

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

Мұстафа Аслан Мақсатұлы

«Бұйымдарды дайындау кезінде Laser Freeform Fabrication аддитивті
технологиясын қолдануды зерттеу»

Дипломдық жобаға

ТҮСІНІКТЕМЕЛІК ЖАЗБА

5B071200 – Машина жасау

Алматы 2020

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ә. Бүркітбаев атындағы Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрлау институты

Өнеркәсіптік инженерия кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі

PhD д-ф, қауым. профессор

_____ Арымбеков Б.С.

« ____ » _____ 2020 ж.

Дипломдық жобаға

ТҮСІНІКТЕМЕЛІК ЖАЗБА

Тақырыбы: «Бұйымдарды дайындау кезінде Laser Freeform Fabrication
аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

5B071200 – Машина жасау

Орындаған

Мұстафа Аслан Мақсатұлы

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 Мұстафа Аслан Мақсатұлы

Тақырыбы ««Бұйымдарды дайындау кезінде Laser Freeform Fabrication
аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»»

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

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

Дипломдық жобаның бастапқы берістері бұйым жасау кезінде Laser Freeform
Fabrication технологиясын қолдануды зерттеу

Дипломдық жобада қарастырылатын мәселелер тізімі

а) Лазерлік еркін пішінді дайындау технологиясының құрылымы зерттеу

б) LFF процесінің математикалық көрінісі

в) Модельдеу әдісі

Ұсынылған негізгі әдебиет: 18 атау

Дипломдық жобаны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәліметтер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Кіріспе. Лазерлік еркін пішінді дайындау технологиясының құрылымы зерттеу		
Laser Freeform Fabrication процесінің математикалық көрінісі		
Модельдеу әдісі		
Алынған нәтижелерді талдау және талқылау		

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 _____ Мұстафа А. М.

Күні «__» _____ 2020 ж.

АНДАТПА

Көп қабатты Laser Freeform Fabrication процесін модельдеу үшін 3D-өтпелі сандық тәсіл әзірленді.

Модельдеудің осы тәсілін, балқытылған материалдардың геометриясын, сондай-ақ кернеудің/деформацияның температуралық және термиялық өрістерін пайдалана отырып, барлық дайындау процесі бойында болжанды. Ұсынылған алгоритмнің мүмкіндіктерін көрсету үшін сол материалдан жасалған дайындамада (тот баспайтын болат AISI 304L) Laser Freeform Fabrication әдісі бойынша төрт қабатты жұқа қабырғаны балқыту процесі үлгілендірілді.

Модельдің жұмыс қабілеттілігі мен дәлдігі эксперименталды тексерілді. Жұқа қабырғаның геометриясы үлгілеу кезіндегі технологиялық параметрлермен эксперименталды жасалған төрт қабатты қабырғамен салыстырылды. Берілген сандық әдіспен болжанған температураны бөлу процесс процесінде екі Жоғары температуралы термопар көмегімен екі нүктенің температурасын өлшеу және оларды сандық нәтижелермен салыстыру арқылы тексерілді.

АННОТАЦИЯ

Для моделирования многослойного процесса Laser Freeform Fabrication разработан 3D-переходный цифровой подход.

Этот способ моделирования предполагался на протяжении всего процесса изготовления с использованием геометрии расплавленных материалов, а также температурных и термических полей напряжения/деформации. Для демонстрации возможностей предлагаемого алгоритма в заготовке из того же материала (нержавеющая сталь AISI 304L) был модулирован процесс плавки четырехслойной тонкой стены методом Laser Freeform Fabrication.

Экспериментально проверена работоспособность и точность модели. Геометрия тонкой стены сопоставлена с технологическими параметрами при моделировании экспериментально выполненной четырехслойной стенкой. В процессе процесса распределения предполагаемой температуры заданным числовым методом с помощью двух высокотемпературных термопаров проверено измерение температуры двух точек и сравнение их с количественными результатами.

ANNOTATION

A 3D transient digital approach has been developed to simulate the multi-layer Laser Freeform Fabrication process.

This method of modeling was assumed throughout the manufacturing process using the geometry of molten materials, as well as temperature and thermal stress/strain fields. To demonstrate the capabilities of the proposed algorithm, the process of melting a four-layer thin wall using Laser Freeform Fabrication was modulated in a billet made of the same material (AISI 304L stainless steel).

The efficiency and accuracy of the model were experimentally verified. The geometry of the thin wall is compared with the technological parameters when simulating an experimentally performed four-layer wall. During the process of distribution of the assumed temperature by a given numerical method using two high-temperature thermocouples, the temperature measurement of two points is verified and compared with the quantitative results.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	8
1 Лазерлік еркін пішінді дайындау технологиясының құрылымы	10
2 Laser Freeform Fabrication процесінің математикалық көрінісі	14
2.1 Температура, кернеу және деформация өрістерінің басқару теңдеулері	14
2.1.1 Температураның таралуы	14
2.1.2 Кернеу мен деформацияның жылу өрістері	14
2.2 Шекаралық шарттар, түзетулер мен болжамдар	15
2.2.1 Шекара шарттары	15
2.2.1 Шекара шарттары	15
2.2.2 Қозғалатын лазерлік сәуле энергиясының таралуы.	16
2.2.3 Қуат әлсіреуі.	16
2.2.4. Бірлескен жылу беру коэффициенті.	17
3 Модельдеу әдісі	19
3.1 Теңдеулерді шешудің стратегиясы	19
3.2 Қорытылған материалдың өтпелі геометриясын 3D болжау	19
3.2.1 Балқыманың өтпелі бастиегінің шекарасын анықтау	19
4 Тәжірибелік және модельдеу нәтижелерін салыстыру	21
5. Алынған нәтижелерді талдау және талқылау	23
Қорытынды	26
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	27

КІРІСПЕ

Laser Freeform Fabrication процесі дәстүрлі өндіріс әдістерімен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарды көрсетті. Техникалық ерекшеліктер тұрғысынан жылу әсерінің шағын аймағы (HAZ), ең аз араласу, терморегуляцияның жоғарылауы және функционалды градуирленген бөлшектер өндірісі, осы технологияның көптеген артықшылықтарының бірі болып табылады, ал өндірістік процесті жоспарлау тұрғысынан бұл әдіс сызбаны дайындау, белгілі бір өлшемдегі шикізатты сатып алу, адам мен машинаның өзара іс-қимыл процесін жоспарлау, сапаны үзік тексеру және соған байланысты адами қателер сияқты дәстүрлі әдістермен салыстырғанда көптеген кезеңдерді жоя алады.

Сонымен қатар, Laser Freeform Fabrication икемділігіне, оның аддитивті сипатына және лазер сәулесінің ерекше сипаттамаларына байланысты Laser Freeform Fabrication әр түрлі қолданбаларда салыстырмалы түрдегі қарапайым әдістердің шектеулерін, мысалы, тез прототиптеу және құралдарды [3] қаптау [4] және бөлшектерді жөндеу шешімдерін ұсынады. [5].

