да се добију мање серије прототипова, када је израда калупа за ињекционо ливење скупа и спора. Ако се у силиконске калупе лије полиуретан, карактеристике изливених прототипова су врло блиске правом производу [1].

На слици 3 су приказани разни модели и прототипови. Слика 3а) приказује примену 3Д штампе у пројектовању архитектонских објеката. На слици 3б) је приказан прототип аутоматског одвијача. Колико је свестрана применљивост 3Д штампе јасно описује слика 3ц) где је ова технологија примењена у развоју обуће и уметничким моделима.



а)



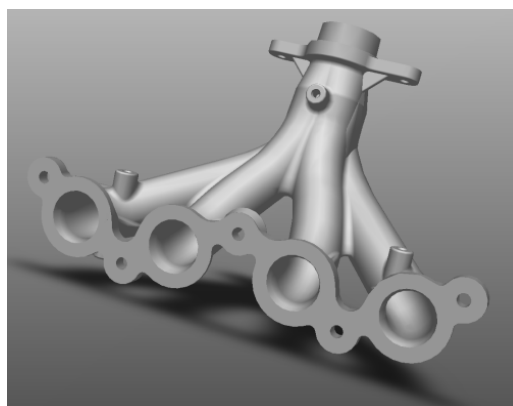
б)



ц)



Слика 3. Примена 3Д штампе у различитим областима [2]



Слика 4. Употреба Zcast технологије за најкраћи пут од модела (лево) до ливених металних делова (десно) – Volkswagen [3]

Индустрија обуће је, такође, пронашла интерес у коришћењу 3ДП технологије, што се може уочити на слици 5.



Слика 5. Примена 3Д штампања у индустрији обуће [4]

Примена у медицини је јако широка. Омогућена је боља визуелизација како тренутног стања, тако и жељених резултата. Приликом сложених хируршких захвата, понекад је немогуће уочити све жељене детаље на снимцима који се добијају другим уређајима. Тада на сцену наступа моћна 3Д технологија, која приказује све што је потребно лекарима. Постоји и примена чак у максилофацијалној хирургији, стоматологији итд. Све ово је везано и са образовањем. Наиме, ти исти модели се могу креирати и у сврхе медицинског образовања (израда модела кости, скелета, органа...)

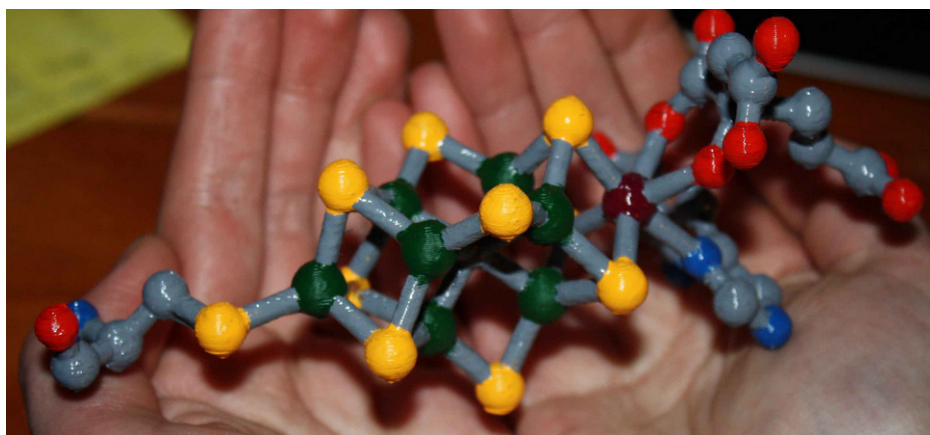


Слика 6. Примена 3ДП у медицини и образовању [5]



Слика 7. *Примена 3ДП у стоматологији [6]*

Молекуларно моделирање је област која се проучава у хемији, биологији, микробиологији. Могућност визуелног представљања атома, молекула, рибозома итд. је отворила врата 3ДП технологији и у овој области.

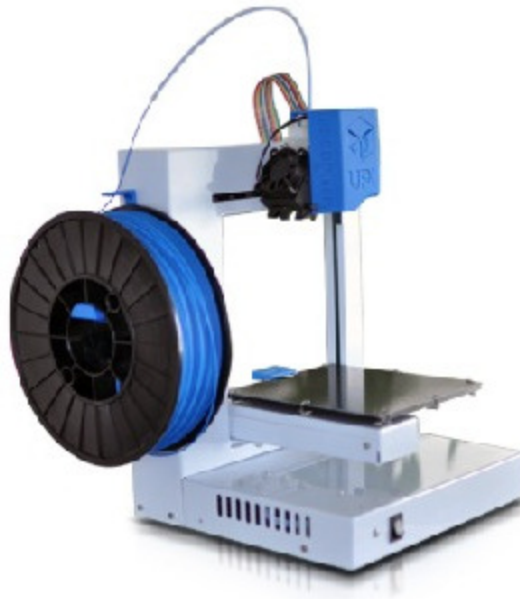


Слика 8. *Примена 3ДП у молекуларном моделирању [7]*

Хемијски сложене структуре се представљају у пуном колору и са детаљном геометријом, коју би јако тешко било на други начин израдити. Такође, овакви модели су и у образовању нашли примену.

Продор на тржиште технологије 3Д штампања је учинила кинеска индустрија производње ових система. Модели који су добијени у почетној фази развоја имају идентичне особине као и они добијени у развијеним земљама. Тако се данас на тржишту могу наћи 3Д штампачи који користе пластику као материјал израде дела, и у потпуности својом функционалношћу и квалитетом израде дела могу да се пореде са истим

штампачима који долазе из развијених земаља. Пример једног таквог штампача је дат на слици 9.



Слика 9. 3Д штампач UP PLUS 2 [8]

3.4. 3Д штампач ZPrinter 310

Компанија ZCorporation, развила је и комерцијализовала 3Д штампач ZPrinter 310 System (слика 10). Овај модел спада у групу штампача мање резолуције као и мањих димензија. Може да израђује два слоја у минути с'тим што дебљина слоја може да се подешава и варира од 0,089mm - 0,203mm. Уграђена је једна глава за штампање.

Карактеристике овог штампача су:

Резолуција: 300 x 450 dpi,

Вертикална брзина штампе: 25 mm/hour,

Максимална величина 3Д модела: 203 x 254 x 203 mm,

Дебљина слоја 3Д модела: 0.089 - 0.203 mm,

Број цетова: 304,

Формати фајлова који могу да се одштампају: STL, VRML, PLY, 3DS, ZPR,

Димензије штампача: 74 x 86 x 109 cm,

Тежина штампача: 115 kg,

Јачине напајања: 90-110V, 5.3A; 100-120V, 4.3A; 200-240V, 2.4A,

Користи следеће основне материјале [1]:

- Прах на бази скроба под ознакама ZP14 и ZP15е у комбинацији са везивним средством ZB51. Прах ZP14 користи се за прецизно ливење и ливење са топлјивим моделима, а ZP15е користи се у комбинацији са уретанским инфилтрантом за савитљиве делове.
- Прах на бази гипса је такође основни материјал који се користи за израду презентационих модела и функционалних прототипова. Основна карактеристика овог материјала је немогућност скупљања приликом сушења. Основне ознаке су ZP102, ZP250 и ZP103, а везивна средства су ZB56 и ZB58.

