

[https://doi.org/10.51885/3134-8009\\_IJS\\_2026\\_2\\_16](https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_2_16)

XFTAP 55.01.11

## ЭЛЕКТР МАШИНАЛАРЫ ҮШІН АДДИТИВТІ ТЕХНОЛОГИЯЛАР НЕГІЗІНДЕГІ ЖАҢА КОНСТРУКЦИЯЛЫҚ ТӘСІЛДЕРГЕ ШОЛУ

### ОБЗОР НОВЫХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ОСНОВАННЫХ НА АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

### AN OVERVIEW OF NEW APPROACHES TO THE DESIGN OF ELECTRIC MACHINES BASED ON ADDITIVE TECHNOLOGIES

А.Б. Усеров<sup>1</sup>, Д.С. Мырзалиев<sup>1</sup>, В.Н. Печерский<sup>1</sup>, О.Б. Сейдуллаева<sup>1\*</sup>,  
Н.Н. Рахымтай<sup>1</sup>

<sup>1</sup>М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті, Шымкент қ., Қазақстан

\*Жауапты автор: Сейдуллаева Орынкул Бахытқызы, e-mail: orynkul\_s@mail.ru

#### Түйінді сөздер:

аддитивті технологиялар,  
аддитивті өндіріс, 3D  
басып шығару, электр  
машиналары, магниттік  
тізбек, ротор, энергия  
тиімділігі

#### ТҮЙІНДЕМЕ

Бұл мақала электр машиналары конструкцияларында аддитивті технологияларды қолданудың инженерлік және технологиялық мүмкіндіктерін зерттеуге арналған. Зерттеу тақырыбының өзектілігі электр машиналары өндірісінде заманауи аддитивті технологияларды пайдалану арқылы материал шығынын азайту, ішкі салқындату арналары бар күрделі конструкцияларды дайындау және технологиялық икемділікті арттыру қажеттілігімен түсіндіріледі. Жұмыстың мақсаты – электр машиналары конструкцияларында қолданылатын аддитивті өндіріс технологияларын салыстырмалы инженерлік тұрғыдан талдау және CAD/CAE негізіндегі сандық модельдеу арқылы олардың механикалық сенімділігін бағалау болып табылады. Зерттеу барысында LPBF, микроэкструзия және cold spray технологияларының өндірістік дәлдігі, бет сапасы, материалдық шектеулері және технологиялық тиімділігі салыстырмалы түрде талданды. SolidWorks CAD ортасында ротордың параметрлік үшөлшемді моделі құрылып, SolidWorks Simulation бағдарламасында оның кернеулік-деформациялық күйіне инженерлік талдау жүргізілді. Зерттеудің ғылыми жаңалығы электр машиналары роторының аддитивті өндіріс жағдайындағы механикалық сенімділігіне CAD/CAE негізіндегі авторлық инженерлік талдау жүргізумен негізделеді. Алынған нәтижелер аддитивті технологияларды қолдану арқылы электр машиналарының массасын азайтуға, күрделі геометриялық құрылымдарды қалыптастыруға және энергия тиімділігін арттыруға мүмкіндік бар екенін көрсетті.

#### Ключевые слова:

аддитивные  
технологии, аддитивное  
производство,

#### АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящена исследованию инженерных и технологических возможностей применения аддитивных технологий в конструкциях электрических машин. Актуальность темы исследова-



3D-печать, электрические  
машины, магнитная  
цепь, ротор,  
энергоэффективность

ния обусловлена необходимостью снижения расхода материалов, создания конструкций сложной геометрии с внутренними каналами охлаждения, повышения технологической гибкости при производстве электрических машин с использованием современных аддитивных технологий. Целью работы является сравнительный инженерный анализ аддитивных производственных технологий, применяемых в конструкциях электрических машин, оценка их механической надежности с использованием численного моделирования на основе CAD/CAE-систем. В ходе исследования проведен сравнительный анализ технологий LPBF, микроэкструзии и cold spray по таким параметрам, производственная точность, качество поверхности, материальные ограничения и технологическая эффективность. В среде SolidWorks CAD была создана параметрическая трехмерная модель ротора, в программе SolidWorks Simulation выполнен инженерный анализ его напряженно-деформированного состояния. Научная новизна исследования заключается в проведении авторского инженерного анализа механической надежности ротора электрической машины в условиях аддитивного производства с использованием CAD/CAE-моделирования. Полученные результаты показали, что применение аддитивных технологий позволяет снизить массу электрических машин, формировать конструкции сложной геометрии и повысить их энергетическую эффективность.