Осы техниканың артықшылықтарына қарамастан, Laser Freeform Fabrication процесі де, басқа жаңа технологиялар сияқты, өзінің барлық әлеуетін пайдалануда қиындықтарға тап болады. Laser Freeform Fabrication технологиясы, қолданылатын жабдықтар мен материалдарға қатысты өзара байланысты көптеген технологиялық параметрлермен басқарылады. Сонымен қатар, бұл параметрлердің физикалық сапасы мен геометриялық дәлдігін анықтайды. Сондықтан бұл параметрлерді бақылау Laser Freeform Fabrication пайдаланып нысанды жасау кезінде шешуші мәнге ие. LFF-тің оның әр түрлі қосымшалары үшін толық әлеуетін дамыту көптеген мекемелер мен зерттеу топтарында зерттелген. Көптеген зерттеулер жүргізілді, онда белгілі бір технологиялық параметр, белгілі бір өнімнің материалдық қасиеттері немесе осы процеске байланысты физикалық құбылыстар зерттелген [8–10]. Алайда, сезімтал және өзара байланысты технологиялық параметрлердің көптігі Laser Freeform Fabrication процесі үшін түпкілікті өнімнің сапасын анықтайды, процестің жан-жақты моделіне ие бола отырып, жүйенің әрекеті мен процесс параметрлерінің арақатынасы туралы жақсы түсінік береді. Сонымен қатар, мұндай алынған модельдерден алынған білім тәжірибе жұмыстарына кететін уақыт пен күрделілікті азайтады. Бірнеше стационарлық және өтпелі аналитикалық және сандық жылу модельдері жасалды, оларда жылу беру құбылысына байланысты әр түрлі физикалық параметрлер: балку бастиегінің

сипаттамасы мен геометрия, балқытылған бастиегі мен ұнтақ ағынының өзара әрекеттестігі, процестің бүкіл аумағына жылу таралуы және әсер етуі.

Эксперименттік және сандық нәтижелерден алынған әр қабаттың орташа биіктігін салыстыру, материалды тұндыру үшін әзірленген алгоритм Laser Freeform Fabrication процесінде барлық қабаттардың геометриясын болжай алатындығын көрсетеді (максималды орташа салыстырмалы қателік - 9,29%).

FE талдауының дұрыстығын тексеру үшін дайындаманың екі нүктесіндегі температура дайындау процесінде сипатталған термопаралармен үздіксіз өлшенді. 3-суретте көрсетілген координаталар жүйесі бойынша дайындамадағы осы екі нүктенің орындары тиісінше А және В нүктелері үшін (17, 3, -1,5) және (12, 3, -1,5) мм.

Тәжірибелік нәтижелер модельдеуден алынған нәтижелермен салыстырылды. Мәліметтерді жинау жылдамдығы 140 Гц құрады. Нәтижелер FE моделінен алынған температуралық профильдер эксперименталды түрде өлшенгендерге сәйкес келетіндігін көрсетеді. Бірінші және төртінші қабаттар үшін орташа қателіктер А нүктесі үшін 1,47%, 3,8%, 4,49% және 5,51%, В нүктесі үшін сәйкесінше 1,55%, 3.52%, 4.42% және 5.29% құрайды.

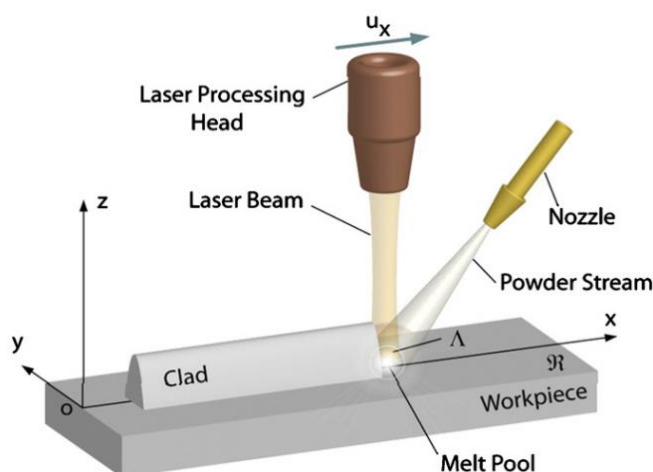
Сондай-ақ, модель жылу кернеулерінен туындаған дайындаманың бұрмалануы тұрғысынан эксперименталды түрде тексерілді. Осы мақсатта төрт қабатты орналастырғанға дейін және одан кейін дайындамадан екі сурет алынды.

1 Лазерлік еркін пішінді дайындау технологиясының құрылымы

Бос формадағы лазерлік еркін пішінді дайындау өндірісте (LFF) объект тікелей оның CAD-моделінен жобалау саласына металл материалдарды қабат-қабат қосу арқылы жүйелі басу жолдарының көмегімен жасалынады. Әрбір қабат жылу көзі ретінде лазерлік сәулені пайдалана отырып, бір мезгілде балқытылатын жылжымалы төсеніштің үстіңгі бетін, жұқа қабатын тез қатайту жолымен жасалады. Басқа қабатты технологиялардан қарағанда, LFF технологиясының негізгі ерекшеліктерінің бірі - әрбір қабат ені шектеулі жолдарды яғни қабаттарды салу арқылы қалыптасады. Сондықтан бөлшектерді жасау үшін лазерлік сәуле және материалды тұндыру жүйесі CAD-модель бөлшектерін қолдана отырып анықталған тізбекті траекторияларымен баспада басып шығады. 1-суретте ұнтақты бүрку арқылы LFF процесінің схемасы көрсетілген, онда лазерлік өңдеу басы, бүйір шүмек және дайындама көрсетілген.

Laser Freeform Fabrication процесі дәстүрлі өндіріс әдістерімен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарды көрсетті. Техникалық ерекшеліктер тұрғысынан жылу әсерінің шағын аймағы (HAZ), ең аз араласу, терморегуляцияның жоғарылауы және функционалды градуирленген бөлшектер өндірісі, осы технологияның көптеген артықшылықтарының бірі болып табылады, ал өндірістік процесті жоспарлау тұрғысынан бұл әдіс сызбаны дайындау, белгілі бір өлшемдегі шикізатты сатып алу, адам мен машинаның өзара іс-қимыл процесін жоспарлау, сапаны үзік тексеру және соған байланысты адами қателер сияқты дәстүрлі әдістермен салыстырғанда көптеген кезеңдерді жоя алады.

Сонымен қатар, Laser Freeform Fabrication икемділігіне, оның аддитивті сипатына және лазер сәулесінің ерекше сипаттамаларына байланысты Laser Freeform Fabrication әр түрлі қолданбаларда салыстырмалы түрдегі қарапайым әдістердің шектеулерін, мысалы, тез прототиптеу және құралдарды [3] қаптау [4] және бөлшектерді жөндеу шешімдерін ұсынады. [5].



1-сурет - Инжир. 1. Laser Freeform Fabrication процессінің сызбасы

Осы техниканың артықшылықтарына қарамастан, LFF процесі де, басқа жаңа технологиялар сияқты, өзінің барлық әлеуетін пайдалануда қиындықтарға тап болады. Laser Freeform Fabrication технологиясы, қолданылатын жабдықтар мен материалдарға қатысты өзара байланысты көптеген технологиялық параметрлермен басқарылады. Сонымен қатар, бұл параметрлердің физикалық сапасы мен геометриялық дәлдігін анықтайды. Сондықтан бұл параметрлерді бақылау LFF пайдаланып нысанды жасау кезінде шешуші мәнге ие. Laser Freeform Fabrication -тің оның әр түрлі қосымшалары үшін толық әлеуетін дамыту көптеген мекемелер мен зерттеу топтарында зерттелген. Көптеген зерттеулер жүргізілді, онда белгілі бір технологиялық параметр, белгілі бір өнімнің материалдық қасиеттері немесе осы процеске байланысты физикалық құбылыстар зерттелген [8–10]. Алайда, сезімтал және өзара байланысты технологиялық параметрлердің көптігі Laser Freeform Fabrication процесі үшін түпкілікті өнімнің сапасын анықтайды, процестің жан-жақты моделіне ие бола отырып, жүйенің әрекеті мен процесс параметрлерінің арақатынасы туралы жақсы түсінік береді. Сонымен қатар, мұндай алынған модельдерден алынған білім тәжірибе жұмыстарына кететін уақыт пен күрделілікті азайтады. Бірнеше стационарлық және өтпелі аналитикалық және сандық жылу модельдері жасалды, оларда жылу беру құбылысына байланысты әр түрлі физикалық параметрлер: балқу бастиегінің сипаттамасы мен геометрия, балқытылған бастиегі мен ұнтақ ағынының өзара әрекеттестігі, процестің бүкіл аумағына жылу таралуы және әсер етуі. Бүкіл процесс бойынша технологиялық параметрлердің өзгерістері зерттелді [11–14]. Осы зерттеулердің ішінде бірнеше рет Laser Freeform Fabrication процесінің 2D және 3D модельдеуі туралы хабарлады [15–18]. Алайда, осы модельдеу тәсілдерінде жинақталған

материалдардың геометриясы алдын-ала анықталған (яғни тікбұрышты қимасы бар жұқа қабат) немесе динамикалық түрде әр қадам сайын элементтердің жаңа тобы тік бұрышты қимасы бар жұқа қабырғаға құрылады.

