

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

Нұрғожа Берік Ақылбекұлы

«Өнімді жасау кезінде Laser Engineered Net Shaping 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 Laser Engineered Net Shaping аддитивті  
технологиясын қолдануды зерттеу»

5B071200 – Машина жасау

Орындаған

Нұрғожа Берік Ақылбекұлы

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 Нұрғожа Берік Ақылбекұлы

Тақырыбы «Өнімді жасау кезінде Laser Engineered Net Shaping аддитивті технологиясын қолдануды зерттеу»

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

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

Дипломдық жобаның бастапқы берістері Laser Engineered Net Shaping технологиясының құрылымын зерттеу, және толық қанды ашып талдау

Дипломдық жобада қарастырылатын мәселелер тізімі

а) LENS аддитивті технологияларына арналған материалдар

б) LENS жүйесінің термомеханикалық сипаттамасы

в) Базалық плитаны дайындау

г) Қысым-деформациялық талдау

с) CoFe өзекшелерінің магнитострикциялық сипаттамалары

Ұсынылған негізгі әдебиет: 14 атау

Дипломдық жобаны дайындау  
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәліметтер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Кіріспе. Лазерлер негізі. Nd: YAG-лазер		
Laser Engineered Net Shaping - лазерлік инженерлік торлы қалыптау		
LENS жүйесінің термомеханикалық сипаттамасы		
LENS жүйесін пайдалана отырып, аддитивті жасалған CoFe өзекшелерінің магнитострикциялық сипаттамалары		

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 \_\_\_\_\_ Нұрғожа Б. А.

Күні «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 ж.

## АҢДАТПА

Дипломдық жұмыста аддитивті технологияларды пайдалану кезінде Laser Engineered Net Shaping (LENS) - лазерлік инженерлік торлы қалыптау жүйесін пайдалана отырып, лазер негізіндегі жылдам прототиптеу процесі баяндалады. Қысқаша аддитивті технологиялар негізіне, электромагниттік сәулелену табиғатына ақпарат беріліп, өндірістік лазер типтеріне шолу жасалып, соның ішінде қатты затты лазер Nd: YAG-лазеріне анықтама беріледі. LENS жүйесіне сипаттама беріліп, оның артықшылықтары мен кемшіліктері айтылады. LENS жүйесін пайдаланып өндірістегі бұйымдарды жасауға қажетті материалдарға сипаттама беріліп, олардың құрамдары, температуралық ерекшеліктері, өзге материалдармен әрекеттесу қабілеттілігі қарастырылады. Бұл LENS жүйесіне термомеханикалық сипаттама жасалды. Ол сипаттама негізінде эксперимент жүргізіліп, теориямен сәйкестігі салыстырылады. Оның ішінде базалық плитаны дайындау, бұрмалау процестері жүргізіліп, қысым-деформациялық талдау жүргізіледі. Эксперимент нәтижелеріне есептеулер жасалады. LENS жүйесін пайдалана отырып, аддитивті жасалған CoFe өзекшелерінің магнитострикциялық сипаттамалары жасалды.

## АННОТАЦИЯ

При использовании аддитивных технологий в дипломной работе излагается процесс быстрого прототипирования на основе лазера с использованием системы лазерной инженерной сетки - Laser Engineered Net Shaping (LENS). В основе краткой аддитивной технологии дается информация о природе электромагнитного излучения, проведен обзор типов производственного лазера, в том числе выдается определение лазера Nd: YAG-лазера с твердым веществом. Система LENS представлена описанием и описанием ее преимуществ и недостатков. С использованием системы LENS дается характеристика материалов, необходимых для изготовления изделий на производстве, рассматриваются их составы, температурные особенности, способность взаимодействовать с другими материалами. Для этой системы LENS была разработана термомеханическая характеристика. На основе описания проводится эксперимент и сопоставляется с теорией. В том числе проводится процесс изготовления, фальсификации базовой плиты, проводится напорно-деформационный анализ. Производится расчет результатов эксперимента. С использованием системы LENS были разработаны магнестрикционные характеристики аддитивных стержней CoFe.

## ANNOTATION

When using additive technologies, the thesis describes the process of rapid prototyping based on a laser using the Laser Engineered Net Shaping (LENS) system. The brief additional technology is based on information about the nature of electromagnetic radiation, an overview of the types of production laser, including the definition of an Nd: YAG laser with a solid substance. The LENS system is presented with a description and description of its advantages and disadvantages. Using the LENS system, the characteristics of materials necessary for manufacturing products in production are given, their compositions, temperature characteristics, and the ability to interact with other materials are considered. A thermomechanical characteristic was developed for this LENS system. Based on the description, an experiment is performed and compared with the theory. This includes the manufacturing process, falsification of the base plate, and pressure-strain analysis. The results of the experiment are calculated. Magnetostrictive characteristics of CoFe additive rods were developed using the LENS system.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1. Аддитивті технология	11
1.1. Лазерлер негізі	11
1.2. Электромагниттік сәулелену табиғаты	11
1.3. Өндірістік лазер типтері	12
1.3.1. Қатты затты лазерлер	13
1.3.2. Nd: YAG-лазер	14
2. Лазер негізіндегі жылдам прототиптеу процестері	14
2.1. Laser Engineered Net Shaping - лазерлік инженерлік торлы қалыптау (LENS)	15
3. LENS адитивті технологияларына арналған материалдар	18
4. LENS жүйесінің термомеханикалық сипаттамасы	19
4.1. Теория	20
4.2. Эксперимент	20
4.3. Базалық плитаны дайындау	21
4.4. Бұрмалау	21
4.5. Қысым-деформациялық талдау	21
4.6. Микроскопия	22
4.7. Есептеулер	22
5. LENS жүйесін пайдалана отырып, аддитивті жасалған CoFe өзекшелерінің магнострикциялық сипаттамалары	24
5.1. Нәтижелер және талқылау	25
Қорытынды	28
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	29



## Кіріспе

Қазіргі заманға сай индустрия бәсекелестік тұрғысынан қарағанда, шығарылатын өнім менен пайдаланылатын материалдардың сан алуан түрлілігіне және қалыптасқан үрдістер жағдайында оның экологиялық тарапына ерекше көңіл бөледі. Жаңа тұтас бірегей өнімді ең қысқа уақыт мерзімде нарыққа шығару, ең аз шығын негізінде ресурстарды өте тиімді пайдалану, қазіргі заманғы компьютерлік технологияларды пайдалану және өндірістік процесстерді автоматтандырудың жоғары дәрежесі мен икемділік міндеттерін өз алдына қойып отыр. Аддитивті өндірістің (АӨ) қарқынды дамып келе жатқан технологиялары – қойылған міндеттерді шешуге, сұраныстың артуына және әрбір жаңа өнімнің даму процесінде міндетті кезеңге айналдыруға мүмкіндік береді. Аддитивті технологияларды қолдану өнімдер мен прототиптерді қолмен немесе сандық бағдарламамен басқаратын (СББ) дәстүрлі қалыптасқан машиналардың сатысын толықтай жоюға, сонымен қатар құрал-жабдықты дамытуға, жаңа өнімдерді өндіруге қажетті дайындық уақытын 50-80% -ға дейін қысқартуға мүмкіндік береді [1]. Болашақ бұйымның физикалық және геометриялық сипаттамаларына барынша жақын болып келетін сапалы прототип жасау – ол өте қиын міндет. Бұл жолда геометриялық форманың дәл қайталанып жасалуы, жиналуы, сыртқы түріне сәйкес келуі және талап етілетін стандарттарға барынша ұқсас материалдарды табу сияқты маңызды мәселелер шешіледі. Қазіргі замандағы өнеркәсіптегі бұл міндеттер аддитивті өндіріс технологиясын, яғни өндіріс өнімінің компьютерлік моделі бойынша бөлшектің қабаттап құралуын шешуге қабілетті. Заманауи аддитивті технология өндірісі бұйымның сыртқы пішінін бағалауға, құрылымдық элементтерін тексеруге, қажет сынақтарды жүргізуге, кезекті құю үшін арналған мастер-модель жасауға мүмкіншілік беретін қарапайым прототипті құрастырудан алға қадам жасап, дайын өнімді құрастыруға мүмкіндік алды [2]. Прототип жасау процесі САД-жүйелері ортасында болашақ бұйымының моделін үш өлшемді жобалау кезеңінен басталады. Стереолитография технологиясына арнап әзірленген және басқа АӨ процесстерінде қолданылатын \*.STL арнайы форматы бар. Арнайы бағдарламалық жасақтамада бұйым қабаттарға(слой) бөлінеді, негізінен оның қалыңдығы ол нақты технологияға, құрал-жабдыққа сонымен қатар пайдаланылатын материалға байланысты, ал қажет бола қалған жағдайда механикалық өңдеуге әдіп тағайындалынады. Одан әрі қабаттар туралы ақпараттар жабдықтың басқару блогына келіп түсіп, бұйымды қабаттап өсіру, яғни жинау жүреді. Қазіргі замандағы машина жасау саласында аддитивті технологиялар елдің өнеркәсіптік даму деңгейін анықтайтын маңызды бағыт-

