

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

Карсыбаев Асылбек Анварбек уғлы

«Бұйымдарды дайындау кезінде Lasform 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 Lasform аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

5B071200 – Машина жасау

Орындаған

Карсыбаев Асылбек Анварбек уғлы

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 Карсыбаев Асылбек Анварбек уғлы

Тақырыбы «Бұйымдарды дайындау кезінде Lasform аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

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

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

Дипломдық жобаның бастапқы берістері бұйым жасау кезінде Lasform технологиясын қолдануды зерттеу

Дипломдық жобада қарастырылатын мәселелер тізімі

а) *Lasform технологиясының құрылымын анықтау*

б) *Эксперимент жүргізу шарттары мен тәртібі*

в) *Нәтижелер және талқылау*

Ұсынылған негізгі әдебиет: 26 атау

Дипломдық жобаны дайындау  
**КЕСТЕСІ**

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәліметтер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Кіріспе. Lasform технологиясының құрылымын анықтау		
Эксперименттік параметр және процедура		
COMSOL модельдеу		
Нәтижелер 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 \_\_\_\_\_ Карсыбаев А. А.

Күні «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 ж.

## АҢДАТПА

Негізгі дипломдық жобада аддитивті технологиялардың ішіндегі Lasform процесінің жұмыс жасауын толық зерттелді. Lasform процесі сапаны сақтау және жобалық талаптарды қанағаттандыру кезінде осы проблемаларды шешу үшін әзірленген. Lasform механикалық өндеуге қарама-қарсы тәсілді қолданады, онда материал қосылады және жойылады.

Lasform процесінде CO<sub>2</sub> лазер сәулесінің фокустық аймағына енгізілген газдандырылған және гидридті-дегидридті титан легіріленген ұнтақтар қолданылады [29]. Фокустау аймағы CAD кесігімен анықталғандай, X-Y жазықтығында жылжиды. Бұған қажетті пішінді жаңғырту үшін сандық басқарылатын манипуляторды жүргізу арқылы қол жеткізіледі. Титан шөгіндісінің қатты қабаты басып шығарады және процесс Z бағытында келесі қабат үшін қайталаынады. Эксперименттік параметр және процедурасын анықтадық. COMSOL модельденді.

Жұқа қабырғалы құрылымның механикалық қасиеттері мен микроқұрылымдағы лазерлік металдардың орналасуы зерттелді. COMSOL модельдеу талдауының көмегімен Lasform процесінің қайталанатын қуаты оңтайландырылды. Кеуектілігі, микроқұрылымы, қаттылығы және созылу қасиеті бір реттік қабатты және жұқа қабырғалы құрылымды қайта құру тәжірибелерімен талданды. Модельдеу моделі балқытылған бастиектің геометриялық анализі және термпары өлшеуімен тексерілген. Максималды температура градиентінің бағыты оңтайлы қалпына келтіру қуатында тұрақты болып қалады, бұл жұқа және ұзын бағаналы дендриттердің пайда болуына ықпал етеді.

## АННОТАЦИЯ

Основной дипломный проект - детальное изучение процесса Lasform в аддитивных технологиях. Процесс Lasform предназначен для решения этих проблем, сохраняя при этом качество и отвечая требованиям дизайна. Lasform использует противоположный метод обработки, при котором материал добавляется и удаляется.

В процессе Lasform используются газообразные и гидрид-дегидридные порошки титанового сплава, вводимые в фокальную зону лазерного луча CO<sub>2</sub> [29]. Зона фокусировки перемещается в плоскости X-Y, как определено в разделе САД. Это достигается с помощью манипулятора с цифровым управлением для воспроизведения желаемой формы. Твердый слой титана выпадает в осадок, и процесс повторяется в направлении Z для следующего слоя. Определялись экспериментальный параметр и методика. COMSOL был смоделирован.

Изучены механические свойства тонкостенных конструкций и расположение лазерных металлов в микроструктуре. С помощью анализа моделирования COMSOL была оптимизирована повторяющаяся сила процесса Lasform. Свойства пористости, микроструктуры, жесткости и удлинения были проанализированы экспериментами по восстановлению однослойных и тонкостенных конструкций. Модель моделирования была проверена с помощью геометрического анализа расплавленной головки и измерения термодпары. Направление максимального градиента температуры остается постоянным при оптимальной мощности восстановления, что способствует образованию тонких и длинных столбчатых дендритов.

## ANNOTATION

The main diploma project is a detailed study of the Lasform process in additive technologies. The Lasform process is designed to address these issues while maintaining quality and meeting design requirements. Lasform uses the opposite method of machining, in which the material is added and removed.

The Lasform process uses gaseous and hydride-dehydride titanium alloy powders introduced into the focal zone of the CO<sub>2</sub> laser beam [29]. The focus area moves in the X-Y plane as defined by the CAD section. This is achieved by running a numerically controlled manipulator to reproduce the desired shape. The solid layer of titanium precipitates and the process is repeated in the Z direction for the next layer. We determined the experimental parameter and procedure. COMSOL was modeled.

The mechanical properties of thin-walled structures and the location of laser metals in the microstructure were studied. With the help of COMSOL modeling analysis, the repetitive power of the Lasform process was optimized. Porosity, microstructure, stiffness and ductility were analyzed by experiments on the reconstruction of single-layer and thin-walled structures. The modeling model was tested by geometric analysis of the molten head and measurement of the thermocouple. The direction of the maximum temperature gradient remains constant at the optimum recovery power, which contributes to the formation of thin and long columnar dendrites.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Lasform технологиясының құрылымын анықтау	11
2 Эксперимент жүргізу шарттары мен тәртібі	16
2.1. Қалыптау жағдайы және материалы	16
2.2. Эксперименттік параметр және процедура	18
3 COMSOL модельдеу	19
3.1. Басқарушы теңдеулер	19
3.2. Бастапқы және шекаралық шарттар	19
3.3. Жылу көзі	20
4. Нәтижелер және талқылау	22
4.1. COMSOL модельдеуін тексеру	22
Қорытынды	25
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	26



## КІРІСПЕ

Aeromet Lasform технологиясы Джон Хопкинс университетінің қолданбалы физика зертханасымен, Пенсильвания штаты университетінің қолданбалы зерттеулер зертханасымен және MTS Systems Corporation корпорациясымен бірге 1996 және 1997 жылдары жүргізілген зерттеулерге негізделген.

Компания титан қорытпаларынан жасалған жоғары сапалы конструкциялардың лазерлік аддитивті өндірісіне маманданған.

Ұнтақты беру жүйесі осы процеске байланысты массаның жоғары жылдамдығымен ұнтақтың тұрақты ағынын қамтамасыз етеді.

Lasform процесі коммерциялық қол жетімді материалдарды пайдаланады және пайдалану алдында аз өңдеуді немесе термиялық өңдеуді талап ететін бөлшектер жасайды.

