

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

Ордабек Нұрдәулет Нұрланұлы

«Өнімді жасау кезінде Single Pass Jetting 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: «Өнімді жасау кезінде Single Pass Jetting аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

5B071200 – Машина жасау

Орындаған

Ордабек Нұрдәулет Нұрланұлы

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 Ордабек Нұрдәулет Нұрланұлы

Тақырыбы «Өнімді жасау кезінде Single Pass Jetting аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

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

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

Дипломдық жобаның бастапқы берістері Single Pass Jetting технологиясының құрылымын зерттеу, және толық қанды ашып талдау

Дипломдық жобада қарастырылатын мәселелер тізімі

а) Бір өтпелі ағынды басып шығару параметрлері

б) Қабат қалыңдығы

в) Басып шығару қанықтылығы

г) Кептіру уақыты

с) Күйдіру және жентектеу әсерін

Ұсынылған негізгі әдебиет: 25 атау

Дипломдық жобаны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәліметтер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Кіріспе. Single Pass Jetting технологиясының құрылымы анықтау		
Қабат қалыңдығы зерттеу		
Жылытқыштың Қуат Коэффициенті қарастыру		
Күйдіру және жентектеу әсерін 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 _____ Ордабек Н. Н.

Күні «__» _____ 2020 ж.

АНДАТПА

Берілген дипломдық жобада Single Pass Jetting технологиясының құрылымы толық зерттелді қарастырылды. Сонымен қатар Single Pass Jetting технологиясының қазіргі жағдайына да шолу жасадық.

SPJ әдісіндегі үздіксіз байланыстырушы реактивтілік болат оксидінің пайда болуын және тығыздалуын тудырады. Single Pass Jetting (SPJ) бұл үздіксіз бір реттік реактивті технология 12 000 см³/сағ жылдамдықты қамтамасыз етеді, 32000 ағыннан тұратын екі толық өлшемді баспа өзекшелері ұнтақты таратқыштармен бірге ұнтақты таратып, жинау аймағында бір жылдам өту арқылы басып шығарады, секундына миллиондаған тамшылар шығарады, және лазерлік жүйелерге қарағанда 100 есе жылдам. Нәнді құралдар жиынтығымен бұл күрделі металл бөлшектерін жасаудың ең жылдам әдісі болып саналады. SPJ әдісіндегі алғашқы 3D принтерді жаппай өндіруге қабілетті, әрі бәсекеге қабілетті өндірістік бағамен қамтамасыз етті.

Зерттеу кезеңде бірінші кезеңде Single Pass Jetting технологиясының құрылымын толық қанды зерттеді. Сонымен қатар сол технологияның қазіргі жағдайын да қарастырдық. Бір өтпелі ағынды басып шығару параметрлерін де қарастырылды.

Қабаттың қалыңдығы AM әдістерінің бірнеше түрлері үшін маңызды технологиялық параметр болып табылады, өйткені ол конструктивтік элементтің ең аз ықтимал өлшемін және шектеулердің рұқсатын анықтайды. Қабаттың қалыңдығы қабатты басып шығарғаннан кейін жинау пластинасы түсірілетін арақашықтыққа тең. SPJ принтірлерінің мүмкіндігі, қабаттың қалыңдығының өзгеру диапазонын анықтайды. Ұнтақ мөлшері мен сипаттамасы қабаттың қажетті қалыңдығын ішінара анықтай алады

Арымбеков Бекен Сағатбековичтің жетекшілігімен қабат қалыңдығын, басып шығару қанықтылығын, жылытқыштың қуат коэффициентін, кептіру уақытын, және байланыстырғыштың ағынды өңдеуін қайта өңдеуін анықтадық. Сонымен қатар бұйымды күйдіру мен жентектеуінде толық қанды қарастырдық.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном проекте рассмотрена структура технологии Single Pass Jetting. Также мы провели обзор современного состояния технологии Single Pass Jetting.

Непрерывная связующая реактивность в методе SPJ вызывает образование и уплотнение оксида стали. Single Pass Jetting (SPJ) эта непрерывная одноразовая реактивная технология обеспечивает скорость 12 000 см³/ч, два полноразмерных печатных стержня, состоящего из 32000 потоков, распаковывают порошок вместе с порошковым передатчиком и печатают через один быстрый проход в зоне сбора, выпускают миллионы капель в секунду, и в 100 раз быстрее, чем лазерные системы. С набором нулевых инструментов это самый быстрый способ изготовления сложных металлических деталей. Первый 3D-принтер в методе SPJ обеспечил конкурентоспособную и конкурентоспособную производственную цену, способную производить массовое производство.

На первом этапе исследования полностью изучена структура технологии Single Pass Jetting. Также мы рассмотрели современное состояние этой технологии. Также были рассмотрены параметры печати одного переходного потока.

Толщина слоя является важным технологическим параметром для нескольких типов методов AM, так как он определяет минимально возможный размер конструктивного элемента и допуск к ограничениям. Толщина слоя равна расстоянию, на котором после печати слоя складывается пластина. Возможность принтеров SPJ определяет диапазон изменения толщины слоя. Размер и характеристика порошка могут частично определить необходимую толщину слоя

Под руководством Арымбекова Бекена Сагатбековича мы определили толщину слоя, насыщенность печати, коэффициент мощности подогревателя, время сушки и переработку поточной обработки связующего. Кроме того, мы предусмотрели полную кровь в обжиге и спекании изделия.

ANNOTATION

This thesis project examines the structure of Single Pass Jetting technology. We also reviewed the current state of Single Pass Jetting technology.

The continuous binding reactivity in the SPJ method causes the formation and compaction of steel oxide. Single Pass Jetting (SPJ) this continuous single-use jet technology provides a speed of 12,000 cm³/h, two full-size printing rods consisting of 32,000 threads decompress the powder together with the powder transmitter and print through one quick pass in the collection area, release millions of drops per second, and 100 times faster than laser systems. With a set of zero tools, this is the fastest way to make complex metal parts. The first 3D printer in the SPJ method provided a competitive and competitive production price, capable of mass production.

At the first stage of the study, the structure of the Single Pass Jetting technology was fully studied. We also reviewed the current state of this technology. The parameters of printing a single transition stream were also considered.