бағдар болып табылады. АТ дәстүрлі жолмен іске аспайтын міндеттерді шешеді. Шетелдік жабдықтарды пайдалану қиын болғанда, маңызды өнеркәсіптіке салалар үшін – ғарыш, авиация, соның ішінде әскери мақсатта пайдаланылатын дайын бөлшектерді өсіру қажет. Сонымен қатар, АТ Қазақстандағы сыни технологияларды дамытуға, мысалға, жаңа заман талаптарына сай зымыран-ғарыштық және көліктік жабдықтарын жасаудың, перспективалық қару-жарақ, арнайы және әскери техниканы құру үшін негізгі әрі маңызды әскери және де өнеркәсіптік технологияларды дамытуға мүмкіншілік береді. Сол себепті, сандық үш өлшемді модельдерден қажетті бөлшектерді алу үшін жоғары тиімді әдіс-тәсілдер мен технологиялық процестерді іздестіру және оны дамыту, сонымен қоса оларды пайдалану сипаттамаларын зертте-қарастыру маңызды міндет болып табылады.

**Бұл жұмыстың мақсаты** лазерлік сәуле көмегімен ұнтақ түріндегі материалдарды Laser Engineered Net Shaping - лазерлік инженерлік торлы қалыптау (LENS) технологиясымен өңдеп, бұйым жасау болып келеді. Ол үшін кемінде төменде аталып өтетін ақпараттарды білу қажет.

**1. Аддитивті технология** – бұл біз үшін мүлдем жаңа технология болып табылады, ол туралы оқулықтар мен әдістемелік нұсқаулықтар жоқтың қасы деуге болады. Тек зерттеу нәтижелері жаңа индустрия үшін негіз қалыптастыра алады. Бұл жаңа технологиялардың енгізілуін жылдамдатып қана қоймай, сонымен қатар техникалық мамандықтардың түлектерін даярлау деңгейін көтеруге және оларды әлемдік технологиялық нарыққа сәтті бейімдеп шығаруға мүмкіндік береді. Қазіргі уақытта барлық салаларда аддитивті технологиялар бойынша жұмыс жүргізетін жаңа жабдықты белсенді енгізу процесі жүріп жатыр. Оның ішінде Laser Engineered Net Shaping технологиясын айта кетейік. Ол лазер негізіндегі жылдам прототиптеу процесстеріне жатады[4]. LENS электромагниттік сәулелену табиғаты негізінде өндірістік лазерді, соның ішінде қатты затты лазерді пайдаланады.

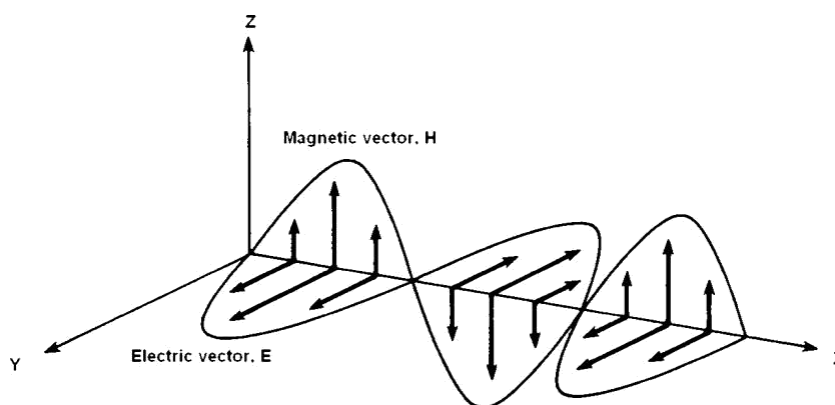
### **1.1. Лазерлер негізі.**

Лазер – бұл еріксіз сәулелену есебінен жарықты күшейтуге арналған аббревиатура болып табылады. Әлемдегі ең алғашқы лазерлердің бірі, яғни рубин кристалын пайдаланатын лазер, Майами қаласында көрсетілген болатын. Ол ультракүлгін сәуледен бастап инфрақызылға дейінгі аралықтағы толқын ұзындығы бар электромагниттік сәулеленудің ұқсас, когерентті және монохроматты шоғыры[5]. Қазіргі уақытта лазерлер үшін қолданыс аясы өте кең, мысалға медицина, электротехника, тіпті техниканың барлық салаларында қолданыс табуда. Кез келген салада лазерлік сәулеленуді толықтай пайдалана алу үшін оның негізгі механизмі мен қасиеттерін білу қажет.

### **1.2. Электромагниттік сәулелену табиғаты.**

Электромагниттік сәулелер магнит өрісімен (H) және тербелмелі электр өрісімен (E) байланысты таратылатын толқындардан құралады. Бұл компоненттер бір-біріне, сонымен қатар толқынның таралу бағытына тікелей бұрышпен ауытқиды. Магнит өрісінің векторы электр өрісінің векторына перпендикуляр болғандықтан, толқынның таралуын сипаттау кезінде электр өрісі векторының тербелісі ғана ескеріледі. Электр өрісінің векторының тербелістері белгілі бір тәртіпте болғанда ғана, жарық поляризацияланған деп айтылады. Жазық поляризацияланған жарықта электр векторы толқын қозғалғанда бір жазықтықта ауытқиды. Бұл суретте бейнеленген. Керісінше, толық емес жарықтағы электр векторлары кез келген ықтимал бағыттарды

кабылдай алады (яғни кездейсоқ бір жазықтықтан артық ауытқитын электр векторы). 1.1-суретте көрсетілген жазық поляризацияланған толқын үшін у бағытында тербелмелі электр векторы кеңістік пен уақытқа байланысты өзгереді.



1.1-сурет. Жазық электромагниттік толқынмен байланыстағы магнит (H) және электр (E) өрістері векторларының тербеліс схемасы.

### 1.3. Өндірістік лазер типтері.

Ең алғашқы рубинді лазерді ойлап тапқаннан бастап, 1960 жылдан бастап, лазерлер туралы ақпарат жүздеген материалдарда жарық көре бастады. Бірақ-та, осы күнге дейін үшін лазерлерде пайдаланылатын активті материалдар саны шектеулі болып келеді. Лазерлерді пайдаланатын материалдың физикалық қасиеттеріне байланысты негізгі төрт топқа жіктеуге болады. Олардың ішіндегі маңызды лазерлердің кейбір түрлері 1.1 кестеде көрсетілген. Олардың бәрін жіктеп, талқылау біз үшін қажет емес. Сондықтан бізге қажетті лазерге ғана сипаттама беріп өтейік.