---

**keywords:**

additive technologies,  
additive manufacturing,  
3D printing, electric  
machines, magnetic circuit,  
rotor, energy efficiency

---

**ABSTRACT**

This paper investigates the engineering and technological potential of additive manufacturing technologies in electric machine structures. The relevance of the study is determined by the need to reduce material consumption, manufacture complex geometries with internal cooling channels, and improve production flexibility in the design and manufacturing of electric machines. The aim of the study is to perform a comparative engineering analysis of additive manufacturing technologies used in electric machine structures and to evaluate their mechanical reliability through CAD/CAE-based numerical simulation. The study compares LPBF, microextrusion, and cold spray technologies in terms of manufacturing accuracy, surface quality, material limitations, and technological efficiency. A parametric three-dimensional rotor model was developed in the SolidWorks CAD environment, and its stress-strain state under centrifugal loading was analyzed using SolidWorks Simulation. The scientific novelty of the research lies in the original CAD/CAE-based engineering assessment of the mechanical reliability of an electric machine rotor designed for additive manufacturing. The simulation results showed that the maximum von Mises stress was  $1.189 \times 10^7$  Pa, the maximum displacement was  $9.748 \times 10^{-4}$  mm, and the calculated safety factor reached 52.2, indicating a high level of structural reliability. The obtained results demonstrate that additive manufacturing technologies provide opportunities to reduce rotor mass, create complex geometries, and improve the energy efficiency of electric machines.

---

**КІРІСПЕ**

Қазіргі таңда әлемдік өнеркәсіп қарқынды түрде цифрландыру және интеллектуалдандыру үдерісінен өтуде. Бұл өзгерістер «Индустрия 4.0» тұжырымдамасымен сипатталып, өндірістік жүйелерге цифрлық технологияларды, автоматтандыру құралдарын және жаңа өндірістік тәсілдерді кеңінен енгізуді көздейді. Аталған үдерістің маңызды құрамдас бөліктерінің бірі – аддитивті технологиялар болып табылады. Аддитивті өндіріс дәстүрлі

субтрактивті әдістерге балама ретінде материалды қабат-қабат қосу арқылы бұйым жасауға мүмкіндік береді және өндірістік процестердің икемділігін айтарлықтай арттырады.

Электр машиналары қазіргі заманғы энергетика, көлік, өнеркәсіптік автоматтандыру және жаңартылатын энергия көздері салаларында кеңінен қолданылады. Осыған байланысты олардың энергия тиімділігін арттыру, массасын азайту, сенімділігін жоғарылату және жаңа конструкциялық шешімдерді енгізу өзекті ғылыми-техникалық мәселе болып табылады.

Әдеби деректерді талдау көрсеткендей, аддитивті технологияларды қолдану электр машиналарының дәстүрлі конструкцияларымен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарға ие. Атап айтқанда, күрделі ішкі каналдары бар салқындату жүйелерін қалыптастыру, магниттік ағындарды тиімді басқаруға мүмкіндік беретін геометриялық пішіндерді жасау мүмкіндігі бар. Алайда, аддитивті өндірістің анизотропиясы, материал қасиеттерінің біркелкі болмауы және өндіріс құны сияқты мәселелер әлі де өзекті болып отыр.

Осыған байланысты аддитивті технологиялардың электр машиналары конструкцияларында қолданылуын кешенді түрде талдау, олардың артықшылықтары мен шектеулерін анықтау ғылыми және практикалық тұрғыдан маңызды болып табылады. Бұл мақалада соңғы жылдары жарияланған ғылыми еңбектер негізінде электр машиналарының әртүрлі типтерінде аддитивті өндіріс әдістерін қолданудың негізгі бағыттары қарастырылады.

Зерттеудің мақсаты – электр машиналарын жобалау мен өндіру саласында аддитивті технологияларды қолдану бойынша заманауи ғылыми жетістіктерге жүйелі шолу жасау және олардың тиімділігін бағалау. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды:

- аддитивті технологиялардың электр машиналары конструкцияларында қолданылу бағыттарын талдау;
- әртүрлі зерттеулерде ұсынылған техникалық шешімдерді салыстыру;
- аддитивті өндірістің артықшылықтары мен шектеулерін анықтау;
- алынған нәтижелердің ғылыми және практикалық маңыздылығын бағалау.

Зерттеу нысаны ретінде электр машиналарының конструкциялық элементтері, ал зерттеу пәні ретінде аддитивті технологияларды қолдану арқылы оларды жетілдіру тәсілдері қарастырылады. Мақала құрылымы зерттеу логикасына сәйкес құрастырылып, келесі бөлімдерде қолданылған материалдар мен әдістер, алынған нәтижелер және олардың талқылауы ұсынылады (Industrie 4.0 Working Group, 2016).

«Төртінші өнеркәсіптік революция» кітабының кіріспесінде К. Шваб «ең жаңа технологияларды дамыту және енгізу белгісіздікпен байланысты екенін және осы өнеркәсіптік революциясына байланысты өзгерістердің болашақта қалай дамитыны туралы әлі білмейтінімізді білдіреді» деп жазады (Шваб К., 2016). Бұл жағдай «индустриялық революция 4.0 Глоб жаһандық трендінің барлық қатысушыларына – әртүрлі елдердің үкіметтеріне, бизнеске, ғылыми қоғамдастыққа және жұртшылыққа үлкен жауапкершілік жүктейді».

Біздің басты мақсатымыз – адитивті өндіріс туралы ағымдағы білімді (және технологиялық тенденцияларды) жіктеу және оны пайдаланудың ықтимал мүмкіндіктерін анықтау. Төртінші өнеркәсіптік революция, атап айтқанда 4.0 индустриясы – бұл жақында пайда болған интеллектуалды автоматтандыру қозғалысы. Жаңа дәуірде жаңа ақпараттық технологияларды интеграциялау контекстінде заманауи өндірістік дағдыларды пайдалану экономикалық бәсекеге қабілеттілікте маңызды рөл атқарады.