Layer thickness is an important technological parameter for several types of AM methods, since it determines the minimum possible size of the structural element and the tolerance to restrictions. The thickness of the layer is equal to the distance at which the plate is folded after printing the layer. The ability of SPJ printers determines the range of layer thickness changes. The size and characteristics of the powder can partially determine the required layer thickness

Under the guidance of Arymbekov Beken Sagatbekovich, we determined the layer thickness, print saturation, heater power factor, drying time and processing of the binder in-line processing. In addition, we have provided full blood in the firing and sintering of the product.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Single Pass Jetting технологиясының құрылымы	11
2 Single Pass Jetting технологиясының қазіргі жағдайы	15
3 Бір өтпелі ағынды басып шығару параметрлері	18
3.1 Қабат қалыңдығы	18
3.2 Басып шығару қанықтылығы	18
3.3 Жылытқыштың Қуат Коэффициенті	19
3.4 Кептіру уақыты	20
4 Байланыстырғыштың ағынды өңдеуін қайта өңдеу	21
4.1 Күйдіру	21
4.2 Жентектеу	21
Қорытынды	26
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	27

КІРІСПЕ

АМ технологиясы металдардан, керамикадан, полимерлерден, құмнан және әйнектен тұратын әр түрлі материалдардан бөлшектер жасалады [5,8–12,17–19]. Материалды экструзиялау әдісі полимерлі жіптерді пайдаланады, шикізат материалдары [5,20,21], ламинаттау әдісі парақтарды яғни листтерді пайдаланады, ал тікелей энергия тұндыру кезінде сымдар немесе ұнтақтар қолданылады. Binder Jetting әдісінде, Powder bed fusion (ұнтақты қабатта қорытылуы) және Electron beam melting)– электронды - сәулелі балқыту ұнтақты қабаттың негізіндегі әдістер болып табылады [5,22,23], және тез прототиптеу және күрделі ішкі сипаттамалары бар бөлшектерді дайындау үшін қолданылады [24,25].

Binder Jetting әдістемесіне Single Pass Jetting, Color Jet Printing, Voxeljet, 3D Printing, ZipDose технологиялар кіреді.

Бұл дипломдық жұмыстың негізгі мақсаты, Single Pass Jetting технологиясын, яғни бір өтпелі ағынды өңдеу технологиясын бұйым басу кезіндегі процестерін зерттеу болып табылады.

Desktop Metal Production жүйесі Single Pass Jetting (SPJ) деп аталатын 3D металл басып шығарудың жаңа тәсіліне негіздеп патент алды. Бұл технологияны ағынды процесті және бір реттік пассивті басып шығаруды ойлап тапты. Single Pass Jetting металл бөлшектерін бірнеше сағатта емес, бірнеше минутта металл бөлшектерін шығарады. Single Pass Jetting екі бағытты бар. Desktop Metal кез келген қозғалыста басып шығару үшін барлық қажетті қадамдарды біріктірді. Өндірістік жүйеде күрделі, және жоғары өнімді металл бұйымдарды үлкен көлемде өндіру үшін өте қолайлы. Single Pass Jetting технологиясына қолданатын ұнтақтардың құны төмен болуы, және жоғары өнімділік және өңдеу қарапайымдылығы дәстүрлі өндірістік үдерістермен салыстырғанда бәсекеге қабілетті, бір бөлшекті есептеу шығындарын қамтамасыз етеді және металдағы 3D-баспаның қазіргі заманғы жүйелеріне қарағанда 20 есе төмен. Металл компоненттерін кез-келген инженерлік салада жан-жақты қолдану арқасында машина жасаудың барлық салаларында шешуші рөл атқарады. Сонымен қатар қоспалар өндірісінің негізгі артықшылықтарын, мысалы, жаппай дайындау болып табылады.

SPJ әдісіндегі үздіксіз байланыстырушы реактивтілік болат оксидінің пайда болуын және тығыздалуын тудырады. Single Pass Jetting (SPJ) бұл үздіксіз бір реттік реактивті технология 12 000 см³/сағ жылдамдықты қамтамасыз етеді, 32000 ағыннан тұратын екі толық өлшемді баспа өзекшелері ұнтақты таратқыштармен бірге ұнтақты таратып, жинау аймағында бір жылдам

өту арқылы басып шығарады, секундына миллиондаған тамшылар шығарады, және лазерлік жүйелерге қарағанда 100 есе жылдам. Нөлдік құралдар жиынтығымен бұл күрделі металл бөлшектерін жасаудың ең жылдам әдісі болып саналады. SPJ әдісіндегі алғашқы 3D принтерді жаппай өндіруге қабілетті, әрі бәсекеге қабілетті өндірістік бағамен қамтамасыз етті.

Single Pass Jetting технологиясының - Metal Injection Molding технологиясына дамуына негізделген технология болып табылады. Оның басты технологиялық идеясы каретканың қозғалысы кезінде тегістейтін құрылғы қалыңдығы 50 мкм-ге дейінгі металл ұнтақты композиция қабатын түзеді, ағысты шүмектер арқылы бөлшектер мен қолдау қимасының нысаны бойынша байланыстырушы полимер шашырайды (қажет болған жағдайда), содан кейін бөлшектер мен қолдау қимасының шекарасында арнайы бөлу материалының қабаты жағылады (егер ондай бар болса) және байланыстырушы заттың сәуле шығаратын жылыту элементі болып саналады.

1 Single Pass Jetting технологиясының құрылымы

Аддитивті технология (АМ) машиналарға, құрастыру процестеріне және дәстүрлі өндіріс үлгілеріндегі жабдықтау тізбектеріне қолданады [11,13]. АМ технологиясының жеті санатын Американдық тестілеу және материалдарға қатысты (ASTM) анықтады: ватополимеризация, материалды қымтау, байланыстырушы қондырғы, ұнтақты төсенше синтездеу, материалды экструзия, ламинаттау және энергияны тікелей тұндыру [5,8,9,14–16].

АМ технологиясы металдардан, керамикадан, полимерлерден, құмнан және әйнектен тұратын әр түрлі материалдардан бөлшектер жасалады [5,8–12,17–19]. Материалды экструзиялау әдісі полимерлі жіптерді пайдаланады, шикізат материалдары [5,20,21], ламинаттау әдісі парақтарды яғни листтерді пайдаланады, ал тікелей энергия тұндыру кезінде сымдар немесе ұнтақтар қолданылады. Binder Jetting әдісінде, Powder bed fusion (ұнтақты қабатта қорытылуы) және Electron beam melting)– электронды - сәулелі балқыту ұнтақты қабаттың негізіндегі әдістер болып табылады [5,22,23], және тез прототиптеу және күрделі ішкі сипаттамалары бар бөлшектерді дайындау үшін қолданылады [24,25].

Powder bed fusion және Electron beam melting әдістері ұнтақтың бөлшектерін балқытуға арналған лазерлі немесе электрондық бумаларды қолданатын ұнтақ қабатындағы басқа процестерге қарағанда, ешқандай жылу көзі немесе балқыту байланыстырғыш ағынының процестеріне қатыспайды. Оның орнына сұйық байланыстырушы металл ұнтағының бөлшектерін бірге қосады. Бұл ұнтақ қабатының негізіндегі басқа процестермен салыстырғанда байланыстырғыштың ағынды өңдеудің маңызды артықшылығы болып табылады, өйткені материалдардың шектелмеген диапазоны көптеген өнеркәсіптік қолдану үшін бөлме температурасы мен бөлме атмосферасында жасалуы мүмкін. Binder Jetting әдістемесіне Single Pass Jetting, Color Jet Printing, Voxeljet, 3D Printing, ZipDose технологиялар кіреді.

