

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

Күзембай Арслан Амангелдіұлы

«Өнімді жасау кезінде аддитивті Multi Extrusion Modeling 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: «Өнімді жасау кезінде аддитивті Multi Extrusion Modeling технологиясын қолдануды зерттеу»

5B071200 – Машина жасау

Орындаған

Күзембай Арслан Амангелдіұлы

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 Күзембай Арслан Амангелдіұлы

Тақырыбы «Өнімді жасау кезінде аддитивті Multi Extrusion Modeling технологиясын қолдануды зерттеу»

Университет ректорының «__» _____ 20__ ж. №_____ бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі «__» _____ 20__ ж.

Дипломдық жобаның бастапқы берістері бұйым жасау кезінде Multi Extrusion Modeling технологиясын қолдануды зерттеу

Дипломдық жобада қарастырылатын мәселелер тізімі

а) *Multi Extrusion Modeling технологиясың құрылымын зерттеу*

б) *Роликті беру механизмі*

в) *Ісіну және салқындату әсерін зерттеу*

Ұсынылған негізгі әдебиет: 8 атау

Дипломдық жобаны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәліметтер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Кіріспе. Multi Extrusion Modeling технологиясың құрылымына және жалпы шолу		
Шүмек басы және шығаратын сұйылтқыштарды зерттеу		
Роликті беру механизмін зерттеу		
Балқыманың қасиеттерін зерттеу		

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 _____ Күзембай А. А.

Күні

«___» _____ 2020 ж.

АНДАТПА

Берілген дипломдық жобада аддитивті технологиялардың ішіндегі Multi Extrusion Modeling процесінің жұмыс жасауын толық зерттелді.

Экструзия негізінде АМ жүйесінің конструкциясын анықтадық. Шүмек басы және шығаратын сұйылтқыштар, сонымен қатар роликті беру механизмін, сұйылтқыштың динамикасын, балқыманың қасиеттерін толық зерттеліп анықталды.

Сұйылтқыштың саптамалық геометриясын және сұйылтқышқа кіретін шүмектен, одан шығатын конвекцияны анықтадық.

Қысым ауытқуын бағаланды. Саңылаулар бұрышының әсерін және соңғы элементтерді талдадық. Ісіну және салқындату параметрлерін қарастырдық. Қабатарды басу, шөгу және байланыстыруды толық ашып зертедік.

MEM Melted Extrusion Modeling - балқытылған экструзиялық модельдеу - термопластикалық материалдарды балқыту экструзия, және кез келген шешудің қарапайым идеясын қолданатын RP жылдам прототиптеу әдісінің бір түрі болып табылады.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте был полностью изучен процесс Multi Extrusion Modeling из аддитивных технологий.

На основе экструзии мы определили конструкцию системы АМ. Были изучены головки сопла и выхлопные разбавители, а также механизм подачи ролика, динамику растворителя, свойства расплава.

Определились геометрию насадки разбавителя и конвекцию, выходящую из сопла, входящего в разбавитель.

Оценивалось отклонение давления. Анализировали влияние угла отверстий и конечных элементов. Рассмотрим параметры отека и охлаждения. Мы полностью раскрыли засыпку пластов, просадку и связывание.

MEM Melted Extrusion Modeling-расплавленное экструзионное моделирование-экструзия плавления термопластических материалов, и RP является одним из способов быстрого прототипирования, использующих простейшие идеи любого решения.

ANNOTATION

In this diploma project, the process of Multi Extrusion Modeling from additive technologies was fully studied.

On the basis of extrusion, we determined the design of the AM system. we studied the nozzle heads and exhaust diluents, as well as the roller feed mechanism, the dynamics of the solvent, and the properties of the melt.

The geometry of the diluent nozzle and the convection coming out of the nozzle entering the diluent were determined.

The pressure deviation was estimated. The influence of the angle of holes and finite elements was analyzed. Consider the parameters of edema and cooling. We fully disclosed the filling of reservoirs, the drawdown and sequestration.

MEM Melted Extrusion Modeling is the melting extrusion of thermoplastic materials, and RP is one of the rapid prototyping methods that uses the simplest ideas of any solution.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Multi Extrusion Modeling технологиясың құрылымына және жалпы шолу	10
2 Экструзия негізінде АМ жүйесінің конструкциясына шолу	15
2.1 Материалды беру механизмі	15
2.2 Шүмек басы және шығаратын сұйылтқыштар	16
3 Технологиялық модельдеу	19
3.1 Роликті беру механизмі	19
3.2 Сұйытқыштың динамикасы	21
3.2.1 Балқыманың қасиеттері	22
3.2.2 Сұйытқыш/саптама геометриясы	23
3.2.3 Сұйылтқышқа кіретін және шүмектен шығатын конвекция	24
3.2.4 Қысым ауытқуын бағалау	25
3.2.5 Саңылаулар бұрышының әсері	26
3.2.6 Соңғы элементтерді талдау	27
3.2.7 Ісіну және салқындату	27
3.3 Қабатарды басу, шөгу және байланыстыру	29
3.3.1 Моншақтардың тұнбасы және тұрақтылығы	29
3.3.2 Қабатты салқындату және полимермен байланыстыру	29
Қорытынды	34
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	35

КІРІСПЕ

Жылдам прототиптеу немесе аддитивті өндірістің (АМ) неғұрлым кең қолданылатын және тез өсіп келе жатқан технологияларының арасында балқытылған тұндыру моделдеу (FDM), балқытылған жіптерді дайындау және балқыманың экструзиясы (MEM) (Wohlers, 2011) сияқты экструзиялық тұндыру процестері болып табылады.

Басу процесінде материалды яғни филаментті принтірге қысу ролигі арқылы беріледі. Бастапқы шикізат материалынды балқытып басып шығару үшін, шүмегі екі ролик арқылы ығыстырады. Ығысқан материал қыздырғышқа келіп балқиды. Бұл шүмектен шығатын балқытылған материалдың қатаюына қарай күрделі үшөлшемді объектілерді жасауға мүмкіндік береді. Процестің осы түрінде қолданылатын ең көп таралған материалдар аморфты термопластар болып табылады және ең көп таралған акрилонитрилбутадиестирол (АБС) болып табылады.

1990 жылдары жылдам прототиптеу үшін алғаш рет әзірленген технологиялар неғұрлым күрделі болды және оларды қолдану өсті. Өткенде тез прототиптеу арқылы жасалған бөлшектердің көпшілігі құралдар, презентациялар модельдері және тез өндірілетін, бірақ міндетті емес функционалды прототиптер ретінде пайдалануға арналған. Бұл қосымшалар АМ қорытпасын экструзия әдісімен және басқа да 3D-баспа процестерімен жасалған бөлшектер нарығының негізгі бөлігі болып қала береді, қосымшалардың көп саны соңғы бөлшектерге арналған, олар механикалық қасиеттер мен өлшемдердің рұқсаттарына арналған конструкцияның қатаң функционалдық талаптарына сәйкес келуі тиіс. АМ-өнімдері мен қызметтері нарығының жалпы көлемі \$1,325 млрд-қа дейін өсті (2010 жылдың бағасы) және болжам бойынша 2020 жылға қарай \$ 5 млрд-тан асады (Wohlers, 2011). АМ машиналары өнеркәсіптік кәсіпорындар, үйлер/кеңселер, қызмет көрсетушілер, академиялық мекемелер мен үкіметтік/әскери мекемелер сияқты бүкіл әлем бойынша бірнеше қондырғылардан табуға болады. Мемлекеттік мекемелер тарапынан да, жеке сектор тарапынан да АМ саласындағы зерттеулер мен әзірлемелерге инвестициялар соңғы жылдары тез өсті (Scott et al. 2012), аддитивті өндірісте Ұлттық инновациялар институтын (NAMI, 2012) құруды қоса алғанда. Экструзиялық процестер ең кең қолданылатын АМ технологияларына жатады. Коммерциялық экструзиялық жүйелер нарығында қазіргі уақытта Stratasys, Inc ерітілген тұндыруды модельдеу (FDM) машиналары басым. 2010 жылғы Wohler есебіне сәйкес, АМ өнеркәсіптік жүйелеріндегі Stratasys нарықтық үлесі кез келген басқа жүйе өндірушісінің

үлесінен 3,5 есе асып түседі және 2010 жылы сатылған барлық жүйелердің 41,5% - ын құрайды (Wohlers, 2011).

2010 жылдың соңындағы жағдай бойынша бүкіл әлемде 15 000 Stratasys FDM (Wohlers, 2011) машинасы орнатылды. Олардың өндірістік желісі Fortus industrial FDM systems \$ 100,000-500,000 тұрады және Ultem® polyimide, поликарбонат және полифенилсульфонды, сондай-ақ ABS қоса алғанда, техникалық термопластикалық материалдардан бөлшектерді дайындау үшін сатылады. Stratasys, сондай-ақ кеңінен сатылатын, тек ABS термопластикалық материалдарын басып FDM жүйесінің үнемді өлшемдері, әр түрлі түстері мен сұрыптарында, дегенмен Beijing Yinhua қытай компаниясы жақында MEM Melted Extrusion Modeling (Wohlers, 2011) жүйелерімен осы нарықта бәсекелес болды. Олардың e-Print және F-Print машиналары \$ 10,000-72,000 үшін сатылады және қазіргі уақытта Азия нарығында қол жетімді (Wohlers, 2011) Технологияны Цинхуа университетінің профессорлары 1980 жылдардың аяғында жасап, 1990 жылы коммерцияланды.

MEM Melted Extrusion Modeling - балқытылған экструзиялық модельдеу - термопластикалық материалдарды балқыту экструзия, және кез келген шешудің қарапайым идеясын қолданатын RP жылдам прототиптеу әдісінің бір түрі болып табылады.

