

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Виртуелни инжењеринг

Број индекса: 402/2018

Марко Н. Поповић

**Примена техника и система за адитивну
производњу у брзој изради прототипова
алата**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Проф. др Весна Мандић – ментор**

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Резиме

У овом мастер раду су описани принципи и технике адитивне производње. Детаљно су описане фазе адитивне производње, као и најзаступљеније методе ове технологије, са посебним фокусом на *FDM* технологију. Укратко су описане области примене, а поред тога и најважније предности ове технологије. Затим су представљени принципи 3D дигитализације, основни кораци у добијању дигиталног модела физичког објекта, специфичности и ограничења. Посебно је описана метода 3D скенирања на бази беле структурисане светлости за добијање облака тачака скенираног дела. Поред тога, представљен је поступак двокомпонентног ливења пластике, са најважнијим предностима, ограничењима и областима примене. У другом, односно практичном делу мастер рада, претходно наведене технологије адитивне производње и 3D дигитализације су искоришћене за брзу израду алата за поступак двокомпонентног ливења пластичног дела.

Кључне речи: *FDM, брза израда алата, 3D дигитализација, реверзни инжењеринг, двокомпонентно ливење пластике*

Abstract

This master thesis describes the principles and techniques of additive manufacturing. The stages of additive manufacturing are described in detail, as well as the most common methods of this technology, with a special focus on *FDM* technology. The areas of application are briefly described, as well as the most important advantages of this technology. Then, the principles of 3D digitalization, basic steps in obtaining a digital model of a physical object, specifics and limitations are presented. In particular, a method of 3D scanning based on white structured light for obtaining point clouds of the scanned part is presented. In addition, a two-component plastic casting process is presented, with the most important advantages, limitations and areas of application. In the second, i.e. practical part of the master's thesis, the previously mentioned technologies of additive manufacturing and 3D digitization were used for rapid tooling for the process of two-component casting of plastic part.

Key words: *FDM, Rapid Tooling, 3D digitalization, Reverse Engineering, copolymer casting of plastics*

Садржај

1. Увод	1
2. Принципи и технике адитивне производње	3
2.1 Принцип адитивне производње	4
2.2 Фазе адитивне производње.....	6
2.3 Технике адитивне производње.....	8
2.3.1 Стереолитографија – SLA	9
2.3.2 Депоновање топљеног материјала – FDM	10
2.3.3 Селективно ласерско синтеровање – SLS	14
2.3.4 3D штампа – 3DP	15
2.3.5 PolyJet – PJ	16
2.4 Примена адитивне производње.....	20
2.4.1 Нивои коришћења AM.....	20
2.5 Предности адитивне производње	25
3. Принципи и технике оптичког 3D скенирања.....	27
3.1 Принцип и фазе реверзног инжењеринга	28
3.2 Технике и уређаји.....	33
3.2.1 Координатне мерне машине – CMM	34
3.2.2 Компјутеризована томографија – CT	35
3.2.3 3D Скенери.....	36
4. Брза израда делова од пластике двокомпонентним ливењем	44
4.1 Примена двокомпонентног ливења	46
4.2 Предности двокомпонентног ливења.....	46
4.3 Недостаци и ограничења двокомпонентног ливења.....	47
4.4 Поступак двокомпонентног ливења потпомогнут адитивном производњом	48
5. Конструкција алата за двокомпонентно ливење пластике.....	50
5.1 Дигитализација изабраних објеката	51
5.1.1 Припрема објеката за скенирање	51
5.1.2 Поступак дигитализације окидача-1 на 3D скенеру <i>David SLS-2</i>	52
5.1.3 Поступак дигитализације окидача-2 на 3D скенеру <i>ATOS II</i>	57
5.2 Корекција добијених дигиталних модела	58
5.2.1 Израда површинског модела	59
5.2.2 Израда 3D CAD модела	61
5.3 Брза израда прототипова за проверу тачности геометрије	62
5.4 Визуелна провера добијених мастер модела	66
5.4 Поређење CAD модела са резултатима 3D скенирања.....	67

5.5 Израда 3D CAD модела алата за двокомпонентно ливење	70
6. Адитивна производња алата за двокомпонентно ливење пластике	76
7. Поступак двокомпонентног ливења пластичног дела у алату добијеном адитивном производњом.....	81
7.1 Опис примењеног двокомпонентног материјала	81
7.2 Опис поступка двокомпонентног ливења	82
8. Закључна разматрања	86
Литература	89

1. Увод

Према стандарду *ASTM F2792-12a*, адитивна производња (енгл. *Additive Manufacturing – AM*) се дефинише као „процес спајања материјала за израду предмета директно из података 3D модела, обично слој по слој, за разлику од метода субтрактивне производње”. *AM* технологије омогућавају производњу многобројних производа различитог облика и геометрије. Технологије адитивне производње су развијене како би се убрзао развој производа, а трошкови развоја свели на минимум. Захтеви који се постављају пред савремене поступке развоја производа подразумевају, пре свега, да је квалитетан производ потребно у што краћем времену и уз минималне трошкове довести до нивоа серијске производње. Појава технологија за *AM* представља сасвим нову и веома ефикасну могућност да се време развоја производа у одређеној мери смањи. Уочавање грешака на производу пре израде сета алата и прибора, као и избегавање беспотребних трошкова, представљају основне предности ове нове технологије [1, 2].

Због све веће потребе за израдом појединачних производа и специфичних захтева тржишта, данас се ова технологија све више примењује како у изради алата за производњу тако и за израду завршних производа, најчешће у појединачној и малосеријској производњи. Такође, предности адитивне производње су и могућност израде готових склопова, минималан губитак материјала, могућност комбиновања више материјала, израда више различитих делова истовремено (у зависности од уређаја и врсте процеса). Захваљујући својој флексибилности и квалитету израђених делова, *AM* технологије су нашле широку примену у готово свим гранама индустрије, како за израду најкомплекснијих и веома одговорних делова у авиоиндустрији, тако и за израду показних модела у образовању. Развој адитивне производње, односно брзе израде прототипова углавном је постепен. Најстарије машине су пре свега биле базиране на принципима фотополимеризације, синтеровања прашка, депоновања топливог филамента и ламинирања. Све ове технологије и данас постоје, а свакодневно се усавршавају постојеће и развијају нове технологије. *AM* представља аутоматизован процес развијен из принципа технологије базиране на слојевима. Карактерише га посебан процесни ланац, а почиње са виртуелним тродимензионалним *CAD* моделом (*Solid*) који описује део који ће се произвести. У инжењерингу, скуп података се обично добија *3D CAD* пројектовањем, скенирањем или неким другим технологијама [2, 3, 4, 5].

Без обзира на начин на који је добијен, *3D CAD* модел се прво „сече” у слојеве, користећи рачунар и посебан софтвер. Као резултат, добија се низ виртуелних пресека са равномерном дебљином. Скуп података, који се састоји од података контуре (x -у), дебљине слоја (dz) и броја слоја (или z -координате) сваког слоја, доставља се машини која извршава два основна корака процеса по слоју како би израдила део. Прво се сваки слој обрађује у складу са датим подацима о контури и дебљини слоја, а затим, у другом кораку се сваки слој веже за претходни. Физички модел „расте” слој по слој од дна ка врху све док се не добије коначни облик дела. Ови основни кораци, названи процесним ланцем, исти су код великог броја различитих машина које су доступне на данашњем тржишту. Маchine се разликују само по начину на који се обрађује сваки слој и по начину на који се суседни слојеви спајају у току формирања дела [2].

У мастер раду, главни фокус је стављен на *FDM* технологију. За израду прототипа алата коришћен је 3D штампач *MarkForged Onyx Pro* који ради на принципу *FDM* технологије. По заступљености је друга *AM* технологија после стереолитографије (*SLA*) и има веома распрострањену примену због низа предности које нуди. Овај поступак спада у технологије израде прототипова процесом екструдирања материјала.

Екструдирање је процес у коме се материјал у чврстом стању континуирано доводи у комору за загревање, где се топи, а затим се истискује кроз екструзиону млазницу [3].

Реверзни инжењеринг (енгл. *Reverse engineering – RE*) представља супротан процес класичном поступку дизајнирања и моделирања будућих производа. То је процес дигитализације постојећег дела, подскопа или производа, без цртежа, документације или рачунарског модела. Прецизније, реверзни инжењеринг дефинише се као процес добијања 3D дигиталних геометријских података неког објекта путем 3D дигитајзера. На основу добијеног облака тачака неког физичког објекта путем 3D скенирања израђује се 3D CAD модел. Облак тачака представља дигитални опис објекта у тродимензионалном простору. Подразумева две главне фазе, и то тако да се у првој фази врши дигитализација података или мерење посматраног објекта, док друга фаза подразумева 3D моделирање објекта на основу претходно прикупљених података [6, 7]. За дигитализацију физичких објеката у мастер раду, коришћени су оптички 3D скенери *David SLS-2* и *ATOS II*. Обрада добијених података извршена је у посебно развијеним софтверима. Провера одступања добијених 3D CAD модела, извршена је скенирањем добијених прототипова (израђених на 3D штампачу *MarkForged Onyx Pro*) и преклапањем њихових облака тачака са иницијалним облацима тачака скенираних објеката.

Људска цивилизација прошла је кроз неколико “доба”, од којих се свако доба може разликовати по материјалу који је био у употреби, па се тако може разликовати камено, па бронзано, а затим и гвоздено доба. Данас се са сигурношћу може рећи да се човечанство налази у “мултиматеријалном добу”. Најбољу илустрацију тога може дати данашњи мобилни телефон чије компоненте могу садржати велико број хемијских елемената који се појављују у природи. Због широко распрострањене примене различитих материјала у индустрији, развој и побољшање карактеристика, како нових тако и постојећих материјала, никада није стао. Велики значај имају вештачки полимерни материјали, који се не сматрају само заменом за природне материјале (дрво, природна смола и влакна), већ се посматрају као посебна група материјала са сопственим карактеристикама. Предности израде производа од пластичних маса су многобројне (ниска цена, лакоћа израде, отпорност на одређене утицаје итд), међутим, као и сваки други материјал, тако и оне поседују одређени број недостатака који отежавају њихову примену у одређеним областима [8]. Поступци израде делова од пластике поседују одређене недостатке, због чега су се последњих година појавиле алтернативне методе израде делова од пластике. АМ технике засноване на слојевитом приступу се могу користити за директну израду узорака, тј. мастер модела за ливење. Развој узорака је од суштинског значаја у погледу времена и трошкова за израду комплексних одливака. Технике брзе израде прототипова (енгл. *Rapid Prototyping – RP*) могу се користити за израду сложених узорака и саставних компоненти алата и у великој мери помажу у скраћењу времена развоја истих. Постоји читав низ различитих начина реализације брзе израде алата (енгл. *Rapid Tooling – RT*), а један од њих је и поступак двокомпонентног ливења пластике. Годинама се користи за производњу малих серија и представља знатно практичнију, бржу и једноставнију алтернативу стандардној технологији ињекционог бризгања. Укључује интегрисање најсавременијих материјала и технологија у једну функционалну технологију [9]. Примена техника и система адитивне производње за брзу израду прототипова, са фокусом на прототип алата за двокомпонентно ливење представља главни циљ мастер рада. Прецизније, за израду алата за двокомпонентно ливење изабраног дела, примењена је FDM технологија. CAD модел алата израђен је у софтверу CATIA на основу података о облаку тачака скенираног објекта. Поступак двокомпонентног ливења у произведеном алату описан је у последњем поглављу.

2. Принципи и технике адитивне производње

У фази концептуалног дизајна веома су значајне провере коришћењем физичких модела производа, посебно у ситуацијама када је пројектантима и дизајнерима веома битно да пројектоване производе могу осетити у рукама, проверити ергономске карактеристике, функционалност у склопу итд. Претходно наведене чињенице могу се постићи применом адитивне производње. Адитивна производња (енгл. *Additive Manufacturing* – *AM*) представљаја поступке спајања материјала са циљем формирања радног предмета на основу дигиталног 3D модела, најчешће слој по слој. На почетку су коришћене само за брзу израду прототипова (енгл. *Rapid Prototyping* – *RP*), а временом су се адитивне технологије развиле до тог степена који омогућава израду завршних, функционалних производа (енгл. *Rapid manufacturing* – *RM*) или финалних алата (енгл. *Rapid Tooling* – *RT*). Адитивна производња базира се на слојевитом приступу израде тродимензионалних физичких објеката директно из 3D CAD података [2, 4, 7].

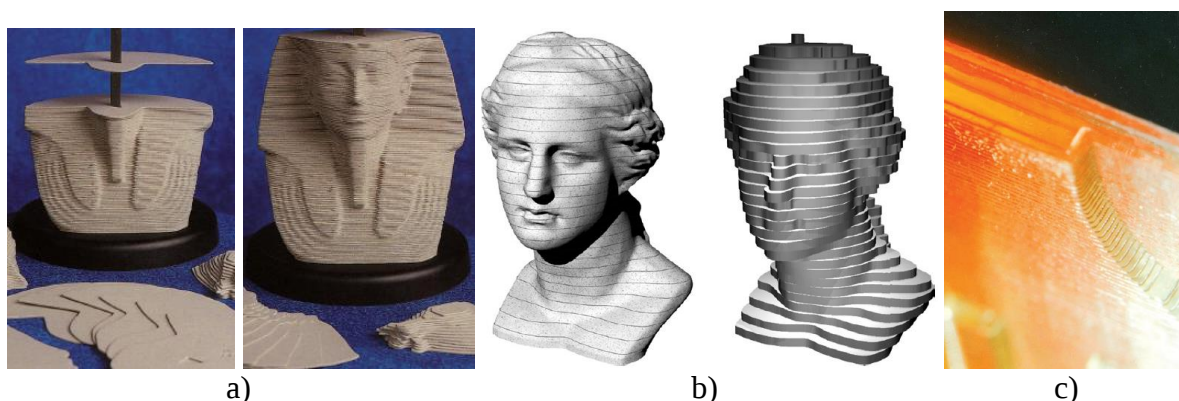
Брза израда прототипова (*RP*) је термин са којим се производна индустрија „борила” дуги низ година. Термин „брза израда прототипова” користио се у разним индустријама за описивање процеса за брзо креирање система или делова пре финалне реализације или комерцијализације. Другим речима, нагласак је на стварању нечега брзог и нечега што је резултат прототип или основни модел из кога ће се изводити даљи модели и на крају коначни производи. Замишљен средином осамдесетих година двадесетог века, коришћен је за описивање низа технологија чијом применом је било могуће брзо израдити прототипове у раним фазама развоја производа. Различите технике у основи комбинују раванске слојеве материјала, узастопно, да би формирали тродимензионални објекат. Међутим, не постоји ништа у изразу „брза израда прототипова” који указује на овај „слојевити” приступ израде. Ова технологија, која је првенствено била усмерена на производњу модела за израду прототипа, временом је развијена до те мере да укључује и брзу израду алата и директну производњу робе широке потрошње. Комерцијалне технологије додатно су побољшане са аспекта брзине, тачности дела и својства материјала. Све веће интересовање и све већа примена од стране индустрије резултирали су смањењем трошкова, као и проширењем области примене. Уочавање растуће атрактивности ове технологије довело је до редовне употребе израза „адитивна производња”, првенствено унутар прерађивачке индустрије и „3D штампања” од стране шире јавности. Израз „адитивна производња” представља формализовани термин и синоним је за брзу израду прототипова и оно што се популарно назива 3D штампањем, за шта је било потребно одређено време да се и званично прихвати [10].

Савремени концепти примене *RP* технологије, као и чињеница да се она све интензивније користи у процесима производње а не само у изради прототипова, довели су до предузимања одређених активности у погледу стандардизације ове технологије. Будући да је *RP* релативно млада технологија, дуги низ година нису предузимани напори у погледу стандардизације. 2007. године, под надзором „Удружења немачких инжењера” (*VDI*), створена је посебна препорука посвећена брзој изради прототипова *VDI3404*, која је затим објављена 2008. године. Од 2009. године, „Америчко удружење машинских инжењера” (*ASME*) у сарадњи са „Америчким удружењем за испитивање и материјале” (*ASTM*) започело је развој сопствених процедура стандардизације. У јесен 2009. године комитет *F42* за адитивну производњу (пододбор *F42.91* за терминологију) објавио је документ *F2792-12a*, који се назива „Стандардна терминологија за адитивне производне технологије”. Поред дефиниција које се могу наћи у овом документу, овај одбор је дефинисао и назив „адитивна производња” који се од тада користи [2].

2.1 Принцип адитивне производње

Адитивна производња се може дефинисати као процес израде 3D производа примарно додавањем материјала уместо скидања материјала које је карактеристично за поступке резања. Техничка реализација *AM* заснива се искључиво на слојевима и зато се назива „технологија на бази слојева“. Ове технологије представљају скуп нових технологија које се користе за израду тродимензионалних физичких објеката директно из 3D CAD модела. Генерисани површински или просторни модели у CAD систему представљају улазне податке о геометрији. У случајевима када се пре CAD моделирања примењује реверзни инжењеринг, као улазни подаци су неки физички објекти, тј. делови или производи за који је неопходно урадити физички модел. Основна карактеристика различитих метода ове технологије представља временски доста бржи поступак израде прототипова у односу на традиционалне методе. Потребно је неколико сати да би се успешно израдио прототип овом технологијом [2, 7].

Принцип технологије базиране на слојевима, заснива се на састављању 3D физичког објекта из много слојева, углавном једнаке дебљине. Сваки слој се контурира према одговарајућем тродимензионалном скупу података и ставља се на врх претходног. Принцип адитивне производње је у суштини једноставан и заснован је само на виртуелним 3D CAD моделима. 3D CAD модел се „сече“ према одређеној дебљини слоја, при чему се површина слободног облика апроксимира низом контурних слојева једнаке дебљине [2]. Принцип поделе виртуелног 3D CAD модела на слојеве дат је на слици 2.1.



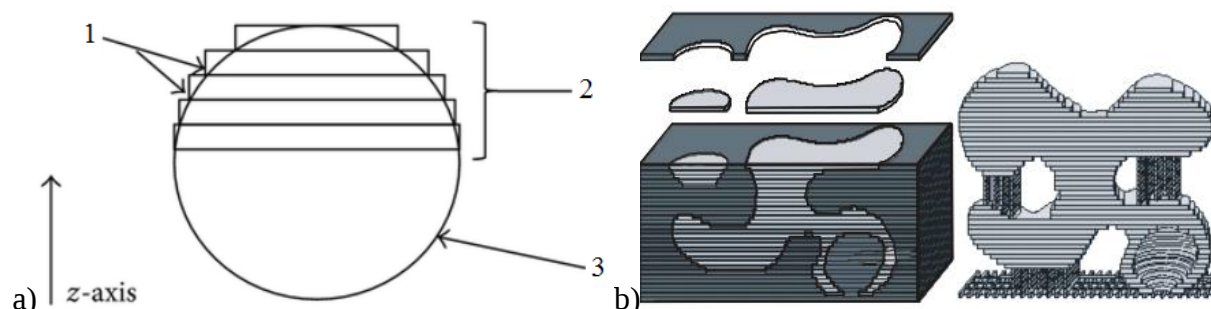
Слика 2.1 Основни принцип адитивне производње (а), подела виртуелног 3D CAD модела на слојеве једнаке дебљине (б) и изглед слоја дебљине 0,1 mm (с) [2]

Процес адитивне производње се састоји из само два корака [2]:

1. Стварање једног слоја са обликом који одговара контури и са дебљином слоја на основу информација о сечењу 3D CAD податка;
2. Спајање сваког новог слоја са претходним.

У оперативни систем се учитавају улазни подаци у облику *STL* фајла (енгл. *Stereo Litography Format*), чиме се описује геометрија прототипа. Сам фајл је *ASCII* или бинарног типа и представља листу троугаоних површина које описују компјутерски генерисани просторни модел, а овакав улазни податак је стандардан за већину машина за *RP* технологије. Виртуелни модел се дели на веома танке слојеве, а затим машина користи овакав модел за формирање модела слој по слој. Сваки слој се везује са претходним и оним следећим све док се не формира просторни 3D модел. Због оваквог начина формирања прототипа, криве површине су састављене из степенастих делова, тј. постиже се ефекат степеница (*stair-stepping*) за сваки корак. Када је прототип формиран

од неправилних геометрија, потребно је израдити ослонце. Из тог разлога CAD модел садржи додатне елементе који се уклањају након израде модела. На слици 2.2 приказан је ступенасти изглед криве површине објекта (a) и RP модел са ослонцима (b) [2, 7].



Слика 2.2 a) Ступенасти изглед криве површине објекта: 1 – формирани ступеник, 2 – слојеви израђеног дела, 3 – површина CAD модела; b) RP модел са ослонцима [7]

Основни принцип ове технологије је да се модел, првобитно генерисан коришћењем тродимензионалног компјутерски потпомогнутог пројектовања (енгл. *3D Computer Aided Design – 3D CAD*), може директно израдити без потребе за планирањем процеса. AM технологија поједностављује процес производње сложених 3D објеката директно из CAD података. Остали производни процеси захтевају пажљиву и детаљну анализу геометрије дела како би се утврдио редослед по коме се могу израђивати различите карактеристике, затим који се алати и процеси морају користити и који додатни елементи морају бити потребни за коначну израду дела. Супротно томе, адитивна производња захтева само неке основне димензионалне детаље и одговарајуће разумевање принципа рада AM машине и о материјалу који се користи за израду дела. Кључно за рад AM је то што су делови направљени додавањем материјала у слојевима. Сваки слој представља танки пресек дела који је изведен из оригиналних CAD модела. У физичком смислу, сваки слој мора имати коначну дебљину, па ће резултирајући део бити апроксимација оригиналних података, као што је приказано на слици 2.3 [7, 10].



Слика 2.3 CAD слика шоље за чај са додатним сликама које показују ефекте изградње користећи различите дебљине слоја [10]

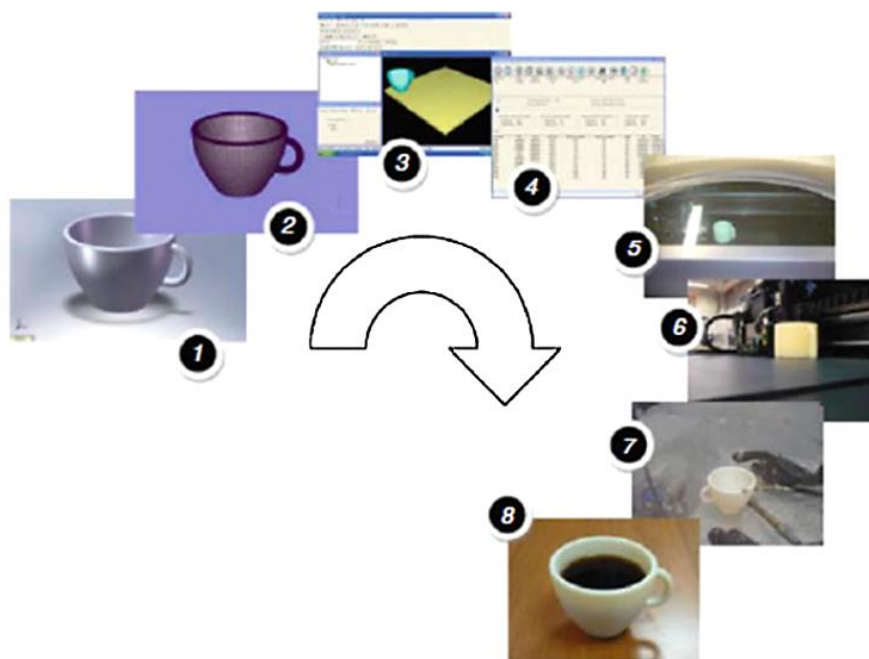
Са слике 2.3. може се приметити да, што је слој тањи то ће штампани део бити ближи оригиналном. Све комерцијализоване AM машине до данас користе приступ заснован на слојевима, а главни начини од којих се разликују су у материјалима који се могу користити, како се слојеви стварају и како се слојеви међусобно везују. Такве разлике ће одредити факторе попут тачности коначног дела, његових својстава материјала и механичких својстава. Они ће такође одредити факторе попут брзине израде дела, колико је потребно накнадне обраде, величину AM машине која се користи и укупне трошкове машине и процеса [10].

Заједничко за све AM технике је то што се посматрани објекат моделира у неком CAD софтверском пакету. Тако добијени модел је представљен затвореним површинама

које одређују запремину предмета, а то значи да је веома битно да објекат буде моделиран просторним моделом. Тако се обезбеђује да сви хоризонтални пресеци буду затворене површине, што представља важан фактор који утиче на исправност *RP* процеса. Затим, претходно добијени модел је потребно конвертовати у *STL* формат, који представља приближни опис модела дефинисан полигонима. За описивање закривљених површина потребан је већи број полигона. Поред овог формата, могу се користити и *CLI* (*Common Layer Interface – Општи интерфејс за слојеве*), *IGES* или *VRML* (*Virtual Reality Modelling Language – Језик за моделирање виртуелне реалности*). Анализа полигоналног модела врши се у посебном софтверу, а затим се претвара у низ попречних пресека. Израђују се секвенцијално у виду слојева добијених очвршћавањем течног материјала за израду модела, везивањем прашкастог материјала или на неки други начин [7].

2.2 Фазе адитивне производње

AM укључује бројне кораке који се крећу од описа виртуалног *CAD* модела до физичког резултата. Шематски приказ најважнијих корака који су укључени у сваком поступку адитивне производње дат је на слици 2.4. Доле наведени низ корака погодан је за све *AM* технологије. Могу постојати одређене варијације зависно од технологије која се користи и дизајна дела, а неки кораци могу бити врло сложени за неке машине [10].



Слика 2.4 Осам корака који чине процес адитивне производње [10]

Као што је представљено на слици 2.4, процес адитивне производње у основи се састоји из осам важних корака као што су [10]:

1. Формирање 3D CAD модела објекта;
2. Конвертовање 3D CAD модела у STL формат;
3. Трансфер на AM машину и обрада STL записа;
4. Подешавање AM машине;
5. Израда модела;
6. Уклањање модела са машине;
7. Постпроцесирање и
8. Примена.

Први корак подразумева формирање 3D CAD модела објекта. Сви AM делови морају бити засновани на софтверском моделу који у потпуности описује спољну геометрију. Ово може укључивати употребу готово било ког професионалног софтвера за CAD моделирање, али излаз мора бити 3D Solid или површински приказ. Такође, могу се користити и уређаји за реверзни инжењеринг. У другом кораку врши се конвертовање 3D CAD модела у STL формат. Скоро свака AM машина подржава STL формат, који је постао готово стандардан, а данас скоро сваки CAD систем може да произведе такав формат датотеке. Ова датотека описује спољне затворене површине оригиналног CAD модела и чини основу за прорачун слојева. Затим, у трећем кораку, STL формат који описује део мора да се пренесе на AM машину. На почетку се утврђује тачност STL формата модела. Софтвер AM система обично има алат за визуелизацију који кориснику омогућава преглед и манипулисање моделом. Корисник може поново да постави део или чак да промени оријентацију како би омогућио да се изгради на одређеном месту унутар радног стола AM машине. Такође постоји могућност израде више делова истовремено. Четврти корак подразумева правилно подешавање AM машине пре процеса израде. Ова подешавања се односе пре свега на параметре везане за ограничења материјала, извор енергије, дебљину слоја, време итд. Израда дела се врши у петом кораку. То је аутоматизован процес и машина у великој мери може радити без надзора. Потребно је само повремено надгледати машину како би се утврдило да није дошло до грешака попут недостатка материјала, напајања или софтверских грешака. Када AM машина заврши израду, делови се морају уклонити што представља шести корак процеса. Ово може захтевати интеракцију са машином, која може имати сигурносне блокаде, како би се осигурало да су радне температуре довољно ниске или да нема активних покретних делова. Када су израђени делови уклоњени из машине, могу захтевати додатно чишћење, пре него што буду спремни за употребу, што представља седми корак AM процеса. Делови могу бити недовољно чврсти у овој фази или могу имати потпорне зидове које је потребно уклонити. Због тога је често потребно време и пажљива, искусна ручна манипулација. На крају, осми корак представља примену израђеног дела. Међутим, они могу захтевати и додатни третман пре него што буду прихватљиви за употребу. На пример, може да захтева премазивање и фарбање како би се добила прихватљива текстура и квалитет површине. Третмани могу бити дуготрајни ако су постављени високи захтеви. Такође се може захтевати да се саставе заједно са другим механичким или електронским компонентама ради формирања коначног модела или производа [2].

Поред описа најважнијих корака адитивне производње, важно је напоменути да многе AM машине захтевају пажљиво одржавање. Многе машине користе ласерску технологију због чега се морају пажљиво надгледати и које се по могућности не би требало користити у загађеном или бучном окружењу. Иако су машине генерално дизајниране за рад без надзора, важно је укључити редовне прегледе у распоред одржавања истих. Такође, треба знати да различите технологије захтевају различите нивое одржавања. Многи произвођачи машина препоручују и нуде тест узорке који се могу редовно користити да се потврди рад машине у прихватљивим границама. Поред машина, материјали такође могу захтевати пажљиво руковање. Сировине које се користе у неким AM поступцима имају ограничен рок трајања и може се захтевати да се чувају у условима који спречавају нежељене хемијске реакције. Такође треба избегавати контакт са влагом, прекомерном светлошћу и загађивачима. Већина процеса користи материјале који се могу поново користити. Међутим, поновна употреба може деградирати својства ако се изведе више пута. Стога би требало следити поступак за одржавање конзистентног квалитета материјала путем рециклирања [10].

2.3 Технике адитивне производње

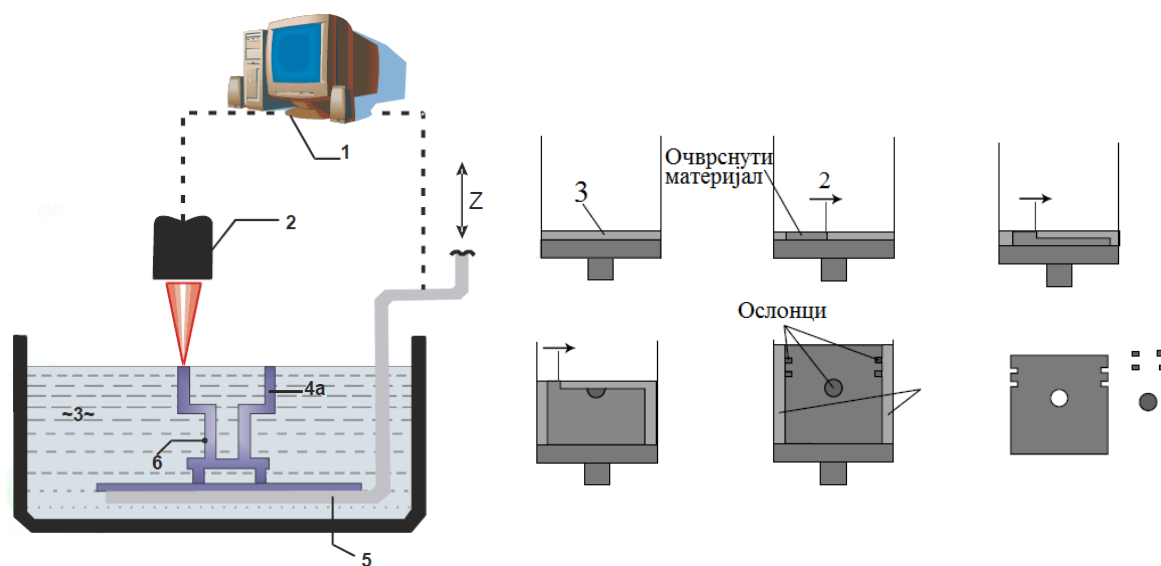
Технологије за адитивну производњу су комерцијално први пут примењене 1987. године од стране компаније *3D Systems*, када је произведен први стереолитографски уређај. Уређај се заснивао на наношењу танког слоја течног полимера који би очвршћавао помоћу *UV* ласера. Након тога почео је и развој осталих поступака као што су везивна 3D штампа (1989. године), затим депоновање истопљеног филамента (1991. год.), ламинација фолија (1991. год.), селективно ласерско синтеровање (1992. год.), а након тога долази до развоја и осталих технологија. Чињеница да технологија адитивне производње поседује велики број предности, довела је до њихове све интензивније примене у различитим областима. Технологије адитивне производње развијале су се великом брзином, а сам принцип производње овом технологијом остао је исти до данас. Управо ово је разлог због чега се данас може наћи велики број различитих *AM* технологија. Ове технологије имају своје специфичности с обзиром на врсту материјала коју користе за израду делова. Материјали који се користе током процеса израде овом технологијом могу се поделити на чврсте, прашкасте и течне. До данас је развијен велики број поступака који се по одређеним карактеристикама могу сврстати у заједничке групе. Стандарди *ISO* и *ASTM* су класификовали ове многобројне поступке у седам основних група према начину генерисања слојева као што је приказано у табели 2.1 [4, 11, 12].

Табела 2.1 Класификација *AM* поступака на основу *ISO/ASTM* стандарда [12]

Група	Начин генерисања контуре	Комерцијални назив технологије	Скр.
Фотополимеризација у кади	Ласер, пројектор, принтерска глава	Стереолитографија	SLA
Фузија прашкастог супстрата	Ласер, млаз електрона	Селективно ласерско синтеровање Селективно ласерско топљење Топљење млазом електрона Директно ласерско синтеровање метала	SLS SLM EBM DMLS
Ламинација фолија	Ласер, нож	Производња ламинираних објеката Ламинација пластичних фолија	LOM PSL
Везивна 3D штампа	Принтерска глава	Везивна 3D штампа	3DP
Екструдирање материјала	Глава екструдера	Депоновање топљеног филамента	FDM
Директна 3D штампа	Принтерска глава и <i>UV</i> лампа	PolyJet, PolyJet Matrix	PJ
Наношење материјала применом усмерене енергије	Млаз електрона	3D ласерско облагање Директно таложење метала	DEO

2.3.1 Стереолитографија – SLA

Стереолитографија (енгл. *Stereolithography Apparatus – SLA*) представља прву комерцијално доступну методу брзе израде прототипова. Прототип производа се креира од течног смоластог полимера који очвршћава под дејством *UV* зрака. Овај *RP* процес се заснива на принципу фотополимеризације помоћу ласерске технологије. Фотополимеризација представља полимеризацију изазвану дејством фотохемијског процеса. Фотополимери представљају материјале који очвршћавају под дејством електромагнетног зрачења (*UV* зрачење или *X*-зраци). Дејством фотохемијског процеса, на површини течног материјала долази до усмереног формирања очврнутих тачака пластике [7, 13]. Шематски приказ стереолитографије приказан је на слици 2.5.



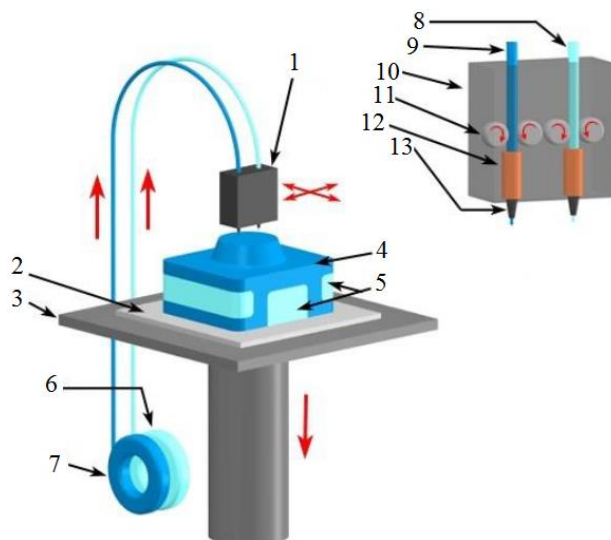
Слика 2.5 Шематски приказ *SLA* процеса: 1 – рачунар, 2 – ласер, 3 – фотореактивни флуид, 4a – дводимензионална литографија, 5 – платформа, 6 – 3D објекат [14]

На основу виртуелног модела се генерише *STL* фајл, који служи за пренос податка о геометрији објекта у оперативни систем машине. Према овим подацима се даље контролише и води *RP* процес. Помоћу рачунара (1) усмерава се ласер (2) преко површине течног полимера која се лако полимеризује, чиме тај материјал, тачку по тачку материјала претвара у чврсто тело (просторни модел). Процес се одвија на платформи (5) која одржава површину модела увек на одређеној позицији испод површине фотореактивног флуида (3). Сходно жељеном моделу, ласер претвара све тачке једног слоја у чврсту пластику. Након очвршћавања слоја, платформа се спушта за мали корак (дебљину слоја), а затим се гради следећи слој на површини претходног слоја. Поступак се понавља све док се и последњи слој не претвори у чврсту пластику. Слојеви се лепе један на други захваљујући добрим адхезионим особинама. Софтвер аутоматски генерише све потребне ослонце. На крају процеса, подиже се платформа и модел се евентуално чисти од вишка пластичне масе и ослонаца [7, 13].

Стереолитографија се одликује великом тачношћу и даје најбољи завршни изглед површине, а своју примену налази код израде и мањих и већих модела. Једном започет процес је потпуно аутоматски и може бити без надзора док се процес не заврши. Недостатак овог поступка представљају комплексне структуре ослонаца код делова који имају препусте и усеке. Делови се у већини случајева накнадно очвршћавају у пећи, да би се процес полимеризације завршио у потпуности. Такође, због токсичности материјала за *SLA*, процес захтева посебне услове рада и пажљиво руковање [7, 13].

2.3.2 Депоновање топљеног материјала – FDM

Моделирање депоновањем топљеног материјала (енгл. *Fused Deposition Modeling* – *FDM*) је друга најчешће коришћена *AM* технологија након стереолитографије. *FDM* спада у технологије израде прототипова процесом екструзирања материјала. Машина за *FDM* поступак се састоји од грејне коморе са екструзионом главом и платформом. Екструзиона глава пружа равномерно таложење материјала у *x-y* равни према контури жељеног модела [7, 10, 13]. Шематски приказ *FDM* поступка дат је на слици 2.6.



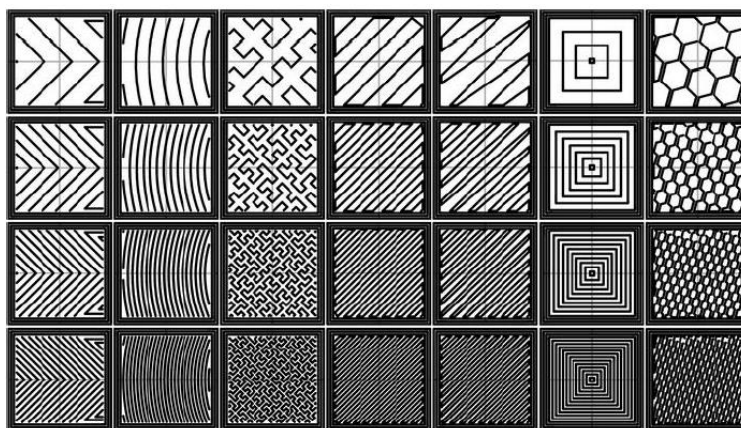
Слика 2.6 Шематски приказ *FDM* поступка: 1,10 – глава екструдера, 2 – подлога, 3 – платформа, 4 – радни комад, 5 – ослонац, 6 – намотај материјала за ослонац, 7 – намотај основног материјала, 8 – материјал ослонца, 9 – материјал за изградњу, 10 – глава екструдера, 11 – водилице, 12 – грејач, 13 – млазница [15]

У овом процесу, материјал у чврстом стању се доводи у комору за загревање и топи. Након тога, растопљени материјал се екструдира (истискује) кроз млазницу која прати пресек објекта који се израђује слој по слој. Екструзиона глава има могућност померања вертикално и хоризонтално. Кроз млазницу, која се налази у екструзионој глави, потискује се отопљена термопластична жица. Ова жица наноси се у танким линијама и слојевима на жељену површину. Глава екструдера са млазницом креће се по радном столу по жељеној путањи чиме се описује геометрија слоја. Екструдирани материјал тренутно очвршћава и везује за слој материјала на који се наноси. Платформа се након завршетка израде једног слоја помера на доле за дебелину следећег слоја, а процес се понавља све док се не изради последњи слој. Целокупни систем смештен је у комори чија је температура нешто нижа од тачке топљења материјала [7, 11].