Лазер типі	Толқын ұзындығы (нм)
<b>Қатты затты лазерлер</b>	
Nd:YAG	1,064
Ruby	694
Nd:glass	1,062
Alexandrite	700–820
Ti-sapphire	700–1,100
Er:YAG	2,940

Nd:YLF	1,047
<b>Газ лазерлері</b>	
HeNe	632.8
Argon	488, 514.5
Krypton	520–676
HeCd	441.5, 325
CO <sub>2</sub>	10,600
ArF	191
KrF	249
XeCl	308
XeF	351
Copper vapor	510.6, 578.2
Gold vapor	628
<b>Жартылай өткізгіш лазерлер</b>	
InGaAs	980
AlGaInP	630–680
InGaAsP	1,150–1,650
AlGaAs	780–880
<b>Сұйық бояғышты лазерлер</b>	
Rhodamine 6G	570–640
Coumarin 102	460–515
Stilbene	403–428

1.1 кесте. Пайдаланатын материалдар типіне байланысты лазер түрлері

### 1.3.1. Қатты затты лазерлер.

Қатты затты лазерлерде белсенді орта қатты сыйымды материалда легирленген қоспалы иондардың шағын пайызынан тұрады. 1960 жылы Маїтат компаниясы әзірлеген алғашқы лазер қатты затты лазер болды. Nd:YAG, nd: glass, alexandrite және Ti:sapphire сияқты лазерлердің үлкен саны енді осы сыныпта қол жетімді. Олардың арасында Nd: YAG-лазер лазерлік өңдеу саласында жиі қолданылатын[9]. Осылайша, мұнда Nd:YAG лазердің жұмыс принциптері түсіндіріледі.

### 1.3.2. Nd: YAG-лазер.

Nd: YAG лазер негізгі материал ретінде  $Y_3Al_5O_{12}$  химиялық формуласы бар кристалды YAG лазерінен тұрады.  $Nd^{3+}$  иондар иттрийдің иондық учаскелерін легализациялаудың ең жоғары деңгейі 2% - ға жуық торда алмастырады. Бұл типтік төрт деңгейлі энергетикалық лазерлік жүйе. Лазерлік ауысулар  $^4F_{3/2}$  деңгейі мен  $^4I_{11/2}$  (Svelto and Hanna 1989) деңгейі арасында орын алады. Ажырау бастапқы және соңғы энергетикалық деңгейлер генерация толқындарының бірнеше ұзындығы болуы мүмкін, және де олардың ең мықтысы-1,064 мкм[9]. Nd лазерінің шығуы: YAG үздіксіз, импульстік немесе Q-ауыстырып қосқышы болуы мүмкін. Қыздыру үшін жарық көзі кристалдың жұтылу сипаттамаларына байланысты. Үздіксіз жұмыс істеу үшін лазер үздіксіз криптонды немесе ксенонды доғалы шамдармен немесе жартылай өткізгіш диодты лазерлермен қозғалады. Криптондық шамдар үздіксіз Nd:YAG лазер үшін тиімді айдау көздері болып табылады, өйткені криптондық шамдардың сәулелену желілері Nd: YAG-да сіңіру желілерімен жақсы үйлеседі. Импульстік жұмыс үшін әдетте қыздыру шамдары қолданылады. Егер импульстердің салыстырмалы үлкен энергиясымен импульстерді алу қажет болса, онда лазер импульстердің салыстырмалы төмен жиілігімен импульстерді беретін жарқылмен қозғалады. Nd: YAG лазер, сондай-ақ, лазердің шығуы 532 нм кезінде көрінетін спектрдің жасыл бөлігінде болатын жиілік-екі еселенген режимде қол жетімді. Жиілік-екі еселік жұмысқа қосымша лазер жиіліктік-утроленген (355 Нм) және жиіліктік-төрт еселік (266 Нм) режимдерде де қол жетімді.[11]

## 2. Лазер негізіндегі жылдам прототиптеу процестері

Қазіргі заманғы бәсекелестік өндірістік жағдайларда өнім өндіретін салалар өнім вариацияларын арттыру және өнім күрделілігін арттыру, сондай-ақ жеткізу мерзімдерін қысқарту сияқты көптеген проблемаларға тап болады. Бұл сын-қатерлерге жауап ретінде негізгі өнеркәсіптік және зерттеу күш-жігері прототиптерді жылдам әзірлеуге, тез жарақтауға және тез өндіріске шоғырланды. Лазерлер әртүрлі жылдам прототиптеу технологияларында кеңінен қолданылады.

Бағытталған энергетикалық тұндыру процестері материалды еріту арқылы бөлшектерді жасауға мүмкіндік береді, ол сақтауға болады. Бұл негізгі

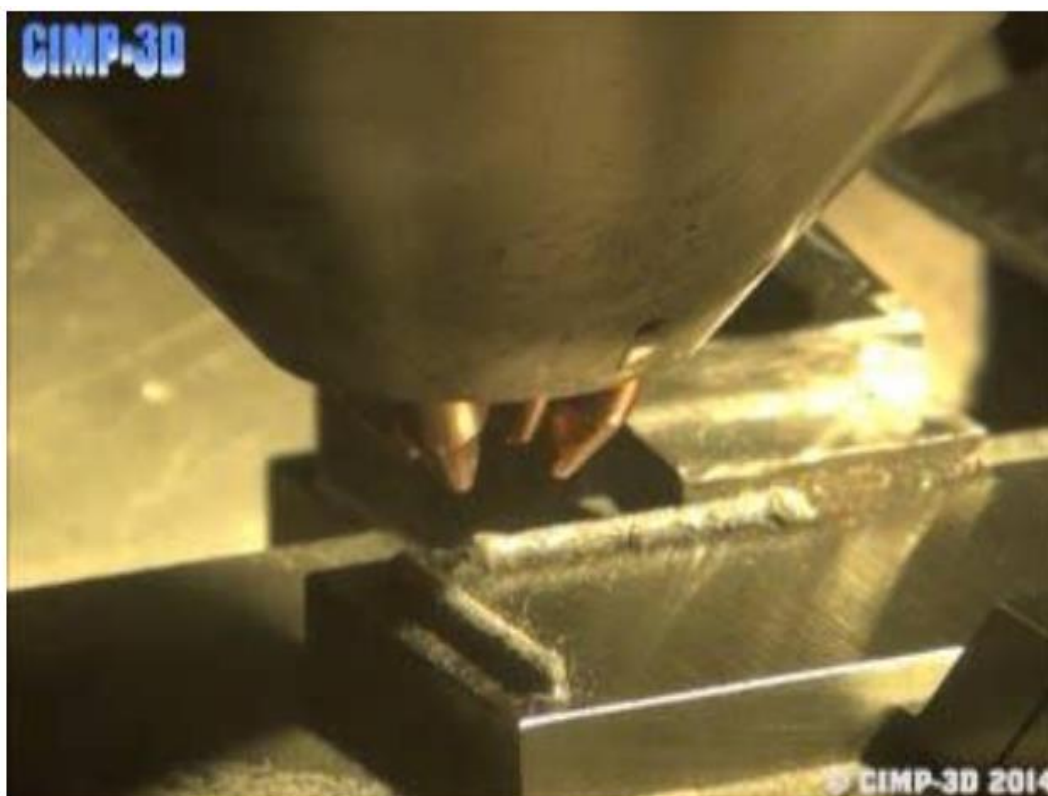
тәсіл полимерлер, керамика және металл матрицасы бар композиттер үшін жұмыс істей алады, ал, ол негізінен металл ұнтақтары үшін пайдаланылады. Осылайша, бұл технология жиі "металл тұндыру" технологиясы деп аталады.