**Бұл дипломдық жұмыстың негізгі мақсаты** Lasform технологиясын толық ашып зерттеу болып табылады.

Бұл RP пайдаланушылары мен дизайнерлері үшін үлкен қызығушылық тудыратын ерекше ерекшелік [27]. AeroMet процесі инертті ортада жүретіндіктен, Lasform процесін ниобийде, ренийде және басқа реактивті материалдарда қолдануға болады, олар қорғаныш өңдеу атмосферасын қажет етеді.

Lasform процесі сапаны сақтау және жобалық талаптарды қанағаттандыру кезінде осы проблемаларды шешу үшін әзірленген. Lasform механикалық өңдеуге қарама-қарсы тәсілді қолданады, онда материал қосылады және жойылады.

Бұл процесс шөгінді және тұндырғыш ұнтақты еріту үшін қуатты СО-лазерді пайдалануды қамтиды. Бөлік осы тұндыру процесінде түзілген және CNC басқару көмегімен лазермен қозғалады. CNC жүйесі 3D қатты моделінен тікелей пайда болатын құрал жолымен жүреді. 4-суретте қолданылатын жабдықтар көрсетілген.

Lasform процесінде СО<sub>2</sub> лазер сәулесінің фокустық аймағына енгізілген газдандырылған және гидридті-дегидридті титан легірленген ұнтақтар қолданылады [29]. Фокустау аймағы CAD кесігімен анықталғандай, X-Y жазықтығында жылжиды. Бұған қажетті пішінді жаңғырту үшін сандық басқарылатын манипуляторды жүргізу арқылы қол жеткізіледі. Титан шөгіндісінің қатты қабаты басып шығарады және процесс Z бағытында келесі қабат үшін қайталады. Жаңа қабат алдыңғы қабатпен біріктіріледі, бұйым

аяқталғанға дейін бұл процес жалғаса береді. Процесс аргонмен толтырылған ортада жүзеге асырылады.

Лазер сәулесінің қуаты балқытылған бастиегі энергиясының тиімді сіңуіне ғана емес, сонымен бірге жылу өткізгіштікке де әсер етуі мүмкін [22]. Осылайша, лазерлік қалпына келтіру қуаты (PW) талдау үшін маңызды фактор ретінде таңдалады. Осы зерттеуде пайдаланылған қуаттылықтың диапазоны 400 Вт-тан 1600 Вт-қа дейін, 200 Вт-қа дейінгі аралықпен.

Lasform - бұл сызықты емес өтпелі жылу алмасудың типтік процесі. Lasform процесінің өтпелі термиялық талдауына келетін болсақ, материалдардың жылу қасиеттері, оның ішінде тығыздығы, жылу өткізгіштігі және меншікті жылу сыйымдылығы температурамен байланысты.

## **1 Lasform технологиясының құрылымын анықтау**

1997 жылы AeroMet™ компаниясы MTS Systems Corporation (MTC) корпорациясының еншілес компаниясы ретінде құрылды. Қазіргі уақытта Миннесота штаты Эден-Преридегі AeroMet зауытында орнатылған Lasform бірінші жүйесі АҚШ армиясының зерттеу зертханасымен (ARL) ынтымақтастықта Абердин сынақ полигонында, Мэриленд штатында пайдаланылады.

Aeromet Lasform технологиясы Джон Хопкинс университетінің қолданбалы физика зертханасымен, Пенсильвания штаты университетінің қолданбалы зерттеулер зертханасымен және MTS Systems Corporation корпорациясымен бірге 1996 және 1997 жылдары жүргізілген зерттеулерге негізделген.

Компания титан қорытпаларынан жасалған жоғары сапалы конструкциялардың лазерлік аддитивті өндірісіне маманданған.

AeroMet лазерлік қалыптау машинасы (1-суретте көрсетілген) 3м×3м×1,2м дейінгі өлшемді өңдеу инертті камерасында бөлшектерді дайындауды қолдайтын үш осьті жүйе болып табылады. X және Y осьтері бөлшекті жылжытатын екі осьтік үстелмен қамтамасыз етіледі.

Z қозғалысына коаксиалды лазерді жеткізу/ұнтақ-саптаманың жинағын тігінен жылжыту арқылы қол жеткізіледі. Жұмыс көлемінің өте үлкен камерасы құрамында 150 бет/мин оттегі бар аргонның қорғаныс атмосферасында өте үлкен компоненттерді өңдеуге мүмкіндік береді. 18кВт-тық CO<sub>2</sub> лазері жоғары тұндыру жылдамдығын алуға мүмкіндік береді.

Ұнтақты беру жүйесі осы процеске байланысты массаның жоғары жылдамдығымен ұнтақтың тұрақты ағынын қамтамасыз етеді.

Lasform процесі коммерциялық қол жетімді материалдарды пайдаланады және пайдалану алдында аз өңдеуді немесе термиялық өңдеуді талап ететін бөлшектер жасайды.

Материал металл ұнтақтар түрінде болғандықтан, құрамдас бөліктердің геометриясында нақты құрамды элементтерді нақты уақыт режимінде араластыру арқылы «сұрыпталған қорытпаларды» шығаруға болады.



1-сурет-АероМет-тің Lasform машинасы (АероМет Inc. ұсынысы)

Бұл RP пайдаланушылары мен дизайнерлері үшін үлкен қызығушылық тудыратын ерекше ерекшелік [27]. АероМет процесі инертті ортада жүретіндіктен, Lasform процесін ниобийде, ренийде және басқа реактивті материалдарда қолдануға болады, олар қорғаныш өңдеу атмосферасын қажет етеді.

Артықшылықтары.

1. Титанның жоғары сапалы бөліктері. Lasform тез өндірілетін жоғары сапалы титан бөлшектеріне арналған. Бөлшектерді механикалық сынау коммерциялық таза Ti, Ti-6Al-4V және Ti-5Al-2.5 Sn стандарттары сақталатынын көрсетеді.

2. Өте үлкен бөліктер. Жұмыс көлемі өте үлкен болғандықтан, оттегі жоқ инертті атмосфераны сақтай отырып, өте үлкен бөлшектерді біркелкі орналастыруға болады.

3. Шығындар мен уақытты үнемдеу. Лазермен қалыптасқан бұл нысандар ең аз өңдеуді және термоөңдеуді талап етеді. Бұл материалдардың жоғары қалдықтарын, қымбат технологиялық жабдықтарды және ұзақ уақыт өңдеу есебінен шығындар мен уақытты айтарлықтай үнемдеуді қамтамасыз етеді.

4. Икемділік. Lasform материал құрамын барлық бөлшектерге түрлендіруге өзінің қабілеттілігінің арқасында икемділікті қамтамасыз етеді, бұл микроқұрылым және механикалық қасиеттері құрамға байланысты өзгеруі мүмкін функционалдық градиенттік материалдың пайда болуына әкелуі мүмкін. Осылайша, әр түрлі бөліктердің құрамы функционалдық және экономикалық талаптарға сәйкес бапталуы мүмкін.