Јединствена могућност технологије 3Д штампе је израда калупа језгара за директно ливење обојених метала. Комбинацијом гипса са ливачким песком добијен је прах са добром температурном постојаношћу. То је тзв. прах за израду калупа под именом Zcast.

Главне предности 3Д штампања су: велика брзина израде делова, могућност примене у широком дијапазону области науке, технике, медицине итд. Веома је важна и једноставност употребе, затим смањеност отпадног материјала, као и могућност постизања пуног колора.

Недостаци се огледају у ограничењима функционалности делова, ограниченом избору материјала и слабом квалитету површине.

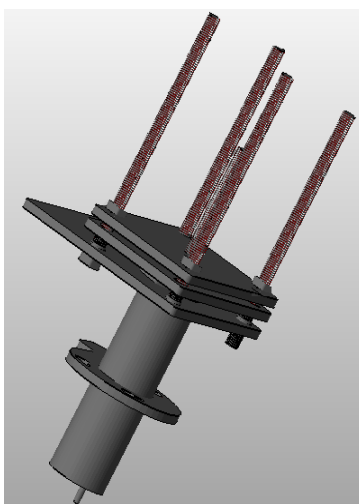
Неке од примена су израда концепцијских модела, функционалних модела и прототипова, шаблона за ливење, калупа за RTV формирање, као и директно ливење обојени метала.



Слика 10. 3Д штампач ZPrinter 310 [9]

3.5. 3Д штампа са глином

На Факултету инжењерских наука у Крагујевцу, извршена је модификација екструзионе главе 3Д штампача *RAP MAN v2* слика 11 [10].



Слика 11. 3Д модел модификоване екструзионе главе

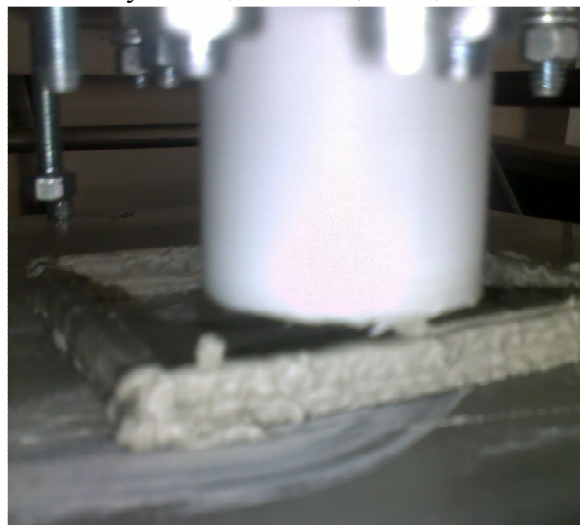
Овом модификацијом је добијена могућност да се штампају делови са новим материјалима који до тада нису били у употреби. Материјал који се током тестирања показао као најбољи, јесте глина која је уз минималну количину воде помешана и постављена у шприц (слика 12).



Слика 12. Депоновање глине у шприц

Овај материјал се показао као врло добар, поготову када је у питању процес штапмања слојева. Материјал се одликовао како својом густином, тако и релативно брзом сједињавању слојева штампе што је довело до квалитетне израде задатог дела. Примери штампања овим материјалом су приказани на слици 13.

Израђени делови могу бити термички процесирани како би се побољшала њихова тврдоћа. Ова модификација екструзионе главе отвара велики простор за експериментисање различитих материјала као што су глина, силикон, гипс, па и чоколада.



Слика 13. Штампање 3Д модела глином

4. Експериментална примена 3Д штампе за израду делова од керамичког праха

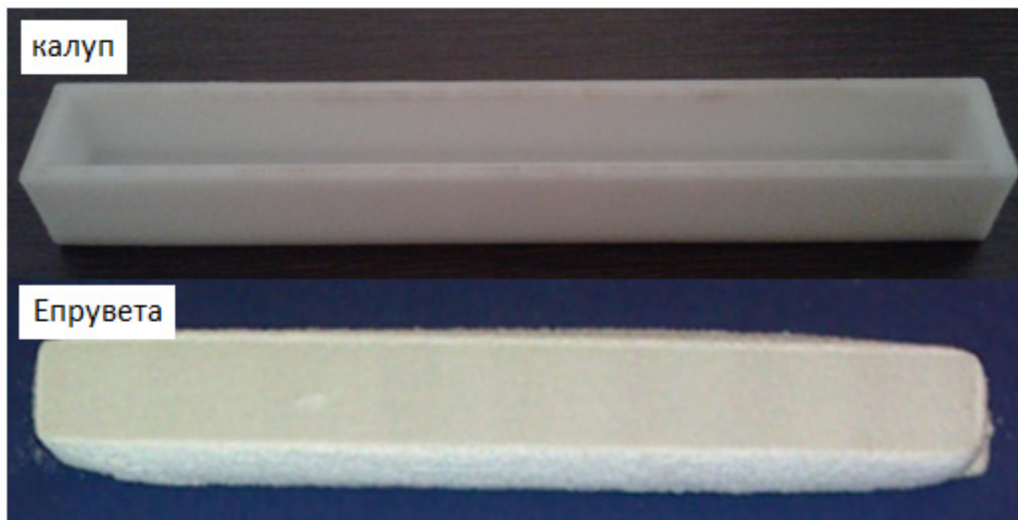
Узимајући у обзир убрзани развој 3Д технологије штампе и њене примене у различитим областима ипак постоји ограниченост у виду примене различитости материјала. Ако сагледамо структуру материјала и сам процес израде делова са правом можемо рећи да постоји још сличних материјала који нису до сада употребљивани у овом процесу штампе. Један од тих материјала је керамички прах који је по структури веома сличан гипсаном праху који се комерцијално примењује. За сада не постоји на тржишту ни један штампач који користи овај материјал као основни у изради делова.

Сагледавањем чињеница које не сумљиво указују на широку примену евентуално израђених делова од ове врсте материјала може се направити велики искорак у овој области. Делови који би били направљени методом штампања би имали велику прецизност и много већу тврдоћу што би нам омогућило и већи спектар различитости делова. Неки од њих би били лако применљиви у уметности, школству, индустрији али и у медицини. Управо у медицини се може оставрити велики искорак у изради директних импланта. До садашње методе у изради импатата су ишле у смеру да је потребно изградити калуп од гипсаног праха на основу кога би се изradio готов импant од керамике или од медицинског цемента. Овај поступак би значајно био смањен ако би се импланти директно израђивали 3Д штампањем. Такође треба имати у виду и примену керамичких импланта у стоматологији.

Да би један овакав материјал могао да се несметано користи уместо комеријалног материјала потребно је пре самог штампања направити тестове методама које су веома сличне методи 3Д штамања. Керамички прах је материјал који је широко распрострањен и може се наћи у слободној продаји у специјализованим радњама.