Материалтану – адитивті өндіріс технологияларының дамуын түсінудің кілті. Осы саладағы зерттеушілер 3D басып шығаруға жарамды жаңа материалдарға үлкен қызығушылық танытады. АӨ үшін көптеген пластикалық / полимерлі компоненттер бар (Singh S., 2017), кейбір нақты материалдар өнеркәсіптің қосымша назарын аударады.

Бұрынғы зерттеулерде негізінен магниттік және технологиялық қасиеттер зерттелсе, бұл жұмыста ротор конструкциясының механикалық сенімділігі CAD/CAE негізінде кешенді бағаланды. Ротор конструкциясы үшін SolidWorks Simulation ортасында centrifugal loading жағдайындағы кернеулік-деформациялық күй бағаланды.

### **ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӨДІСТЕРІ**

Осы зерттеу жұмысы электр машиналары конструкцияларында аддитивті технологияларды қолданудың инженерлік және технологиялық ерекшеліктерін талдауға бағытталды.

#### **Әдеби шолу**

Жақсы механикалық сипаттамаларына байланысты металдар машина жасаудағы ең көп таралған материалдар болып табылады. Нәтижесінде, 3D басып шығару индустриясы дәстүрлі түрде жасалған аналогтарын алмастыра алатын металл бөлшектерін жасаудың жаңа шешімдерін іздейді. 3D басып шығару технологиясындағы жаңа әзірлемелер белсенді зерттеу саласына көшуге тырысады: аддитивті металл өндірісі (АМӨ). Жақында көптеген металл компоненттерін алюминий, титан, тот баспайтын болат және т. б. процестегі негізгі компоненттер ретінде (Herzog D., Seyda V., және Wycisk E. et al, 2016)). Коммерциялық 3D металл принтерлерінің көпшілігі металл ұнтақтарын пайдаланады, ал басқа қолайлы материал қоспалары да АМӨ үшін мұқият зерттелген (Korner C., 2016). Сонымен қатар, АӨ-дан алынған микроқұрылым созылу/шаршау әрекеті сияқты бөлшектердің механикалық қасиеттеріне үлкен әсер етеді. Осылайша, микроқұрылымға, фазалық құрамға, термиялық өңдеуге қатысты мәселелер соңғы уақытта АӨ зерттеушілер қауымдастығының назарын аударды (Grigoriev A., Polozov I., және Sufiarov V. et al, 2017).

Мысалы, автор (Korner C., 2016) лазерге негізделген АМӨ процесі арқылы жасалған компоненттердің кейбір механикалық қасиеттерін зерттеп, крекинг механизмін көрсетті. Екінші жағынан, әзірлеуге әлі көп нәрсе бар, өйткені өндірілген бөлшектер әлі саланың үмітін ақтай алмады. Шешілуі керек кейбір мәселелерге қолайлы шығындар, өндіріс жылдамдығы, созылу/шаршау өнімділігі, қаттылық, бетінің сапасы және біркелкі микроқұрылым жатады. Жаңа дәуірде, егер ол материалтану мен АМӨ процестерін жетілдіру арқылы бар кедергілерді еңсерсе, 4.0 индустриясын іске асырудың негізгі бағыты болуы мүмкін (Rayna T., 2015, Striukova L. Gao W., және Zhang Y. et al 2015).

Аддитивті технологиялар үшін материалдардың, өнімдердің, жүйелердің және қызметтердің кең ауқымы үшін техникалық стандарттарды әзірлеуге арналған американдық ASTM International (American Society for testing and materials) ұйымы екі негізгі терминді ұсынады – additive Fabrication (AF), Additive Manufacturing( AM), сондай-ақ лег заңдыно синонимдер – additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing және Freeform fabrication, олар орыс тіліндегі нұсқада «аддитивті технологиялар» (АТ), «аддитивті өндіріс» (АӨ), сондай-ақ қабатты синтез технологиялары деп дұрыс аударылуы мүмкін.

Қоспа өндіру әдістері материалдарды дұрыс басқара отырып, әртүрлі күрделі пішіндер мен құрылымдарды жасай алады, бұл қалдықтардың азаюына және дәстүрлі өндіріске қарағанда әртүрлі басқа артықшылықтарға әкеледі, бұл оларды барған сайын танымал етеді (Spoerk M., Savandaiah C. және Arbeiter F. et al 2019, Ngo T.D., Kashani A., және Imbalzano G. et al 2018).

Қазіргі таңда аддитивті технологиялар (АТ) электр машиналарының құрылымдарын жетілдірудің маңызды бағыттарының біріне айналды. Оларды пайдалану дәстүрлі өндіріс әдістерімен қол жеткізу мүмкін болмаған жаңа инновациялық шешімдерді іске асыруға және қолданыстағы конструкцияларды тиімдірек етуге жол ашады. АТ көмегімен күрделі пішінді бөлшектерді жасауға мүмкіндік туды. Бұдан бөлек, технологиялық

операциялардың санын қысқарту есебінен өндірістің еңбек шығыны азаяды. Бұл әдістің тағы бір маңызды артықшылығы – дерлік қалдықсыз орындалуы. Мұндай ерекшеліктер аддитивті өндірістің қарқынды дамуына ықпал етуде.