FDM технологија углавном користи материјале попут *ABS* пластике и гуме, међутим у задње време уводе се и други материјали који омогућавају знатно боље карактеристике модела у погледу чврстоће и температурне постојаности. Код сложених геометрија где се захтева израда ослонаца, примењују се и материјали који се лако растварају у води. Због тога је *FDM* глава дизајнирана за екструзирање основног и секундарног материјала. Материјали се могу брзо и једноставно мењати без опасности од токсичних хемикалија. Предност ове технологије представља и релативно нижа цена у односу на остале *AM* технологије. Погодан је за коришћење у канцеларијском окружењу због тихог рада. Омогућава израду функционалних делова уз минимални отпад и лакоћу уклањања ослонаца. Недостатак поступка представља спорост процеса

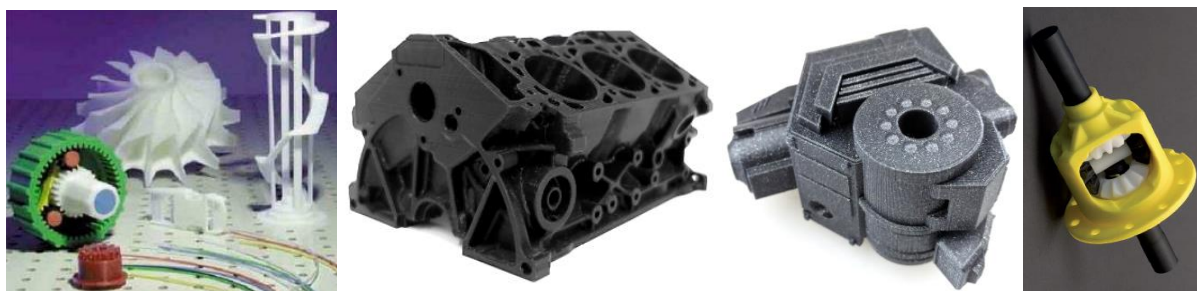
нарочито код израде делова већих димензија, као и непредвидиво скупљање материјала при наглом хлађењу при изласку из *FDM* главе. Ограничена тачност представља још један недостатак овог процеса с обзиром на расположиви пречник термопластичне жице која се користи. Модели израђени *FDM* технологијом често захтевају накнадну обраду како би се уклонио ефекат степеница и добио задовољавајући квалитет површине [7, 13].

Машина за извођење *FDM* поступка најпре израђује спољашњу контуру, а затим унутрашњост прототипа. Нагла промена смера кретања млазнице може проузроковати потешкоће при контроли тока материјала. Уобичајено је да се спољашње контуре израђују при мањим брзинама млазнице, како би се лакше осигурало константно депоновање материјала. Унутрашња структура се може израђивати при већим брзинама. Према слици 2.7, унутрашњост прототипа може бити попуњена различитим структурама: пуна структура, мрежаста структура (крugови, линије, правоугаоници), структура пчелињег саћа итд. Такође, треба напоменути, да поједине *FDM* машине имају могућност израде прототипова са танким ребрима у унутрашњости, чиме се постижу значајне уштеде у материјалу и времену израде. Исто тако, развијене су и машине које имају могућност депоновања и ојачавајућег материјала (нпр. стакленог влакна) што може бити јако корисно код израде функционалних делова [13, 14].



Слика 2.7 Различите структуре попуњавања унутрашњости прототипа [14]

Примењује се за израду модела за концептуализацију и презентацију. Модели се могу пескарити, бојити, етикетирати и бушити па се може добити изглед крајњег производа. Такође, *FDM* поступак је погодан за израду прототипова за дизајн, анализу и функционална испитивања. Нуди могућност израде потпуно функционалних прототипова од *ABS* пластике. Овакви делови поседују 85% чврстоће крајњег производа. Због тога се могу спроводити тестирања у експлоатацији, нарочито за производе шитоке потрошње. *FDM* поступак се примењују и за израду шаблона и мастер модела за израду алата [7]. Модели добијени *FDM* технологијом приказани су на слици 2.8.



Слика 2.8 Модели добијени *FDM* технологијом [2, 7]

2.3.2.1 MarkForged Onyx Pro Desktop 3D штампач

MarkForged Onyx Pro 3D штампач је уређај за брзу израду прототипова и делова који се могу директно уградити у склопове. Специфичан је по томе што, за разлику од класичних 3D штампача, поседује два екструдера, који раде наизменично. Први се користи за избацавање пластичног филамента, а други за влакно. Такође нуди једноставан начин праћења количине преосталог материјала, како основног, тако и ојачавајућег. Као пластични филамент може се користити материјал *Onyx*, а за ојачање стаклена влакна [16]. На слици 2.9 приказан је MarkForged Onyx Pro 3D штампач.



Слика 2.9 MarkForged Onyx Pro 3D штампач [17]

Да би штампани предмет био геометријски тачан неопходно је [16]:

- Повезивање штампача са рачунаром,
- Пратити информације на дисплеју уређаја,
- Темељно опрати водом плочу радног стола принтера од нечистоћа и претходно нанесеног лепка, а затим је осушити,
- Нивелисати радни сто за штампу тако да буде паралелан са екструдерима,
- Водити рачуна да у току процеса равнања (нивелације), радни сто (као и горњи део рама) не сме бити под дејством спољашње силе која може негативно утицати на процес нивелације,
- Пажљиво одвити завртњеве који су предвиђени за равнање радног стола, а затим, након што радни сто промени свој положај, између радног стола и екструдера пластике провући еталон,
- Извршити нивелацију, завијањем претходно одвртнутих завртњева до тренутка када престаје отпор кретању еталона између екструдера пластике и радног стола,
- Подесити висину екструдера за влакна, уколико приликом провлачења еталона није дошло до контакта.

Може доћи до великог броја грешака током процеса штампања уколико се подлога не поравна правилно. Ако је подлога сувише ниско постављена, може доћи до прекидања екструдираних пластичних влакана која чине спољашњост штампаног предмета и влакана која испуњавају предмет. Када је подлога подешена сувише високо долази до сабијања слојева и не долази до потпуне испуне штампаног предмета [17].

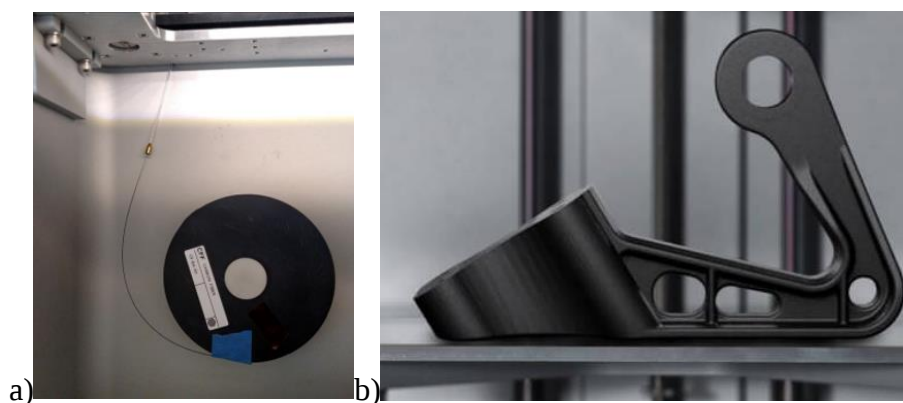
Као пластични филамент користи се *Onyx* који је јако подложен утицају влаге. Под утицајем влаге, карактеристике овог материјала могу деградирати. Због тога се ова врста филамента чува у заштићеним „ сувим кутијама” у које влага не може доспети.

Након отварања, овај материјал не сме провести више од 15 min на отвореном, иначе ће постати неупотребљив. Изглед суве кутије дат је на слици 2.10-а. Пластични филамент је потребно засећи под углом од 45° како би лакше прошао кроз уређај за пренос ка екструдеру. Филамент пролази кроз пластичну цев која повезује штампач и суву кутију (слика 2.10-б). Екструдер се мора загрејати до одговарајуће температуре која је довољна за топљење филамента. Екструдирани филамент се мора одстранити из штампача како не би дошло до грешке приликом штампе. Потребно је деловати силом на филамент у аксијалном правцу, како би га уређај за пренос филамента ка екструдеру адекватно захватио [17].



Слика 2.10 Сува кутија са пластичним филаментом [16]

Како би штампани делови имали боље механичке карактеристике, потребно их је у току процеса штампања ојачати, а то ојачање се добија применом одређених материјала који поседују велику затезну чврстоћу. Описани 3D штампач користи стаклена влакна као материјал ојачања. Да би материјал за ојачање дошао у контакт са системом за пренос ка екструдеру, слично као и код пластичног филамента, потребно је деловати аксијалном силом приликом његовог увођења у штампач. Котур са стакленим влакном се поставља на носач када влакно дође до екструдера (слика 2.11-а), а затим се одстрањује део екструдираног влакна. Притиском тастера *Cut* одсеца се влакно које се из штампача ручно одстрањује [16]. Пример дела који је произведен на описаном 3D штампачу дат је на слици 2.11-б.

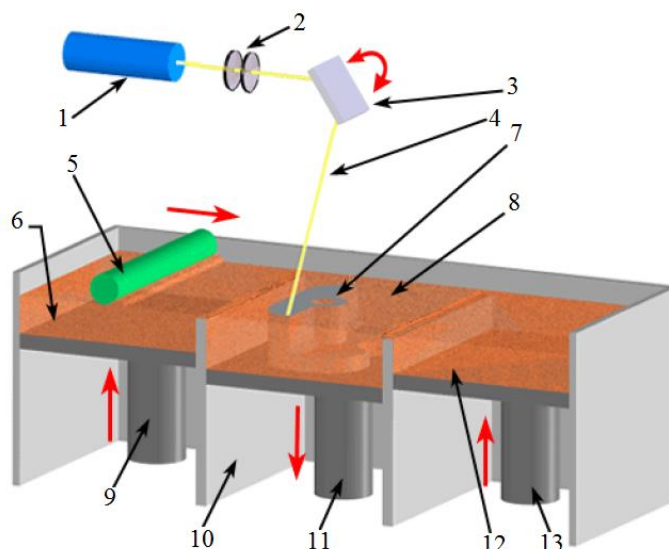


Слика 2.11 а) Постављање котура стакленог влакна на носач; б) Пример примене [17]

Након што се процес 3D штампања заврши, потребно је уклонити заостали пластични филамент. Препоручује се одсецање филамента под углом од 45° ради лакшег увођења у штампач током следеће употребе [16].

2.3.3 Селективно лазерско синтеровање – SLS

Селективно лазерско синтеровање (енгл. *Selective Laser Sintering* – SLS) представља поступак брзе израде прототипова синтеровањем од прашкастих металних материјала. Синтеровање је процес где се честице праха загревају до аморфног стања (нешто нижа температура од температуре топљења), када се повезују у једну целину. Оптички вођен лазер представља извор топлотне енергије и загрева само површински слој материјала [7]. Шематски приказ SLS поступка представљен је на слици 2.12.



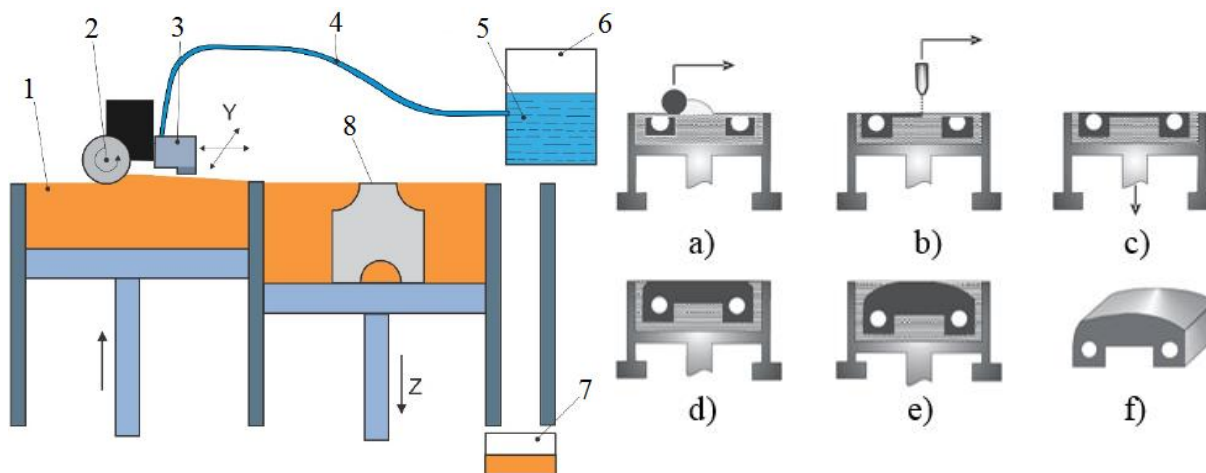
Слика 2.12 Шематски приказ SLS поступка: 1 – лазер, 2 – сочиво, 3 – х-у скенер за навођење ласера, 4 – лазерски зрак, 5 – ваљак за изравнање, 6, 12 – комора са прахом, 7 – синтеровани део, 8 – прашкасти материјал, 9, 13 – клип за довод праха, 10 – радна комора, 11 – клип радне коморе [18]

Као што је приказано на слици 2.12, поступак се састоји из следећих корака. Клип за довод праха (9) се помера на горе чиме се доводи потребна количина праха коју ваљак (5) равномерно распоређује. С друге стране, клип радне коморе се помера на доле да ослободи простор за наношење новог слоја праха. Лазер (1) емитује лазерски зрак (7) и наводи преко површине покривене прахом према CAD моделу. На тај начин прах се селективно топи и везује (синтерује) што доводи до формирања слоја модела. Температура коморе у којој се одвија SLS процес одржава се на температури незнатно испод температуре топљења, а топлотна енергија коју лазер емитује треба само мало да подигне температуру праха да би дошло до синтеровања, што додатно убрзава процес. Процес се понавља по слојевима док се не формира модел. Након формирања модела, подиже се клипом и следи скидање вишка праха. Модел је смештен у компактном праху, а претходно очврснути слој и прах у радној комори представљају ослоње за следећи слој, што значи да није потребна израда ослонаца као код SLA поступка [7].

SLS поступак се одликује добром постојаношћу делова и великим избором употребљивих материјала (најлон, фини најлон, поликарбонат, полиамид, метали, керамике итд.). Такође као што је наведено, нема потребе за ослоњцима. Није потребно накнадно очвршћавање, мада је некада неопходно добијени модел подвргнути додатним третманима (пескарење и бојење). Недостатак SLS јесу велике димензије система. При изради модела се остварује висока потрошња енергије. Слаб квалитет површине готовог дела представља још један недостатак SLS. Модели могу захтевати додатно побољшање механичких карактеристика због порозности материјала [7].

2.3.4 3D штампа – 3DP

3D штампа представља поступак који је развијен на америчком универзитету *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* 1989. године. Први комерцијални 3D штампач се појавио 1997. године. Представља један од првих процеса брзе израде прототипова, а због сличности са *ink-jet* штампом често се у литератури може пронаћи и назив *ink-jet* 3D штампа. Разликује се по томе што се уместо мастила кроз главу штампача избацује везивно средство (енгл. *binder*) које се депонује на прашкасту основу. Честице праха се адхезивно везују, што представља хемијско везивање. Због убрзаног развоја материјала и технологије, овај поступак се често користи и као директни произвођачки процес [4, 7, 18]. Шематски приказ 3D штампе дат је на слици 2.13.



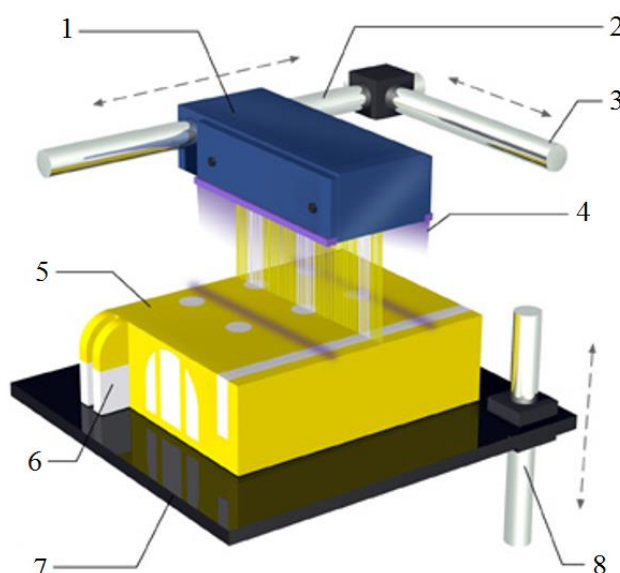
Слика 2.13 Шематски приказ поступка 3D штампе: 1 – комора са прашком, 2 – ваљак, 3 – глава за штампање, 4 – црево за довод везивног средства, 5 – везивно средство, 6 – резервоар везивног средства, 7 – посуда за вишак праха, 8 – модел [4, 18]

На почетку процеса, као што је на слици 2.13 приказано, врши се депоновање слоја прашкастог материјала (а) од којег се модел израђује, до врха радне коморе у којој се формира прототип. Померањем клипа на горе за тачно одређени корак у комори за снабдевање (30% више од дебљине слоја), обезбеђује се захтевана количина прашкастог материјала. Вишак праха се расипа у мањој мери са стране коморе, док у већој мери пада у посуду. Прашак се распоређује и сабија по врху радне коморе ваљком. У следећој фази (б), вишеканална глава распоређује течни адхезив по задатом дводимензионалном шаблону (пресеку слоја) на слој праха. Слој праха постаје везан на местима на којима је нанесен адхезив. На тај начин настао је један слој објекта, а поступак се даље понавља све до формирања комплетног прототипа у зависности од броја потребних слојева. Клип у радној комори се помера на доле за тачно дефинисани корак који је једнак дебљини слоја (с) све док се не изради последњи слој прототипа (е). На крају се врши подизање објекта, вађење из коморе (ф) и уклањање вишка праха четкицом. Сам прашкасти материјал представља ослонац, тако да ова технологија не захтева израду истих [5, 7].

Поступак 3D штампе одликује се великом брзином израде модела, уз ниске трошкове материјала. Пружа могућност израде модела у боји, а карактерише је и једноставност саме употребе. Примењује се код израде концепцијских модела, функционалних модела и прототипова, израду шаблона за ливење. Своју примену налази и у директном ливењу обојених метала и у изради калупа за поступак *RTV* обликовања. Често се користи и у едукативне сврхе. Недостаци процеса везани су за резолуцију, слаб квалитет површине, крхкост модела и ограничен избор материјала [7, 18].

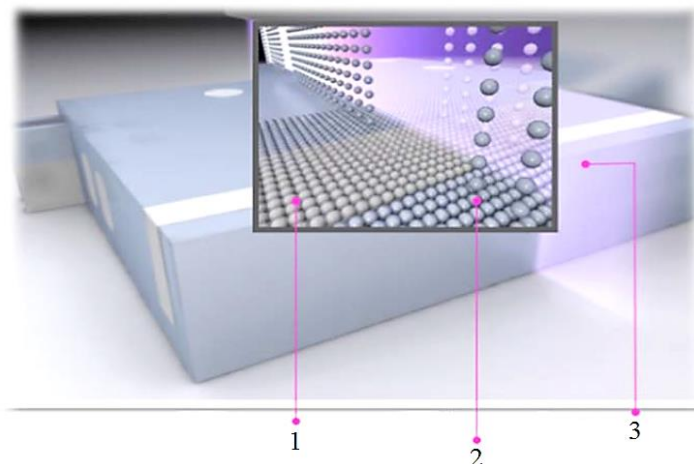
2.3.5 PolyJet – PJ

PolyJet представља један од поступака адитивне производње. У поређењу са другим поступцима, комерцијализовани *PolyJet* поступак има најмању дебљину слоја, што у адитивној (слојевитој) производњи представља најзначајнији фактор. *PolyJet* поступак се може посматрати као процес 3D штампања, међутим, због стварања модела UV очвршћавањем течних мономера, *PolyJet* се заснива на процесу полимеризације слично као код стереолитографије. Принцип поступка се заснива на депоновању акрилног фотополимера, при чему се формирају капљице течног мономера и затим излажу ултраљубичастој светлости да би се подстакла полимеризација. Процес фотополимеризације је сличан као код поступка стереолитографије, али са одређеним разликама. Често се за *PolyJet* каже да је унапређени SLA поступак. За разлику од неких машина за 3D штампање, овом технологијом се могу добити резултати слични онима из процеса стереолитографије. Почетак таласа оваквих машина забележен је на тржишту појавом машине *Quadra* из компаније *Objet Geometries* из Израела 2000. године, а брзо је уследила побољшана верзија *QuadraTempo* 2001. године. Обе машине су избаћивале фотополимер помоћу штампарских глава са преко 1500 млазница. Дизајн оваквих машина веома подсећа на 2D канцеларијске штампаче. Дебљина слоја износи свега 16 μ m, што омогућава добијање врло глатких површина прототипа [2, 10, 14 18]. Шематски приказ *PolyJet* поступка, са основним елементима, представљен је слици 2.14.



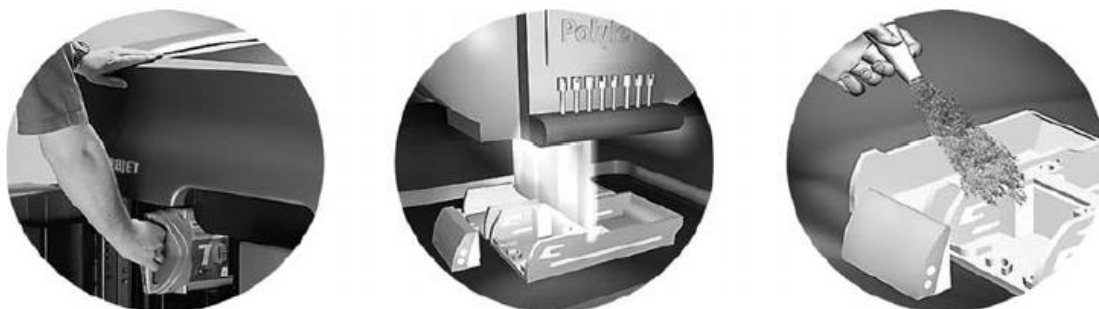
Слика 2.14 Шема *PolyJet* поступка: 1 – глава млазнице, 2 – x-оса, 3 – y-оса, 4 – UV светло, 5 – прототип, 6 – супротни материјал, 7 – радна подлога, 8 – z оса [19]

Код *PolyJet* поступка, глава млазнице (1) се креће напред-назад и наноси/штампа танак слој фотоосетљивог полимерног материјала на радну подлогу (7) у x-y равни. Сваки слој фотоосетљивог полимерног материјала очвршћава под дејством UV светлости (4) одмах након штампања. Користе се два различита материјала, један за израду модела (5), а други за израду потпорних структура (6) (ослонаца). Тачније, једна половина млазница главе наноси материјал за модел, а друга половина наноси материјал потпорне структуре, као што је приказано на слици 2.15. Након завршеног првог слоја, радна подлога се спушта за дебљину следећег слоја и глава за штампање започиње израду тог следећег слоја. Носачи (потпорна структура) се аутоматски генеришу и истовремено граде помоћу другог сета млазница, тако да се сваки слој састоји од материјала модела и/или потпорног материјала. Поступак се понавља све док се не изради и последњи слој модела [20].



Слика 2.15 Процес наношења фотополимерног материјала код *PolyJet* поступка: 1 – супортни материјал, 2 – материјал модела, 3 – тренутно UV очвршћавање [18]

Након израде модела, потпорна структура се лако уклања млазом воде (нпр. *WaterJet* технологијом) под високим притиском (слика 2.16) или ручно у зависности од облика модела. Танкозидне и моделе мањих димензија потребно је чистити при нижим притисцима. Робусни модели могу се чистити под већим вредностима притиска, чиме се скраћује време чишћења. Готови модели могу се обрађивати млазом честица, полирати, брусити, фарбати итд [14, 18].



Слика 2.16 Уклањање супортног материјала млазом воде [14]

Предност *PolyJet* поступка представља висок квалитет добијених модела. Због врло танког слоја модели су врло прецизни и имају јако глатку завршну површину, а пружа и могућност израде ситних детаља и танких зидова. Поступак је брз, није потребно накнадно умрежавање и могуће је користити различите материјале који омогућавају израду модела различитих геометрија и механичких својстава. Овим поступком могућа је израда модела у боји. *PolyJet* поступком могуће је и мешати материјале чиме се постижу циљана својства готовог модела (композитни модели). Недостатак овог поступка представља висока цена уређаја и релативно мале димензије модела [18].

Материјали који се примењују у *PolyJet* поступку су: фотополимерни акрилни материјали *FullCure 720*, *VeroBlue*, *VeroWhite*, *VeroGray*, *VeroBlack*, *DurusWhite* (сличан полипропилену – *PP*), *Digital ABS*, еластични *TangoPlus*, *TangoBlackPlus*, *TangoGray* и *TangoBlack* материјали. Материјали могу бити различитих боја и тврдоће. Користећи технологију *PolyJet Matrix* произвођача „*Connex*” могућа је израда делова од два различита материјала, који подсећају на делове добијене технологијом двокомпонентног ливења [10, 18].

2.3.5.1 Alaris30

Alaris30 представља јединствен 3D штампач компаније *Objet*, који нуди могућност израде висококвалитетних модела са финим детаљима. Има широк спектар примене и погодан је за израду различитих модела у канцеларијском окружењу. Базиран је на *PolyJet* технологији и одликује се креирањем модела уз велику прецизност. Принцип рада се заснива на наношењу фотополимерног материјала у танким слојевима на радну површину, градећи модел слој по слој. Сваки слој од фотополимера очвршћава под дејством *UV* светлости одмах након наношења. Помоћни супортни материјал у виду гела, који је посебно дизајниран за сложене геометрије, лако се уклања воденим млазом [20]. На слици 2.17 приказан је 3D штампач *Alaris30*.



Слика 2.17 3D штампач *Alaris30* [20]

Штампач *Alaris30* одликује се штампањем изузетно ситних детаља комбинујући танке слојеве од 28 μ m уз висококвалитетну резолуцију (600x600x900 dpi). Захваљујући изради модела са врло финим детаљима и глатком површином, *Alaris30* омогућава [20]:

- Израду делова за функционална тестирања,
- Проверу облика и уклапања,
- Високу тачност димензија и облика модела (0,1-0,2 mm),
- Израду комплексних геометрија и покретних елемената,
- Проверу дизајна за широк спектар примене,
- Штампање текста и других детаља који се морају истакнути.
- Израду модела са зидовима дебљине до 0,6 mm.

Поред предности у смислу квалитета израђеног модела, *Alaris30* се одликује и високом продуктивношћу. Димензије радног стола (300x200x150 mm) омогућавају израду великих или мањих модела истовремено уз велику брзину израде. Пуњење са четири кертрица омогућава израду модела до 36h без надзора. Захваљујући малим димензијама и тежини, *Alaris30* је *desktop* 3D штампач који је погодан за употребу у канцеларијском окружењу. Једноставно се инсталира на радном столу или посебном постолу и не захтева посебне услове за прикључење и инсталацију. Дизајниран је тако да буде једноставан за употребу, уз једноставно руковање и управљање штампачем. Користи софтвер *Objet Studio* који обезбеђује једноставан рад у фази препроцесирања. Предност ове машине представља и веома једноставно уклањање супортног материјала. Уклањање супортног материјала се може извршити неколико минута након завршеног процеса израде модела [20].

Функционалне карактеристике *Alaris30* 3D штампача, који ради на принципу *PolyJet* технологије, приказане су у табели 2.2.

Табела 2.2 Спецификације Alaris30 3D штампача [20]

Карактеристика	Спецификација
Величина радног стола (x,y,z)	300x200x150 mm
Максимална величина 3D модела	294x196x150 mm
Дебљина слоја	28µm
Тачност	0,1-0,2 mm, тачност варира у зависности од геометрије и величине модела
Резолуција	600x600x900 dpi
Материјали	VeroWhite, FullCure830 за моделе, FullCure705 гел за супортни материјал
Тежина кетрица	1kg
Број кетрица у машини	2 за модел и 2 за супортни материјал
Број глава за штампање	2
Димензије машине	852x620x590 mm
Тежина машине	83 kg
Захтевана снага	110-240 V, 50/60 Hz, 1.5 KW једнофазна
Услови радног окружења	Температура: 18-25°C, 30-70% релативне влажности
Улазни формат фајла	STL и SLC фајл

Висока прецизност израде модела омогућава израду различитих склопова са покретним деловима који се правилно уклапају. Такође, могућа је израда модела са финим детаљима и танким зидовима. Изузетно танки слојеви израде стварају глатке површине модела (*glossy* опција штампе) које се могу обојити тако да дају приближан изглед коначног производа. Такви модели могу бити идеални за маркетиншку презентацију. Издржљиви модели са изванредним детаљима и одличним површинским карактеристикама пружају директне алате за израду стварних силиконских делова. Глатке површине и издржљив материјал модела стварају моделе који су идеални за обликовање у вакууму, омогућавајући израду модела смањене тежине за паковање и економичну производњу алата [20].

Примери примене 3D штампача *Alaris30*, односно *PolyJet* технологије, приказани су на слици 2.18.



Слика 2.18 Примери примене 3D штампача Alaris30 [20, 21, 22]

2.4 Примена адитивне производње

С обзиром на нагли развој технологија за АМ, област примене значајно се проширила од настанка до данас. АМ технологије се највише користе у областима попут аутомобилске индустрије (управљачки механизми, спојнице, израда алата и калупа за различите отковке/одливке који су саставни делови аутомобила, израда делова за олдтајмере којих више нема на тржишту итд.), ваздухопловне индустрије, индустрије машина, робе широке потрошње (обућа, играчке, накит, музички инструменти), у електроници, затим у медицини/стоматологији (имплантанти од различитих материјала), војној индустрији, архитектури итд, као што је приказано на слици 2.19 [11, 23].

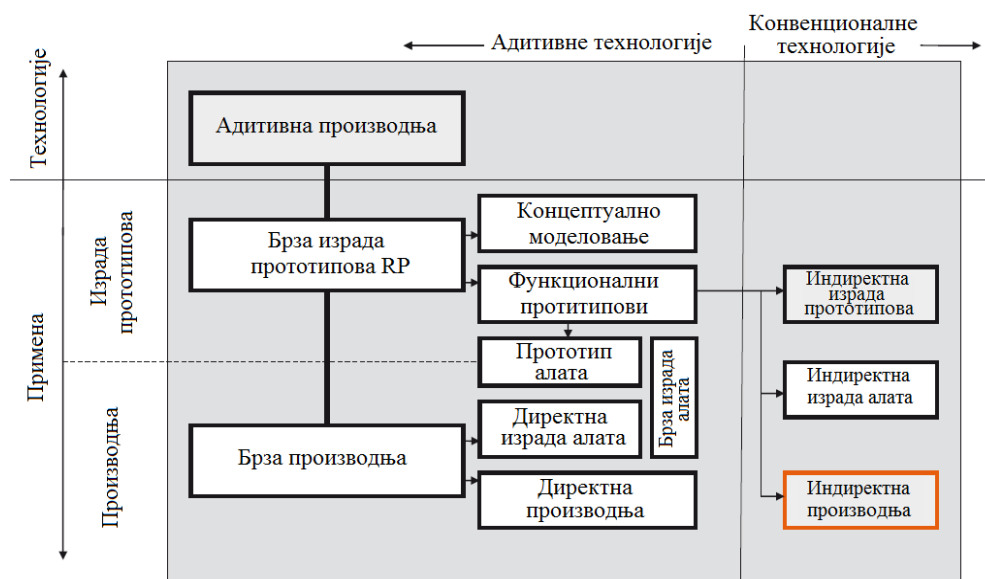


Слика 2.19 Примена адитивне производње у различитим областима [23]

Делови произведени на системима за адитивну производњу, најчешће се користе као модели за ливење металних делова, као делови алата, функционални делови, модели за *RT*, за проверу склопова, едукацију, визуелизацију, презентацију итд. Током свог развоја, технологије за АМ су у врло кратком временском периоду прешле пут од израде прототипова (1998. година) до израде готових делова спремних за уградњу у сложене склопове (2004. година). Треба напоменути да се развој АМ није ту зауставио, већ је са развојем материјала (металних, биокompatibilни итд.) проширена област примене на медицину и нанотехнологије. Управо зато, предвиђа се да ће ове технологије до 2030. године омогућити производњу органа што ће у одређеној мери заменити класичну донорску трансплантацију [24, 25].

2.4.1 Нивои коришћења АМ

У пракси се идентификација најбољег АМ поступка започиње разматрањем одговарајуће примене. Затим, разматрање посебних захтева, као што су димензије, квалитет површине, подношљиве механичке силе, температуре, итд., доводи до избора одговарајућег материјала, и на крају, до машине која омогућава добијање модела који задовољава све горе наведене захтеве. Уопште, различити АМ процеси могу се користити алтернативно за решавање истог проблема. Да би се дефинисала таква структура, прво треба разликовати значење појма „технологија” од „примене”. Технологија је дефинисана као наука о техничком процесу и описује научни приступ. Примена значи како се технологија користи, што се назива и практичним приступом. Да би се добио што бољи преглед коришћења адитивне производње, дефинисане су различите класе примене, односно такозвани „нивои коришћења”. Шематски приказ нивоа коришћења технологија за АМ приказан је на слици 2.20 [2].



Слика 2.20 Нивои коришћења АМ [2]

Као што се може видети на слици 2.20 адитивну производњу карактеришу три главна нивоа примене и то [2]:

1. Брза израда прототипова – *RP*;
2. Брза производња – *RM*;
3. Брза израда алата – *RT*.

2.4.1.1 Примена брзе израде прототипова

Брза израда прототипова (енгл. *Rapid Prototyping – RP*) представља категорију која обухвата израду модела на темељима *CAD* модела, рачунарске томографије или на темељу 3D модела добијеног скенирањем. Као материјали могу се користити дрво, полимери, метали, керамика, кополити итд., у различитим облицима (течном, прашкастом, чврстом стању). Модели се најчешће израђују у сврху процене облика и димензија, ергономских студија, за процену функционалности, израду узорка (мастер модела) калупа, затим за маркетиншке сврхе, тестирања у ваздушним тунелима итд. Могу се разликовати два под-нивоа: „концептуално моделовање“ и „функционални прототипови“. *Концептуално моделовање* дефинише групу делова који се примењују за верификацију основног концепта. Концептуални модели се најчешће користе у пољу индустријског дизајна и естетике или да би се створио утисак спољног изгледа. Користе се само за постизање просторног утиска како би се донела оцена о општем изгледу и пропорцијама. Због тога се делови називају и „*Show-and-tell models*“. Често се користе материјали који су јефтини и брзи за обраду. Брза доступност је неопходна да би се смањило време планирања и израде. Приоритети код оваквих модела су ниски трошкови улагања и материјала, а не отпорност модела. *Геометријски прототипови* користе се за контролу геометријских параметара. Детаљи су важни само ако утичу на геометријске параметре. Исто се односи и на пропорције, које се аутоматски остварују тачном геометријом. Квалитет површина углавном није важан, а исто тако могу се занемарити и механичке карактеристике. Користе се углавном јефтини материјали. Имају нешто мању примену у односу на концептуалне моделе. *Израда функционалних прототипова* примењује се ради омогућавања провере и верификације једне или више функција каснијег производа или доношења одлуке о производњи, иако се модел не може користити као завршни део већ само као прототип. Функције су дефинисане као физичка

својства и могу садржати механичко-техничке карактеристике (нпр. издужење, отпорност на високим температурама, могућност уградње и сл.). Пропорције и детаљи се могу занемарити у одређеној мери ако не утичу на функцију [2]. Различити прототипови добијени *RP* поступком приказани су на слици 2.21.



Слика 2.21 Концептуални (а), геометријски (б) и функционални прототипови (с) [2]

2.4.1.2 Примена брзе производње

Брза израда производа или брза производња (енгл. *Rapid Manufacturing – RM*) примењује се за израду готових производа који одмах иду на тржиште. Ако је резултат *RM* процеса део, процес се назива „директна производња”. У случају да је резултат *RM* процеса алат (калуп) тада се користи термин „директна израда алата”. Директна производња доводи до финалних делова који директно потичу из *AM* процеса. Данас је доступан широки спектар материјала из свих класа материјала (пластика, метали и керамика) који се могу директно обрадити *AM* поступком. Овде није важно да доступни материјали показују потпуно иста физичка својства као и материјали коришћени у традиционалним процесима израде. Међутим, мора се осигурати да се својства на којима је засновано инжењерско пројектовање могу реализовати одабраним *AM* процесом и материјалом [2]. Различити производи добијени *RM* поступцима дати су на слици 2.22.



Слика 2.22 Примери примене брзе производње [2]

2.4.1.3 Примена брзе израде алата

Развој брзе израде прототипова довео је до развоја концепта брзе израде алата (енгл. *Rapid Tooling – RT*). Термин брза израда алата укључује све процесе који примењују *RP* технологију за израду калупа или за директну производњу алата. Технологије брзе израде алата омогућиле су значајно смањење времена развоја и израде, као и трошкова, нарочито у области малосеријске производње. Велики значај су показале у области примене скуких алата [2, 7].

RT поступци се могу поделити на *меке* и *тврде поступке*. *Меки RT поступци* подразумевају израду алата од силиконске гуме, епокси смоле, течних легура и ливачког песка. Омогућавају само једно ливење и/или израду малих серија. *Тврди RT поступцима* израђују алати од алатних челика и погодни су за производњу већих серија. Следећа подела *RT* поступака односи се на начин израде алата, при чему се могу разликовати

директни и индиректни RT поступци. Директни поступци су они код којих се RP поступком директно израђује алат. Код индиректних се RP поступком израђује само главни модел за израду алата (мастер модел) на основу кога се касније прави сам калуп. Имајући у виду ове две основне поделе поступака, генерално се могу разликовати [7]:

- Директни меки *RT* поступци,
- Директни тврди *RT* поступци,
- Индиректни меки *RT* поступци и
- Индиректни тврди *RT* поступци.

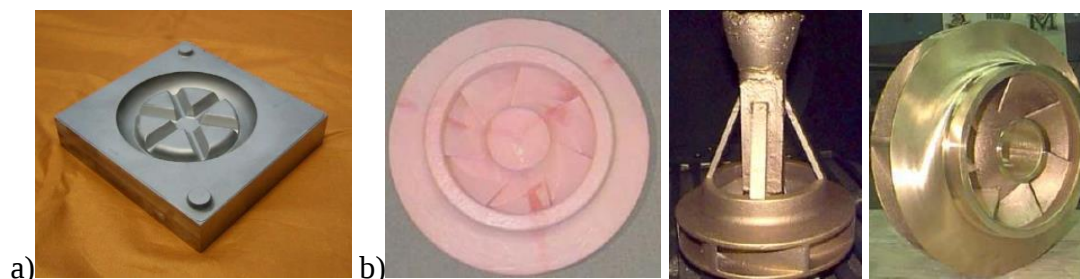
Директна израда алата технички припада директној производњи, али доводи до уметака, алата и калупа серијског квалитета. Иако се израда алата темељи једноставно на инверзији скупа података о производу (позитивно на негативно), постоје разлози да се они припишу посебном апликативном под-нивоу. Поред тога, за инверзију података потребна је конструкција алата, укључујући скалирање за компензацију скупљања, дефинисање линија раздвајања, углова нагиба, избацивача, клизача итд. [2].

Direct AIM (Direct ACES Injection Molding) представља *SLA* поступак за израду калупа (уметака) за ињекционо брызгање високог нивоа детаља. Помоћу *SLA* израђују се обе половине калупа, које се постављају у стандардни алат за брызгање пластике, као што је приказано на слици 2.23 [7, 18].



Слика 2.23 Калупи за ињекционо брызгање израђени *SLA-Direct AIM* поступком [18]

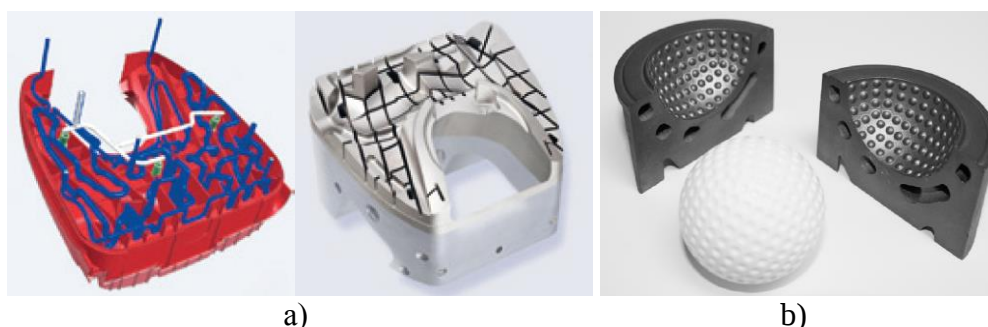
На слици 2.24-а приказан је изглед алата, који се добија методом распршивања метала у облику спреја преко *RP* модела. Користи се углавном при израде алата код малих серија. Слика 2.24-б приказује мастер модел (лево) добијен *RP* поступком од топљивог материјала за прецизно ливење. Топљењем мастер модела добија се шупљина у коју се улива метал у течном стању и формира одливак (у средини) који се накнадно обрађује (десно) [7, 18]



Слика 2.24 Алат добијен поступком распршивања (а) и мастер модел за прецизно ливење и добијени одливак [18]

Технологија *AM* на бази слојева омогућава израду унутрашњих шупљих конструкција. Као пример, умети за калуп могу бити израђени са унутрашњим каналима

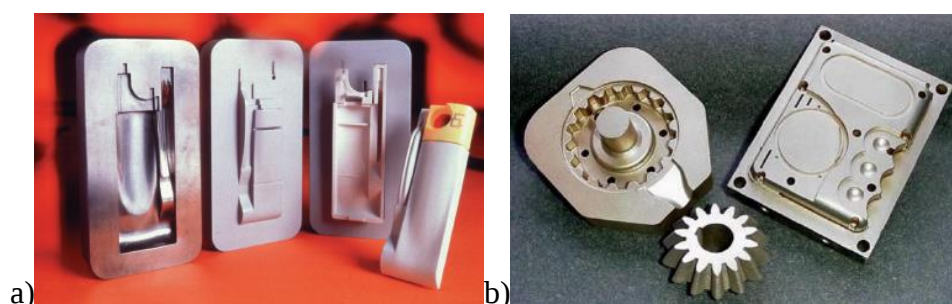
за хлађење који прате контуру шупљине испод површине (слика 2.25-а). Због повећаног одвођења топлоте, продуктивност калупа за убризгавање може се значајно повећати. Поред тога, канали за хлађење и грејање могу бити дизајнирани тако да добију интегрисани систем управљања топлотом и на тај начин много ефикасније алате [2].