Жалпы алғанда, экструзиялық процестер үшін АМ нарығының одан әрі өсуі өндірістік жүйелердің өнімділігін үнемі жақсартуға және өзіндік құнын төмендетуге, сондай-ақ жаңа шикізат материалдарын әзірлеуге байланысты. Процестерді моделдеу негізінде жаңа озық басқару жүйелерін қамтуы және жаңа өндірістік жабдықты әзірлеуді бағыттауы мүмкін. Материалдардың дамуына, сондай-ақ бастапқы шикізаттың қолайлы қасиеттерінің шекараларын (мысалы, балқыманың тұтқырлығы мен филаментің серпімділік модулін) белгілеу және өңдеу шарттарын онтайландыруды жеделдету арқылы өңдеу туралы ғылымды түсінуіміздің жақсаруына ықпал ететін болады. Сонымен қатар, өңдеу шарттары дайын бөлшектердің қасиеттерін анықтауда маңызды рөл атқарады. Осы өзара байланысты түсіну жобалау ережелері мен сапаны бақылау стандарттарын әзірлеуге ықпал етеді. Экструзия негізінде АМ жүйесінің негізгі элементтеріне шолу ұсынылады. Осы элементтердің әрқайсысына байланысты технологиялық ғылымды моделдеуге және қазіргі заманғы түсінуге көзқарастар қарастырылатын болады, атап айтқанда: қысқыш роликті беру тетігі, сұйылтқыш, шарикті матрицаның ісінуі және салқындауы, жол шөгуі және желімдеу.

Бұл дипломдық жұмыстың негізгі мақсаты Multi Extrusion Modeling технологиясын қолдануды зерттеу болып табылады.

1 Multi Extrusion Modeling технологиясың құрылымына және жалпы шолу

Балқытуды және экструдирлеуді модельдеу Multi Extrusion Modeling (MEM) - бұл әдетте модельдеу, прототиптер жасау және өндіріс үшін қолданылатын аддитивті өндіріс технологиясы. Технологияны Цинхуа университетінің профессорлары 1980 жылдардың аяғында жасап, 1990 жылы коммерцияланды.

MEM материалды қабатпен төсей отырып, "аддитивті" қағида бойынша жұмыс істейді. Пластикалық жіп немесе металл сым катушкадан таралып, материалды экструзиялық шүмектерге береді, ол ағысты қосуға және өшіруге болады. Сопло материалды еріту үшін қызады және тікелей автоматтандырылған өндірістің бағдарламалық пакетімен басқарылатын сандық басқару механизмінің көмегімен көлденең және тік бағыттарда жылжытылуы мүмкін (CAM). Үлгі немесе бөлшек материал шүмектен сығылғаннан кейін бірден қатайған кезде қабаттардың пайда болуымен термопластикалық материалдан жасалған шағын шариктерді экструдирлеу жолымен дайындалады.

Акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС), полимер, поликарбонаттар, поликапролактон, полифенилсульфондар және балауыздар сияқты берік және температуралық қасиеттер арасында әртүрлі ымыралы бірнеше материалдар бар. "Сұйықтықта еритін" материал өндіріс кезінде уақытша төсеніштерді дайындау үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл төсеніштің еритін материалы натрий гидроксидінің нақты қыздырылған ерітіндісін пайдалана отырып, механикалық араластыруға арналған арнайы жабдықтың көмегімен тез ериді.

«Балқытылған және экструдталған модельдеу» термині және оның MEM-дан алынған қысқартуы Beijing TierTime Technology Co. сауда белгілері болып табылады.

Жылдам прототиптеу немесе аддитивті өндірістің (AM) неғұрлым кең қолданылатын және тез өсіп келе жатқан технологияларының арасында балқытылған тұндыру моделдеу (FDM), балқытылған жіптерді дайындау және балқыманың экструзиясы (MEM) (Wohlers, 2011) сияқты экструзиялық тұндыру процестері болып табылады.

Басу процесінде материалды яғни филаментті принтірге қысу ролигі арқылы беріледі. Бастапқы шикізат материалынды балқытып басып шығару үшін, шүмегі екі ролик арқылы ығыстырады. Ығысқан материал қыздырғышқа келіп балқиды. Бұл шүмектен шығатын балқытылған материалдың қатаюына қарай күрделі үшөлшемді объектілерді жасауға мүмкіндік береді. Процестің

осы түрінде қолданылатын ең көп таралған материалдар аморфты термопластар болып табылады және ең көп таралған акрилонитрилбутадиенстирол (АБС) болып табылады.

1990 жылдары жылдам прототиптеу үшін алғаш рет әзірленген технологиялар неғұрлым күрделі болды және оларды қолдану өсті. Өткенде тез прототиптеу арқылы жасалған бөлшектердің көпшілігі құралдар, презентациялар модельдері және тез өндірілетін, бірақ міндетті емес функционалды прототиптер ретінде пайдалануға арналған. Бұл қосымшалар АМ қорытпасын экструзия әдісімен және басқа да 3D-баспа процестерімен жасалған бөлшектер нарығының негізгі бөлігі болып қала береді, қосымшалардың көп саны соңғы бөлшектерге арналған, олар механикалық қасиеттер мен өлшемдердің рұқсаттарына арналған конструкцияның қатаң функционалдық талаптарына сәйкес келуі тиіс. АМ-өнімдері мен қызметтері нарығының жалпы көлемі \$1,325 млрд-қа дейін өсті (2010 жылдың бағасы) және болжам бойынша 2020 жылға қарай \$ 5 млрд-тан асады (Wohlers, 2011). АМ машиналары өнеркәсіптік кәсіпорындар, үйлер/кеңселер, қызмет көрсетушілер, академиялық мекемелер мен үкіметтік/әскери мекемелер сияқты бүкіл әлем бойынша бірнеше қондырғылардан табуға болады. Мемлекеттік мекемелер тарапынан да, жеке сектор тарапынан да АМ саласындағы зерттеулер мен әзірлемелерге инвестициялар соңғы жылдары тез өсті (Scott et al. 2012), аддитивті өндірісте Ұлттық инновациялар институтын (NAMII, 2012) құруды қоса алғанда. Экструзиялық процестер ең кең қолданылатын АМ технологияларына жатады. Коммерциялық экструзиялық жүйелер нарығында қазіргі уақытта Stratasys, Inc ерітілген тұндыруды модельдеу (FDM) машиналары басым. 2010 жылғы Wohler есебіне сәйкес, АМ өнеркәсіптік жүйелеріндегі Stratasys нарықтық үлесі кез келген басқа жүйе өндірушісінің үлесінен 3,5 есе асып түседі және 2010 жылы сатылған барлық жүйелердің 41,5% - ын құрайды (Wohlers, 2011).

2010 жылдың соңындағы жағдай бойынша бүкіл әлемде 15 000 Stratasys FDM (Wohlers, 2011) машинасы орнатылды. Олардың өндірістік желісі Fortus industrial FDM systems \$ 100,000-500,000 тұрады және Ultem® polyimide, поликарбонат және полифенилсульфонды, сондай-ақ ABS қоса алғанда, техникалық термопластикалық материалдардан бөлшектерді дайындау үшін сатылады. Stratasys, сондай-ақ кеңінен сатылатын, тек ABS термопластикалық материалдарын басып FDM жүйесінің үнемді өлшемдері, әр түрлі түстері мен сұрыптарында, дегенмен Beijing Yinhua қытай компаниясы жақында MEM Melted Extrusion Modeling (Wohlers, 2011) жүйелерімен осы нарықта бәсекелес болды. Олардың e-Print және F-Print машиналары \$ 10,000-72,000 үшін

сатылады және қазіргі уақытта Азия нарығында қол жетімді (Wohlers, 2011) Технологияны Цинхуа университетінің профессорлары 1980 жылдардың аяғында жасап, 1990 жылы коммерцияланды.

MEM Melted Extrusion Modeling - балқытылған экструзиялық модельдеу - термопластикалық материалдарды балқыту экструзия, және кез келген шешудің қарапайым идеясын қолданатын RP жылдам прототиптеу әдісінің бір түрі болып табылады.

MEM технология және бұл Stratasys компаниясының FDM (Fused Deposition Manufacturing) технологиясымен өндіру процесіне өте ұқсас (4.2 бөлімін қараңыз). Алайда, технологияның өзіндік ерекшеліктері бар [21]. MEM технологиясы термопласттарды филаментті балқытып және сығады. 1 – суретте көрсетілген.



1-сурет - MEM Yinhua жылдам прототиптеу машинасы (лазерлік жылдам қалыптау орталығы ұсынған, Пекин Цинхуа университеті)

Процесс үш осьті экструзиялық бастиек арқылы қозғалмайтын негізге филамент түрінде термопласттарды қыздырады және экструдиялайды. Басы қабаттар арасында жоғары қозғала алады. MEM-250-II моделі бар және ол 250 x 250 x 250 мм (10 x 10 x 10 дюйм) кеңістігі бар.

Пекин Синьхуа жылдам прототиптеу жүйесінің үш түрлі түрін әзірледі. Бұл қатты дайындамаларды кесу (SSM), балқытылған экструзияны модельдеу (MEM) және жылдам прототиптеу (M-RPM) көпфункционалды машиналар. Осы 3 технологиялардың артықшылықтары мен кемшіліктері төменде көрсетілген.

Кемшіліктер

SSM;

1. Қуаттың дәл реттелуі. Лазер алдыңғы қабаттарға еніп, бүкіл прототипті бұрмаламайтындай етіп, қуатты дәл реттеу керек.
2. Прототиптердің тұтастығы. Салынған прототиптердің тұтастығы желімделген қабаттың байланыс беріктігімен шектеледі.