Зерттеу барысында ғылыми әдебиеттерге салыстырмалы шолу жүргізумен қатар, CAD/CAE негізіндегі авторлық инженерлік модельдеу орындалды (Myrzaliyev D.S., Cieslik J. & Seidullayeva O.B., 2025).

Зерттеудің ақпараттық базасы ретінде 2014–2024 жылдар аралығында жарияланған ғылыми мақалалар, халықаралық конференция материалдары және жетекші ғылыми журналдардағы еңбектер пайдаланылды. Әдеби дереккөздерді іріктеу барысында IEEE, Elsevier, Springer, MDPI және басқа да рецензияланатын ғылыми басылымдарда жарияланған жұмыстарға басымдық берілді.

Ақпаратты іздеу additive manufacturing, electric machines, LPBF, cold spray, microextrusion, additively manufactured rotors, CAD/CAE analysis сияқты кілт сөздер арқылы жүргізілді.

Дереккөздерді іріктеу кезінде келесі критерийлер ескерілді:

- зерттеу жұмысының ғылыми рецензияланған басылымда жариялануы;
- электр машиналарының нақты конструкциялық элементтерінің қарастырылуы;
- аддитивті технологияларды инженерлік немесе өндірістік тұрғыдан бағалау;
- механикалық, термиялық немесе магниттік сипаттамалардың талдануы;
- есептік модельдеу немесе тәжірибелік нәтижелердің келтірілуі.

Таңдап алынған ғылыми жұмыстар негізінде электр машиналары конструкцияларында қолданылатын негізгі аддитивті технологияларға салыстырмалы инженерлік талдау жүргізілді.

Қолданылған аддитивті технологиялар

Зерттеу барысында электр машиналары өндірісінде кеңінен қолданылатын келесі аддитивті технологиялар қарастырылды:

- лазерлік ұнтақ қабатын балқыту (LPBF);
- микроэкструзия;
- cold spray технологиясы;
- көп саптамалы 3D-басып шығару.

Әрбір технология үшін өндірістік дәлдік, бет сапасы, материалдық шектеулер, магниттік қасиеттердің өзгеруі, технологиялық деформациялар және өндірістік тиімділік параметрлері салыстырмалы түрде бағаланды.

Талдау барысында LPBF технологиясының геометрияларды жоғары дәлдікпен қалыптастыруда тиімді екені анықталды. Сонымен қатар бұл технологияда қалдық кернеулер мен термиялық деформациялардың пайда болу ықтималдығы байқалды.

Микроэкструзия технологиясы өндірістік шығындардың төмендігімен ерекшеленгенімен, оның геометриялық дәлдігі мен механикалық қасиеттері салыстырмалы түрде төмен екені анықталды.

Cold spray технологиясында материалдың электрөткізгіштік қасиеттері жақсы сақталғанымен, қабатаралық адгезия мәселелері байқалатыны анықталды.

Механикалық талдау нәтижелері бойынша ротор конструкциясындағы кернеу концентрациясының негізгі аймақтары анықталды.

Осылайша жүргізілген инженерлік модельдеу мен салыстырмалы технологиялық талдау электр машиналары конструкцияларында аддитивті өндірісті қолданудың тиімділігін кешенді бағалауға мүмкіндік берді (Zawadzki P., Żywicki K., 2016).

Магниттік материал қабаттарының арасына оқшаулағыш қабат енгізілген. Зерттеу барысында басып шығарудың екі әдісі қарастырылды: микроэкструзия және LPBF (Laser Powder Bed Fusion) технологиясы.

Аталған әдістер арқылы дайындалған өзектердің магниттік сипаттамалары 0,5 мм қалыңдықтағы M270-50A маркалы электротехникалық болат өзегімен салыстырылды. Нәтижелер көрсеткендей, LPBF әдісімен жасалған үлгінің ВН циклі ең үлкен ауданды иеленсе, ал M270-50A болатында бұл көрсеткіш ең төменгі мәнге ие болды. Дегенмен, 50 Гц жиілікте нақты шығындарды талдау кезінде ең үлкен шығын LPBF үлгісінде байқалды, ал ең төменгі шығын M270-50A болат өзегінде тіркелді. Бұл мәліметтер микроэкструзия әдісінің магнитөткізгіш дайындауда LPBF технологиясына қарағанда тиімдірек екенін айғақтайды.