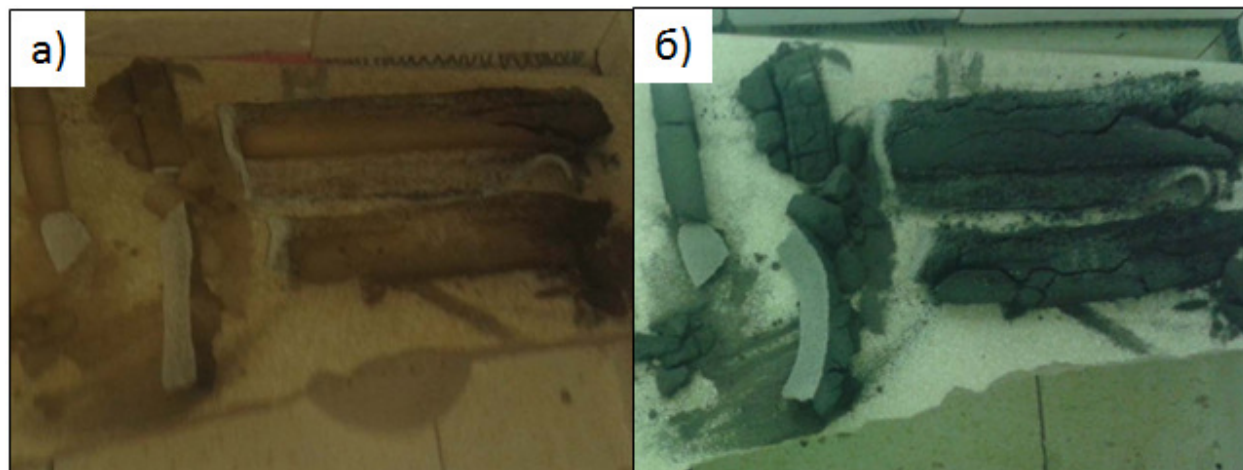
Пробни тест примене керамичког праха у 3Д штампи је вођен у смеру поштовања методе рада 3Д штампача. Тако је узет керамички прах који је помешан са шећером а као везивно средство је коришћена мешавина алкохола и дестиловане воде, што у потпуности прати комерцијални начин израде делова (прах се везује слојем везива који се наноси на њега).

Тако је направљен тест у коме је коришћен калуп димензија 10mm x10 mm x100mm и 10mm x10 mm, у који ће бити слојевито наношен керамички прах, слој везивног средства, слој праха као што је и приказано на слици 14. направљено је укупно 7 узорака.



Слика 14. Епрувета добијена из калупа

Узимајући у обзир да се керамички делови пеку у посебним пећима и на великим температурама епрувете са слике 14. су термички процесирани по процедурама које сам успео да пронађем на интернету и на основу дугогодишњих искустава људи који се баве овом тематиком. На слици 15. су приказане епрувете које су термички процесирани, резултат овог теста ми је показао да су епрувете јако мале тврдоће и да их је скоро немогуће држати у руци. Такође током овог теста је примећено да је велика концентрација шећера у смеси материјала, што за последицу има промену боје епрувете од тамно браон до сиве на крају.



Слика 15. Епрувете током температурног процеса а) 250°C б) 1000°C

На основу овог теста може се закљутити да је потребно направити правилну сразмеру керамичког праха и шећера. Веома је важно напоменути да се током печења епрувета појавио јако густ дим на температури 100 – 200 °C, што је резултат присутности шећера чија је температура топљења 186 °C. Због ове појаве обавезно је вршити поступак печења у простору који има адекватну вентилацију.

4.1. Керамика

Керамика је назив за групу производа из глинених сировина. Основне сировине за керамику су каолин (бела и мекана врста земље), иловаче и глине који су пластички састојци док су као непластички састојци- кремен, кречњак, шамот и други материјали. Према хемијском саставу и топлоти керамичарски материјали се деле на опекарске, грнчарске, порозне, камените и порцеланске [11].

Назив керамика потиче од речи *керамикос*, *керемеус* и *керамос* (грчки: *κεραμικός*) који је био општи назив за производе од глине и иловаче који се пластично стварају, суше и пеку у посебним пећима.

Постоји велики број метеријала према употреби и сврхама. По изгледу и употреби сва керамика се дели на грубу керамику (за индустријску употребу и употребу у грађевинарству, као цреп, опеке, покривне плоче, подови изолатори итд.) и фини керамику (за електро материјале, материјале који се користе у здравству, грнчарске производе и производе за свакодневну употребу, украсни предмети и сл).

Керамички материјали су сложена хемијска једињења која садрже метале и неорганске елементе. *Керамички материјали* имају разноврсна механичка и физичка својстава. Граница између метала и керамике се најлакше дефинише помоћу температурног коефицијента електричне отпорности. Код *керамичког материјала* овај коефицијент има негативан предзнак док за метале има позитиван предзнак. Примена керамике варира од керамичких плочица, грнчарске робе, опеке, одводних цеви, посуђа, ватросталних материјала, магнета, електричних уређаја, влакана до абразивних материјала. Керамички материјали настају под утицајем високе топлоте (печењем, топљењем).

Данас познајемо следеће врсте керамике:

- Теракота, је керамика од печене и неглазиране глине од које се израђују водоводне цеви, кровни покривачи и друго и има црвену боју.
- Фајанс, је „полупорцелан“, од fine глине које се пече при нижим температурама у пећи и има непровидну белу глазуру која је погодна за осликавање а име је добио по граду Фаенце који се налази у Италији и својим пореклом је из Оријента одакле је дошла преко Шпаније.
- Мајолика, је полупорцелан од fine глине и овај назив носи јер се ширила преко Шпаније и Мајорке и у 15. веку настали су радње око града Фаенце, Урбина и Венеције и одатле се шири у Европу. Керамика бива традиционално подељена на:

- Грубу керамику, у коју спадају опекарски производи и
- Фину керамику, на коју се односе други керамичарски производи.

Карактеристичне особине керамичких материјала су:

Ниска електричка проводност и топлотна проводљивост висока физичка чврстоћа, али и кртост. Изврсна отпорност на високе температуре и корозије.

4.2. Керамички прах за 3Д штампу

Бројне комбинације прашка и везивног материјала се комбинују и формулишу како би се употребили у 3ДП процесима, класични материјали који се користе укључују метал у праху, пластику, керамику, где везивни материјал најчешће садржи неку врсту адхезива. Керамички прах који ћемо користити за штампање мора бити прецизно припремљен по следећем рецепту [12]:

- 1kg керамичког праха
- 167g шећера у праху
- 167g малтодетскрозе

Припрема материјала:

У 1kg керамичког праха додати 167g шећера у праху и 167g малтодекстрозе. Да би смо сјединили ову масу неопходно је 3-4 пута просејати целу смесу, након просејавања масу оставити на 30мин у машини за мешање, тек након добро сједињене смесе материјал је спреман за употребу.

Као везивно средство материјала користићемо мешавину алкохола – водке и дестиловане воде у односу 2:1.

По тежини, прашак се састоји од процентуално 66% керамичког праха, 16.7% малтодекстрина, и 16.7% шећера.