3. Тіректерді алу. Процесс пайдаланушылардан көп уақытты қажет ететін тіректерді қолмен алып тастауды талап етеді.

MEM;

1. Орташа дәлдік. Дәлдік пайдаланылатын материалдың пішініне байланысты шектелген және қолданылатын филамент диаметрімен шектелген.
2. Баяу процесс. Құрылыс процесі баяу жүреді, өйткені барлық көлденең қиманы құрылыс материалдарымен толтыру қажет.
3. Болжамсыз шөгуге. Процестің жылдам салқындауы болжау қиын модельдердің кішіреюіне және бұрмалануына әкеледі.

M-RPM;

1. M-RPM SSM және MEM процестерінің екеуін де қолданатындықтан, кемшіліктер жоғарыдағыдай ұқсас.

Артықшылықтары

SSM;

1. Жылдам жинау уақыты. Қажетті пішінге дейін қабатты кесу үшін ұтымды уақыт, тез, өйткені лазер көлденең қиманың барлық ауданын сканерлеу міндетті болып табылмайды
2. Тірек құрылымы. Қолдау құрылымын қажет етпейді, себебі бөлік өзінің материалымен қамтамасыз етіледі.
3. Бөлшектер басу процессінен кейін бірден пайдаланылуы мүмкін, және ешқандай қосымшадайындауды қажет емес.

MEM;

1. Ең аз шығындар. Жүйе модельді өндіру кезінде және өндіруден кейін де, қажетсіз материалдарды тастамайды және тазалауды талап етпейді.
2. Материалды ауыстыру немесе өзгерту жеңілдігі. Материалды оңай алмастыруы, себебі материал яғни филамент катушкалар түрінде қолданылады.

M-RPM;

1. Процестің кең таңдауы. Жүйе екі процесті қамтиды (SSM және MEM).

Пайдаланушылар осы екі процестердің кез келгенін таңдай алады.

Дербес фабрикациялардың жылдам өсіп келе жатқан нарығында (Lipson and Kurman, 2010), сондай-ақ балқытылған жіптерді өндіру жүйелері басым, олардың көпшілігі ашық бастапқы коды бар RepRap жобасына негізделген (Jones et al., 2011). Бұл жүйелердің өсуі мен танымалдығы MEM процесіне Stratasys бастапқы патенттерінің әрекет ету мерзімінің аяқталуына, сондай-ақ жүйенің төмен құны мен конструкциясының қарапайымдылығына байланысты болды. 3D баспа нарығында жеке және офистік пайдалану үшін ең танымал

бәсекелестердің арасында-MakerBot systems, 3D Systems, Inc компаниясы сататын Bits-from-Bytes принтерлері. және жоғары Stratasys корпорациясының Дельта микро-зауыты компаниясы жасаған жабдық, сондай-ақ осы нарықта оның Моджо және uprint принтер желісі бар ірі ойыншы болып табылады. Өндірушіге қарамастан, бұл шағын сериялы машиналар \$ 1500-5000 сатылады және ABS полимерлері және/немесе полимолочной қышқылы (PLA) бөлшектерін басып шығарады.

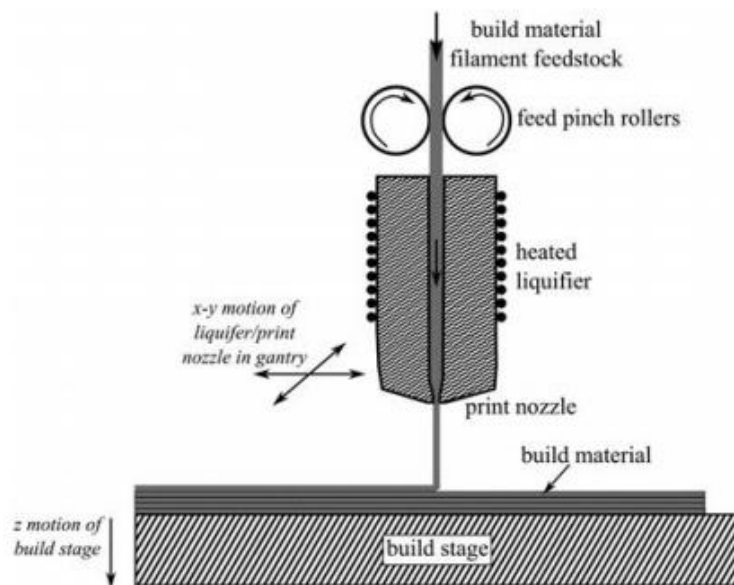
Жалпы алғанда, экструзиялық процестер үшін АМ нарығының одан әрі өсуі өндірістік жүйелердің өнімділігін үнемі жақсартуға және өзіндік құнын төмендетуге, сондай-ақ жаңа шикізат материалдарын әзірлеуге байланысты. Процестерді моделдеу негізінде жаңа озық басқару жүйелерін қамтуы және жаңа өндірістік жабдықты әзірлеуді бағыттауы мүмкін. Материалдардың дамуына, сондай-ақ бастапқы шикізаттың қолайлы қасиеттерінің шекараларын (мысалы, балқыманың тұтқырлығы мен филаментің серпімділік модулін) белгілеу және өңдеу шарттарын оңтайландыруды жеделдету арқылы өңдеу туралы ғылымды түсінуіміздің жақсаруына ықпал ететін болады. Сонымен қатар, өңдеу шарттары дайын бөлшектердің қасиеттерін анықтауда маңызды рөл атқарады. Осы өзара байланысты түсіну жобалау ережелері мен сапаны бақылау стандарттарын әзірлеуге ықпал етеді. Экструзия негізінде АМ жүйесінің негізгі элементтеріне шолу ұсынылады. Осы элементтердің әрқайсысына байланысты технологиялық ғылымды моделдеуге және қазіргі заманғы түсінуге көзқарастар қарастырылатын болады, атап айтқанда: қысқыш роликті беру тетігі, сұйылтқыш, шарикті матрицаның ісінуі және салқындауы, жол шөгуі және желімдеу.

2 Экструзия негізінде АМ жүйесінің конструкциясына шолу

Балқытылған экструзия АМ жүйесінің негізгі элементтеріне материалды беру механизмі, сұйылтқыш және баспа басы, беткі қабат кіреді. Жалпы жүйенің компоненттері 1 суретте көрсетілген. Жүйенің осы компоненттерінің әрқайсысы үшін типтік құрылымдық ерекшеліктері осы бөлімде талқыланады.

2.1 Материалды беру механизмі

Экструзияның дәстүрлі өндіріс процесінде бұрандалы экструдермен түйіршікті немесе түйіршіктелген шикізат қолданылады. Мұндай беру механизмі теориялық тұрғыдан мүмкін болғанымен, біздің білуімізше, мұндай механизм коммерциялық қол жетімді АМ жүйесінде қолданылмайды. Әдеттегі шикізат диаметрі шамамен 1,5-3 мм болатын аморфты термопластикалық полимерлі жіптер болып табылады. Кішігірім жүйелерде бұл шикізат жай бос катушкалар болып табылады, ал үлкен өндіріс жүйелерінде шикізат жүйені жеткізу үшін катушка ішінде жиналады. Қалай болғанда да, филамент 1-суретте көрсетілгендей қысқыш ролик механизмі арқылы жүйеден өткізіледі. Қадам моторы жүйені филаментке жылжыту үшін қуат беретін роликтердің біріне жалғанған. Әдеттегі Роликтің материалы гипалон немесе полиуретаннан жасалады (Agarwala соавт., 1996). Роликтердің біреуінде немесе екеуінде де редуктор тәрізді иілген немесе тістелген беті болуы мүмкін, ол роликті филаменттен ұстап, оны сұйылтқышқа тайғақсыз беру үшін жеткілікті үйкеліс тудыруы мүмкін (Agarwala соавт., 1996). Роликтер арасындағы филаменттің қысымы әдетте кішкене тіс іздерін қалдырып, оны аздап деформациялау үшін жеткілікті, бірақ бұлар филаментті ұсақтамау үшін жасалуы керек (Agarwala соавт., 1996).



2-сурет - Әдеттегі экструзияға негізделген процестің иллюстрациясы

Бөлшектерді экструзияға негізделген процесте басып шығару кезінде полимер шикізатымен ылғалды сіңіру айтарлықтай проблемалар тудыруы мүмкін. Материал экструзиялық саптаманы ерітіп, итергендіктен, сіңіп жатқан су буға айналады және егер ол жеткілікті мөлшерде болса, бұл материалдың морфологиялық өзгеруіне, басып шығару саптамасының бітелуіне және / немесе көпіршіктердің пайда болуына әкелуі мүмкін, және басып шығарылған материалдың жолындағы бітелулер пайда болу мумкін. Stratasys, Inc. Құрғату материалдарын құрғақ күйде ұстау үшін шикізат катушкасында де, MEM жүйесінде де пайдаланады. Шағын жүйелерде әдетте бұл мәселені шешудің механизмі жоқ.