Кемшіліктері.

1. Өте үлкен физикалық өлшем. Бұл жүйені орналастыруға өте үлкен орын керек.

2. Материалдың алуан түрлілігі. Бұл жүйе тек титан бөлшектері мен металдарды өндіруге мамандандырылған. Сондықтан оны полимер бөлшектерін немесе функционалды емес модель ретінде пайдаланылатын бөлшектерді шығару үшін пайдалануға болмайды.

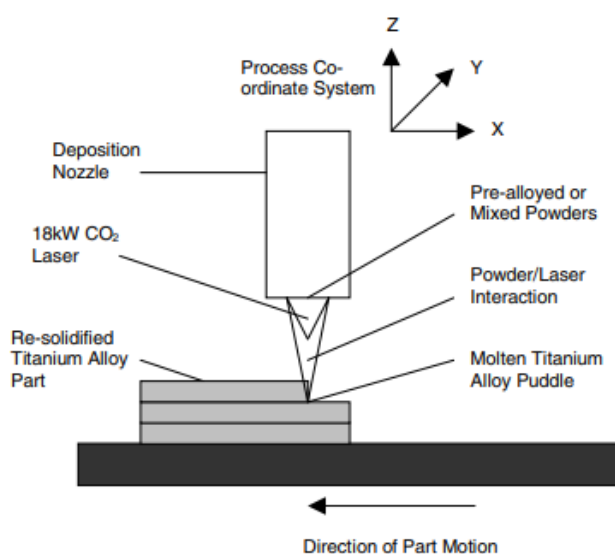
Lasform процесі 2-суретте суреттелген. Процесс келесідей сипатталады [28]:

1. AeroMet лазерін қалыптастыру процесі бөлікті CAD көрсетуден басталады. Содан кейін бұл лазер құратын жүйенің траектория жолдарын құру үшін жеке бағдарламалық жасақтама арқылы басқарылады. Бұл жолдар лазерлік пішіндеу жүйесіне машиналық нұсқаулық ретінде жіберіледі.

2. Фокусталған лазер сәулесі сәуленің астына титанның тақтайшасын шамамен x-y траекториясында жылжыту арқылы қалаған бөліктің құрылымдық пішінін анықтайды.

3. Титанмен алдын ала легирленген ұнтақ балқытылған металдың басына енгізіліп, қалаған қалыптың қалыптасуын қамтамасыз етеді, өйткені балқытылған нүкте нысаналы тақтайшаға қалаған қалыпта өтеді.

4. 3D-құрылым суретті қайталау, қажетті геометрияның үстіндегі қабаттан кейінгі қабат және Суретті қайталау үшін фокустық нүктені бір қабатқа жоғары индекстеу жолымен жасалады. Қабаттар арасындағы металлургия тұтастығы бар бұл қабат-қабат тізілімі механикалық алдын ала нысан деп аталатын қалаған тұтас қабырғалы құрылымды жасайды. Пост-процестерге термиялық өңдеу, өңдеу және тексеру кіреді.

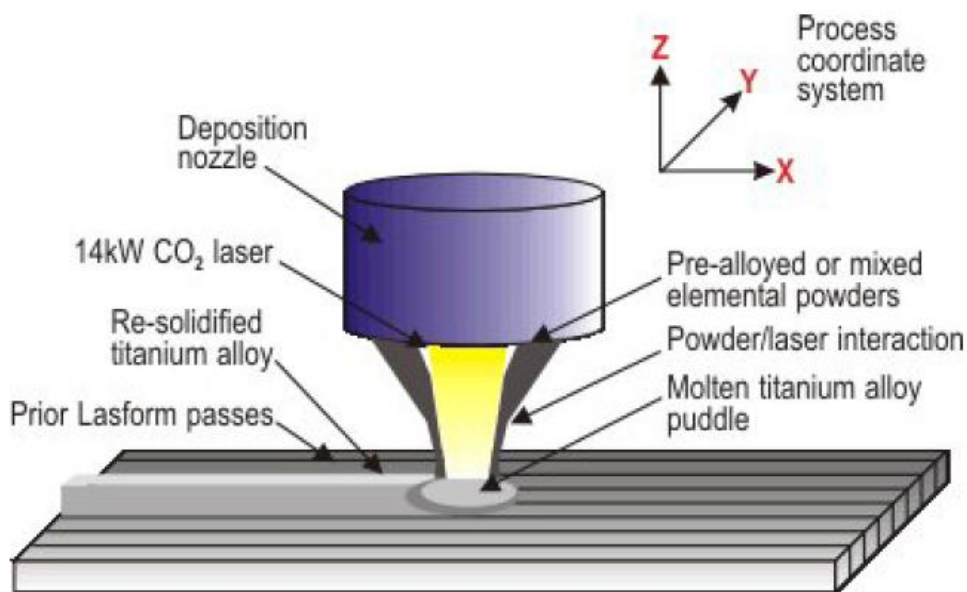


2-сурет-Lasform процесінің схемалық диаграммасы

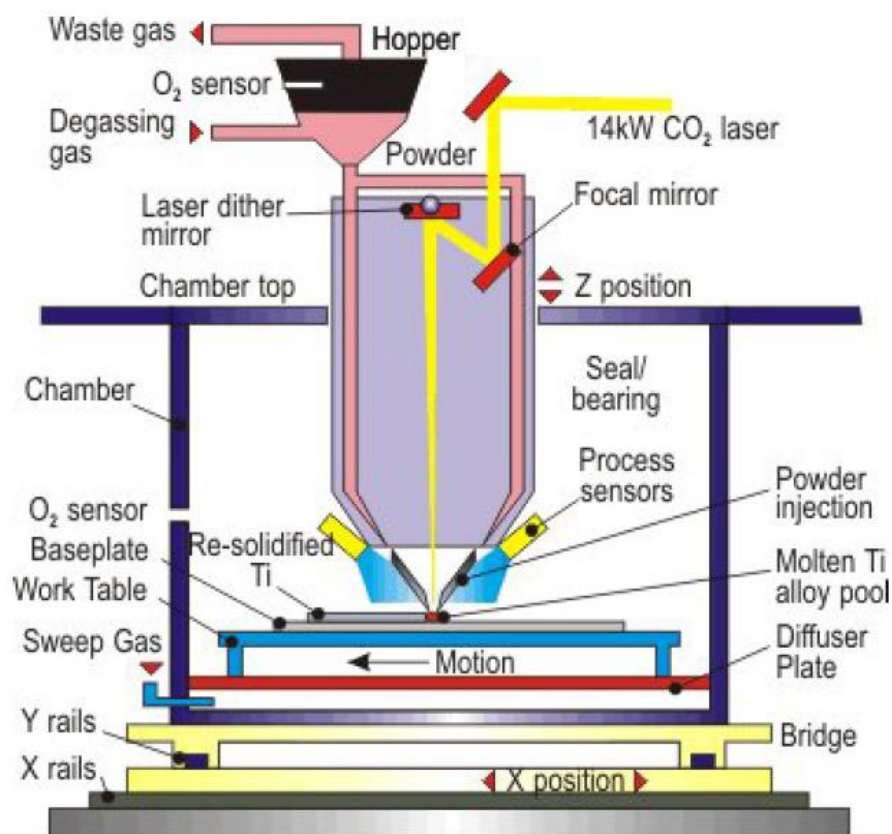
Lasform процесі сапаны сақтау және жобалық талаптарды қанағаттандыру кезінде осы проблемаларды шешу үшін әзірленген. Lasform механикалық өңдеуге қарама-қарсы тәсілді қолданады, онда материал қосылады және жойылады. Лазерлік тозаңдату процесінің көмегімен (3-суретте көрсетілген) форманың жақын сызбасы құрылады, содан кейін соңғы өлшемге дейін өңделеді.