Слика 2.25 Брза израда алата: а) Уметак за калуп са каналима за хлађење и пнеуматским избацивачима од алатног челика; б) Алат за дување пластике [2]

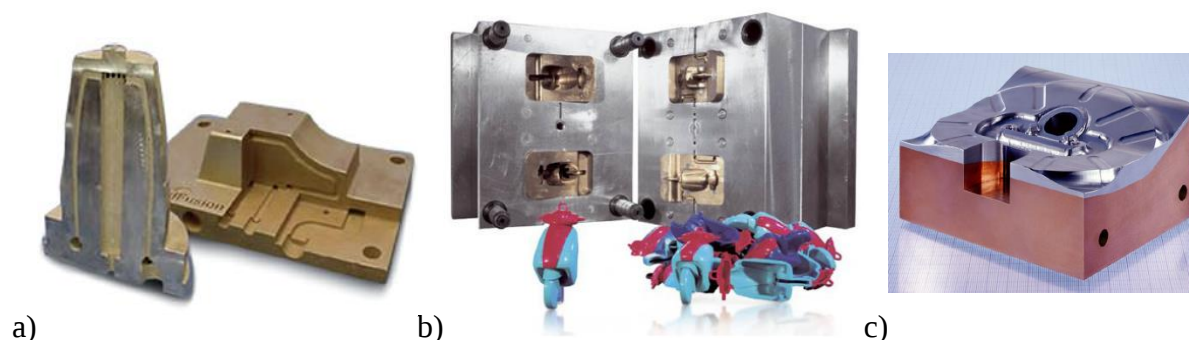
За израду челичних калупа за дување пластике, који се користи нпр. за израду лоптица за голф, потребна је велика прецизност. Помоћу поступка директног ласерског синтерованја метала (DMLS), могуће је произвести облик гравуре алата за дување пластике приказан на слици 2.25-б [2].

Поступак *3D Keltool* заснован је на изради металних калупних уметака помоћу модела израђеног *SLA* поступком. Заснива се на процесу синтерованја металног праха. Алат добијен овим поступком приказан је на слици 2.26-а. Пример калупних уметака добијеним индиректним ласерским синтерованјем метала дат је на слици 2.26-б [2].



Слика 2.26 Алати добијени *3D Kelton* поступком (а) и *IMLS* поступком [2, 18]

Уметак са унутрашњим каналима за хлађење, добијен *3D* штампом метала, приказан је на слици 2.27-а. На слици 2.27-б приказан је алат са две калупне шупљине, добијен *DMLS* поступком, а на слици 2.25-с алат добијен *DMD* поступком [2].

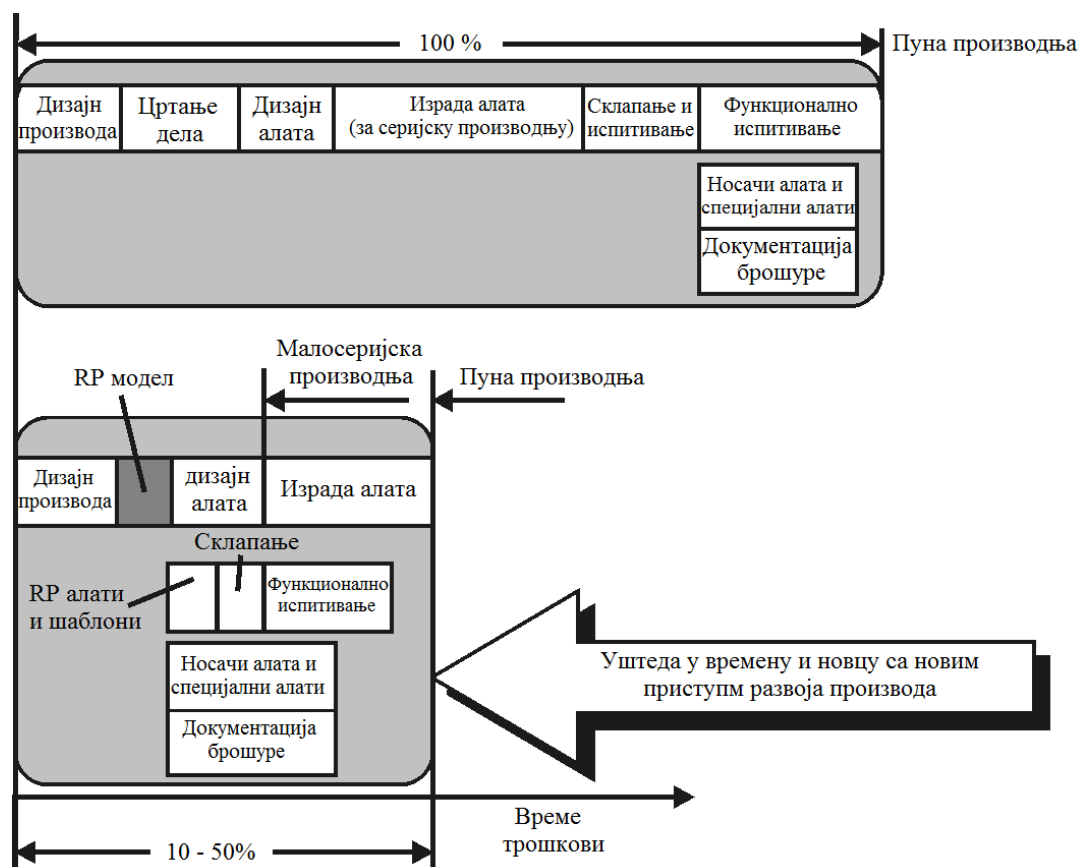


Слика 2.27 Алати добијени директним поступцима брзе израде алата [2]

2.5 Предности адитивне производње

Данашњи аутоматизовани АМ системи могу директно произвести функционалне делове у малим производним количинама. Делови произведени на овај начин обично имају тачност и квалитет површине нижи од оних израђених конвенционалном обрадом. Међутим, неки напредни системи су способни да произведу делове високог квалитета који су идентични или врло блиски онима који се производе конвенционалним методама. Произведени делови, уз одговарајућу накнадну обраду, имају карактеристике блиске коначном производу. Што је још важније, време за израду било којег дела, након што су доступни дизајнерски и пројектантски подаци, биће у значајној мери скраћено и може потрајати неколико сати. Предности АМ система су огромне и могу се сврстати у директне и индиректне [26].

Једна од предности АМ система јесте способност експериментисања са физичким објектима било које сложености у релативно кратком временском периоду. Производња било којег производа обухвата широк спектар различитих активности. У горњем делу слике 2.26 приказане су активности потребне за потпуну производњу конвенционалним приступом. Доњи део слике 2.28 представља АМ системе. У зависности од величине производње, уштеда времена и трошкова може се кретати од 50% до 90% [26].



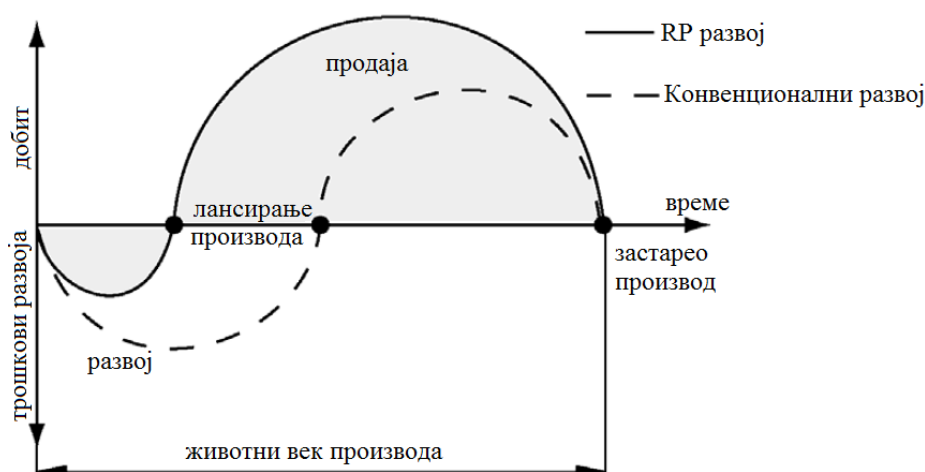
Слика 2.28 Смањење времена и трошкова производње делова коришћењем технологија за адитивну производњу [26]

Код конвенционалног начина развоја производа, након израде конструкционог решења производа и његовог 3D рачунарског модела, врши се конструкција алата, а затим израда прве серије производа, монтажа и тек након тога следи функционално тестирање. Уколико се уоче одређене грешке у конструкцији врше се корекције, што

директно утиче на цену. То изискује израду нових, односно, у најбољем случају дораду постојећих алата. Тек након добијања прве серије, која испуњава захтеве у погледу квалитета, започиње се серијска производња и пласман производа на тржиште. При примени *АМ* у процесу развоја производа, одмах након израде рачунарског 3D модела врши се израда прототипа или серије прототипова на неком од система за *АМ*. У случају да постоје грешке, врше се корекције, односно промене у конструкцији производа пре израде алата за серијску односно масовну производњу. Израда алата за производњу врши се тек након добијања прототипа који испуњава све захтеве који су дефинисани документацијом. Време добијања првог прототипа или серије прототипова коришћењем технологије за *АМ* значајно је краће од добијања истих конвенционалним начином [4].

Дизајнери производа могу повећати сложеност дела са малим утицајем на време и трошкове. *АМ* дозвољава прилагођавање облика из функционалних или естетских разлога, а сам дизајн делова се може оптимизовати у складу са захтевима купаца. Такође, омогућена је бржа анализа функционалности, облика и димензија модела производа. Применом *АМ* технологија може се постићи и виши степен визуелизације током раних фаза пројектовања што је битно у откивању и елиминацији грешака пројектовања пре израде алата. Откривање грешака у раној фази пројектовања може компанији донети и вишемилионске уштеде, посебно у великосеријској производњи. Захваљујући *АМ* моделима, значајно се умањују дуготрајне анализе и процене могућности производње што је резултат боље комуникације између појединих одељења компаније [7, 26].

Примена *АМ* у великој мери може смањити време до пласмана производа на тржиште. На слици 2.29 упоређен је *АМ* и конвенционални развој производа. Ово резултира смањеним ризиком, јер нема потребе да се пројектују потребе купаца неколико година унапред. Израђују се производи који задовољавају потребе купаца. Резултат овога се огледа и у смањеним трошковима развоја самог производа. Технологије за *АМ* омогућавају израду модела намењених истраживању тржишта, маркетинга и дизајна амбалаже. Поред повећања асортимана производа, потрошач може видети реалан прототип а не само илустрацију, а затим купити производе који ближе одговарају његовим захтевима у погледу квалитета [7, 26].



Слика 2.29 Животни век производа [18]

Примена технологија за *АМ* у фази пројектовања, све интензивније се примењују у многим компанијама, јер доводи до скраћења циклуса пројектовања и по више недеља. Смањење трошкова развоја може бити испраћено истовременим повећањем квалитета производа применом ових напредних технологија [7].

3. Принципи и технике оптичког 3D скенирања

Све строжији захтеви савременог тржишта приморавају компаније да непрестано траже нове начине за скраћење времена потребног за развој нових производа који задовољавају очекивања потенцијалних купаца. Предузећа све интензивније улажу у *CAD/CAM/CAE*, *RP* и читав низ нових технологија које пружају многобројне пословне користи. Једна од нових технологија која пружа предности у смислу скраћења времена развоја производа јесте реверзни инжењеринг. Реверзни инжењеринг (енгл. *Reverse engineering – RE*) је у суштини супротан процес класичном поступку дизајнирања и моделирања будућих производа. То је процес дуплирања постојећег дела, подскопа или производа, без цртежа, документације или рачунарског модела. Реверзни инжењеринг се дефинише као процес добијања 3D дигиталних геометријских података неког физичког објекта путем 3D дигитализера. Најчешће је то процес добијања облака тачака (енгл. *Point cloud*) неког физичког објекта путем 3D скенирања, из кога ће касније проистећи 3D *CAD* модел. Облак тачака представља дигитални опис објекта у тродимензионалном простору. *RE* обухвата две фазе процеса. У првој фази се врши дигитализовање података или мерење посматраног објекта, а друга подразумева 3D моделирање објекта на основу претходно прикупљених података [6, 7].

Данас је у употреби велики број уређаја за скенирање помоћу којих се врши мерење физичких објеката, а најчешћу примену имају технологије попут координатних мерних машина (*Coordinate Measurement Machine – CMM*), ласерског скенера, 3D дигитализера или компјутерске томографије (*Computer Tomography – CT*). Дигитални подаци, који се обично представљају као облак тачака, не садрже потребне тополошке информације, па се због тога они даље процесирају и моделирају, односно превode у неки погоднији формат (3D полигонални модел, 3D геометријски модел или *CAD* модел), помоћу одговарајућег софтвера. Након генерисања површина од дигитализованих података, оне се процесирају до формирања просторног солид модела [7].

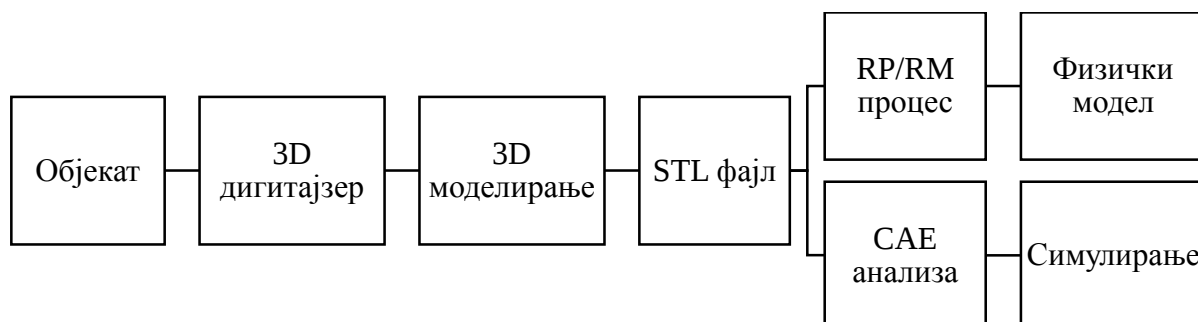
RE се данас широко користи у различитим областима. На пример, у аутомобилској индустрији, када се нови аутомобил лансира на тржиште, конкурентски произвођачи га могу купити и раставити како би дознали на који начин је направљен и како заправо функционишу његови поједини делови и склопови. *RE* нуди могућност решења многобројних проблема у фази пројектовања јер је физички модел извор информација за *CAD* модел. Други разлог за примену *RE* је и сажимање времена циклуса развоја производа. На конкурентном глобалном тржишту, произвођачи непрестано траже нове начине да скрате време развоја производа. На пример, компаније које примењују технологију ињекционог бризгања пластике морају драстично скратити време развоја алата и калупа. *RE* омогућава да се тродимензионални физички производ брзо превode у дигитални облик, конвертује и извезе за брзу израду прототипова/алата или брзу производњу. Користи од примене *RE* се могу видети у многим случајевима, а посебно када оригинални произвођач више не постоји, а купцу је потребан искључиво такав производ. Такође, примена реверзног инжењеринга може бити корисна и када оригинални произвођач више не производи жељене производе. Нпр. резервни делови авиона потребни су обично након неколико година његове употребе. Такође, помаже приликом обнове и производње дела за који не постоји *CAD* модел или за који су подаци застарели или изгубљени. *RE* се може корисити за контролу квалитета, упоређивањем израђеног дела са његовим *CAD* моделом добијеним скенирањем и моделирањем. Поред тога, своју примену може наћи и у анализи добрих и лоших карактеристика производа конкурената и израду 3D модела на којима ће се вршити редизајн [6, 27].

3.1 Принцип и фазе реверзног инжењеринга

Квалитет финалиних модела зависи у највећој мери од прикупљених података, употребљених метода и његове намене. Добијање података врши се различитим мерним инструментима, који се могу поделити на контактне и бесконтактне. Методе добијања података варирају од потпуно аутоматизованих техника, до техника које се у великој мери ослањају на корисника. Тачност података у великој мери зависи од поузданости и прецизности ових инструмената. Типичан *RE* процес започиње одабиром објекта који ће се скенирати. Затим се, одговарајући 3D дигитајзер за прикупљање података користи за генерисање необрађених података, обично информација о облаку тачака. Облак тачака је дигитални опис и представља скуп координата тачака (x, y, z) са површине скенираног објекта. Области тачака нису директно употребљиви у већини инжењерских примена све док се не претворе у одговарајући формат, као што су полигонални модели (добijени триангулацијом), *NURBS* површински модели или *CAD* модели [27].

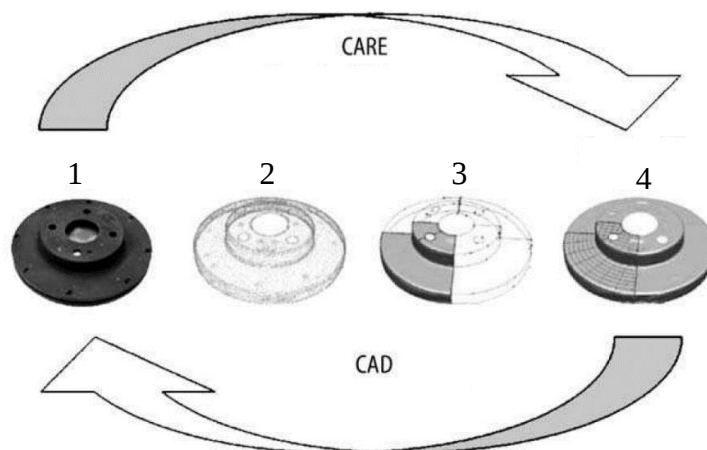
Метода триангулације заснива се на формирању мреже (са троугаоним елементима) која ће заузимати тополошке карактеристике дела на основу података о облаку тачака. То је апроксимативни приказ површина и других геометријских карактеристика са троуглом, који се обично чува у *STL* формату. Повећање броја троуглова ће пружити бољу презентацију површина, али ће истовремено повећати и величину датотеке. Оптималан број троуглова софтвер одређује аутоматски или ручно од стране пројектанта како би се остварила равнотежа између прецизности дела и величине датотеке података. Формирана триангуларна мрежа се након тога „полира“ како би се смањили сувишни врхови (повезане тачке) и изравнале површинске закривљености у складу са пројектним захтевима. У почетном прикупљању података из облака тачака, подаци се често преклапају како би се осигурала потпуна покривеност дела предмета. Одговарајућа обрада ових необрађених података преусмеравањем, премештањем, уклањањем и додавањем података је од суштинске важности. Различите методе обраде података развијају се и примењују у различитим *RE* софтверским пакетима. У сегментном приступу, иницијални подаци о облаку тачака се сегментирају са дефинисаним границама. Ови дискретни површински сегменти (поља) се накнадно побољшавају одговарајућим математичким моделом, као што су параметарско моделирање, квадратне функције или *NURBS*. Сваки сегмент се тада поставља у одговарајуће подручје површине дела да би се изградио симулирани модел [27].

Реверзни инжењеринг се најчешће користи за брзу израду прототипова од скенираног објекта, па се због тога дигитални модел преводи у *STL* формат, који се затим учитава у оперативни систем машине за *RP*. Фазе технике реверзног инжењеринга за укључивање у *CAD/CAM/CAE* систем или у *RP/RM* процес, шематски су приказане на слици 3.1 [7].



Слика 3.1 Шематски приказ фаза примене *RE* технике [7]

CAE (компјутерски подржани инжењеринг) кроз CAD и CAM технологије је аутомазација инжењеринга и производње, у којој дизајн формализује идеје кроз рачунарско моделирање, а затим те моделе преводи у стварне објекте. Процес компјутерски подржаног реверзног инжењеринга (енгл. *Computer Aided Reverse Engineering* – CARE) се одвија у супротном смеру. CARE креира рачунарски модел објекта, мерењем објекта какав постоји у стварном свету. Шематски приказ овог тока приказан је на слици 3.2 и служи за разумевање овог процеса. Први корак у CARE процесу је мерење односно прикупљање тачака дуж површине физичког објекта (1). Свака тачка има x , y и z координате које лоцирају тачку у 3D простору. Скуп ових тачака познат је као облак тачака (2). Повезивањем ових тачака настаје полигонална мрежа (3) из које ће касније проистећи CAD модел објекта (4) [6].

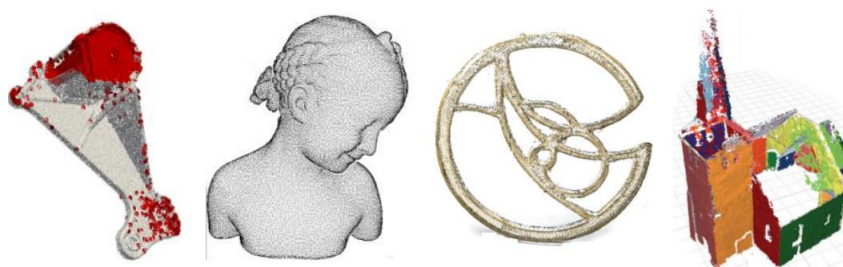


Слика 3.2 Процес компјутерски подржаног реверзног инжењеринга: 1 – стварни објекат, 2 – облак тачака, 3 – полигонална мрежа 4 – 3D CAD модел [6]

Процес реверзног инжењеринга се може поделити у четири фазе, и то [7]:

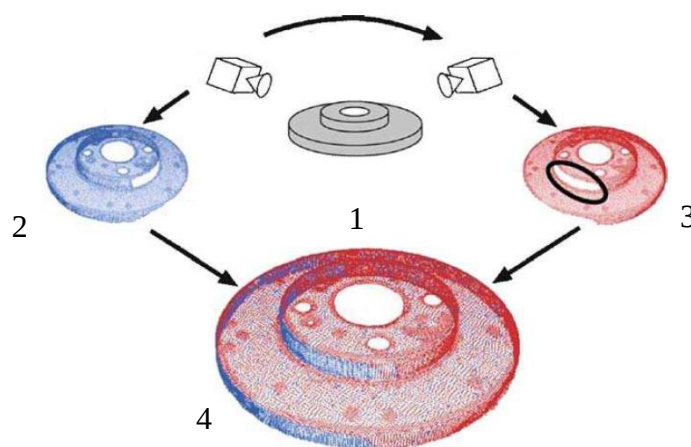
1. Планирање сцене за скенирање;
2. Аквизиција података (тачака);
3. Обрада добијених резултата и
4. Креирање геометријског модела.

Сваки RE процес започиње скенирањем физичког објекта. Ова фаза обухвата одабир одговарајуће технике скенирања, припрему физичког објекта за скенирање и извођење скенирања за прикупљање информација (подаци о координатама тачака) које описују све геометријске карактеристике физичког објекта. За скенирање геометрије физичког објекта користе се 3D скенери, стварајући облаке тачака, који дефинишу геометрију површине. Један део ће се скенирати више пута из више различитих оријентација, у зависности од комплексности објекта, како би се скенирање извршило у потпуности. Скенирају се само спољашње површине, а за добијање података о унутрашњој (скривеној) геометрији користе се CT (компјутеризована томографија) или MR (магнетна резонанца) скенери. Облак тачака представља резултат након сваког корака скенирања, при чему се бележи x , y и z координата за сваку тачку које дефинишу њихову локацију у простору. Код неких скенера се бележе и додатне вредности које могу описивати боју или интензитет. Сваки пролаз скенирања садржи између 50,000 и 2,000,000 тачака. Као резултати 3D процеса скенирања, облаци тачака се користе у многе сврхе, укључујући креирање 3D CAD модела у производњи делова, метрологији, инспекцији квалитета, визуализацији, анимацији, рендерингу итд. Изглед облака тачака код различитих апликација приказан је на слици 3.3 [6, 7, 28].



Слика 3.3 *Облаци тачака код различитих апликација [28]*

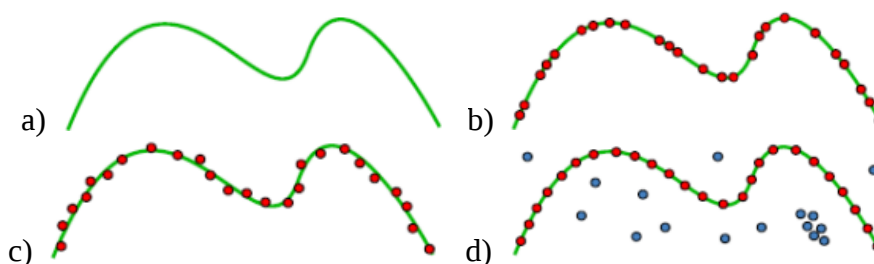
На слици 3.4 приказан је процес добијања облака тачака скенирањем објекта (1) (диск кочнице) из два различита угла, тако да добијени резултати скенирањем из првог (2), допуњују сакривене делове објекта из другог угла скенирања (3), при чему се добија потпуни облак тачака (4) [6].



Слика 3.4 *Облак тачака добијен скенирањем објекта из два различита угла:
1 – објект који се скенира, 2 – облак тачака добијен скенирањем са леве стране,
3 – облак тачака добијен скенирањем са десне стране, 4 – коначни облак тачака [6]*

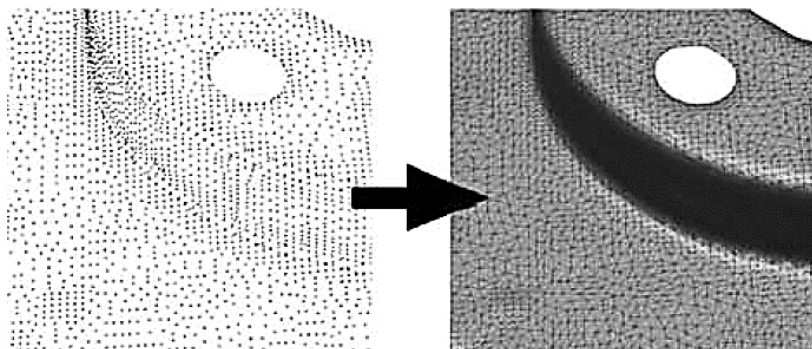
Резултат 3D дигитализације (облак тачака) садржи велику количину података уз присутне грешке мерења (шум). Због тога је у следећој фази потребно извршити препроцесирање резултата 3D дигитализације. У овој фази се врши филтрирање шума, тј. одстрањивање грешака, уклањање пикова, тачака ван опсега и редуковање непотребних података који би успоравали касније просецирање [27].

Различите форме облака тачака дела, датих у случају криве у 2D приказу, дате су на слици 3.5. Слика 3.5-а приказује оригинални облик 2D криве коју је потребно скенирати. Неуниформно узорковање на кривој приказано је на слици 3.5-б. Тачке које су насумично распоређене у близини површине се сматрају шумом (слика 3.5-с), а тачке које су далеко од површине се могу дефинисати као тачке ван опсега (слика 3.5-д) [27].



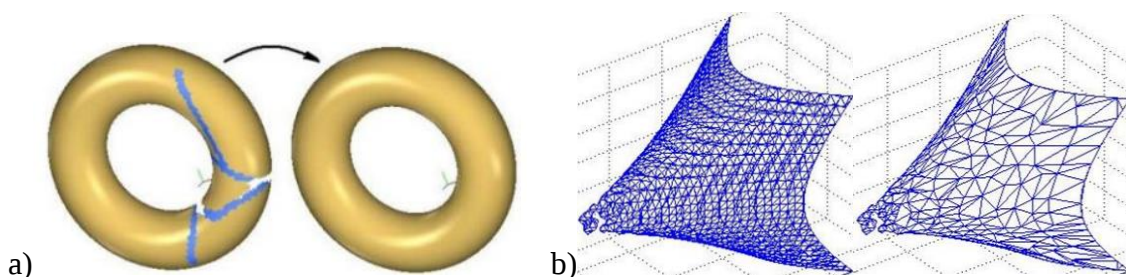
Слика 3.5 *Различите форме облака тачака датих у случају криве у 2D приказу [27]*

Обрада добијених података скенирањем подразумева реконструкцију физичког модела, односно генерисање његовог *CAD* модела. На почетку се врши креирање површинског (*surface*) 3D модела, на основу кога се генерише чврст (*solid*) модел. Један од приступа јесте *Cross-sectional* приступ, који подразумева генерисање површинског модела на основу узастопних попречних пресека објекта (*CT* технологија). У другом приступу, 3D површински модел се добија конвертовањем облака тачака у полигоналну мрежу (слика 3.6) из које се касније креирају *NURBS* површине (*CMM* технологија) [7].



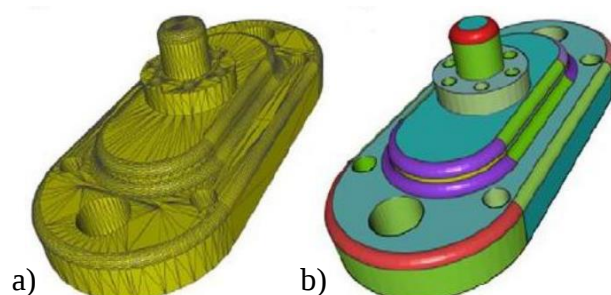
Слика 3.6 Добијање полигоналне мреже триангулацијом из облака тачака [6]

Може се издвојити неколико главних корака у фази обраде података. Први корак подразумева *пречишћавање података*, јер се грешке мерења морају исправити. На почетку се пречишћавање података изводи аутоматски помоћу одговарајућег софтвера. Софтвер користи математичке алгоритме и открије све оно што не улазу у задате оквире и уклања га из облака тачака. Након тога, у случају да је то неопходно, пројектант може додатно ручно изабрати неке тачке из облака тачака и обрисати их. *Придруживање података* представља корак који се такође у великој мери изводи аутоматски. Прегруписавање скенираних података се може изводити и ручно, за потпуно дефинисање жељеног 3D облика. *Интеграција података* представља корак где се прави унифицирани скуп података од скупа свих појединачних скенираних физичких објеката. Овај процес је потпуно аутоматски. Да би се добила глатка полигонална мрежа, неопходан је корак *финог подешавања*. У овом кораку се изводи попуњавање отвора (слика 3.7-а), изоштравање ивица и изравнање неравних површина (уклањање ефекта „поморанчине коре”). На слици 3.7-б приказан је пример редукције тј. укрупњавања полигона. Након подешавања добија се *STL* фајл који се може користити у жељеној апликацији или за додатно процесирање за добијање површинског или солид модела. Време и спретност пројектанта имају пресудан значај на квалитет излаза код апликација где се захтевају 3D *CAD* подаци. *Креирање NURBS* површина, које у потпуности одговарају оригиналном делу, је временски захтеван и детаљан процес. Креирају се комбинацијом аутоматских функција и додатним ручним манипулисањем података од стране оператера у софтверу. Датотека се на крају изводи у *IGES* или *STEP* фајл и увози у *CAD* систем [7].



Слика 3.7 Попуњавање постојећих шупљина на мрежи (а) и редукција полигона (б) [27]

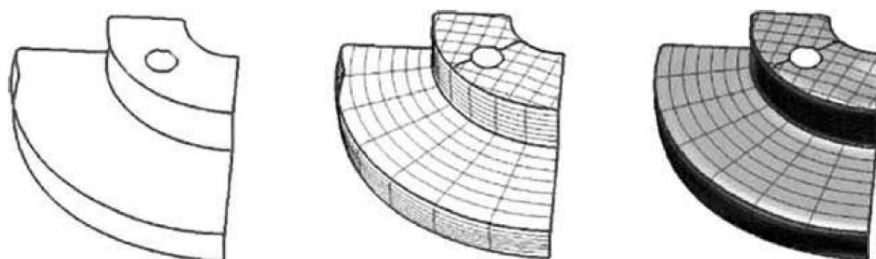
У случају врло сложених површина потребно је извршити и сегментацију података. Сегментација (слика 3.8) се може описати као процес дељења резултата 3D дигитализације на смислене регионе или процес екстракције важних елемената из облака тачака [7].



Слика 3.8 Сегментација: а) Триангулисани облак тачака; б) Модел са регионима [27]

По завршетку претходне фазе, могуће је фајл директно увести у неку CAD апликацију. Међутим за кориснике који користе програме као што су CATIA, Pro/Engineer, SolidWorks, Unigraphics, процес овде није завршен у потпуности. Увежени подаци представљају обичан *solid* модел који не препознаје карактеристике попут конуса, сфере или коцке. У већини случајева, *RE* фајл представља колекцију независних површина које се морају саставити тако да формирају површински или солид модел. Због недостатка параметарских дефиниција, нови CAD модел од *RE* података мора бити креиран и за најмању промену [7].

За већину сложених објеката, једна параметризована површина није остварива и није практична за цео објект. Уместо тога, објект се мора поделити у граничне површине односно тзв. „закрепе”, а затим свакој следећој граничној површини моделирати властита параметризована површина. Стога је први задатак подела објекта у одговарајуће граничне површине и затим додељивање параметара свим граничним површинама појединачно. Главни изазов је идентификација одговарајућих граничних површина, посебно зато што параметризоване површине претпостављају правоугаону структуру. Правоугаоници не одговарају произвољним границама које се често јављају при одабиру граничних површина. Као резултат, у додатном кораку мора се одсећи површина до ових граница. Ако је гранична површина идентификована, додељивање параметара може бити у великој мери једноставније. За решавање претходно наведеног проблема може послужити израда *B-Spline* модела. Слика 3.9 на једноставан начин приказује површинско уклапање преко граничних површина [6].

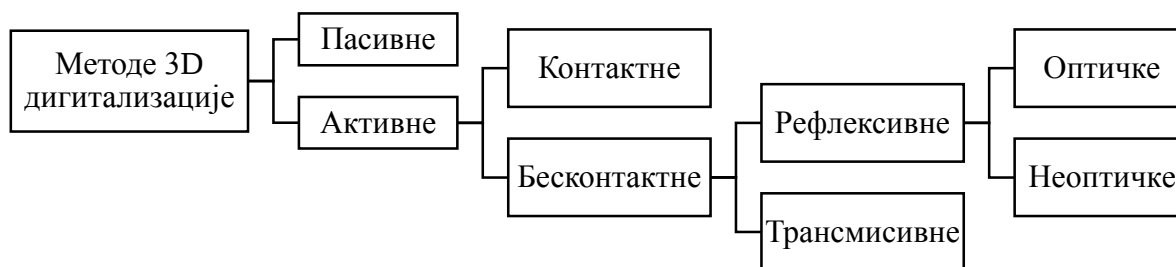


Слика 3.9 Типичан редослед формирања солид модела преко граничних површина [6]

На слици 3.9 приказан је поступак детекције површинских дисконтинуитета који служе као границе између елемената. Затим се *NURBS* уклапа на резултирајуће елементе. Завршетак овог корака представља финализацију *CARE* процеса, који је првобитно приказан на слици 3.2 [6].

3.2 Технике и уређаји

Један од највећих изазова реконструкције физичких објеката је снимање његових геометријских детаља. Срећом, напредни уређаји су развијени да приказују тродимензионалне карактеристике физичког објекта и преводе их у 3D моделе са великом тачношћу. Подаци се могу добити директно помоћу дигитајзера који је повезан са рачунаром на коме је инсталиран софтвер за *RE*. Најзаступљеније технике дигитализације могу се поделити у две групе, на оптичке бесконтактне и механичке контактне системе. Обе групе система мере спољне карактеристике дела да би добиле његове геометријске и димензионалне информације [27]. Шематски приказ поделе метода 3D дигитализације дат је на слици 3.10.



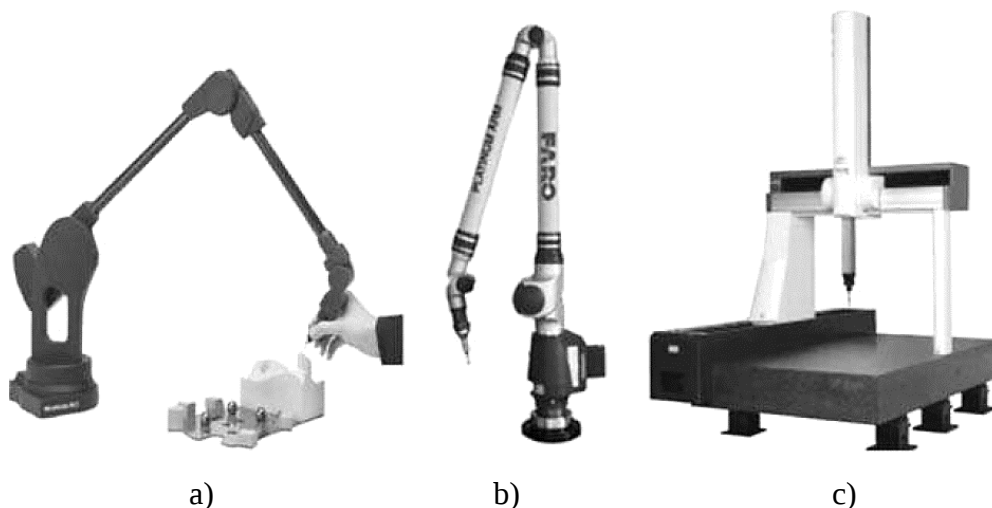
Слика 3.10 Шематски приказ метода 3D дигитализације [18]

Контактне методе представљају најекономичније 3D дигитализаторе. Као што и сам назив сугерише, контактне методе карактерише контакт објекта и сензора, који је овде типично мерни пипак. Они мере ограничен број тачака преко циљаног дела, а затим шаљу податке на рачунар где информације обрађује софтвер за израду електронске слике дела. Најчешће се користе код делова са нешто једноставнијим геометријским облицима и обично пружа високу тачност. Типичан представник ових механичких система су *СММ* уређаји [18, 27].

За скенирање физичких објеката *бесконтактним методом*, обично су потребне само ручне акције попут усмеравања уређаја ка самом објекту. Све остале радње, као што су фокусирање и снимање топографских карактеристика, аутоматски ће се обрадити од стране уређаја за скенирање. Предност бесконтактних метода се огледа у већој брзини аквизиције података од механичких. Све бесконтактне методе се могу поделити на рефлексивне и трансмисивне. Принцип *рефлексивних метода* 3D дигитализације заснива се на пројектовању сигнала одређене врсте на физички објекат и детектовању рефлектоване информације са тог предмета. Рефлексивне методе се могу поделити на оптичке и неоптичке методе. *Оптичке методе* користе принципе триангулације (на бази ласерске или структуриране светлости), интерферометрије, активне стеровизије и оптичких радара. Интерферометрија се заснива на анализи интерферентних пруга (шаблона) чији је облик последица врсте неравнина на површини која се дигитализује. Стеровизијски принцип заснива се на пројектовању две слике истог објекта, снимљене под различитим угловима, које омогућавају стварање ефекта треће димензије, тј. дубине. Оптички радару могу радити на принципу прорачуна времена и амплитудне модулације. У *неоптичке методе* спадају микроталасни радару и ултразвук. *Трансмисивне методе* детектују слабије сигнале (најчешће енергетске) након проласка кроз мерни објекат, односно мере количину енергије коју објекат није апсорбовао. У ову групу спадају радиографија (дигитална и филмска), компјутеризована томографија, магнетна резонанца, ултразвук итд [18]. У наставку рада ће нешто детаљније бити описани 3D скенери, *СММ* дигитализатори и аксијална томографија.