Бағытталған энергетикалық тұндыру процестері тікелей энергияны төсенішті қыздыру, төсенішті балқыту және бір мезгілде субстрат балқымасының бассейніне шөгетін материалды балқыту үшін тар фокусталған аймаққа қайта өңдейді. Ұнтақты қабатта дәнекерлеу әдістеріне қарағанда. Бағытталған энергетикалық тұндыру процестері процестері алдын ала ұнтақ қабатына салынған материалды еріту үшін пайдаланылмайды, бірақ материалдарды жағуға қарай еріту үшін қолданылады.[10]

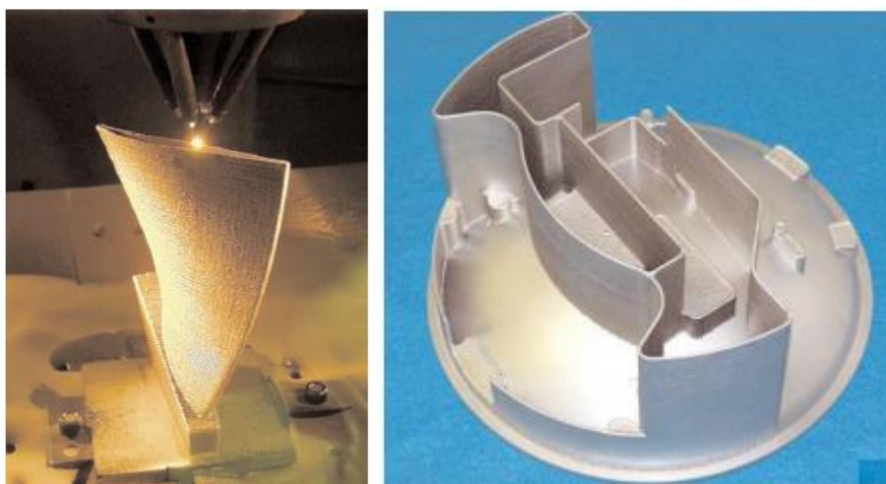
Бағытталған энергетикалық тұндыру процестерінде бастапқы материалдың балқытуға және экструзиялық процестерге ұқсас үшөлшемді объектілерді салуға арналған біріктірілген жылу көзі (әдетте лазер немесе электрондық сәуле) қолданылады. Бағытталған энергетикалық тұндыру процестері бастарының әрбір өтуі қатайған материалдың жолын жасайды, ал материалдың көршілес сызықтары қабаттар құрайды. Күрделі үш өлшемді геометрия қосалқы материалды немесе көп осьті шөгінді бастиекті талап етеді.

## **2.1. Laser Engineered Net Shaping - лазерлік инженерлік торлы қалыптау (LENS)**

LENS-бұл бөлшектерді дайындау үшін ұнтақты жеткізу тәсілін қоспағанда, SLS сияқты процесс. LENS-те лазер сәулесі бөлшектің тұсында балқыма басы арқылы фокусталады, сосын материалдық ұнтақ жеткізіледі және ұштықтың шеңберіне таралады. Ұнтақ гравитациялық күштермен немесе жоғары қысымды газ тасымалдаушы арқылы жеткізілуі мүмкін. Лазер ұнтақты балқытуды және қажетті бөлшектің көлденең қимасына сәйкес қабат алу үшін келесі тұндыруды тудырады. Детальдың геометриялық барлық көлденең қималарына сәйкес келетін бірнеше қабаттарды жағу жолымен қатты денелі моделінен тікелей құрылады. Бұл процесс әртүрлі металдар, қорытпалар және композициялық материалдар үшін пайдаланылуы мүмкін.



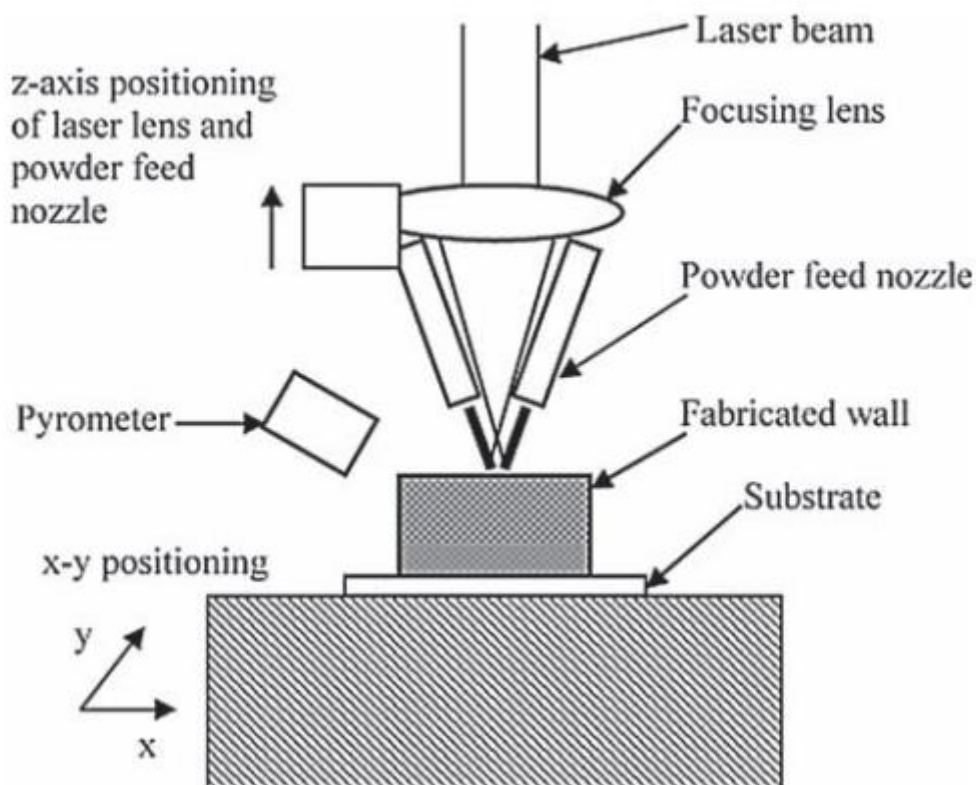
2-сурет. Ұнтақты қабаттау технологиясына қарағанда, LENS процесі материалды ұнтақ шикізатын бүркіп, лазерлік қыздыру арқылы жасайды.



3-сурет LENS технологиясымен бұйым шығару.



LENS -бұл Sandia ұлттық зертханасында әзірленген және ұнтақты қалыптау технологиясына негізделген жылдам прототиптеу әдісі. Прототиптерді жасауға, сонымен қатар бұл процесс тікелей CAD-үлгілерінен толық тығыз металл бөлшектерді тікелей жасау үшін де пайдаланылуы мүмкін.[13]



4-сурет LENS жүйесі

LENS жүйесі 4-суретте көрсетілген. LENS процесі кезінде металл бөлшектерді құру үшін төсеніш пайдаланылады. Бөлшектерді құру лазер сәулесін фокустау және бір мезгілде балқыту бассейніне ұнтақ бөлшектерін беру жолымен бассейн төсенішінде балқыманы құрудан басталады. Содан кейін бөлшектің жіңішке көлденең қимасы төсеніштің лазер әсерімен X және Y жазықтығында жылжу жолымен төсенішке салынады. Әрбір қабат көлденең аймақтың шекарасын және осы аймақтың ішіндегі тиісті құю суретін сканерлеу арқылы жасалады. Тізбекті қабаттарды дайындау ұнтақты беру шүмегін ұлғайту және алдыңғы қабаттың қалыңдығына сәйкес тік бағытта фокустайтын линзаны құрастыру жолымен жеңілдетіледі, солайша 3D-нысандар жасалады. Құрастыру аяқталғаннан кейін оның бөлшектері пластинадан төсеніштерді механикалық түрде алып тастайды. Тозандату процесінде маңызды мәселе лазерлік сәуле айналасында берілетін ұнтақты

біркелкі бөлу болып табылады. Ұнтақ әдетте ауырлық күшінің әсерінен немесе газ тасығыштың қысымымен балқытатын басы, лазерлік сәуленің фокусы арқылы беріледі. Алайда, ұнтақты беру үшін осьтік емес шүмектері бар конструкциялар да пайдаланылуы мүмкін. Аргон сияқты инертті газ жиі бөлшектерді жинау кезінде балқыту бассейнінің ластануын болдырмау үшін пайдаланылады және осылайша қабаттар арасындағы ең жақсы адгезияны қамтамасыз етеді. Металдарды тікелей отырғызудың тағы бір ұқсас әдісі-Лос-Аламос ұлттық зертханасында әзірленетін Directed Light Fabrication (DLF). Бұл процесс қуатты лазерлік сәулелердің фокальды аймағына газбен берілетін металл ұнтақтарды балқытуды қамтиды.

**Table 9.4** Specifications of some of the commercially available laser engineered net shaping systems available from Optomec (Courtesy of Optomec)

Model	LENS 750	LENS 850-R
Work envelop (mm <sup>3</sup> )	300 × 300 × 300	900 × 1500 × 900
Motion control	3-axes: XY linear table motion Z-gantry motion	5-axes: XYZ linear gantry motion Tilt-Rotate worktable
Laser system	500 W Nd:YAG laser	1 kW or 2 kW IPG fiber laser
Positional accuracy (mm)	±0.25	±0.25
Linear resolution (mm)	±0.025	±0.025
Motion velocity (mm/s)	60	60
Deposition rate (kg/hr)	Up to 0.5	Up to 0.5
Powder feeder	One feeder: 14 kg powder holding capacity	Two feeder: 14 kg powder holding capacity each

2-кесте. Optomec-тің қол жетімді кейбір коммерциялық LENS жүйелерінің техникалық сипаттамалары көрсетілген.