Қабатты қабаттың қабаттасуы және процестің барлық аймағында жылу бөлу сипаттамасы болғандықтан, Laser Freeform Fabrication жасаған бөлшектер жылу кернеулеріне ұшырайды. Жылу әсерінен болатын жиырылу деформацияға әкеліп соғады, демек бөлік бойынша сызаттар мен жарықтардың пайда болуының негізгі себебі болып табылатын қалдық кернеулер пайда болады. Бірнеше мақалада термиялық кернеулердің қабатты өндіруді және әсіресе Laser Freeform Fabrication көмегімен дайындалған бөлшектердің механикалық-металлургиялық қасиеттеріне әсері талқыланды [19-21]. Бірқатар зерттеу топтары термиялық градиенттен туындаған кернеу өрістерін модельдеу тәсілдеріне негізгі құбылыс ретінде біріктіріп, соңғы бөліктің бірнеше механикалық-металлургиялық қасиеттерін анықтайтын зерттеулер жүргізді. Могал және т.б. [22] 2D ақырғы элементті (FE) термомеханикалық модель жасады, ол жылытылатын жылу көзі бар, қатты металдың түзілуін қолдана отырып, қатты формалы өндірістегі қалдық кернеуді болжайды. Никель және т.б. жұмыста лазерлік тұндыру процесінде пайда болатын деформациялар мен кернеуге тұндыру заңдылықтарының әсері зерттелді. Олардың көзқарасы эксперименттер мен математикалық модельдеудің комбинациясы болып табылады. Олардың модельдерін оңайлату үшін материалды тұндыру да, жасырын жылу да, радиация мен конвекцияның осы процеске әсері де қарастырылмаған. Бұдан басқа, төсеніштің төменгі бетінен басқа барлық шекаралар оқшауланады деп болжанды. Оларды зерттеуде тағы бір айтарлықтай жеңілдету жылу көзі ретінде лазерлік сәулемен байланысты болды. FE моделінде барлық тұндыру желісі қыздырылып, содан кейін келесі тұндыру алдында бір мезгілде салқындатылды. Jendrzewski және соавт. [23] лазерлі балқыту әдісімен жабынды басу процесінде уақыт тәуелді температуралық және кернеулі өрістерді алуға болатын FE моделін әзірледі. Олардың байланыссыз модельдеуге жақындауында кернеу өрістері температураны үлестіру нәтижелерін алғаннан кейін бірден есептелді. Бір қабатты тұндыру кезінде 20 параллельді тұндыру сызықтарының әрқайсысының көлденең қимасы 1 0,2 мм² тікбұрышты қимаға тең алдын ала қабылданады. Гхош және т.б. [24] жылу таратумен индукцияланған макро–микро кернеулерді анықтау үшін байланыссыз әдісті қолдану арқылы FE өтпелі процестерін 3D-модельдеу тәсілін енгізді. Модельдеу және эксперименттер бір және екі қабаттар үшін жүргізілді.

Демек, эксперимент нәтижелері бойынша алынған көлденең қималар үлгілеу нәтижесінен ерекшеленді, әсіресе екі өтпелі Шөгү үшін. Сонымен қатар, лазердің қуаты және эксперименттер мен модельдеуде қолданылатын аддитивті материалдардың қасиеттері әртүрлі болды. Алайда, бұл процестің күрделілігіне байланысты, осы саладағы көптеген зерттеулер үлгілеу процедураларын жеңілдету үшін жорамалдардың көп санын қамтыды.

Бұл жұмыста ұнтақты бүрку жүйесінің көмегімен көп қабатты Laser Freeform Fabrication процессінің 3D-сандық үлгілеу тәсілі сипатталған, оның көмегімен әрбір балқытылған қабаттың пішінін болжауға болады, үлгінің кез келген уақытында процестің барлық аумағы бойынша температураны және жылу кернеулерінің өрісін үлестіруге болады. Үлгілеу кезінде жылуөткізгіштік теңдеуі және деформация/кернеу өрісі үшін анықтаушы теңдеулерді тиісті шекаралық және бастапқы жағдайлармен қатар жұптасқан FE әдісін пайдалану арқылы шешіледі.

Марангони құбылыстары, қуаттың сөнуі, құлау бұрышының эффектсі (Дрюдің шағылыстыруы) және модельдеу сияқты әртүрлі технологиялық параметрлердің әсерін модельдеуге қарапайым және нақты математикалық тәсілге ие болу үшін әртүрлі болжамдар мен жеңілдіктер жасалады. Содан кейін тегіс және тығыз емес беттерде модельдеу аймағына аддитивті материалдарды тұндыру алгоритмі ұсынылады. Модельдеудің бұл тәсілі төрт қабатты жұқа қабырғаны модельдеу және температура мен кернеу өрісінің таралуын зерттеу үшін қолданылады, ол Laser Freeform Fabrication әдісімен жасалған барлық бөлшекте жарықтардың пайда болуы және ықтимал қатпарлану негізгі көзі болып табылады. Бұл модель ақыр соңында температура мен кернеуді таратуға Дайындаманы алдын ала қыздыру мен қысудың әсерін зерттеу үшін қолданылады. Қорытылған материалдардың геометриялық ерекшеліктерін және үлгінің жылу тәртібін, сондай-ақ жылу кернеуінен туындаған дайындаманың майысуын қамтитын сандық нәтижелер эксперименттік деректермен расталады.

2 Laser Freeform Fabrication процесінің математикалық көрінісі

Laser Freeform Fabrication процессіндегі температура мен кернеулер/деформациялар өрісін зерттеу үшін, LFF аймағына қатысатын физикалық құбылыстар математикалық түрде ұсынылуы тиіс, содан кейін тиісті басқару теңдеулері арқылы олардың өзара байланыстары негізінде бірге жиналуы тиіс. LFF процесінің физикалық саласы дайындықтан, балқытылған материалдан (яғни, жалатылған), ұнтақ ағынынан және лазерлік сәуледен тұрады. 1. Бұл бөлімде LFF процесінің математикалық тұжырымы негізгі байланысты физикалық құбылыстардың тиісті басқару теңдеулерін енгізу жолымен сипатталады.