2.2 Шүмек басы және шығаратын сұйылтқыштар

Экструзияға негізделген АМ жүйесінің негізі полимер шикізаты балқытылатын сұйылтқыш болып табылады. Сұйылтқыш - бұл әдетте филамент/балқымадан өту үшін өңделген арна бар металл блок. Stratasys жүйелерінде канал сұйылтқышпен қоршалған бір рет қолданылатын басып шығару механизміне қосылған. Резистивті қыздыру әдетте сұйылту камерасын қоршаған спиральды қыздыру элементімен немесе сұйылту торабына орнатылған бір немесе бірнеше патронды қыздырғыштармен пайдаланылады. Кез келген жағдайда жүйе барлық сұйылтқышта біркелкі температураны ұстап тұруға арналған. Бір термопара тұрақты температураны ұстап тұру үшін қыздыру элементімен және контроллермен бірге қолданылады (Gibson et al.,

2010). Бастапқы материалға жылу ағыны оны балқытылған күйге келтіру үшін жеткілікті болуы тиіс. Сұйылтқыштың қорытпасының саны жылу ағынына және материалды беру жылдамдығына байланысты болады. Бастапқы шикізат әдетте белгілі бір балқыту температурасы жоқ аморфты полимерлер болып табылады. Температураның жоғарылауымен балқыманың тұтқырлығы азаяды, бұл қысымның аз ауытқуымен басу шүмегі арқылы оңай өтуге мүмкіндік береді. Балқудың жоғары температурасы сонымен қатар моншақтардың немесе басып шығарылған материалдардың жолдарының арасындағы жақсы адгезияға әкеледі, сондықтан дайын бөлігінде үлкен механикалық беріктік болады. Жоғары температура сонымен қатар полимердің тозуына, полимер тізбектерінің бұзылуына, дайын бөлігінің әлсіреуіне және балқымалы каналдың ішінде қалдықтың қалуына әкелуі мүмкін (Гибсон және басқалар, 2010). Басу басы сұйылтқышпен тығыз біріктірілген және бекітілуі немесе ауыстырылуы мүмкін. Ең соңғысы, әдетте, неғұрлым жоғары класс жүйелерінде кездеседі, өйткені термоциклдеу және / немесе материал қалдықтарының жинақталуы уақыт өте келе басып шығаратын бастың өнімділігін өзгертеді. Қорытпаның тұтқырлығымен бірге басып шығаратын бастың геометриясы жүйедегі қысымның ауытқуын және материалды беру тетігінен талап етілетін күшті анықтайды. Басып шығару шүмегінің тесігінің өлшемі, сондай-ақ, соңғы баспа өнімінде қол жеткізуге болатын рұқсатты шектейді. Сопланың типтік тесіктері диаметрі 200-500мм. Қозғалысты қамтамасыз ететін Қуат электр кадамдық қозғалтқышпен беріледі және басып шығару бастарына / ажыратқышқа тісті беріліс және ГРМ белбеуі арқылы беріледі. Басып шығару басы/сұйылтқыш қозғалуы мүмкін жылдамдық, және соңында бөлшектерді дайындау жылдамдығы, бірінші кезекте портал конструкциясының қаттылығымен шектеледі. Басылуы мүмкін бөлшектердің өлшемі портал өлшемімен шектеледі.

Материал басып шығару механизмінің тік бағытта қозғалатын көлденең бетке шығарылады (яғни z бағыты бойынша). Бұл қозғалыс, басып шығару бастарының қозғалысымен үйлескен қозғалысы 3D-құрылымдарды жасауға мүмкіндік береді. Балқыма басылған бет жүйе конструкциясының маңызды элементі болып табылады. Балқыманы осы бетке жабыстыру керек, бірақ детальды басып шығару процесі аяқталғаннан кейін жоюға болмайды. Stratasys машиналары вакуумдық үстелін құрастыру пластинасына салынған құрылыс материалына сәйкес келетін бір реттік жинау парағын пайдаланады. Karton™ пленкалары әдетте ABS және PLA полимерлік материалдарды басып шығаруға арналған және ең көп таралған пленканың бірі болып табылады. Бұл проблемамен күресу үшін алдыңғы қатарлы жүйелер температурасы реттелетін

пеш ішінде басылады. Вентиляторлар бөлшектерді суытуға арналған жүйе арқылы, оларды басып шығаруына және жинау ортасында баспайтын бастиекпен/сұйылтқышпен сәулеленетін жылудың жиналуын болдырмауына қарай ауаны өткізеді. Мұндай тәсіл Ultem сияқты баяу балқитын полимерлер үшін қажет. Дербес масштабтағы және бастапқы ашық коды бар шағын жүйелер температураны азайту және деформациясы үшін жылытылатын құрама пластинаны пайдаланады. Бұл тәсіл экономикалық тиімді болып табылады, бірақ шамадан тыс температура пайдалануға болатын қорытпаның құрылымы мен температурасын шектейді.

3 Технологиялық модельдеу

Жалпы алғанда АМ және экструзиялық процестердің одан әрі өсуін тежейтін негізгі факторлардың бірі қайта өңдеу туралы ғылымды шектеулі түсіну болып табылады (Bourell et al., 2009). Балқыту және экструзия процесінің динамикасын және материалдың дәйекті қабаттары арасындағы байланыс процесін сипаттайтын технологиялық модельдер АМ жүйелерін басқарудың жетілдірілген стратегияларын жасауда маңызды болып табылады. Технологиялық параметрлер мен түпкілікті бөліктің қасиеттері арасындағы байланысты түсіну өндіріске арналған бөлшектерді жобалауға мүмкіндік береді, бөлшектерді өнеркәсіптік пайдалану үшін біліктілік әдістерін жасауда және материалдардың ақылды стратегияларын жасауда маңызды болады. MEM немесе онымен байланысты процестің негізгі элементтеріне қысқыш роликті беру механизмі, сұйылтқыштың динамикасы, көрші материалдардың жолдарын бір-бірімен байланыстыруы және бөліктің ішіндегі жылу градиенттеріне байланысты пішіннің өзгеруі жатады. Типтік процестің осы аспектілерінің әрқайсысын модельдеудегі қазіргі жағдай осы бөлімде қарастырылады.

3.1 Роликті беру механизмі

MEM тәрізді процестерде материалдарды балқыту дәрежесіне дейін жеткізу үшін қысқыш роликті механизм қолданылады. Филаментің бастапқы қалпынан соплаға дейін созылуы осы роликтерден кернеуіне байланысты (Bellini et al., 2004). Роликтердің көмегімен филамент сығымдалады, және балқытқышқа дейінгі аралықта және басып шығару шүмегінде қысылуы мүмкін (Беллини және басқалар, 2004). Талап етілген филаментің ені (W) және филаментің қалыңдығы (H), және филаментің сызықтық жылдамдығы (v) ретінде аппроксимациялануы мүмкін (Agarwala et al., 1996; Bellini et al., 2004 ж.):

$$v = \frac{Q}{WH} \quad (1)$$

Беріліс жылдамдығы филаментпен роликтер арасындағы тамаша адгезияны болжай отырып, қысу ролигінің параметрлерімен байланысты болуы мүмкін, яғни сырғанаудың болмауы.

$$v = \omega_r R_r \quad (2)$$

Бұл жағдайда беру жылдамдығы келесідей: ω_r -бұрыштық жылдамдық және R_r -радиусы (Bellini et al., 2004; Agarwala et al., 1996). Сондай-ақ Навье (Navier) -сырғанаудың жалпыланған шекаралық шарты қолданылды. Филамент

пен роликтер арасындағы сырғу роликтің беткі қабаты мен филаментің бетінің арасындағы сәйкессіздік, роликтердегі ойықтың тереңдігі жеткіліксіз тереңдігі, тозған роликтер немесе жоғары қысымның төмендеуі, филаментің озіндік қасиеттерін жоғалтуы, яғни кеуіп қатып қалулығы кіреді. (Agarwala соавт., 1996). Мұндай сырғанау сұйылтқыш шүмегінен алынған материалдың жетіспеушілігіне және іргелес жолдар арасындағы ілінісу деңгейінің төмендеуіне әкеледі (Agarwala et al., 1996). Бұл сырғудың есепке алу, ағынның кенеттен өзгеруі кезінде роликті қозғалтқышты дәл басқару үшін өте маңызды деп тапты (Беллини және басқалар, 2004).

$$F = \Delta P A \quad (3)$$

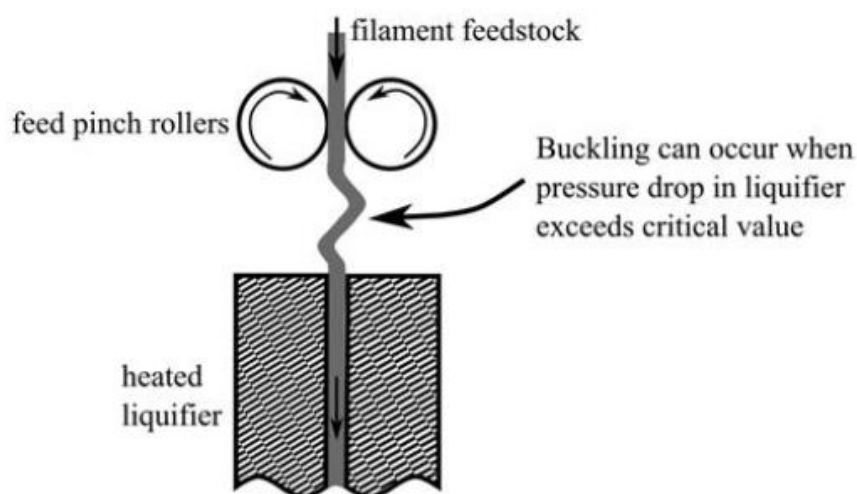
Балқыманы сұйылтқыш арқылы итеру үшін қажетті күш, егер сұйылтқыш арқылы қысымның төмендеуі (ΔP) белгілі болса, онда A - жіптің көлденең қимасы, оның көлденең қимасының ауданына тең деп қабылданған жағдайда анықталады. сұйылтқыш (Беллини және басқалар, 2004).

$$\Gamma = \frac{F}{2} R, \quad (4)$$

Бұл өз кезегінде қажетті моментті (Γ) және қуатты есептеуге мүмкіндік береді (Беллини және басқалар, 2004):

$$P_{mot} = \omega, \Gamma \quad (5)$$

Екі мотор 5-ші теңдеуде роликтің механизміне қуат береді деп болжанады, беру роликтерді сұйылтқыш жағынан қысу беру жылдамдығын шектейді. Бұл қысу сыни шегіне жеткенде, 3-суретте көрсетілгендей, бастапқы филамант суретте көрсетілгендей бүгілуі мүмкін (Венкатараман соавт., 1999, 2000a, b).