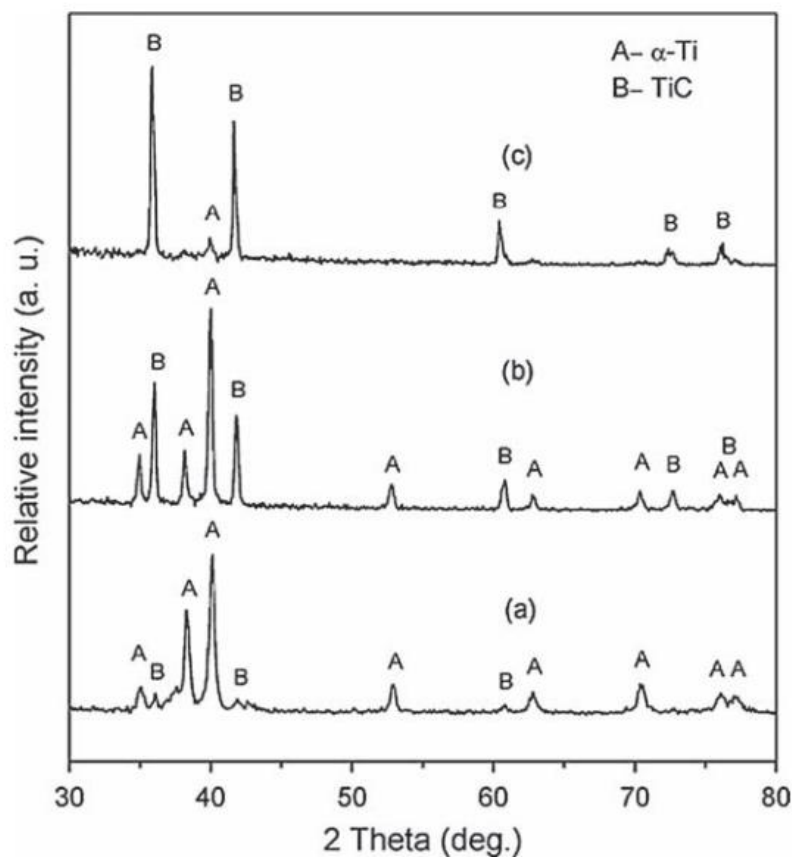
### 3. LENS адитивті технологияларына арналған материалдар

LENS - бұл процесті түрлі металдар мен қорытпалардан жасалған бөлшектерді жасау үшін қолдануға болады. Бұл тот баспайтын болат (304 және 316), аспаптық болат, темір-никель қорытпасы, никель алюминий, титан қорытпаларын қамтиды.

LENS процесі кезінде тез қатаю компоненттің микроқұрылымына және қасиеттеріне елеулі әсер етеді. Демек, дайындау кезінде металл компоненттері, салқындату жылдамдығы сияқты түрлі жылу параметрлері және температуралық градиенттер бағалануы тиіс. Кең жылулы модельдеу

AISI 316 тот баспайтын болаты үшін LENS процесінде балқыма ваннасындағы температура градиенті шамамен  $5 \times 10^2$  К/мм екенін көрсетті. Сонымен қатар, температура балқытылған ванна айналасында күрт өзгерістер және балқытылған аймағынан алыс азаяды.

Ni-Mo қорытпалары қоспадан 75% элементті никель және 25% элементті Молибден ұнтақтарынан тұрады. Сонымен қатар, металл бөлшектер градуирленген композицияда жасалуы мүмкін. Элементті ұнтақ бірнеше жүйеде араласады.[14] Ол келесі суретте көрсетіледі.



5-сурет. Градуирленген композицияда жасалған Ti-TiC композитінің (а) төменгі, (б) аралық және (в) жоғарғы қабатынан рентгенограммалар.

#### 4. LENS жүйесінің термомеханикалық сипаттамасы

Аддитивті өндірістің, атап айтқанда Laser Engineered Net Shaping (LENS) технологиясы термомеханикалық сипаттамасы Лос-Аламосағы Ұлттық зертхана (LANL) жүргізілген зерттеулерінің басым саласы болды. LANL - да өткізілген LENS алғашқы зерттеуі LANL мен Остиндегі Техас университеті арасында бірегей жүргізіледі. Бұл жоба аддитивті өндірістің құралы ретінде тікелей лазерлік тұндыру кең спектрінің процесі туралы қосымша білім алу талпынысында эксперименттік және есептеу деректерін біріктіретін бірегей екі жақты тәсілді пайдаланады.

## 4.1 Теория

Эксперименталды нәтижелерді үлгілеумен дұрыс интеграциялау үшін материалдар жүйесі таңдалған болуы тиіс, ол постмикроскопия арқылы көруге болатын процесс сипаттамаларының маркерлерін қалдырады. Үлгіні тексеру үшін жоғары температуралар және салқындату жылдамдығы тұндырғаннан кейін микроскопия көмегімен өлшенген жағдайда болуы тиіс. Төмен көміртекті жазықтағы перлиттер арасындағы қашықтық осы сипаттамаларды кейіннен өңдеу мүмкіндігін қамтамасыз етеді; сондықтан Болат 1018 материалдық жүйе ретінде таңдалды. Келтірілген үлгілердегі қосымша қалдық кернеу компоненттердегі қалдық кернеулердің динамикалық жинақталуын болжау, компьютерлік үлгілеу қабілетін анықтау үшін эксперименталды өлшенеді.

Уақыт бойынша тиімді тестілердің шектеулі санын жүргізу үшін екі еркіндік дәрежесі бар жүйе орнатылды. Лазер энергиясының бірлік ұзындығы және ұнтақ беру жылдамдығы өзгерісіне термомеханикалық ұнтақ қатуын тиімді сынауға дейін мүмкіндік береді.

## 4.2. Эксперимент

Қолданылатын ұнтақ-ұяшығы бар болат-100 / + 200 (-149 мкм / + 74 мкм) 1018. Ұнтақ ехова корпорациясы индуктивті-байланысқан плазмамен (ICP-MS) металл құрамын анықтау үшін масс-спектроскопияны тестілеу үшін жіберілді. Сонымен қатар, LANL-да көміртегі мен күкірттің құрамын анықтау үшін Horiba интерстициальді талдауы жүргізілді. Нәтижелер төменде көрсетілген:

	Metallic Impurities														
	Al	Sb	As	Cr	Co	Cu	Ge	Mn	Mo	Ni	P	Sn	W	V	Zn
%w	0.002	0.0013	0.004	0.052	0.005	0.073	0.002	0.78	0.016	0.062	0.004	0.007	0.001	0.057	0.007
ppm	20	13	44	520	47	730	22	7800	160	620	40	66	14	570	71

3-кесте. EXOVA ICP-MS құрамы

	Non-metallic impurities	
	C	S
%wt	0.1939	0.0225
ppm	1939	225

4-кесте. LANL зертханасындағы Horiba интерстициалды талдау нәтижесі

	Alloying Elements Weight%				
	Fe	C	Mn	P	S
ASM 1018	99.25-98.5	0.15-0.2	0.6-0.9	0.04 max	0.05 max
Powder Used	98.7099	0.1939	0.78	0.004	0.0225

5-кесте. AISI 1018 болатын салыстыру нәтижесі.

ICP-MS тестінің және интерстициальді талдау комбинациясы ұнтақ шынымен ASM 1018 болатын көрсетеді

#### 4.3. Базалық плитаны дайындау

Он бір 5"x4"x1/4" суықтай басылған болат 1018 дайындамалары лазерлік шөуге арналған тірек плиталар ретінде дайындалды. Әрбір тірек плитаны көлемі бойынша ірі бөренеден қиып, кеседі. Содан кейін пластиналар механикалық өңдеуден кейін майды немесе қалдықтарды кетіруге арналған жуғыш құралға арналған ультрадыбыстық ваннаға орналастырылды.