Слика 16. Материјали за припрему праха:

а) керамички прах б) малтодекстроза ц) шећер у праху

4.3. Везивно средство

Као везивно средство користићемо мешавину алкохола и дестиловане воде која се сипа до нивоа грла посуде [13].



Слика 17. Везивно средство: а) водка б) дестилована вода

Додавањем адхезивног средства тачку по тачку на нови слој праха остварује се повезивање честица унутар једног слоја, а наношењем следећег слоја праха и везива омогућава се међусобно повезивање слојева. Начин наношења везивног средства на прах

је контролисан и остварује се термалним инкџет поступком. Потом се проверава боца за течни отпад и по потреби се уклања и празни ради регулације локалног одлагања отпада.



Слика 18. Припрема везивног средства

4.4. Припрема 3Д штампача за рад

Прво треба извршити припрему штампача за рад. То првенствено представља припрему хардвера, док ће се софтверска подешавања касније извршити. Целокупни процес се одвија у више различитих корака.

Пре сипања прашкастог материјала у леву преграду неопходно је извршити спуштање платформе. Само спуштање се врши притиском на одговарајући тастер “feed” на штампачу. Уколико притисак на овај тастер траје неколико секунди добија се светлосна сигнализација у виду треперења која нам говори да ће се платформа сама аутоматски спустити до краја. Процес аутоматског спуштања платформе можемо поновним зауставити притиском на тастер “feed”.

Следећи корак у припреми штампача за рад је сипање прашкастог материјала у леву преграду. Количина праха која је потребна у процесу штампања обично је већа од оне која је потребна за израду модела. Разлог за то је чињеница да се прахом при изради попуњава цела запремина новог слоја, а вишак материјала се пресипа у спремиште.

После пуњења спремишта прахом врши се његово равномерно распоређивање. Веома је важно направити хомогену структуру, јер се у супротном јављају неравнине и нежељене грешке на крајњем моделу. Употребом кашике за сипање праха ослобађа се ваздух који је заробљен у спремишту.

Затим следи равнање површине спремишта притискивањем. Овај процес је неопходно извршити због каснијег уједначавања леве и десне преграде штампача. Због осетљивости уређаја не употребљава се притисак већи од 5 kg.

По завршетку припреме спремишта притиском на тастер “feed” вршимо подизање леве платформе и довођење у ниво десне.



Слика 19. Постављање керамичког праха у штампач

Да би се штампач повезао са управљачким рачунаром потребно је притиснути тастер “Online”. Уколико постоји грешка систем даје светлосну сигнализацију лампицом црвене боје о немогућности наставка процеса. После отклањања грешке, глава штампача и ваљак се постављају у позицију за равнање прашкастог материјала.

Аутоматски процес равнања врши се у 13 пролаза. Да би се започело са аутоматским равнањем неопходно је тастер "Spread" држати притиснут неколико секунди. Током овог процеса ваљак са леве платформе набацује танки слој прашкастог материјала на десну платформу. Ово се извршава тако што се лево спремиште подиже, а десно спушта за одређену висину. Понекад је непотребно извршити свих 13 пролаза, али је препоручљиво због постизања идеално равне површине од које се почиње штампање.



Слика 20. Изглед платформе након пуњења материјалом

Због одржавања самог уређаја и чистоће радне атмосфере, уписава се вишак прашкастог материјала који се налази углавном око леве и десне платформе.

Пре процеса штампања потребно је извршити чишћење и исушивање делова који се налазе на сервисном склопу штампача. Да би се могло оперисати са овим деловима штампача, претходно треба омогућити прилаз до њих. Прво се притисне тастер Online на штампачу. Затим у програму Zprint Software треба кликнути на опцију 310Service, а потом изабрати Unpark. У том тренутку носач главе се помера улево, па је омогућен приступ сервисном склопу. На месту за паркирање главе и по исушивачу сипа се дестилована вода. Уз помоћ папирног убруса потребно је очистити брисач исушивача као и место за паркирање главе на сервисном склопу.

У оквиру редовног одржавања уређаја предвиђено је подмазивање додирних површина. ZPrint софтвер ће обавестити корисника уколико је време за сервис. Прво се спусте лева и десна платформа до краја. Затим је неопходно извадити посуду у којој се скупља вишак материјала иза које се налазе завојна вретена на која се наноси средство за подмазивање. Онда се иста пребришу сувим папирним убрусом.

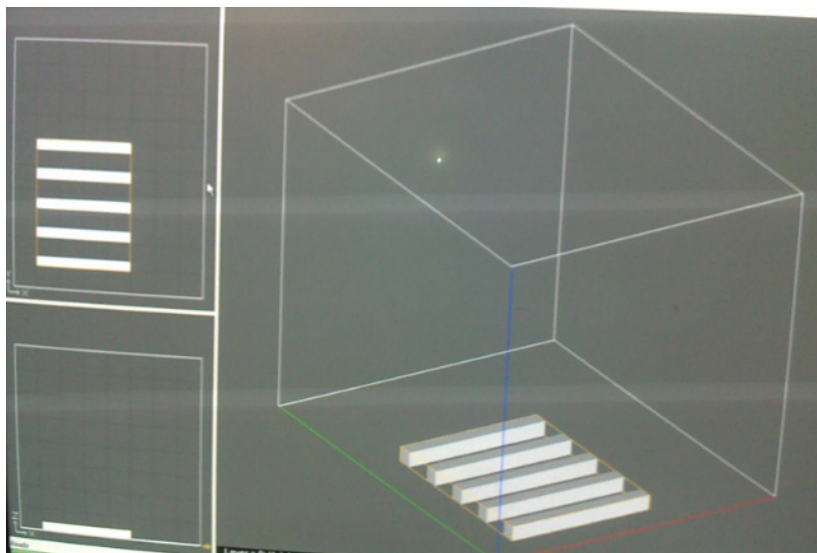
Уколико добијамо информацију о грешци у комуникацији са главом за штампање, онда је потребно очистити њене контакте. Ако и после чишћења нема комуникације, тј. експлоатациони параметри главе имају вредност нула онда је она дотрајала и врши се замена. Подиже се поклопац штампача, а затим се у софтверу изабере опција Service па

Changing Print Head... и онда се може прићи дотрајалој глави која се вади и замењује новом.

Пре почетка рада ново постављена глава за штампање садржи извесну количину мастила коју је неопходно odstranити. Одабиром опције 310Service, а потом Purge Print Head у софтверу почиње пражњење главе и избацивање мастила у боцу за течни отпад. Зависно од главе која је стављена као замена, овај поступак може бити поновљен и више пута, не би ли се потпуно изгубила боја мастила у везиву. Боцу је на крају процеса неопходно поново испразнити.