3-сурет - Артық қысу салдарынан берілетін қысу роликтері мен сұйылтқышқа кіру арасындағы филаментердің майысуы

Бұл керамикалық толтырғыштармен экструзиялық АМ процестерінде филаменттердің жиі кездесетін бұзылу режимі болып табылады (Venkataraman et al., 2000b).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E d_f^2}{16 L_f^2} \quad (6)$$

Филаментке салынатын қысымның жуықтауын (P_{cr}) Эйлер әдісімен талдаудан алуға болады, мұндағы E - талшықтың серпімді модулі, d_f - талшықтың диаметрі, L_f - роликтен бастап филаменттің ұзындығы ликватордың кіруі (Ярдимчи және басқалар, 1997; Венкатараман және басқалар, 2000б). Балқыту аймағына енетін филаменттің диаметрі мен басу саңылауының арасындағы айырмашылыққа байланысты 6 теңдеуіне түзету коэффициенті ұсынылды, бұл 1,1x тартуға сыни қысымның пайда болуына мүмкіндік береді (Venkataraman соавт., 1999). Беріліс жылдамдығын шектеуден басқа, иілу MEM (Yardimci et al) процесінде пайдаланылуы мүмкін бастапқы шикізат қасиеттеріне шектеу қояды. 2000b).

Эйлердің тартылу талдауы бойынша болжалған критикалық қысымды капиллярлық реометрдегі қысымның төмендеуімен байланыстыра отырып, Венкатараман және т. б. қатты шикізаттың серпімділігі Модулінің оның балқымасының көрінетін тұтқырлығына қатынасының мәнінен жоғары болмағанын бағалауға және эксперименталды растай алды, E/η , of 3×10^5 to $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ (Venkataraman et al., 2000b). Болашақта осы талдаудың кеңеюі балқытылған экструзиялық АМ процестеріне арналған құрама шикізат материалдарының дамуына көмектеседі.

3.2 Сұйытқыштың динамикасы

Қатты полимерлі шикізат ерітіліп, кішкене басып шығару шүмегі арқылы итерілетін сұйытқыш пен басып шығару механизмі экструзияға негізделген АМ процестерін анықтайтын элементтер болып табылады. Сұйытқыштың динамикасы өте күрделі және модельдеуге қиын, өйткені балқу қасиеттері температура мен ығысу жылдамдығының сызықтық емес функциясы болып табылады. Сұйытқышқа берілетін және ақырында басып шығарылатын мөлшер саптама арқылы қысымның төмендеуімен шектеледі. Беру жылдамдығы динамикалық түрде басқарылады, өйткені басып шығару механизмі жүйенің капотасында қозғалатын жылдамдық өзгереді. Сұйытқышта болатын балқыма мөлшері, балқыманың температурасы, демек, балқыманың

тұтқырлығы мен беттік энергиясы қоректену жылдамдығына байланысты өзгереді. Бұл айнымалылар материалдың сұйылтқыш арқылы өтетін жылдамдығын және сәйкесінше басылған бисердің мөлшерін басқарады (яғни, басылған бөліктің ажыратымдылығы). Бұл балқу динамикасы коммерциялық жүйелерді басқару алгоритмдерінде маңызды болып табылады. Сонымен қатар, балқыманың осы динамикасын түсіну шикізаттың коммерциялық мақсатта пайдалануға жарамды болуына қажетті материалдық қасиеттерге шек қоюға көмектеседі. Кейінірек талқыланатын болғандай, балқыманың температурасы, тұтқырлығы және беттік энергиясы баспа полимерлі моншақтың көрші бисермен байланысына әсер етеді.

3.2.1 Балқыманың қасиеттері

Сұйылтқыштағы балқыманың тұтқыр мінез-құлқы сұйылтқыштың және экструзиялық саптаманың мінез-құлқын сипаттауда өте маңызды. Экструзиялық АМ процестеріне арналған шикізат қорғанысы әдетте жылжу болып табылады және көбінесе күш заңына сәйкес тұтқырлық моделіне сәйкес келеді деп саналады (Беллини және басқалар, 2004; Мостафа және басқалар, 2009; Раманат және басқалар, 2008; Ярдимчи және басқалар, 1997) ,

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (7)$$

мұндағы η - тұтқырлық, $\dot{\gamma}$ - ығысу жылдамдығы, ал K және n - қуат заңына сәйкес келетін параметрлер. Тұтқырлықтың температураға тәуелділігі де ескерілуі керек, өйткені материал сұйылтқыш камерада ағып жатқандықтан, теріс емес болады. Бұл тұтқырлықты температура мен ығысу жылдамдығына тәуелді шарттар көбейтіндісіне бөлу арқылы жасалды (Беллини соавт., 2004):

$$\eta = H(T)\eta_{T_0}(\dot{\gamma}) \quad (8)$$

Жылжу жылдамдығына тәуелді термин дегеніміз - белгілі бір температуралық температурада бағаланатын сәйкес параметрлермен қуат заңының өрнегі, температураға тәуелді мерзім үшін Аррениус моделі қолданылған.

$$H(T) = \exp\left[\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (9)$$

Бастапқы температурада $H(T)$ 1 тең екенін ескеріңіз. Материал сұйылтқышқа кіре берісте қатты екенін ескеру үшін тығынның ағыны сұйылтқышқа кіре берісте көзделеді. Бүгінгі таңда МЕМ сұйылтқыштарының жарияланған зерттеулерінде тек күш заңдары бойынша тұтқырлық модельдері

қолданылды. Қуат заңының негізгі артықшылығы оның математикалық қарапайымдылығы. Балқыманың кейбір негізгі аспектілері осы үлгіні ұстамайды деп күтуге болады. Мысалы, көптеген полимер балқымаларына тән қуат заңы моделіне кірістіліктің кернеуі кірмейді. Қорытпаның кейбір негізгі аспектілері осы модельмен қамтылмайтынын негізді күтуге болады. Мысалы, дала моделінде тұрақсыздық шегі жоқ, бұл полимерлердің көптеген балқымаларына тән. Сұйылтқыштың кіреберісінде салыстырмалы түрде төмен ығысу күтіледі, ал балқыма басып шығару шүмегінен өтетіндіктен өте жоғары ығысу болады.

Саңылаулардағы ығысу жылдамдығы әдетте $100-200 \text{ s}^{-1}$ аралығында болады (Venkataraman соавт., 2000b).

Каррау типті модельдер көбінесе математикалық күрделілікке қарамастан, полимер балқымаларындағы кірістіліктің және ығысу жылдамдығының кең диапазондарын есепке алу үшін қолданылады (Освальд және Менгес, 2003). Сұйылтқышта жылу беруді модельдеу балқу қасиеттерінің температура мен ығысу тәуелділігімен қиындатады.

Балқыманың (c_p) жылу сыйымдылығы кейбір модельдерде тұрақты болады деп болжалды (Беллини соавт., 2004; Беллини, 2002). Алайда, c_p әйнектің ауысу температурасында (T_g) аморфты полимерлер үшін айтарлықтай өзгертінді белгілі. Кейінірек талқыланатындай, T_g температурасынан жоғары температура материалдардың біртіндеп сақталған қабаттары арасында жақсы байланыс орнату үшін қажет.

Жартылай кристалды полимерлер МЕМ тәрізді процестерде жиі қолданылмаса да, олар әдетте балқу кезіндегі жылу сыйымдылығының үлкен өзгерісін, сонымен қатар материал үшін балқу / термоядролық жылуды есепке алу қажеттілігін тудырады.

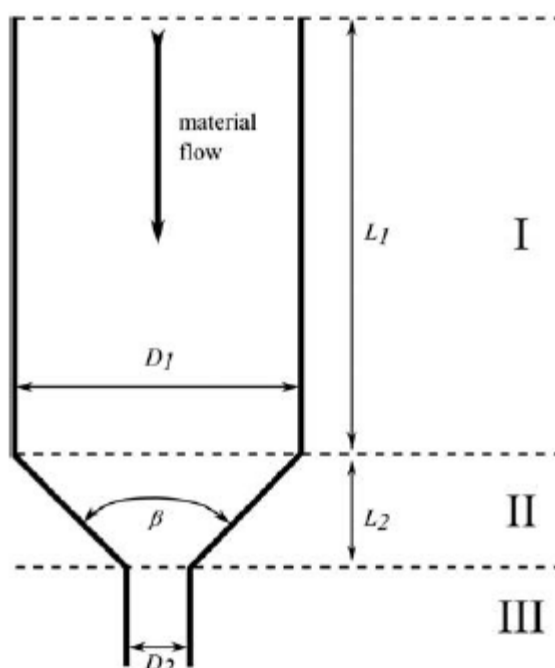
3.2.2 Сұйылтқыш / саптама геометриясы

Тұтқыр мінез-құлықтан басқа, сұйылтқыштың геометриясы сұйылтқышта балқыманың сипаттамасына барынша әсер етеді. Қазіргі заманғы жүйелердің көпшілігі 1- суретте көрсетілгендей, ұсақ баспа шүмегінің тесігімен қиыстырылған конустық қосылыстары бар тік цилиндрлік түтікті пайдаланады. Ескі жүйелер көлденең цилиндрлік түтікті 1-суретте көрсетілгендей сұйылтылған геометрияға қосылмас бұрын 90° иілген (Раманат соавт., 2008; Мостафа соавт., 2009). Модельдеуді жеңілдету үшін ликерлеуші әдетте 3-суретте көрсетілгендей бөлімдерге бөлінеді.