Бұл дипломдық жұмыстың негізгі мақсаты, Single Pass Jetting технологиясын, яғни бір өтпелі ағынды өңдеу технологиясын бұйым басу кезіндегі процестерін зерттеу болып табылады.

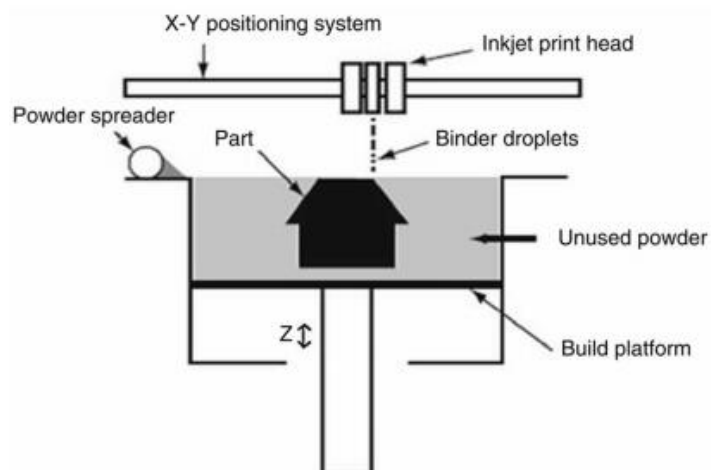
Desktop Metal Production жүйесі Single Pass Jetting (SPJ) деп аталатын 3D металл басып шығарудың жаңа тәсіліне негіздеп патент алды. Бұл технологияны ағынды процесті және бір реттік пассивті басып шығаруды ойлап тапты. Single Pass Jetting металл бөлшектерін бірнеше сағатта емес, бірнеше минутта металл бөлшектерін шығарады. Single Pass Jetting екі бағытты бар. Desktop Metal кез келген қозғалыста басып шығару үшін барлық қажетті

қадамдарды біріктірді. Өндірістік жүйеде күрделі, және жоғары өнімді металл бұйымдарды үлкен көлемде өндіру үшін өте қолайлы. Single Pass Jetting технологиясына қолданатын ұнтақтардың құны төмен болуы, және жоғары өнімділік және өңдеу қарапайымдылығы дәстүрлі өндірістік үдерістермен салыстырғанда бәсекеге қабілетті, бір бөлшекті есептеу шығындарын қамтамасыз етеді және металдағы 3D-баспаның қазіргі заманғы жүйелеріне қарағанда 20 есе төмен. Металл компоненттерін кез-келген инженерлік салада жан-жақты қолдану арқасында машина жасаудың барлық салаларында шешуші рөл атқарады. Сонымен қатар қоспалар өндірісінің негізгі артықшылықтарын, мысалы, жаппай дайындау болып табылады.

Single Pass Jetting (SPJ) көмегімен жасалған өндіріс жүйесінде екі бағытты басып шығару қарастырылған, онда басып шығару процесінің барлық кезеңдері - ұнтақты тұндыру, тарату, тығыздау, және байланыстырғыш сұйықтықпен басып шығару - әр құрастыру өткізілімінде қолданылады. Сонымен қатар SPJ технологиясының жұмыс жасау процесі жеті кезеңнен тұрады, олар: басып шығару, тазарту, ұнтақты тазарту, сүзу, инфильтрациялау, күйдіру және өңдеу болып табылады [14,15,30].

Жалпы Single Pass Jetting (SPJ) технологиясының жұмыс жасау сұлбасы 1-суретте көрсетілген.

Бір өтпелді ағының жұмыс істеу процесі, басып шығару төсеншесін ұнтақтың жұқа қабатын таратудан, яғни жайудан басталады. Содан кейін басып шығару механизмі платформадан өтіп, бірінші қабатты құра отырып, 2D файлы туралы ақпаратқа негізделген тиісті нүктелерде ұнтақты байланыстырады. Бірінші қабат басып шығарылған кезде, басып шығару жүйесі жинау қорапшасын төмендетеді және келесі қабатты бұйымның бетіне төсейді. Жаңа ұнтақ қабаты жайып болған соң, байланыстырғыштарды бұйымның геометриялық формасына тамшылатады. Басып шығару процесі бұйым аяқталғанша процес қайталанылады [15,27].



1-сурет - Бір өтпелі ағынды өңдеу әдісінің басу процесінің сұлбасы [26].

SPJ әдісіндегі үздіксіз байланыстырушы реактивтілік болат оксидінің пайда болуын және тығыздалуын тудырады. Single Pass Jetting (SPJ) бұл үздіксіз бір реттік реактивті технология 12 000 см³/сағ жылдамдықты қамтамасыз етеді, 32000 ағыннан тұратын екі толық өлшемді баспа өзекшелері ұнтақты таратқыштармен бірге ұнтақты таратып, жинау аймағында бір жылдам өту арқылы басып шығарады, секундына миллиондаған тамшылар шығарады, және лазерлік жүйелерге қарағанда 100 есе жылдам. Нөлдік құралдар жиынтығымен бұл күрделі металл бөлшектерін жасаудың ең жылдам әдісі болып саналады. SPJ әдісіндегі алғашқы 3D принтерді жаппай өндіруге қабілетті, әрі бәсекеге қабілетті өндірістік бағамен қамтамасыз етті.

Металл ұнтақтарын балқыту үшін электронды сәулені қолданатын PBF процестерінен айырмашылығы, SPJ әдісінде басу процесінде ешқандай жылу немесе электронды сәулені қолданбайды, сондықтан SPJ металдардың кең спектрімен жұмыс істей алады және аддитивті өндірістің үнемді әдістерінің бірі болып саналады [5, 12,14,26,31,32]. Сонымен қатар, ұнтақ төсенішіндегі кез-келген өзгеретін геометриялық формаларын оңай басып шығады, және құрылымын жобалау қажеттілігін жояды [5,27].

Реттелмеген ұнтақтар толығымен қайта өңделеді, сондықтан оларды қолдануға болады [26]. Алайда, жергілікті балқудың болмауы және салыстырмалы тығыздықтың жоғары болуына кедергі жасау мүмкіндігін арттырады. Single Pass Jetting әдісінде басып шығарылған металл бұйымдардың салыстырмалы тығыздығы, әдетте, теориялық тығыздықтың шамамен 50–60% пайызын құрайды, бұл ұнтақты металлургияда (P/M) өңделген қосылыстардан айтарлықтай төмен [4,5]. Басып шығарғаннан кейін бұйымның беріктігін арттыру үшін байланыстырғышты бекіту қажет. Ұнтақ қабатынан және артық қоршаған ұнтақ бөлігін жою үшін әдетте жұмсақ щетка

қолданылады. Ұнтақтарға байланыстырғыштарды бір уақытта тамшылату және бұйымдарды тығыздау кезінде, бұйымның тығыздығы мен беріктігін жақсартады. Әдетте, бөлшектердің сапасы технологиялық процесс параметрлеріне байланысты.