Бұл процесс шөгінді және тұндырғыш ұнтақты еріту үшін қуатты СО-лазерді пайдалануды қамтиды. Бөлік осы тұндыру процесінде түзілген және CNC басқару көмегімен лазермен қозғалады. CNC жүйесі 3D қатты моделінен тікелей пайда болатын құрал жолымен жүреді. 4-суретте қолданылатын жабдықтар көрсетілген.

Процесс балқытылған материалды ауаның әсерінен қорғау үшін инертті газы бар камерада өтеді. Әдетте аргон қолданылады, оттегі деңгейі 50 ppm төмен. Бұл тамаша механикалық қасиеттері бар кеуекті материалды алуға әкеледі.



3-сурет-Lasform Процесі



4-сурет-Lasform процесінде қолданылатын жабдық

Lasform процесінде CO<sub>2</sub> лазер сәулесінің фокустық аймағына енгізілген газдандырылған және гидридті-дегидридті титан легіріленген ұнтақтар қолданылады [29]. Фокустау аймағы CAD кесігімен анықталғандай, X-Y жазықтығында жылжиды. Бұған қажетті пішінді жаңғырту үшін сандық басқарылатын манипуляторды жүргізу арқылы қол жеткізіледі. Титан шөгіндісінің қатты қабаты басып шығарады және процесс Z бағытында келесі қабат үшін қайталаынады. Жаңа қабат алдыңғы қабатпен біріктіріледі, бұйым аяқталғанға дейін бұл процес жалғаса береді. Процесс аргонмен толтырылған ортада жүзеге асырылады.

Металлдарды лазерлік тікелей тұндыру арқылы жоғары сапалы титан пішіндерін шығару бірнеше технологияларды біріктіруді қажет етеді. Оларға жоғары қуатты лазерлік сәулелерді шығару және жеткізу, металл ұнтағын өңдеу, робототехника, процестерді сезіну және бақылау және қоршаған ортаны бақылау кіреді. AeroMet компаниясы осы технологияларды біріктіріп, коммерциялық негізде Lasform ұсынған.

Lasform процесі перспективті ұшақтарға арналған монолитті арматураланған қабырғалы конструктивтік элементтерді дайындау кезінде сәтті

қолданылуы мүмкін [29]. Lasform процесін пайдалана отырып, титан ұнтағынан (қорытпасынан) дерлік, форманың қалаған құрылымын құру арқылы ғана алынуы мүмкін.

Сондай-ақ титандан ерекшеленетін қорытпалар жүйелерінде қолдану салалары анықталады. Мысалы, ұста-пресс өнеркәсібі металл тікелей тез және арзан салыстырмалы үлкен нысандары мен штамптарын өндіру қажеттілігі бар. Қазіргі уақытта Lasform процесінде пайдаланылуы мүмкін материалдарды зерттеу жүргізілуде, сондай-ақ қолданыстағы Lasform машинасын одан әрі жетілдіру жүргізілуде.

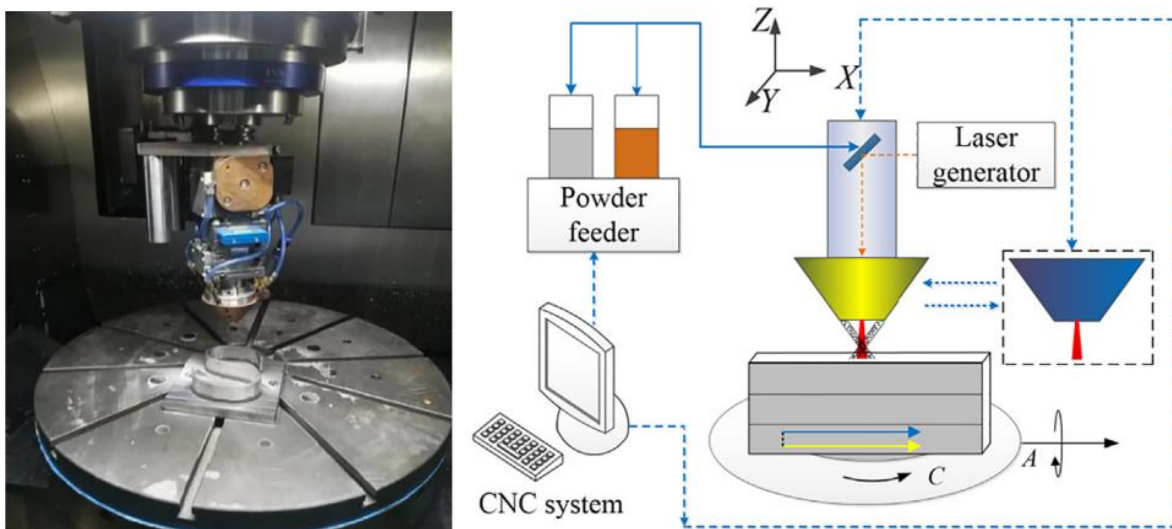
Lasform процесін шектеу. Lasform процесінде барлық компоненттер мен материалдар бірдей мүмкін емес. Көптеген бөліктер тым күрделі және технологияның қазіргі мүмкіндіктерінен тыс. Сондай-ақ, аз қорытпалардан жасалған компоненттер қарапайым өндірістік процестерді қолдану арқылы үнемді шығара алады.