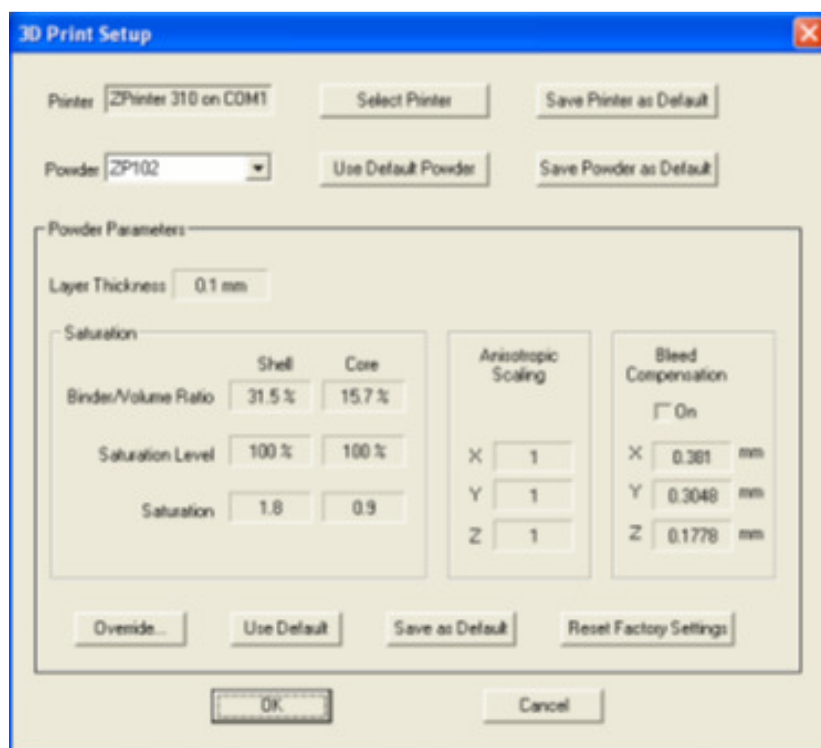
4.5. Процес штампања

Тек када је целокупна процедура извршена можемо приступити процесу штампања. Након покретања апликације Zprint Software, неопходно је увести 3Д модел који се штампа у нашем случају су то епрувете димензија 10x10x100mm.



Слика 21. 3Д модел епрувете

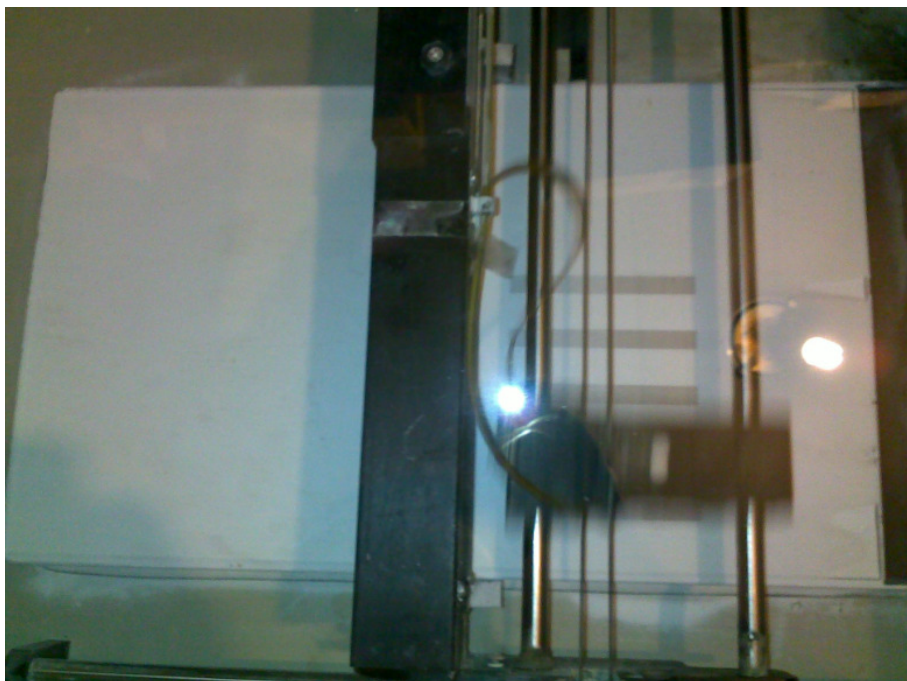
Потом се врши провера опције 3D Print Setup (слика 22). Да би смо потврдили комуникацију између софтвера и штампача потребно је да изаберемо опцију „Select Printer“, након чега вршимо одабир серијског или мрежног штампача, зависно од тога како је рачунар повезан са штампачом.



Слика 22. Опција 3Dprint Setup

Пре сваког штампања кориснику је омогућено да види одређене информације о времену које је потребно за штампу, запремини материјала који ће бити искоришћен.

Након свих ових информација треба проверити последње три ставке које нам софтвер сигнализира и након тога можемо почети са штампањем задатог модела.



Слика 23. Штампаче слоја



Слика 24. Изглед одштампаних епрувета у остатку слободног праха

Након завршеног штампања потребно је оставити делове у спремишту 24 часа како би се добијени делови осушили на собној температури. Када делови добију белу боју знаћемо да је материјал прошао прву фазу сушења, и можемо приступити вађењу епрувета из спремишта како је и приказано на слици 25.



Слика 25. Вађење епрувета из спремишта

Након уклањања из спремишта неопходно је оставити епрувете на собној температури још додатних 24 часа, у овом процесу сушења постижемо сушење и оних делова који нису могли да се осуше у спремишту (доњи делови епрувете, крајеви бочних страница епрувете).

