

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ә. Бүркітбаев атындағы Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрлау институты

Өнеркәсіптік инженерия кафедрасы

Хайрулла Бауыржан Хайруллаұлы

«Бұйымдарды дайындау кезінде Augmented Polymer Deposition аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

Дипломдық жобаға

**ТҮСІНІКТЕМЕЛІК ЖАЗБА**

5B071200 – Машина жасау

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ә. Бүркітбаев атындағы Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрлау институты

Өнеркәсіптік инженерия кафедрасы

**ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ**

Кафедра меңгерушісі

PhD д-ф, қауым. профессор

\_\_\_\_\_ Арымбеков Б.С.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 ж.

Дипломдық жобаға

**ТҮСІНІКТЕМЕЛІК ЖАЗБА**

Тақырыбы: «Бұйымдарды дайындау кезінде Augmented Polymer Deposition аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

5B071200 – Машина жасау

Орындаған

Хайрулла Бауыржан Хайруллаұлы

Ғылыми жетекші,

PhD д-ф, қауым. профессор

\_\_\_\_\_ Арымбеков Б.С.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 ж.

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ә. Бүркітбаев атындағы Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрлау институты

Өнеркәсіптік инженерия кафедрасы

5B071200 – Машина жасау

**БЕКІТЕМІН**

Кафедра меңгерушісі

PhD д-ф, қауым. профессор

\_\_\_\_\_ Арымбеков Б.С.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 ж.

**Дипломдық жоба орындауға  
ТАПСЫРМА**

Білім алушы Хайрулла Бауыржан Хайруллаұлы

Тақырыбы «Бұйымдарды дайындау кезінде Augmented Polymer Deposition аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

Университет ректорының «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ ж. №\_\_\_\_\_ бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ ж.

Дипломдық жобаның бастапқы берістері бұйым жасау кезінде Augmented Polymer Deposition технологиясын қолдануды зерттеу, және салыстыру

Дипломдық жобада қарастырылатын мәселелер тізімі

a) *Augmented Polymer Deposition технологиясының құрылымын және алғашқы патенттерді зерттеу*

б) *Эксперименттік жұмыс*

в) *Нәтижелер*

с) *Augmented Polymer Deposition технолгиясымен Fused Deposition Modeling технологиясын салыстыру*

Ұсынылған негізгі әдебиет: 7 атау

Дипломдық жобаны дайындау

**КЕСТЕСІ**

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәліметтер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Кіріспе. Augmented Polymer Deposition технологиясының құрылымы және оның патентерді зерттеу		
Эксперименттік жұмыс		
Нәтижелер		
Augmented Polymer Deposition технолгиясымен Fused Deposition Modeling технологиясын салыстыру		

Дипломдық жоба бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жобаға қойған қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер, аты, әкесінің аты, тегі (ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Норма бақылау			

Ғылыми жетекші \_\_\_\_\_ Арымбеков Б.С.

Тапсырманы орындауға алған білім алушы \_\_\_\_\_ Хайрулла Б. Х.

Күні «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 ж.

## АНДАТПА

Берілген дипломдық жобада аддитивті технологиялардың ішіндегі Augmented Polymer Deposition процесінің жұмыс жасауын толық зерттелді қарастырылды. Алынған мәліметтерге сай Augmented Polymer Deposition технологиясымен Fused Deposition Modeling технологиясын салыстырдық. Полимерді тұндыру үшін модификацияланған Augmented Polymer Deposition анықтадық. Augmented Polymer Deposition технологиясының артықшылықтарын қарастырылды.

APD және FDM жүйелерін бағалаудың және салыстырудың аддитивті өңдеуден кейінгі жүйесінде салыстыру үшін жасалды. Аддитивті процесс алдымен бөлшекке материалдық қорды қосу үшін номиналды CAD геометриясын алып тастау арқылы жүзеге асырылды.

Тәжірибе нәтижелері аддитивті процестердің үйлесуі бөліктердің өлшемдік тұрақтылығын едәуір жақсартып алатындығын көрсетті.

Сонымен қатар, тегіс беттерді шығаруға мүмкіндік беретін баспалдақ эффекті де жоюға болады. Эксперимент қоспа өндірісін негізгі өлшемдер, құрастыру нүктелері және геометриялық функционалды беттер сияқты ерекшеліктер бойынша қажетті дәлдікті алу үшін аддитивті процестермен біріктіруге болатындығын көрсетеді.

## АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте был рассмотрен весь процесс работы Augmented Polymer Deposition среди аддитивных технологий. Согласно полученным данным, мы сравним технологию Fused Deposition Modeling с технологией Augmented Polymer Deposition. Для осаждения полимера мы обнаружили модифицированный Augmented Polymer Deposition. Рассмотрены преимущества технологии Augmented Polymer Deposition.

Для сравнения систем APD и FDM в системе оценки и сравнения после аддитивной обработки. Аддитивный процесс был осуществлен, прежде всего, путем исключения номинальной геометрии CAD для включения материальных запасов в деталь.

Результаты эксперимента показали, что сочетание аддитивных процессов может значительно улучшить размерную устойчивость деталей.

Кроме того, можно устранить и лестничный эффект, который позволяет вывести ровные поверхности. Эксперимент показывает, что производство смеси можно совмещать с аддитивными процессами для получения необходимой точности по таким спецификам, как основные размеры, точки сборки и геометрические функциональные поверхности.

## ANNOTATION

In this thesis project, the entire process of working with Augmented Polymer Deposition among additive technologies was considered. According to the data obtained, we will compare the technology of Fused Deposition Modeling with the technology of Augmented Polymer Deposition. For polymer deposition, we found a modified Augmented Polymer Deposition. The advantages of the Augmented Polymer Deposition technology are considered.

To compare APD and FDM systems in the evaluation and comparison system after additive processing. The additive process was implemented primarily by eliminating the nominal CAD geometry to include inventory in the part.

The results of the experiment showed that the combination of additive processes can significantly improve the dimensional stability of parts.

In addition, you can eliminate the stair effect, which allows you to display flat surfaces. The experiment shows that the production of a mixture can be combined with additive processes to obtain the necessary accuracy for such specifics as basic dimensions, Assembly points, and geometric functional surfaces.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Augmented Polymer Deposition технологиясының құрылымы және оның патенті	10
1.1 Полимерді тұндыру үшін модификацияланған (APD).	15
1.2 Augmented Polymer Deposition технологиясының артықшылықтары	16
1.3 Воксельдер мен Материалдар	19
2 Эксперименттік жұмыс	20
2.1 Нақты зерттеуге арналған геометрия	20
2.2 Аддитивті өндіріс процесі	21
3 Нәтижелер	23
3.1 Зерттелетін бөлшектердің габариттік өлшемдері және олардан ауытқулар	23
3.2 Augmented Polymer Deposition технолгиясымен Fused Deposition Modeling технологиясын салыстырдық.	25
Қорытынды	30
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	31

## КІРІСПЕ

Бүгінгі 3D-принтерлердің барлығын бөлшек пайдалануға жарамсыз етіп, 3D басып шығарғаннан кейін өңдеуді қажет етеді, бұл уақытты қажет ететін, қымбат, лас және қауіпті, оларды арнайы жабдықталған қондырғылармен шектейді.

Rize компаниясының инженерлері келесі шығарылымда фотореалистикалық түсті басып шығару мүмкіндігін қарастырады. Одан да қызықты болып табылады, олар конструкцияға басқа функционалдық материалдарды қосу мүмкіндігін болжайды, мысалы, өткізуші, термооқшаулағыш және жылу өткізгіш болып есептелді.

Бұл, мысалы, 3D баспа құрылымының ішінде батарея жасауға мүмкіндік береді. Және APD тәсілі пластиктің механикалық қасиеттерін оның басып шығарылуына қарай өзгертуге мүмкіндік беретіндіктен.

Массачусетске негізделген 3D принтер өндірушісі Rize Inc компаниясы өзінің алғашқы өнімі - Rize One 3D принтерін алғашқы коммерциялық өндірісі мен жөнелтуін жариялады. Бәсекелестермен салыстырғанда кейінгі өңдеу уақытын айтарлықтай қысқарту үшін әзірленген Rize One патенттелген технологиясы қосымша полимерлік тұндыру (APD) орнатылған, ол "3D-баспа сапасы бөлшектерін басып шығару талабы бойынша жақсартты.