#### 4.4. Бұрмалау

Дайындалған он бір базалық пластинадан - он, әрқайсысы үш 3" ұзындықты шөгіндісі бар бланкіге тесттер дайындалады. Әрбір болат 1018 дайындау бір өтпелі шөгінділер, екі өтпелі шөгінділер, және қабырға биіктігі 1 дюйм болады. Үш тест комбинациясы модельдердің кіріс деректерін береді, екінші рет өту әсерлері өлшенетін эксперименталды деректер, сондай-ақ тестіленетін компоненттер. Сонымен қатар, термопар және тензодатчикті тірек плиталарда орналастырылады, ол ойылу орнында температураны ескеруге мүмкіндік береді.

#### 4.5. Қысым-деформациялық талдау

Шөгінді қабырғадағы қалдық кернеуді анықтау үшін, біз кесу әдісін өлшеудің кері деформациясына пайдаланамыз. Бұл экспериментте тірек плиталар электр эрозиялық өңдеу арқылы қабырғаның әр жағынан дюймнің төрттен біріне дейін төмен бөлінеді. Қабырғадан кейін секцияланады, үлгі машинада қайта бағдарланады және біртіндеп орталыққа, шөгінді қабырғаның жоғарғы бөлігінен тірек плитасына қарай кесіледі. Шағын кесіктер деформация релаксация жасалған сияқты тірек плитасының артқы жағында

тензодатчиктің көмегімен жазылады. Бұл техника өте күрделі геометрия үшін тиімді болды және жай қабырға үшін өте қолайлы, ол тек жазық кернеуді көрсетеді. Бұл тест барлық басқа өлшемдерге және микроскопияға дейін жасалуы тиіс, себебі қалдық кернеуді алу үшін үлгілер орта бойынша бөле отырып, бұзғыш тексерілуі тиіс. Осы сынақтың нәтижесінде он үлгінің ортасы тең  $\sim 1 \frac{1}{2}$  дюйм секциялар әр үлгінің жартысының бірі қатаң микроскопия үшін пайдаланылатын болады және екінші жартысы резервтік болады немесе уақыт мүмкіндік берсе, созылу үлгілері үшін пайдаланылуы мүмкін.

#### **4.6. Микроскопия**

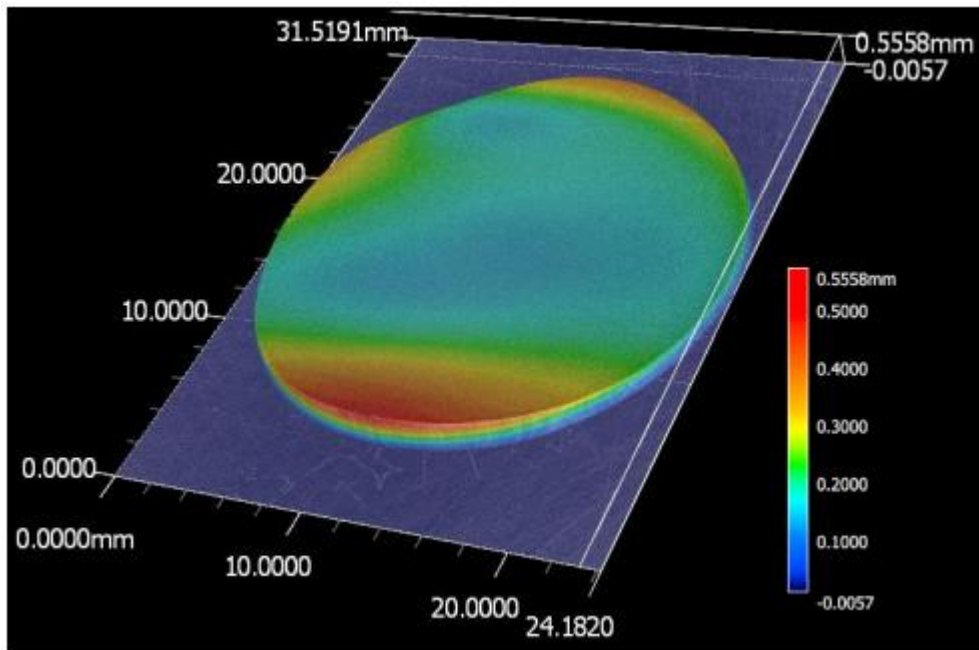
EDM кесуден кейін үлгілер микроскопия үшін Техас университетіне қайтарылады. Жоғары температураны, салқындату жылдамдығын, сұйылту және аддитивті өзара әрекеттесуді анықтау үшін әр түрлі үлестік қуат деңгейлері алынады. Температураны өзгерту деректері және SysWeld коды үшін кіріс деректер ретінде пайдаланылады.

#### **4.7. Есептеулер**

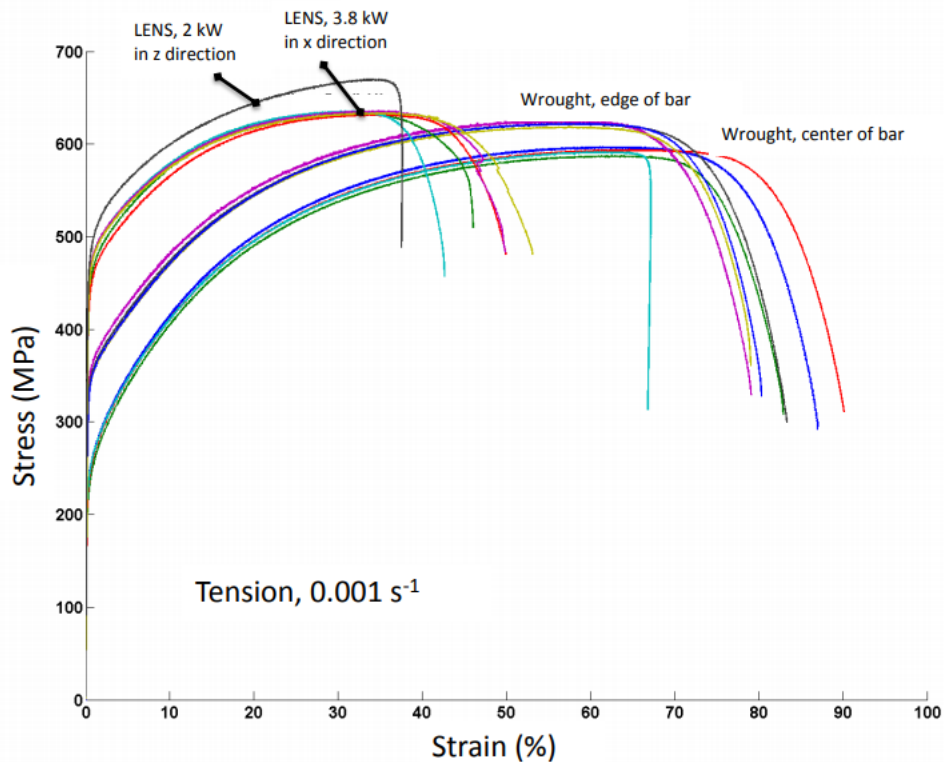
Біз термомеханикалық шешімдер арқылы SysWeld-де бір өтпелі шөгуді жүргізе бастадық. Эксперименталды нәтижелер параметрлерді өзгерту және бір өтпелі және екі өтпелі шөгу кезінде тексеру үшін пайдаланылуы мүмкін кейін үлкен қабырға жай ғана траекторияның дәнекерленген тігісін және кеңейтілген есептеу уақытын қосады.

Есептеулердің бекітілген және тексерілген нәтижелері сандық үлгілеу байқалатын эксперименталды деректерді қайда көрсететінін және олар байқалатын мәндерден қай жерде ауытқуын анықтау үшін эксперименталды нәтижелермен салыстырылатын болады. Жергілікті араластыру параметрлері, температура шыңы, салқындату жылдамдығы және қалдық кернеулер, олар эксперименталды және есептеу жағынан өлшенеді.