3.2.1 Координатне мерне машине – CMM

Рад механичких система заснива се на принципу механичког контакта са физичким објектом преко контактеног уређаја. Координатне мерне машине (енгл. *Coordinate measuring machine – CMM*) користе контактне методе аквизиције 3D геометрије. Представља најпознатију и најраније развијену контактну методу реверзног инжењеринга. Као што је већ напоменуто, контактне методе карактерише контакт објекта и сензора односно мерног пипка. Прелажењем мерног пипка преко површине предмета одређују се координате тачака површине објекта. Из формираног облака тачака се формирају полигони, а затим *NURBS* површине [7, 11, 18]. Примери контактних мерних машина дати су на слици 3.11.



Слика 3.11. CMM уређаји: а) *Immersion MicroScribe MX* зглобна мерна рука; б) *Faro Technologies* зглобна мерна рука; в) *Mitutoyo* CMM машина [6]

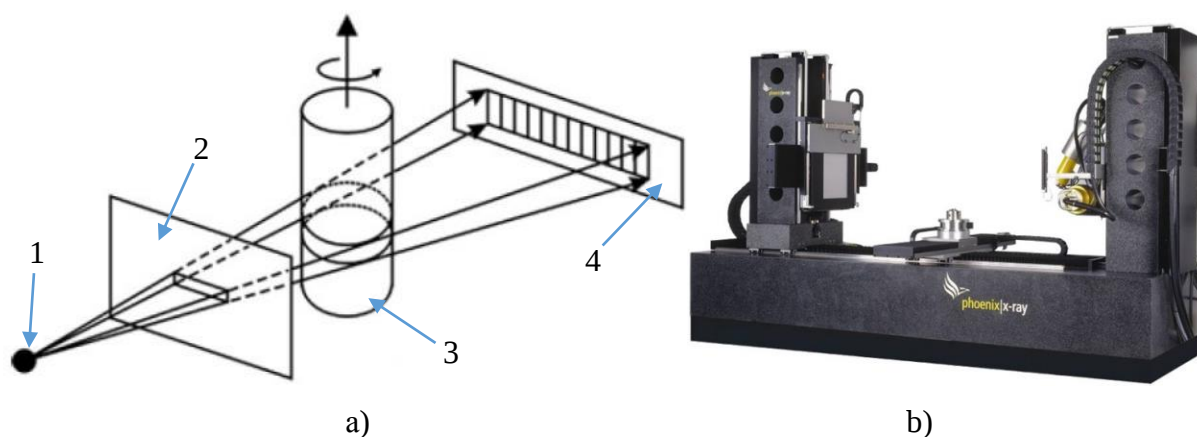
CMM уређаји могу бити аутоматски и ручно вођени. Аутоматски су познати под називом *CNC CMM* системи и управљани су програмском апликацијом. Код оваквих система се аутоматски снимају координате тачака. За разлику од њих, принцип рада ручно управљаних CMM система се заснива на ручном управљању мерног пипка од стране оператера за добијање координата тачака на површини скенираног објекта. Ручни CMM уређаји су често у форми механичке руке која има више степени слободе покрета. Захваљујући енкодерима и потенциометрима одређује се позиција сваког дела руке [7, 11].

Мерни уређај је смештен на радном столу, обично у x-y равни. Мерни пипак је постављен вертикално и може се померати у z правцу. Додиром мерног пипка на површину скенираног објекта региструју се координате самог врха мерног пипка и записују помоћу одговарајућег софтвера. Континуираним померањем мерног пипка по површини објекта врши се записивање читавог низа тачака, које се затим користе за креирање CAD модела [11].

Предност контактних метода у односу на бесконтактне методе је већа тачност мерења. Такође, представљају јефтиније уређаје у односу на бесконтакте. Применом CMM уређаја могуће је дигитализовати транспарентне и рефлектујуће објекте јер не зависе од квалитета површине. Способни су за мерење дубоких прореза. Као недостатак оваквих уређаја може се навести мануелни рад. За скенирање веома сложених и закривљених површина захтевају велики уложени рад [6, 7].

3.2.2 Компјутеризована томографија – СТ

Компјутеризована томографија (енгл. *Computer Tomography – CT*) представља технологију помоћу које је могуће 3D дигитализовати објекте са недоступним унутрашњим површинама и припада трансмисионим методама 3D дигитализације. СТ је базирана на примени Х-зрачења и представља дигитализовани процес. При проласку кроз материјал дела, Х-зраци атенуирају (слабе) услед апсорпције или расејавања. Ниво атенуације зависи од дужине пута који прелазе унутар апсорбирајућег материјала, затим од структуре материјала и његове густине (односно атенуационог коефицијента μ), као и од енергије Х-зрака. Количина радијације која се преноси дуж сваке пројекционе линије се сакупља. Након сакупљања свих података следи њихово дигитално филтрирање и математичко пројектовање на матрицу. Тако се добија расподела густине материјала од кога је објекат израђен. Затим, када се ове густине мапирају, добијају се пресеци објекта по танким слојевима, који заједно формирају 3D модел [7, 18]. Шема поступка и пример СТ машине дати су на слици 3.12.



Слика 3.12 Компјутеризована томографија: а) Шема поступка: 1 – уређај за емитовање х-зрака, 2 – Уређај за стварање паралелног снопа зрака, 3 – објекат, 4 – детектор; б) Пример индустријске СТ машине Phoenix X-ray [29]

СТ омогућава недеструктивну карактеризацију у унутрашњости објекта захваљујући релативно доброј продорности Х-зрака, као и осетљивости на густину материјала објекта. Ово га чини врло погодним за примену у индустријској контроли. Подједанако добро се примењује и на металним и на пластичним деловима. Исто тако, може се применити и код глатких и текстурисаних површина, без обзира на то да ли је део пун или израђен од влакнастих материјала. Треба рећи и да је СТ индиферентан на квалитет обрађене површине. Код ове методе 3D дигитализације, елиминисана је потреба за уклапањем више облака тачака јер се укупна геометрија објекта добија у само једном скенирајућем пролазу. Не захтева никакве додатне приборе и није потребно ни накнадно померање објекта што је још једна од предности компјутеризоване томографије [18].

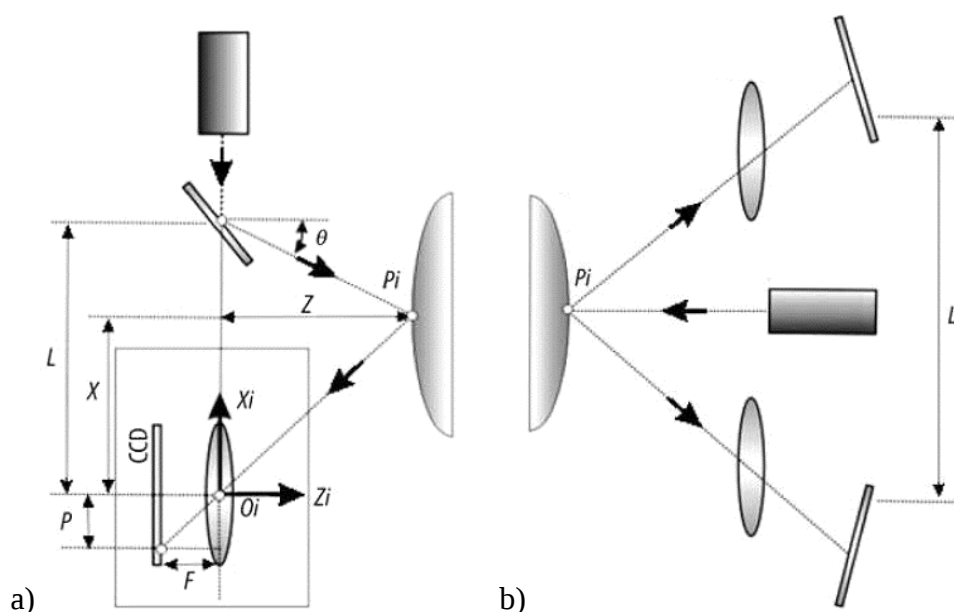
Данас су индустријске и сродне СТ технологије комерцијално доступне и специјализоване за индустријску примену. СТ и микро СТ скенери високе резолуције могу да уоче веома ситне детаље, чак и када су објекти направљени од материјала велике густине. Применљив је за широк спектар материјала, укључујући стене, кости, керамику, метале, пластику и мека ткива. Веома висока цена ових уређаја у погледу хардвера и софтвера за обраду података представља један од недостатака. Као недостатак се може навести и јонизујуће Х-зрачење, које може штетно деловати на човека, па ова технологија захтева веома опрезно руковање [6, 7].

3.2.3 3D Скенери

Најпознатије оптичке методе су засноване на принципу триангулације на бази ласерске или структуриране беле светлости. Основна подела свих ових метода је према начину кретања објекта и система, па се тако могу разликовати [18]:

1. Методе код којих је скенер (светлосни извор и сензор) стационаран, док се платформа (која носи објекат) креће транслаторно и ротационо у оквиру видног поља;
2. Методе код којих је објекат стационаран, а скенер покретан;
3. Методе код којих су и објекат и скенер непокретни, а усмеравање светлосних извора и сензора се изводи помоћу огледала, при чему је битно да сензор буде синхронизован са светлосним извором.

Већина ласерских скенера користи једноставну геометријску триангулацију за одређивање површинских координата објекта. Две различите варијације триангулације су шематски приказане на слици 3.13. Триангулација представља методу која на основу локације и углова између извора светлости и фото-осетљивог сензора (*CCD*) одређује позиција. Према слици 3.13-а, извор светлоси високе енергије се фокусира и пројектује под претходно одређеним углом на жељену површину. Након тога, фото-осетљиви сензор прикупља рефлексију са површине, а затим се геометријском триангулацијом на основу познатих растојања и углова израчунава позиција тачке на површини у односу на референтну раван [6, 18].



Слика 3.13 Шематски приказ једноструке (а) и двоструке триангулације (б): 1 – извор светлоси, 2 – огледало, 3 – објекат, 4 – сочиво, 5 – фото-осетљиви сензор [6]

У систему са једном *CCD* камером (слика 3.13-а) уређај преноси тачку светлости (или линију) на објекат под одређеним углом. *CCD* камера открива положај рефлектоване тачке (или линије) на површини. У другом случају, тј. у двоструком систему, користе се две *CCD* камере (слика 3.13-б). Пројектор светлости није укључен ни у какве мерне функције и може се састојати најчешће од покретне светлосне тачке или покретне светлосне линије, а у неким случајевима и од покретних пруга. Пошто је фиксна дужина L између извора светлости и камере позната из калибрације, коришћењем геометријске триангулације из познатог угла θ , фокусне дужине камере F , координате

рефлексије осветљене тачке P и фиксне основне дужине L , позиције осветљене тачке P_i у односу на координатни систем камере може се израчунати на следећи начин [6]:

$$Z = \frac{FL}{P + F \tan \theta} \quad (3.1)$$

$$X = L - Z \tan \theta \quad (3.2)$$

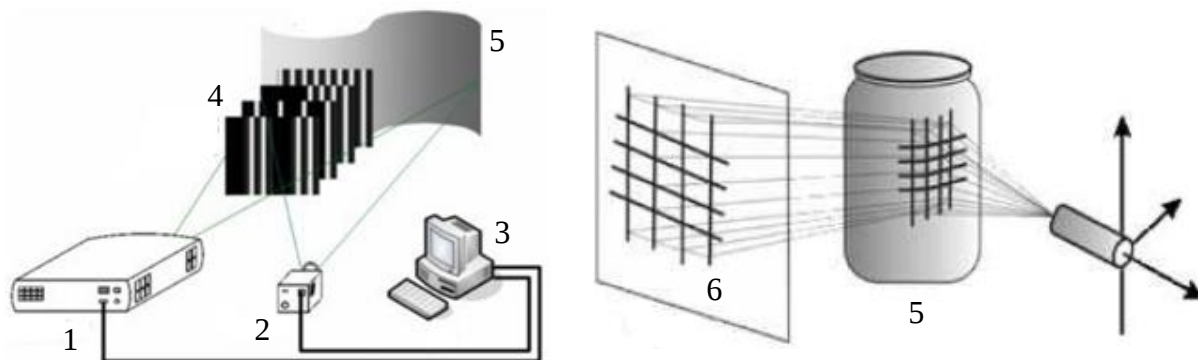
Грешке мерења у P и θ могу се одредити из следеће једначине [6]:

$$\Delta Z = \frac{Z^2}{FL} \Delta P + \frac{Z^2 \sec^2 \theta}{L} \Delta \theta \quad (3.3)$$

Грешка мерења Z параметра (3.1) директно је пропорционална вредности Z^2 , али обрнуто пропорционална фокусној F и фиксној основној дужини L . Због тога, повећање основне дужине може произвести већу тачност мерења. Из практичних разлога, основна дужина се не може повећати по слободном избору, а ограничена је хардверском структуром скенера. Због тога се триангуларни скенери најчешће користе за скенирање малих предмета на кратким раздаљинама [6].

Предност ласерске триангулације представља могућност одличног фокусирања па чак и са велике удаљености. Ласерска светлост има једнозначну таласну дужину, а захваљујући овој чињеници, сензор се може прекрити појасним филтером за ту таласну дужину и тако смањити осетљивост на амбијентално осветљење. На овај начин се смањује и могућност појаве евентуалне грешке. Код оваквих ласера који се примењују за триангулацију, не јавља се проблем расипања топлоте, што се често дешава код некохерентних светлосних извора. Недостатак може представљати појава ласерских пега, затим потреба за специјалним заштитним мерама, посебно код уређаја који раде на видљивим и ултраљубичастим таласним дужинама. Спорији процес аквизиције података ласерском триангулацијом, због тога што примењује само једно-тачкасто или једно-линијско скенирање, представља још један недостатак ове методе [18].

Триангулација структурираном светлосћу или вишеллинијска триангулација (слика 3.14), заснива се на пројектовању више линија на објекат, са циљем убрзања процеса 3D дигитализације. Пројектор пројектује више линија на објекат, при чему свакој одговара јединствена кодна шифра. Кључни елемент процеса је идентификација линија на сензору. Фото-осетљиви сензор детектује рефлектоване сигнале. Управљачка јединица повезује кодиране пројектоване линије и сигнале на фото-осетљивом сензору. Удаљеност тачака од објекта, односно њихове координате, израчунавају се на основу тригонометријских односа пројектоване и рефлектоване светлости [18].



Слика 3.14 Структурирана светлосна триангулација: 1 – пројектор, 2 – камера, 3 – рачунар, 4 – кодиране линије, 5 – објекат, 6 – мрежа кодираних линија [6, 18]

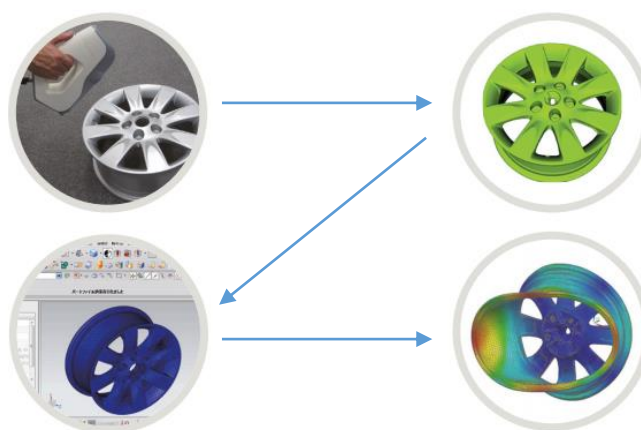
3.2.3.1 ArtecEva Lite

Уређај *ArtecEva Lite*, приказан на слици 3.15, представља један од најкоришћенијих скенера за 3D дигитализацију објеката који ради на принципу триангулације структурисане беле светлости (Расположив у Центру за виртуелну производњу Факултета инжењерских наука – ЦЕВИП). Као резултат, овај приступачни 3D скенер може се употребити за израду висококвалитетних 3D модела приликом скенирања стварних физичких објеката. Одликује се великом брзином скенирања и једноставан је за употребу. Захваљујући ниској цени, овај преносни уређај може представљати економичну опцију у различитим областима примене. Будући да *Eva Lite* не детектује боју објекта, прикупља значајно мање података, а као резултат тога, мања је потрошња енергије и може се комбиновати са приступачнијим рачунарима [30].



Слика 3.15 3D скенер *ArtecEva Lite* (ЦЕВИП): 1 – вентилационе рупе, 2 – дугме за преглед/снимање и заустављање, 3 – флеш лампа за 3D снимање, 4 – камера, 5 – 12 LED флеш лампи, 6 – 3D камера [30]

Фазе процеса реверзног инжењеринга применом *ArtecEva Lite* 3D скенера приказане су на слици 3.16.



Слика 3.16 Фазе реверзног инжењеринга применом *ArtecEva Lite* 3D скенера [31]

Према слици 3.16, прва фаза представља скенирање физичког објекта. Након тога, следи креирање 3D модела коришћењем алгоритама софтвера *ArtecStudio*. Добијени 3D модел се може експортирати у неки софтвер за израду симулација и вршити велики број различитих анализа на виртуелном моделу физичког објекта [31].

Скенер снима до 16 слика (фрејмова) у секунди и свака слика је 3D слика. Ови фрејмови се аутоматски поравнавају у реалном времену. То значи да се приликом скенирања може проверити у коликој мери је објекат скениран и којим деловима објекта је потребна већа пажња. С обзиром на малу тежину овог ручног уређаја (0,85 kg), то га чини преносивим и погодан је у ситуацијама када је потребно скенирање појединих објеката који се не могу преносити. У поређењу са ласерским 3D скенерима, *ArtecEva* скенира око десет пута брже истовремено обезбеђујући високу резолуцију и тачност [30]. Спецификације *ArtecEva Lite* 3D скенера су приказане у табели 3.1.

Табела 3.1 Спецификације *ArtecEva Lite* 3D скенера [30, 32]

Карактеристика	Спецификација
Тип скенера	Ручни (преносни)
Тачност мерења	0,1 mm
Резолуција	0,5 mm
Тачност на даљину	0,03% преко 100 cm
Радна дистанца	0,4-1 m
Маса	0,85 kg
Димензије	262 x 158 x 63 mm
Запремина зоне скенирања	61000 cm ³
Линеарно видно поље, Н x W, најближи домет	214 x 148 mm
Линеарно видно поље, Н x W, најудаљи домет	536 x 371 mm
Угаоно видно поље	30 x 21°
Брзина скенирања	16 fps
Брзина прикупљања података	2,000,000 тачака у секунид
Извор светлосних зрака	Блиц сијалице, без ласера
3D формати	OBJ, PLY, WRML, STL, AOP, ASCII, Disney PTX, E57, XYZRGB
Формати за мере	CSV, DXF, XML
Конекције	1 x USB 2.0
Оперативни систем	Windows 7, 8 или 10 (x64)
CPU	I5, I7, 8 GB RAM

Софтвер за обраду добијених података *Artec Studio* може радити са више *Artec3D* скенера. Нуди алате за брзо стварање 3D модела физичких објеката. Поред управљања процесом скенирања објекта, омогућава и спровођење потпуне обраде података, оптимизацију мреже и примену других операција за добијање квалитетног 3D модела. Затим, добијени модел се може послати на *CNC* или *RP* машину или га увести у другу апликацију за 3D моделирање. Данас *ArtecEva Lite* има распрострањену примену у различитим областима попут индустрије, медицине, форензике, уметности, образовања, архитектуре, реверзног инжењеринга, конторле квалитета итд [33].

3.2.3.2 David SLS-2

Уређај *David SLS-2* представља 3D скенер који ради на принципу триангулације структурисане беле светлости (расположив у ЦЕВИП-у). Рад овог скенера се заснива на пројектовању шаблона на објекат скенирања. Када се шаблон пројектује на управну равну површину, он ће бити непоремећен. Пројектовањем шаблона на било коју другачију површину настаје поремећај, који камера региструје [34]. Изглед 3D скенера *David SLS-2* приказан је на слици 3.17.

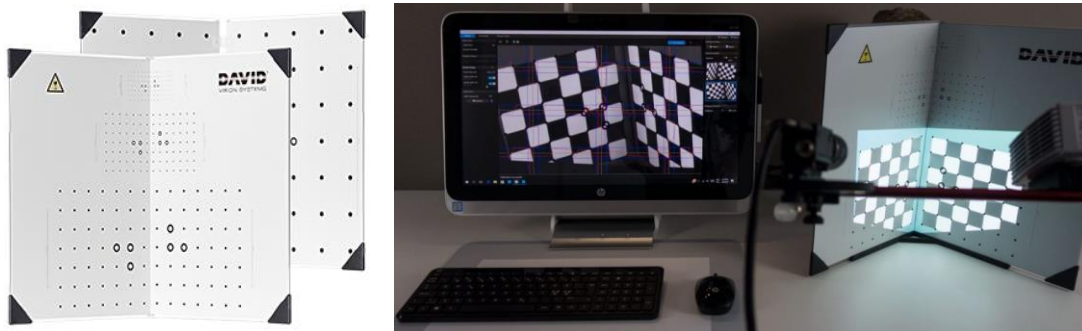


Слика 3.17 3D скенер *David SLS-2* (ЦЕВИП) [35]

Према слици 3.17 *David SLS-2* садржи трипод, мерну летву, пројектор и камеру, као и посебно развијен софтвер. Кораци који се морају испоштовати пре процеса скенирања су следећи [34]:

1. Постављање жељеног објекта на место за скенирање;
2. Постављање пројектор тако да буде изнад скенираног објекта и да слика коју пројектор емитује прекрива цео објекат;
3. Фокусирање слике пројектора на објекат (померањем полуге на пројектору);
4. Камеру треба померати дуж мерне летве тако да је слика коју пројектор шаље центрирана у односу на средњу осу камере;
5. Угао камере подесити у опсегу 20-25° за мање објекте;
6. Осветљење (*brightness*) би требало да буде подешено на максимум;
7. Експозиција (*exposure*) – 1/60s.

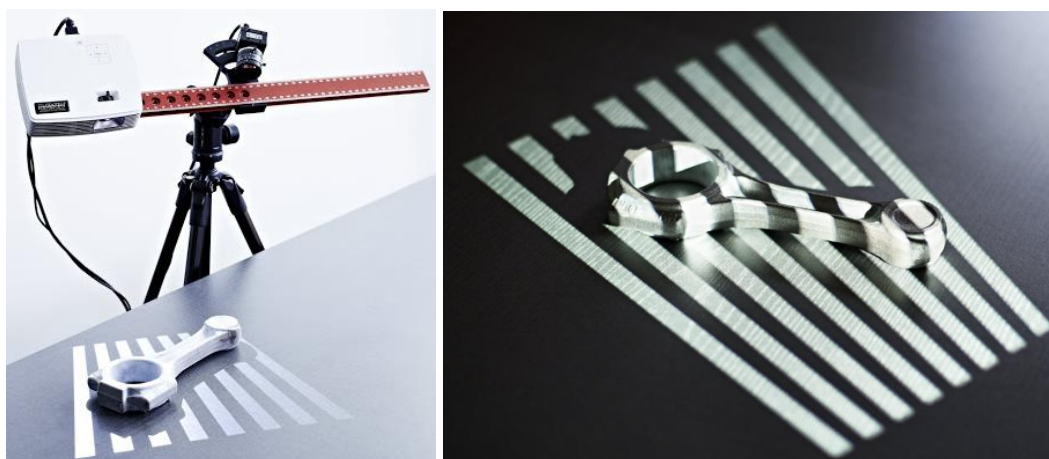
Пре скенирања обавезна је калибрација, а за то се користе посебне калибрацијске плоче дате на слици 3.18. Да би се калибрација извршила успешно, плоче се постављају под правим углом помоћу носача. Прво се утврђује опсег мерења, постављањем објекта у простор који је ограничен једним од четири калибрацијска сета на овим плочама [34].



Слика 3.18 Калибрацијске плоче (лево) и поступак калибрације (десно) [36, 37]

Увек треба изабрати онај калибрацијски сет који је најближи димензијама објекта, а затим ту димензију (поред одабаног сета) унети у поље за калибрацију у софтверу. Једном калибрисан на одређену димензију, софтвер памти параметре и није га потребно сваки пут пре употребе калибрисати, уколико су димензије новог објекта блиске претходном. Уколико плоче нису у фокусу, трипод се мора удаљити или приближити у односу на плоче. Такође, потребно је фокусирати камеру, а подешавање се омогућава попуштањем завртња. Потребно је пратити оштрину слике на екрану, а слика не би требало да буде ни превише светла ни превише тамна. Исто тако, појава одсечених пикова у софтверу указује да фокус није добар. Када је слика подешена потребно је стегнути завртње. Затим се калибрацијске плоче пажљиво уклањају. Треба напоменути да релативан положај камере и пројектора не сме бити промењен [34].

Спољашња светлост може негативно утицати на рад скенера и калибрацију, при чему ће квалитет добијених скенова бити лошији. Из тог разлога, пожељно је уклонити директан утицај сунчеве светлости при скенирању. Додавањем црне позадине може се повећати вероватноћа за успешно скенирање. Предмет који се скенира не би требало да буде сјајан и рефлектујући. Уколико је објекат скенирања превише сјајан по својој природи, потребно је нанети слој матирајућег спреја који је веома танак и готово да не утиче на тачност резултата [34]. Пример скенирања клипњаче приказан је на слици 3.19.



Слика 5.19 3D скенирање клипњаче на уређају David SLS-2 [38]

Овај 3D скенер има јако повољан однос цене и квалитета скенирања. Предност овог скенера је и компактна градња, као и могућност надоградње са још једном камером. Поседује широк спектар употребе, даје одличне резултате и једноставан је за употребу. Негативна страна овог скенера представља дуготрајан процес спајања добијених скенова у једну целину. Додавањем окретног постоља може се олакшати поступак скенирања. Изглед добијених скенова овим 3D скенером приказан је на слици 3.20 [34].



Слика 3.20 Изглед добијених скенова из различитих углова скенирања [34]

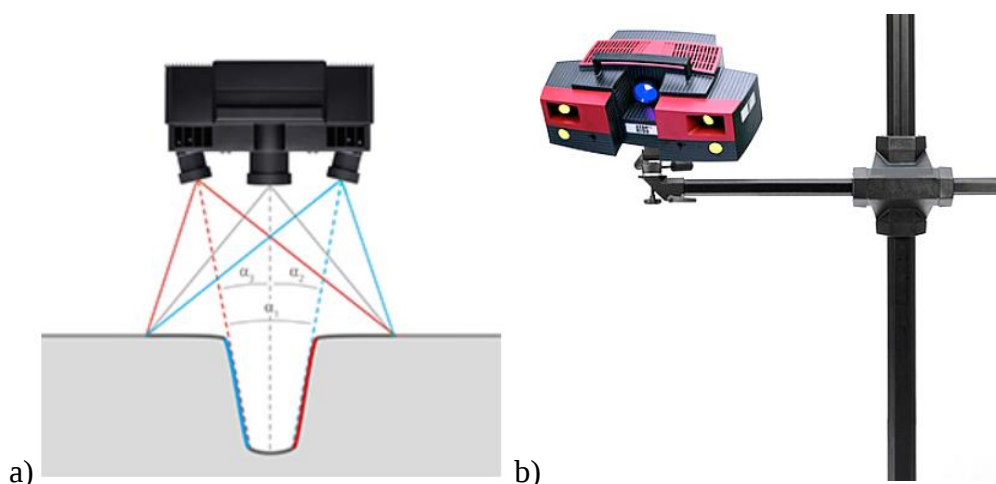
3.2.3.3 ATOS Triple Scan

ATOS Triple Scan представља оптички 3D дигитализатор високе резолуције (расположив у Лабораторији за композитне материјале и инжењерски софтвер Факултета инжењерских наука). Овај уређај се користи у многим индустријама за проверу делова попут танких лимова, алата, матрица, лопатица турбина, прототипова, затим делова добијених бризгањем, ливењем под притиском итд. Уређај је приказан на слици 3.21 [39].



Слика 3.21 3D скенер ATOS [39]

Заједно са обе камере, пројекциона јединица ради по принципу троструког скенирања (слика 3.22-а). Током мерења, прецизни обрасци односно шаблони (*patterns*) се пројектују на површину објекта и снимају их две камере, на основу принципа стерео камере. Овај аутоматски принцип нуди предности у мерењу рефлектујућих површина или предмета са сложеним удубљењима [39, 40].



Слика 3.22 Принцип рада ATOS Triple Scan уређаја (a) и троосовински статив (b) [39]

ATOS Triple Scan се користи ручно са студијским постољем или сталком. За полуаутоматску употребу доступан је троосовински статив (слика 3.22-b), укључујући модул за подизање сензора и јединицу за подешавање нагиба и закретања. Такође, на тржишту се могу наћи и ротационе плоче које омогућавају једноставно аутоматизовано мерење малих и средњих објеката [39, 40].

Пројекциона јединица система ATOS заснована је на технологији плаве светлости. Плаво светло уске таласне дужине омогућава спровођење прецизних мерења и дигитализације, потпуно независно од услова осветљења околине. Тачније, ометајуће амбијентално светло може се филтрирати током снимања слике. Захваљујући овом моћном извору светлости могу се постићи кратка времена мерења. Са само једном сензорском главом постиже се висока резолуција и тачност резултата за мале и велике објекте. ATOS користи мерне камере високе резолуције и специјално развијену оптику

за прецизно мерење. Тачност, резолуција мерења и мерно подручје су потпуно прилагодљиви захтевима примене. Тиме се постиже највиша резолуција за изузетно детаљно мерење малих делова мерне запремине од 38 mm или за брзу дигитализацију великих објеката мерне запремине до 2 m. Ова флексибилност омогућава мерење широког спектра објеката истом сензорском главом, а у комбинацији са системом *TRITOP*, *ATOS Triple Scan* постиже високу локалну прецизност и при скенирању објеката већих од 30 m [40]. Карактеристике *ATOS II* 3D скенера дате су у табели 3.2.

Табела 3.2 Карактеристике *ATOS 3D* скенера [28]

Карактеристика	Спецификација
Број мерних тачака	1,400,000
Време мерења	1 s
Мерна површина, mm ²	175 x 140 – 2000 x 1600
Растојање између тачака, mm	0,12-1,4
Рачунарска подршка	<i>High-End PC/Notebook</i>
Управљач сензора	Екстерни
Позиционирање тачака	Да
Димензије сензора, mm ³	490 x 260 x 170
Тежина сензора, kg	5,2

Комбинација 3D мерења целих површина и појединачних тачака обезбеђује потпуну мерну флексибилност и прилагодљивост. *ATOS* мерна сонда (*Touch Probe*) обједињује оптичка и контактна 3D мерења. Омогућава брза мерења, чак и у тачкама које је иначе тешко измерити, директно поређење CAD геометрије, брза мерења индивидуалних тачака и поклапања у реалном времену. Изузетно је корисна код скенирања отвора. 3D скенирање оптичким бесконтактним системом *ATOS* и контактна мерења мерном сондом спроводе се једним системом и анализирају у једном програмском пакету. Осим саме мерне сонде коју оператер држи у руци, није потребан никакав додатни хардвер. Ова мерна сонда, у комбинацији са *ATOS 3D* скенером, приказана је на слици 3.23 [39, 40].



Слика 3.23 Комбинација бесконтакног *ATOS 3D* скенера и контактне мерне сонде [40]

4. Брза израда делова од пластике двокомпонентним ливењем

Развој хемијске индустрије, нарочито у области полимерних материјала, резултирао је појавом читавог низа нових производа и масовне производње материјала најразличитијих механичких и других карактеристика. Нови материјали се успешно могу производити тако да имају изразито боље карактеристике од полазних материјала. Материјали на бази полимера могу наћи примену у готово свим областима људске делатности, захваљујући могућности испуњења најразличитијих захтева. Данас, материјали на бази полимера имају веома распрострањену примену у аутомобилској, авио и космичкој индустрији, грађевинарству, електроници и електротехници, телекомуникацијама, производњи предмета за домаћинства, медицини, пољопривреди, индустрији намештаја, амбалаже, дечјих играчака итд. Производња полимерних материјала бележи непрекидни пораст из године у годину, а овако брз пораст производње није забележен ни за једну другу групу материјала. Због тога се популаран термин “пластично доба”, који се користио првенствено за другу половину двадесетог века, проширио и на 21. век због све веће потражње за производима од полимерних материјала. Полимери представљају основну компонентну свих пластичних маса. Поред полимера који представља основну компоненту, у састав пластичних маса улазе и одређени додаци (адитиви) који се додају ради добијања потребних својстава. Пластичне масе се могу дефинисати и као полимерни материјали који као основу садрже неки природни или синтетички полимер велике молекулске масе. Као и сваки други материјал, пластичне масе се одликују одређеним предностима и недостацима. Предности израде производа од пластичних маса су [41, 42]:

- Ниска цена коштања,
- Висока продуктивност,
- Мала густина у односу на метале (не прелази $1,5 \text{ kg/dm}^3$),
- Лакша израда, нарочито производа сложених конфигурација,
- Одлични су електро-изолатори и
- Добри су звучни изолатори,
- Висока отпорност према хемикалијама и према корозији,
- Способност бојења и добра прозрачност,
- Висока отпорност на вибрације,
- Добра фриктиона и антифриктиона својства.

У недостатке пластичних маса спадају [41, 42]:

- На повишеним температурама имају ниску чврстоћу,
- У току дуготрајног оптерећења долази до смањења чврстоће,
- Димензиона нестабилност,
- Мала топлотна отпорност,
- Лако су запаљиве,
- Кратак век трајања (склоност старењу и разградњи) итд.

У технологије прераде пластичних маса, спадају сви они поступци прераде који омогућавају добијање полуфабриката или готових производа од полимерних сировина, при чему сваки поступак прераде зависи од врсте, својства и стања полимера. Вредност температуре и притиска, као и време њиховог деловања зависе од физичких и хемијских особина пластичних маса. За разлику од производа од метала који се обично добијају у низу узастопних операција обраде, производи од полимерних материјала се најчешће

израђују у једној операцији обраде. При производњи производа од полимерних материјала неопходно је познавање вискозности у зависности од састава, односно додатака. Поред тога, треба имати у виду да се коначни облик производа код термопласта постиже хлађењем, а код дуропласта и еластомера након умрежавања. Својства и карактеристике производа, као и коначни облик производа су доста подложни многим утицајима спољашње средине и утицајима експлоатације, што такође треба узети у обзир при изради делова од полимерних материјала [42, 43].

Поступци прераде пластичних маса се могу поделити на основне операције прераде, операције прераде полуфабриката и помоћне операције прераде. Основне операције прераде пластичних маса су: каландровање, пресовање, екструдирање, бризгање, израда фолија, израда шупљих тела дувањем, вакуум термообликовање итд. Сви поступци прераде пластичних маса поседују одређене предности и недостатке. Тако нпр. ињекционо бризгање представља један од најзначајнијих поступак прераде термопласта са економског аспекта. Такође, бризгање је уз поступке екструдирања и дувања најраширенији технолошки поступак прераде пластичних маса. Развој нових материјала и све већи захтеви у експлоатацији производа добијених бризгањем условили су развој и усавршавање различитих поступака бризгања. Предности технологије бризгања у економском смислу се могу приметити у уштеди материјала, мањем времену израде и мањем простору за производњу. Иако овај поступак карактеришу веома скупе машине и алати, у серијској производњи ињекционо бризгање даје низ предности као што су тачност димензија и облика предмета. Поред тога, велика могућност обликовања предмета, израда производа са чистим и глатким површинама, могућност производње предмета у било којој боји су такође неке од предности ињекционог бризгања. Ову технологију одликује могућност дораде, обраде и оплемењивања површина, затим брза производња великих серија, добро искоришћење материјала итд. Технологију ињекционог бризгања карактерише и још једна веома важна предност, а то је могућност израде производа који по својим димензијама одговарају алату, што значи да се све димензије могу тачно одредити. У многим случајевима при производњи великих серија технологија се може аутоматизовати. Ипак, поред претходно описаних предности, технологија ињекционог бризгања поседује и одређене недостатке. Недостаци се, пре свега, односе на веома скупу основну опрему технологије бризгања. Недостатак ове технологије представља и веома сложен термодинамичко-реолошки процес [43, 44].

Имајући у виду недостатке ињекционог бризгања, у последње време су се појавиле алтернативне методе израде делова од пластике. Технике засноване на слојевитом приступу проширују поља примене, од изградње естетских и функционалних прототипова до производње алата и калупа. *RP* процеси се могу користити за директну израду узорака, тј. мастер модела за ливење. Развој узорка је од суштинског значаја у погледу времена и трошкова за израду комплексних одливака у ливницама. Да би се знатно скратило време развоја узорака, калупа и прототипа, *RP* је идеална метода за израду сложених узорака и саставних компоненти алата. Употреба *RP* процеса показала се као исплатив и временски ефикасан приступ за производњу узорака и кућишта за језгра за ливење у песку. Поред тога постоји читав низ различитих начина реализације брзе израде алата за ливење коришћењем *RP* технологије, који се одликују многобројим предностима у односу на класичне методе. Један од њих је и поступак двокомпонентног ливења пластике. Поступак прецизног кополимерног ливења годинама се користи за производњу малих серија, а веома успешно и за инжењерске и естетске пластичне делове. Представља знатно практичнију, бржу и једноставнију алтернативу стандардној технологији ињекционог бризгања са обрађеним челичним калупима [9, 45, 46, 47].

Материјали који се најчешће користе су двокомпонентни полиуретани (*PU*) и акрилне смоле (*PMMA*), који очвршћавају под дејством каталитичке хемијске реакције, на распону ниских температура, до око 100°C. Полиуретани поседују високу свестраност и широк опсег тврдоће која се постиже у комбинацији са другим компонентама, од меканих, али веома издржљивих еластомера, до тврде пластике. Физичка и хемијска својства су слична уобичајеним инжењерским термопластима (*ABS*, *SAN*, *PC* или *PA*). По неким својствима их чак и превазилазе, захваљујући великој отпорности на ударце и абразију, добрим диелектричним особинама, димензијском и хемијском стабилношћу, затим биокомпатибилношћу или отпорношћу на *UV* зрачење [47].

4.1 Примена двокомпонентног ливења

Многи инжењерски делови као што су ваљци и зупчаници, обично се израђују од полиуретана, чак и у већим серијама, а такви делови зупчаника, штапова или полука углавном се производе у пилот погонима са основном опремом која је тренутно на располагању како би се задовољиле потребе за резервним деловима [47]. Неки производи добијени поступком двокомпонентног ливења приказани су на слици 4.1



Слика 4.1 Производи добијени двокомпонентним ливењем [47]

Произвођачи запажају знатно веће потребе за овим производним процесом малог обима сложених и прецизних пластичних делова као бржу и јефтинију алтернативу уобичајеном ињекционом бризгању са високим ценама алата и дугим временом потребним до почетка производње. Клијенти из индустрије биомедицинске и лабораторијске опреме имају својствен висок ниво прилагођавања и високу потребу за флексибилном производњом малог обима, јер произведени уређаји ретко достижу бројку од 5000 јединица произведених током целог животног циклуса производа. Ова уочена потражња и ширење тржишне нише, подстакла је поједине компаније да оживе процес ливења за производњу прилагођених делова електронских уређаја који се дизајнирају за клијенте, заједно са резервним деловима направљеним на постојећим мастер моделима или заснованим на реверзном инжењерингу [47].

4.2 Предности двокомпонентног ливења

Процес двокомпонентног ливења је погодан за конструкције са великим варијацијама код дебљине зидова, што је проблематично или немогуће постићи ињекционим бризгањем због проблема са деформацијама у фази хлађења. Предност је и у томе што се, за разлику од ињекционог бризгања, не јављају високе температуре и притисци, тако да се други елементи и компоненте, попут разних металних уметака или навоја, могу лако уградити у одливане делове, чак и деликатне електронске компоненте,

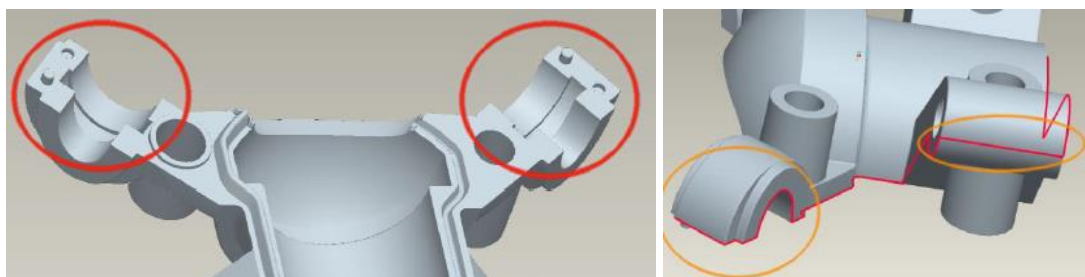
PCB плоче, конектори и сензори, без опасности од оштећења. Ово постављање електронике у *PU* ради заштите и затварања такође је већ годинама уобичајена пракса у индустрији аутомобилске електронике и трансформатора, као и у индустрији кабловске опреме. Током производње нема високих притисака јер се пуњење калупа у процесу постиже квалитетним вакуумом, тако да нема великих и тешких машина за убризгавање, нити хидрауличних уља и течности. Стога је комплетна опрема потребна за ливење врло компактна, а потрошња енергије и укупни утицај на животну средину су врло мали. Адекватни вакуум је потребан и за одплећавање током мешања компоненти материјала, посебно када се морају додати адитиви попут пунила, пигмената или стабилизатора. Интегрисање напредних технологија у функционалну производну синергију и примена адекватних софтверских алата чине овај процес ливења потпуном индустријском алтернативом ињекционом брызгању и другим тренутним конкурентним процесима за производњу делова малих серија [47].