2 Single Pass Jetting технологиясының қазіргі жағдайы

Single Pass Jetting технологиясының - Metal Injection Molding технологиясына дамуына негізделген технология болып табылады. Оның басты технологиялық идеясы каретканың қозғалысы кезінде тегістейтін құрылғы қалыңдығы 50 мкм-ге дейінгі металл ұнтақты композиция қабатын түзеді, ағысты шүмектер арқылы бөлшектер мен қолдау қимасының нысаны бойынша байланыстырушы полимер шашырайды (қажет болған жағдайда), содан кейін бөлшектер мен қолдау қимасының шекарасында арнайы бөлу материалының қабаты жағылады (егер ондай бар болса) және байланыстырушы заттың сәуле шығаратын жылыту элементі болып саналады.



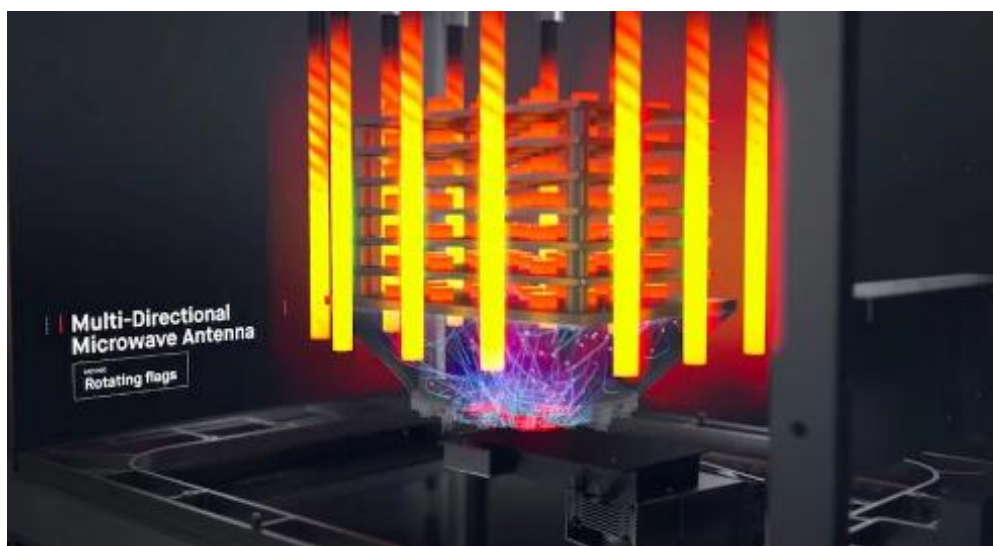
2-сурет - Single Pass Jetting технологиясының жұмыс жасау құрылысы.

Өндіріс жүйесімен жасалған бөлшектер сусымалы ұнтақпен қоршалған, бұл құрастыру қабырғасын толығымен пайдалануға және құрастыру өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді.



3-сурет - Жоғары тығыздық бөліктері

Басып шығару кезінде металл байланыстырғышпен бірге ұнтақ түрінде жинақтың бетіне түседі. Қабаттар жинақталады, және ол аяқталғаннан кейін, байланыстырғышты алу үшін бөлік жуылады және қызады. Әрлеу микротолқынды антеннасы бар жеке пештер жүйесінде орын алады, нәтижесінде металл балқу нүктесінен төмен болады. Байланыстырушы зат күйіп кеткен кезде, металл бөлшектер бір-бірімен біріктіріліп, қатты бөлшек түзеді.



4-сурет- Микротолқынды күшейтілген жентектеу

Қолданыстағы 3D принтерлерден айырмашылығы ұнтақ және басып шығару ұнтақтағышта өтуге мүмкіндік беретін бір реттік жолмен және материалға ысырап жоқ. Өлшеу жүйесі металды ұнтақты жинайды, ал тығыздау

жүйесі адамның шашы сияқты жұқа қабат жасайды. Басып шығару тақтасы байланыстырғыш заттың тамшыларымен жүреді. Басып шығару тақтасының өлшемі 330x330x330.

Көптеген өндірістерде кең таралған қорытпалардың бірі - SS 316L, оны көптеген зерттеушілер зерттеген [27]. Алайда, SS 316L Single Pass Jetting технологиясының толық қанды зерттелмеген. Осы тәжірибе жүргізу кезеңінде параметрлерді жақсарту/күйге келтіру немесе SS 316L ұнтағынан жасалған бұйымның бәсекеге қабілетті функционалды бөліктерін құру үшін параметрлерді орнаттық. Бұған қол жеткізу үшін жарияланған зерттеулердің қазіргі жағдайы қаралып, жинақтадық.

SS 316L байланыстырушы ағынының қазіргі жағдайы толық тығыздықты алу үшін шикізатты (мысалы, ұнтақтарды) және агрегаттау профильдерін таңдау туралы кең мәліметтер ұсынылған. Алайда, қазіргі әдебиетте оңтайлы байланыстырғышты таңдау және бөлшектердің түпкілікті тығыздығы мен өлшемді дәлдігінде байланыстырушы рөлін анықтау үшін алшақтық бар.

3 Бір өтпелі ағынды басып шығару параметрлері

3.1. Қабат қалыңдығы

Қабаттың қалыңдығы АМ әдістерінің бірнеше түрлері үшін маңызды технологиялық параметр болып табылады, өйткені ол конструктивтік элементтің ең аз ықтимал өлшемін және шектеулердің рұқсатын анықтайды. Қабаттың қалыңдығы қабатты басып шығарғаннан кейін жинау пластинасы түсірілетін арақашықтыққа тең. SPJ принтірлерінің мүмкіндігі, қабаттың қалыңдығының өзгеру диапазонын анықтайды. Ұнтақ мөлшері мен сипаттамасы қабаттың қажетті қалыңдығын ішінара анықтай алады [83].

Жұқа қабаттың қалыңдығы соңғы бөліктің қасиеттерін жақсартады, ал құрылыс уақыты сәйкесінше артады [15]. Жақсы ағын мен таралу қабілеттілігін сақтау үшін 3x бөлшектің көлемінің әр түрлі қабатының қалыңдығы [62,84], 2x бөлшек өлшемі [85] және ең үлкен бөлшек [31,86,87] ұсынылды.

3D басып шығару кезінде байланыстырғыш бұйымдардың енуі [85], атап айтқанда барлық бөлшектердің ұнтағы үшін 20 мкм сияқты қалыңдығы 20 мкм және бөлшектердің орташа мөлшері 5,5 мкм [85] таңдағанда, қажетсіз жерлерге артық байланыстырғыштың енуі нашар шешімге әкеледі [88,89]. Алайда, қалыңдығы 50 мкм [85] сияқты тым қалың қабат байланыстырғыштың басып шығарылған қабатқа тік бағытта енуіне қолайлы уақыт бере алмады [85,88,89]. Қабаттың оңтайлы қалыңдығы 35 мкм болғанда, тік және бүйірлік бағытта байланыстырғыштың енуі басып шығарылған бөліктің қажетті беріктігін қамтамасыз ете алады [85].