Негізгі конструктивтік айнымалылар сұйылтқыштың ұзындығын (L_1), сұйылтқыштың диаметрін/қыздыру жіптерін (D_1), сопла бұрышы (β), сопла диаметрін (D_2) және сопла ұзындығын (L_2) қамтиды. Соплақ диаметрлері 200-500 мм диапазонында, ал соплақ бұрыштары әдетте 120° құрайды (Yardimci et al., 1997).

Кез келген жағдайда цилиндрлік кіріс диаметрі Әдетте қоректендіретін жіптің диаметріне тең қабылданады. Саңылаудың диаметрі бірнеше көп болуы керек, ол қыздыру жіптерін салуды жеңілдетеді және қыздыру жіптерінің диаметріне ақылға қонымды рұқсатты қамтамасыз етеді.

Сұйылтқыш пен қабырға арасындағы кез-келген алшақтық сұйылтқыш қабырғаларынан жіпке жылу өткізуге жоғары жылу кедергісін тудырады деп күтуге болады. Бүгінгі күні бұл МЕМ немесе оған қатысты процестердің жарияланған үлгілерінде ескерілмеген. Бұл әсер 4-суреттегі I аймақтың үстіңгі жағында анағұрлым маңызды болады және материал басып шығару саптамасына жақындаған кезде азаяды және жіптің қатты бөлігі қамтамасыз ететін сығымдау ерітіндісін сұйылтқыштың қабырғаларына итереді.



4-сурет- Модельдеу үшін сұйылтқыш үш аймаққа бөлінген

3.2.3 Сұйылтқышқа кіретін және шүмектен шығатын конвекция

Ақырғы элементтерді талдау (FEA) сұйылтқыштың ішіндегі температура градиенттерін зерттеу үшін қолданылды (Ярдимчи және басқалар, 1997).

Бұл талдау сұйылтқыштың кіреберісіндегі және саптаманың шығысындағы жылу ортасына жылу конвекциясын қарастырды, кіре берісте конвективті жылу беру коэффициентін (h) кіре берісте $10 \text{ Вт} / \text{м}^2\text{К}$, ал саптаманың шығысында $100 \text{ Вт} / \text{м}^2\text{К}$ құрайды (Ярдимчи соавт.), 1997). Бұл h мәндері ешқандай эксперименталды немесе теориялық талдаумен негізделмеген және сұйылтқыштың жылу шығыны таңдалған мәндерге өте сезімтал емес. Жылу шығынының алдын алу үшін нақты жүйелерде әдетте екі жерде де оқшаулағыш пластина қолданылады, бұл FEA және таңдалған h (Yardimci et al) мәндеріне негізделген толық ақталған тәжірибе болып табылады., 1997).

3.2.4 Қысым ауытқуын бағалау

Сұйылтқыштың импульстерінің балансынан шыға отырып, Балқыма жылдамдығының профилін, қысымның ауытқуын және жылжу кернеуінің профилін болжауға болады.

Энергетикалық тепе-теңдікті бір мезгілде шешкен кезде сұйытылған сұйықтықтың ішіндегі балқыманың температуралық профилін анықтауға болады (Беллини және басқалар, 2004; Беллини, 2002) және басқалары, олардың жұмысына негізделіп (Ramanath et al., 2008) аналитикалық шешімдер қолданды I, II және III аймақтарға сәйкес келетін цилиндрлік, конустық және цилиндрлік фигуралар үшін экструзияға арналып (Michaeli, 2003) жасалған импульстік тепе-теңдік теңдеулері, 3-суретте Аррениус температурасына тәуелділігі күш-қуаттың тұтқырлық моделімен бірге (cf) сұйықтықты модельдеу үшін 7 және 8 теңдеулерін қолдандық.

Бұл модельдегі негізгі болжамдарға балқыманың сығылмайтындығы, сұйықтықтың қабырғаларында сырғып кетпейтін шекаралық жағдай және ағынның толық дамыған, тұрақты күйі және ламинары кіреді (Michaeli, 2003). Осы модельге сәйкес сұйылтқыштың әр бөліміндегі қысымның төмендеуі сәйкесінше беріледі:

$$\Delta P_1 = 2L_1 \left(\frac{v}{\phi} \right)^{1/m} \left(\frac{m+3}{(D_1/2)^{m+1}} \right)^{1/m} \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \right] \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = & \left(\frac{2m}{3 \tan(\beta/2)} \right) \left(\frac{1}{D_2^{3/m}} - \frac{1}{D_1^{3/m}} \right) \\ & \times \left(\left(\frac{D_1}{2} \right)^2 (m+3) 2^{m+3} \right)^{1/m} \\ & \times \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

Және

$$\Delta P_3 = 2L_3 \left(\frac{v}{\phi} \right)^{1/m} \left(\frac{(m+3)(D_1/2)^2}{(D_2/2)^{m+3}} \right)^{1/m} \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \right] \quad (15)$$

мұндағы L_1 , L_3 , D_1 және D_2 өлшемдері 3-суретке сәйкес келеді, сұйылтқыштың конустық бөліміндегі саңылаулар бұрышы, ал m және ϕ - қуат заңына сәйкес параметрлері (Ramanath et al., 2008; Bellini et al., 2004; Беллини, 2002; Михаэли, 2003). Сұйылтқыштағы қысымның жалпы төмендеуі әр бөлімдегі қысымның төмендеуінің қосындысы

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \quad (16)$$

3.2.5 Саңылаулар бұрышының әсері

Саңылаулар бұрышы, әдетте көптеген жүйелерде 120° (Ярдимчи соавт., 1997) қысымның түсуіне және ағынның сипаттамаларына әсер етеді. Рамант және басқалар. Саңылау бұрышының қысымның төмендеуіне 60° -қа дейінгі бұрыштарға әсерін зерттеді, бұл қысымның төмендеуі саңылаулар бұрышы жоғарылаған сайын төмендейді (Ramanath et al., 2008; Bellini et al., 2004); алайда, 120° - бұл әдеттегі саптама бұрышы (Ярдимчи соавт., 1997).

Жүйе үшін табиғи конвергенция бұрышынан жоғары ағынның тұрақсыздық әсерінен қысымның төмендеуі артуы мүмкін (Лян, 1995; Лян және басқ., 2001; Лян және Несс, 1997). Толтырылған шикізатты пайдалану кезінде саптаманың бітелуіне әкеледі (Ярдимчи соавт, 1997).

Жинақтылықтың табиғи бұрышы сопла бұрышының конструкциясы үшін жоғарғы шекара ретінде ұсынылды (Yardimci et al., 1997). 6, 13-16 теңдеу үшін критикалық қысым сопла бұрышының конструкциясына төменгі шектерді қояды.

3.2.6 Соңғы элементтерді талдау

Ерітінді сұйықтығының динамикасы мен сұйытылған жылу берілісінің динамикасын неғұрлым қатаң талдауларға FEA арқылы қол жеткізілді (Раманат соавт., 2008; Мостафа соавт., 2009; Джи мен Чжоу, 2010; Беллини және басқалар, 2004). FEA талдауынан қысым ауытқуының болжамдары 13-16 теңдеулерінде сипатталған талдау моделімен сапалы түрде сәйкес келеді, ол шүмек диаметрінің азаюына немесе беру жылдамдығының ұлғаюына қарай қысым ауытқуының ұлғаюын көрсетеді (Ramanath et al., 2008; Беллини, 2002; Беллини және т. б., 2004). Сандық жағынан, FEA модельдері 13-16 теңдеулерінде жинақталған аналитикалық модельге қарағанда қысымның айтарлықтай төмендеуін болжайды ($\sim 5 \times 10^5 \text{Pa}$) (Ramanath et al., 2008). Бұл айырмашылық, ең алдымен, аналитикалық үлгіні оны математикалық тұрғыдан қозғалмалы ете алу үшін неғұрлым қатаң болжамдар жасаумен байланысты болуы мүмкін (Michaeli, 2003). FEA талдауы сұйылтқыштағы қысымның басым көпшілігі (шамамен 85%) саптаманың төңірегінде (Venkataraman et al., 2000a; Bellini, 2002) және саптаманың диаметріне қатты тәуелді болатындығын көрсетеді. In a study of poly- ϵ -caprolactone, increasing nozzle size from 0.25 to 0.4 mm reduced the calculated pressure drop from $\sim 2,5 \times 10^6$ to $\sim 1 \times 10^6 \text{Pa}$. Поли- ϵ -капролактонды зерттеген кезде сопл өлшемінің 0,25-тен 0,4 мм-ге дейін ұлғаюы $\sim 2,5 \times 10^6$, $\sim 1 \times 10^6 \text{Pa}$ қысымның есептік ауытқуын азайтады. FEA модельдері сұйылтқыштың кіреберісіндегі және саптаманың шығуындағы температураның тез өзгеретінін болжайды, ал филаменттің аз мөлшері балқымадағы температураның біркелкі болуына қабырға мен көбінесе $<1 \text{ K}$ ортасынан ауытқумен тез қол жеткізуге мүмкіндік береді. Сол сияқты параболалық жылдамдық профилі балқытылған фронт құрылғаннан кейін тез дамиды болады. Ламинарлы ағынның жүру сызықтары да, бірақ саптаманың бұрышы табиғи деңгейден асып кететіндіктен ағынның тұрақсыздығы мен құйындылығы туралы ешқандай дәлелдер жоқ.