2.1. Температура, кернеу және деформация өрістерінің басқару теңдеулері

2.1.1. Температураның таралуы

LFF процесінің барлық аймағында $T(x, y, z, t)$ өтпелі температураны тиісті шекаралық шарттармен бірге 3D жылу өткізгіштік теңдеуінен алуға болады. Жылу өткізгіштің 3D дифференциалдық теңдеуі келесідей өрнектеледі: [25]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t}, \quad (1)$$

мұндағы k (Вт/мК) - жылу өткізгіштігі, c_p (Дж/кгК) - меншікті жылу сыйымдылығы, ρ (кг/м³) - тығыздығы, t (с) - уақыт, ал Q (Вт/м³) - дайындаманың ішінде өндірілетін қуат.

2.1.2. Кернеу мен деформацияның жылу өрістері

Материалдар температураның өзгеруі кезінде кеңейтіледі немесе қысылады, сондықтан термиялық деформация ағымдағы температура мен кернеуге байланысты емес бастапқы температураға байланысты болады. Денедегі жалпы кернеу е түрінде берілуі мүмкін

$$\varepsilon_{mn} = \varepsilon_{mn}^M + \varepsilon_{mn}^T \quad (m, n = 1, 2, 3), \quad (2)$$

мұнда ϵ М (m/m) және ϵ Т (m/m) - механикалық күштермен және температураның өзгерістерімен сәйкес енгізілетін деформациялар. Бұл зерттеуде негізгі назар балқыманың бастиегінің аймағына емес, процестің барлық саласына бөлінгендіктен, икемділік басым бола алмайды және модельдеудің осы тәсіліне кірмейді.

Кернеу деформацияның сызықтық функциясы болып табылатындықтан, сызықты серпімді материалдар үшін анықтайтын теңдеуіш болып табылады [26]

$$\sigma_{ij} = D_{ijmn} \epsilon_{mn} \quad (i, j, m, n = 1, 2, 3), \quad (3)$$

мұнда σ_{ij} (Pa) - серпімді кернеу, ал D_{ijmn} (Pa) - бұл дақтар мен кернеу тензорларының симметриясына байланысты 81 компоненттен тұратын серпімді коэффициенттердің тензоры, барлығы 36 тәуелсіз компоненттер бар.

2.2. Шекаралық шарттар, түзетулер мен болжамдар

Эквалайзерден бірінші шарты (1) - бұл кеңістіктегі екінші ретті және уақыттың бірінші ретті теңдеуі, тиісті шекаралық және бастапқы жағдайлар барлық уақытта тұйық шекараның барлық нүктелері үшін және бір уақытта жеке жағдайлар (яғни бастапқы шарт) тиісінше талап етіледі. Жылу деформациялары мен кернеулерінің өрістері үшін сыртқы күштерді және шекаралық беттегі кез келген орын ауыстыруды ұйғаратын шекаралық шарттарды ескеру қажет. Сонымен қатар, басқару теңдеулері мен олармен байланысты шекаралық шарттарды LSFF процесіне сәйкес келтіру үшін, онымен байланысты негізгі құбылыстарды қарау кезінде кейбір түзетулерді, сондай-ақ есептің күрделілігін төмендету үшін жорамалдарды назарға алу қажет.

2.2.1. Шекара шарттары

Екінші ретті жылу өткізгіш Eq. (1) тиісті бастапқы-маңызды және шекаралық шарттарда шешілуі керек. Бастапқы және негізгі шарттар

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (4)$$

$$T(x, y, z, \infty) = T_0, \quad (5)$$

мұндағы T_0 (K) - қоршаған ортаның температурасы. Конвекция және радиациялық шекараның жай-күйін бірге қарастыруға болады.

Әр түрлі жұмыс параметрлерінің әсерлерін LSFF процесінің математикалық көрінісіне қосу үшін, сондай-ақ шешім процесін жеңілдету үшін келесі түзетулер мен жорамалдар қарастырылады.

2.2.2. Қозғалатын лазерлік сәуле энергиясының таралуы.

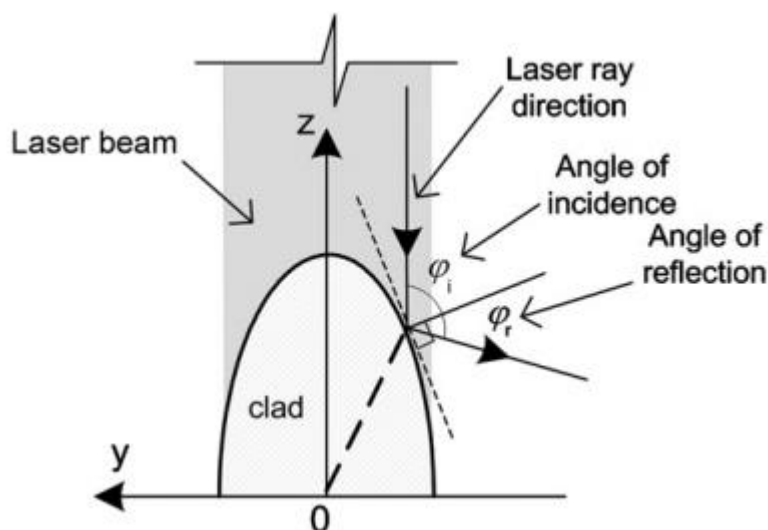
Лазер энергиясын бөлу Gaussian TEM00 режимі ретінде қарастырылады [12].

$$I(r) = \frac{2P_1}{\pi r_1^2} \exp\left[\frac{-2(r^2)}{r_1^2}\right], \quad (9)$$

мұндағы r_1 (m) - лазер сәулесінің радиусы, r (m) - лазер сәулесінің центрінен қашықтық, ал P_1 (W) - лазердің орташа қуаты. Егер импульсті лазер қолданылса, онда $P_1 = EF$; мұндағы E (J) - импульстің энергиясы, ал F (Hz) - лазер импульсінің жиілігі. Егер лазер сәулесі планарлы емес бетке түссе, дөңгелек сәуле сәйкесінше планарлы емес бетке түсіріледі.

2.2.3. Қуат әлсіреуі.

Лазер энергиясының бір бөлігі дайындамаға тікелей сіңеді. Ұнтақ бөлшектер лазер энергиясының бір бөлігін ерітінді бастиегіне сіңіреді және тасымалдайды.



2-сурет - Құлау және шағылысу бұрыштары.

Бұл модельдеудің әсерін ескеру үшін Picasso әдісі әзірленді. [30] қолданылады. Осы әдісті негізге ала отырып, PW дайындамасының жиынтық сіңірілген қуатын анықтауға болады

$$P_w = \beta_e P_l, \quad (13)$$

бұл жерде β_e тиімді сіңіру коэффициенті болады. Бұл β_e әдіс негізінде тиімді сіңіру коэффициентін есептеуге болады

$$\beta_e = \beta_w(1 - \xi) + \eta_p \beta_p \xi + \eta_p \beta_p (1 - \beta_w)(1 - \xi)\xi, \quad (14)$$

мұнда ξ -лазердің әлсіреген қуаты мен қуатының қатынасы, β_w - дайындаманы сіңіру коэффициенті, br-ұнтақты сіңіру коэффициенті, ал η_p - ұнтақ тиімділігі, оны былай жазуға болады.

$$\eta_p = \frac{A_{jet}^{melt}}{A_{jet}}, \quad (15)$$

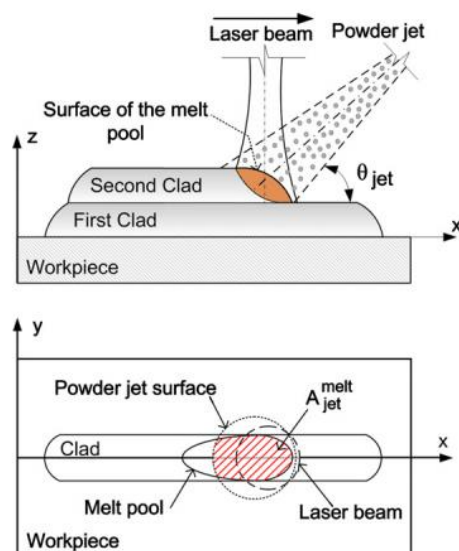
мұнда $A_{jet} (m^2)$ - ұнтақ ағынының беті, ал $A_{jet}^{melt} (m^2)$ реактиві (м2) - 3-суретте көрсетілгендей, балқытылған бастиегін мен ұнтақ ағынының ауданы.