	Austenite parameters	
	$a_l$	$a_t$
Wrought	3.5932 Å	3.5900 Å
LENS 3.8kW //	3.5938 Å	3.5904 Å
LENS 2kW +	3.5941 Å	3.5908 Å



6-сурет. Үлгі тор параметрлері шағын айырмашылықтар көрсетеді. Тірек плитасы айтарлықтай өзгерген (қалыңдығы 12 мм). Үлгі тор параметрлері қиып алынған диск аз айырмашылық көрсетеді. Диск 100 мкм, өте аз деформация (25 мм артық емес мм).



7-сурет. LENS материалы соғылғанға қарағанда әлдеқайда күшті.

## 5. LENS жүйесін пайдалана отырып, аддитивті жасалған CoFe өзекшелерінің магнитострикциялық сипаттамалары

Аддитивті өндіріс (АӨ) - материалдың әрбір қабаты жеке және жүйелі түрде жағылатын материалды дайындау әдісі. Бұрынғы зерттеулердің көп бөлігі полимерлік жүйелерге арналған, ал металдар негізіндегі жүйелер соңғы уақытта айтарлықтай дамыды. Бұл жүйелер пайдалану неғұрлым күрделі және әдетте инертті атмосфераға, жоғары температура камераларына, бөлшектердің аз өлшемдеріне және лазерді немесе электрондық шоғырды металдарды балқытуға арналған энергия көзі ретінде пайдалануға қойылатын жалпы талаптарға байланысты әлдеқайда аз монтаждық пластиналарды талап етеді, бірақ барлық жүйелер осы сипаттамаларға сәйкес келмейді. Магнитті линзалармен басқарылатын электрондық-сәулелік жүйелер лазерлік өңдеу үшін қолданылатын механикалық ауыспалы сатыға қарағанда әлдеқайда жылдам басқаруды қамтамасыз етеді. Дехофф және т. б. микроқұрылымдарды изотропты поликристаллдан монокристалды микроқұрылымдарға дейін бір жинақтың ішінде термоядролық синтездің электронды-сәулелік, ұнтақты жүйелерін пайдалана отырып түрлендіруге мүмкіндік берді [3,4]. Бұл қасиеттері магниттік қолдану үшін өте қажет болса да, осы коммерциялық ұнтақ қабатының көптеген тексерілген құрылымдық ұнтақтарды ғана пайдалануға мүмкіндік береді, ал ұнтақ қабатының жүйелері, сондай-ақ жинауды бастау үшін материалдың көп мөлшерін талап етеді. Ұнтақ қабаты үшін қолданылатын ұнтақтың көп мөлшері бұл әдістерді өте қымбат етеді. Сонымен қатар, ұнтақ қабатындағы құрам бекітілген болғандықтан, зерттеу үшін осы технология арқылы қорытпаларды жобалау тиімді емес. Лазерлік-инженерлік торлы формалар (LENS™) [5] жоғарыда аталған әдістерге ұқсас, бірақ бастапқы материалды әлдеқайда аз талап етеді және құрастыру кезінде композициялық вариацияларға жол береді. LENS - бұл ұнтақ лазермен жасалатын балқыманың бассейніне берілетін энергия бағытталған АӨ әдісі. Ұнтақтың қабатындағы тізбекті қабаттарды балқытудың орнына, ұнтақтар бөлшектер үшін қажетті көп ұнтақты талап ете отырып, қызықты жерде ғана балқиды. Geng оның әр түрлі құрамдағы FeCo үлгілерінің магниттік қасиеттерін экспресс-бағалауда қолданылуы көрсетілген [6]. АӨ үшін жылдам LENS әдісі қолайлы әдіс болып табылады.

Бұл зерттеуде  $Co_{1-x}Fe_x$  екі өзегі осы класты магнитострикциялық материалдардың өнімділігін бағалау үшін LENS әдісін пайдалана отырып, материалдарды жасаудың дәстүрлі емес әдістерін пайдалана отырып басылып шықты. FeCo кобальтты қорытпалары магнитострикцияның елеулі мәндерін көрсетті- $Fe_{30}Co_{70}$  және  $Fe_{35}Co_{65}$  монокристаллдарына ұқсас қанығу



магнитострикциясын көрсетті,  $(3/2) \lambda_{100}$ , ~248-280 мкН кернеулерді [9-11] және 195 мкН кернеулерді сәйкесінше көрсетті [12].

### 5.1. Нәтижелер және талқылау.

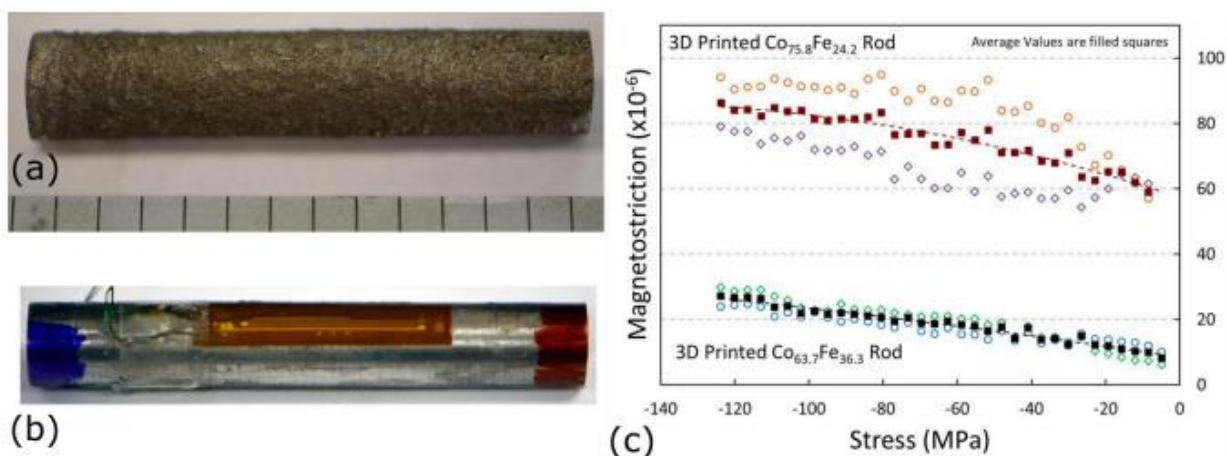
3D баспа өзекшелерінің магнитострикациясы -суретте көрсетілген. Олар құрамы бойынша өте жақын және бір тиражда басылғанына қарамастан, олар әртүрлі сипаттамаларды көрсетеді: 76% Со-өзек 100 ppm жақын, 64% Со-өзек 30 ppm төмен. Бір де бір өзек қолда бар қолданбалы кернеумен қанықпайды, алайда 76% Со өзекшесі қысу кернеуінің ұлғаюымен тегістеледі. 76% Со өзегі үшін екі тензометриялық датчиктерде үлкен шашыраңқы бар, алайда бұл күтпеген нәтиже емес және магнитострикцияның үлкен мәндерімен байланысты болуы мүмкін, себебі екеуі де төменде көрсетілгендей ұқсас микроқұрылымдар бар. Қоса берілген қысылған кернеудің ұлғаюына қарай мәндер қанығуға жақындауы тиіс

магнитострикция шамасы  $(3/2) \lambda$ .

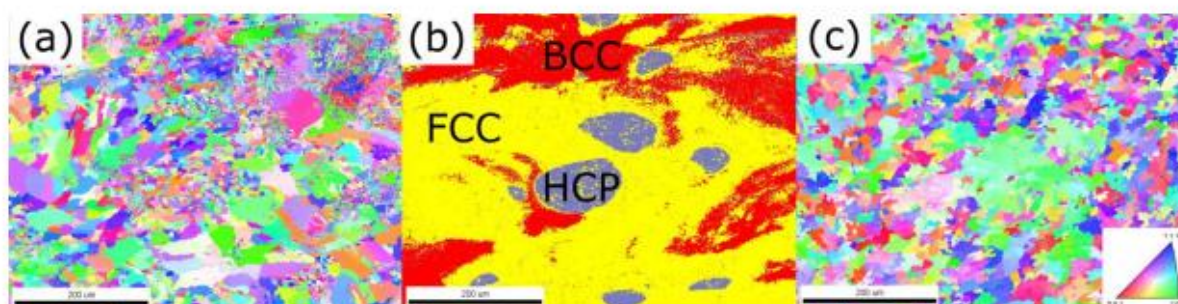
Керісінше, өлшенген магнитострикция, қанығу монокристалдық диск  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{33}$  құрады,  $(3/2) \lambda_{100} = 197$  ppm және  $(3/2) \lambda_{111} = 136$  ppm.  $(3/5) \lambda_{111} + (2/5) \lambda_{100}$  деп есептелген изотропты поликристалды мән 107 ppm құрайды, ал қанығудың толық мәні  $(3/2) \lambda_s$  161 ppm. 76% Со өзегі осы мәндерге жақындайды, алайда осы өзек үшін қажетті қысу кернеуі, бұл уақытта қол жетпеді; алайда, 76% -дық Со үлгісі 161 ppm есептелген қанығу мәні төмен болады деп күтілуде, өйткені магнитті трикция кобальт мөлшерінің ұлғаюымен азаюы тиіс.