#### 1-кесте. Аддитивті технологияларды салыстыру

| Көрсеткіш                       | LPBF                                  | Микроэкструзия   | Cold Spray                   |
|---------------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------------------|
| Өндірістік дәлдік               | Жоғары ( $\pm 0.05$ мм)               | Орташа           | Орташа                       |
| Бет сапасы                      | Жоғары                                | Төменірек        | Қосымша өңдеу қажет          |
| Материалдар                     | Fe-Si, Al, Ti                         | Полимер-композит | Cu, Al, магниттік қорытпалар |
| Магниттік қасиеттер             | Жақсы, бірақ қалдық кернеу әсер етеді | Төмен шығындар   | Жақсы өткізгіштік            |
| Технологиялық шектеу            | Қалдық кернеу, қымбат жабдық          | Төмен беріктік   | Қабат адгезиясы              |
| Өндіріс құны                    | Жоғары                                | Төмен            | Орташа                       |
| Электр машиналарында қолданылуы | Магнитөткізгіштер                     | Прототиптер      | Роторлар, катушкалар         |
| Артықшылығы                     | Күрделі геометрия                     | Арзан өндіріс    | Жоғары өткізгіштік           |
| Кемшілігі                       | Анизотропия                           | Төмен дәлдік     | Беттік кедір-бұдырлық        |
| Ескерту – авторлар құрастырған  |                                       |                  |                              |

Басқа бір зерттеуде осьтік ағынды синхронды электр қозғалтқышының статор магнитөткізгіші аддитивті әдістер арқылы жасалды. Мұнда 6,5 % кремний қосылған металл ұнтақ қолданылып, статор Гильберт құрылымы негізінде қалыптастырылды. Эксперимент нәтижелері мұндай магнитөткізгіштің дәстүрлі тәсілдермен өндірілген үлгілерге қарағанда құйынды ток шығындарын едәуір азайтатынын көрсетті (Grigoriev A., Polozov I. және Sufiiarov V. et al, 2017).

Механикалық талдау нәтижелері бойынша ротор конструкциясындағы кернеу концентрациясының негізгі аймақтары анықталды және конструкцияның беріктік қоры бағаланды.

Жүргізілген тәжірибелердің нәтижелері көрсеткендей, ұсынылған ротор конструкциясындағы тұрақты магниттердің (ТМ) температурасы дәстүрлі шешімдерге қарағанда қарқынды салқындатудың арқасында айтарлықтай төмен деңгейде болады (Sethuraman L., Vijayakumar G., 2022).

Зерттеулердің бірінде авторлар аддитивті технология негізінде жасалған, тұрақты магниттердің ішкі орналасуына ие қабырғасыз ротордың жаңа түрін ұсынып, оны дәстүрлі ротор құрылымымен салыстырды. Ротордың механикалық беріктігін қамтамасыз ету үшін әдетте полюстік жиектер қолданылады, алайда олар шашырау ағындарын туындатып, электр қозғалтқышының тиімділігін төмендетеді. Ұсынылған жаңа конструкцияда тұрақты магниттер қабырғасыз роторда орналасып, олардың беріктігін магниттік емес пластина қамтамасыз етеді (Selema A., Van Den Abbeele J. және Ibrahim M.N., Sergeant P., 2023).

Жұмыста ротордың дәстүрлі құрылымына негізделген қозғалтқыш параметрлері мен аддитивті технологиялар арқылы жасалған қозғалтқыш сипаттамалары салыстырмалы түрде берілген (Selema A., Beretta M., және Van Coppenolle M., et al 2023).

Бұл тәсіл аддитивті өндіріс технологияларын қолдануға негізделген және автоматтандырылған геометриялық жобалауда жиі пайдаланылатын Безье қисықтарына сүйенеді. Оңтайландырудың басты мақсаты – электр болатының массасын барынша азайта отырып, жоғары айналу моментін қамтамасыз ету болды.

### **Әдеби шолу нәтижелері**

#### **1. Электр машиналары аддитивті технологиялар арқылы дайындау нәтижелері**

Жүргізілген әдеби талдау нәтижелері көрсеткендей, электр машиналарының катушкаларын аддитивті технологиялар көмегімен дайындау соңғы жылдары белсенді зерттеліп жатқан бағыттардың бірі болып табылады. Әсіресе клапанды реактивті қозғалтқыштар мен жоғары қуат тығыздығына ие электр машиналарында бұл тәсілдің тиімділігі айқын байқалады. Бірқатар ғылыми еңбектерде 3D басып шығару арқылы жасалған катушкалардың дәстүрлі мыс катушкаларымен салыстырғандағы артықшылықтары жан-жақты қарастырылған.

#### **2. Магниттік тізбектерді аддитивті өндіріс әдістерімен қалыптастыру**

Электр машиналарының тиімділігіне айтарлықтай әсер ететін негізгі элементтердің бірі – магниттік тізбек болып табылады. Соңғы зерттеулер аддитивті технологиялардың магнитөткізгіш элементтерді дайындауда кең мүмкіндіктер ұсынатынын дәлелдейді. Әсіресе осьтік ағынды синхронды электр қозғалтқыштарының статор магнитөткізгіштерін аддитивті тәсілмен жасауға арналған жұмыстарда айтарлықтай нәтижелер алынған.