## 2 Эксперимент жүргізу шарттары мен тәртібі

### 2.1. Қалыптау жағдайы және материалы

Осы зерттеу аясындағы барлық эксперименттер 5(a) суретте көрсетілгендей, HEIDENHAIN iTNC640 CNC жүйесімен жабдықталған SVW80C3D өңдеу орталығында аддитивті өндірістік қосылыстарды өңдеу орталығында өткізілді. SVW80C-3D өңдеу орталығы ең алдымен 5 осьті лазерлік қаптамадан және автоматиканы ауыстырғыштан, ұнтақтағыштан және азот генераторынан тұратын өңдеу жүйесінен тұрады. Төрт ұнтақ түтігі лазер сәулесінің айналасында біркелкі бөлінеді. Азот генераторы мен ауа компрессоры газды қорғаушы ретінде азот шығарады және ұнтақты саптаманың концентраттарына жеткізеді. Амалдық жүйе ұнтақты беруді лазермен жоюды уақытында тоқтату үшін ұнтақты бергішті басқара алады. 5 (b) суретте гибриді Lasform принципі көрсетілген.



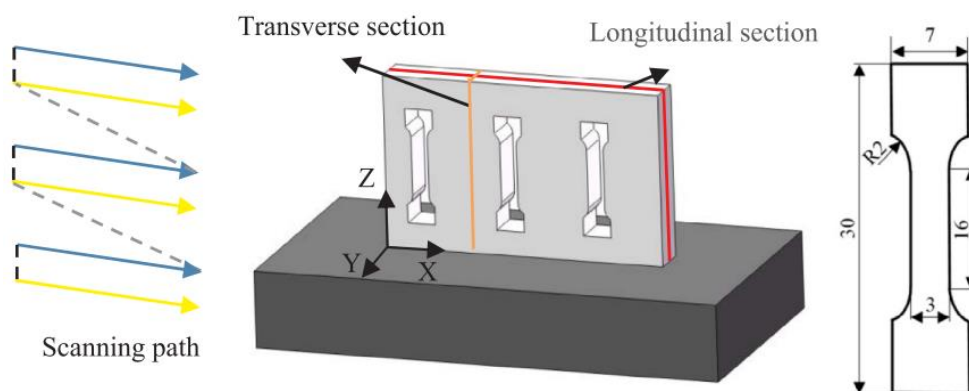
5-сурет- (a) SVW80C-3D аддитивті және (б) SVW80C-3D орталығында Lasform процесс принципі

316L ұнтағының өте жақсы өзгергіштігі мен адгезиясы болғандықтан, бұл зерттеу лазерлік тұндыру материалы ретінде 316L ұнтағын таңдады (1 кестені қараңыз). Ұнтақ бөлшегінің орташа мөлшері 45–75 мкм құрайды. Тәжірибені жеңілдету және коррозия процесін жеңілдету үшін, тот баспайтын болаттан жасалған 316L болат өлшемі  $160 \times 160 \times 20$  мм<sup>3</sup> болатын төсеніш ретінде таңдалады.

## 2.2. Эксперименттік параметр және процедура

Лазер сәулесінің қуаты балқытылған бастиегі энергиясының тиімді сіңуіне ғана емес, сонымен бірге жылу өткізгіштікке де әсер етуі мүмкін [22]. Осылайша, лазерлік қалпына келтіру қуаты (PW) талдау үшін маңызды фактор ретінде таңдалады. Осы зерттеуде пайдаланылған қуаттылықтың диапазоны 400 Вт-тан 1600 Вт-қа дейін, 200 Вт-қа дейінгі аралықпен.

Басқа технологиялық параметрлер келесідей орнатылды: лазерді сканерлеу жылдамдығы ( $V_s$ ) 360 мм / мин, лазерлік қаптамалы ұнтақ - 1200 Вт, ұнтақты беру жылдамдығы ( $D_m$ ) 13,5 г / мин. Сонымен қатар, лазер сәулесінің фокусынан балқытылған бастиегге дейінгі қашықтық (defocusing арақашықтық) 13,5 мм, ал Z-өсуінің іргелес қабаттар арасындағы ара қашықтық 0,6 мм болды. Бұл параметрлер жарияланған зерттеуге негізделді [23].



6-сурет- Созылу кезінде кесу жағдайы және үлгі өлшемдері.

Лазерлік тұндыру жүзеге асырылған кезде, әрбір қаттыланған қабаттан кейін LR өңдеу жүргізілді. Lasform процесінің сканерлеу режимі 6-суретте көрсетілгендей, бір-біріне қарай сызықты орналастыру болды.

### 3 COMSOL модельдеу

#### 3.1. Басқарушы теңдеулер

Lasform - бұл сызықты емес өтпелі жылу алмасудың типтік процесі. Lasform процесінің өтпелі термиялық талдауына келетін болсақ, материалдардың жылу қасиеттері, оның ішінде тығыздығы, жылу өткізгіштігі және меншікті жылу сыйымдылығы температурамен байланысты. Алдыңғы зерттеулердің үлкен саны Lasform процессінің температурасының таралуы жылу өткізгіштігінің теңдеуі екенін дәлелдеді [24]

$$Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho C_p V_Z \cdot \nabla T$$

мұндағы  $Q$  - жылу кірісі,  $\rho$  - тығыздық ( $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ),  $C_p$  - нақты жылу ( $\text{J} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $T$  - температура (K),  $\lambda$  - жылу өткізгіштік ( $\text{В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ), ал  $V_Z$  - тордың қозғалу жылдамдығы ( $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ).  $\rho$ ,  $C_p$  және  $\lambda$  әдебиетке сәйкес анықталған [25,26].

#### 3.2. Бастапқы және шекаралық шарттар

$T_0$  төсенішінің бастапқы температурасы 293K (қоршаған орта температурасы) тең болады. Имитациялық модельге радиациялық және конвективті шығындарды қамтитын жылу ағынының үздіксіз шарты қолданылады. Төсеніштің тік беті (1-аймақ) үшін төсеніш пен ауаның жылу алмасуы ескеріледі және шекаралық шарт ретінде анықталады.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -h_c(T - T_0) \quad (2)$$

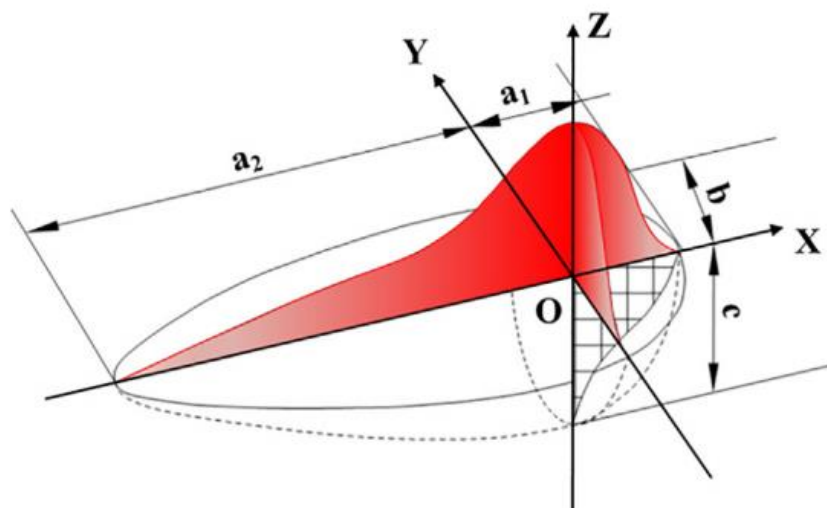
Жылу беру және жылу сәулеленуі  $T > 600^\circ\text{C}$  кезінде орын алады. Осы екі облыстың шекаралық шарттары мынадай түрде көрсетілуі мүмкін

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = qA_c - h_c(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (3)$$

мұнда  $h_c$ -конвекция коэффициенті [28] ( $\text{W} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ), [29].  $\sigma$ -Стефан-Больцман тұрақтысы ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ),  $q$ -жылу ағынының тығыздығы ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), ал лазерлі балқыту процесі үшін сіңіру коэффициенті. Жоғарыда келтірілген жылуөткізгіштік теңдеулері беттің тиісті шекарасына қолданылады.