3.2. Басып шығару қанықтылығы

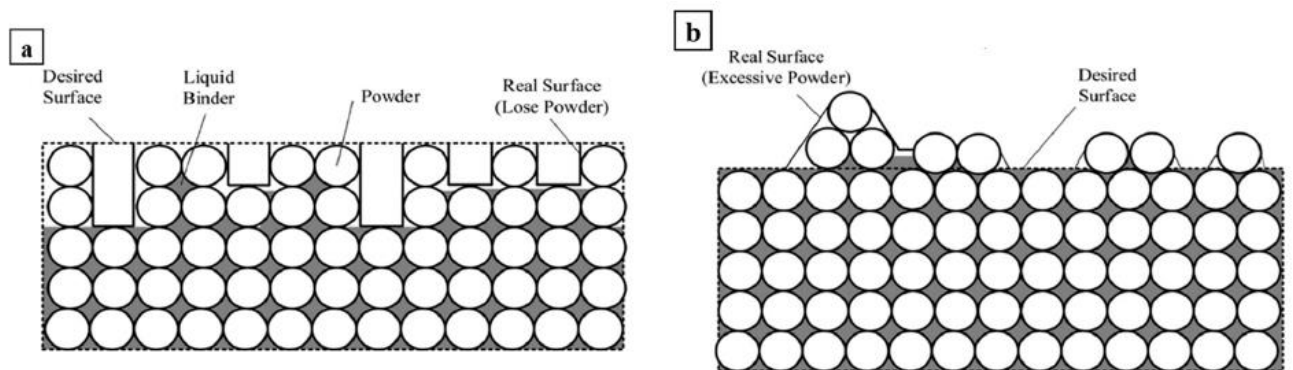
Басып шығару кезінде жинау қабаты ұнтақпен, тесіктермен немесе ауамен, сондай-ақ байланыстырғыш заттармен толтырылады. Байланыстырғыш зат алатын ауа көлемінің пайызы баспаның қанығуы немесе байланыстырғыш заттың қанығуы деп аталады және келесі теңдеумен анықталуы мүмкін [15]:

$$S = \frac{V_{binder}}{V_{air}} = \frac{V_{binder}}{(1 - PR) \times V_{solid}} \quad (1)$$

мұнда " PR " - ұнтақ пен ауаның белгілі бір көлеміндегі ұнтақ көлемінің үлесін білдіретін қаптама жылдамдығы. Қаптаманың жылдамдығы келесі теңдеумен анықталады [15]:

$$PR = \frac{V_{powder}}{V_{powder} + V_{air}} \quad (2)$$

Қаптау деңгейі әдетте 50-70% құрайды. Қанықтыру жинақталған байланыстырғыштың мөлшерін сипаттайды. Сондықтан, қанықтылық басып шығарудың тұрақтылығын білдіреді. Ұнтақты бөлшектерге бір-біріне қатты қосылуға жеткілікті байланыстырғыштың болмауынан төмен қанықтық сәтсіздікке ұшырауы мүмкін, ал қанықтылықтың жоғары мөлшері ұнтақтың көп мөлшерін байланыстыру себебінен бөліктің геометриясын түзете алады. 8-суретте сәйкесінше төмен және жоғары басып шығару қанығуының схемасы көрсетілген [15].



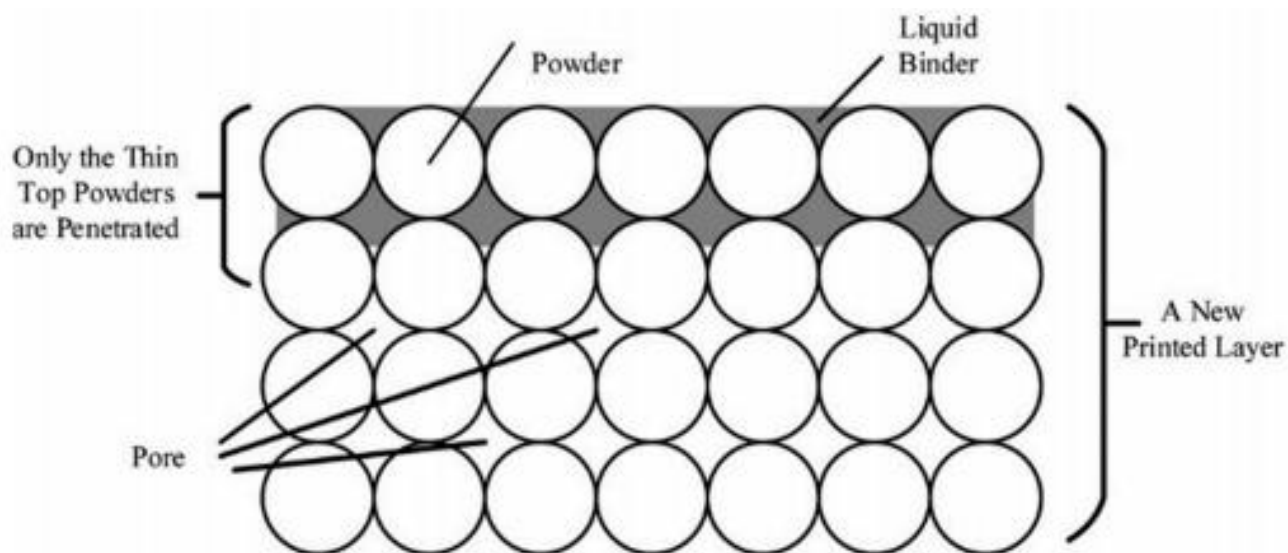
7-сурет- Басып шығару қанығуының сызбасы; (a) төмен басып шығару қанықтылығы жеткілікті байланыстырудың болмауына әкеледі; (b) жоғары қанықтылық ұнтақтың артық мөлшеріне әкеледі

3.3. Жылытқыштың Қуат Коэффициенті

Әрбір қабатты басып шығарғаннан кейін жинақтау қабаты байланыстырушы затты кептіру үшін қыздырғыштың астына жылжытылады. Жылытқыштың қуат коэффициенті жылытқыштың ағымдағы қуатының жылытқыштың ең жоғары қуатына жылу жылдамдығы мен температураны анықтау үшін қатынасын көрсетеді. Қыздырғыштың талап етілетін қуаты әртүрлі баспа параметрлерінде [30] белгілі бір шексіз өзгереді. Қуат қатынасы тым төмен байланысты кептіре алмайды, ал қуаттың тым жоғары арақатынасы қуат қуатын көп тұтынады және деформация және басып шығару кезінде шөгудің жылдамдығын арттыра алады [15]. Сондықтан қыздырғыштың қуат коэффициенті бөлшектерге ешқандай ақаулар тудырмайтындай етіп орнатылуы тиіс. 75% қыздыру қуаты 70% байланыстырғышты қанықтыру кезінде Exone m-Lab принтеріндегі 316L басып шығару үшін пайдаланылған.