Екі үлгінің қанықтырылуын магниттелуін өлшеу үшін төсекке жақын және бос бетінде VSM пайдаланды; екі шеті ұқсас сипаттамаларды көрсетті. 64% Со үлгісі үшін ~181 emu/g және 74% Со үлгісі үшін 200 emu/g құрады. 76% Со іріктеуі әдеби мәндерге тікелей сәйкес келеді, ал 64% Со іріктеуі

~35 emu/g күтілгеннен төмен[15]; бұл өнімділіктің төмендеуі АМ процесінде катаюдан төменде көрсетілгендей тең емес фазалардың болуымен түсіндіруге болады .



8-сурет. LENSTM пайдалана отырып жасалған, (а) беттің алынған күйін көрсететін кодтық стержендер (сызғышта 1/8 дюйм таңбалау); (б) өңделген бет жағылған тензометриялық сенсормен бөлінеді. Қызыл және көк түстері өзектің бос ұштары мен ұштарын ажырату үшін қолданылды; (с) осьтік қысу кернеуіне байланысты жасалған өзекшелердің 76% Со және 64% Со LENSTM магнитострикциясы. Толтырылған квадраттар екі тензометриялық датчиктердің орташа мәндері болып табылады; нүктелі сызықтар көзге бағыттаушы болып табылады.



9-сурет.  $Co_{1-x}Fe_x$ -тен жасалған LENSTM өзекшелерінің көлденең қимасының EBSD-нің төменгі (тік) бейнелері тиісті фазалық картасы бар (b) 64% Со үшін (a) кері полюсті фигураны (IPF), сондай-ақ (c) 76% Со үлгісі үшін IPF көрсетеді.

Аддитивті жасалған  $Co_{1-x}Fe_x$  магнит өрісі LENSTM арқылы жасалды. 76% және 64% Со үлгілері елеулі магнитострикцияны көрсеткен кезде, 76% Со үлгісі есепті поликристалды мәндерге жақындағанда әлдеқайда жоғары мәнге ие болды. Бұл өнімділікті сәйкессіздік химиялық біртектілікпен қатар 64% Со үлгісінде бірнеше кристалды фазалардың болуымен байланысты

болды, ал 76% Co үлгісі тұтастай бір фазалы түйіршіктер өлшемімен болды. Бұл нәтижелер, сондай-ақ серпімді константаларды және магниттілікті қарайтын RUS және VSM өлшемдерімен үйлеседі. Басып шығару параметрлерін реттей отырып, жақсы тегістеуге, ВСС бір фазасының бағаналы өсуіне қол жеткізуге болады; бұл LENS<sup>TM</sup> сатысының қозғалысын X-Y және тек Z бағытында жұмыс істеу арқылы немесе ұнтақты қабатты балқытудың электронды-сәулелік жүйесіне ауысу арқылы қол жеткізуге болады. Мұндай оңтайландырылған кристаллография байқалатын магнитострикциялық үнқатысуды жақсартар еді және белсенді құрылымдарды немесе белсенді компоненттері бар статикалық құрылымдарды құру үшін осындай технологияны пайдалануға мүмкіндік берер еді. Одан әрі кристаллографиялық талдау және тұрақты серпімділікті өлшеу баспа параметрлерін оңтайландыруға көмектеседі.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Диплом жазу барысында барлық алға қойылған мақсаттарға қол жеткізілді. Алдымен қажетті негізгі ақпараттарға тоқталып, аддитивті технология, лазер және оның түрлеріне сипаттама жасалып, қажет ақпараттар жиналды.

Қазіргі заман талабына сай аддитивті өндіріс үшін тиімді болып келетін Laser Engineered Net Shaping - лазерлік инженерлік торлы қалыптау (LENS) жүйесі – бұл лазер негізіндегі жылдам прототиптеу процесі. Оның көмегімен өте күрделі конструкцияларды жылдам әрі сапалы дайындауға болады. Бұл жүйе арқылы негізінен ғарыш, медицина және т.б ұсақ детальдарды дайындау мүмкіншілігі өте зор, және тиімді болып келеді.

LENS адитивті технологияларына арналған материалдар пластик немесе кейбір метал түрлері болуы мүмкін. Сонымен қатар бұл технология үшін материалдар саны күн сайын артуда. Оның кейбіріне дипломдық жұмыста сипаттама беріліп, зерттеулер жүргізілді.

Нәтижесінде, бұл жобадағы зерттеулер кеңінен бағытталған лазерлік тұндыру процесінің есептік-эксперименттік сипаттамасы, атап айтқанда LENS процесінде жүргізіледі. Жоғары температуралар, салқындату жылдамдығы, қалдық кернеулер, сұйылту және т. б. қажетті қасиеттері лазер қуаты мен лазер жылдамдығына байланысты қарастырылады және аддитивті өндірістегі технологиялық ортаны одан әрі түсінуге, кеңітуге жол ашады.

## ПАЙДАЛАНЫЛГАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Srivatsan T.S. Additive Manufacturing Innovations, Advances, and Applications. Taylor & Francis Group, LLC, 2016. 444 p
2. David L. Bourella, Joseph J. Beaman, Jr., Ming C. Leub and David W. Rosenc. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. RapidTech 2009, [www.rapidtech.itu.edu.tr](http://www.rapidtech.itu.edu.tr).
3. Каблов Е. Новые материалы и технологии – основа технологического лидерства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://viam.ru/news/5032>.
4. Аддитивное производство: технологии и материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://poisk-ru.ru/s58t8.html>.
5. Осокин Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.
6. Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В., Гордеев Г.А., Анкудинов В.Е. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей. Управление большими системами. Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2010. –No 31. –С. 299–322.
7. S. Kumar. Comprehensive Materials Processing, volume 10. Elsevier, 2014.
8. [http://www.3dsystems.com/products/datafiles/lasersintering/datasheets/Laser\\_Form\\_ST\\_100\\_uk.pdf](http://www.3dsystems.com/products/datafiles/lasersintering/datasheets/Laser_Form_ST_100_uk.pdf)
9. M. S. Węglowski, K. Kwieciński, K. Krasnowski, and R. Jachym, “Characteristics of Nd:YAG laser welded joints of dual phase steel,” Arch. Civ. Mech. Eng., vol. 9, no. 4, pp. 85–97, 2009
10. K. Takasawa, R. Ikeda, N. Ishikawa, and R. Ishigaki, “Effects of grain size and dislocation density on the susceptibility to high-pressure hydrogen environment embrittlement of high-strength low-alloy steels,” Int. J. Hydrogen Energy, vol. 37, no. 3, pp. 2669–2675, 2012.
11. S. Chaki, R. N. Bathe, and S. Ghosal, “Multi-objective optimisation of pulsed Nd : YAG laser cutting process using integrated ANN – NSGAI model,” J. Intell. Manuf., 2015.
12. Liu W, DuPont JN (2003) Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping. Scripta Materialia 48:1337–1342.
13. Atwood C, Ensz M, Greene D et al (1998) Laser engineered net shaping (LENS(TM)): a tool for direct fabrication of metal parts. Paper presented at the 17th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Orlando, 16–19 November 1998. <http://www.osti.gov/energycitations>
14. Optomec. LENS process. <http://www.optomec.com>