4.3 Недостаци и ограничења двокомпонентног ливења

Овај поступак има неколико озбиљних ограничења која га спречавају да се укључи у широку употребу и постане индустријска пракса за производњу малог обима. Главни калупи у поступку обично се праве од сличног материјала на бази кополимера као и завршни делови, сипањем у течној фази преко мастер модела. Мастер модел који се користи за израду калупа је једнократан који се обично прави на *CNC* машини или *RP* поступком и додатном ручном обрадом да би се постигла глаткоћа површине и прецизност. Потребне подеоне равни (површина одвајања) калупа морају се пројектовати тако да се сви детаљи ливеног дела могу изградити. Примене поступка ливења ограничена је на делове без сложених подеоних површина, углавном са једноставним равним подеоним површинама, једноставним отварањем калупа и са врло малим или једноставним бочним сегментима. Квалитет површина одвајања калупа је критичан за укупни квалитет ливења и избегавање проблема попут неправилног затварања или отварања, прекомерног истицања течног материјала (венца) на линијама одвајања, лепљења делова за калуп итд. Ова геометрија се традиционално може прецизно произвести само *CNC* обрадом или *EDM* обрадом метала, што значајно повећава трошкове и време потребно за производњу калупа, јер површине одвајања калупа постају сложеније. Главни технолошки проблем је и дуго време очвршћавања кополимерних материјала. Тачније, потребно је око 4-8 сати на нормалној собној температури за већину *PU*, чиме се серијска производња у хиљадама јединица успорава. Повећавање температуре очвршћавања убрзава процес, али неминовно изазива проблематичне унутрашње напоне у материјалу, што резултира појавом деформација на изливеним деловима. Алтернативно убрзано очвршћавање *UV* светлошћу или зрачењем даје боље резултате и контролу процеса сушења, али делује споља, тако да зраци морају пролазити кроз затворени калуп да би доспели до дела изнутра, такође деградирајући структуру материјала калупа. Израда више истих калупа који ће се користити истовремено или употребом калупа са више шупљина, обично су најлакша решења, али постоје алтернативе за убрзавање процеса очвршћивања, осим представљених. Сви уобичајени *PU* материјали већину својих одличних физичко-хемијских својстава дугују чињеници да припадају групи термореактивних (термостабилних) пластичних маса. Поступак очвршћавања је неповратан након завршетка, тј. термостабилни материјал се након очвршћавања више не може истопити и преобликовати и тешко га је рециклирати. Ово представља једини еколошки недостатак у поређењу са уобичајеним инжењерским термопластима за ињекционо брызгање који се могу рециклирати више пута [47].

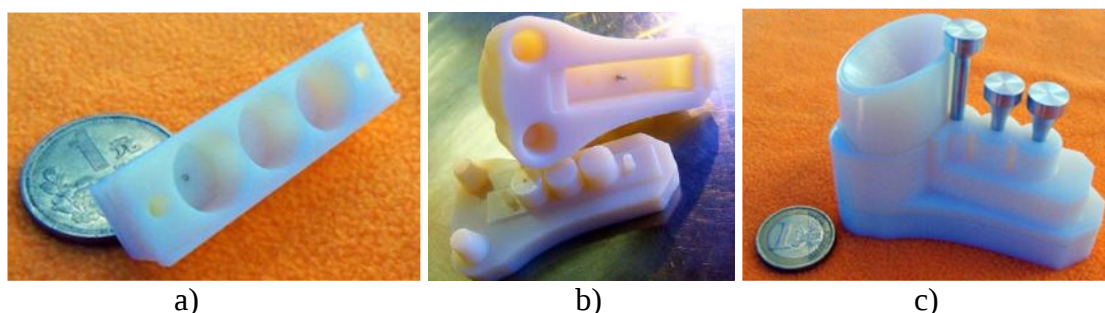
4.4 Поступак двокомпонентног ливења потпомогнут адитивном производњом

Описана ограничења двокомпонентног (кополимерног) ливења могу се превазићи применом напредних *RP/RT* технологија, за прецизну производњу сложених сегмената калупа и мастер модела. *RP* технологије су постигле веома високу прецизност и ниво глаткоће површине, до 18 μm танких слојева, као што је то могуће постићи помоћу *PolyJet* технологије, користећи спектар од преко 50 различитих материјала, од којих неки одговарају или превазилазе уобичајене инжењерске термопластичне материјале у физичким и конструкцијским својствима. Дакле, *RP* технологија се може искористити за израду сегмената калупа са сложеним подеоним површинама, као бржа и једноставнија алтернатива *CNC* обради и уз минималну или никакву накнадну обраду. Сегменти и елементи израђени *RP* технологијом, намењени су пре свега за покривање подручја калупа сложене геометрије. Овде се подразумевају подручја у којима је геометрија мастер модела веома сложена са и захтева да се смер отварања сегмента разликује од смера отварања калупа. Такође, овде спадају и подручја у којима су подеоне равни калупа сложене или неправилне (слика 4.2.) чак и без сегмената који се морају покретати у додатним смеровима за отварање калупа [47, 48].



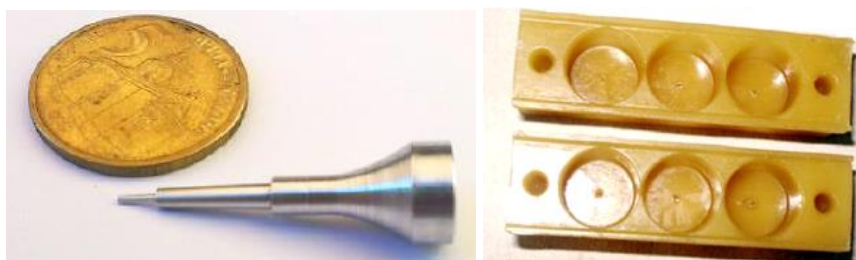
Слика 4.2 Критична подручја [47]

RP сегменти алата успешно се могу изградити *PolyJet* технологијом, при чему се као резултат добијају задовољавајући делови, што потврђује адекватност примене технологије за брзу израду алата. Остали различити сегменти, компоненте, уређаји или структуре које се могу уградити у калупну шупљину су углавном игле, шипке, цеви и сличне дуге и танке структуре калупне геометрије [47, 48]. Примери *RP* мастер модела и калупа за двокомпонентно ливење израђени у ЦЕВИП центру су приказани на слици 4.3.



Слика 4.3 *RP* мастер модел и алати за двокомпонентно ливење: а) мастер модел, б) горњи и доњи калуп, с) калуп са уграђеним иглама за отворе [47]

Сви ови елементи калупа се могу произвести *RP* технологијом, али обично захтевају и неке додатне металне елементе због чврстоће. Пример прецизне металне игле која се користи за обликовање отвора на поклопцу сензора, пречника око 0,65 mm, дат је на слици 4.4 [47, 48].



Слика 4.4. Игла за обликовање отвора (лево) и израђени поклопац сензора технологијом двокомпонентног ливења у *RP* калупу (десно) [47]

У калупе за двокомпонентно ливење се могу уградити и осетљиве електронске или *MEMS* компоненте, као што су *PCB* плоче, конектори или сензори, без опасности од оштећења. Посебне компоненте које се могу уградити у калупе су *UV LED* лампе велике снаге, чиме се убрзава процес очвршћавања. *UV* светлосни *LED* извори, уграђени у калупе попут осталих сегмената и компоненти, на локацијама близу површине калупне шупљине, убрзавају ефекат очвршћавања. Коришћењем малих усмерених *UV LED* извора, уграђених у калупе у близини површина калупне шупљине и распоређених у оптималним положајима на критичним подручјима, треба да постигне максималан ефекат убрзаног и контролисаног очвршћавања [47, 48].

Као алтернатива може се користити *MfM* (*moulds-for-moulds*) метода, односно израда калупа за калупе. Са повећаном брзином и лакоћом израде калупа, може се користити основна метода убрзавања серијске производње, израдом више истих калупа који се истовремено користе. Да би се повећала ефикасност технологије, калупи, који се користе за ливење делова, сами би се производили ливењем у већем броју, користећи *MfM*. Ова *MfM* метода за производњу више калупа истовремено, може бити резервна метода за убрзавање серијске производње у посебним случајевима када очвршћавање помоћу *UV* светлости не даје значајно убрзавање процеса. Напредак у развоју термопластичних полиуретана резултирао је доступношћу нових термопластичних *PU* материјала који превазилазе проблеме стабилности и издржљивости *TPU* на бази полиестера, тако да процес може испунити строге захтеве у погледу рециклаже материјала у производњи, у случајевима када је то потребно [47, 48].

Ласером се могу додати блокирајуће микро текстуре на критичним површинама калупа, како би се побољшало затварање и заптивање калупа и спречила појава вишка материјала у облику венца између додирних површина. Бушење рупа микро величине у калупу пречника испод 250 μm је проблематично или немогуће конвенционалним путем. Ово се може постићи употребом ласера, што може бити корисно за прикључке на вакуум пумпи за избацивање гасова заробљених у калупној шупљини, а појава трагова на одливцима сведена је на минимум. Тачне критичне позиције рупа није увек могуће одредити у дизајну калупа, па чак ни у симулацији протока материјала. Оне се лакше, јефтиније и поузданије израђују ласером него *RP* технологијом [47, 48].

Из претходног се може закључити да поступак двокомпонентног ливења укључује интегрисање најсавременијих напредних материјала и технологија у једну функционалну технологију. Подразумева примену термопластичних и термореактивних полиуретана, метакрилата и сличних двокомпонентних материјала који имају хемијско-каталитичко очвршћавање на ниским температурама. Уградња прецизних сегмената, добијених *RP* технологијом, као и примена *UV* светлости за убрзавање процеса очвршћавања и ласерске микро обраде, доприносе у повећавају успешности поступка за израду висококвалитетних и прецизних делова у малосеријској производњи [47].

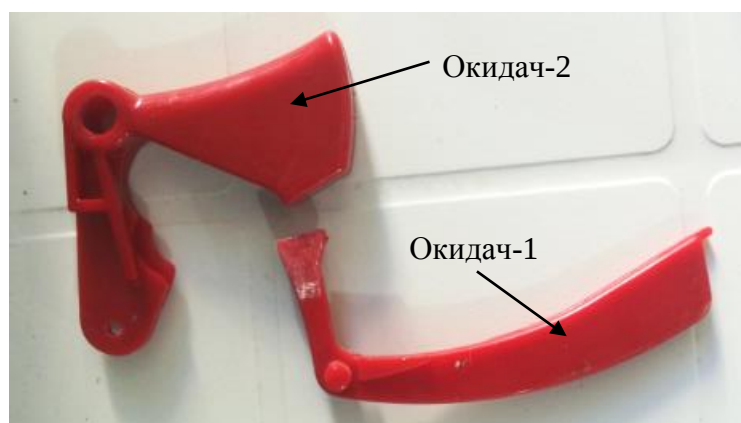
5. Конструкција алата за двокомпонентно ливење пластике

У овом делу мастер рада детаљно је описан поступак конструкције алата за двокомпонентно ливење пластике. Изабрани делови, за које су били потребни алати за двокомпонентно ливење, представљају два пластична окидача ручице гаса тримера произвођача *Villager*, приказана на слици 5.1 (лево). Као што се види на слици 5.1 (десно), на окидачу гаса се може уочити оштећење и због чега окидач није био у стању да адекватно извршава своју предвиђену функцију. Поправка оваквих делова није исплатива, а куповина појединачних резервних делова код произвођача није могућа. Прецизније, поправка једног окидача гаса тримера подразумева замену читавог подсклопа, односно читаве ручице гаса тримера. Због тога, идеално решење дају калупи за двокомпонентно ливење пластике за израду оваквих функционалних делова.



Слика 5.1 Ручица гаса тримера

За израду калупа за двокомпонентно ливења било је потребно набавити оригиналну ручицу гаса и искористити функционалне окидаче. Како би се добила гравура алата која одговара геометрији окидача гаса, било је потребно извршити њихово 3D скенирање за добијање облака тачака из кога је касније проистекао 3D CAD модел. За прикупљање података за облак тачака коришћена су два 3D скенера, *ATOS II* и *David SLS-2*. Након израде 3D CAD модела алата, следећи корак подразумевао је њихову израду на 3D штампачу *AlarisObjet30*. На крају, последњи корак подразумевао је примену поступка двокомпонентног ливења пластике у алатима добијеним адитивном производњом. На слици 5.2 приказани су резервни окидачи гаса. Ради лакшег означавања и праћења целокупног поступка израде, окидачима су додељени називи *окидач-1* и *окидач-2*.



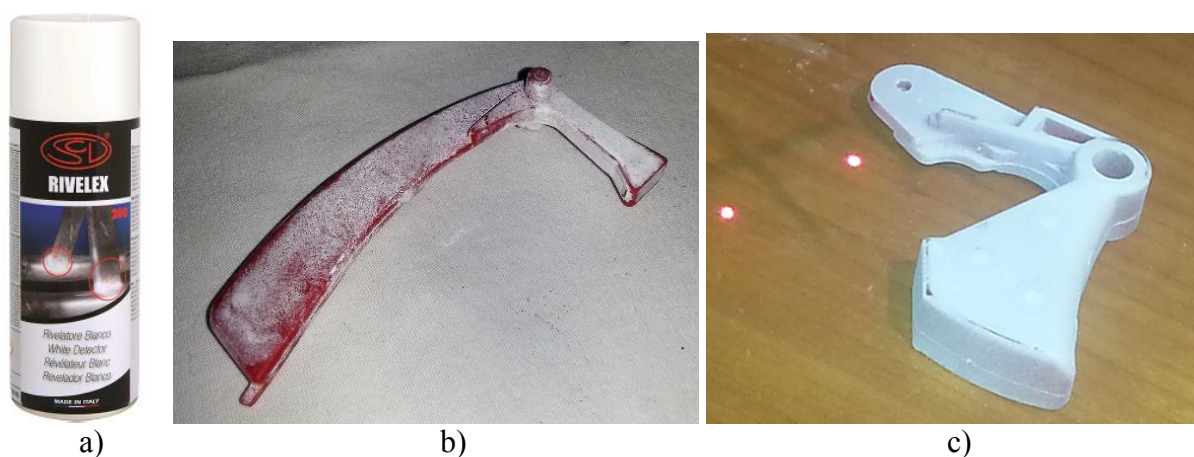
Слика 5.2 Окидачи гаса тримера

5.1 Дигитализација изабраних објеката

Прва фаза реверзног инжењеринга је 3D дигитализација, односно превођење у дигитални облик прикупљених података о координатама тачака са површине скенираних објеката са слике 5.2. 3D дигитализација је веома битна у процесу реверзног инжењеринга јер директно утиче на квалитет резултирајућег CAD модела. Прикупљање података о координатама тачака је извршено помоћу 3D скенера *Atos* и *David SLS-2* чији је принцип рада детаљно описан у трећем поглављу мастер рада. 3D дигитализација објеката, првобитно је била предвиђена на 3D скенеру *ArtecEva Lite*, међутим, због нешто мање прецизности и немогућности овог уређаја да адекватно скенира танке зидове и оштре ивице на приказаним окидачима тримера, алтернатива је нађена у 3D скенерима *ATOS II* и *David SLS-2*. Дигитализација окидача-1 је извршена на *David SLS-2*, а окидача-2 на *ATOS II* 3D скенеру. Разлог због чега дигитализација окидача-2 није извршена на *ATOS II* 3D скенеру, представља немогућност постављања референтних тачака (маркера) на појединим малим површинама. Поступак дигитализације оба окидача детаљно је описан у наставку рада.

5.1.1 Припрема објеката за скенирање

За успешно обављање процеса 3D дигитализације неопходна је припрема објеката. Одсјај може негативно утицати на квалитет добијених резултата, па је на објекат скенирања потребно нанети танак матирајући слој. Из тог разлога, површине објеката су испрскане белим *Rivelex 200* спрејом који се првенствено користи за откривање пукотина и грешака код заварених спојева. Овим спрејом за матирање површина (слика 5.3-а), елиминисао се негативни ефекат рефлексије. Такође, наношење оваквог спреја је неопходно и код скенирања провидних и тамних објеката. Треба напоменути да се пре наношења матирајућег слоја морају очистити површине објекта од евентуалних нечистоћа и прашине, а затим нанети танак слој са удаљености од 20 – 30 cm. Затим је потребно сачекати 10-15 min како би се слој осушио, након чега започиње поступак скенирања објекта. Предност матирања овим спрејом јесте у томе што овако танак слој готово да не утиче на квалитет скенирања и једноставно се уклања без опасности да ће се површине делова оштетити. Окидачи гаса тримера након наношења белог матирајућег слоја приказани су на слици 5.3-б и 5.3-с.



Слика 5.3 Спреј за матирање површина (а) и изглед окидача-1 (б) и окидача-2 (с) након матирања површина

Окидач-2 чије је 3D скенирање било предвиђено на 3D скенеру *ATOS II*, поред наношења белог матирајућег слоја, захтевао је и наношење маркера, односно

референтних тачака, ради лакшег препознавања површина при процесу спајања добијених скенова. Изглед окидача-2 након наношења белог матирајућег слоја и маркера приказан је на слици 5.4. У већини случајева довољно је поставити три референтне тачке. Јако је битно да положаји ових референтних тачака не формирају праву линију, већ троугао.



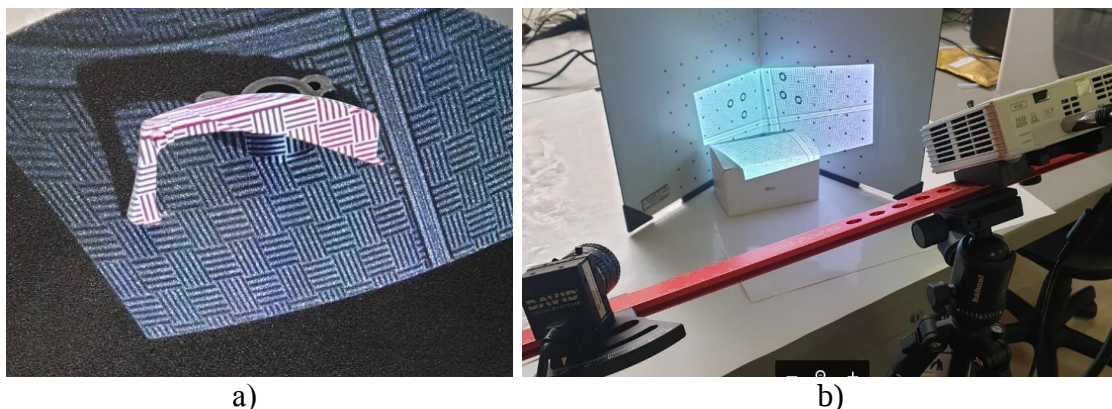
Слика 5.4 Објект сценирања након наношења матирајућег слоја и маркера

5.1.2 Поступак дигитализације окидача-1 на 3D скенеру *David SLS-2*

3D дигитализација окидача-1 извршена је на 3D скенеру *David SLS-2*. Након матирања објекта сценирања, било је потребно извршити калибрацију уређаја, како би се адекватно извршило прикупљање података о облку тачака, а затим обраду и спајање прикупљених скенова у једну целину и његово превођење у STL формат.

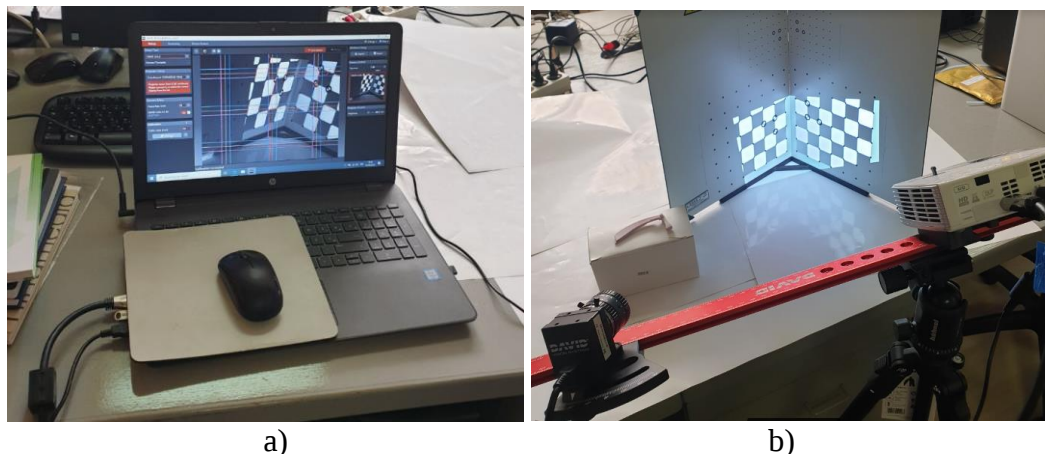
5.1.2.1 Калибрација *David SLS-2* 3D скенера

Пре процеса прикупљања података 3D скенером *David SLS-2*, било је потребно покренути софтвер *David 5*, камеру и пројектор повезати са рачунаром, а затим извршити калибрацију. За успешно извођење калибрације, камера мора бити фокусирана на предмет сценирања - окидач-1 тримера (слика 5.5-а). Попуштањем два завртња на камери омогућено је подешавање. Затим је окидач-1 постављен на жељено место, при чему се пратила оштрина слике на екрану. Као помоћ при фокусирању послужиле су црвене линије које морају да буду у границама плавих хоризонталних и вертикалних линија. Након успешног подешавања слике завртњеви су стегнути. Такође, било је потребно проверити и завртњеве на пројектору, клизачу камере, као и оне за подешавање угла камере. У следећем кораку калибрације, објект сценирања је уклоњен, а на његово место су постављене калибрацијске плоче. Плоче су постављене под правим углом у специјална лежишта као на слици 5.5.b.



Слика 5.5 Поступак калибрације *David SLS-2* 3D скенера

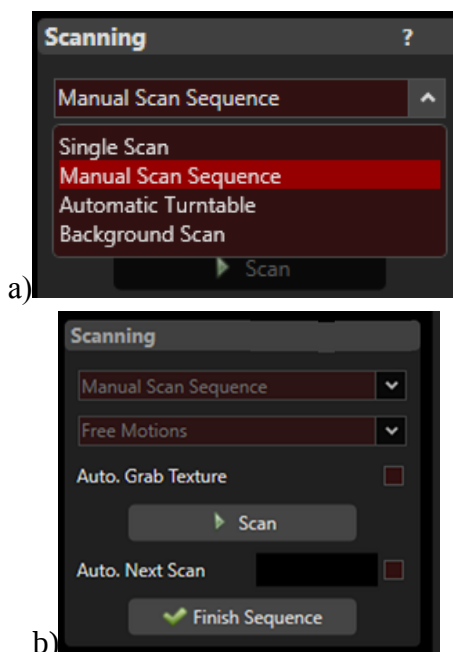
У оквиру прозора *Calibration*, који се налази у софтверу *David 3D Scanner*, потребно је поставити ону димензију која је уписана поред шаблона у који се објект мерења најбоље уклапа. У овом случају, за подешавање калибрације уписана је вредност 120 mm. Када се поступак калибрације завршио, у софтверу се добио приказ који је дат на слици 5.6-а, након чега су пажљиво уклоњене калибрацијске плоче са слике 5.6-б.



Слика 5.6 Успешно извршена калибрација 3D скенера

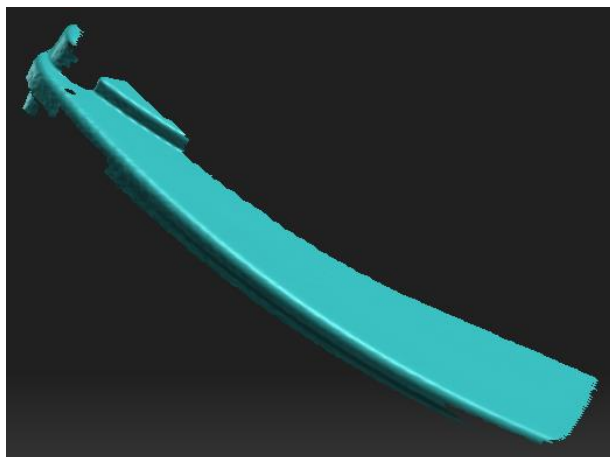
5.1.2.2 Скенирање окидача-2

Након калибрације уређаја мора се водити рачуна да се међусобни положај пројектора и камере не сме променити у току рада. Пре самог почетка скенирања дела, потребно је одредити тип скенирања у прозору *Scanning* (слика 5.7-а). У овом случају, реч је о узастопном скенирању, при чему се објект скенирања ручно помера, како би се „ухватила” цела геометрија. Из тог разлога изабрана је опција *Manual Scan Sequence*.



Слика 5.7 Бирање типа скенирања (*Manual Scan Sequence*)

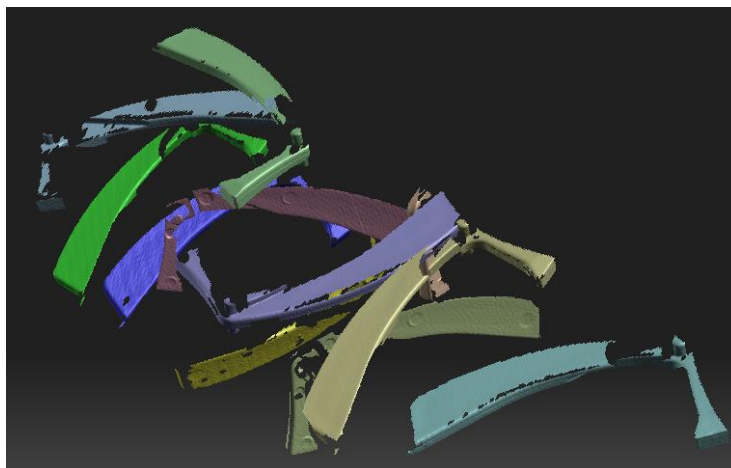
Притиском дугмета *Scan* (слика 5.7-доле), почиње поступак скенирања, односно прикупљања података о координатама тачака са површине окидача-1. На слици 5.8. приказан је изглед једног добијеног скена окидача-1 гаса тримера овим 3D скенером.



Слика 5.8 Изглед добијеног скена на 3D скенеру David SLS-2

Број скенова које је потребно направити за добијање целокупне геометрије објекта скенирања првенствено зависи од његове комплексности. Према томе, за добијање комплетног облака тачака окидача-1 гаса није било могуће извршити само једним скенирањем, односно дигитализације објекта из само једног положаја. Због тога је скенирање било поновљено више пута, при чему се окидач гаса морао ручно померати како би се дигитализовали сви углови дела. Посебна пажња је посвећена нешто неприступачнијим подручјима објекта скенирања. Сви добијени скенови аутоматски се чувају у скен листи (*List of Scans*) софтвера David 5.

Као што је претходно наглашено у мастер раду, за добијање целокупног облака тачака, било је потребно извршити скенирање објекта (окидача-1) у различитим положајима. Ручним манипулисањем вршена је промена положаја окидача, при чему се водило рачуна да добијени скенови морају имати заједничка подручја ради њиховог правилног спајања (поравнања). Приказ свих добијених скенова, које је касније требало спојити у једну целину дат је на слици 5.9.

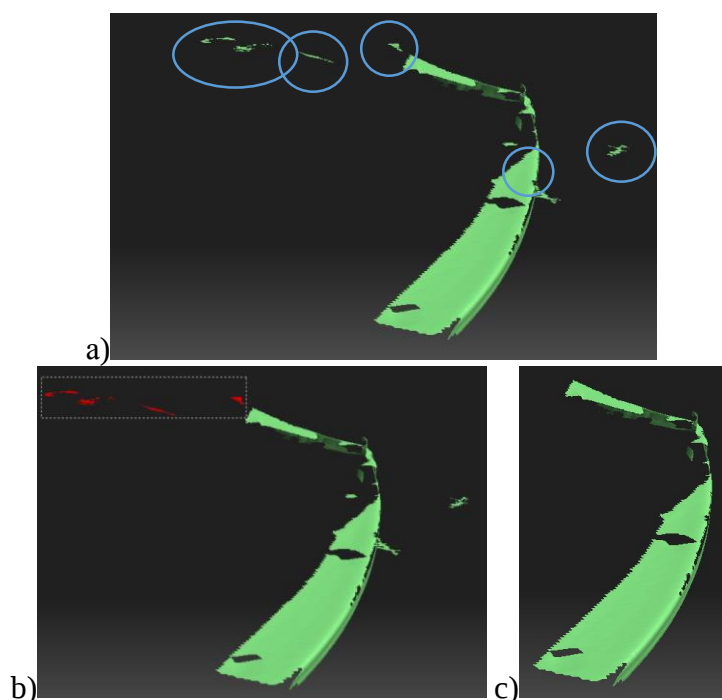


Слика 5.9 Приказ свих скенова окидача-1

5.1.2.3 Брисање шумава

Све шумове и објекте који су грешком „ухваћени” (слика 5.10-а) током процеса скенирања, потребно је уклонити како не би нарушили квалитет 3D CAD модела. Коришћењем алата из падајућег менија у прозору *Cleaning* овакви шумови и непотребни објекти се селекују и бришу на једноставан начин (слика 5.10-б), при чему скен добија

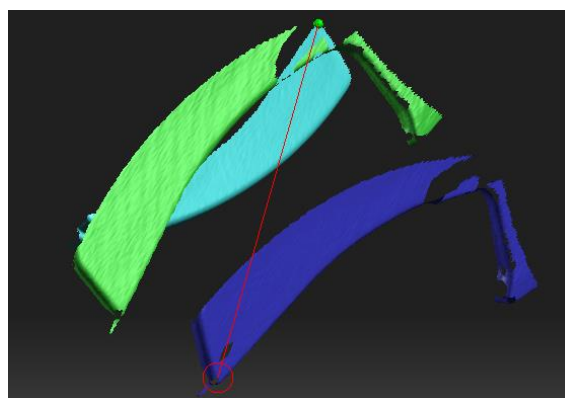
изглед као на слици 5.10-с. Такође, са појединих скенова се могу уклонити и подручја која не спадају у шуме, како би се добио приближан део облака тачака који недостаје. Ово може бити корисно јер и нагомилавање скенова на истом подручју може нарушити квалитет CAD модела.



Слика 5.10 Брисање шума и случајно ухваћених објеката

5.1.2.4 Поступак спајања добијених скенова

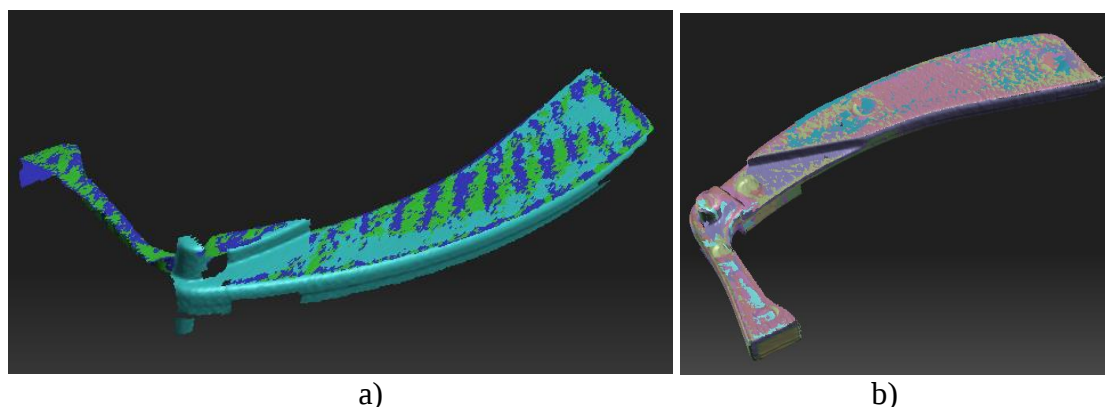
Иако софтвер *David 5* поседује опцију аутоматског поравнања (спајања), то у већини случајева доводи до погрешног поравнања. Оваква грешка може довести до тога да следећи скен буде погрешно постављен при чему се врши акумулација грешака што резултира нетачном облаку тачака. Поравнање, односно спајање скенова, врши се помоћу опција у прозору *Alignment*. Да би се извршило спајање, скенови морају поседовати заједничка подручја. Кликом на опцију *Align Scans*, ручно се бирају заједничка подручја као што је то приказано на слици 5.11.



Слика 5.11. Бирање заједничких подручја опцијом *Align Scans*

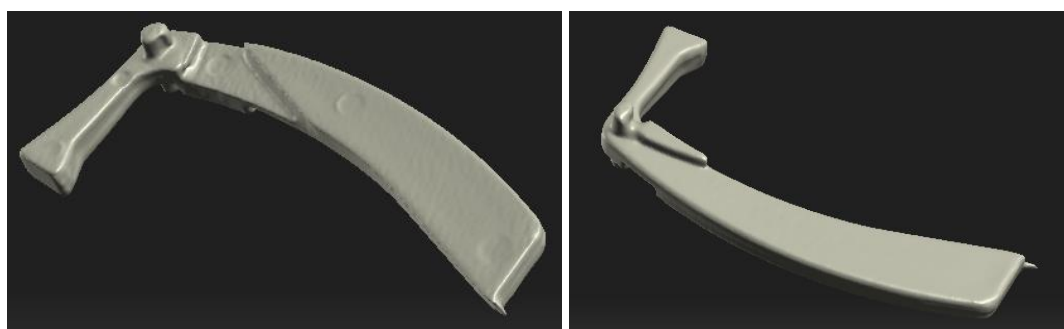
На слици 5.12-а приказан је изглед три различита скена која су спојена у једну целину на основу изабраних заједничких подручја. Коначан изглед облака тачака

окидача-1, добијен 3D скенером *David SLS-2*, након спајања свих потребних скенова приказан је на слици 5.12-b.



Слика 5.12 Изглед три различита скена спојена у једну целину (а) и коначан изглед облака тачака након спајања свих потребних скенова

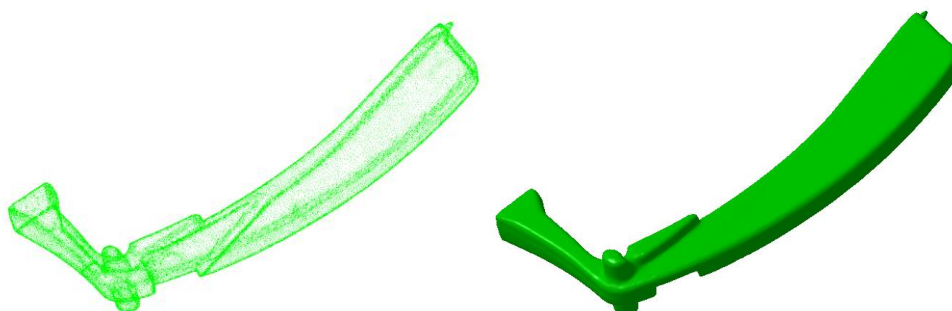
У секцији *Fusion* подешене су вредности за резолуцију (*Resolution*) и оштрину (*Sharpness*). Након подешавања свих параметара и провере да су сви потребни скенови видљиви, активирана је опција *Fuse*. Чекирањем опције *Close Holes* затварају се мали отвори на добијеном моделу. Финални изглед облака тачака дат је на слици 5.13.



Слика 5.13 Коначан изглед добијеног дигиталног модела окидача-1

5.1.2.5 Експортирање у STL формат

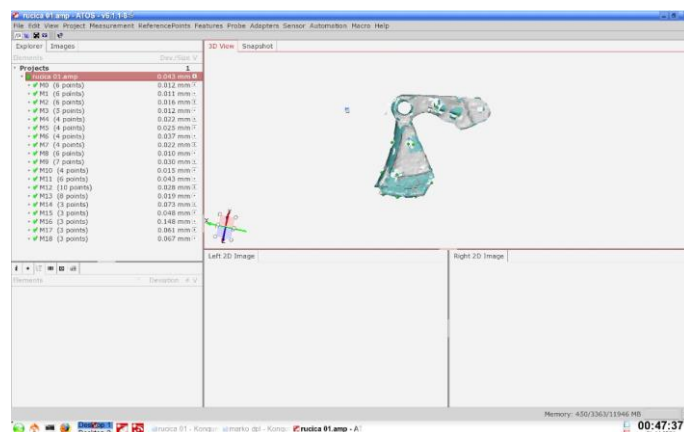
Софтвер *David5* има могућност превођења добијеног облака тачака у неки од различитих формата за даљу употребу. Након процеса спајања скенова у једну целину, дигитални модел је снимљен у *STL* формату помоћу опције *Export*. Изглед добијеног облака тачака и модела окидача-1 у *STL* формату који је увезен у софтвер *CATIA* приказан је на слици 5.14. Добијени *STL* формат се у наставку користитио приликом провере одступања *CAD* модела, што ће детаљније бити описано у наставку мастер рада.



Слика 5.14 Облак тачака и модел у *STL* формату

5.1.3 Поступак дигитализације окидача-2 на 3D скенеру ATOS II

Поступак 3D дигитализације окидача-2 на 3D скенеру ATOS II (принцип рада описан у трећем поглављу) одвијао се готово на сличан начин као поступак дигитализације окидача-1 на 3D скенеру David SLS-2. Поступци се разликују само по начину спајања добијених скенова. Софтвер помоћу кога се управља поступком дигитализације јесте ATOS Viewer чије је радно окружење приказано на слици 5.15.



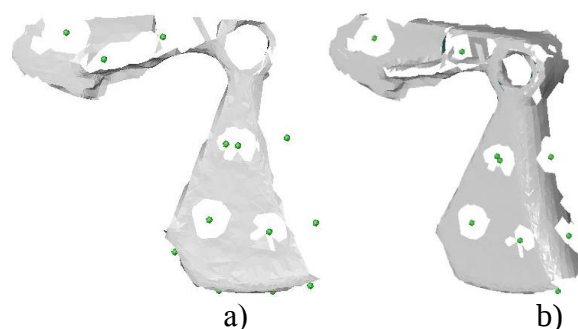
Слика 15 Радно окружење софтвера ATOS Viewer

Као и у претходном поступку скенирања, било је потребно направити више скенова. Скенирање је извршено из различитих углова како би се добили подаци о облаку тачака са свих доступних подручја са скенираног објекта. Сви добијени скенови се аутоматски чувају у посебној палети скенова, као што је приказано на слици 5.16. Активирање добијених скенова врши се чекирањем поља са десне стране, након чега се исти појављују у прозору 3D View где се може вршити њихова даља обрада.

Projects		1
rucica 01.amp		0.043 mm
▶ M0 (6 points)		0.012 mm
▶ M1 (6 points)		0.011 mm
▶ M2 (6 points)		0.016 mm
▶ M3 (5 points)		0.012 mm
▶ M4 (4 points)		0.022 mm
▶ M5 (4 points)		0.025 mm
▶ M6 (4 points)		0.037 mm
▶ M7 (4 points)		0.022 mm
▶ M8 (6 points)		0.010 mm
▶ M9 (7 points)		0.030 mm
▶ M10 (4 points)		0.015 mm
▶ M11 (6 points)		0.043 mm
▶ M12 (10 points)		0.028 mm
▶ M13 (8 points)		0.019 mm
▶ M14 (3 points)		0.073 mm
▶ M15 (3 points)		0.048 mm
▶ M16 (3 points)		0.148 mm
▶ M17 (3 points)		0.061 mm
▶ M18 (3 points)		0.067 mm

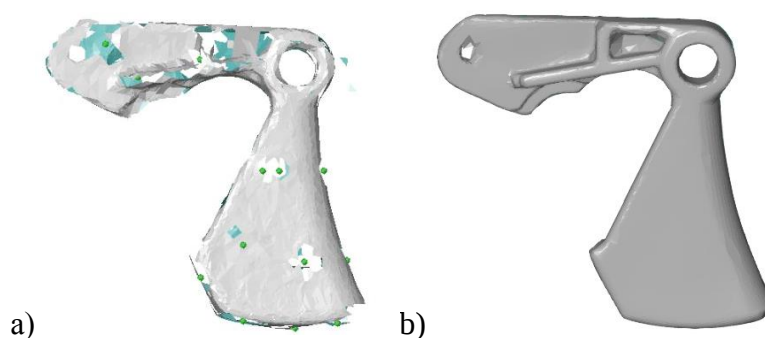
Слика 5.16 Палета скенова

Брисање шумова и случајно ухваћених објеката у оовм софтверу, врши се на једноставан начин. Поступак брисања шумова је готово исти као претходно описани поступак у софтверу David 5. Захваљујући референтним тачкама које су постављене на објекат скенирања (окидач-2), знатно је олакшан поступак спајања (поравнања) добијених скенова. Захваљујући координатама ових референтних тачака, софтвер аутоматски врши поравнање скенова. Изглед облака тачака након спајања шест и десет добијених скенова приказан је на слици 5.17.