2.2.4. Бірлескен жылу беру коэффициенті.

Есептеу уақытын қысқарту үшін радиациялық және жылу өткізгіштік коэффициенті пайдаланылады, өйткені шекаралық жағдайда анализді сызықты емес етеді [15].

$$h_c = 2.41 \times 10^{-3} \varepsilon T^{1.61}. \quad (16)$$

Басқа термодинамикалық және оптикалық қасиеттері үшін олардың температураға тәуелділігін ескеру үшін процестің температураларындағы орташа мәні есептелген.



3-сурет- Laser Freeform Fabrication көп қабатты процесс кезінде лазерлік шоғырдың және ұнтақ ағынының өзара әрекеттесуінің принципті сұлбасы.

3 Модельдеу әдісі

Бұл жұмыста ұсынылған модельдеу тәсілі екі негізгі кезеңнен тұрады. Бірінші кезең - Laser Freeform Fabrication температураның таралуы мен кернеудің өрістерін есептелген шекара жағдайында басқару теңдеулерін шешу. Екінші сатыда LFF көп қабатты тұндыру процесі үшін жинақталған материалдардың геометриясын динамикалық түрде болжау үшін термиялық талдау нәтижелері қолданылады.

3.1. Теңдеулерді шешудің стратегиясы

3.2. Қорытылған материалдың өтпелі геометриясын 3D болжау

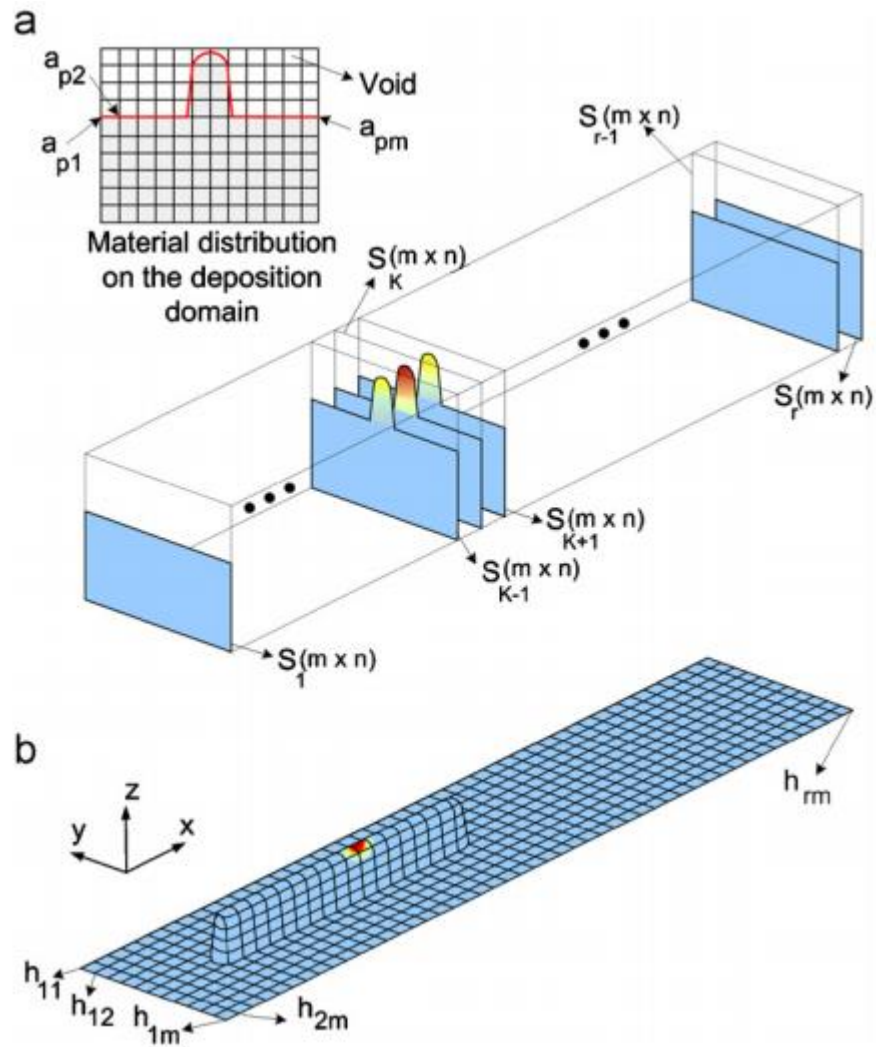
Бұл бөлімде шөгілетін материалдардың геометриясын болжауға, сондай-ақ көп қабатты Laser Freeform Fabrication моделдеуде аддитивті материалдардың әсерін ескеруге болатын әдіс ұсынылған. Бұл әдіс үш негізгі кезеңнен тұрады:

- Балқыманың өтпелі бассейнінің шекарасын анықтау.
- Модельдеу саласына аддитивті материалды қосу.
- Жаңартылған геометрия негізінде FE моделін қайта қарау.

Ұсынған бір қабатты геометрия құру арасындағы үлкен айырмашылық бар[12] және осы жұмыста ұсынылған көп қабатты геометрия басу, бір қабатты тұндыру кезінде балқу бастиегінің шекарасы z координатасына сәйкес келетін жазықтық бетіне орналастырылады деген болжамнан туындайды, ал көп қабатта балқытылған бастиег беті 3-суретте көрсетілгендей тегіс емес. Бұл айырмашылық екінші және кейінгі қабаттардың шөгінділеріне қоспа материалды енгізудің жаңа әдістемесін әзірлеуді қажет етеді.

3.2.1. Балқыманың өтпелі бастиегінің шекарасын анықтау

Моделдеу саласына аддитивті материалдарды қосу үшін ЭКВ теңдеуінің сандық шешімі негізінде төсеніште балқыманың қозғалмалы бастиегінің шекарасын алу қажет. (1) Laser Freeform Fabrication процесінде барлық уақыт қадамдары үшін тиісті шекаралық шарттармен бірге шешіледі. Мұндай жақындағанда дайындама 4 суретте көрсетілгендей x бағытындағы көлденең қималардың g -ге тік бұрышты көлденең қималы дайындамалар үшін.

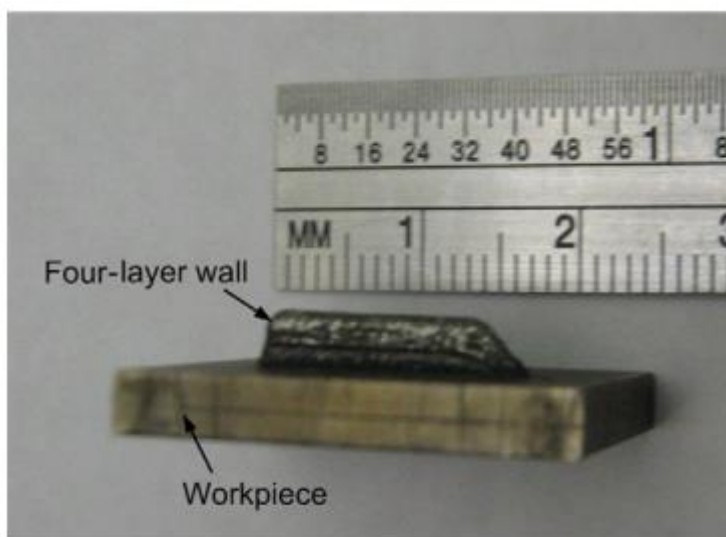


4-сурет - $t = t_s$ кезінде ыстық емес бетінде балқыма бастиегінің облысы бойынша деректерді жинау.