#### **3. Ротор конструкцияларын оңтайландырудағы аддитивті технологиялардың рөлі**

Аддитивті технологияларды қолданудың келесі маңызды бағыты – ротор конструкцияларын жетілдіру болып табылады. Әсіресе тұрақты магнитті синхронды қозғалтқыштардың роторларын дайындауда бұл тәсілдің артықшылықтары айқын байқалады. Бірқатар зерттеулерде аддитивті өндіріс арқылы жасалған жеңілдетілген ротор конструкциялары ұсынылған.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, роторды білікпен бірге біртұтас құрылым ретінде дайындау оның механикалық беріктігін арттырумен қатар, салқындату тиімділігін де жақсартады. Ауамен немесе сұйықтықпен салқындатылатын ішкі арналарды қалыптастыру мүмкіндігі тұрақты магниттердің жұмыс температурасының төмендеуіне ықпал етеді. Бұл фактор электр машиналарының сенімділігі мен қызмет ету мерзімін арттыруда маңызды рөл атқарады.

#### **4. Жел энергетикасына арналған синхронды машиналардағы аддитивті шешімдер**

Жаңартылатын энергия көздерінің, әсіресе жел энергетикасының қарқынды дамуы жоғары қуатты, сенімді және массасы аз электр генераторларын әзірлеу қажеттілігін арттыруда. Бұл салада аддитивті технологияларды қолдану ерекше қызығушылық тудырады, себебі жел генераторларына арналған синхронды машиналар ірі габаритті және күрделі магниттік жүйелерге ие.

Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, аддитивті тәсілмен оңтайландырылған магниттік жүйелер электр болатының жалпы массасын айтарлықтай азайтуға жағдай жасайды. Кейбір жұмыстарда статор мен ротордың магниттік контурларын қайта пішіндеу арқылы болат массасын ондаған тоннаға дейін қысқарту мүмкін болған. Бұл көрсеткіш ірі қуатты жел генераторлары үшін экономикалық және технологиялық тұрғыдан аса маңызды болып табылады.

#### **5. Аддитивті және дәстүрлі өндіріс әдістерінің салыстырмалы талдауы**

Жүргізілген талдау барысында аддитивті технологиялар арқылы жасалған электр машиналары элементтерінің дәстүрлі өндіріс әдістерімен дайындалған аналогтарымен

салыстырмалы бағалауы жүргізілді. Салыстыру бірнеше негізгі көрсеткіштер бойынша жүзеге асырылды, олардың қатарына масса, энергия тиімділігі, магниттік шығындар және конструкциялық икемділік жатады.

Нәтижелер аддитивті әдістердің конструкциялық икемділік тұрғысынан айқын артықшылыққа ие екенін көрсетті. Күрделі ішкі құрылымдары бар салқындату арналары, арнайы пішінделген катушкалар және магниттік тізбектер дәстүрлі әдістермен салыстырғанда аддитивті өндіріс арқылы әлдеқайда оңай жүзеге асырылады. Бұл электр машиналарының жылулық режимін жақсартып, олардың жұмыс тұрақтылығын арттырады.

6. Зерттеудің ғылыми маңыздылығы электр машиналары конструкцияларында қолданылатын аддитивті технологиялардың артықшылықтары мен технологиялық шектеулерін жүйелі инженерлік тұрғыдан салыстырумен сипатталады. Жұмыс барысында әртүрлі аддитивті өндіріс әдістерінің электр машиналары элементтеріне әсері құрылымдық, магниттік және жылулық аспектілер бойынша талданды.

Алынған нәтижелердің сенімділігі қарастырылған дереккөздердің беделді ғылыми журналдарда жариялануымен және олардың эксперименттік немесе есептік әдістерге негізделуімен қамтамасыз етіледі. Сонымен қатар, әртүрлі авторлар ұсынған нәтижелердің өзара салыстырылуы жалпы үрдістер мен қайталанатын заңдылықтарды анықтауға мүмкіндік берді

#### **Аддитивті өндірістегі технологиялық шектеулер**

Аддитивті өндіріс технологияларын электр машиналары элементтерін дайындауда қолдану кезінде бірқатар өндірістік-технологиялық шектеулер байқалады. Әсіресе LPBF технологиясында жоғары температуралық градиенттердің әсерінен қалдық кернеулер мен локальды деформациялар пайда болуы мүмкін. Бұл факторлар магнитөткізгіштердің геометриялық дәлдігіне және магниттік қасиеттерінің тұрақтылығына әсер етеді.

Қабаттап қалыптастыру процесі нәтижесінде материал құрылымында анизотропия құбылысы байқалады. Мұндай құрылым электр машиналарының ұзақмерзімді сенімділігіне, шаршау беріктігіне және діріл тұрақтылығына теріс ықпал етуі мүмкін.

Беттік кедір-бұдырлықтың жоғары болуы электр машиналарының ауа саңылауы аймағында қосымша шығындардың пайда болуына әкеледі. Осыған байланысты аддитивті өндірістен кейін механикалық өңдеу және термиялық тұрақтандыру операцияларын қолдану қажеттілігі туындайды.

### **НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ**

#### **CAD/CAE және SolidWorks Simulation негізіндегі инженерлік талдау**

Есептеулер электр машиналары элементтерін аддитивті технологиялар арқылы дайындау кезінде пайда болатын механикалық жүктемелердің әсерін бағалауға бағытталды.