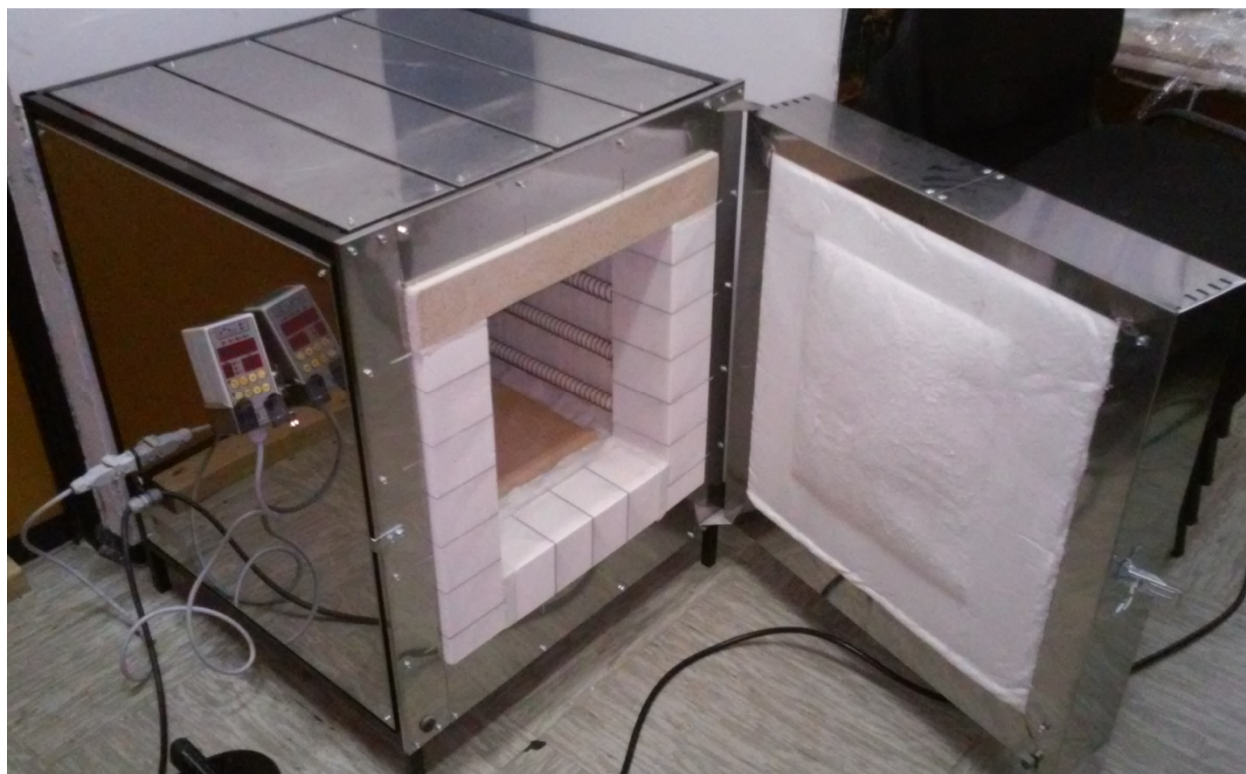


Слика 26. Сушење епрувете на собној температури

4.6. Поступак печења керамике

Након што су се епрувете осушиле на собној температури, можемо их термички третирати у пећницама које су предвиђене за печење керамике. На Факултету инжењерских наука у употреби је пећница ПИКА 300 чије су карактеристике:

ТИП	Унутрашње димензије (cm) š x d x v	Спољашње димензије (cm) š x d x v	Максимална температура °C	kW	VOLT
PIKA 85 L	45 x 46 x 42	69 + 10 x 85 x 85	1050	3,5	220



Слика 27. Пећница ПИКА 300

Овај модел пећнице има могућност програмирања температурног циклуса, што је јако важно нарочито када се зна да печење керамике захтева одређено задржавање на температурама. Контролер за програмирање је приказан на слици 28.



Слика 28. Контролер за програмирање пећнице

Програмирање термичког процеса се врши тако што се контролер укључи притиском на тастер START / STOP. Ако је све у реду на екрану контролера ће се приказати тренутна температура пећнице слика 29.



Слика 29. Правилно стратовање конторлера

Програмирање жељеног тепературног циклуса се врши тако што се задржи тастер Change program а затим се притисне тастер  да би се повећала вредност од тренутно приказане температуре на екрану. Такође почетна температура се може смањити притиском на тастер . Након подешене темепратуре аутоматски се прелази у мод задавања времена стагнације температуре. Када је овај мод активан притиском на један од ова два тастера може се смањити или повећати време нски период застоја температурног

циклуса. Након тога притиском на тастер Enter потврђује се задати унос и понавља се иста процедура како би цео термички процес био испрограмиран.

Да би печење керамике било успешно, неопходно је водити рачуна о температури на којој се епрувете пеку. У овом случају због коришћења 2 врсте материјала у основи (керамички прах и шећер) додатно треба истражити својства ова два материјала. Добро је познато да је тачка топљења шећера 186 °C, овај податак је веома важан зато што ће утицати на температурни циклус печења епрувета. Третман печења је приказан на дијаграму 1.



Дијаграм 1. Циклус печења епрувета у зависности од времена печења

Након постављања епрувета у пећницу неопходно је подесити температуре печења и периоде задржавања на одређеним температурама.

ЦИКЛУС ПЕЧЕЊА

Епрувете се задржавају на температури од 100°C 10 минута у овом интервалу сав алкохол и вода испаравају. Затим се температура повећава на 200°C са задржавањем од 2-3 минута, овај период задржавања је јако битан јер у њему шећер у праху и малтодекстроза испаравају због своје тачке кључања. Важно је напоменути да у овом температурном

циклусу долази до запаљења шећера и да долази до појаве густог дима па самим тим треба бити додатно обазрив. Да би материјал одржао своју конзистентност потребно је направити додатно задржавање у интервалу од 20 минута на температури 450°C . Ово задржавање је јако битно и не сме се прескочити, у противном резултат печења би био неповљан и израђени део би се претворио у прах. Даљи температурни ток је подизање температуре на 900°C и овде постоји задржавање од 10 минута, из истог разлога као и у претходном случају. Након тога температура се подиже на 1000°C и након достизања ове температуре епрувете се остављају у пећници до потпуног природног хлађења.

На слици 30 су приказане термички обрађене епрувете.



Слика 30. Епрувете после циклуса печења

4.7. Могућност коришћења других материјала у праху

Бројне комбинације прашка и везивног материјала се комбинују и формулишу да би се употребили у 3ДП процесима. Класични материјали који се користе укључују метал у праху, пластику, керамику, где везивни материјал најчешће садржи неку врсту адхезива. Сва истраживања се крећу у смеру да се произведе нова супстанца прашак / везивни материјал са циљем да се побољша и повећа примена 3Д штампе ван индустрије и академских оквира. Највише информација о коришћењу 3Д штампе се може наћи у литератури *Mark Ganter* -а.

Гантер и његови сарадници су креирали потребну формулу прашка и везивног материјала да направе глину која се пече на ниској температури (енг. *Terra cotta*) која се може купити за приступачну своту новца. Прашак се састоји од глине, малтодекстрина (додатак са влакнима која се могу наћи у продавници), и шећера у праху. Један од предмета који је одштампан са овим материјалом је приказан на слици 31.



Слика 31. Предмет израђен од глине поступком 3Д штампе [14]

Везивни материјал се састоји из (дестиловане воде, боје која се такође користи у прехрани, и алкохола) који делује као везивач да би задржао вискозност и напоне у материјалу. За разлику од коришћења адхезива у основном материјалу, најбољи избор за овај процес је супстанца малтодекстрин и шећер у праху који се налазе у самом праху који се користи за штампање. Користећи прашак као везивну материју има својих предности а главне су :

- Упрошћавање проблема структуре
- Повећање поузданости

Штампање оваквим материјалима као што је глина релативно је јефтино и лако за одржавање, можемо и да повећамо радни век главе штампача, што је последица мање вискозности и напона на површини.

Оваква решења имају за циљ да поједноставе задатак планирања и креирања целог система штампе. Са применом оваквих материјала у могућности смо да редукујемо трошкове око регуларног одржавања и сервисирања штампача. Повећавањем радног века главе штампача, а самим тим и трошкова материјала (и везивног материјала и прашка), добијамо повољну 3Д штампу.

5. Димензионо и механичко испитивање узорака израђених 3Д штампом

5.1. Димензиона анализа

Након печења јасно је уочљива димензиона промена на свим епруветама, да би смо прецизније анализирали ову промену извршена је димензиона контрола методом скенирања површине, како и мерење дужине, висине и ширине саме епрувете.

Димензиона контрола методом скенирања површине и мерењем дужина помичним кљунастим мерилом.