APD процесінің мүмкіндігін дәлелдеу үшін Rize компаниясы Stratasys, Markforged және EnvisionTEC материалдарын сынау сериясын өткізді. Функционалдық беріктікке сынау нәтижелері төменде келтірілген диаграммада Rizium One сәйкес келеді және кейбір жағдайларда өңделген және көміртекті талшықты нығайтылған нейлон, ABS және PC ABS қоса алғанда, бәсекелес материалдардың сипаттамаларынан асып түседі.

APD технологиялық инновациялары Rize материалдарының инновацияларымен ұштастыра отырып, түпкі клиенттер үшін бірегей және сараланған құндылықтарды жасайды – детальдардың толық түстегі қауіпсіздігі мен беріктігі бар, платформасын қамтамасыз етеді.

**Бұл дипломдық жұмыстың негізгі мақсаты**, аддитивті технологияның ішіндегі Augmented Polymer Deposition технологиясын зерттеу болып табылды.

Көптеген 3D-басып шығару өміршең немесе оңтайландырылған емес, себебі ол қолданба үшін сенімді емес, кеңседегі жұмыс үстелінде немесе уақыт пен алдын ала және одан кейінгі өңдеу кезінде пайдалану үшін қауіпсіз емес, оны пайдалану мен тиімділігін қатты шектеді. Augmented Polymer Deposition осы шектеулерді шешеді.

Материал Rize APD процесі кезінде байланыстырылған арқасында, Rizium One өзінің изотропты қасиеттерінің көп бөлігін сақтауға қабілетті. Бұл бөлшектер Rizium бойынша изотропты бір қосылыс басылған дегенді білдіреді, барлық бағыттарда дерлік бірдей беріктігі (x, y және Z). Осылайша жасалған бөлшектер бастапқы материалмен салыстырғанда тек 10 пайыздық изотропты қасиеттерінің жоғалуы (тіпті барлық құйылған бөлшектер 100 пайыздық



изотропия бар екенін атап айтқан маңызды). Салыстыру үшін, FDM типтік бөліктері оның Z-беріктігінің шамамен 40 пайызын жоғалтады және, демек, APD бөлігі сияқты күшті емес.

## **1 Augmented Polymer Deposition технологиясының құрылымы және оның патенті**

Уобернада орналасқан 3D-принтерлердің Жаңа өндірушісі Массачусетс штаты, екі мәселені іс жүзінде жоятын технология бар. Индустрия ардагері Юджин Гиллердің негізін салған (көп ұзамай оған Леонид Райз, том Дэвидсон және басқалар қосылды), Rize Inc компаниясы. Патенттелген процесті ұсынады, ол полимерлердің күшейтілген тұнбасы яғни Augmented Polymer Deposition (APD) деп аталады. APD экструдер өз «инженерлік және медициналық термопластик» Rize (Rizium One) баспа басы ретінде орналастырады, сонымен қатар әрбір 3D-пиксель арнайы қоспаларды (сондай-ақ "сиямен" деп аталатын) енгізеді.

Бөлшектерге арналған термопластикалық тірек жасағаннан кейін баспа басы экструдер бөлшектің бірінші қабатын жасаған кезде Rizium One фирмалық сия қабатын шығарады.

Бұл арнайы сиялар бөлшектер мен тірек арасындағы молекулалық байланысты әлсіретеді, бұл дайын бөлшекті қосымша өндеусіз, қолмен оңай жоюға мүмкіндік береді. Маркетинг және арналармен байланыс жөніндегі вице-президент Джули Рис: «тіпті қолдау болған бет таза және тегіс» деп те мәлімдеді.

Сонымен қатар, Rizium One поликарбонатқа ұқсас және Z- бағытында ABSPlus-тен екі есе артық мақтана алатын акрилонитрилді бутадиен стиролынан (ABS) қарағанда әлдеқайда мықты болып келеді.

Бұл Rize әлеуетті клиенттерінің бірі тестілеу барысында расталды, ол функционалды беріктілік сынағын өткізді, онда Augmented Polymer Deposition баспа бөлігінде өңделген нейлон, сол бөлігімен қарсыласты. Сонымен қатар, әрбір воксельде материалын таңбалау мүмкіндігі бар, бұл құрастыру кезінде кез келген бетіне жоғары шешімді монохроматикалық графиктерді қосуға мүмкіндік береді.

Rize One 3D принтері 2017 жылдың ақпан айында SolidWorks World көрмесінде ұсынылды және қазіргі уақытта өндірісте. 12×8×6 дюйм (300×200×150мм) құрастыру конверті, 0,25 мм ажыратымдылығы және \$28 500 базалық бағасы бар, ол толық функционалды прототиптерді немесе жеке бір реттік өндірістік бөлшектерді офистік ортада өндеусіз дайындау үшін пайдаланылуы мүмкін.

Rize «машинаның жылдық пайдалану құны шамамен 10 000 АҚШ долларын құрайды, ал FDM жүйелерімен салыстырған кездегі 90 000

доллармен салыстырғанда. Осындай мүмкіндіктерге ие болу үшін осы жүйелермен алдын-ала \$ 120 000-дан \$ 150 000-ға дейін ақша жұмсалады ».

Rize компаниясының инженерлері келесі шығарылымда фотореалистикалық түсті басып шығару мүмкіндігін қарастырады. Одан да қызықты болып табылады, олар конструкцияға басқа функционалдық материалдарды қосу мүмкіндігін болжайды, мысалы, өткізуші, термооқшаулағыш және жылу өткізгіш болып есептелді.

Бұл, мысалы, 3D баспа құрылымының ішінде батарея жасауға мүмкіндік береді. Және APD тәсілі пластиктің механикалық қасиеттерін оның басып шығарылуына қарай өзгертуге мүмкіндік беретіндіктен.

Массачусетске негізделген 3D принтер өндірушісі Rize Inc компаниясы өзінің алғашқы өнімі - Rize One 3D принтерін алғашқы коммерциялық өндірісі мен жөнелтуін жариялады. Бәсекелестермен салыстырғанда кейінгі өңдеу уақытын айтарлықтай қысқарту үшін әзірленген Rize One патенттелген технологиясы қосымша полимерлік тұндыру (APD) орнатылған, ол "3D-баспа сапасы бөлшектерін басып шығару талабы бойынша жақсартты.

2017 жылдың бірінші жартысында Rize One өзінің алғашқы клиенттік сатылымдарын аяқтап, өндірісті және коммерциялық жеткізуді бастады.

Бұл, өз кезегінде, АҚШ-тағы компанияның сату арналарының айтарлықтай кеңеюіне және Rize Директорлар кеңесіне Сантана Кришнан бағдарламалық қамтамасыз ету жөніндегі сарапшыны қосуға әкелді.

Балқытылған қыздыру дайындау (FFF) шығару материалына сәйкес келеді.

Rize One-дағы APD әдісі экструзияға негізделген 3D басып шығаруды екі басы бар жүйе арқылы сиялы яғни материал, технологиямен біріктіреді. Біріншіден, Rize экструдері тірек материалы ретінде қолданылатын термопластик қабатын жинайды. Осыдан кейін, сиялы басып шығару механизмі материал қабатына береді. Шығарылған сияның жоғарғы жағында нысандар жасау үшін кейінгі қабаттар 3D түрінде басылған.



1-сурет - Rize кеңейтілген полимерлі қабат (APD) технологиясының схемасы

Термопластикалық қабаттардың арасына сия, сия басындағы екінші арнадан қосуға болады. Бұл функционалды сиялар пластиктің қасиеттерін өзгертуге, яғни өткізгіштікке және оқшаулауға (сия түрінде келеді) немесе бүкіл нысанның түс градиентін жасауға қосылады.

APD процесінің мүмкіндігін дәлелдеу үшін Rize компаниясы Stratasys, Markforged және EnvisionTEC материалдарын сынау сериясын өткізді. Функционалдық беріктікке сынау нәтижелері төменде келтірілген диаграммада Rizium One сәйкес келеді және кейбір жағдайларда өңделген және көміртекті талшықты нығайтылған нейлон, ABS және PC ABS қоса алғанда, бәсекелес материалдардың сипаттамаларынан асып түседі.