3.4. Кептіру уақыты

Кептіру уақыты - бұл әр қабатты басып шығарғаннан кейін байланыстырғышты жылытқыштың астына кептіру уақыты. Кептіру кезінде басып шығару механизмі бітеліп қалмас үшін артық байланыстырғышты алып тастау үшін таза ыдысқа өтеді. Осылайша, қысқа кептіру уақыты басып шығару механизмінің бітелуіне алып келеді, бұл соңғы бөліктің беткі қабатының сапасына айтарлықтай әсер етеді [15].



8-сурет- Қысқа уақытты кептіру уақыты байланыстырғыш заттың жеткіліксіз енуіне әкеледі [15].

8-суретте байланыстырғыш ұнтаққа жартылай еніп, басылған бөлігінде көп кеуектер қалдырылған кезде қысқа кептіру уақытының сызбасы көрсетілген.

4. Байланыстырғыштың ағынды өңдеуін қайта өңдеу

4.1. Күйдіру

Өңдеудің алғашқы сатысында байланыстырушы зат тұрақсыз болып, буланып кететін компоненттерге ыдырайды. Кәдімгі полимерлер құрамында бірдей температура диапазонында күйіп кететін көміртек, оттегі және көміртегі-сутек байланыстары бар. Тұтқырғыштардың көпшілігі <150 _C температурада ериді, бірақ 300-500 _C дейін буланбайды. Оттегі сияқты белсенді затты қосу күйдіруді тездетеді [63].

4.2. Жентектеу

Жентектеу дегеніміз бөлшектерді балқу температурасынан төмен температурада қатты күйдегі диффузия нәтижесінде пайда болатын жоғары температурада байланыстыру болып табылады [63]. Алайда, сұйылту сұйық фазалық бөліну деп аталатын [92,93] сұйық фазаны қалыптастыруды қамтуы мүмкін. Қатты күйге келтіруден гөрі сұйық фазалық агломерация микроқұрылымды жақсы басқаруды, бөлінген бөліктердегі кеуектілікті азайтуды және төмен температурада тезірек ыдырауды ұсынады [94].

Жентектеу қозғаушы күші - бұл ұнтақ компактiнiң интерфейс энергиясының жалпы төмендеуі, оны келесі теңдеумен көрсетуге болады [93]:

$$\Delta(\gamma A) = \Delta\gamma A + \gamma\Delta A \quad (3)$$

мұндағы γ - меншікті бетің энергиясы, ал A - ықшамдалған жалпы ауданы. Энергияның өзгеруі ($\Delta\gamma$) тығыздыққа жатады, ол қатты / будың бетін қатты күйде бөлу кезінде қатты бетке ауыстырады, ал беткей аймағының өзгеруі (ΔA) бұйымның қабаттасуымен, яғни өсуімен байланысты [93]. Балқу температурасында материалдар өте жоғары атомдық секірулерді көрсетуі мүмкін, ал агломерация кезінде атомның секіру жылдамдығы балқу температурасының 1% құрайды.

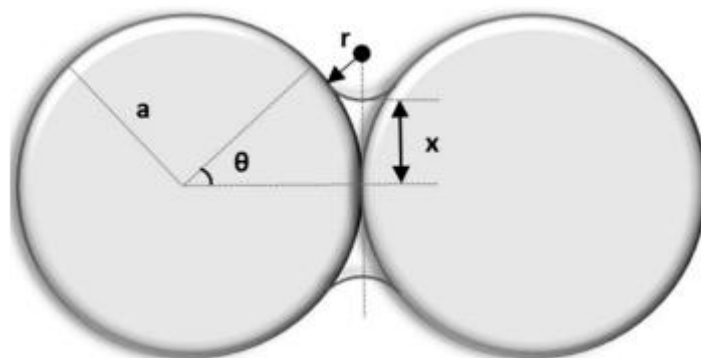
Осылайша, атомдық секірулердің кішкене сынуы байланыстырушы байланыстың өсуіне және ұсақ бөлшектердің беттік энергиясының төмендеуіне әкеледі.

Кішігірім бөлшектер тезірек қозғалады, өйткені олар қысқа қашықтыққа және үлкен кернеулерге байланысты аз атомдар қажет. Пішіндеу ақырында кеуектерді жою және микроқұрылымды кеңейту арқылы жүзеге асырылады [63]. Қайталанатын қасиеттері бар агрегат бөлшектерінде тығыздықты, бұйым мөлшерін және кеуектердің таралуын қосқанда өзгермелі айнымалылар бақылануы керек.

Тербелмелі айнымалылардың тағы бір тобы - өзгермелі температура мен уақытты, қыздыру мен салқындату жылдамдығын, ұстап тұру уақытын, қысым мен атмосфераны қосқандағы технологиялық айнымалылар. Технологиялық айнымалылар көбінесе термодинамикалық айнымалыларға ие, ал процестің ауыспалы құрамы ықшамдықтың сығылу қабілеттілігі мен өзгеруіне әсер етеді. Қатты күйге бөлудің үш қабаттасу кезеңі бар, олардың ішінде бастапқы, аралық және қорытынды кезең бар [63,93].

Бастапқы кезең бөлшектер арасында мойындардың пайда болуымен анықталады [93] және бұрышты және бұрыштық кеуектерді қамтиды [63]. Бастапқы кезеңде тығыздаудың тек 2-3% -ы пайда болады. Аралық кезең ашық тесіктерді қамтиды. Тері тесігі айналасындағы қисық сызықтар массивті таралу аймағына толтыруды жалғастыруда. Аралық кезеңде мойындар кедергі жасайтын және қабаттасатындай үлкен. Дәндер өсіп, тесіктер көбінесе бөлшектерді қайта орналастыру арқылы қысқарады [63,95]. Тері тесігін оқшауламас бұрын аралық кезеңде салыстырмалы тығыздықтың 93% -ы пайда болады [93].

Соңғы саты көбінесе жабық, сфералық кеуектерден тұрады [63] және тығыздау оқшауланған кеуекті күйден бастап соңғы тығыздалуға дейін жүреді. Толық тығызданғаннан кейін бұйымның өсуі жеделдейді, өйткені бұл процеске кедергі келтіретін ешқандай кеуектер жоқ [63]. Арна кеуектерінің моделі және оқшауланған кеуектер моделі әдетте аралық және соңғы сатыларда іріктеу кезінде кеуектердің пішінін өзгерту үшін қолданылады [93]. Бірдей мөлшердегі сфералық бөлшектерді қарастыра отырып, ұнтақ ықшамдалған бөлшектерді екі бөлшектердің моделімен ұсынуға болады [63,93]. 9-суретте екі сфералық бөлшектердің арасында мойынтірек көрсетілген, мұндағы x - мойын радиусы, a - бөлшектердің радиусы, θ - бөлшектер арасындағы диафрагмалық бұрыш, r - мойын қисығының радиусы, және (x / a) - мойын өлшемінің қатынасы [93].