Сондықтан, $a_{ij}(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$, арқылы белгіленген әрбір түйін үшін FE температурасы мен дайындаманың геометриясының шешімі бойынша температура мен координаталар қол жетімді. Айта кету керек, бұл түйіндердің кейбіреуі 4 суретте көрсетілген бос элементтер деп аталады, жұмыс бөлігіне жатпайды; сондықтан олардың сәйкес температурасы балқу бастиегінің шекарасын анықтау процесінде.

4 Тәжірибелік және модельдеу нәтижелерін салыстыру

Алдыңғы бөлімде сипатталған қондырғыны пайдалана отырып, дайындамаға 5-суретте көрсетілгендей төрт қабатты қабырға басылады. Үлгілеу және эксперимент нәтижелерін геометриялық салыстыру әрбір тұндыру қабатынан кейін 6 суретте суреттелген (Балқыма бассейнінің шекарасындағы тордың тығыздығына байланысты пайда болатын ойылған деректерді жою үшін деректерді тегістеуге арналған жылжымалы орташа әдіс қолданылады).



5-сурет -LFF технологиясы бойынша жасалған төрт қабатты жұқа қабырға.

Эксперименттік және сандық нәтижелерден алынған әр қабаттың орташа биіктігін салыстыру, материалды тұндыру үшін әзірленген алгоритм LFF процесінде барлық қабаттардың геометриясын болжай алатындығын көрсетеді (максималды орташа салыстырмалы қателік - 9,29%).

FE талдауының дұрыстығын тексеру үшін дайындаманың екі нүктесіндегі температура дайындау процесінде сипатталған термопаралармен үздіксіз өлшенді. 3-суретте көрсетілген координаталар жүйесі бойынша дайындамадағы осы екі нүктенің орындары тиісінше А және В нүктелері үшін (17, 3, -1,5) және (12, 3, -1,5) мм.

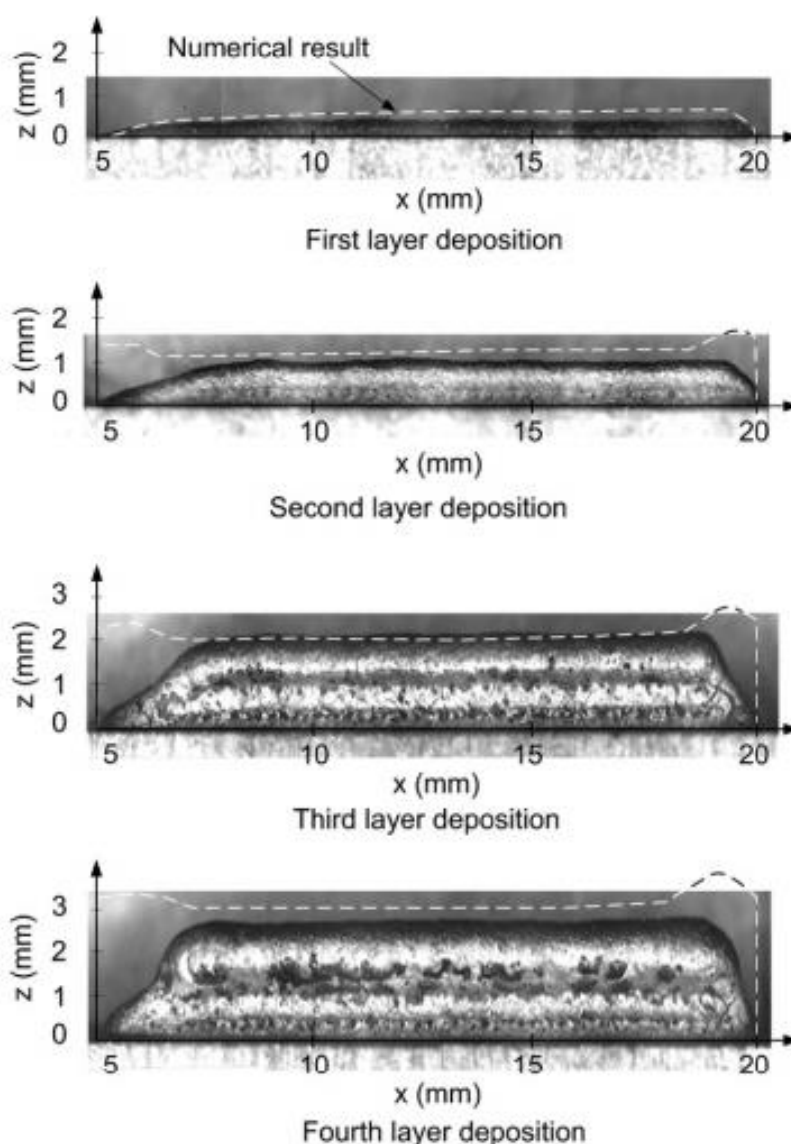
Тәжірибелік нәтижелер модельдеуден алынған нәтижелермен салыстырылды. Мәліметтерді жинау жылдамдығы 140 Гц құрады. Нәтижелер FE моделінен алынған температуралық профильдер эксперименталды түрде өлшенгендерге сәйкес келетіндігін көрсетеді. Бірінші және төртінші қабаттар үшін орташа қателіктер А нүктесі үшін 1,47%, 3,8%, 4,49% және 5,51%, В нүктесі үшін сәйкесінше 1,55%, 3,52%, 4,42% және 5,29% құрайды.

Сондай-ақ, модель жылу кернеулерінен туындаған дайындаманың бұрмалануы тұрғысынан эксперименталды түрде тексерілді. Осы мақсатта төрт қабатты орналастырғанға дейін және одан кейін дайындамадан екі сурет алынды.

D0 нүктесінің z нүктесінде d нүктесінің орналасуы осы екі суреттен анықталды. Ең үлкен абсолюттік қателік эксперименттік және сандық нәтижелер арасындағы 3,75% құрайды. Дайындаманы x, y және z координаталарымен бірге максималды жылжыту болып табылады.