Слика 5.17 Облак тачака скенираног окидача-2 након спајања шест (a) и десет скенова (b) у једну целину

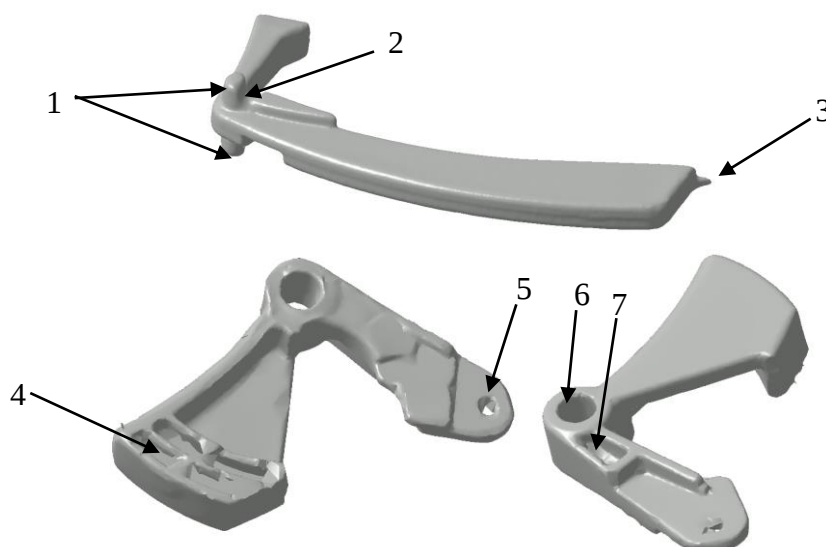
Изглед коначног облака тачака након спајања свих (деветнаест) скенова у једну целину, приказан је на слици 5.18-а. Добијени облак тачака окидача-2 експортиран је у *STL* формат, који је приказан на слици 5.18-б.



Слика 5.18 Облак тачака након спајања свих добијених скенова (a) и *STL* модел (b)

5.2 Корекција добијених дигиталних модела

Због уочених неправилности, које су настале услед немогућности скенера да „ухвати” неприступачна подручја и веома ситне детаље, извршене су одређене корекције у софтверу *CATIA*, како би дигитални модели имали прецизне димензије и облик. На слици 5.19 приказани су уочени недостаци на *STL* моделима окидача.

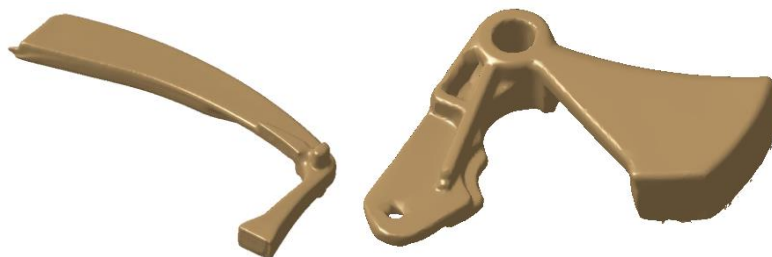


Слика 5.19 Уочени недостаци на *STL* моделима

Према слици 5.19 корекције су подразумевале реконструкцију цилиндричних ослонаца (1), зазор између ослонаца и граничника у облику троугла (2), клина (3), ребара (4), отвора за опрогу (5), отвора за уградњу (6) и зидова (7).

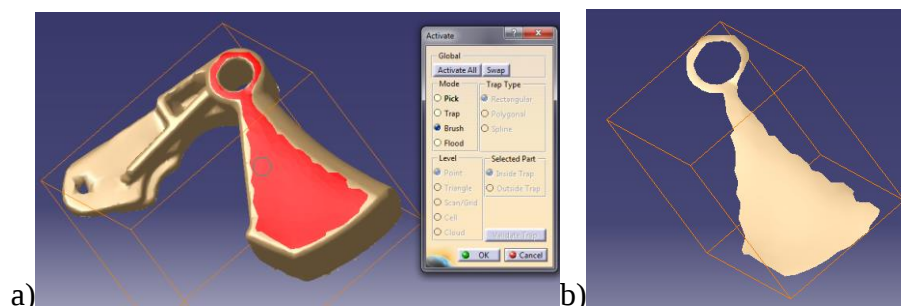
5.2.1 Израда површинског модела

Пре почетка поступка реконструкције модела, добијени облак тачака је импортован у софтвер *CATIA* помоћу модула *Digitalized Shape Editor*. На слици 5.20 приказани су облаци тачака два окидача тримера у овом модулу.



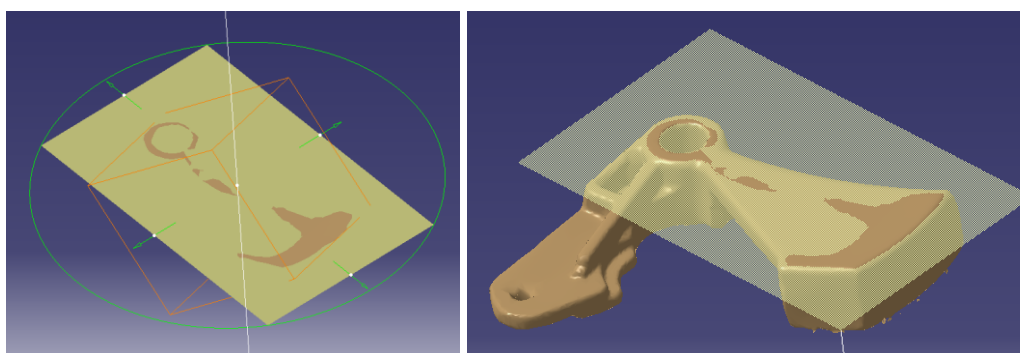
Слика 5.20 Облаци тачака у *CATIA* модулу *Digitalized Shape Editor*

Затим, након импортовања облака тачака, реконструкција површина је извршена у модулу за брзо површинско моделирање *Quick Surface Reconstruction*. Овај модул садржи алате за апроксимацију дела (области) облака тачака једном равни. На почетку је потребно активирати облак тачака (*Activate*) одређене области (слика 5.21-а), како би се добила област (слика 5.21-б) на којој ће се урадити апроксимација. На овај начин бира се само део површине од интереса чиме су избегнуте лоше скениране ивице.



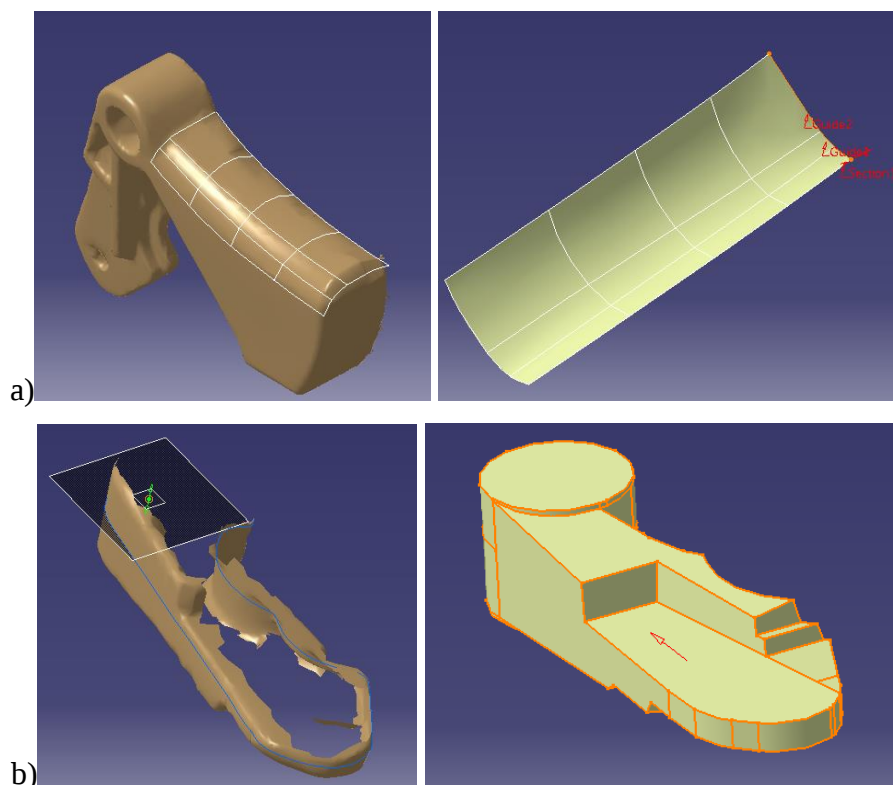
Слика 5.21 Активирање потребне области облака тачака (а) и изглед те области (б)

Затим, у прозору *Basic Surface Reconstruction* бира се врста апроксимације, а начин постављања апроксимираних равни на основу изабране области облака тачака приказан је на слици 5.22. Поступак се понавља на свим локацијама где постоје равне површине, уз обавезно коришћење опција *Trim* и *Split* за њихово правилно обликовање.



Слика 5.22 Постављање апроксимираних равни на основу једне области облака тачака

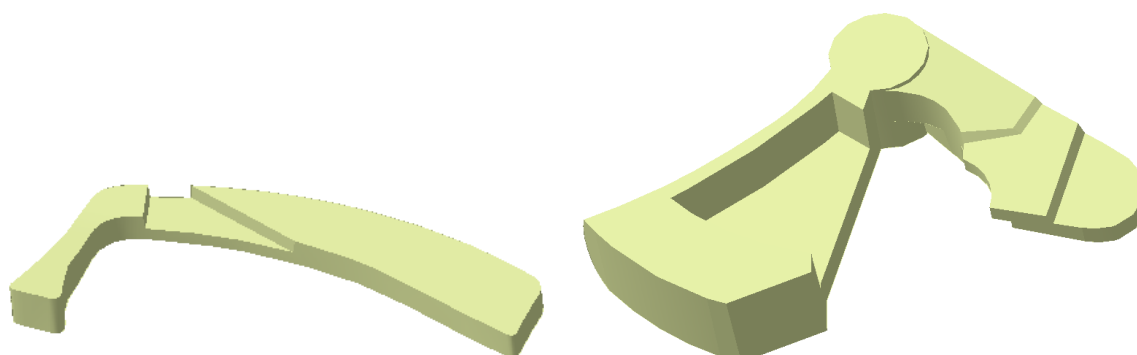
Коришћењем опције *3D Curve* омогућава се цртање кривих линија по облаку тачака, што може бити јако корисно у комбинацији са опцијом *Multi-section Surface*, чиме се добијају закривљене површине (слика 5.23-а). Опција *Planar Section* омогућава добијање компликованијих геометрија са модела на основу једне пресечне равни и изабраног дела облака тачака (слика 5.23-б).



Слика 5.23 Опције *Multi-section Surface* (a) и *Planar Section* (b)

За реконструкцију комплетног модела било је потребно користити и модул *Generative Shape Design*. Помоћу овог модула за „површинског моделирања”, добијене су остале равне и закривљене површине (које се такође могу добити у модулу *Quick Surface Reconstruction*) које постоје на моделима, коришћењем низа корисних алата (*Swiping*, *Extrude*, *Revolve*, *Fill*, *Intersection* итд).

Површински модели, настали коришћењем ова три модула, приказани су на слици 5.24. Реконструкција критичних области, а затим обарање ивица и израда радијуса заобљења извршена је у модулу *Part Design*.



Слика 5.24 Површински модели окидача гаса

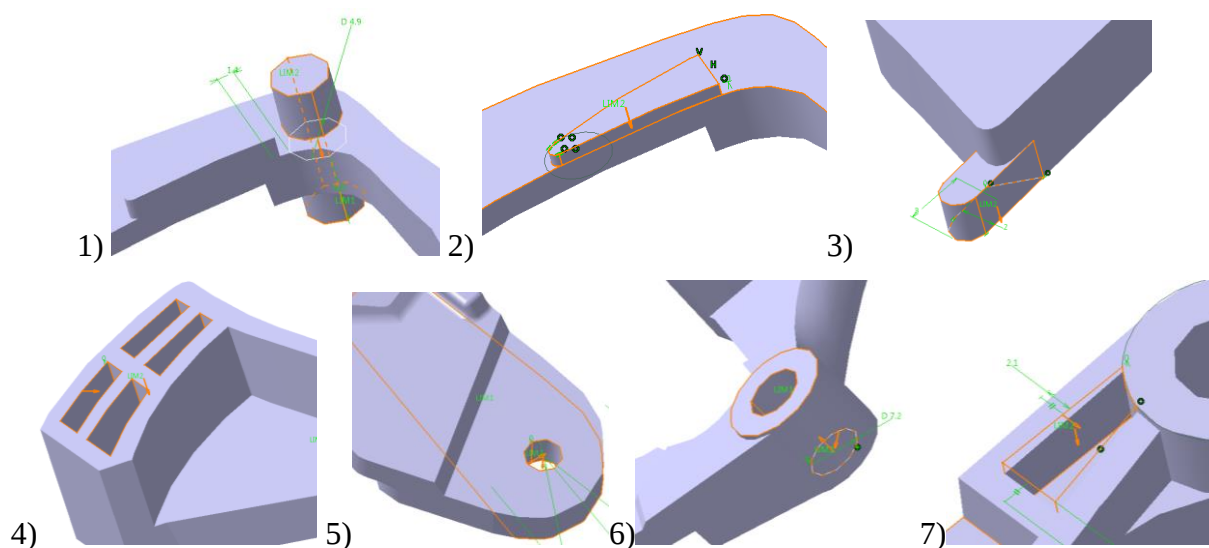
5.2.2 Израда 3D CAD модела

Коришћењем мерне опреме (дигитално помично мерило и микрометар који су приказани на слици 5.25) узете су димензије са критичних подручја оригиналних окидача гаса, као и њихове позиције, које су послужиле приликом реконструкције истих.



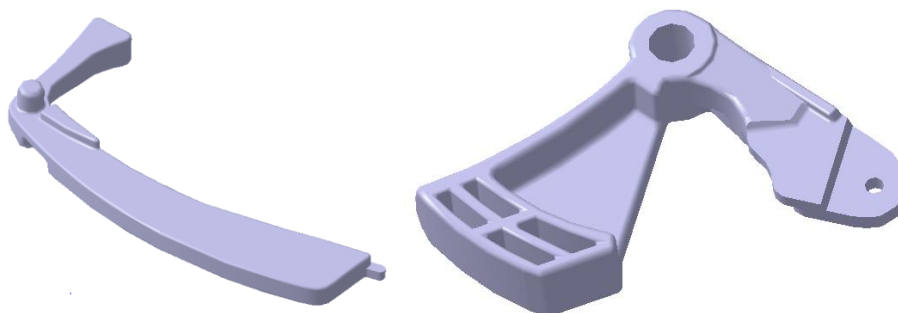
Слика 5.25 Мерна опрема

На почетку је од површинских модела (приказани на слици 5.24) направљен *Solid* 3D CAD модел помоћу опције *Close Surface*, како би било могуће искористити опције у модулу *Part Design*. Коришћењем једноставних опција *Pad*, *Pocket* и *Hole*, на CAD моделима су додељени недостајућу елементи (описани на слици 5.19) као на слици 5.26.



Слика 5.26 Накнадно додати критични елементи: 1 – цилиндрични ослонци, 2 – зазор између ослонца и граничника, 3 – клин, 4 – ребра, 5 – отвор за опрогу, 6 – отвор за уградњу, 7 – зидови

У последњој фази моделирања окидача извршено је обарање ивица и израда свих потребних заобљења на CAD моделима. Добијени CAD модели окидача-1 и окидача-2 приказани су на слици 5.27.

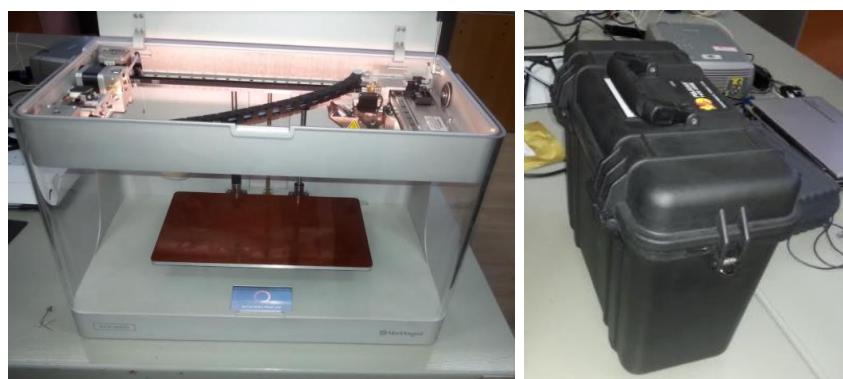


Слика 5.27 CAD модели окидача-1 (лево) и окидача-2 (десно)

Добијени CAD модели су сачувани и у STL форматима и послужили су за извођење процеса 3D штампе како би се утврдила тачност геометрије и функционалност прототипова окидача.

5.3 Брза израда прототипова за проверу тачности геометрије

Да би се проверила тачност геометрије 3D CAD модела окидача гаса који ће се користити као мастер модел за израду алата за двокомпонентно ливење, извршено је 3D штампање на уређају *MarkForged Onyx Pro* у ЦЕВИП-у (принцип рада је описан у другом поглављу). Као пластични филамент користио се *Onyx*, а за ојачања стаклено влакно. Након повезивања уређаја са рачунаром, преко кога је добијао информације о процесу, екструдерима је допремљен пластични филамент из „суве кутије” помоћу *Бовденове* цеви, као и стаклено влакно за ојачање штампаних делова. Изглед овог 3D штампача и суве кутије представљен је на слици 5.28.



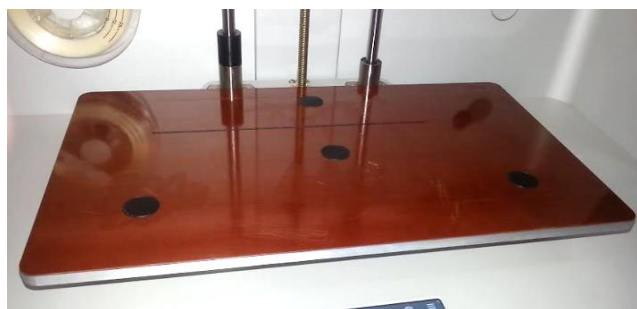
Слика 5.28 *MarkForged 3D штампач и сува кутија за чување материјала*

Пре почетка процеса адитивне производње делова, било је потребно подесити уређај, односно извршити нивелацију (равнање) стола за адитивну производњу. Нивелација се изводила провлачењем еталона између покретног радног стола и оба екструдера. За извођење нивелације, коришћени су еталони приказани на слици 5.29-а (горњи за стаклено влакно, а доњи за пластични филамент). Као што је раније већ описано, нивелација се изводи завијањем завртњева, све до момента док се не осети благи отпор приликом провлачења еталона између екструдера и радног стола. Овај поступак је поновљен више пута на различитим локацијама радног стола.



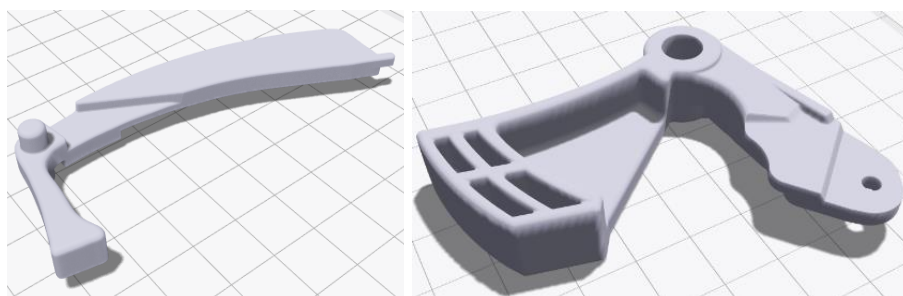
Слика 5.29 *Еталони за нивелацију радног стола принтера (а) и лепак (б)*

У следећем кораку, извршена је припрема радног стола, односно чишћење од нечистоћа и наношење лепка (слика 5.29-б) како би се спречило померање штампаних делова у току процеса. Како би се утврдило да ли је уређај подешен на адекватан начин, извршено је пробно тестирање, штампањем кружних предмета (слика 5.30), након чега је утврђено да је уређај подешен на адекватан начин јер нису уочене неправилности.



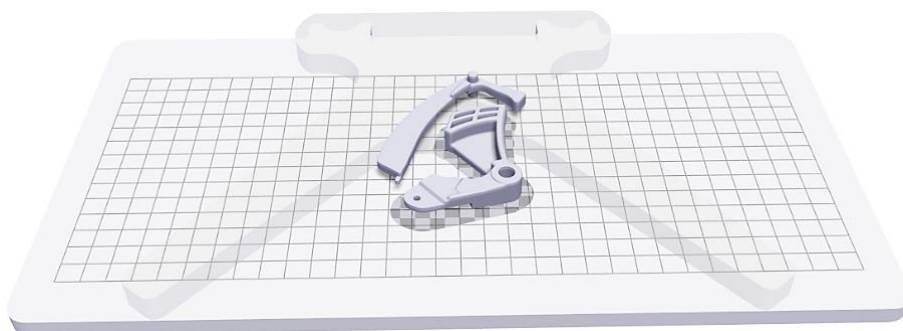
Слика 5.30 Пробно штампање за тестирање нивелације стола

Након утврђивања да је уређај правилно подешен, у следећем кораку се приступило софтверу *Eiger*. У виртуелну библиотеку софтвера (*Eiger Library*) су увезени *STL* модели окидача гаса, а њихов изглед у радном окружењу дат је на слици 5.31.



Слика 5.31 Изглед модела окидача гаса у софтверу *Eiger*

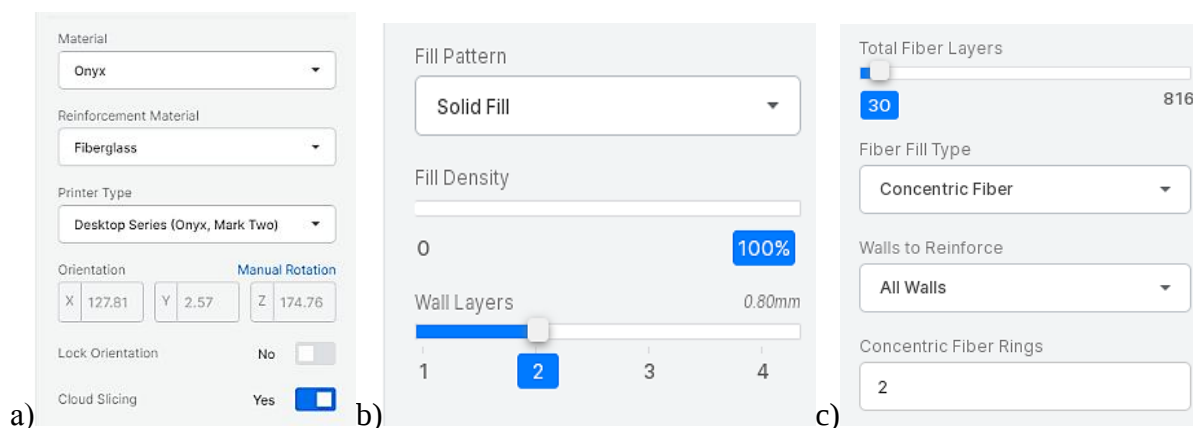
MarkForged 3D штампач има могућност штампања више делова истовремено, због чега су модели окидача позиционирани на радној плочи као на слици 5.32, водећи рачуна о њиховом међусобном растојању. Такође, вођено је рачуна о томе да њихово међусобно растојање не буде превелико, јер може утицати на дужину трајања процеса адитивне производње.



Слика 5.32 Позиционирање *STL* фајлова окидача на радном столу принтера

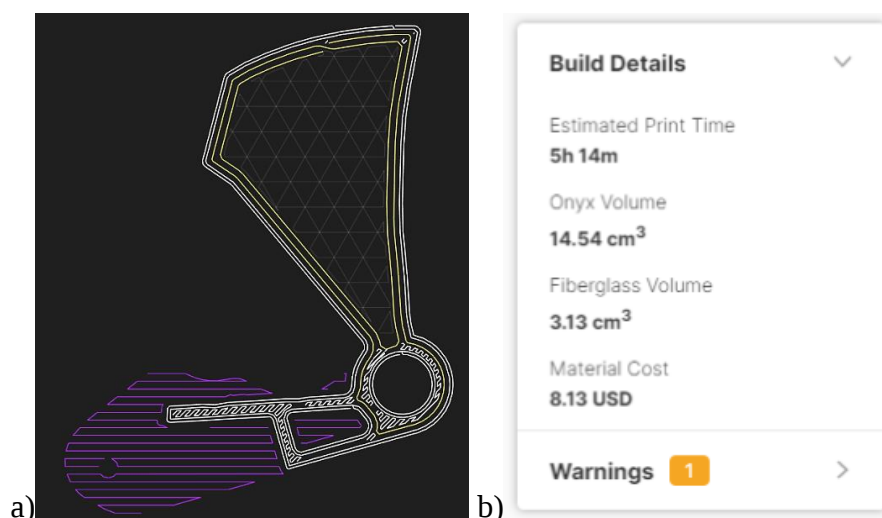
Након позиционирања делова на радној плочи, у следећем кораку је извршено подешавање параметара процеса штампања у прозору *General* (слика 5.33-a). Као основни материјал (*Material*) изабран је *Onyx*, а за материјал за ојачање (*Reinforcement Material*) *Fiberglass*. Затим је дефинисан тип штампача (*Printer type*) бирањем из падајућег менија *Desktop Series (Onyx, Mark Two)*. У прозору *Settings*, поред подешавања коришћених јединица, активира се и опција за коришћење супорт материјала (*Use Supports*) приликом штампе компликованих делова. Затим је активирано поље *Use Brim* како би се испод окидача-2 поставила подлога кружног облика која повећава адхезивну моћ везивања за подлогу. Прозор *Infill* (слика 5.33-b) користи се за регулисање начина

попуњавања унутрашњости штампаног дела пластичним филаментом. Изабрана је опција *Solid Fill* у падајућем менију *Fill Pattern* како би се целокупна запремина штампаних делова испунила пластичним филаментом. И на крају, у прозору *Reinforcement* (слика 5.33-с) врши се подешавање параметара везаних за коришћење стаклених влакана као ојачања приликом штампе. Бирањем опције *Concentric Fiber* у падајућем менију *Fiber Fill Type*, дефинише се концентричан начин постављања ојачања. Избором опције *All Walls* у падајућем менију *Walls to Reinforce*, ојачања се израђују на свим зидовима штампаног дела. У пољу *Concentric Fiber Rings* дефинисан је број прстенова којима се штампани део ојачава.



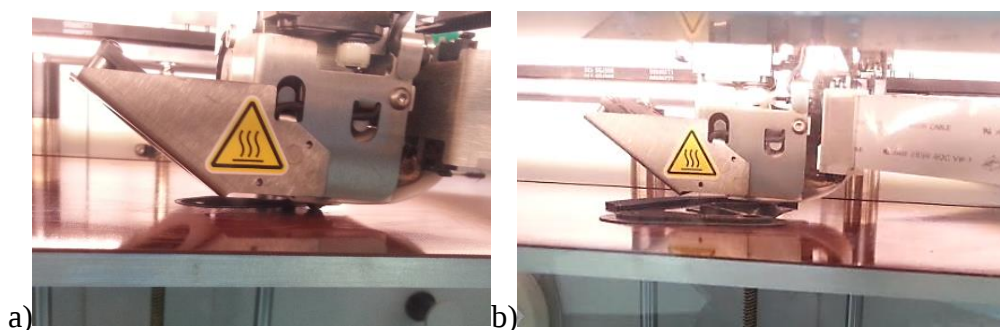
Слика 5.33 Дефинисање параметара штампања: а) General, б) Infill, в) Reinforcement

У софтверу *Eiger* се пре почетка процеса штампања може прегледати целокупни ток процеса формирања штампаног дела по слојевима помоћу опције *Internal View*. На слици 5.34-а дат је 2D приказ виртуелног штампаног дела након 35-ог слоја, односно 43 min процеса адитивне производње. Љубичастом бојом означен је супортни материјал, белом штампани део, а жутом стаклено влакно. Такође, овде се може проверити утрошак материјала у сваком слоју посебно. Овај софтвер даје и техно-економске податке у прозору *Build Details* као што су: величина штампаних објеката, време потребно за израду, цена израде која се заснива на цени материјала и струје у Америци (САД), маса штампаног дела, запремина потребног филамента и стаклених влакана (слика 5.34-б). Сходно томе, за израду окидача-1 и окидача-2 било је потребно 5h и 14 min, 14,54 cm³ *Onyx* материјала и 3,13 cm³ стакленог влакна, а процена цене израде износила је 8,13 USD.



Слика 5.34 Виртуелни приказ по слојевима (а) и техно-економски показатељи (б)

Следећи корак подразумева стартовање процеса штампања изабраних делова, активирањем опције *Print*. Током процеса 3D штампања, уређај је повремено надгледан и праћен како би се спречила појава евентуалних грешака. Изглед штампаних делова након првог и десетог одштампаног слоја приказан је на слици 5.35.



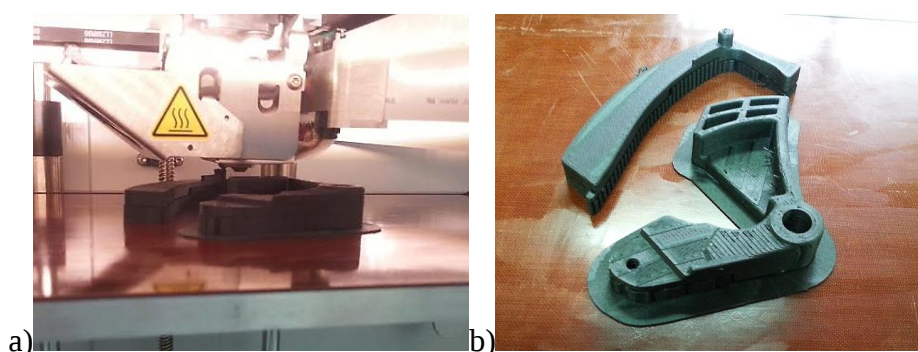
Слика 5.35 Изглед штампаних делова након првог (a) и десетог одштампаног слоја (b)

На слици 5.36 приказан је изглед штампаних делова након успешне израде 67-ог слоја, односно након нешто више од 3h процеса штампања, где се јасно може приметити разлика између материјала пластичног филамента и стакленог влакна за ојачање.



Слика 5.36 Изглед штампаних делова након израде шездесет седмог слоја

На слици 5.37-а приказан је тренутак израде последњег слоја, као и изглед делова непосредно након завршетка процеса адитивне производње на *MarkForged* 3D штампачу (слика 5.37-b).



Слика 5.37 Изглед одштампаних делова након завршетка процеса

Након завршетка процеса адитивне производње мастер модела делова, радна плоча стола је пажљиво уклоњена из 3D штампача, а затим је уследило одвајање штампаних делова од ње. Одвајање штампаних делова изводи се помоћу шпакле (слика 5.38-a) уз повећану опрезност како се исти не би оштетили. Приказ окидача након одвајања од радне плоче стола приказани су на слици 5.38-b.



Слика 5.38 Шпакла за одвајање делова од радне плоче стола (a) и изглед одштампаних делова након њиховог одвајања (b)

Последњи корак подразумевао је уклањање супортног материјала, као и накнадно шмирглање како би се уклонили трагови од супортног материјала и „ефекат степеница” (*stair-step effect*) на површинама под нагибом. Коначни изглед окидача тримера након уклањања супортног материјала и шмирглања површина приказан је на слици 5.39.

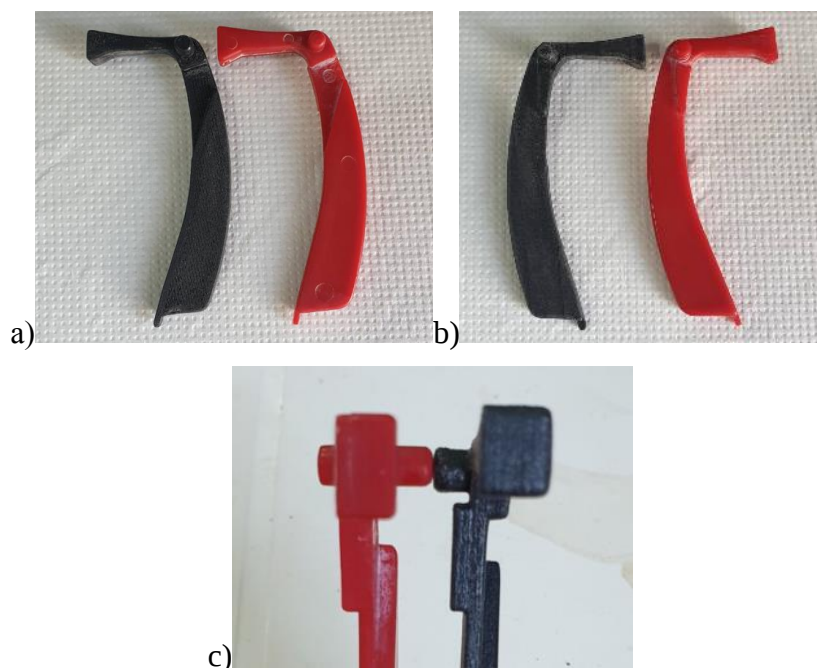


Слика 5.39 Изглед мастер модела окидача тримера добијених АМ технологијом

5.4 Визуелна провера добијених мастер модела

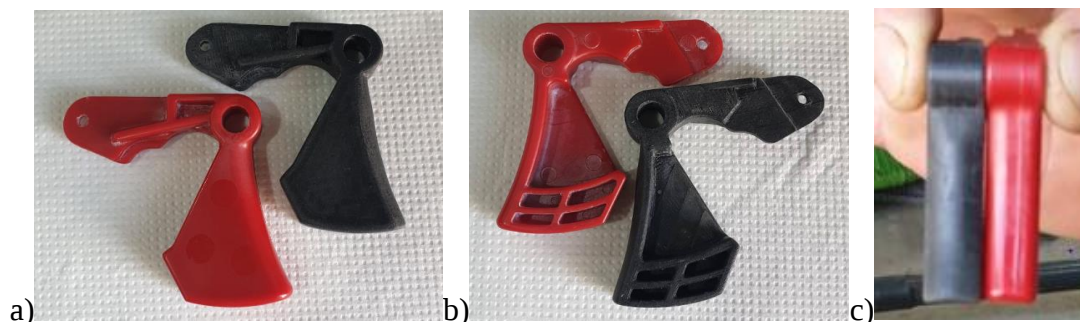
Провере коришћењем физичких модела производа веома су битне јер омогућавају да се пројектовани производи могу осетити у рукама, затим проверу ергономских карактеристика, функционалности у склопу итд. Управо из тих разлога је извршено визуелно упоређивање добијених мастер модела окидача-1 и окидача-2 израђених адитивном производњом са оригиналним деловима како би се утврдиле евентуалне неправилности које се морају кориговати пре саме израде њихових калупа. Добијени прототипови окидача показали су се као функционални у склопу приликом уградње, међутим, због уочених неправилности облика и димензија поједних зона делова, био је неопходан редизајн *CAD* модела како би се спречила појава евентуалног отказа приликом коришћења тримера. Олакшавајућа околност представљала је присуство ојачавајућих стаклених влакана на критичним зонама прототипова окидача тримера.

На слици 5.40 приказани су мастер модел и оригинални окидач-1 где се могу уочити неправилности у геометрији појединих зона. Посебну пажњу је требало посветити реконструкцији зоне окидача-1 која је приказана на слици 5.40-с. Реконструкција је подразумевала превођење квадратног облика (десно) у правоугаони облик (лево), како би мастер и оригинални део постали идентични, а *CAD* модел адекватан за израду калупа.



Слика 5.40 *Поређење мастер модела добијеног адитивном производњом и оригиналног окидача-1*

На исти начин као и у претходном случају, визуелном провером уочене су одређене неправилности које су указивале да се на *CAD* моделу скенираног окидача-2 мора извршити реконструкција. На слици 5.41 приказан је мастер модел и оригинални окидач-2. Као што се види у зони окидача окидача-2, приказаној на слици 5.41.с, примећено је да се мастер модел по облику разликује од оригиналног дела. Ова неправилност не утиче негативно на функционисање окидача, али због естетских разлога захтевало је извођење редицајна на *CAD* моделу.



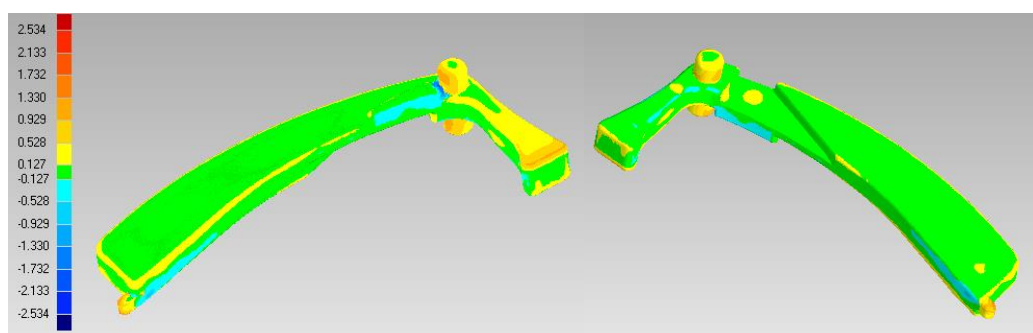
Слика 5.41 *Поређење мастер модела добијеног адитивном производњом и оригиналног окидача-2*

5.4 Поређење *CAD* модела са резултатима 3D скенирања

Провера тачности добијених резултата 3D скенирања извршена је у софтверу *Geomagic Studio*. Предност овог софтвера је у томе што се преклапање два виртуелна објекта (референтни и мерени) изводи аутоматски и не захтева се поседовање координатних система на истим локацијама приликом њиховог поравнања. Циљ је био извршити процену одступања израђених *CAD* модела у односу на иницијалне облаке тачака који су добијени скенирањем окидача на *David SLS-2* и *ATOS 3D* скенеру. Такође, облаци тачака скенираних прототипова окидача-1 и окидача-2 упоређени су са *CAD*

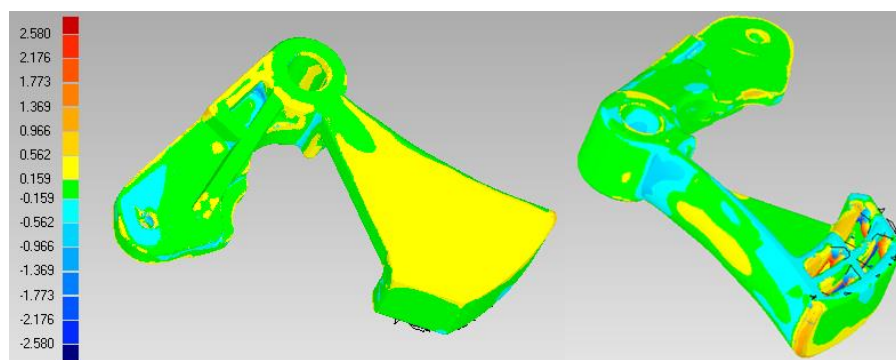
моделима окидача. Процењена одступања послужила су у даљој реконструкцији CAD модела пре израде алата за двокомпонентно ливење. Како би се проценила вредност одступања, било је потребно направити *STL* фајлове. Након тога, преклапањем два *STL* фајла и коришћењем опције *Deviation* добијене су вредности одступања. Треба напоменути да се током анализе вредности одступања мора тачно дефинисати која су одступања настала као последица моделирања јер на појединим областима облака тачака недостаје одређена група тачака због немогућности оптичког скенирања неприступачних делова физичког објекта.

Одступање CAD модела окидача-1 од облака тачака (који је добијен скенирањем на 3D скенеру *David SLS-2*) приказано је на слици 5.42 са обе стране. Вредности одступања се у највећој мери крећу у границама од приближно $-0,127 \div 0,127$ mm. Веће и недозвољене вредности одступања се могу приметити у областима које су означене жутом бојом и које су указале да CAD модел окидача-1 захтева додатну реконструкцију. Одступања у области цилиндричног носача, као и клина на врху окидача-1 нису разматрана јер су ови елементи накнадно дорађени приликом израде CAD модела.