9-сурет - Мойын радиусымен 'x' және 'a' бөлшектердің радиусымен 'r' радиусымен мойын қисығы бар екі сфералық бөлшектердің сызылуы.

Вакуум концентрациясы мен бу қысымының айырмашылығы тербелмелі қозғаушы күшті анықтайды [93]. 10-суретте материалды тасымалдау тетіктері келесідей көрсетілген [96]:

Торлы (көлемдік) диффузия (дән шекарасының таралуы (бұйымның шекарасынан))

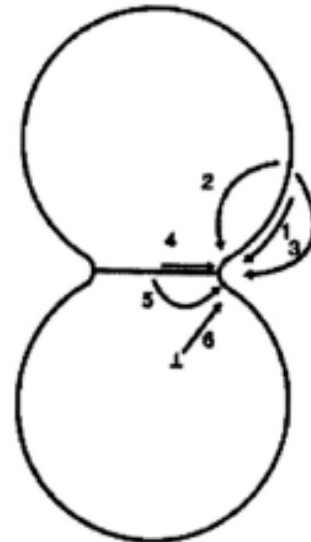
- Тұтқыр (пластикалық) ағын (сығылған бұйымнан)
- Беттік диффузия (бұйымның бетінен)
- Торлы диффузия (бұйымның бетінен)
- Газ фазасын тасымалдау (бұйымның бетінен):

Сурет 9. Мойын радиусымен 'x' және 'a' бөлшектердің радиусымен мойын радиусымен және 'a' бөлшектер радиусымен екі сфералық бөлшектердің сызылуы. бу қысымы қоздырғышты анықтайды [93]. 10-суретте материалды тасымалдау тетіктері келесідей көрсетілген [96]:

- Торлы (көлемдік) диффузия (бұйым шекарасынан)
- бұйым шекарасының таралуы
- Тұтқыр (пластикалық) ағын
- Беткі диюция (бұйым бетінен)
- Газ фазасын тасымалдау (бұйым бетінен):
- Булану / конденсация
- Газды кептіру

Mechanism:

1. Surface diffusion
2. Lattice diffusion (from the surface)
3. Vapor transport
4. Grain boundary diffusion
5. Lattice diffusion (from grain boundary)
6. Plastic flow (by dislocation motion)



10-сурет- Жентектеу кезінде материалды тасымалдау жолдары [96].

Принтердің барлық тетіктері қисылуға және тығыздалуға ықпал етпейді. Тығыздайтын механизмдер тордың (көлемнің) диффузиясы, бұйымның шекарасынан мойынға дейінгі шекаралық диюция және мойынның өсуіне және

тығыздалуына әкелетін пластикалық ағын. Ылғалдандырмайтын механизмдер, оның ішінде будың тасымалдануы, беттік диффузия және бөлшектердің бетінен мойынға дейінгі көлемді диюция мойынның өсуіне және бөлшектердің тығыздалмауын қамтамасыз етеді. Егер тығыздамайтын механизмдер басым механизм болса, онда кеуекті микроқұрылым алады [93,96].

Диффузия маңызды бұзу механизмі болып табылады [93]. Диффузия дегеніміз - температураға тәуелді процесс, ал коэффициенті (D) - бұл [97]:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4)$$

мұндағы D_0 - D (см² / с) бірлігі бар тұрақты, Q - активтендіру энергиясы (Дж / моль), R - жалпыға бірдей газ тұрақтысы (8,314 Дж / моль_K), ал T - абсолютті температура (K). Атомдардың дән шекарасынан мойынға торлы таралуы шекараға бос жерді жою алаңы ретінде әрекет етуге мүмкіндік береді.

Торлардың таралуы кезінде атомдардың дән шекарасынан мойын бетіне таралуы кезінде мойын аймағы созылып, ал дән шекарасы қысымды күйде болады. Осы араластыру механизмі арқылы материал бөлшектердің жанасу аймағынан шығарылады, нәтижесінде мойынның өсуі және тығыздалуы (қысылуы) пайда болады [93]. Набарро-Герринг (NH) кремні қалыпты химиялық потенциалды аймақтарға қалыпты қысымға түсетін химиялық потенциалды аймақтарға дейін созылу кернеулеріне ұшыраған дән шекарасындағы жоғары химиялық потенциалды (m) аймақтардан бос орындардың бөлінуі нәтижесінде пайда болады. Бұл дән шекараларының қалыпты жылдамдығын немесе штамм жылдамдығын береді [98,99]. Дән шекарасының таралуы (ГБ) дән шекарасынан мойынға материалды тасымалдануды қамтиды.

Коблдың диффузиялық сығылуы дән шекарасы бойындағы материалдағы атомдардың диффузиясы нәтижесінде пайда болады [100]. Геррингтің масштабтау заңы [101] бөлшектердің мөлшерінің кинетикаға әсерін түсіндіреді. Бірдей эксперименттік күйде және агрегаттау механизміндегі ұқсас формадағы ұнтақтар үшін масштабтау заңы дәл осындай мөлшерге жету үшін түсіру уақытының салыстырмалы ұзақтығын болжайды. A1 радиусы аз ұнтақ және a2 үлкенірек ұнтақ үшін, мұндағы $a_2 = \lambda a_1$ [93];

$$t_2 = \lambda^\alpha t_1 \quad (5)$$

мұндағы λ тұрақты, ал α - экспонент. Тербелмелі теңдеудің жалпы формасын келесі түрде білдіруге болады [93]:

$$\left(\frac{x}{a}\right)^n = F(T) a^{m-n} t \quad (6)$$

мұндағы x - мойын радиусы, a - бөлшектердің радиусы, F (T) - температураға тәуелді функция, t уақытты бөлу қажет, m - тығыздау үшін дән

мөлшерінің көрсеткіші, n - дәннің өсуіне арналған дән мөлшері, ал $a^{m-n} t$ - болу керек тұрақты, осылайша $\alpha = n - m$.

Дән өсіп келе жатқандықтан, масштабтау заңының осындай формуласы агрегат механизмінде қанағаттанбайды. Дегенмен, ол бөлшектердің мөлшерінің микроқұрылымдық өзгерістерге әсерін көрсетудің қарапайым әдісін ұсынады [93,102]. Коблдың кезеңді аралық үлестіруге арналған моделі, астықтың барлық жиектерінде цилиндр тәрізді тесіктері бар тетракаидекаэдрлі дәндерге негізделген. Кобланың микроқұрылымының аралық сатысы кеуектің бағытта бірдей шөгуін болжайды. Торлы диффузия және дән шекарасының диффузиясы осы кезеңде екі қол жетімді механизм болып табылады [34,93].