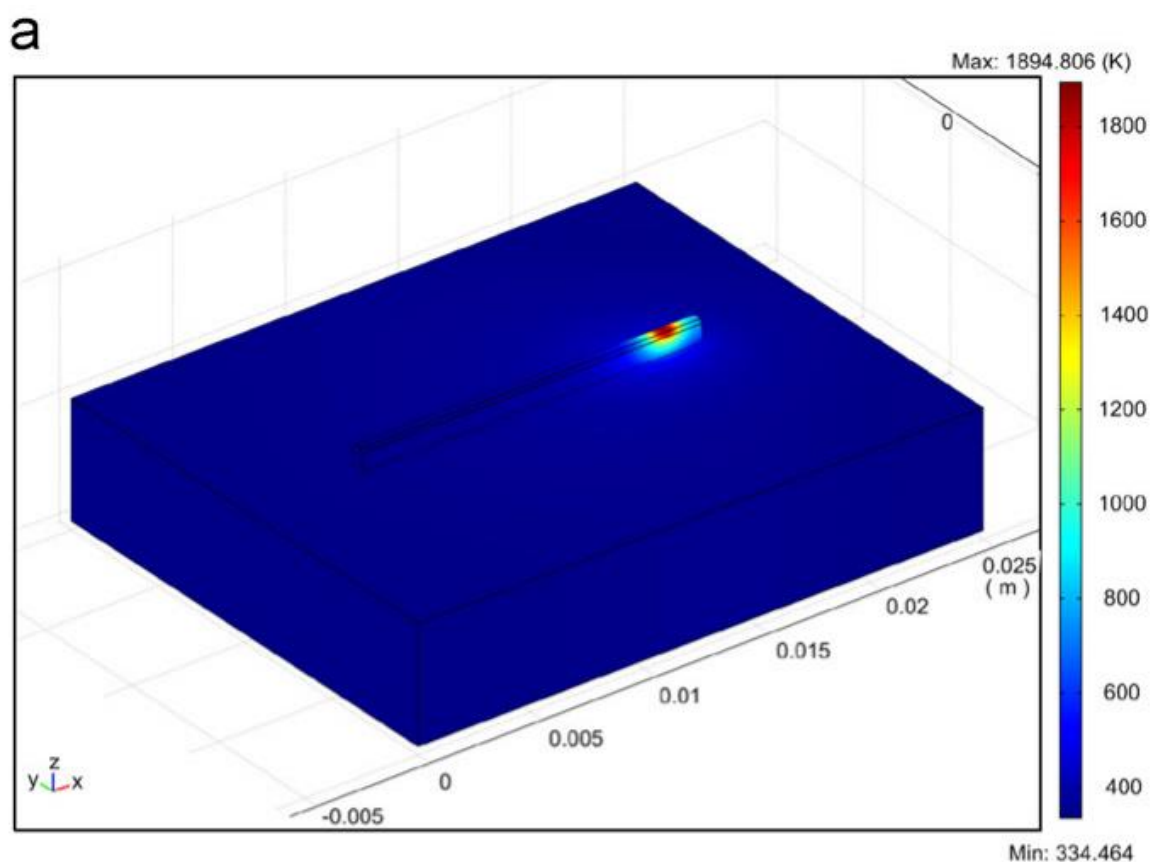
5. Алынған нәтижелерді талдау және талқылау

Модельдеу және эксперимент нәтижелері арасындағы геометриялық салыстыру 6 суретте көрсетілген. Суретте көрсетілгендей, жабылған биіктік оның екі соңғы нүктесінде жоғарылайды. Бұл екі сегменттердегі температураның жоғарылауына байланысты (шөгінді жолындағы максималды температурасы), бұл үлкен балқытылған бастигіне және сәйкесінше ұнтақтардың көбірек жиналуына әкеледі. Жылу көзінің өлшемін ескере отырып, дайындама лазер сәулесінен энергияны жылу өткізгіштік арқылы сіңіру тұрғысынан жылу қабылдағыш рөлін атқарады және Eq-те қарастырылғандай, энергияның бір бөлігін конвекция және сәулелену арқылы айналасына береді.

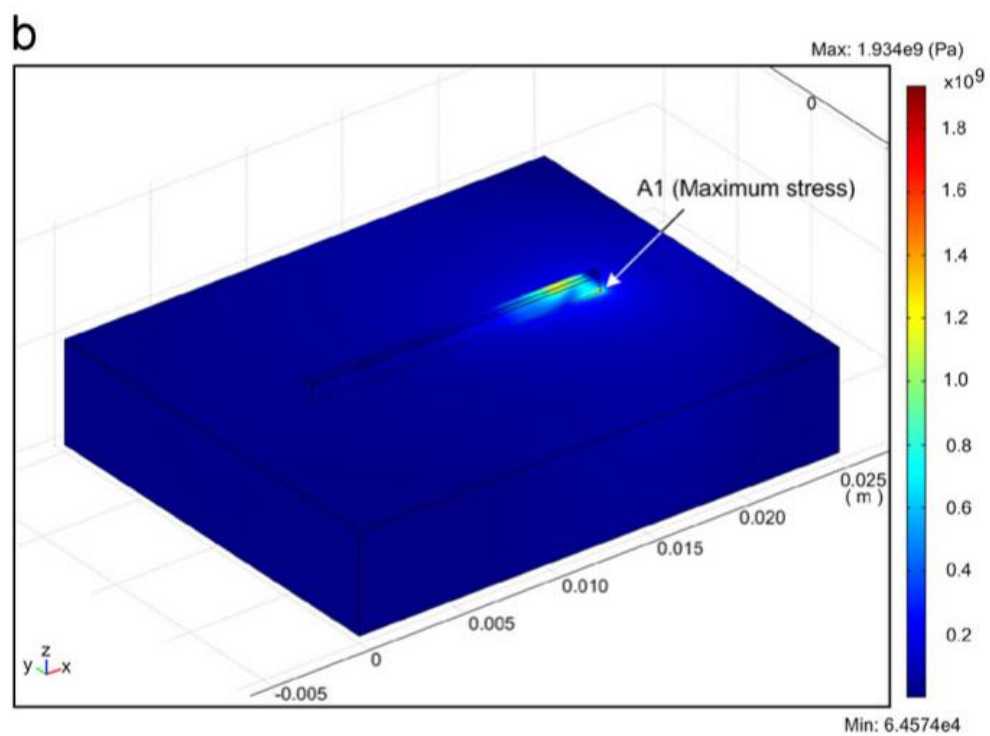


6-сурет -Тәжірибелік және модельдеу нәтижелері арасындағы геометриялық салыстыру.

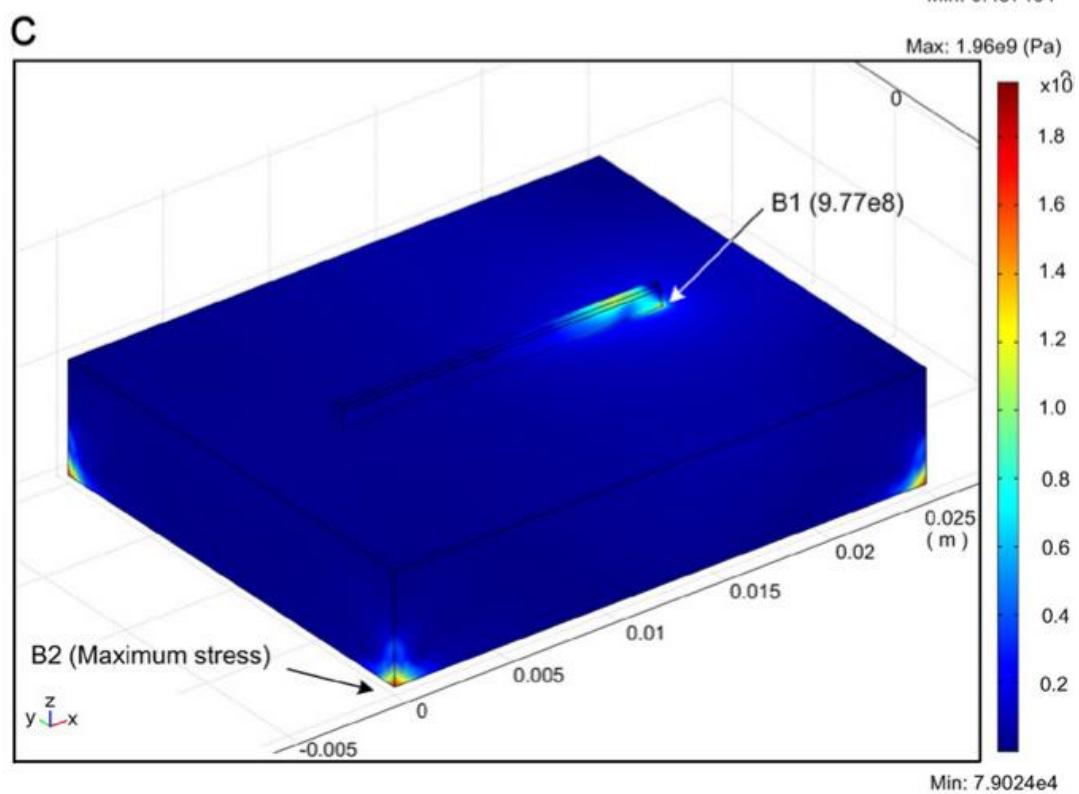
Сондықтан, геометриялық өзгерістерді ескере отырып, бірінші қабат үшін жылу беру сипаты келесі қабаттардан ерекшеленеді. Жоғарғы қабаттар үшін жылу беру сипаты жұқа тік қабырғаға ұқсас, ал бірінші қабаттар үшін физикалық аймақ жылу өткізгіштіктің жартылай соңғы облысымен үйлесімді. Жұқа қабырғаның геометриясын ескере отырып, жұқа қабырғадан конвекция / сәулелену арқылы жылу шығындары қабаттардың көп санының шөгуіне қарай ұлғаяды. Тиісінше, бұл әсер қабырғаның орташа және соңғы сегменттері арасында да байқауға болады. Өйткені энергияның арқылы сәуле төмен өткізгіштігі, онда ұсынған аралас конвекция коэффициенті (шамамен диапазонында 8-186 Вт м²К пайдалана отырып), температура әрбір қабаттың ұшында, сондай-ақ жоғары қабаттарда көтеріледі. Эксперименталды нәтижелердің бұл әсері сандық нәтижелерде айқын емес.