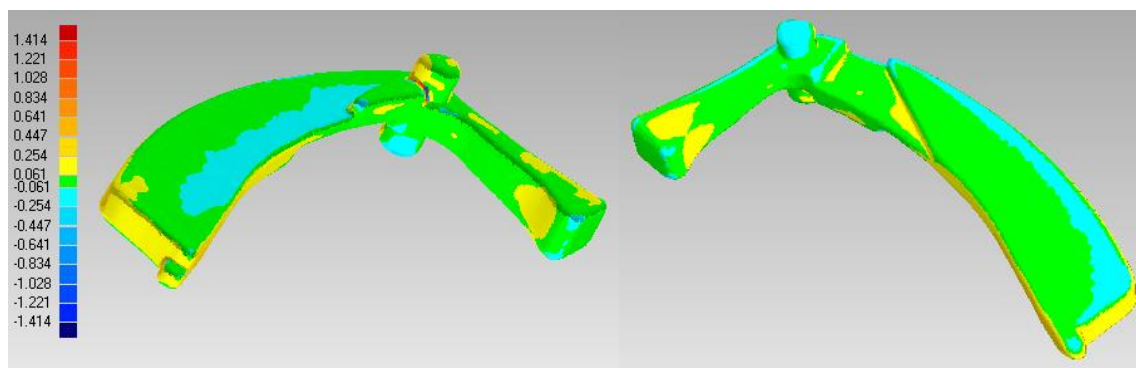
Слика 5.42 Одступање CAD модела окидача-1 од облака тачака

Слично као и код претходног, одступање CAD модела окидача-2 од облака тачака (који је добијен скенирањем на 3D скенеру *ATOS*) приказано је на слици 5.43. Вредности одступања се у највећој мери крећу у границама од приближно $-0,159 \div 0,159$ mm што се може сматрати прихватљивим вредностима. Веће и недозвољене вредности одступања се могу приметити у областима које су означене жутом и светло плавом бојом и које су указале да CAD модел окидача-2 захтева додатну реконструкцију. Одступање у области површине на врху окидача-2, затим у области танких зидова, ребара и отвора нису разматрана јер су настала као последица CAD моделирања недостајућих зона скенирања, односно ови елементи су накнадно дорађени у софтверу *CATIA*. Критично подручје окидача-2 које је захтевало реконструкцију, представља прелаз између зида и дела са отвором где се одступања крећу и до $-0,966$ mm.



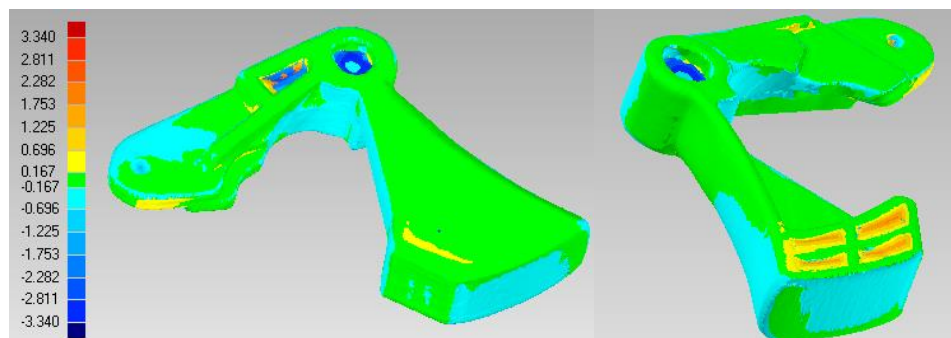
Слика 5.43 Одступање CAD модела окидача-2 од облака тачака

Одступање мастер модела окидача-1 добијеног адитивном производњом од *CAD* модела приказано је на слици 5.44. Може се приметити да се вредности одступања мастер модела у највећој мери крећу у границама од $-0,061 \div 0,061$ што се сматра изузетно dobrim резултатима. Исто тако, нешто веће вредности одступања у границама од $-0,254 \div 0,254$ се могу сматрати прихватљивим и оне су првенствено последице накнадне обраде шмирглањем остатака од супортног материјала.



Слика 5.44 Одступање мастер модела окидача-1 добијеног адитивном производњом од *CAD* модела

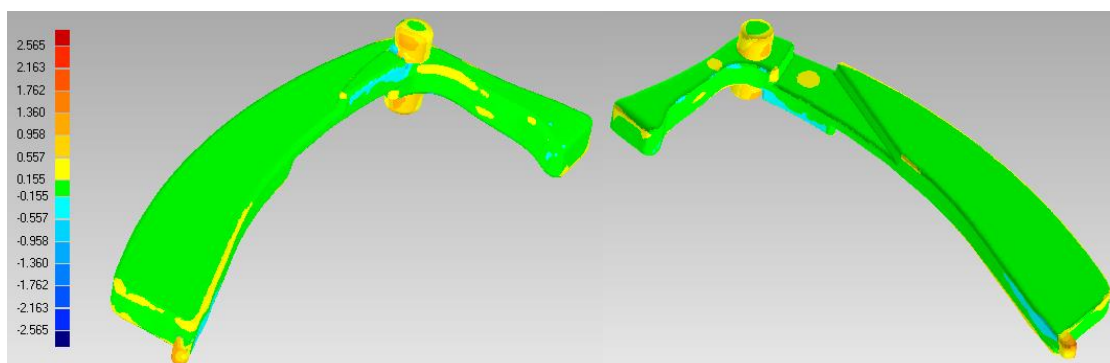
На исти начин као и у претходном случају, одступање мастер модела окидача-2 добијеног адитивном производњом од *CAD* модела приказано је на слици 5.45. Може се приметити да се вредности одступања штампаног дела у највећој мери крећу у границама од $-0,167 \div 0,167$ што се сматра прихватљивим вредностима. Веће вредности су углавном настале као последица накнадне обраде шмирглањем, аутоматског преклапања (модел не поседује заједничке координатне системе) и недостајања одређених група тачака у облаку тачака због немогућности скенирања неприступачних делова објекта.



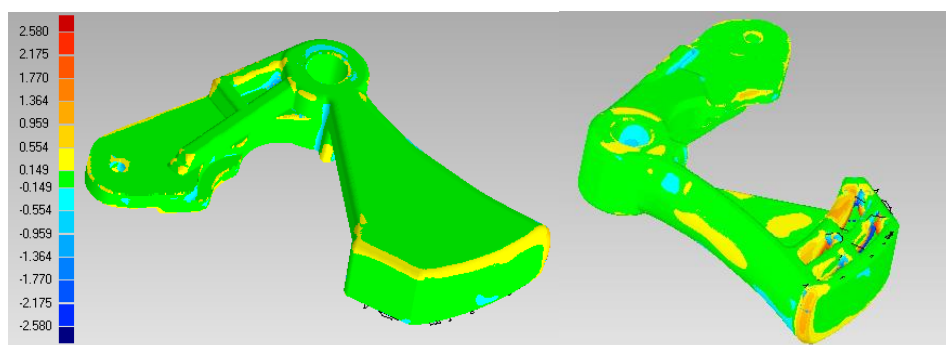
Слика 5.45 Одступање мастер модела окидача-2 добијеног адитивном производњом од *CAD* модела

На основу претходно разматраних вредности одступања добијених у софтверу *Geomagic Studio*, извршен је редизајн *CAD* модела окидача како би се добила што прецизнија геометрија и на тај начин умањила одступања од реалног објекта.

Слика 5.46 прикаује одступање редизајнираног *CAD* модела (на основу уочених одступања) окидача-1, док је на слици 5.47 приказано одступање *CAD* модела окидача-2 од иницијалног облака тачака. Резултати показују да се одступања крећу у дозвољеним границама. Веће вредности одступања се могу уочити само на деловима где је вршено „додавање материјала” приликом израде *CAD* модела и то искључиво у областима где недостаје извесна група тачака у облаку тачака због немогућности њиховог прикупљања скенирањем у неприступачним подручјима.



Слика 5.46 Одступање редизајнираног CAD модела окидача-1 од облака тачака



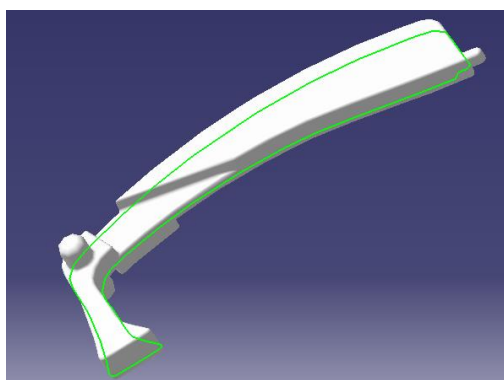
Слика 5.47 Одступање редизајнираног CAD модела окидача-2 од облака тачака

5.5 Израда 3D CAD модела алата за двокомпонентно ливење

Поступак конструкције алата за двокомпонентно ливење обухватио је:

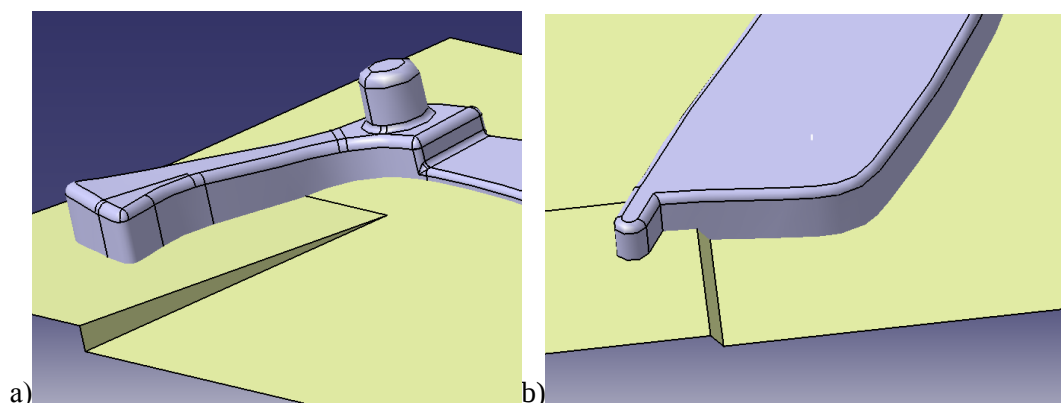
- Одређивање подене равни и правца отварања калупа,
- Одређивање габаритних димензија калупних плоча,
- Израду гравуре калупне шупљине,
- Израду вођица и
- Избор одговарајуће локације и облика уливка и одушака за ваздух.

За потребе овог рада конструисани су и израђени само алати за окидач-1, с обзиром да су принципи и поступак идентични и за окидач-2. Алат (калуп) за двокомпонентно ливење конструисан је у софтверу CATIA. На самом почетку процеса конструисања алата, одређена је оптимална подеона линија калупа. Линија поделе, на основу CAD модела, приказана је на слици 5.48.

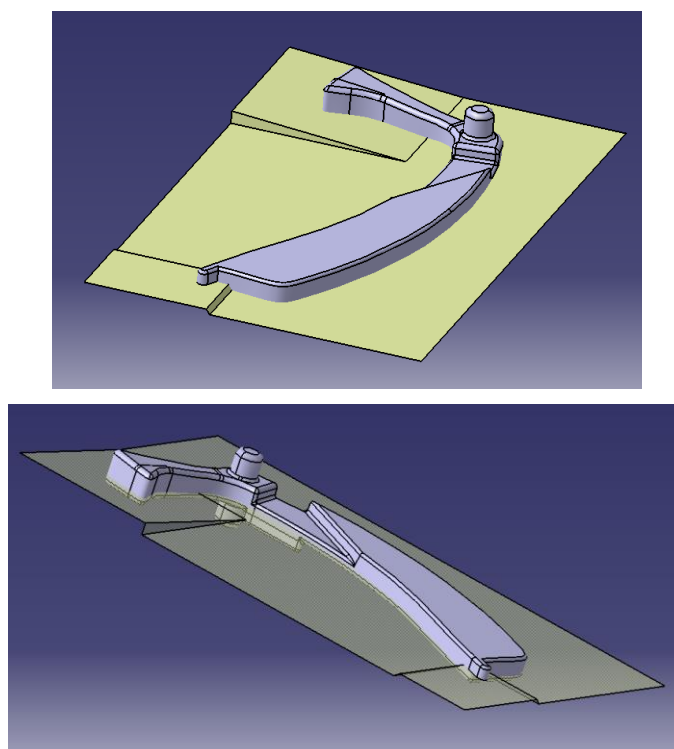


Слика 5.48 Дефинисање подеоне линије

Након одређивања подене линије, уследило је конструисање подеоне равни. Израда одговарајуће подене равни није била могућа коришћењем само једне равне површине, већ је то изведено као на сликама 5.49. Такође, било је потребно конструисати подеону раван тако да се сви детаљи на окидачу-1 могу израдити технологијом двокомпонентног ливења, односно избећи евентуалне *undercut* елементе који могу створити потешкоће приликом отварања калупа након процеса ливења. Подеона раван је израђена у модулу *Generative Surface Design*, односно површинским моделирањем. На слици 5.49-а приказан је изглед подеоне равни у зони краћег крака окидача-1, која је захтевала постављање под благим углом. Затим, као што је приказано на слици 5.49-b, подена раван у области дужег крака, измештена је вертикално на горе, како би се сачувао облик клина након вађења одливка из калупа. Коначан изглед подеоне равни приказан је на слици 5.50.



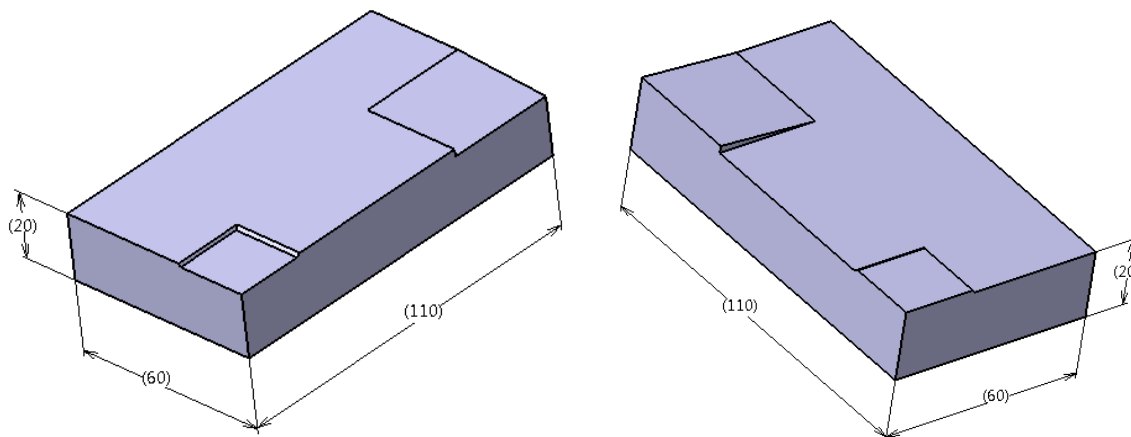
Слика 5.49 Изглед подене равни у критичним зонама окидача



Слика 5.50 Коначан изглед подеоне равни окидача-1

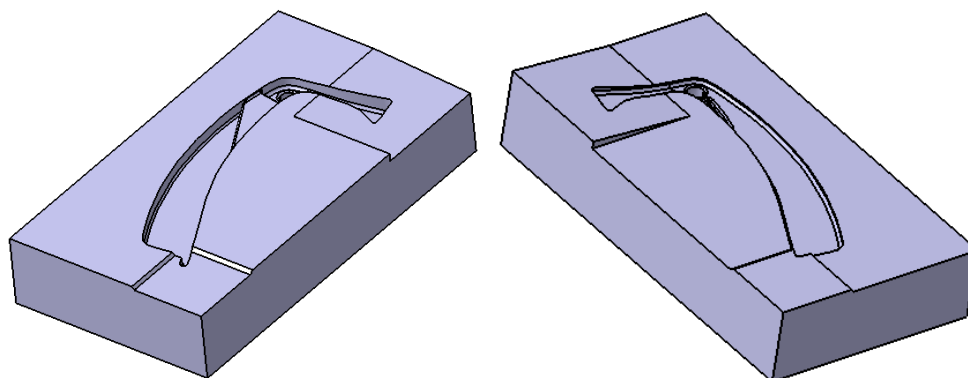
Након утврђивања да су сви елементи окидача-1 обухваћени конструисањем подеоне равни, уследило је одређивање габаритних димензија калупних плоча за

двокомпонентно ливење. Коначан изглед подеоне равни приказан је на слици 5.50. Габаритне димензије калупних плоча одређене су тако да све његове површине буду удаљене 10-15 mm од калупне шупљине. Према томе, коначне Димензије калупне плоче износе 110 x 60 x 20 mm. Горња и доња калупна плоча, са габаритним димензијама, приказане су на слици 5.51.

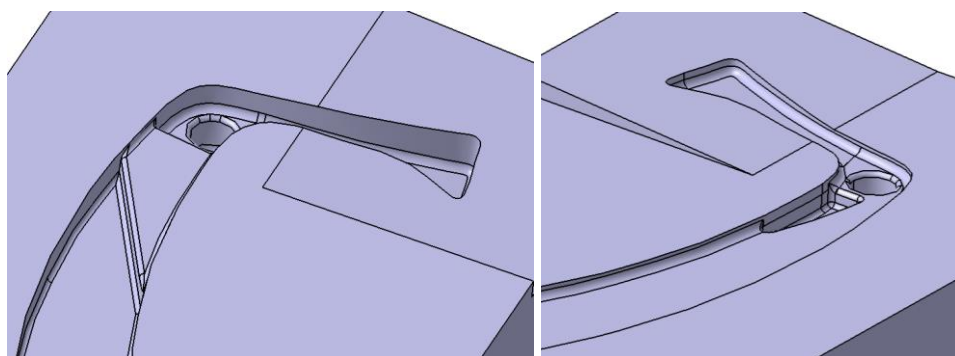


Слика 5.51 Габаритне димензије доње (лево) и горње калупне плоче (десно)

У следећем кораку извршено је утискивање CAD модела окидача-1 у горњу и доњу калупну плочу, након чега су добијене гравуре калупне шупљине, које су приказане на слици 5.52. Коришћена је једноставна опција *Boolean Operation-Remove*. На слици 5.53 приказан је изглед гравуре калупне шупљине доње и горње плоче која одговара геометрији CAD модела окидача-1.

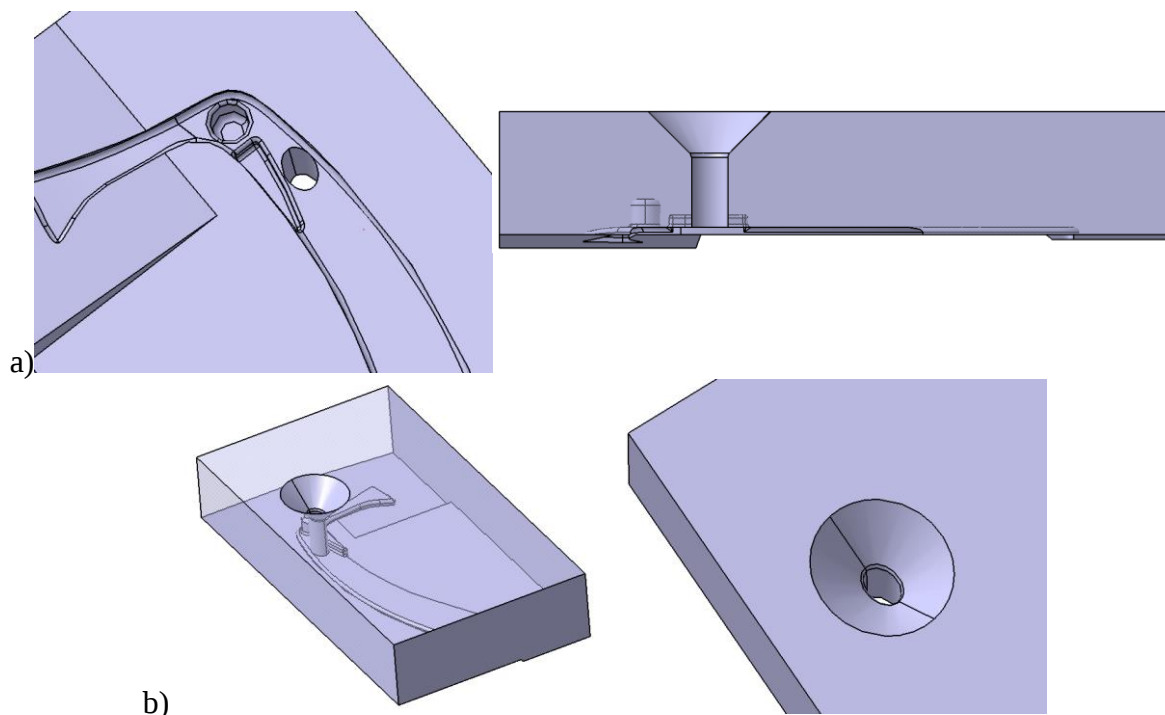


Слика 5.52 Изгед доње (лево) и горње калупне плоче (десно) након израде калупне шупљине



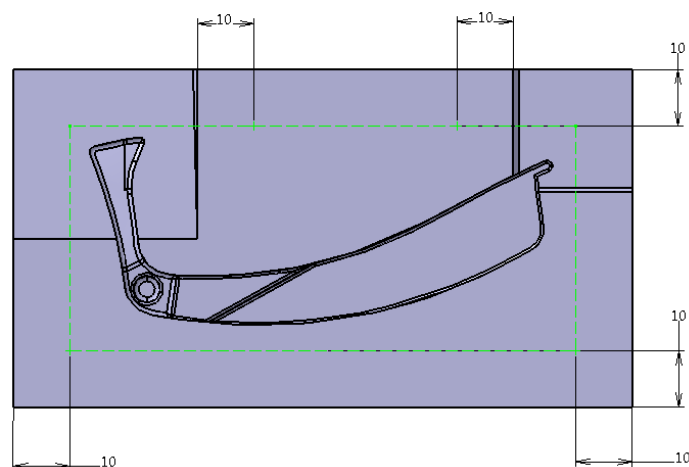
Слика 5.53 Гравура доње (лево) и горње калупне плоче (десно)

Након израде гравуре калупне шупљине, уследило је постављање уливног канала у горњем калупу који служи за допремање течног материјала у калупну шупљину (слика 5.54). Уливни канал је елипсастог попречног пресека димензија $6 \times 4,2 \text{ mm}$. Поред тога, на самом врху горњег калупа, израђен је и уливак који олакшава поступак уливања течног материјала у уливни канал.



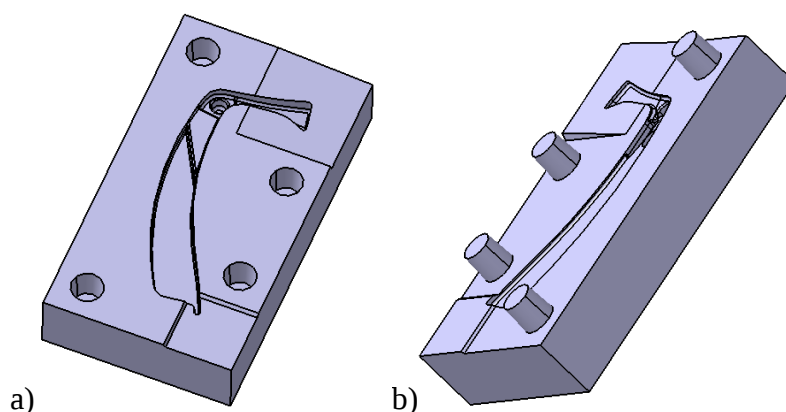
Слика 5.54 Изглед уливног канала елипсастог попречног пресека (a) и уливка у горњем делу калупа (b)

Након израде уливног канала уследило је моделирање елемената за вођење. На CAD моделу доњег калупа израђене су четири рупе за вођење, пречника 10 mm и дубине 10 mm . Вођице су коничног облика са нагибом од 3° ради лакшег раздвајања калупних плоча. Кроз рупе за вођење је предвиђено да пролазе вођице које су израђене на доњем калупу, пречника 10 mm и висине $9,5 \text{ mm}$, коничног облика са нагибом од 3° . Удаљеност оса елемената за вођење од контурних ивица износи 10 mm (слика 5.55). Оса елемената за вођење је паралелна са смером отварања калупа.



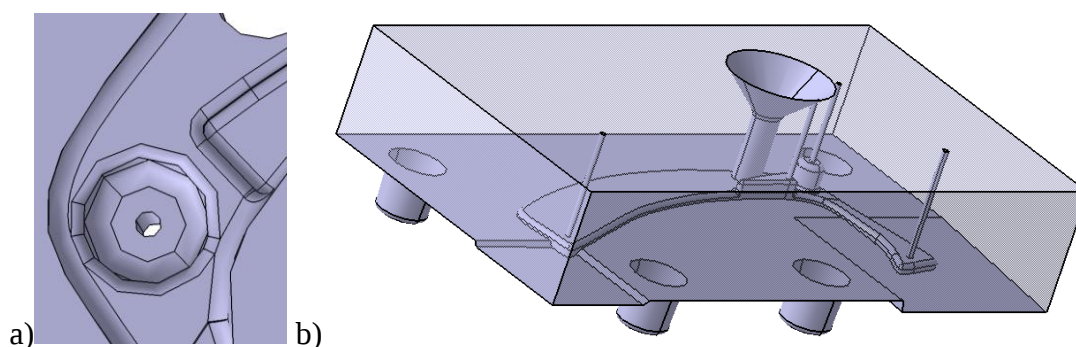
Слика 5.55 Положај елемената за вођење

На слици 5.56 приказан је доњи (а) и горњи (б) калуп након израде елемената за вођење.



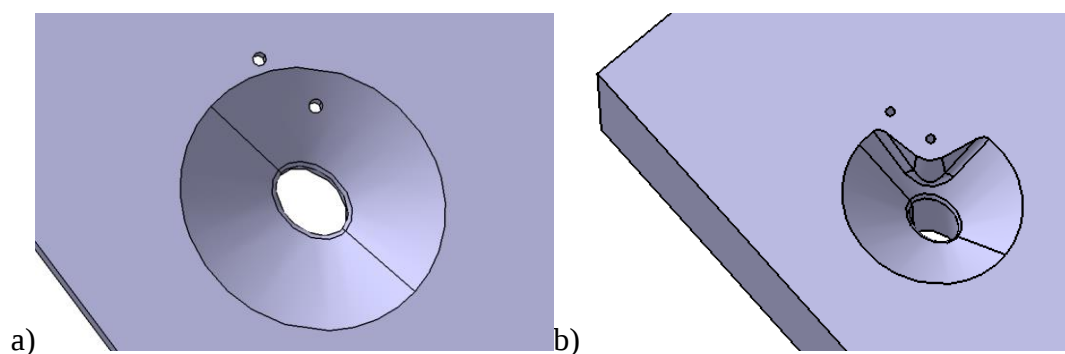
Слика 5.56 Доњи и горњи калуп са израђеним елементима за вођење

Како би се избегла појава заробљавања ваздуха у калупној шупљини, која може негативно утицати на квалитет одливка, израђени су технолошки отвори пречника 1 mm на најудаљенијим и критичним деловима калупне шупљине. Технолошки отвори израђени су у горњем делу калупа као што је приказано на слици 5.57. На слици 5.57-а приказан је изглед технолошког отвора на локацији цилиндричног носача, док је на слици 5.57-б дат приказ горњег калупа са свим технолошким отворима.



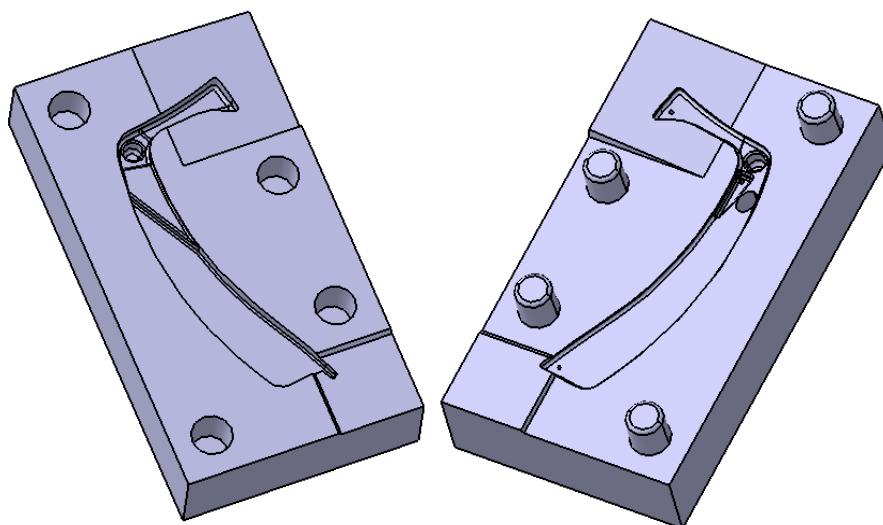
Слика 5.57 Технолошки отвори у горњем делу калупа

Након израде технолошких отвора, приступило се кориговању улива због уоченог проблема приказаног на слици 5.58-а. Премештање ваздушног отвора изнад елемента у облику троугла није било могуће па је решење нађено кориговањем улива. Уливак је коригован као на слици 5.58-б чиме је избегнуто пролажење ваздушног отвора кроз исти.



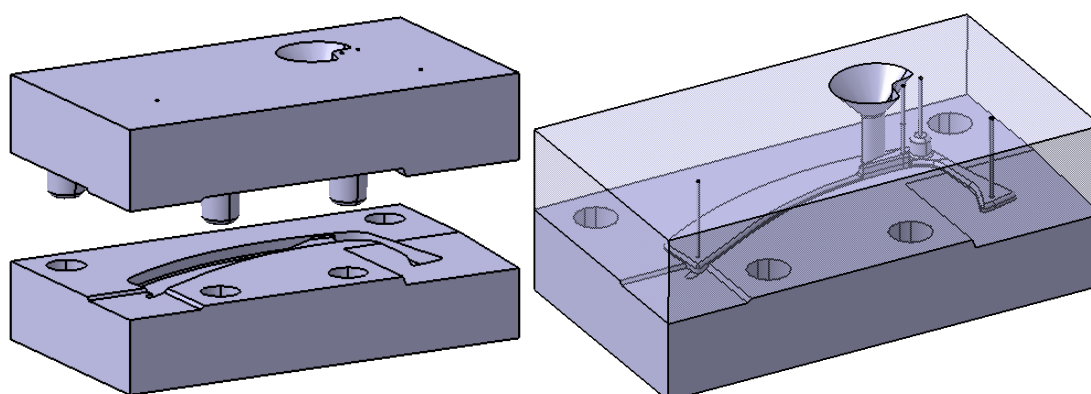
Слика 5.58 Ваздушни отвор у уливу (а) и изглед улива након реконструкције (б)

Након обарања ивица, израде заобљења и нагиба на појединим елементима, 3D CAD модели горњег и доњег дела калупа за двокомпонентно ливење су добили коначан изглед који је приказан на слици 5.59.



Слика 5.59 3D CAD модели доњег (лево) и горњег (десно) дела калупа за двокомпонентно ливење

На слици 5.60 приказан је изглед склопа израђеног у софтверу CATIA који чине CAD модели са слике 5.59. CAD модел калупа за двокомпонентно ливење је приказан са раздвојеним (лево) и састављеним плочама (десно).

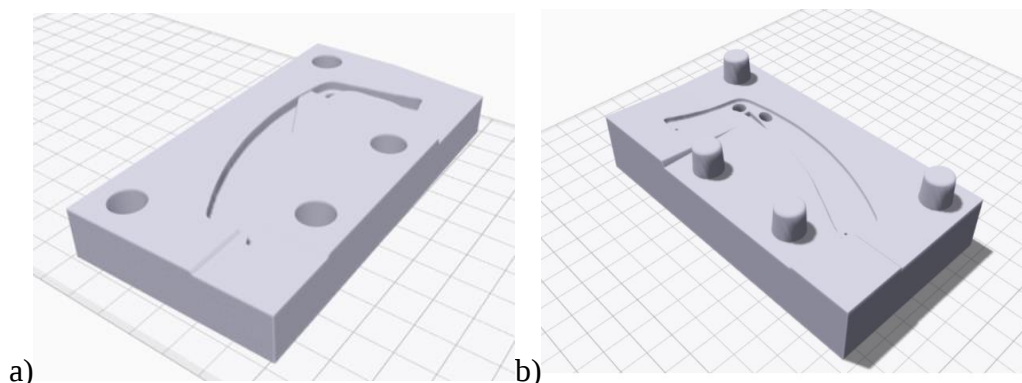


Слика 5.60 3D CAD модел склопа калупа за двокомпонентно ливење пластике

CAD модели горњег и доњег калупа за двокомпонентно ливење сачувани су у STL формату који ће се користити за адитивну производњу FDM технологијом на уређају MarkForged Onyx Pro.

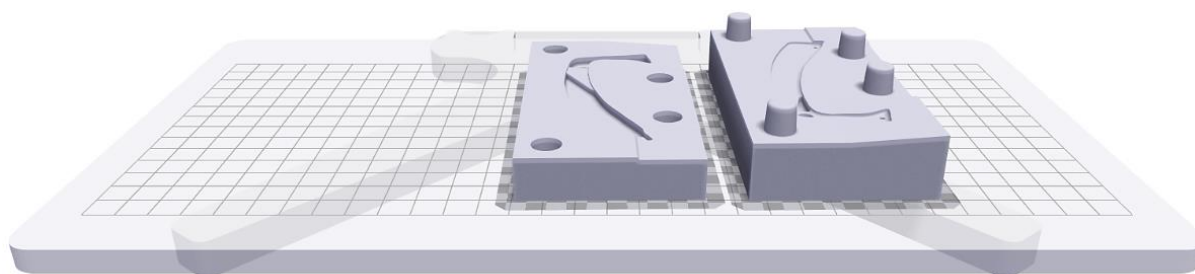
6. Адитивна производња алата за двокомпонентно ливење пластике

Адитивна производња калупа окидача-1 извршена је на 3D штампачу *MarkForged Onyx Pro*. Након утврђивања да је уређај правилно подешен и калибрисан, уследило је импортовање *STL* фајлова у софтверу *Eiger*. Изглед увежених модела калупа окидача-1 у радном окружењу софтвера приказан је на слици 6.1.



Слика 6.1 Увежени *STL* модели доњег (a) и горњег (b) калупа окидача-1 у софтверу *Eiger*

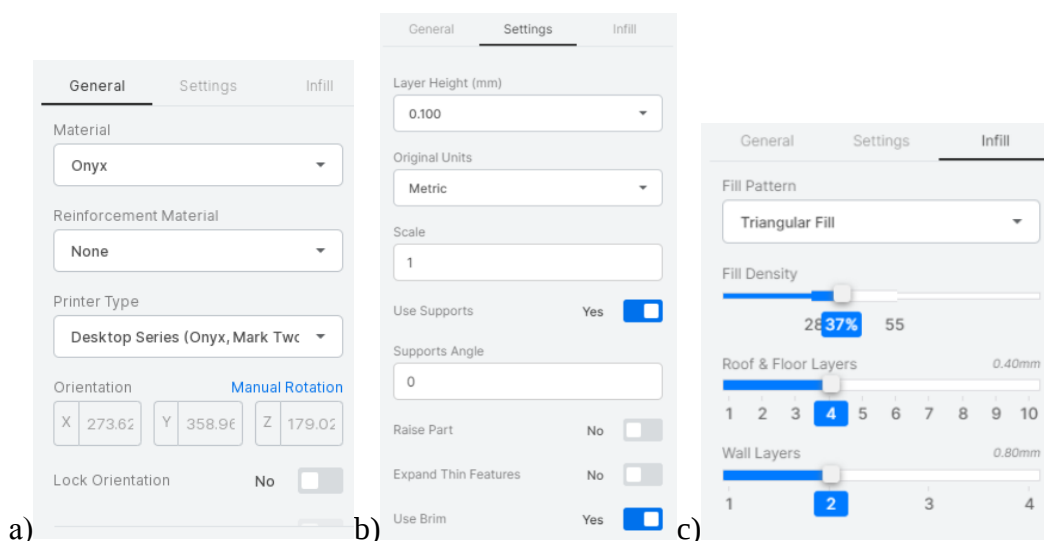
Као што је објашњено у петом поглављу, 3D штампач *MarkForged* има могућност штампања више делова истовремено. Позиционирани доњи и горњи делови калупа окидача-1 на радној плочи приказани су на слици 6.2. Водило се рачуна о њиховом међусобном растојању тако да оно не буде превелико, како процес адитивне производње не би превише трајао. Поред тога, модели су позиционирани тако да количина утрошеног супортног материјала буде минимална.



Слика 6.2 Позиционирани *STL* фајлови окидача-1 и окидача-2 на виртуелном радном столу у софтверу *Eiger*

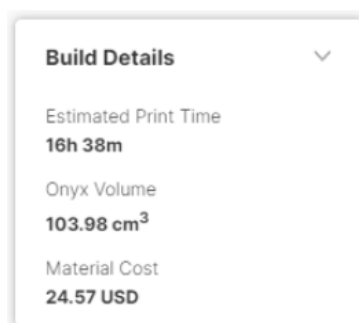
У следећем кораку подешени су параметри процеса адитивне производње. На слици 6.3-а приказан је прозор *General* у коме је за основни материјал (*Material*) изабран *Onyx*. За разлику од мастер модела, за адитивну производњу калупа окидача-1 није изабран ојачавајући материјал (*Reinforcement Material*). У падајућем менију *Printer Type* изабран је *Desktop Series (Onyx Mark Two)*. Дебљина слојева (*Layer Height*) подешена је у прозору *Settings* чија вредност износи 0.1 mm (слика 6.3-b). Такође, у овом прозору изабрана је опција *Use Supports* како би уређај изградио потребне ослонце. Бирањем опције *Use Brim*, дефинисана је израда структуре која прати доњу спољашњу контуру калупа која има улогу спречавања евентуалних померања модела у току адитивне производње. На крају, коришћењем прозора *Infill* (слика 6.3-c), у падајућем менију *Fill Pattern*, изабрана је опција *Triangular Fill* која омогућава израду ребрасте структуре у

унутрашњости модела чија вредност износи 37% од укупне запремине. Овај прозор се користи и за дефинисање броја слојева на врху, дну и на свим зидовима модела.



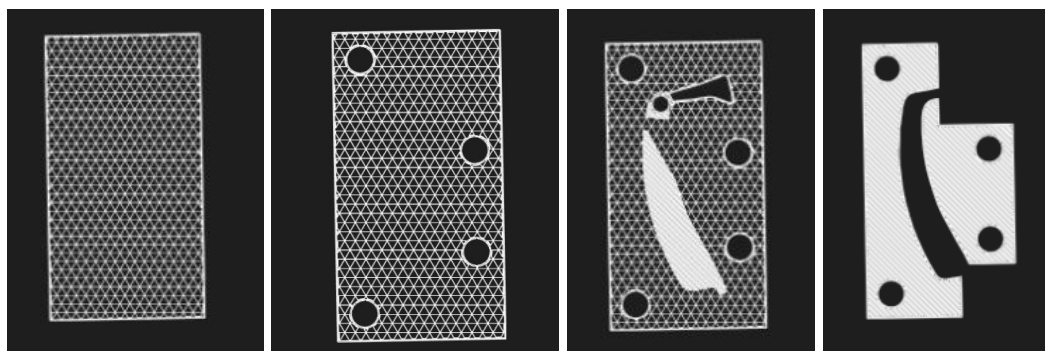
Слика 6.3 Подешавање параметара адитивне производње у софтверу Eiger:
a) General; b) Settings; c) Infill

На слици 6.4 приказани су техно-економске подаци у прозору *Build Details*. Према овим подацима, за израду калупа окидача-1 било је потребно 16h и 38 min, 103,98 cm³ *Onyx* материјала, а процена набавне цене материјала у САД иносила је 24,57 USD.

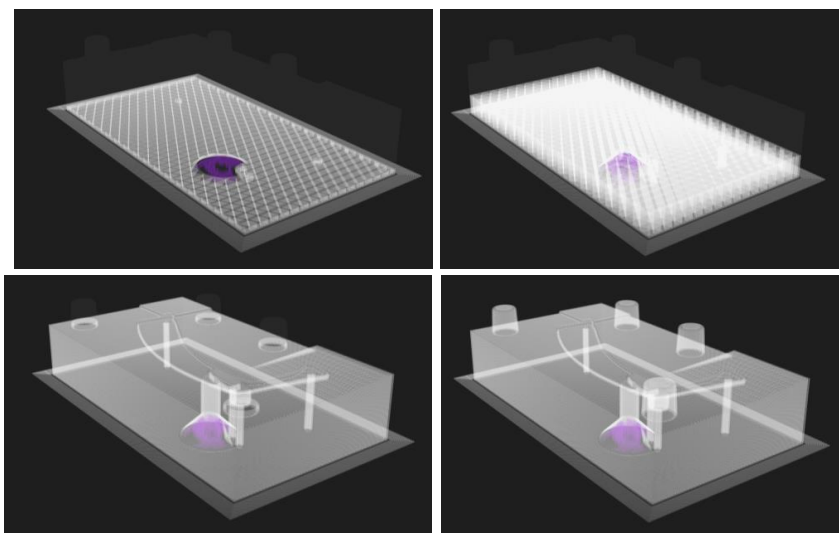


Слика 6.4 Техно-економски подаци у прозору *Build Details*

Као што је већ описано у петом поглављу мастер рада, у софтверу *Eiger* се пре почетка процеса штампања може прегледати целокупни ток процеса формирања штампаног дела по слојевима помоћу опције *Internal View*. На сликама 6.5 и 6.6 дат је виртуелни 2D и 3D приказ тока адитивне производње калупа окидача-1 по слојевима.