### 3.3. Жылу көзі

Бұл жұмыста дененің жылу көзі Голдак ұсынған қосарлы эллипсоидты жылу көздерінің моделін қабылдайды [30], өйткені беттік жылу көзі (мысалы, Гаусси бетінің жылу көзі) балқытылған бассейнің ену әсерін елемейді.



7-сурет- Қос эллипсоид жылу көзінің моделі.

7 суретте көрсетілгендей, эллипсоидтағы жылу ағынының тығыздығын X осінің оң және теріс бағыты бойынша бөлу келесідей өрнектеледі:

1-кесте 316L тот баспайтын болаттан жасалған химиялық құрамы (%).

Элемент	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Fe
(Wt%)	< 0.03	< 2	< 0.045	< 0.03	< 1	10–14	16–18.5	2–3	Қалдығы

$$\begin{cases} q_p(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_1PW}{(a_1 + a_2)ba_1\pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \\ q_n(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_2PW}{(a_1 + a_2)ba_2\pi^{3/2}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right) \end{cases}, f_1 + f_2 = 2 \quad (4)$$

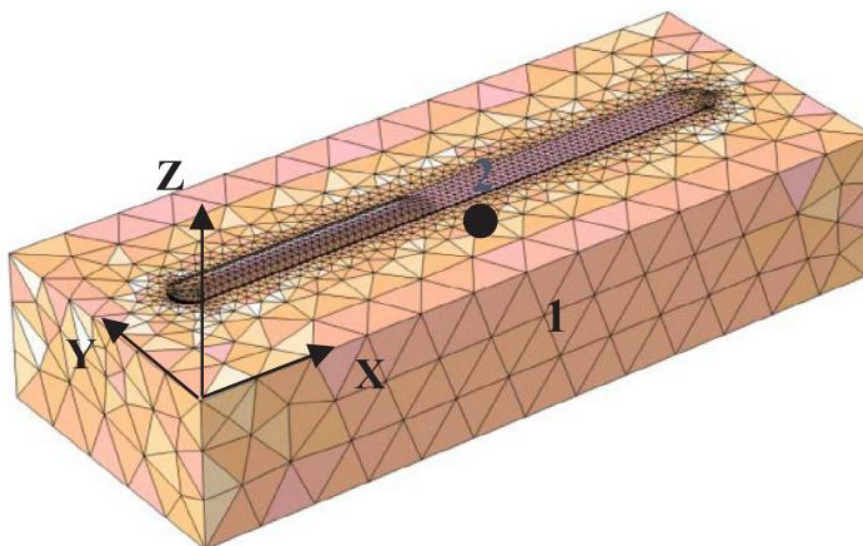
мұнда  $a_1, a_2, b, c$ -қос эллипсоидтік жылу көзі моделінің формасының параметрлері.  $a_1, a_2, b, c$  эмпирикалық мәндері алдыңғы эксперименттер негізінде тиісінше 0,64, 0,86, 1,4 және 0,65 (мм) құрайды.  $PW$ -лазерлік сәуленің қуаты (W).  $f_1, f_2$ -жылудың таралу коэффициенттері.

8-суретте имитациялық модельде пайдаланылатын үшбұрышты торлардың мысалы көрсетілген. 1,2 облыстары төсеніш және қаптау аймағы

болып табылады. Балқытылған бастиегінің пайда болуы 2 аймағында жоғарғы бетінің кеңейтуі мүмкін. Қозғалатын генерациялау тор жүзеге асырылады COMSOL Multiphysics негізделген ерікті Лагранжево Эйлердіктәдісі. Егер температура қаптау материалының балқу температурасынан жоғары болса, онда z бағытында ғимараттың жоғарғы бетінің VZ қозғалыс жылдамдығын былайша есептеуге болады [33]

$$\begin{cases} V_Z = D_m \sqrt{1 - (x^2 + y^2)/r^2} / \rho \pi r^2 \\ x^2 + y^2 < r^2 \\ x = x_0 - V_S t \end{cases} \quad (6)$$

мұндағы  $r$  - лазер сәулесінің диаметрі (мм),  $D_m$  - ұнтақты беру жылдамдығы,  $V_S$  - лазерлік сканерлеу жылдамдығы.



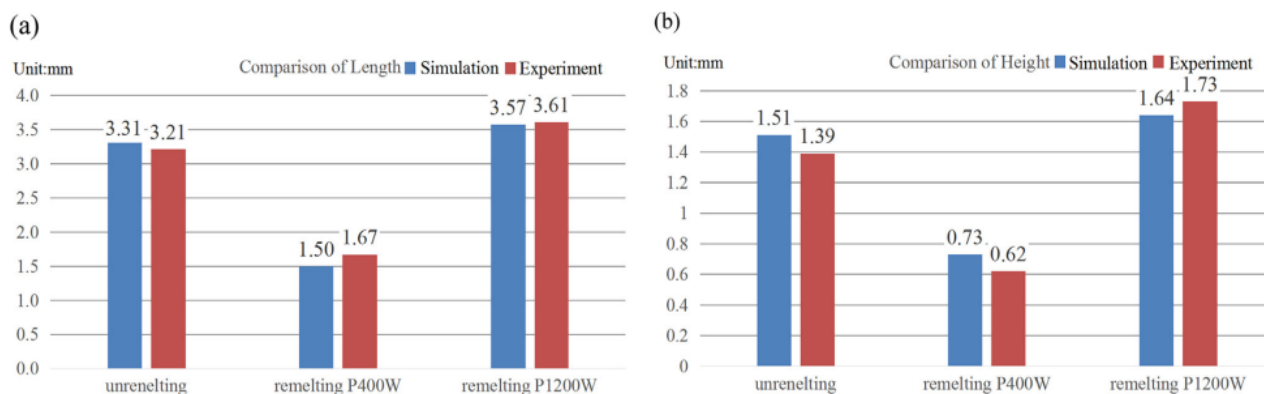
8-сурет- Төсеніштің торлы моделі және қаптау қабаты.