7-сурет-Температураның таралуы.



8-сурет- Қысылмаған дайындамаға арналған кернеу өрісі.



9-сурет- Қысылған дайындамаға арналған кернеу өрісі $t = 9$ С кезінде екінші қабатты жағу үшін.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диплом жазу барысында барлық қойылған мақсаттарға толық қол жеткізілді.

Көп қабатты Laser Freeform Fabrication процесін модельдеу үшін 3D-өтпелі сандық тәсіл әзірленді. Модельдеудің осы тәсілін, балқытылған материалдардың геометриясын, сондай-ақ кернеудің/деформацияның температуралық және термиялық өрістерін пайдалана отырып, барлық дайындау процесі бойында болжанды. Ұсынылған алгоритмнің мүмкіндіктерін көрсету үшін сол материалдан жасалған дайындамада (тот баспайтын болат AISI 304L) Laser Freeform Fabrication әдісі бойынша төрт қабатты жұқа қабырғаны балқыту процесі үлгілендірілді. Модельдің жұмыс қабілеттілігі мен дәлдігі эксперименталды тексерілді. Жұқа қабырғаның геометриясы үлгілеу кезіндегі технологиялық параметрлермен эксперименталды жасалған төрт қабатты қабырғамен салыстырылды. Берілген сандық әдіспен болжанған температураны бөлу процесс процесінде екі Жоғары температуралы термопар көмегімен екі нүктенің температурасын өлшеу және оларды сандық нәтижелермен салыстыру арқылы тексерілді.

Кернеулердің / деформациялардың жылу өрістерінен туындаған дайындаманың майысуы жұқа қабырғаны дайындау үшін пайдаланылатын дайындаманың майысуын эксперименталды өлшеу арқылы да тексерілді. Жалпы, Laser Freeform Fabrication көп қабатты процесін модельдеу үшін әзірленген модельдің нәтижелері модельдеудің осы тәсілі осы процесті болжау үшін жақсы әлеуетке ие екенін көрсетті және сондықтан осы әдістемені одан әрі зерттеу үшін, әсіресе эксперименталды қиын немесе зерттеу мүмкін емес аспектілер үшін пайдаланылуы мүмкін. Қорытындылай келе, бұл жұмыстың негізгі нәтижелері келесі:

- Ұнтақты ұстау тиімділігі жоғары қабаттар үшін артады, ал тиімді сіңіру коэффициенті азаяды.
- Жоғары қабаттардың шеткі нүктелеріндегі температуралар мен термиялық кернеулер балқыма геометриясының және жылу беру механизмінің өзгеруіне байланысты.
- Дайындаманың қысқыш критикалық жерлерде (мысалы, тұндыру аймағында) термиялық кернеуді азайтуы мүмкін.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Hu D, Mei H, Kovacevic R. Improving solid freeform fabrication by laser based additive manufacturing. *Proc Inst Mech Eng—Part B—Eng Manuf* 2002;216(9):1253–64.
- 2 Paul CP, Jain A, Ganesh P, Negi J, Nath AK. Laser rapid manufacturing of Colmonoy-6 components. *J Opt Lasers Eng* 2006;44:1096–109.
- 3 Zhong M, Liu W, Ning G, Yang L, Chen Y. Laser direct manufacturing of tungsten nickel collimation component. *J Mater Process Technol* 2004;147(2):167–73
- 4 Dubourg L, Ursescu D, Hlawka F, Cornel A. Laser cladding of MMC coatings on aluminum substrate: influence of composition and microstructure on mechanical properties. *J Wear* 2005;258(11–12): 1745–54
- 5 Kim JD, Kang KH, Kim JN. Nd:YAG laser cladding of marine propeller with hastelloy C-22. *J Appl Phys A, Mater Sci Process* 2004;79(4–6):1583–5
- 6 Hu D, Kovacevic R. Sensing, modeling and control for laserbased additive manufacturing. *Int J Mach Tool Manuf* 2003;43(1): 51–60.
- 7 Nickel AH, Barnett DM, Prinz FB. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing. *J Mater Sci Eng A* 2001;317: 59–64.
- 8 Adak B, Nash P, Chen D. Microstructural characterization of laser cladding of Cu-30Ni. *J Mater Sci* 2005;40(8):2051–4.
- 9 Niederhauser S, Karlsson B. Mechanical properties of laser clad steel. *J Mater Sci Technol* 2003;19(11):1611–6.
- 10 Huang YL, Liang GY, Su JY, Li JG. Interaction between laser beam and powder stream in the process of laser cladding with powder feeding. *J Model Simulat Mater Sci Eng* 2005;13(1):47–56.
- 11 Huang YL, Liu J, Ma NH, Li JG. Three-dimensional analytical model on laser-powder interaction during laser cladding. *J Laser Appl* 2006;18(1):42–6
- 12 Toyserkani E, Khajepour A, Corbin SF. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder deposition: effects of powder feedrate and travel speed on the process. *J Laser Appl* 2003;15(3): 153–61.
- 13 Pinkerton AJ, Li L. Modeling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances. *J Phys D: Appl Phys* 2004;37:1885
- 14 Han L, Liou FW, Phatak KM. Modeling of laser cladding with powder injection. *J Metall Mater Trans B* 2004;35(6):1139–50.
- 15 Hu D, Kovacevic R. Modeling and measuring the thermal behavior of the molten pool in closed-loop controlled laser-based additive manufacturing. *J Eng Manuf* 2003;212(Part B):441–52.

- 16 Vasinonta A, Beuth JL, Griffith ML. A process map for consistent build condition in the solid freeform fabrication of thin-walled structures. *J Manuf Sci Eng* 2001;123(4):615–22
- 17 Han L, Phatak KM, Liou FW. Modeling of laser deposition and repair process. *J Laser Appl* 2005;17(2):89
- 18 Costa R, Vilar L, Reti T, Deus AM. Rapid tooling by laser powder deposition: process simulation using finite element analysis. *J Acta Mater* 2005;53:3987–99.