	дужина [l]	ширина [b]	висина [H]
номинална	100 mm	10 mm	10 mm
остварена	98 mm	8.8 mm	9.2 mm
Δ	2 mm	2.2 mm	0.8 mm

Основне димензије нам указују да је дошло до смањења дужине и ширине саме епрувете од 2% у односу на номиналну вредност, док је висина епрувете смањена за 0.8%.

Скенирање добијеног модела епрувете је вршено уз помоћ уређаја за скенирање површина *ATOS Compact Scan 3D scanner*.

ATOS Compact Scan 3D scanner је мобилни оптички мерни уређај који је заснован на принципу триангулације. Ради тако што на објекат који меримо пројектује узорке паралелних линија и снима их помоћу две камере. За сваки појединачни пиксел у камерама са високом прецизношћу одређују се тродимензионалне координате и припадајуће тачке са снимање површине. Тиме се ствара полигоналана мрежа која детаљно описује форму дигитализованог објекта. Захваљујући јединственој конструкцији са две камере, висококвалитетни скенови површине објекта могу се допунити тактилно измереним тачкама. ATOS-ова мерна сонда својим могућностима, поузданошћу и лакоћом коришћења далеко премашује мобилне трокординатне уређаје (мерне руке).

Мерни систем ATOS (слика 32.) помоћу тродимензионалне дигитализације одређујуна објектима свих величина и сложености следеће вредности:



Слика 32. *ATOS Compact Scan 3D scanner* [15]

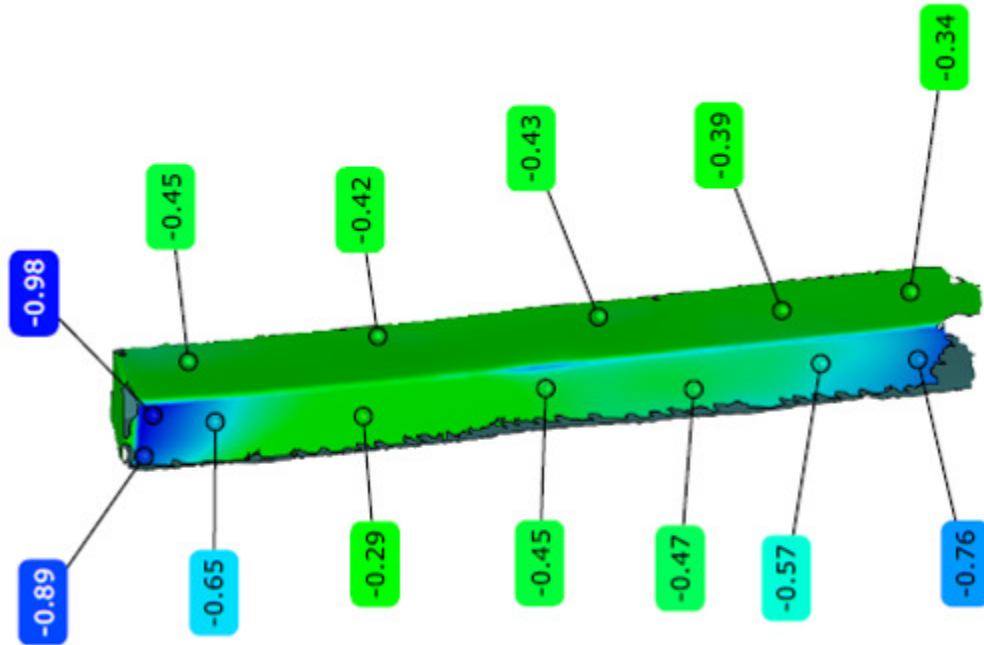
- Високопрецизне 3D координате
- Одступања копмплетне површине од CAD модела
- Анализе дуж пресека или ивица
- Укупни мерни извештај

Изузетне перформансе, висока резолуција детаља и широк распон мерних подручја омогућују ефикасно и прецизно прикупљање и приказивање података за:

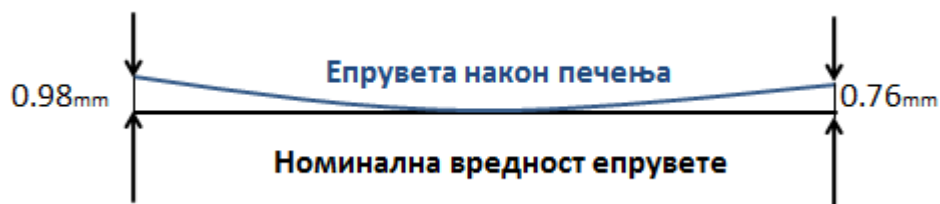
- Контролу квалитета
- Реверзни инжењеринг
- Брзу израду прототипова

- Брзо глодање и брзу израду алата
- Дигитално моделовање и монтажу

Јасно можемо уочити да је долази до благог савијања на крајевима епрувете и то 0.98mm са леве и 0.76mm са десне стране епрувете. Све вредности које су приказане на слици 33 су изражене у mm и представљају одступање реалног дела (епрувете) у односу на задати 3Д модел. Ознака " – " означава недостатак материјала у односу на номинални 3Д модел.



Слика 33. Анализа површине епрувете



Слика 34. Приказ деформације епрувете на основу методе скенирања површине

Овакви резултати су потпуно очекивани, разлог ове благе деформације је поступак испаравања везивног средства током процедуре печења, као и утицај испаравања шећера у временском интервалу од 2-3 минута на температури од 200°C.

5.2. Испитивање тврдоће узорака

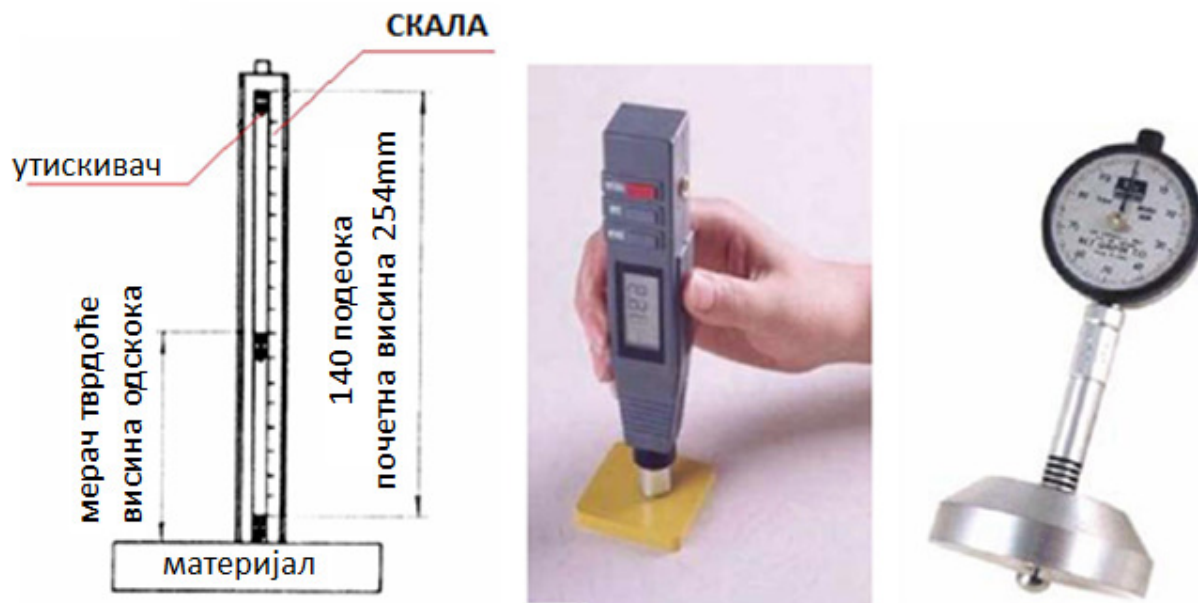
Током испитивања тврдоће добијених епрувета најрелевантнији резултати су добијени склероскопском методом, осталим методама није било могуће испитати тврдоћу јер је њихов опсег мерења опсег знатно већи од тврдоће коју има добијена епрувета.