1 – кесте Беріктікке функционалдық сынау

3D принт ері	Өлше мі 1200	Mackfo raed, X	X Экстри мом 3SP		Bize One	Mackfor aed, X	Fortus 380	Fortus 380
Матер иал	ABS	Оникс	ABS	Өңде лген Нейл он	Biziu m One	Көмірте кті Нейлон	Нейлон	PC ABS
Қысқ ыш күште р								

40	Өту	Өту	Өту	Өту	Өту	Өту	Өту	Өту
60	Өту	Өту	Өту	Өту	Өту	Сәтсіздік	Pass bowing	Өту
80	Өткізу қателенеді бастады	Жарыла бастады	Өткізу қателенеді бастады	Өткізу-бүгу	Өту	Нүктеге икемделу біз оны ала алмаймыз 70 фунттан жоғары және ол жарылып жатыр	Өту	Өту
100	Өту	Сәтсіздік	Өту	Өту	Pass-bowin g		Өту	Өту
120	Өту		Өту	Өту	Өту		Өту	Өту
140	Өту		Өту	Өту	Өту		Pass-major bowing	Сәтсіздік
160	Өту		Сәтсіздік	Өту	Өту		Өту	
180	Өту			Өту	Өту		Өту	
200	Өту			Өту	Өту		Сәтсіздік	
220	Жарыла бастады			Өту	Өту		210 жоғары көтерілмейді	

240				Болт тың басы шай ыр арқы лы соза ды	Сәтсіз дік			
260								

3D-баспаның көптеген технологияларының тағы бір шектелуі, Z осі бойынша бөлшектің әлсіздігін тудыратын қабаттар арасындағы байланыстардың салыстырмалы әлсіздігі болып табылады (қабаттар шөгетін бағыт). Осылайша, қысыммен басу бөлшегі дерлік 100% изотропты болуы мүмкін, ал (барлық бағыттарда бірдей күшті), FDM типтік бөлшектері шамамен 40% жоғалтады өзінің Z-беріктігін.

APD технологиялық инновациялары Rize материалдарының инновацияларымен ұштастыра отырып, түпкі клиенттер үшін бірегей және сараланған құндылықтарды жасайды – детальдардың толық түстегі қауіпсіздігі мен беріктігі бар, платформасын қамтамасыз етеді.

Қосымша полимерлер қолдану (APD) 3D басып шығару шектеулерінің көптеген шешеді:

- Күшті бөліктер: Толықтырылған тұндыру процесінде материалдық байланыстардың арқасында Rizium One Z-беріктілік қасиеттерінің көпшілігін сақтай алады.
- Тезірек, оңай, қиындықсыз: кеңейтілген полимерлі қабат (APD) кейінгі өңдеудің қажеттілігін жояды, бұл бүкіл 3D басып шығаруды тездетеді.
- Кесудің құны: полимерлік тұндыруды (APD) пайдалану көптеген облыстардағы уақытты және шығындарды, әсіресе өңдеуден кейінгі өңдеуді азайтады. Химиялық заттардың, жұмыс күшінің, жабдықтардың, қондырғылардың және т.б. шығындарын үнемдеуге болады.
- Кеңсенің қауіпсіздігі: материалдар мен процестер қауіпсіз, жасыл және толығымен қайта өңделеді, зиянды шығарындылар, материалдар немесе химикаттар жоқ.
- Өнеркәсіптік класс: Полимерлік тұндыру (APD) процедурасын қолдана отырып шығарылған бөлшектер - бұл өнеркәсіптік сапа, олар ең жақсы Z-

беріктігі, төмен ылғалдық термопластикасы бойынша 0,25 мм (250 м), жоғары ажыратымдылықтағы мәтін мен суреттер 300 дюймді құрайды.

## **1.1 Полимерді тұндыру үшін модификацияланған (APD).**

Бұл көптеген мүмкіндіктер мен қосымшаларды ұсынады, бірақ бүгінгі күні Rize One 3D принтерінде енгізілгендердің бірі өңдеуден кейінгі жою. Пост-өңдеу деп бөлшекті 3D принтерде салу аяқталғаннан кейін бөлікті қолдануға болатын барлық процестер, соның ішінде тіреуіштерді алу, тегістеу, бояу, қаптау, өңдеу және тағы басқалар жатады. Барлық басқа 3D принтерлер, соның ішінде жұмыс үстелі 3D принтерлер, жарамды бөлігін шығару үшін 3D басып шығарудан кейінгі өңдеуді қажет етеді.

Термопластикалық тірек APD көмегімен экструдталғаннан кейін, басып шығару механизмі тірек пен бөліктің бірінші қабаты арасында Release One сия қабатын шығарады. Шығарылған сия бөлшекті басып шығару кезінде сырғып кетуіне жол бермеу үшін жеткілікті байланыстырады, бірақ пайдаланушыға басып шығарғаннан кейін бөлікті жалаңаш қолдарымен қарапайым кеңсе жағдайында жайсыз кеңістікте, химиялық заттарсыз, арнайы қондырғысыз бірнеше секунд ішінде босатуға мүмкіндік береді, және сақтау талаптары бар.

Бүгінгі таңда APD-нің бір уақытта экструзия және воксельдік деңгейдегі желдетудің тағы бір мүмкіндігі - бұл жоғары ажыратымдылықтағы мәтін мен суреттерді бөлікке басып шығару мүмкіндігі. Бұл жағдайда таңбалау сияны басып шығару механизмі кез-келген жерде қозғалады және кез-келген уақытта оны файлға тікелей бөліктерге басып шығаруға болады.

Жұмыс жасау кезеңі

1. Файлдарды дайындау. Rize бағдарламалық жасақтамасы импортталған CAD файлын 3D форматында басып шығаруға автоматты түрде дайындайды.
2. 3D басып шығару.
  - а. Rize <sup>TM</sup> One 3D принтері Rizio <sup>TM</sup> One, Rize термопластикалық жіптерін қыздырады және бөліп алады
  - ә. Өнеркәсіптік басып шығару механизмінің ағындары екі қабат арасындағы байланысты әлсірету үшін бөлік пен оның тіреу құрылымы арасында қажет болған жағдайда бір сия шығарады.
  - б. Rize One Rizio One қабатын қабат толығымен шығарып алуды жалғастыруда.

д. Вокселдің материалдық қасиеттерін воксельге өзгерту үшін қажет болған кезде функционалды сия термопластик қабаттарының арасына салынады.

е. Белгілеу сиясы файлда толық және толық мәтін мен кескіндер жасау үшін қай жерде және қай жерде шақырылатын болса да таңдалады.

3 Қолдау шығару. Бөліктің тірек құрылымы бөлшектен таза, қауіпсіз және жалаң қолмен бірнеше секундта шығарылады. Өшіру, жабу немесе басқа рәсімдер қажет емес. Бөлік пайдалануға дайын.

## **1.2 Augmented Polymer Deposition технологиясының артықшылықтары**

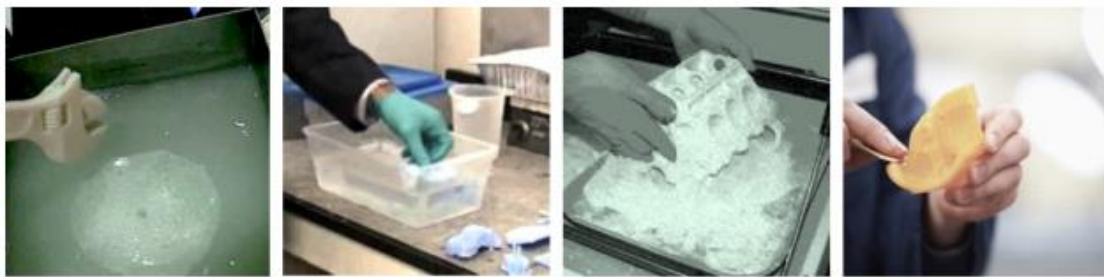
Көптеген 3D-басып шығару өміршең немесе оңтайландырылған емес, себебі ол қолданба үшін сенімді емес, кеңседегі жұмыс үстелінде немесе уақыт пен алдын ала және одан кейінгі өңдеу кезінде пайдалану үшін қауіпсіз емес, оны пайдалану мен тиімділігін қатты шектеді. APD осы шектеулерді шешеді.

Z-бағытталған беріктік бөлшектер қабаттары арасындағы ішкі байланыстың беріктігіне байланысты. 3D-басып шығару технологиясының көпшілігі материалдың әрбір қабатының арасында пайда болатын әлсіз байланыстардың салдарынан X және Y осьтер сияқты берік бөлшектер жасай алмайды. Бұл байланыстар анизотропты деп аталады, яғни олардың физикалық қасиеттері әртүрлі бағыттарда өлшеу кезінде әртүрлі мағыналарға ие.