3.2.7 Ісіну және салқындату

Полимердің балқымасының сопласында кернеу астында, деформация энергиясының бір бөлігі қатты (Michaeli, 2003) сақталады. Полимердің балқымасы баспа шүмегінен шыққан кезде, енді полимердің балқымасының бос шекарасы полимерлік шарикті тез тығын ағынының жылдамдығының профилін қабылдауға мүмкіндік береді, яғни тұрақты жылдамдық бағытта (Bellini, 2002).

Полимердің балқымасы бұдан былай сұйылтқыш қабырғаларымен шектелмеген кезде, сопладағы балқытуға әсер ететін кернеу әлсірейді және қатты жинақталған энергия босатылады, бұл 5 суретте көрсетілгендей матрицаның ісінуі деп аталатын балқытпаның кеңеюіне әкеледі. (Michaeli, 2003).

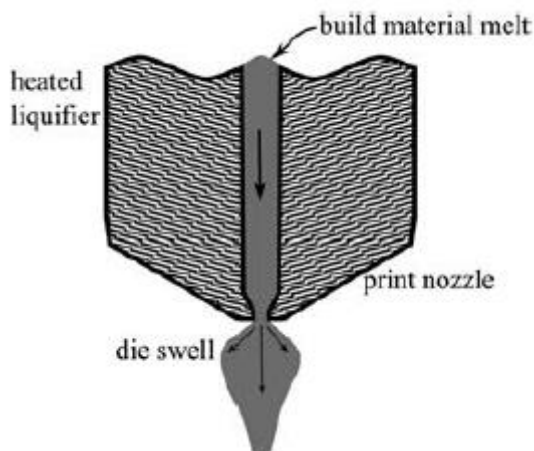
Бұл құбылыс полимерлік материалдарды зерттеудің белсенді саласы болып табылады және экструзияға негізделген АМ процесінде қол жеткізілген шешімді анықтауда рөл атқарады. Ісінудің сандық өлшемі - бұл экструдалған материалдың максималды диаметрінің ісіну коэффициенті деп аталатын саңылаудың диаметріне қатынасы.

Ісіну коэффициентінің шамасы материалдың қасиеттеріне және экструзиялық шүмектің геометриясына байланысты. MEM әдісі үшін хабарланған мәндер ~ 1.05 -ден 1.3 -ке дейін өзгереді. Керамикалық бөлшектер (Bellini, 2002) немесе көміртекті талшықтар (Shofner et al., 2003), әдетте, ісінуін азайтады.

FEA модельдері MEM тәрізді процестерде (Беллини, 2002) және басқа экструзионды процестерде өлімнің ісінуін болжау үшін пайдаланылды. Ерітінді экструзиялық саптамадан шыққан кезде, ауаны конвективті ортада қозғалудан конвективті салқындатуға да ұшырайды. Беллини жылу беру коэффициентін, $h = 20 \text{ Вт / м}^2\text{К}$ ала отырып, бұл конвективті салқындатуды модельдеді (Беллини, 2002). Конвективті салқындату процесі экструдалған бисермен жалғасқан сұйылтқышта балқымадан жылу өткізбеу арқылы тежеледі (Беллини, 2002). Біршама қарсы болсақ, балқыманың жылу өткізгіштігі неғұрлым көп болса, моншақ экструзиялық саптамадан шыққан кезде баяу салқындатылады (Беллини, 2002).

3.3 Қабатарды басу, шөгу және байланыстыру

3.3.1 Моншақтардың тұнбасы және тұрақтылығы



5-сурет- AM экструзиясы процесінде материалдың ісінуі

Сұйылтқыштың саптамасын балқытылған экструзиялық AM процесінде қалдырғаннан кейін, полимер материалдарымен жұмыс төсеншесіне немесе бұрын басылған полимер қабатына түседі. Егер 3-суреттегі басып шығару шүмегі арқылы өтетін ағын қарапайым Hagen-Poiseuille ағыны ретінде модельденсе, көлемдік ағынның жылдамдығы Q болып табылады (Крокетт және Калверт, 1996):

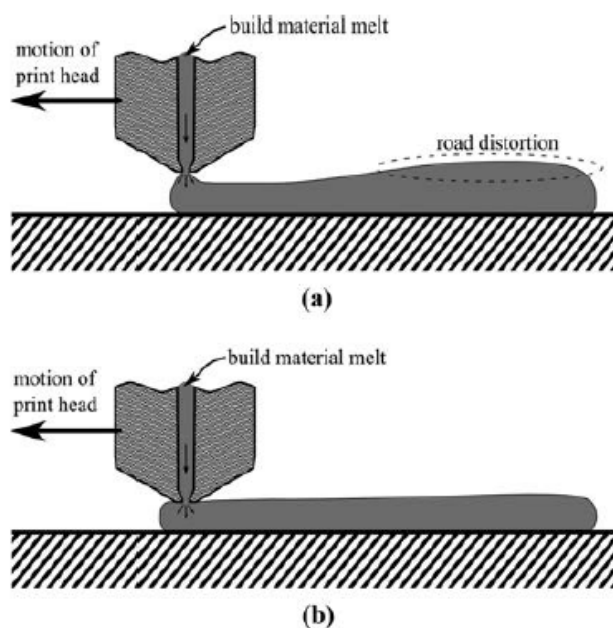
$$Q = \frac{\pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^4 \Delta P}{8\eta L_2} \quad (17)$$

Бастиектің көлденең қимасы (A) басып шығару механизмінің жылдамдығына (v_{print}) кері пропорционал болады.

$$A = \frac{Q}{v_{print}} \quad (18)$$

3.3.2 Қабатты салқындату және полимермен байланыстыру

Балқытылған экструзиялық AM бөлшектерінің беріктігі көрші материал қырлары арасындағы байланыс беріктігімен шектеледі. Қосылыстың бұл беріктігі шарлар арасындағы байланыс алаңына ішінара тәуелді болатын ілінісу энергиясына байланысты болады.



- (a) Басып шығарылған жол сақталған жолдан жоғары болған кезде жол нысаны бұрмаланады. (b) басып шығару механизмі жолмен байланыста, үстіңгі қабаттың тегіс болуын қамтамасыз етеді

6- сурет- Басып шығару механизмінің экструдалған жолмен әрекеттесуі

Полимерлік материалдар үшін жол ілініс тоқу процесі арқылы өтеді, ол тұтқыр ағын механизмі арқылы өтеді (Rosenzweig and Narkis, 1981). Бұл түрлендіру процесі термиялық басқарылатын болғандықтан, басқа жолмен қиылысқан жолдың температуралық тарихы байланыс сапасын анықтауда шешуші айнымалы болады. Жентектеу процесінің міндетті шарты полимердің әйнектеу температурасынан жоғары болуы тиіс, яғни сұйылтудан шыққан кезде балқымалар осы температурадан едәуір жоғары болуы тиіс; алайда құрастыру ортасы TG-дан едәуір төмен ұсталады. Сұйылтқыштан шығатын материалдан жасалған жылу, ол TG-дан жоғары тұндыратын жолдың температурасын арттырады. Демек, материалдардың жылуөткізгіштігі мен жылу сыйымдылығы технологиялық процесті пайдаланудың өміршең шарттарын анықтауда маңызды рөл атқарады. Жылу жолдардан төмен материалға өткізгіштігі және құрылыс ортасындағы қоршаған ауаға конвекция арқылы жоғалады. Жолдың жылу тарихын болжау үшін бірнеше модель әзірленді. H қыздыру жібінің биіктігі мен W ені үшін жолдың ені бойынша орташаланған қыздыру жібінің температурасы үшін алынған теңдеу түрі бар.

Модельдердің эксперименттік тексерісі термопараны материалды жолға салу және температураны бақылау арқылы жүзеге асырылды, өйткені оның

үстіне қабаттар орналастырылды (Беллини, 2002; Bellehumeur et al., 2004; Sun et al., 2008) .

Температура жоғары болған қысқа уақыттарда бөлшектелген сыйымдылық моделі экспериментпен жақсырақ үйлесті, ал 2D моделі неғұрлым ұзақ және төмен температурада дәлірек болатындығын дәлелдеді. Коммерциялық CFD бағдарламалық жасақтамасымен жасалған болжамдармен эксперименттік салыстыру жарияланған жоқ, дегенмен керамика процесінің теріс тұндыруына арналған мұндай модель өте қысқа уақытта (0,03 секунд) қоспағанда өте дәл көрсетілген (Беллини, 2002).

Сапалы жүргізілген эксперименттер қабат температурасы тез арада көтерілетіндігін көрсетті, одан кейін тез ыдырау арқылы балқыманың қабаты басылады, 2 секунд уақыт ауқымында, әйнектеу температурасынан бірнеше градусқа дейін төмендейді. Төменгі қабаттағы температура тіпті 30 қабат қабатталғаннан кейін тепе-теңдік құру ортасының температурасына орнықталмады.