5.2.1. Склероскопска метода

Принцип мерења тврдоће, по овој методи, заснован је на еластичном одскоку и на визуелном мерењу висине његовог првог одскока. Висина одскока зависна је од врсте материјала, његове тврдоће, модула еластичности, стања површине, масе предмета, као и апарата за мерење.

Уређај за испитивање по склероскопској методи

По својој конструкцији уређај је веома једноставан. Уређај се састоји из једне стаклене цеви дужине 245 мм, подељене на 130 подеока, у којој се налази покретни утискивач масе 2.5 g са дијамантским купастим врхом. При мерењу тврдоће утискивач се пушта да слободно пада кроз стаклену цев на површину предмета чија се тврдоћа мери. Висина првог одскока утискивача у подеоцима скале је мера одскочне тврдоће.



Слика 35. Уређаји за испитивање тврдоће – принципијелна схема и примери [16]

Услови испитивања

Препоруке које су примемењене везано за поступак мерења су:

- На истом месту узорка изведено је само једно мерење;
- Вредност тврдоће узорка је узета је као средња вредност 10 мерења на различитим местима на узорку, при собној температури

Процедура мерења

- Уређај за мерење – Шоров склероскоп, чврсто се поставља на површину узорка или радног предмета, при чему се контрола управности проверава либелом;
- Подиже се утискивач у највиши положај;
- Ослобађа се утискивач да слободно пада (притиском на дугме);
- Пажљиво се прати одскок утискивача и региструје висина одскока;
- На основу средње вредности еластичног одскока утискивача може се тврдоћа по Шору прерачунати у тврдоћу по Викерсу.

5.3. Резултати мерења тврдоће

Резултат који је добијен на основу 10 мерења склероскопском методом износи 20 HS, што на MOHS скали износи 2.5.

Мосова скала тврдоће је скала од 10 степени којом се одређује релативна тврдоћа минерала. Измислио ју је немачки минералог Фридрих Мос 1812. године. Тврдоћа појединачних минерала у овој скали није сложена пропорцијално. Ова скала је једна од оријентационих скала, а класификација се заснива на томе да ако испитивани минерал може да огребе површину узорка, биће класификован његовом тврдоћом. У овој скали минерали су поређани од најмекшег до најтврђега.

тврдоћа	минерал	хемијска формула
1	талк	$(\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$
2	гипс	$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$
3	калцит	(CaCO_3)
4	флуорит	(CaF_2)
5	апатит	$(\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F}))$
6	ортоклас, (фелдспат)	$(\text{KAlSi}_3\text{O}_8)$
7	кварц	(SiO_2)
8	топаз	$(\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})_2)$
9	корунд	(Al_2O_3)
10	дијамант	(C)

Слика 36. *MOHS*–ова скала [17]

На основу добијених резултата јасно можемо уочити да епрувета по тврдоћи припада класи гипсаних материјала.

6. Закључак

На основу овог рада може се извести закључак да је апсолутно могуће применити и нестандарни материјал (керамички прах) у 3Д штампању. Резултати након примене овог материјала указују да уз одговарајућу правилу припрему можемо добити узорак који је по својој тврдоћи много бољи од комерцијалних материјала који се користе за штампање. Такође важно је напоменути да је израда делова од овог материјала знатно јефтинија од дела израђеног од материјала на бази гипса. Широка доступност керамичког праха, и самог везивног средства је веома важна предност у односу на комерцијалне материјале.

Отвара се могућност даљег истраживања у примени овог начина штампе у медицини, за израду импланта, огледних средстава (вилице, зуба, пршљенова...)

Примена у савременој уметности може имати нови значај јер многи уметнички радови могу бити израђени на овај начин (статуете, модели, калупи...)

Ово је само један од материјала које је могуће применити у 3Д штампи. Даљи развој би могао бити усмерен ка имплементирању још једног додатног материјала како би се у процедури печења добила порозна структура, на основу које би се могли израђивати и подлоге за развој матичних ћелија. Такође, глина у праху је један од занимљивих материјала које би требало применити у 3Д штампи.

Литература

- [1] др. Ненад Грујовић (2004), *Брза израда прототипова*, Крагујевац
- [2] http://hotos.pcpro.co.uk/blogswp-content/uploads/2013/01/DSC_0001, приступљено 26 Октобра 2014.
- [3] <http://thegrid.soup.io/tag/Printing?since=262968363> приступљено 13 Октобра 2014.
- [4] <http://www.about3dprinters.com/how-3d-printing-is-changing-the-world.html> приступљено 26 Октобра 2014.
- [5] <http://3dprint.com/wp-content/uploads/2014/05/fda-feat> приступљено 15 Октобра 2014.
- [6] <http://www.3ders.org/articles/20130515-pp3dp-releases-up-plus-2-3d-printer.html> приступљено 10 Октобра 2014.
- [7] <http://barneybioproductslab.cfans.umn.edu/3d-printing-and-molecular-models/> приступљено 26 Октобра 2014.
- [8] <http://www.ceramic-substrates.co.uk/about-ceramics> приступљено 12 Октобра 2014.
- [9] http://www.ems-usa.com/Used_3D_printer_3D_scanner.html приступљено 26 Октобра 2014.
- [10] Владимир Кањевац (2011), *завршни рад Развој био – екструдера за примену адитивне производње у инжењерингу ткива*, Крагујевац
- [11] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ceramic> приступљено 12 Октобра 2014.
- [12] Grant Marchelli, Mark Ganter and Duane Storti, “*New material systems for 3D ceramic printing*”, 2009
- [13] <http://www.washington.edu/news/2009/03/31/3-d-printing-hits-rock-bottom-prices-with-homemade-ceramics-mix/> приступљено 26 Октобра 2014.
- [14] <http://ceramicartsdaily.org/ceramic-supplies/pottery-clay/the-printed-pot/> приступљено 26 Октобра 2014.
- [15] <http://www.scanare3d.com/index.php/en/3d-metrology/three-dimensional-measurements/3d-scanner> приступљено 26 Октобра 2014.
- [16] <http://www.pce-grupa.ba/ispitivanje-materijala/tvrdoca-materijala.html> приступљено 26 Октобра 2014.
- [17] http://www.thisoldearth.net/Mineral_Prop.cfm приступљено 27 Октобра 2014.