Материал Rize APD процесі кезінде байланыстырылған арқасында, Riziium One өзінің изотропты қасиеттерінің көп бөлігін сақтауға қабілетті. Бұл бөлшектер Riziium бойынша изотропты бір қосылыс басылған дегенді білдіреді, барлық бағыттарда дерлік бірдей беріктігі (x, y және Z). Осылайша жасалған бөлшектер бастапқы материалмен салыстырғанда тек 10 пайыздық изотропты қасиеттерінің жоғалуы (тіпті барлық құйылған бөлшектер 100 пайыздық изотропия бар екенін атап айтқан маңызды). Салыстыру үшін, FDM типтік бөліктері оның Z-беріктігінің шамамен 40 пайызын жоғалтады және, демек, APD бөлігі сияқты күшті емес.

Бірнеше жылдар бойы инженерлер 3D-баспа өнімдерін бағалауға, тексеруге, жетілдіруге және қолдануға дейін бірнеше сағат бойы отыруға мүмкіндік беретін, өңдеуден кейінгі әртүрлі материалдар, мен әдістерге шағымданады. Басып шығарғаннан кейін бірден қолдануға болатын бөлшектермен APD технологиясындағы мүмкіндіктеріне сәйкес келеді. Өндіріс инженері бірнеше сағат ішінде арнайы құрал жасап, құрастыру сызығын қыздырады. Алайда APD технологиясында мұндай қосымша өңдеулер болмайды.





2-сурет - 3D- баспадан кейінгі өңдеу процесі

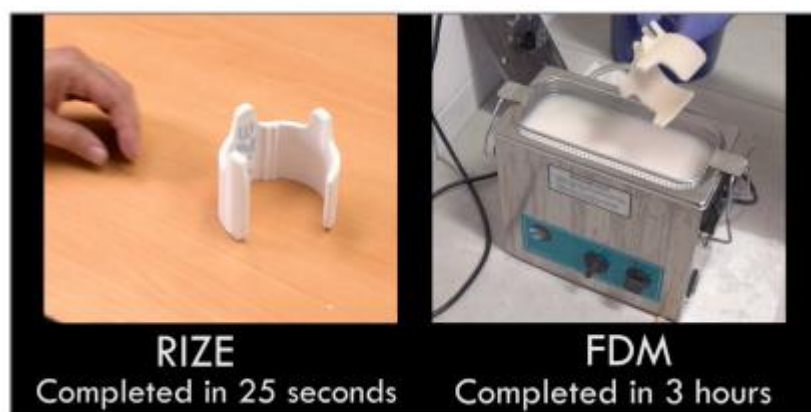
Бүгінгі 3D-принтерлердің барлығын бөлшек пайдалануға жарамсыз етіп, 3D басып шығарғаннан кейін өңдеуді қажет етеді, бұл уақытты қажет ететін, қымбат, лас және қауіпті, оларды арнайы жабдықталған қондырғылармен шектейді.

Нөлдік өңдеу, сондай-ақ, инновациялық және өндіріс үшін қажет шығармашылыққа назар аудара отырып, пайдаланушыларды ренжітетін қиындықтарды жояды. Қайта өңдеуге арналған лас және улы материалдар, қайта өңдеу құрылғылары үшін қажетті арнайы қосылыстар мен кеңістік және ең бастысы, осы проблемаларды шешу үшін қажетті қымбат тұратын еңбек сағаттары жоғалды.

Нөлдік өңдеу артықшылықтары:

Уақытты үнемдеу. 3D басып шығарылғаннан кейін пайдалы бөлікке ие болу үшін бірнеше сағат, тіпті күндер кетуі мүмкін. Бұрын химиялық еріткіші бар ваннада отыруға уақыт керек болуы мүмкін, немесе бірнеше сағат бойы қатайту, немесе өңдеу үшін жеткілікті берік және тегіс жасау үшін жабу және бояу, немесе оны тегіс жасау үшін қайрау және тегістеу қажет.

Reebok-тің қосымша өндіріс лабораториясының менеджері Гари Рабиновиц өзінің ішкі клиенттеріне пайдалы бөлшектерді жеткізе алатын уақытты кідіртп, өте қажет болған бөлшектерді шығаруға кететін уақытты азайтып, өңдеуден кейінгі уақыттың 50% жұмсайды дейді. Бөлшектерді тәулік бойына өзгертуге тырысу үшін ол ұзақ және ұзақ жұмыс істейтін болады.



3-сурет- APD және FDM технологияларын салыстыру

Бір бөлшекті пайдаланатын Rize APD және Stratasys FDM арасындағы тіректі жою салыстыру кезінде, Rize тірегі пайдаланушының жұмыс үстелінде 25 секунд ішінде жойылды, ал Stratasys әдісі тек зертханада қолдануға болатын химиялық еріткіш ваннасында үш сағатты алды.

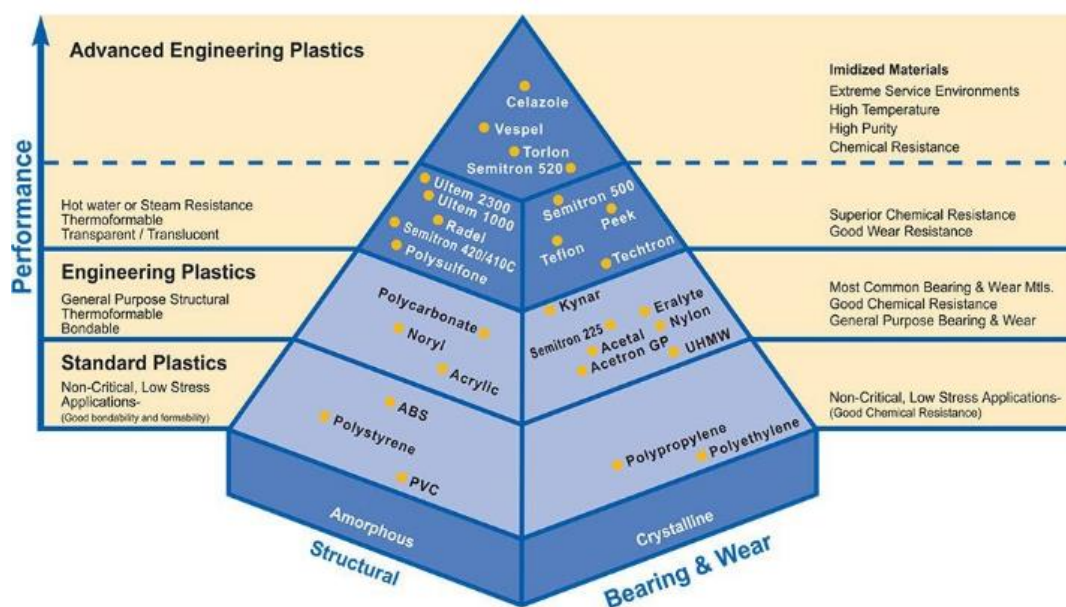
Біздің мақсатымыз бүкіл 3D басып шығару процесін қиындықсыз жасау болғандықтан, біз процестің алдыңғы жағына да назар аудардық.

3D форматында басып шығаруға болатын CAD (компьютердің көмегімен жобаланатын) файлдарды жасау, оның ішінде аяқталмаған беттер немесе беткі шекаралар сияқты кедергілерді жеңу көп уақытты талап ететін және күрделі процесс болуы мүмкін. Шын мәнінде, көптеген пайдаланушылар осы әрекетке көмектесу үшін өздерінің CAD бағдарламасының жоғарғы жағында файлдарды түзету жөніндегі қосымша бағдарламалық жасақтаманы сатып алады. Дегенмен, файлды түзету бағдарламалық қамтамасыздандыруы 3D басып шығаруға болатын файлды құру үшін қосымша уақытты, үлкен тәжірибені және шығындарды қажет етеді.

APD бағдарламалық жасақтамасына енгізілген интеллект пен шеберлік импортталған 3D файлындағы ақауларды автоматты түрде анықтайды және өңдейді. Шектегіш жетілдірілмеген 3D-файлдарға төзімді болғандықтан, файлды тез және оңай басып шығаруға болады, бұл қосымша бағдарламалық құралдардың қажеттілігінсіз, пайдаланушыларға бағдарламалық жасақтамада 3D файлдарын басып шығаруға мүмкіндік береді.

### 1.3 Воксельдер мен Материалдар

Компанияның алғашқы материалы «поликарбонаттың жанында пластикалық пирамидада жоғары, сондықтан біз материалдың X және Y беріктігі үшін шамамен 75 мега паскальдардан МПа бастаймыз, Z осі үшін біз тек 5 МПа жоғалтамыз».