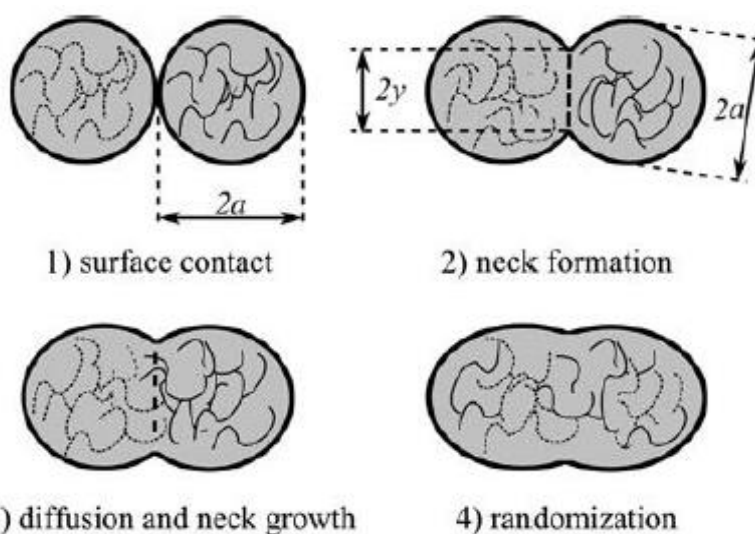
Сынақ құрылымының кішкентай мөлшерін ескере отырып, басып шығару механизмі арқылы радиациялық қыздыру жергілікті қоршаған ортаның температурасын жиналған ортаның негізгі температурасынан жоғары етіп, әрі қарай салқындауға жол бермейді. Кезекті тұндыру материалдың температурасын T_g -ден, тіпті бірнеше қабаттардан жоғары көтере алатындықтан, дәйекті тұндыру арасындағы уақыт материалдың жылу тарихын анықтауда да маңызды. Бұл екі бөліктің бағдарлары бойынша әр түрлі ұзындықтарымен көрсетілді (Sun және басқалар, 2008).

Бұл бақылаулардың салдары осы бөлшектің механикалық қасиеттерінің құралдың қозғалыс траекториясына және бөлшектің бағдарына тәуелділігі бір қарағанда әлдеқайда күрделі болып табылады. Берілген нүктеден жоғары қабат қабатының арасындағы уақыттың қысқаруы байланыстың беріктігін арттыруы керек, өйткені байланыс орнындағы температура ұзақ уақытқа жоғары болады. «Бір деңгейлі домендік ыдырау» әдісімен жасалған үлгілер бір бағытты растрлық үлгілермен салыстырғанда жолдың орташа ұзындығын қысқартқан сияқты (Bellini and Gucerì, 2003). Қабаттың жылу тарихы конвективті салқындауға қоршаған орта арқылы ағатын ауа арқылы тәуелді болды (Sun және басқалар, 2008).

Жылу беру коэффициентінің мәні жинау ортасындағы орналасқан жеріне және ауа шығынына, сондай-ақ құрастыру ортасындағы бөлшектердің мөлшеріне, нысанына, санына және таралуына байланысты өзгереді деп күтілуде (Sun et al., 2008).

МЕМ процесінде конвективті жылу беруді эксперименталды растау күрделі мәселе болып табылады, өйткені ауа шығыны мен құрастырудың қоршаған ортасының температурасы әдеттегі коммерциялық жүйелерде жеңіл бақылауға берілмейді. Конвективті жылу тасымалын қатаң есептеу әдісі мәселенің есептеу қарқындылығына байланысты шектеулі болуы мүмкін; алайда, процестің кейбір шектік жақтарын белгілеу процесті және өнімді жобалау ережелерін әзірлеуде үлкен пайда әкеледі. Процесс параметрлерінің соңғы бөлігінің беріктігіне әсерін көптеген эмпирикалық зерттеулер жүргізілгенімен, байланыстың қалыптасу процесі мен осы байланыстың түпкілікті механикалық беріктігі арасындағы іргелі байланысы туралы аз жарияланды.

Көрші кабаттар арасындағы ілінісу процесін бағалау кезінде қолданылған маңызды көрсеткіштердің бірі мойынның қалыптасуы болып табылады. Бұл процесс тұтқыр ағыс және полимерлі тізбектердің молекулалық диффузиясы арқылы шариктердің екі бөлшектерінің арасындағы бөлім шекарасы арқылы, А радиус жіптері мен $2y$ мойын ұзындығы үшін 7 суретте көрсетілгендей болады.



1) а радиусы жолдарының арасындағы алғашқы байланыс. 2) мойынның қалыптасуы. 3) полимерлі тізбектердің интерфузиясы және мойын өсуі және 4) көршілес жолдар арасында полимер тізбектерін рандомизациялау. Мойдың ұзындығы, $2y$, байланыс сапасын өлшейді

7-сурет-полимерлерді жентектеу процесінің иллюстрациясы

Бұл құбылысты АМ жүйелерінде зерттеу туралы хабарланбаса да, сопла жинақтылық бұрышы әсер етеді деп ойлауға болады. Борттың жыпылықтауы және жолдың жолға ілінуі ам экструзиялық процестерінің көмегімен жасалған бөлшектердің үстіңгі және механикалық қасиеттерін анықтайды. Баспа

жолының соңғы нысаны оның үстіртін керілуіне, тұтқырлығына, салқындату жылдамдығына және басу бастарымен өзара әрекеттесуіне байланысты. Шарларды жаюдың аналитикалық модельдері беті бойынша жекелеген тамшыларды жаю туралы әдебиеттің үлкен көлемінен жаю жағдайында болуы тиіс. Мұндай модельдің бірі туралы хабарланған (Crockett, 1997; Crockett and Calvert, 1996); алайда, тұтқырлықтың қандай да бір өзгеруін ескерместен, уақыт өте келе оның сандық мәнін шектейді.

ҚОРЫТЫНДЫ

MEM және ұқсас процестер дайын бөлшектерді өндіруде өсіп келе жатқан қолданумен жылдам прототиплеудің ең кең қолданылатын процестерінің бірі болып табылады. Типтік процестердің негізгі элементтері, оның ішінде материалды беру механизмі, баспаға арналған сұйылтқыш және шүмектер, құрастыру беті және қоршаған орта, сондай-ақ бөлшектерді өңдеу тәсілдері сипатталған. Қозғалтқыштың айналмалы сәтін және қыздыру филаментін берудің қажетті жылдамдығына жету үшін қажетті қуатты бағалау тәсілдері ұсынылған. Талап етілетін жылу ағынының моделі, балқымадағы жылжу және сұйылтқыштың қысымының өзгеруі қарастырылған. Басып шығару шүмегінен шыққан кезде матрицаның ісінуі және борттың салқындатылуы ескеріледі. Сонымен қатар, балқытылған қабат материалының таралуын және бір-бірімен полимерлік жолдардың ілінуін моделдеу тәсілдері қарастырылды. Жалпы технологиялық процестер модельдерінің эксперименттік валидациясы шектеулі дәрежеде жүргізілді. Мысалы, қарапайым модельдер жиі қолданылатын шнек роликті беру механизмі үшін талап етілетін мотордың моментін және қуатын, сонымен қатар экструзиялық саптаманы қалдырып, берілетін филаментаның диаметріндегі ағынның жылдамдығына әсер етуге мүмкіндік береді. (Беллини және басқалар, 2004; Agarwala соавт., 1996). Бұл модельдер жүйенің дизайнындағы қозғалтқыштарды өлшеуге және процесті сапалы білуге мүмкіндік береді. Бұл модельдерде тістеу біліктері мен берік филаменттер арасындағы сырғанау белгілі дәрежеде ескерілген; дегенмен, ол жарияланған әдебиетте тәжірибелік түрде өлшенбеген. Сырғанау дәрежесі роликтің бетінің және бастапқы материалдың сипаттамаларына, сондай-ақ роликтермен көрсетілетін қысымға байланысты болуы тиіс. Ең аз шамаға сырғу жоқ ұсақтау жіптер арпалысын білдіреді қызықты проблеманы жүйесін жобалау. Тұйықталған контурмен басқару алгоритмінде бұл сырғуды есепке алу аса маңызды болып табылады. Осыған жақындау бойынша кейбір ұсыныстар аналитикалық модель тұрғысынан да, беру функцияларын (Bellini et al., 2004), бірақ бұл модельдердің дәлдігі эксперименталды бағаланбаған. Қысу роликтері мен сұйылтқыш арасында қоректендіретін жіптің майысуынан бас тарту бастапқы шикізаттың қолайлы қасиеттеріне және оны пайдалану жағдайына шектеу қояды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Bellini, A. and Guceri, S. (2003), “Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, pp. 252-264.
- 2 Crockett, R.S. (1997), “The liquid-to-solid transition in stereodeposition techniques”, PhD thesis, University of Arizona.
- 3 Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010), *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, New York, NY.
- 4 Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C. and Bowyer, A. (2011), “RepRap – the replicating rapid prototyper”, *Robotica*, Vol. 29, pp. 177-191
- 5 Venkataraman, N., Rangarajan, S., Harper, B., Matthewson, M.J., Safari, A. and Danforth, S.C. (2000a), “Processproperty- performance relationship for fused deposition of ceramics (FDC) feedstock materials”, in Danforth, S.C., DIMOS, D. and Prinz, F.B. (Eds), *Solid Freeform and Additive Fabrication*, San Francisco, CA, pp. 203-210.
- 6 Wang, T.M., Xi, J.T. and Jin, Y. (2007), “A model research for prototype warp deformation in the FDM process”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, pp. 1087-1096.
- 7 Yardimci, M.A., Hattori, T., Guceri, S.I. and Danforth, S.C. (1997), “Thermal analysis of fused deposition”, in Bourell, D.L., Beaman, J.J., Crawford, R.H., Marcus, H.L. and Barlow, J.W. (Eds), *Solid Freeform Fabrication Proceedings*, University of Texas at Austin, Austin, TX.
- 8 Mostafa, N., Syed, H.M., Igor, S. and Andrew, G. (2009), “A study of melt flow analysis of an ABS-iron composite in fused deposition modelling process”, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 14, pp. 29-37.