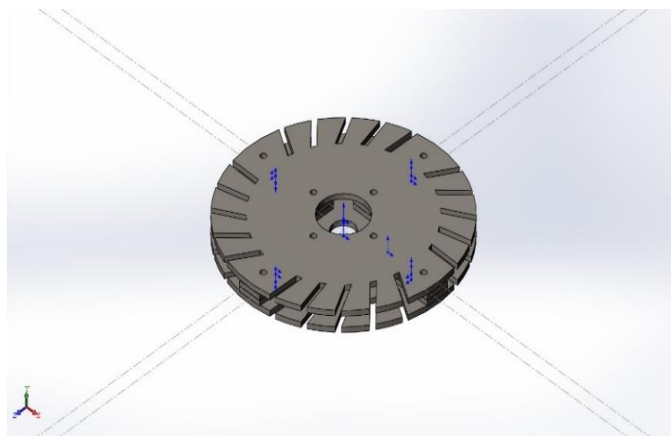
Ротор конструкциясының механикалық күйін бағалау барысында айналу әсерінен пайда болатын орталықтан тепкіш жүктемелер ескерілді. Сандық талдау SolidWorks Simulation ортасында жүргізілді.

Зерттеу барысында электр машинасының ротор конструкциясына авторлық инженерлік модельдеу жүргізілді. Ротордың параметрлік үшөлшемді моделі SolidWorks CAD ортасында құрылды (Мырзалиев Д.С., Цеслик Яцек & Сейдуллаева О.Б., Усеров А.Б, 2025).

Модель құрамына:

- орталық бекіту аймағы;
- радиалды орналасқан қалақшалар;
- массаны азайтатын геометриялық ойықтар енгізілді.

Ротор материалы ретінде легирленген болат (Alloy Steel) қабылданды.

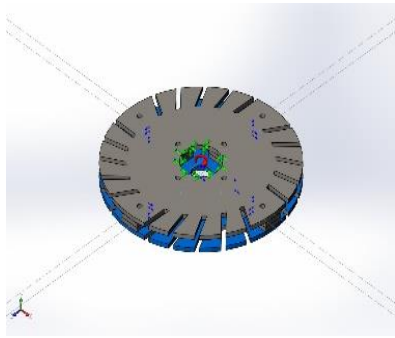
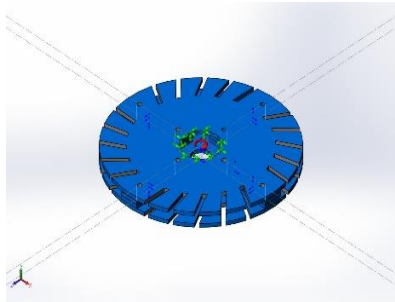


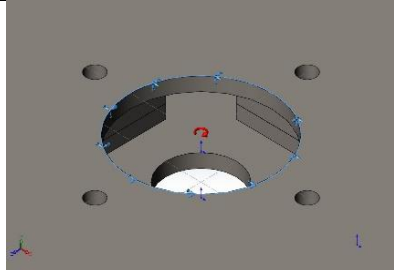
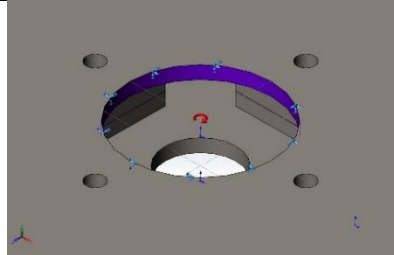
**1-сурет.** Ротордың параметрлік үшөлшемді моделі

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Есептік модельде ротордың орталық аймағына Fixed Geometry шекаралық шарты берілді. Алынған нәтижелерді өңдеу барысында салыстырмалы талдау, инженерлік интерпретация және құрылымдық бағалау әдістері қолданылды.

**2-кесте.** SolidWorks Simulation ортасында сандық инженерлік талдау

| Ротордың 3D моделі                                                                  | Сипаттамалар                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                   | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|  | <p>Масса: 0,366371 кг<br/> Көлемі: <math>4,75806 \times 10^{-5} \text{ м}^3</math><br/> Тығыздығы: 7700 кг/м<sup>3</sup><br/> Салмағы: 3,59043 Н</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|  | <p>Ротор материалы ретінде легирленген болат (Alloy Steel) қабылданды. Материалдың аққыштық шегі <math>\sigma_y = 6,204 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2</math><br/> Материал атауы: легирленген болат (Alloy Steel) (SS)<br/> Модель түрі: Сызықты серпімді изотропты модель<br/> Қолданылған беріктік критерийі: Максималды von Mises кернеуі<br/> Аққыштық шегі: <math>6,20422 \times 10^8 \text{ Н/м}^2</math><br/> Созылу беріктігі: <math>7,23826 \times 10^8 \text{ Н/м}^2</math><br/> Серпімділік модулі: <math>2,1 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2</math><br/> Пуассон коэффициенті: 0,28<br/> Тығыздығы: 7700 кг/м<sup>3</sup><br/> Ығысу модулі: <math>7,9 \times 10^{10} \text{ Н/м}^2</math><br/> Жылулық ұлғаю коэффициенті: <math>1,3 \times 10^{-5} \text{ К}</math></p> |

|                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Жүктемелер және шекаралық шарттар                                                                                                                                                                                                         |
|  | Есептік модельде ротордың айналу әсерін модельдеу үшін орталықтан тепкіш жүктеме (Centrifugal Load) қолданылды. Жүктеме ротордың Face<1> бетіне берілді. Айналу параметрлері:<br>бұрыштық жылдамдық - 3000 айн/мин ;<br>бұрыштық үдеу - 0 |
| Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған |                                                                                                                                                                                                                                           |