4-сурет- Пластикалық пирамида (EJB пластикалық бейнесі)

APD процесі «тіреу мен модель арасында» маған қолдау көрсетіңіз, бірақ маған жабыспаңыз» деп аталатын шығарылатын материалға қол жеткізуге мүмкіндік береді. Бұл баспа тіректерін АМ басқа әдістерімен құрастырылған заттарға қарағанда тезірек кетіру керек дегенді білдіреді. Марангеллдің айтуынша, өндеуден кейінгі жұмысты үш сөзбен тұжырымдауға болады, «оны өшіріңіз».

## 2 Эксперименттік жұмыс

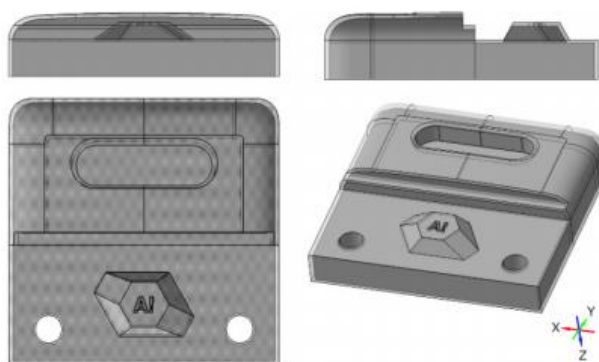
### 2.1 Нақты зерттеуге арналған геометрия

Эксперименттік бөлімінде Rize APD және Stratasys FDM 3D баспаларын басу процестерін салыстырдық.

Аддитивті процестің жарамдылығын бағалау үшін Бенчмаркинг геометриясы әзірленді.

Геометрия үш осьтік аддитивті процесінде өңделетін макродеңгейдің әртүрлі геометриялық элементтерін қамтиды, олар қисық сызықты беттер, тесіктер, қалталар, өткір жиектер, сондай-ақ перпендикулярлы, параллельді және түрлі бұрыштардың астындағы көлбеу жазықтықтар.

Геометрия ықтимал тәуелді элементтерді алып тастау есебінен тірек конструкцияларындағы қажеттілікті барынша азайту үшін әзірленген.



5-сурет- Жоғарғы, бүйір, алдыңғы және перспективада түрі

5-суретте осы экспериментте қолданылатын геометрия көрсетілген. Сұр түсті бөлшек нақты геометрияны көрсетеді. 5 суретте жартылай мөлдір ығысқан геометрия бейнеленеді.

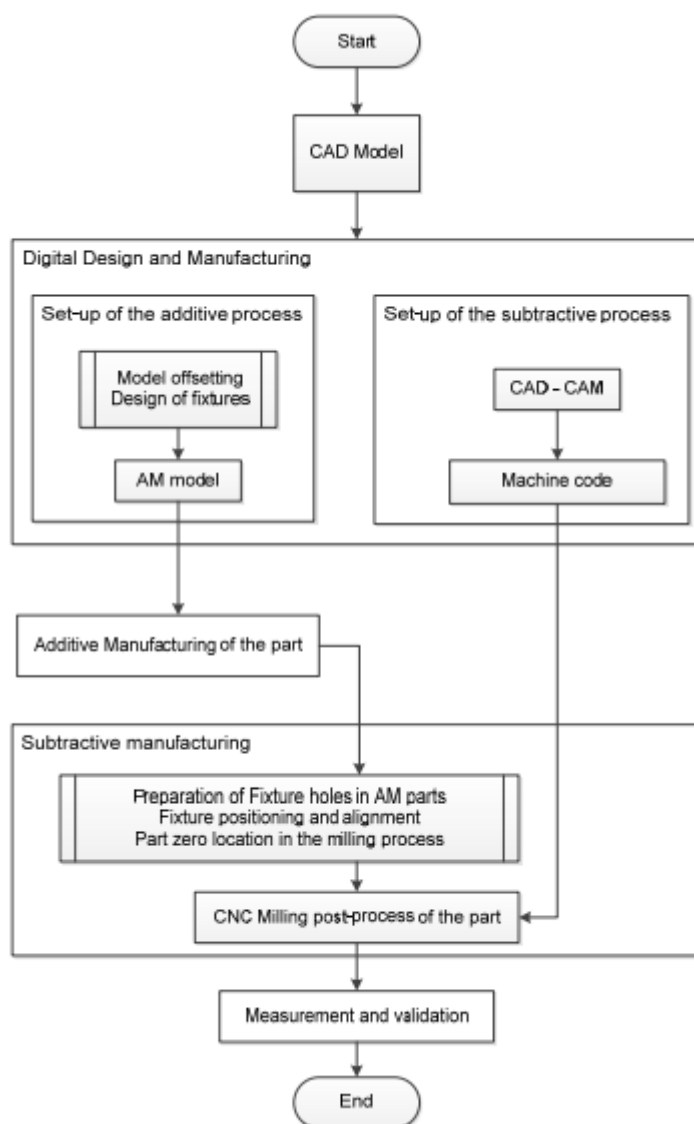
Номиналды геометрия аддитивті процестің жалпы өтеу үшін барлық беттерде және геометриялық ерекшеліктерде есепке алынды. Осылайша, өндірілген бөлшектерде өңдеуден кейінгі уақытта алынатын материалдар жеткілікті болады; сондықтан АМ бөліктеріндегі қателіктер әрлеу процесінде өтелуі мүмкін.

Бөлшектердің жалпы өлшемдері Y осі бойынша 65 мм, X осі бойынша 68,5 мм және Z осі бойынша 15 мм құрайды, ал оның теориялық көлемі шамамен 49 300 мм<sup>3</sup> құрайды. Ығысу коэффициенттері аддитивті үдерістен

кейін бөлшектерге өңделетін дайындаманың шамамен 1 мм алу үшін есептелген.

## 2.2 Аддитивті өндіріс процесі

Аддитивті процестерінде пайдалану енгізу алдында бірнеше қадамды талап етеді. – 6 суретте көрсетілген. Өндірістің аралас әдістерінің технологиялық сұлбасы ұсынылған. Бұл деректер одан кейін аддитивті процесі үшін машиналық кодты құру, сондай-ақ аддитивті процесс кезінде қолданылатын ығысу геометриясы үшін қолданылады.



6-сурет- Аддитивті өндірістің технологиялық схемасы

Stratasys ойлап тапқан FDM технологиясы кәсіби жағдайларда ең көп қолданылатын технология болып табылады, ал Ultimaker тұтыну нарығында Еуропада кеңінен қолданылды (Вохлерс, 2015). Сондықтан эксперимент жүргізу үшін бұл машиналар тандалды.

Әдетте, екі машинаның жалпы сипаттамалары машина айырмашылықты көрсетеді. Екінші жағынан, FDM жүйесі жылытылатын құрастыру камерасымен және екі жақты экструдермен жабдықталған. Құрастыру көлемі, қабаттың қалыңдығы және екі машина материалын өңдеу мүмкіндігі салыстырылады. Дегенмен, APD жабдығының технологиялық өзгермелі өзгерісін еркін бақылауға және реттеуге болады. Мысалы, қабықтың қалыңдығы және модельдің ішкі тығыздығы толығымен теңшеледі, сондай-ақ басқа да айнымалы процесс болып есептеледі. Осыған қарағанда, FDM жүйесі өзгерту мүмкін емес орнатылған айнымалы процесс жиынтығы бар.