Соңғы сатыға ығыстыру үшін Кобл моделі сфералық кеуектері бар тетракаидекаэдрлі түйіршікті және атомдардың кеуек бетіне концентрлі диффузиясын болжайды [93]. Соңғы кезеңде тығыздау жылдамдығы астық мөлшеріне кері пропорционал. Кобл моделі дән шекарасын тығыздау үшін атом көзі ретінде қарастырмайды. Осылайша, соңғы кезең үшін Геррингтің масштабтау заңын [103] дән шекарасынан бастап кеуекке дейінгі материал ағынына кеуектер бетінің әсерін ескеру үшін қолдануға болады [93]. Соңғы кезеңде тығыздану тері тесігі болған кезде астықтың өсуімен байланысты [93,96]. Бөлшектердің мөлшері мен түсу уақыты жоғарылаған сайын тығыздау жылдамдығы төмендейтіні белгілі болды. Алайда, ұсақ ұнтақ үшін астықтың диффузиялық механизмі басым болады [93].

SPJ агломерация процестерінде, әдетте, 60% жасыл тығыздықтан басталады, бөлудің бастапқы кезеңі бөлшектер арасында мойындалу нәтижесінде 1,5% -дан 2% -ға дейін шөгуге әкеледі. Алайда, ірілендірудің соңғы кезеңі 15% сызықтық шөгуге әкелуі мүмкін. Металдардың әр түрлі сұйықтықтармен араласуы және үлкен және ұсақ бөлшектердің таралуы компоненттің сапалық құрамы мен тығыздану режиміне қатты әсер етуі мүмкін [28]. Металл ұнтақтарына толық көлемділікті алу үшін әдетте $D_{50} < 20$ мкм бөлшектердің орташа мөлшері қажет [104].

Көп модальды ұнтақтар, әдетте, жасыл тығыздыққа ие болады; дегенмен, олардың барлығы жоғары тығыздыққа әкелмейді. Әдетте SPJ процестеріне жақын тығыздықтың көп бөлігі (> 90%) сұйық фазалық іріктеу арқылы қол жеткізілді, ол қоспалар қосылған кезде пайда болды [75]. Толық тығыздықты, соның ішінде ыстық изостатикалық басуды (HIP) және инфильтрацияны алу үшін қосымша кейінгі өңдеуді жүргізуге болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диплом жазу барысында барлық қойылған мақсаттарға толық қол жеткізілді.

Алғашқы кезеңде бірінші кезеңде Single Pass Jetting технологиясының құрылымын толық қанды зерттеді. Сонымен қатар сол технологияның қазіргі жағдайын да қарастырдық. Бір өтпелі ағынды басып шығару параметрлерін де анықтадық.

Қабаттың қалыңдығы АМ әдістерінің бірнеше түрлері үшін маңызды технологиялық параметр болып табылады, өйткені ол конструктивтік элементтің ең аз ықтимал өлшемін және шектеулердің рұқсатын анықтайды. Қабаттың қалыңдығы қабатты басып шығарғаннан кейін жинау пластинасы түсірілетін арақашықтыққа тең. SPJ принтірлерінің мүмкіндігі, қабаттың қалыңдығының өзгеру диапазонын анықтайды. Ұнтақ мөлшері мен сипаттамасы қабаттың қажетті қалыңдығын ішінара анықтай алады

Арымбеков Бекен Сағатбековичтің жетекшілігімен қабат қалыңдығын, басып шығару қанықтылығын, жылытқыштың қуат коэффициентін, кептіру уақытын, және байланыстырғыштың ағынды өңдеуін қайта өңдеуін зерттедік. Сонымен қатар бұйымды күйдіру мен жентектеуінде толық қанды қарастырдық.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 P. Zawadzki, K. Zywicki, *Manag. Prod. Eng. Rev.* 7 (2016) 105–112.
- Y. Liu, X. Xu, *J. Manuf. Sci. Eng.* 139 (2016) 1–8.
- 3 L. Wang, G. Wang, *Int. J. Eng. Manuf.* 6 (2016) 1–8.
- 4 M.K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R.I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 65 (2016) 737–760.
- 6 P. Zawadzki, K. Zywicki, *Manag. Prod. Eng. Rev.* 7 (2016) 105–112.
- 7 Y. Liu, X. Xu, *J. Manuf. Sci. Eng.* 139 (2016) 1–8.
- 8 L. Wang, G. Wang, *Int. J. Eng. Manuf.* 6 (2016) 1–8.
- 9 M.K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R.I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, F. Martina, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 65 (2016) 737–760.
- 10 S. Singh, S. Ramakrishna, R. Singh, *J. Manuf. Process.* 25 (2017) 185–200.
- 11 D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, *Acta Mater.* 117 (2016) 371–392.
- 12 C. Körner, *Int. Mater. Rev.* 61 (2016) 361–377.
- 13 A. Grigoriev, I. Polozov, V. Sufiiarov, A. Popovich, *J. Alloys Compd.* 704 (2017) 434–442.
- 14 M. Tang, P.C. Pistorius, *Int. J. Fatigue* 94 (2017) 192–201.
- 15 W.J. Sames, F.A. List, S. Pannala, R.R. Dehoff, S.S. Babu, *Int. Mater. Rev.* 6608 (2016) 1–46.
- 16 Z.X. Khoo, J.E.M. Teoh, Y. Liu, C.K. Chua, S. Yang, J. An, K.F. Leong, W.Y. Yeong, *Virtual Phys. Prototyp.* 10 (2015) 103–122.
- 17 M. Zarek, M. Layani, S. Eliazar, N. Mansour, I. Cooperstein, E. Shukrun, A. Szlar, D. Cohn, S. Magdassi, *Virtual Phys. Prototyp.* (2016) 1–8.
- 18 K. Kim, W. Zhu, X. Qu, C. Aaronson, W.R. McCall, S.C. Chen, D.J. Sirbuly, *ACS Nano* 8 (2014) 9799–9806.
- 19 J. Rossiter, P. Walters, B. Stoimenov, in: *Proc. SPIE*, 2009, pp. 1–10.
- 20 Q. Ge, C.K. Dunn, H.J. Qi, M.L. Dunn, *Smart Mater. Struct.* 23 (2014) 1–15.
- 21 D. Raviv, W. Zhao, C. McKnolly, A. Papadopoulou, A. Kadambi, B. Shi, S. Hirsch, D. Dikovsky, M. Zyracki, C. Olguin, R. Raskar, S. Tibbits, *Sci. Rep.* 7422 (2014) 1–8.
- 22 R. Maccurdy, R. Katzschmann, Y. Kim, D. Rus, in: *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2016, pp. 3878–3885.
- 23 E. MacDonald, R. Salas, D. Espalin, M. Perez, E. Aguilera, D. Muse, R.B. Wicker, *IEEE Access* 2 (2014) 234–242.

24 H. Ota, S. Emaminejad, Y. Gao, A. Zhao, E. Wu, S. Challa, K. Chen, H.M. Fahad, A.K

25“Single Pass Jetting” 2017. [Online]. Available: <https://www.desktopmetal.com/products/production/>. [Accessed: 30-Apr-2017].