Еқ сәйкес. (6), VZ лазер сәулесінің пішініне және ұнтақтардың тығыздығының таралуына байланысты. Lasform процесі кезінде ұнтақты таралу жағдайы Гаусстың таралуына сәйкес келеді.

## 4. Нәтижелер және талқылау

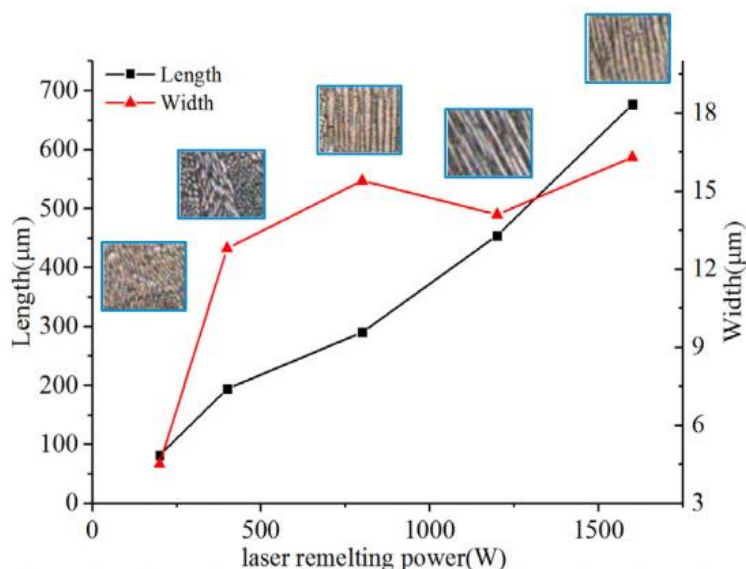
### 4.1. COMSOL модельдеуін тексеру

Талдауды жеңілдету үшін Lasform процесін сілтеме жасай отырып, температуралық өрісті алу үшін Lasform процесін (PW = 400 Вт, 1200 Вт) COMSOL модельдеді. COMSOL моделіне сәйкес балқу нүктесіндегі модельденген изотерма (316L-ден 1385°C) балқытылған/рольденген бастиектің профилін көрсете алады. Салыстыру үшін, балқытылған/тазартылған бастиектің нақты профилін жоғары жылдамдықты камера қабылдады.



9-сурет-Балқытылған бассейнің мөлшерін COMSOL модельдеу мен эксперимент арасындағы салыстыру: (a) ұзындығын салыстыру; (b) биіктігін салыстыру.

Сонымен қатар, 9-суреттегі нәтижелер балқытылған бассейнің модельделген ұзындығы мен биіктігі [33] модельдеу моделіне қарағанда дәлірек және максималды ауытқу <10% құрайды. Сондықтан модельдеу моделі Lasform процесі үшін балқытылған бастиектің нақты жергілікті геометриялық сипаттамасын бере алады. Сонымен қатар, К-термопарамен өлшенген (Қуаты = 400 Вт, 1200 Вт) температурасы модельдеу нәтижелерімен салыстырылды.



9-сурет- ұзындығын және PDAS нәтижелерін (PW = 200 ~ 1600 Вт).

2-ші нүктеден төсем қабатының шекарасына дейінгі қашықтық - 1,5 мм. 10-суретте көрсетілгендей, модельденген температура қисығы эксперименттік қисыққа сәйкес келеді және максималды ауытқу  $50^{\circ}\text{C}$ -тан төмен болады. Осылайша, жылу өрісін модельдеу тиімді және жылу градиенттерін, қатаю жылдамдығын және салқындату уақытын келесі бөлімде есептеуге негіз болады.

Бұл зерттеуде гибриді лазерлік релельдердің өзара әрекеттесу механизмі және жұқа қабырғалы құрылымның механикалық қасиеттері мен микроқұрылымдағы лазерлік металдардың орналасуы зерттелді. COMSOL модельдеу талдауының көмегімен Lasform процесінің қайталанатын қуаты оңтайландырылды. Кеуектілігі, микроқұрылымы, қаттылығы және созылу қасиеті бір реттік қабатты және жұқа қабырғалы құрылымды қайта құру тәжірибелерімен талданды. Нәтижелер мен талдау негізінде келесідей қорытынды жасауға болады:

- 1) Бір жолақты қаптамалы қабат үшін гибриді Lasform процесі тері тесігін тиімді азайтып, қатпарлы қабатқа жабысатын ұнтақтарды кетіру арқылы кедір-бұдыр бетті қалпына келтіреді. Оңтайлы лазерді кетіру қуаты лазердің қапталу қуатына тең болады, ал қалыптасқан қаптама толығымен кетеді. Қаттылық тұрғысынан Lasform өңдеу бүкіл қапталған қабаттың қаттылығын жақсартып алады. Сонымен қатар, оңтайлы қалпына келтіру қаттылықтың градиентін төменгі қабаттан жоғарғы қабатқа дейін төмендетеді.
- 2) Модельдеу моделі балқытылған бастиектің геометриялық анализі және термодинамикалық өлшеуімен тексерілген. Максималды температура

градиентінің бағыты оңтайлы қалпына келтіру қуатында тұрақты болып қалады, бұл жұқа және ұзын бағаналы дендриттердің пайда болуына ықпал етеді. Бағаналы дендриттердің бағыты біркелкі болады, ал еңкею бұрышы  $75^\circ$  құрайды.

- 3) Бөлімнің морфологиялық талдауы негізінде оңтайлы қуатпен Lasform өңдеу кеуектілікті тиімді азайтып қана қоймайды, сонымен қатар қабаттың мөлшері мен бағытын біркелкі етіп, қатайту құрылымын қалыптастырады. Lasform гибридті процесі қалыптасқан құрылымның созылу күші мен беріктігін едәуір жақсарта алады, әсіресе созылмалы жұқа қабырғалы құрылымға қарағанда созылу 37% асады.



## ҚОРЫТЫНДЫ

Диплом жазу барысында барлық қойылған мақсаттарға толық қол жеткізілді.

Бұл зерттеуде гибридті лазерлік релельдердің өзара әрекеттесу механизмі және жұқа қабырғалы құрылымның механикалық қасиеттері мен микроқұрылымдағы лазерлік металдардың орналасуы зерттелді.

COMSOL модельдеу талдауының көмегімен Lasform процесінің қайталанатын қуаты оңтайландырылды. Кеуектілігі, микроқұрылымы, қаттылығы және созылу қасиеті бір реттік қабатты және жұқа қабырғалы құрылымды қайта құру тәжірибелерімен талданды.