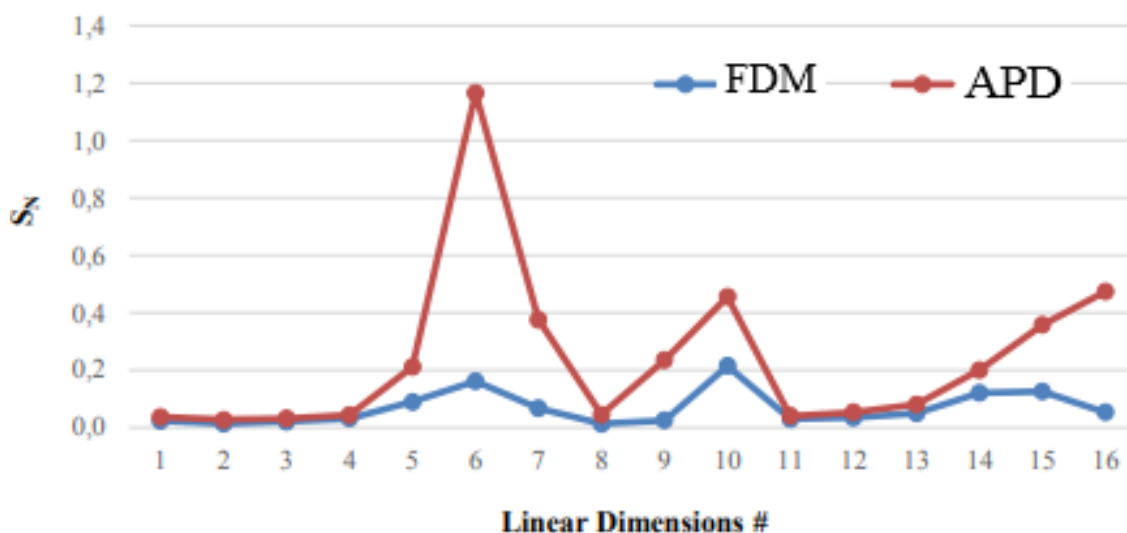
Аддитивті процесс кезінде тек көлденең бағыт сыналды және екі машинада қолданылатын материал ақ АБС-пластикалық жіппен патенттелген. Материалдың бұл түрі FDM жабдықтарында кеңінен қолданылады, сондықтан өндірістік эксперимент үшін тандалған. Эксперимент барысында модельдің ішкі тығыздығы, сондай-ақ аддитивті процестің айнымалылар, алынған бөлшектердің шамамен алғандағы салмағы екі процесте бірдей болатындай етіп түзетілді. Бұл ұқсас механикалық қасиеттері бар бөлшектерді алу және азайту процесінен кейін салыстырмалы нәтижелер алу үшін жасалды.

APD жүйесін орнату деформация әсерін азайту үшін, сондай-ақ бастапқы қабаттар тірек плитасына дұрыс бекітілуін қамтамасыз ету үшін процесс параметрлерін бастапқы оңтайландыруды талап етті. Бұл оңтайландыру сынақтар мен қателер әдісіне және машинаны пайдаланушының біліміне негізделген. Бұл процесс барысында 20-дан астам үлгі жасалғанын, және деформация әсері қолайлы диапазонға дейін барынша азайтылғанға дейін іздердің 40% -ы алынбағанын атап өткен жөн; тек үш үздік үлгі талдау үшін енгізілді. Сонымен қатар, APD төмен сенімділігі жинақтаудың және процестің әртүрлі параметрлерімен (мысалы, бөлшектің бағдарлануы, бөлшектің орналасуы, қабаттың қалыңдығы және т.б.) бөлшектердің көп үлгілерін жасауға мүмкіндік бермеді.) Тәжірибелік сапаны жақсарту үшін.

### 3 Нәтижелер

#### 3.1 Зерттелетін бөлшектердің габариттік өлшемдері және олардан ауытқулар

7-суретте алынған үлгінің жалпы сызықтық және бұрыштық өлшемдері келтірілген. Стандартты белгісіздік көрсеткіші әрбір өлшем үшін және әрбір машина үшін де ұсынылған.



7-сурет- Зерттелетін бөлшектердің габариттік өлшемдері және олардан ауытқулар

2-кесте Зерттелетін бөлшектердің габариттік өлшемдері және олардан ауытқулар

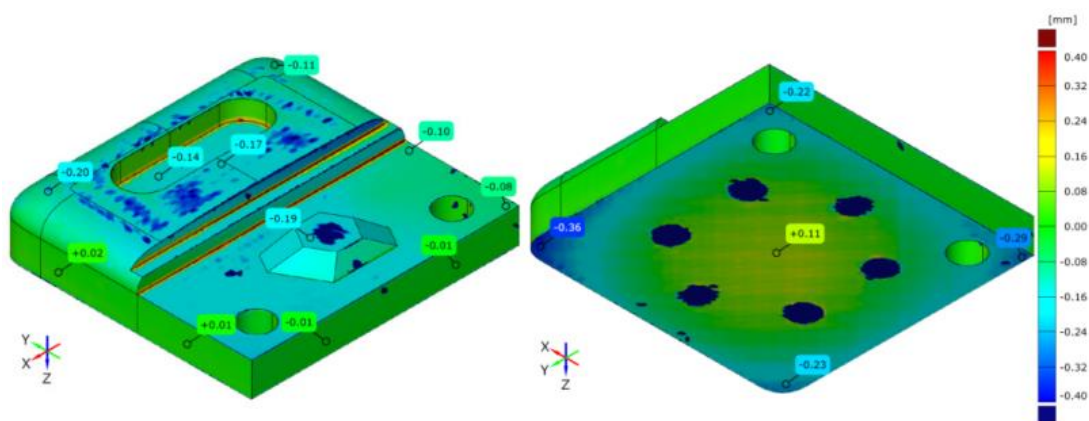
Ерекшелігі	Nom	FDM		APD	
		Ave.	SN	Ave.	SN
Hole 1	8	7,980	0.023	7.977	0.013
Hole 2	8	7,983	0.013	7.977	0.013
Номиналды X	68,5	68,528	0.020	68.511	0.011
Номиналды y	65	65,003	0.031	65.013	0.013
Номиналды z ортасына	15	14,953	0.089	14.977	0.122

(макс.)					
номиналды Z-бұрышы (мин)	15	14.541	0.161	12.755	1.005
Төменгі жазықтыққа номиналды Z	15	14.781	0.067	14.375	0.309
Логотип жоғарғы жазықтықта осі Z	4	3.975	0.013	3.900	0.032
Қалта жоғарғы жазықтықта осі Z )	0,83	0.840	0.025	0.663	0.210
Алдыңғы жазықтықтан ортаңғы жазықтыққа (Y-осі)	29,25	29.264	0.215	29.291	0.241
Саңылауға дейінгі қашықтық (X осі)	50	49.981	0.029	49.932	0.011
Қалта диаметрі	12,1	12.045	0.034	12.051	0.018
Қалта ені (X білігі)	25,3	25.250	0.049	24.903	0.031
60 бұрышы	60	59.980	0.120	60.043	0.080
45 бұрышы	45	44.903	0.125	44.827	0.232
30 бұрышы	30	29.887	0.052	29.970	0.420



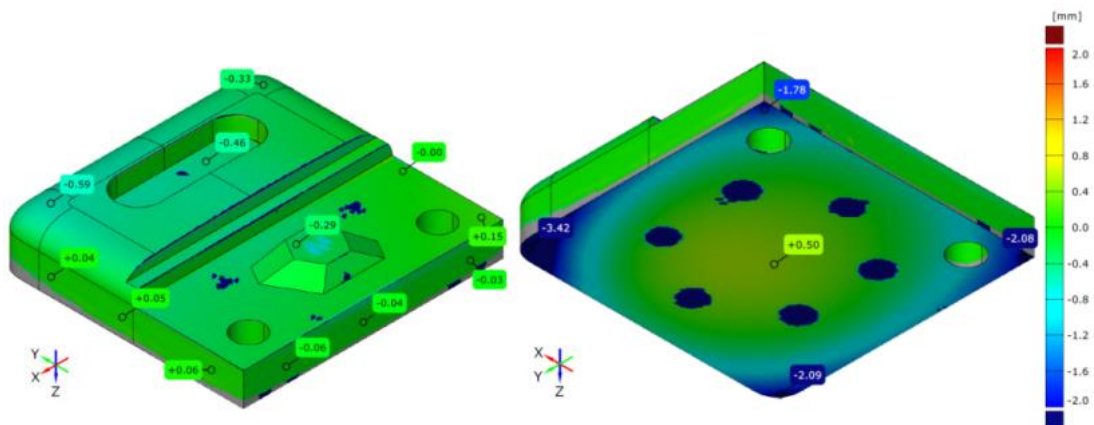
### 3.2 Augmented Polymer Deposition технологиясымен Fused Deposition Modeling технологиясын салыстырдық.

2-кестеде көрсетілген нәтижелерге сәйкес Z осіндегі барлық өлшемдік сипаттамалар (яғни, шығарылған бөліктердің төменгі жазықтығына байланысты өлшемдер) айтарлықтай жоғары ауытқуды көрсетті. Осыған байланысты APD шығарған бөліктердегі 6 өлшемнің орташа қателік мәні 2,245 мм-ге дейін өсті және суретте көрсетілмеген. 4-суретте бөлшектердің гибридіті өндірісінен кейінгі орташа сызықтық өлшемді қателік көрсетілген. Қателер өндірілген үлгінің орташа өлшемдері мен номиналды мәні арасындағы айырманы есептеу арқылы есептелді. Нәтижелер бөліктің төменгі жазықтығымен байланысты өлшемдік қателіктер (яғни, жазықтықты қосу машинасында бекіту) әдетте материалды экструзия процесінде пайда болатын бұрылу әсерінен едәуір жоғары ауытқуларға ұшырайтындығын көрсетеді.