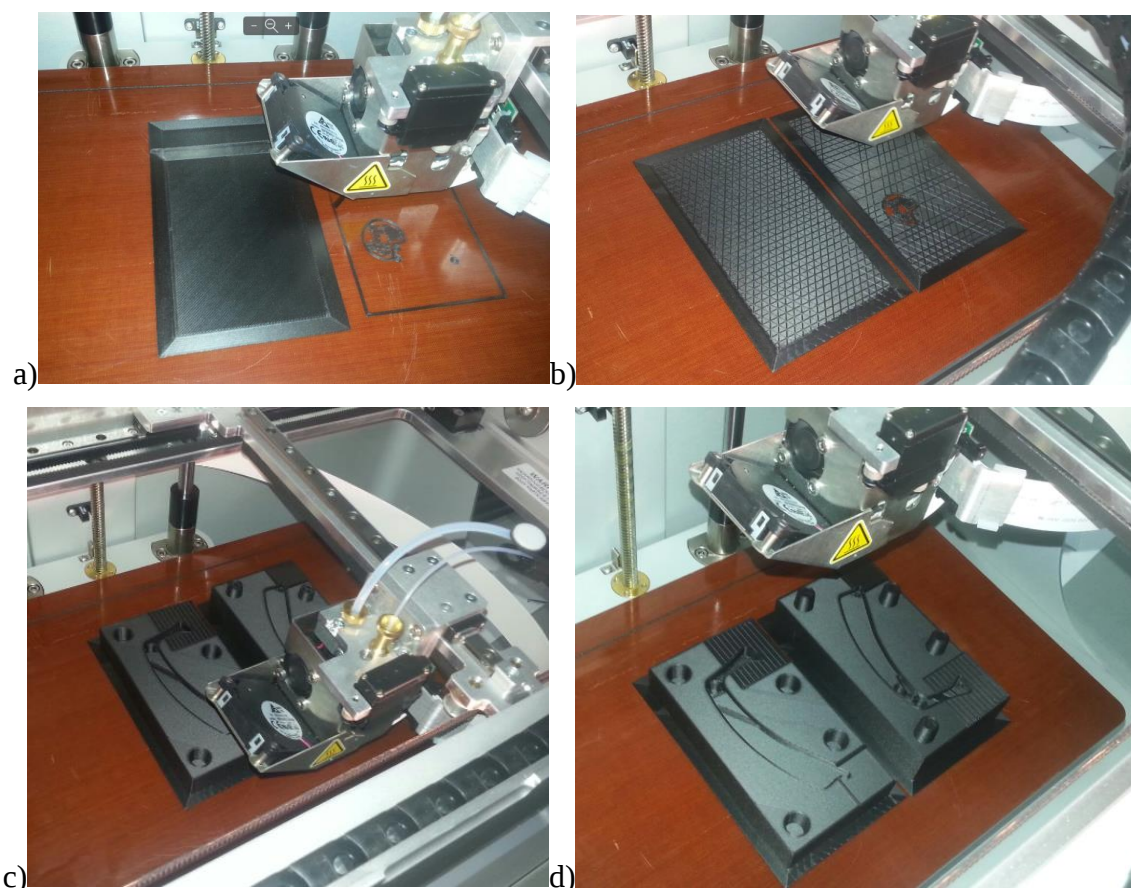


Слика 6.5 2D приказ адитивне производње доњег калупа окидача-1 по слојевима



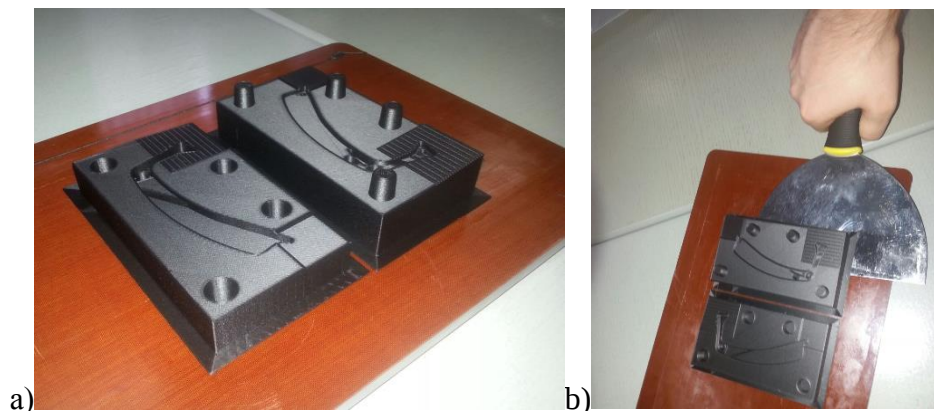
Слика 6.6 3D приказ адитивне производње горњег калупа окидача-1 по слојевима

Након провере свих потребних параметара и успешно изведеног пробног теста, стартован је процес адитивне производње калупа окидача-1. Уређај је повремено надгледан како би се избегла појава евентуалних грешака. Изглед штампаних калупа окидача-1 у току процеса адитивне производње приказан је на слици 6.7.



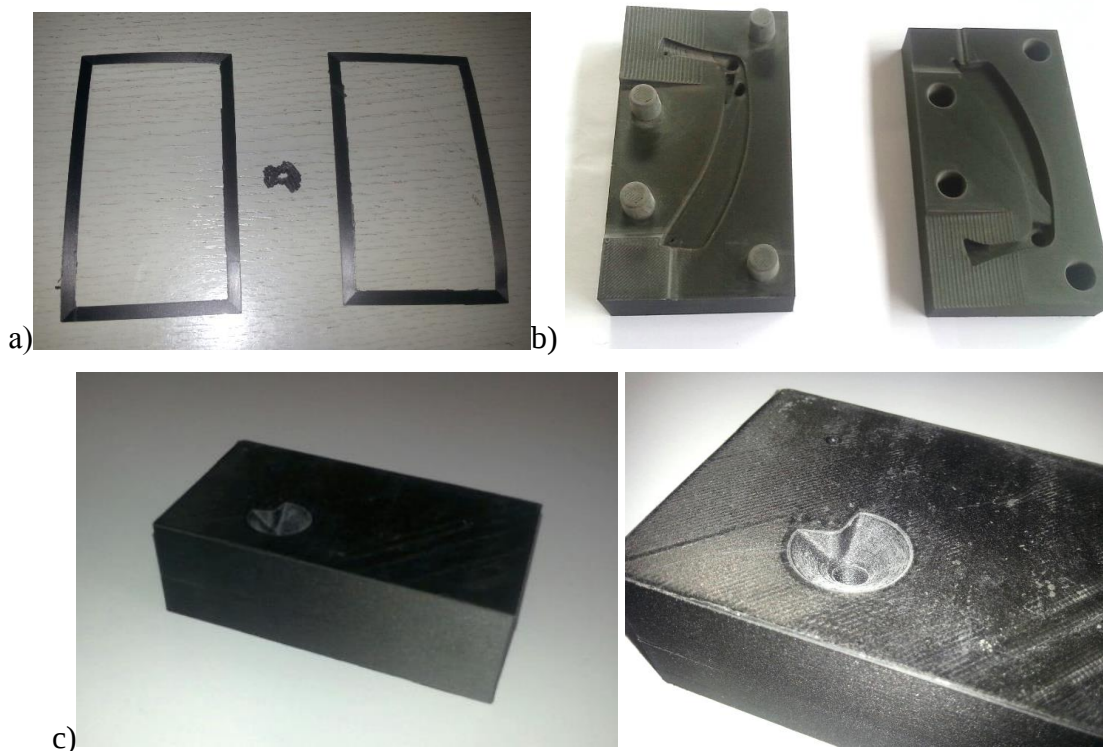
Слика 6.7 Изглед доњег и горњег дела калупа за двокомпонентно ливење пластике у току процеса адитивне производње FDM технологијом на уређају MarkForged Onyx Pro: а) Израда првог слоја; б) Израда десетог слоја; в) Израда 250-ог слоја, д) Крај процеса адитивне производње

Изглед калупа окидача-1, након завршетка процеса адитивне производње и уклањања радне плоче из штампача, приказан је на слици 6.8-а. Након тога, уследило је одвајање штампаних калупа од радне плоче (слика 6.8-b). Одвајање је изведено помоћу шпакле, строго водећи рачуна да њен положај деловања буде под веома малим углом како би се избегла оштећења на израђеним калупима.



Слика 6.8 Изглед калупа након завршеног процеса адитивне производње (a) и њихово одвајање од радне плоче (b)

Након одвајања израђених калупа од радне плоче, извршено је уклањање супортног материјала и свих сувишних елемената (слика 6.9-a). По завршетку процеса уклањања супортног материјала, уследио је процес шмирглања како би се ублажио ефекат степеница на косим површинама и добио што бољи квалитет површине. Коначан изглед калупа добијених адитивном производњом приказан је на слици 6.9-b. На слици 6.9-с приказан је склоп калупа (лево) за двокомпонентно ливење са уливком (десно).



Слика 6.9 Коначан изглед калупа за двокомпонентно ливење пластике добијен адитивном производњом применом FDM технологије

Визуелна провера извршена је коришћењем лупе, како би се утврдило да ли између додирних површина горњег и доњег дела калупа за двокомпонентно ливење постоји зазор. Зазор може негативно утицати на ток двокомпонентног ливења и главни је узрочник евентуалне појаве превелике количине материјала у облику венца што може нарушити коначни изглед одливеног дела. У случају појаве зазора мора се приступити процесу уклањања ефекта степеница. На сликама 6.10 приказан је изглед линије спајања горњег и доњег калупа за двокомпонентно ливење пластике који је израђен адитивном производњом.



Слика 6.10 Визуелна провера линије спајања додирних површина

Након утврђивања да не постоје зазори и да је остварен задовољавајући контакт између горњег и доњег калупа, уследио је поступак двокомпонентног ливења који ће детаљно бити описан у наставку мастер рада.

7. Поступак двокомпонентног ливења пластичног дела у алату добијеном адитивном производњом

Алат израђен технологијом адитивне производње, коришћен је приликом реализације поступка двокомпонентног ливења. Поступак двокомпонентног ливења састојао се из неколико главних корака као што су:

- Припрема калупа за двокомпонентно ливење,
- Припрема потребног материјала,
- Наношење слоја раздвајајућег материјала,
- Наношење смеше у шупљину доњег дела калупа,
- Затварање калупа и стезање помоћу стеге,
- Утискивање смоле кроз уливни канал и
- Постављање калупа на сигурно место за процес очвршћивања материјала.

7.1 Опис примењеног двокомпонентног материјала

Примењени материјал у поступку двокомпонентног ливења јесте *NEUKADUR AF Neu* плаве боје, односно такозвана површинска смола. Главна особина оваког материјала представља то што поседује систем епоксидних смола. Има велику тврдоћу и отпорност на трење. Такође, карактерише је и побољшана отпорност на хемикалије и топлоту употребом очвршћивача *BWS* [49].

Овај материјал се примењује у [49]:

- Изради модела за ливење,
- Изради разних алата и калупа,
- Изради калупа за пенасте материјале и сл.

Пре мешања треба обратити пажњу на темељно хомогенизовање смоле и очвршћивача. Након темељног мешања смоле и очвршћивача потребно је нанети смешу помоћу четкице са кратком длаком или излити. Други слој треба да се нанесе чим је површински слој желиран и још увек помало лепљив. Ово стање зависи од температуре, а при собној температури у зависности од типа очвршћивача постиже се након приближно 40 min. *NEUKADUR AF Neu* испоручује се у паковању од 0,5 и 1 kg, док се очвршћивач *BWS* испоручују у паковању од 50 до 100 g [49].

Материјал треба складиштити у оригиналном чврсто затвореном паковању на температури од 15-25°C. При одговарајућем складиштењу материјали се користити у оквиру рокова трајања који су наведени на налепницама. Корисник треба да се информисе из сигурносних листова о физикалним, еколошким, триболошким и осталим релевантним подацима као и о сигурном руковању и складиштењу.

У табели 7.1 представљене су особине материјала у неумреженом стању.

Табела 7.1 Особине материјала у неумреженом стању [49]

Особина	Јединица мере	<i>NEUKADUR AF Neu</i>	Очвршћивач <i>BWS</i>
Боја		Плава	Ћилибара
Густина (20°C)	g/cm ³	1,75	0,95
Вискозитет (20°C)	mMpas	140	4

Особине мешавине *NEUKADUR* смоле и *BWS* очвршћивача дате су у табели 7.2.

Табела 7.2 Особине мешавине *NEUKADUR* смоле и *BWS* очвршћивача [49]

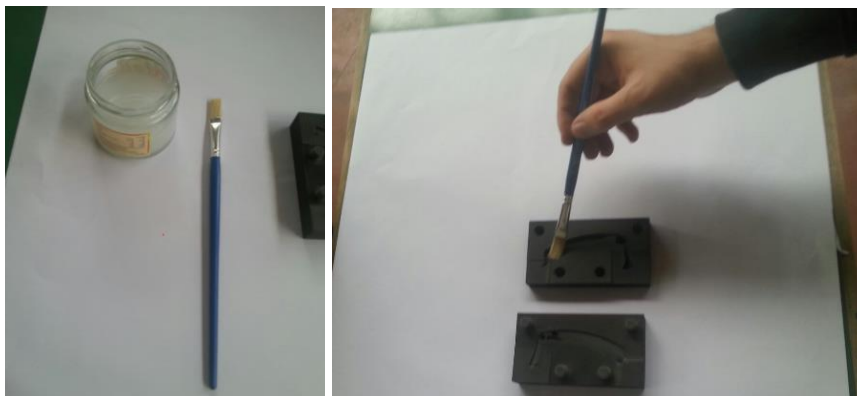
Особина	Јединица мере	Стандард	<i>NEUKADUR AF Neu</i> + 10 % очвршћивач <i>BWS</i>
Вискозност мешавине (20°C)	mPa·s		55
Време обраде (20°C) 1g	Минута		15
Време желатирања (20°C) 1 mm	Минута		40
Време очвршћавања (20°C) 1 mm	Часова		14-18
Густина	g/cm ³	DIN 53479	1,7
Тврдоћа	Shore D	DIN 53505	83
Постојаност облика на топлоти	Martens °C	DIN 53458	90
Затезна чврстоћа	N/mm ²	DIN 53455	30
Е-модул-испитивање на затезање	N/mm ²	DIN 53457	7,5
Притисна чврстоћа	N/mm ²	DIN 53454	120
Чврстоћа притиском кугле	N/mm ²	DIN 53456	160
Коефицијент топлотне проводљивости	W/K·m	DIN 52612	0,5
Коефицијент линеарне термичке дилатације	10 ⁻⁶ K ⁻¹	VDE	40

7.2 Опис поступка двокомпонентног ливења

Први корак у поступку двокомпонентног ливења представља припрему калупа. Било је потребно детаљно прегледати калуп и уклонити све нечистоће које би могле проузроковати различите грешке на добијеним одливцима. Калуп је пажљиво очишћен алкохолом након чега је био спреман за извођење наредног корака.

У следећем кораку, извршено је наношење танког слоја раздвајајућег материјала. Улога овог материјала јесте да олакша поступак вађења одливка из калупа, а самим тим и поступак раздвајања делова калупа након поступка ливења. Слој раздвајајућег материјала се наноси на свим местима где материјал за ливење долази у контакт са алатом. Према томе, танак слој раздвајајућег материјала је нанет помоћу четкице по свим површинама гравуре калупне шупљине доњег и горњег калупа, а затим и по уливном каналу. Такође, танак слој овог материјала је нанет и по површинама где долази до међусобног контата између горњег и доњег дела калупа, неколико милиметара око гравуре калупне шупљине где може доћи до стварања вишка материјала у облику венца.

Раздвајајући материјал, као и поступак наношења танког слоја помоћу четкице, приказан је на слици 7.1. Када се нанесе танак слој раздвајајућег материјала, потребно је сачекати одређено време и тек онда започети поступак уливања материјала за ливење у калупну шупљину. Треба напоменути да приликом припреме оваквих материјала (као и осталих материјала који ће бити описани у наставку рада), а нарочито приликом њихове употребе, треба строго водити рачуна о њиховој токсичности јер могу изазвати нежељене здравствене последице у контакту са кожом. Исто тако, пожељно је да се поступак припреме материјала изведе ван канцеларијског окружења због испарења.



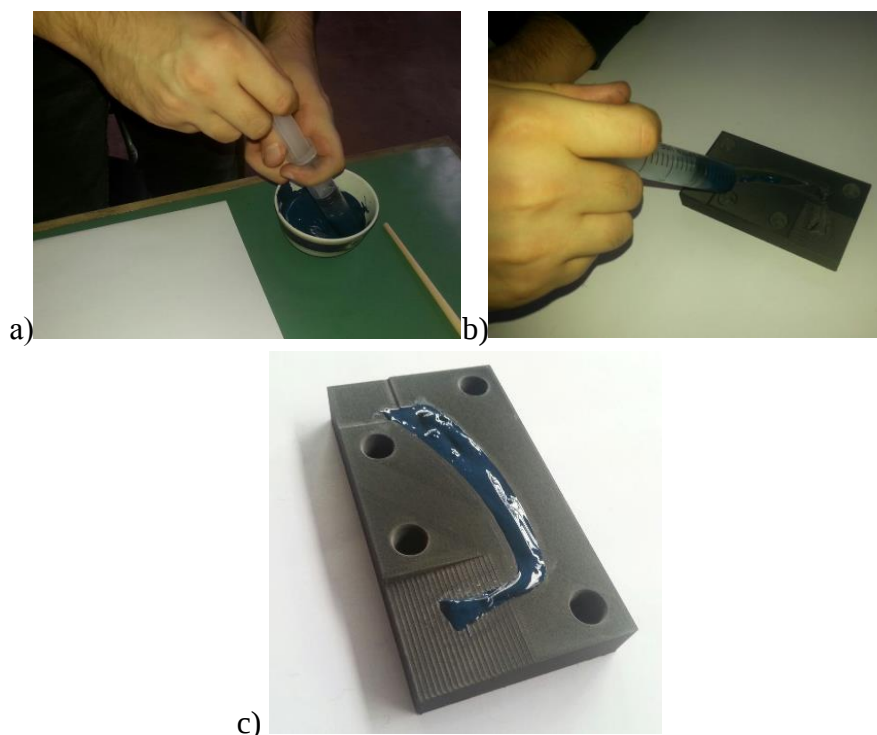
Слика 7.1 Припрема и поступак наношења танког слоја раздвајајућег материјала

Након успешног наношења танког слоја раздвајајућег материјала, припремљен је материјал за ливење. Према упутству произвођача, који је описан на почетку овог поглавља, смолу *NEUKADUR AF Neu* је било потребно помешати са 10% очвршћивача *BWS*. Особине ових материјала представљене су у табели 7.1 (пре умрежавања). Након мерења запремине калупне шупљине, 20 ml смоле је помешано са 2 ml очвршћивача *BWS*. Примењени материјали су приказани на слици 7.2.



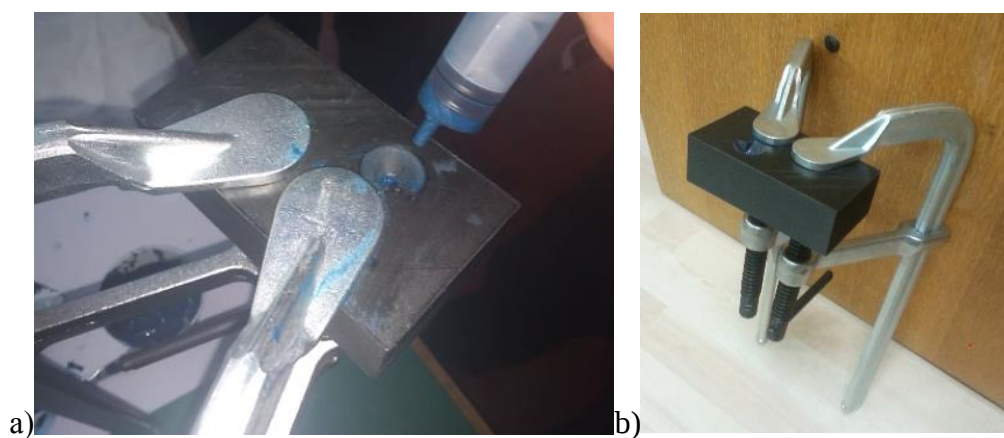
Слика 7.2 Примењени материјали: а) *NEUKADUR AF Neu*; б) очвршћивач *BWS*

Добијена смеша коју чине смола плаве боје *NEUKADUR AF Neu* и *BWS* очвршћивач пажљиво је хомогенизована, а затим је уследило њено наношење у доњи део калупне шупљине као што је приказано на слици 7.3. За извођење овог поступка коришћен је шприц као што је приказано на слици 7.3-а. Према упутству произвођача материјала, препоручено је да се, због нешто веће густине добијене смеше, прво нанесе дебео слој у доњи део калупне шупљине (7.3-б) и тек након тога приступи поступку убризгавања кроз уливни систем. Такође, на слици 7.3-с, приказан је и изглед доњег калупа након пуњења калупне шупљине непосредно пре затварања калупа.



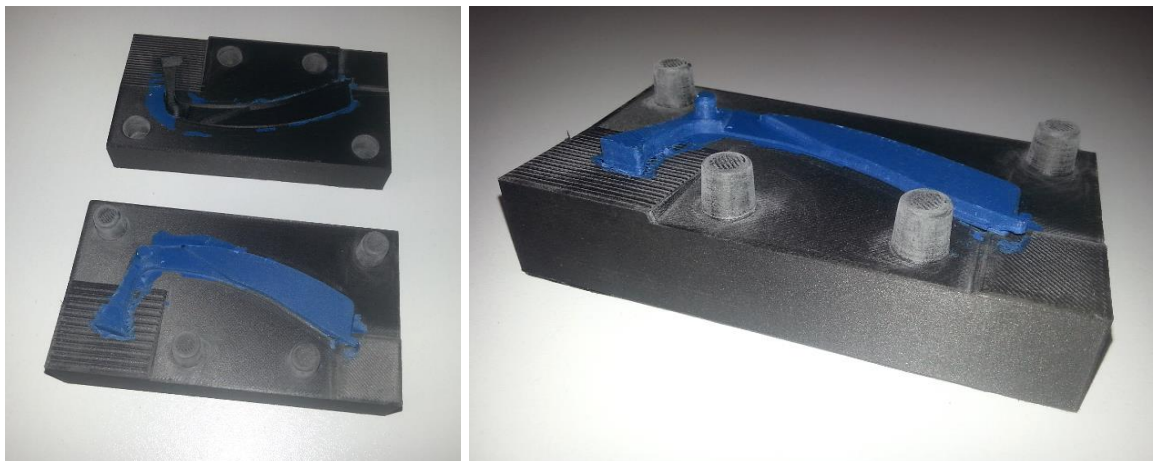
Слика 7.3 Поступак пуњења доње калупне шупљине: а) Пуњење шприца хомогенизованом смешом; б) Наношење смеше у доњу калупну шупљину; с) Изглед доњег дела калупа за двокомпонентно ливење након пуњења калупне шупљине смешом

Након успешног пуњења доње калупне шупљине, уследило је пажљиво затварање калупа. Како би се остварио потпуни контакт додирних површина горњег и доњег калупа и спречило стварање вишка материјала у облику венца, калуп је стегнут и осигуран стегама. Након стезања калупа, у следећем кораку је извршено додатно убризгавање смеше кроз уливни систем који је израђен у горњем делу калупа. Поступак убризгавања материјала кроз уливни систем приказан је на слици 7.4-а. Током поступка убризгавања материјала, праћени су технолошки отвори за ваздух који су израђени у горњем делу калупа. Пролажење материјала кроз ове отворе помогло је приликом утврђивања попуњености калупне шупљине материјалом. Након завршеног процеса убризгавања материјала, калуп је одложен на сигурно место јер потребно време очвршћавања материјала износи 14-18h на собној температури (слика 7.4-б).



Слика 7.4 Убризгавање материјала кроз уливни систем (а) и крај поступка двокомпонентног ливења

Након завршеног процеса очвршћавања материјала у калупу који је трајао око 18h, уследило је раздвајање горњег и доњег калупа. На слици 7.5 приказан је изглед одливка у раздвојеном калупу. Коначан изглед одливка, након вађења из калупа приказан је на слици 7.6. Након поступка вађења одливка, уследило је чишћење површина и уклањање вишка материјала у облику венца.



Слика 7.5 Изглед добијеног одливка након раздвајања калупа



Слика 7.6 Коначан изглед одливка након вађења из калупа и уклањања вишка материјала

Уочени дефекти порозности на добијеном одливку и неиспуњавање калупа у зонама са малим попречним пресецима могу се елиминисати коришћењем вибрационог стола. Оптимизација отвора за ваздух може се постићи накнадном израдом отвора на постојећим калупима.

8. Закључна разматрања

Адитивна производња, која је дефинисана као технологија израде делова на бази слојева директно из *3D CAD* модела, омогућава израду производа различитог облика и геометрије. Применом ове релативно нове технологије може се у великој мери убрзати развој производа, а трошкови развоја свести на минимум. Своју примену налази у готово свим гранама индустрије, у медицини, образовању, маркетингу итд. Због великог броја предности које је карактеришу, ова технологија се све интензивније примењује, како за брзу израду прототипова, тако и за брзу израду алата и готових делова. Уочени пораст интересовања за овом технологијом довео је до усавршавања постојећих и развоја нових технологија, због чега се на тржишту може наћи велики број различитих уређаја за извођење процеса адитивне производње.

Реверзни инжењеринг који је дефинисан као супротни процес класичном поступку дизајнирања и моделирања будућих производа, може бити јако користан у ситуацијама када не постоје технички цртежи, документација или рачунарски модели. Помоћу ове технологије, може се добити облак тачака неког физичког објекта путем *3D* скенирања, а затим израдити *3D CAD* модел. Посебно треба нагласити да сви уређаји за *3D* дигитализацију физичких објеката поседују одређена ограничења у дигитализацији објекта, због чега се у облаку тачака може наћи извесна количина шума, тачака ван опсега и случајно скенираних објеката. Тачније, немогуће је потпуно аутоматизовано добити идеалан *3D CAD* модел скенираног објекта, већ се мора применити неки вид захтевне и обавезне технике моделирања за превођења облака тачака у што тачнији *CAD* модел прихватљив за предвиђену употребу. Због тога се поступак *3D* дигитализације сматра најбитнијом фазом реверзног инжењеринга јер ће од квалитета облака тачака зависити и квалитет израђеног *CAD* модела и време потребно за његово моделирање.

Поред великог броја предности које карактеришу ињекционо бризгања пластике, ова технологија поседује и одређене недостатке. Када се говори о недостацима ове технологије, првенствено се мисли на веома скупу опрему, машине и алате. Због тога се у литератури може пронаћи велики број алтернативних технологија, које омогућавају израду производа сличног квалитета који се добија ињекционим бризгањем. Једна од таквих технологија јесте двокомпонентно ливење у алатима израђеним адитивном производњом. Ова алтернативна метода представља скуп најсавременијих технологија која нуди висок квалитет производа уз минималне трошкове и минимално време израде, па је тиме погодна за мале серије.

Циљ мастер рада био је примена различитих техника и система за адитивну производњу у брзој изради прототипова алата и резервних делова од пластике. Изабрани делови, за које је било потребно израдити алате технологијом адитивне производње, представљају два окидача ручице гаса тримера. Експеримент је био замишљен тако да *CAD* модели калупа буду израђени на основу мастер модела који су добијени поступком *3D* скенирања. На крају, алати добијени *FDM* технологијом адитивне производње искоришћени су за реализацију поступка двокомпонентног ливења пластике.

Описани поступак конструкције алата за двокомпонентно ливење обухватио је више различитих фаза. На самом почетку, извршена је дигитализација изабраних физичких објеката. Дигитализација физичких објеката извршена је помоћу два оптичка *3D* скенера како би се добили облаци тачака са њихових површина. За скенирање окидача-1 коришћен је скенер *David SLS-2*, а за скенирање окидача-2 *ATOS II* скенер. Пре поступка дигитализације било је неопходно нанети танак слој матирајућег спреја на

површине физичких објеката, а затим додати референтне маркере. Танак матирајући слој је неопходан како би се ублажио ефекат рефлексije који негативно утиче на резултате 3D скенирања.

За добијање адекватног облака тачака, објекти су скенирани из више различитих углова, како би се добиле информације о облаку тачака на свим површинама. Након тога, извршено је поравнање свих добијених скенова. Треба напоменути да је пре поравнања скенова у једну целину, извршено брисање свих шума и случајно скенираних објеката, који могу негативно утицати на квалитет каснијег моделирања CAD модела.

Коришћењем опција у CATIA модулима *Generative Surface Design* и *Quick Surface Reconstruction*, израђени су CAD модели на основу облака тачака. Ово представља такође веома важну фазу реверзног инжењеринга. За генерисање што прецизнијег CAD модела на основу облака тачака, потребно је познавање различитих техника превођења облака тачака у CAD модел. Ова фаза може бити временски захтевна да би се добио квалитетан CAD модел, а поред тога захтева знања и вештине пројектанта.

Добијени CAD модели скенираних објеката сачувани су у STL формату и искоришћени су за адитивну производњу мастер модела. Адитивна производња мастер модела изведена је применом FDM технологије на уређају *MarkForged Onyx Pro*. За израду окидача-1 и окидача-2 било је потребно 5h и 14 min, 14,54 cm³ Onyx материјала и 3,13 cm³ стакленог влакна, а софтверска процена цене материјала у САД износила је 8,13 USD. Трошкови израде окидача на уређају *MarkForged Onyx Pro* сматрају се малим износом када се узме у обзир чињеница да алати за ињекционо бризгање коштају неколико десетина хиљада евра.

Визуелном провером одступања делова израђених адитивном производњом од оригиналних, утврђене су поједине неправилности које су првенствено последице грешака приликом скенирања и недостатака појединих области у облаку тачака, што је захтевало накнадну реконструкцију CAD модела. Визуелне провере могу бити јако корисне у откривању неправилности на израђеним прототиповима приликом развоја производа, посебно у оваквим ситуацијама када не постоји оригинални технички цртеж.

Провера геометрије мастер модела, који су израђени адитивном производњом на уређају *MarkForged Onyx Pro*, извршена је и у софтверу *Geomagic Studio*. Мастер модели су скенирани помоћу 3D скенера *David SLS-2*, а затим су добијени облаци тачака преклопљени са иницијалним облацима тачака. Резултати су показали да се одступања добијена у софтверу *Geomagic Studio* поклапају са одступањима уоченим визуелном провером, што је још додатно потврдило да се мора извршити редизајн CAD модела.

Поклапањем редизајнираних CAD модела са иницијалним облацима тачака добијене су вредности одступања. Вредности одступања крећу се у дозвољеним границама од $-0,167 \div 0,167$ mm. Нешто веће вредности одступања су се појавила искључиво у областима где је вршено „додавање материјала” приликом израде CAD модела у софтверу CATIA. Ово је последица недостатка извесне групе тачака у облаку тачака, јер примењени 3D скенери нису у могућности да скенирају неприступачне области. Такве области је могуће скенирати применом CT технологије.

У последњој фази конструкције алата за двокомпонентно ливење, извршено је бирање оптималног положаја подене равни, димензија алата, елемената за вођење и уливног система. Такође, извршено је обарање ивица на појединим елементима алата како би се олакшао поступак вађења одливка након процеса очвршћавања. CAD модели алата за двокомпонентно ливење сачувани су у STL формату, а затим су коришћени за

поступак адитивне производње применом *FDM* технологије. Добијени алати нису показали присуство зазора између додирних површина приликом њиховог међусобног спајања, што значи да је остварен задовољавајући контакт и да неће доћи до стварања превеликог вишка материјала у облику венца.

Поступак двокомпонентног ливења представља алтернативну методу ињекционом бризгању за мале серије делова од пластике, чак и за појединачну производњу. Ово се може објаснити чињеницом да се за израду алата применом *FDM* технологије могу постићи значајне временске и финансијске уштеде. Такође, ово може бити корисно за израду функционалних делова који немају превелика експлоатацијска оптерећења и посебне естетске захтеве. Уз примену описане методологије у мастер раду и коришћењем *PolyJet* технологије може се превазићи и овај проблем. *PolyJet* технологија омогућава израду делова са веома глатким површинама, захваљујући изузетно танким слојевима који се формирају приликом адитивне производње на штампачу *Alaris 30*, што ће бити предмет даљих истраживања у овој области. Добијени одливак одговара геометрији гравуре калупне шупљине, међутим, због уочених недостатака, првенствено у областима у којима је дошло до заробљавања ваздуха, могућа су одређена побољшања калупа, што ће такође бити део будућих истраживања. Оптимизација отвора за ваздух може се постићи накнадном израдом отвора на постојећим калупима. Поред тога, као предмет будућих истраживања, може се испитати утицај вибрационог стола на ову појаву. Исто тако, могу се испитати понашања различитих материјала за ливење у калупу израђеном *FDM* технологијом. Ово би помогло приликом избора најпогоднијих материјала за извођење процеса ливења у оваквим калупима, чиме би се елиминисали наведени дефекти.

Литература

- [1] Стандард: ASTM, F2792-12a, *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*
- [2] Andreas Gebhardt, *Understanding Additive Manufacturing, rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*, Hanser Publishers, Munich, 2011., ISBN: 978-3-446-42552-1
- [3] Rupinder Singh, *Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components*, Rapid Prototyping Journal, 2013.
- [4] Дејан Моврин, *Оптимизација параметара постпроцесирања у технологији везивне 3D штампне*, Докторска дисертација, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука у Новом Саду, Нови Сад, 2017.
- [5] Ian Campbell, David Bourell, Ian Gibson, *Additive Manufacturing: rapid prototyping comes of age*, Rapid Prototyping Journal, 2012.
- [6] Vinesh Raja, Kiran J. Fernandes, *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*, Springer series in Advanced Manufacturing, London, 2008. ISBN: 978-1-84628-855-5
- [7] Весна Мандић, *Виртуелни инжењеринг*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007., ISBN: 978-86-86663-02-3
- [8] Владан Јововић, *Термодинамичке и транспортне особине полимера*, Докторска дисертација, Природно математички факултет, Институт за Физику, Универзитет у Новом Саду, Нови Сад, 1996.
- [9] Жарко Гавриловић, Весна Мандић, Владимир Урошевић, *Application of poly-jet technology in rapid tooling*, WBCInno2015 International Conference, Novi Sad, 2015.
- [10] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, *Additive Manufacturing Technologies, 3D printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, second edition*, Springer, New York, 2015., ISBN: 978-1-4939-2112-6
- [11] Адиса Вучина, Миленко Обад, Небојша Рашовић, *Дизајн производа предвиђених за производњу адитивним технологијама*, Свеучилиште у Мостару, Мостар, 2015. ISBN: 978-9958-16-043-1
- [12] ISO/ASTM 52900:2015 (en) Additive manufacturing – General principles – Terminology
- [13] Miltiadis Boboulos, *CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation*, Ventus Publishing ApS, 2010., ISBN: 978-87-7681-676-6
- [14] Frank W. Liou, *Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development*, CRC Press, New York, 2008., ISBN: 978-0-8493-3409-2
- [15] Драги Тиро, *Компаративна анализа затезне чврстоће три поступка брзе израде прототипова*, 9th Research/Expert Conference with International Participations „Quality 2015”, Neum, 2015.
- [16] MarkForged, Eiger User Manual, 2019.
- [17] MarkForged, Интернет страница: <https://markforged.com/>, приступљено: 8.9.2020.
- [18] Младомир Милутиновић, *Брза израда прототипова и алата*, Наставни материјал, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад

-
- [19] Александар Рајић, *Примена адитивних производних технологија у поступку прецизног ливења ортопедских имплантата*, Докторска дисертација, Технички факултет Михајло Пупин, Универзитет у Новом Саду, Зрењанин, 2015.
- [20] Каталог компаније Objet
- [21] Младен Шерцер, Дамир Годец, Ана Пилиповић, Миодраг Каталенић, *Адитивна производња с полимерима*, Факултет стројарства и бродоградње, Свеучилиште у Загребу, Загреб, 2018.
- [22] Lior Zonder, Nadav Sella, *Precision prototyping, the role of 3D printed mold in the injection molding industry*, Stratasys, 2013.
- [23] Joel Najmon, Sajjad Raeisi, Andres Tovar, *Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry*, Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Indianapolis, 2019.
- [24] Additive Manufacturing: opportunities and constraints, A summary of a roundtable forum, Royal Academy of Engineering, London, 2013. ISBN: 978-1-909327-05-4
- [25] Wohlers Associates, интернет страница: <https://wohlersassociates.com/>, приступљено: 15.7.2020.
- [26] Chua Chee Kai, Leong Kah Fai, Lim Chu-Sing, *Rapid Prototyping: Principles and Applications*, 2nd Edition, World Scientific, New Jersey, 2003., ISBN: 981-238-117-1
- [27] Wego Wang, *Reverse Engineering, Technology of Reinvention*, CRC Press Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978-1-4398-0631-9
- [28] Драган Лазаревић, *Регенерисање NC кода применом 3D идентификације и анализе геометријских одступања*, Докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2017.
- [29] Angela Cantatore, Pavel Müller, *Introduction to computed tomography*, DTU Mechanical Engineering, 2011.
- [30] Artec3D, Интернет страница: <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners/artec-evalite-v2>, приступљено: 1.8.2020.
- [31] Каталог произвођача Artec3D, *Artec3D Scanners, Profesional 3D Scanning Solutions*
- [32] Solfin, Интернет страница: <https://solfin.com/3dstampa-3Dskeniranje/Artec-3d-skeneri-evalite>, приступљено: 1.8.2020.
- [33] Artec3D, ArtecStudio13, *User Guide*
- [34] David Heckner, *David Vision Systems, SLS-2, Quick Guide*, 2014.
- [35] ANIWAA, Интернет страница: <https://www.aniwaa.com/product/3d-scanners/david-structured-light-scanner-sls-2/>, приступљено: 2.9.2020.
- [36] Physimetrics, Интернет страница: <http://www.physimetrics.com/hp-3d-calibration-panels-pro/>, приступљено: 3.9.2020.
- [37] 3D Scan Expert, Интернет страница: <https://3dscanexpert.com/hp-3d-scanner-pro-s3-david-sls-3-review/>, приступљено: 3.9.2020.
- [38] Slide and Film Scanners, Интернет страница: <http://slideandfilmscanner.com/david-sls-2-structured-light-3d-scanner-review/>, приступљено: 3.9.2020.
-

-
- [39] GOM, ATOS Triple Scan, Интернет страница: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>, приступљено: 12.9.2020.
- [40] Топоматика, Интернет страница: <https://topomatika.rs/proizvodi/3d-skeneri/atos-triple-scan/#1469628059703-f32694c2-e702d744-dad1>, приступљено: 12.9.2020.
- [41] Богдан Недић, Владислав Ђукић, *Пластичне масе*, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2004.
- [42] Милорад Јовановић, Драган Адамовић, Вукић Лазић, Нада Ратковић, Машински материјали, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003., ISBN: 86-80581-55-0
- [43] Богдан Недић, *Технологије прераде пластичних маса*, Машински факултет, Универзитет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008
- [44] Милош Врачевић, *Прерада пластичних маса бризгањем: са примерима из праксе*, Поли – библиотека, Нови Сад, 1997., ISBN: 678-5-05-621-7-07
- [45] Dilip Sahebrao Ingole, Abhay Madhusudan Kuthe, Shashank B. Thakare, Amol Talankar, *Rapid prototyping – a technology transfer approach for development of rapid tooling*, Rapid Prototyping Journal, 2009.
- [46] Elena Basoli, Andrea Gatto, Luca Iuliano, Mario Grazia Violante, *3D printing technique applied to rapid casting*, Rapid Prototyping Journal, 2007.
- [47] BELIT, Advancing Copolymer Casting with UV-LED Curing, Rapid-tooling Elements and Ablation by Lasers, 7th Framework programme, 2013.
- [48] BELIT, *Enhancing Copolymer Casting by Embedding Rapid Prototyping and Tooling Segments*
- [49] Каталог произвођача полимерних материјала Altropol: http://www.altropol.de/wp-content/uploads/2018/02/E_OP_blau_AF_Neu.pdf