Бір жолақты қаптамалы қабат үшін гибридті Lasform процесі тері тесігін тиімді азайтып, қатпарлы қабатқа жабысатын ұнтақтарды кетіру арқылы кедір-бұдыр бетті қалпына келтіреді. Оңтайлы лазерді кетіру қуаты лазердің қапталу қуатына тең болады, ал қалыптасқан қаптама толығымен кетеді. Қаттылық тұрғысынан Lasform өңдеу бүкіл қапталған қабаттың қаттылығын жақсарта алады. Сонымен қатар, оңтайлы қалпына келтіру қаттылықтың градиентін төменгі қабаттан жоғарғы қабатқа дейін төмендетеді.

## ПАЙДАЛАНЫЛГАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 G.K.L. Ng, A.E.W. Jarfors, G. Bi, H.Y. Zheng, Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition, *Appl. Phys. A* 97 (3) (2009) 641.
- 2 A.G. Demir, B. Previtali, Investigation of remelting and preheating in SLM of 18Ni300 maraging steel as corrective and preventive measures for porosity reduction, *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 93 (5–8) (2017) 2697–2709.
- 3 G. Kasperovich, J. Haubrich, J. Gussone, G. Requena, Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting, *Mater. Des.* 105 (2016) 160–170.
- 4 A.J. Sterling, B. Torries, N. Shamsaei, S.M. Thompson, D.W. Seely, Fatigue behavior and failure mechanisms of direct laser deposited Ti–6Al–4V, *Mater. Sci. Eng., A* 655 (2016) 100–112.
- 5 B. Bax, R. Rajput, R. Kellet, M. Reisacher, Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition, *Addit. Manuf.* 21 (2018) 487–494.
- 6 B.K. Barnhart, Characterization of Powder and the Effects of Powder Reuse in Selective Laser Melting. Doctoral dissertation, Case, Western Reserve University, 2017.
- 7 B. Zhang, L. Dembinski, C. Coddet, The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder, *Mater. Sci. Eng. A* 584 (2013) 21–31.
- 8 Wilson, P. N., Bocchini, P. J. Tailoring high strength aluminum alloys for additive manufacturing through the use of grain refiners. U.S. Patent, (2019) 15/687,330.
- 9 V.A. Popovich, E.V. Borisov, A.A. Popovich, V.S. Sufiiarov, D.V. Masaylo, L. Alzina, Impact of heat treatment on mechanical behaviour of Inconel 718 processed with tailored microstructure by selective laser melting, *Mater. Des.* 131 (2017) 12–22.
- 10 F. Brenne, A. Taube, M. Pröbstle, S. Neumeier, D. Schwarze, M. Schaper, T. Niendorf, Microstructural design of Ni-base alloys for high-temperature applications: impact of heat treatment on microstructure and mechanical properties after selective laser melting, *Prog. Additive Manufact.* 1 (3–4) (2016) 141–151.
- 11 J. Schanz, M. Hofele, S. Ruck, T. Schubert, L. Hitzler, G. Schneider, H. Riegel, Metallurgical investigations of laser remelted additively manufactured AlSi10Mg parts: Metallurgische Untersuchungen von laserstrahlunggeschmolzenen additiv hergestellten AlSi10Mg Bauteilen, *Materialwiss. Werkstofftech.* 48 (5) (2017) 463–476.

- 12 A. Chaudhuri, Y. Raghupathy, D. Srinivasan, S. Suwas, C. Srivastava, Microstructural evolution of cold-sprayed Inconel 625 superalloy coatings on low alloy steel substrate, *Acta Mater.* 129 (2017) 11–25.
- 13 C.R. Ciubotariu, D. Frunzăverde, G. Mărginean, V.A. Șerban, A.V. Bîrdeanu, Optimization of the laser remelting process for HVOF-sprayed Stellite 6 wear resistant coatings, *Opt. Laser Technol.* 77 (2016) 98–103.
- 14 S. Zhou, Y. Xu, B. Liao, Y. Sun, X. Dai, J. Yang, Z. Li, Effect of laser remelting on microstructure and properties of WC reinforced Fe-based amorphous composite coatings by laser cladding, *Opt. Laser Technol.* 103 (2018) 8–16.
- 15 Z. Cai, X. Cui, Z. Liu, Y. Li, M. Dong, G. Jin, Microstructure and wear resistance of laser clad Ni-Cr-Co-Ti-V high-entropy alloy coating after laser remelting processing, *Opt. Laser Technol.* 99 (2018) 276–281.
- 16 K. Wei, M. Lv, X. Zeng, Z. Xiao, G. Huang, M. Liu, J. Deng, Effect of laser remelting on deposition quality, residual stress, microstructure, and mechanical property of selective laser melting processed Ti-5Al-2.5 Sn alloy, *Mater. Charact.* 150 (2019) 67–77.
- 17 S. Griffiths, M.D. Rossell, J. Croteau, N.Q. Vo, D.C. Dunand, C. Leinenbach, Effect of laser rescanning on the grain microstructure of a selective laser melted Al-Mg-Zr alloy, *Mater. Charact.* 143 (2018) 34–42.
- 18 E. Yasa, J. Deckers, J.P. Kruth, The investigation of the influence of laser remelting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts, *Rapid Prototyping J.* 17 (5) (2011) 312–327.
- 19 E. Yasa, J.P. Kruth, J. Deckers, Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting, *CIRP Ann.* 60 (1) (2011) 263–266.
- 20 X. Zhao, H. Zhang, Y. Liu, Effect of laser surface remelting on the fatigue crack propagation rate of 40Cr steel, *Results Phys.* 12 (2019) 424–431.
- 21 D. Cong, H. Zhou, Z. Ren, H. Zhang, L. Ren, C. Meng, C. Wang, Thermal fatigue resistance of hot work die steel repaired by partial laser surface remelting and alloying process, *Opt. Lasers Eng.* 54 (2014) 55–61.
- 22 P. Michaleris, Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes, *Finite Elem. Anal. Des.* 86 (2014) 51–60.
- 23 P. Li, Y. Gong, Y. Xu, Y. Qi, Y. Sun, H. Zhang, Inconel-steel functionally bimetal materials by hybrid directed energy deposition and thermal milling: Microstructure and mechanical properties, *Archives Civil Mech. Eng.* 19 (3) (2019) 820–831.
- 24 W. Ya, B. Pathiraj, S. Liu, 2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding, *J. Mater. Process. Technol.* 230 (2016) 217–232.

25 M. Belgacem, B. Thierry, G. Jean-Claude, Investigations on thermal debinding process for fine 316L stainless steel feedstocks and identification of kinetic parameters from coupling experiments and finite element simulations, *Powder Technol.* 235 (2) (2013) 192–202.

26 N. Yang, J. Yee, B. Zheng, K. Gaiser, et al., Process-structure-property relationships for 316L stainless steel fabricated by additive manufacturing and its implication for component engineering, *J. Therm. Spray Technol.* 26 (4) (2017) 610–626.