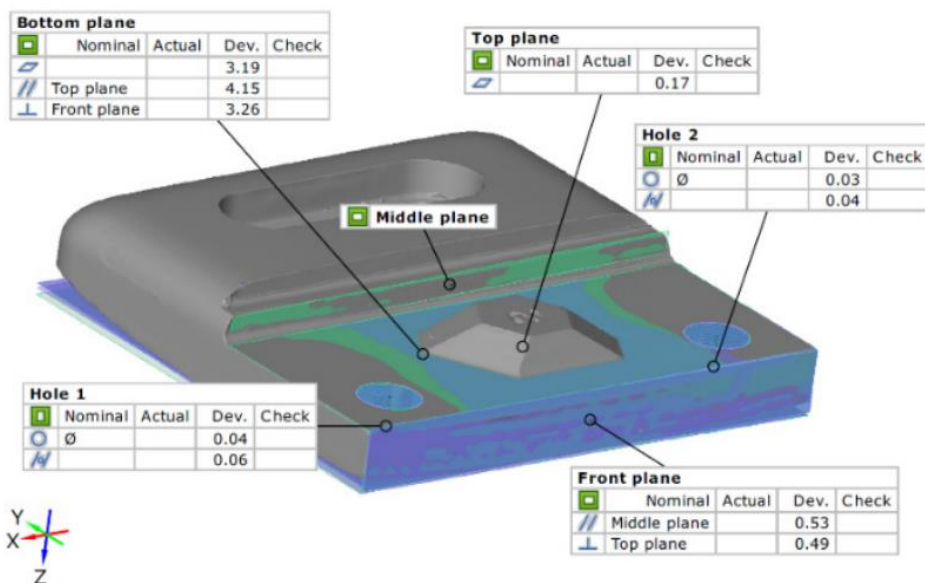
8-сурет- FDM беттерін салыстыру: 3-үлгі

8 және 9-суреттерде APD үлгісі сәйкесінше FDM және APD үлгіні беткі бөлікпен салыстырады. Қызыл аудандар CAD номиналды моделінен жоғары өлшемді білдіреді, ал көк аймақ - номиналды CAD моделінен төмен өлшемдер. Номиналды CAD моделіне ауытқу FDM шығарған бөлшектер үшін -0,40 мм-ден 0.40 мм-ге дейін, ал APD -да шығарылған бөліктер үшін -2 мм-ден 2 мм-ге дейін. Сонымен қатар, цифрлардың төменгі көрінісі APD шығарылған бөліктерде бұрмаланудың анағұрлым қатал екендігін көрсетеді, осылайша ауытқудың максимумы 3,4 мм-ге жетеді. Бұрын 7-суретте және 2-кестеде көрсетілген тенденциялармен, көрнекі үлгілердің жоғарғы көрінісі өңделгеннен кейінгі барлық беттерде (яғни XY жазықтығында) өлшемдік ауытқулар әлдеқайда төмен болатындығын, демек, субстративті процестер өлшемдік тұрақтылықты арттыратындығын көрсетеді.



9-сурет- APD беттерін салыстыру: 2 үлгі

10-суретте осы эксперимент кезінде зерттелген жалпы өлшемдер мен төзімділік көрсетілген, ал көрсетілген мәліметтер APD жабдығымен жасалған 3-үлгіге сәйкес келеді. Орташа мәні және кішкене үлгілер үшін түзетілген стандартты ауытқулар 2-кестеде көрсетілген.

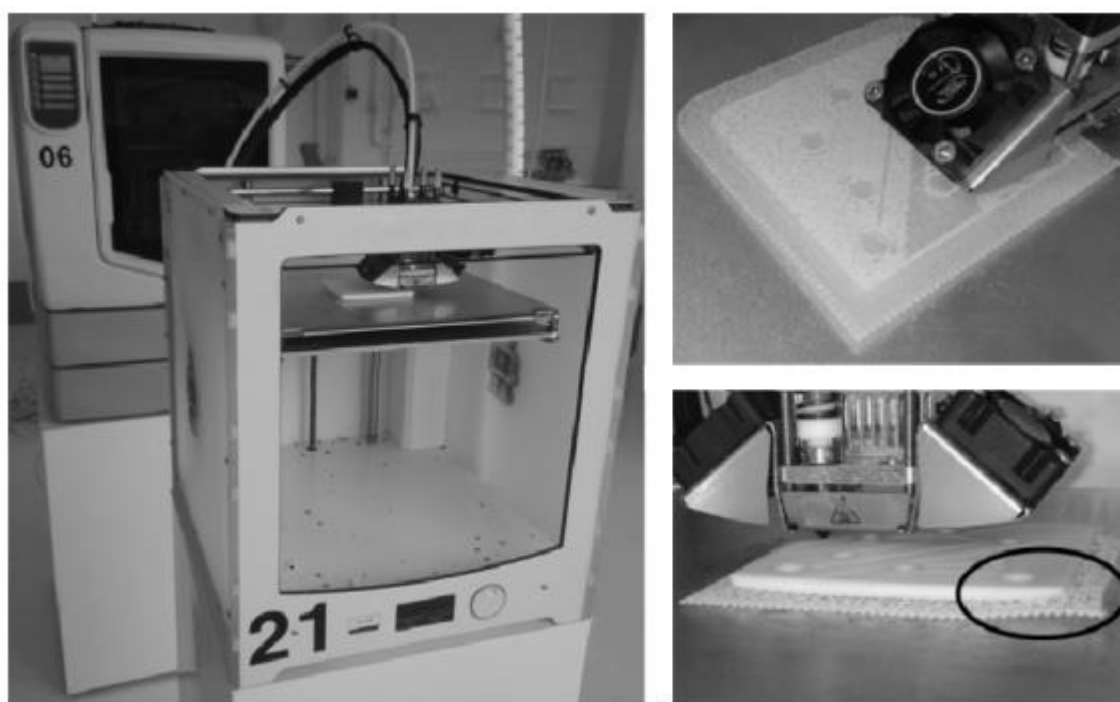


10-сурет- APD 3 үлгісі: геометриялық төзімділіктері зерттеу

1 және 2 саңылаулардағы цилиндрлік және дөңгелектікке төзімділік (APD және FDM бөліктері үшін эквивалентті нәтижелерді көрсетеді. Жоғарғы және алдыңғы жазықтықтардың перпендикулярлығы, алдыңғы жазықтық пен ортаңғы жазықтық параллелизмі және үстіңгі жазықтықтың жазықтығы APD бөліктері үшін жақсы нәтижелерді көрсетеді.

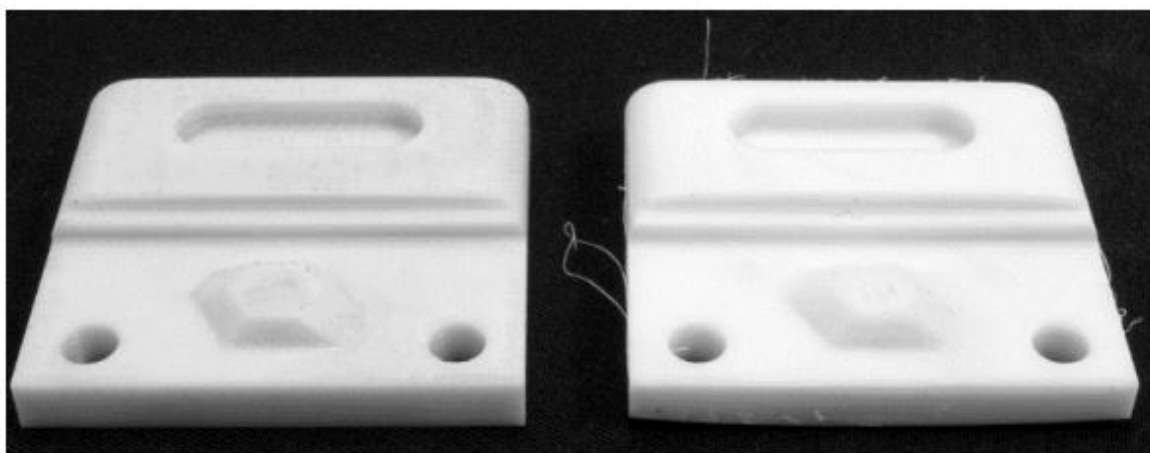
Осы мүмкіндіктерінің көпшілігі қолданылатын машинаның түріне тәуелді емес, стандарттарға сәйкес төзімділік класына жатады. 2-кесте сонымен қатар термиялық түзілудің төменгі жазықтық пен үстіңгі жазықтық

параллелизмі, төменгі жазықтық пен алдыңғы жазықтықтың перпендикулярлығы және төменгі жазықтықтың жазықтығы сияқты ерекшеліктеріне теріс әсер еткенін көрсетеді. Олар өндірілген үлгінің төменгі жазықтығына ең жақсы сәйкес келетін жазықтықтың көмегімен есептелген, сондықтан оның ауытқуы әлдеқайда жоғары. Сыналған қоспа машиналардың сапалық бағасы APD жабдығын пайдалану кезінде бастапқы қабаттардың жалпы геометрияға әсері маңызды екенін көрсетті. 11-суретте APD жүйесінің өзегі термиялық бүлінуге байланысты бір сағаттық өндірістен кейін базалық жазықтықтан қалай ажыратылғандығы көрсетілген, бұл базалық тақтадан геометрияның бөлінуіне әкелетін кернеуді тудырады. FDM жүйесі осы тәжірибе кезінде бірнеше рет сәтсіздікке ұшырады, ал өндіріс процесін болжау мүмкін болмады.



11-суретте- APD жүйесіндегі 3D баспа

Сонымен қатар, 12-суретте көрсетілгендей, APD өндірілген бөлігінде субтрактивті процестің үйлесі көрсетілді.



12-сурет- 3D басу процесстен кейінгі геометриясы, оң жағынан FDM және сол жағынан APD

Өлшемді және нәтижелері өндірістің төмен көлеміне қатты геометриялық қажеттілігі бар геометрия құру үшін қосымшалы және субтивтивті процестерді біріктіруге болатындығын көрсетеді. Дегенмен, APD жабдығын пайдалану кезінде кемшіліктер бар, көбінесе бұл процестің сенімділігі, өндірілетін бөліктердің жылдамдығы мен соңғы өлшемді дәлдігі. 20-дан астам үлгілер шығарылды, ал басып шығарудың 40% -ы бүліну әсері қолайлы диапазонға дейін жойылды; талдауға тек ең жақсы үш үлгі кірді.

FDM жабдығының төмен сенімділігі өндіріс процесін белгісіз етеді, сондықтан техникалық инженерлік қолдану үшін жарамсыз болады. Жалпы, өлшемді нәтижелері APD-қа қарағанда түзетілген стандартты ауытқу, негізінен, жылу түзету проблемаларына байланысты жоғары екенін көрсетті.

Бұйым үлгінің мөлшері неғұрлым сенімді зерттеулерді қамтамасыз ету үшін өте маңызды екенін түсінеді. Дегенмен, FDM жабдығынан сенімді бөліктердің үлкен үлгіні алу қиындықтарына байланысты, өндірілген үлгілердің стандартты ауытқуы ISO стандарты ұсынған нұсқаулыққа сәйкес шектеулі үлгіні өлшеу кезінде өлшемді белгісіздікті өлшеу бойынша түзетілді. Осы түзетуден кейін APD үлгісінің нәтижелері әрлеу процесі неғұрлым сенімді және қайталанатын бола алатындығын көрсетті. APD жүйесін қолданудың артықшылығы айқын: өлшемді ауытқу мен бұралу әсерлерін машинада қыздыру камерасын қосу және өндірісті жеңілдету үшін онтайландырылған технологиялық параметрлерді алдын ала орнату арқылы азайтуға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, алынған үлгінің бөлшектердің жоғары жылжу беріктігі арқасында кейінгі өңдеудің жақсы механикалық көрсеткіштері болды. 4-суреттің нәтижелерін талдай отырып, 9, 10, 11 және 12 өлшемдері APD мен FDM арасындағы айтарлықтай сәйкессіздік көрсетті. Барлық осы өлшемдік белгілер Z осінде өлшенді (яғни, шығарылған бөліктердің төменгі жазықтығына байланысты өлшемдер). FDM жүйелерін пайдалану кезінде жылу камерасы температура градиентін бақылау арқылы азаяды және нәтижелер номиналдыға жақын; алайда APD жүйесі өндіріс процесінде температура градиенттері көп

болатын қыздырылған табақты ғана қамтыды, сондықтан дәлдіктер әлдеқайда жоғары.

Болашақ зерттеулерге назар аудара отырып, осы эксперименттің нәтижелерін өңдеуді қажет ететін геометриялық ерекшеліктерге байланысты оңтайлы бағдар табу арқылы едәуір жақсартуға болады. Сонымен қатар, FDM шығаратын бөлшектерге әсер етудің әсерін әр түрлі термопластикалық жіптерді қолдану және қабаттардың қалыңдығы сияқты құрылым параметрлерін оңтайландыру арқылы азайтуға болады. Эксперимент барысында алынған нәтижелер мен қол жеткізілген геометриялық дәлдікке экспериментте қабылданған өңдеу тәсілі әсер етті. Дәл солай геометриялық ерекшеліктерді өткір бұрыштармен аяқтаған кезде қолдануға болады; бұл жағдайда радиусы кішірек құрал қолданылуы мүмкін. Осыған қарамастан, қабылданған стратегия өлшемді және нәтижелеріне нұқсан келтіретін операция үшін бірдей құралды қолдануды көздейді. Номиналды АЖЖ-нің үстіңгі бетін пайдалану арқылы жасалған құрал-сайман жолының әсері қол жеткізілген дәлдікке де әсер етеді. Бұл экспериментте контурды өңдеу стратегиясы бөлшектер қабатының қалыңдығынан төмен және бір жағынан төмен болатын барлық функцияларды өңдеу үшін қолданылды. Келесі зерттеу APD шығарған бөлшектерді өңдеудің оңтайлы параметрлерін қарастыра алады (мысалы, шпиндельдің жылдамдығы, берілу жылдамдығы, артқы қадамдар, түсірілімдер, аспаптар жолдары және басқалары).

## ҚОРЫТЫНДЫ

Диплом жазу барысында барлық қойылған мақсаттарға толық қол жеткізілді.

Негізі зерттеу кезінде, Augmented Polymer Deposition технологиясының құрылымы және оның патенті туралы анықтадық. Және Augmented Polymer Deposition технологиясымен Fused Deposition Modeling технологиясын салыстырдық.

APD және FDM жүйелерін бағалаудың және салыстырудың аддитивті өңдеуден кейінгі жүйесінде салыстыру үшін жасалды. Аддитивті процесс алдымен бөлшекке материалдық қорды қосу үшін номиналды CAD геометриясын алып тастау арқылы жүзеге асырылды.

Тәжірибе нәтижелері аддитивті процестердің үйлесуі бөліктердің өлшемдік тұрақтылығын едәуір жақсартып алатындығын көрсетті.

Сонымен қатар, тегіс беттерді шығаруға мүмкіндік беретін баспалдақ эффекті де жоюға болады. Эксперимент қоспа өндірісін негізгі өлшемдер, құрастыру нүктелері және геометриялық функционалды беттер сияқты ерекшеліктер бойынша қажетті дәлдікті алу үшін аддитивті процестермен біріктіруге болатындығын көрсетеді. Алайда, FDM процесі APD-мен салыстырғанда айтарлықтай төмендеді.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Ahn, D., Kim, H. and Lee, S. (2007) 'Fabrication direction optimization to minimize postmachining in layered manufacturing', International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, Nos. 3–4, pp.593–606.
- 2 ASTM International (2013) F2792-12a – Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Available online at: [www.astm.org/Standards/F2792](http://www.astm.org/Standards/F2792)
- 3 Зленко М.А. Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении // пособие для инженеров. М. ГИЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с
- 4 Francis, J., Sparks, T.E., Ruan, J. and Frank, L. (2014) 'Multi-axis tool path generation for surface finish machining of a rapid manufacturing process', International Journal of Rapid Manufacturing, Vol. 4, No. 1, pp.66–80.
- 5 ISO (2005) General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories, ISO/IEC17025:2005, ISO
- 6 Lee, W.C., Wei, C.C. and Chung, S.C. (2014) 'Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining', Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, No. 11, pp.2366–2374
- 7 Turner, B.N., Strong, R. and Gold, S.A. (2014) 'A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I – process design and modeling', Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, No. 3, pp.192–204.