Ротордың айналу жылдамдығы бұрыштық жылдамдық арқылы анықталды:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, [\text{рад/с}]$$

мұндағы:  $\omega$  - бұрыштық жылдамдық, рад/с;  $n$  - айналу жиілігі, 3000 айн/мин

Зерттеу барысында:

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314,16 \text{ рад/с}$$

Ротордың механикалық беріктігін бағалау үшін von Mises критерийі қолданылды:

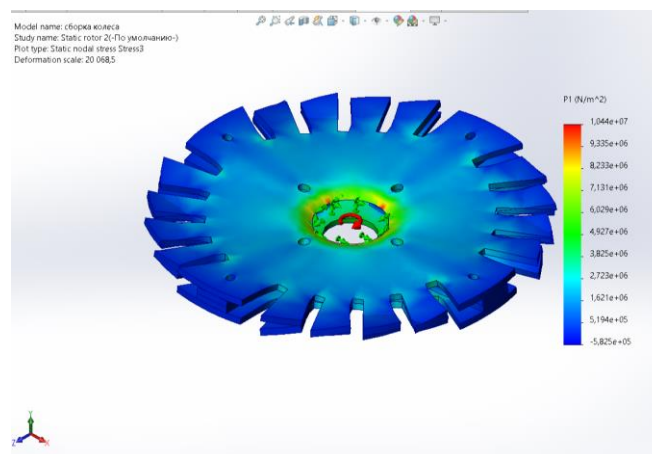
$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}, [H/M^2]$$

мұндағы:  $\sigma_{vm}$  - эквивалентті кернеу;

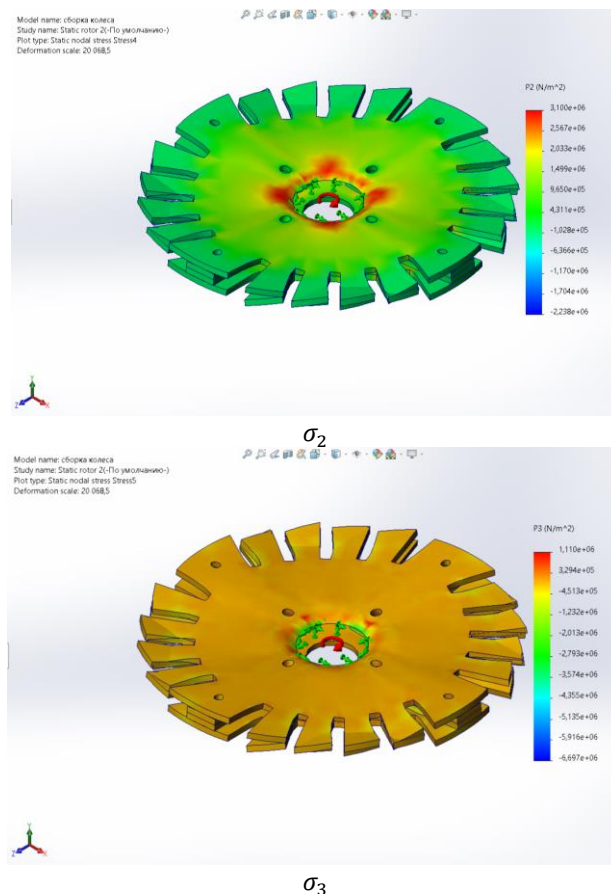
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - бас кернеулер.

Сандық модельдеу нәтижесінде бірінші  $\sigma_1 = 1,044 \cdot 10^7$ , екінші  $\sigma_2 = 3,100 \cdot 10^6$  және үшінші  $\sigma_3 = 1,110 \cdot 10^6$  бас кернеулер мәндерін көрсетті.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(1,044 \cdot 10^7 - 3,100 \cdot 10^6)^2 + (3,100 \cdot 10^6 - 1,110 \cdot 10^6)^2 + (1,110 \cdot 10^6 - 1,044 \cdot 10^7)^2}{2}} = 1,184 \cdot 10^7 H/M^2$$



$\sigma_1$



**2-сурет.** Сандық модельдеу нәтижелері

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Осы мәндерді von Mises критерийі бойынша өңдеу нәтижесінде эквивалентті кернеу шамамен  $1,184 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  құрады. SolidWorks Simulation бағдарламасында алынған максималды эквивалентті кернеу  $1,189 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  болды.

Сандық есептеу нәтижесінде:  $\sigma_{vm} = 1,189 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  мәні алынды.

Қауіпсіздік коэффициентін анықтау

Ротор конструкциясының беріктік қоры қауіпсіздік коэффициенті арқылы бағаланды:

$$n_s = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}}$$

мұндағы:  $n_s$  - қауіпсіздік коэффициенті;  $\sigma_y$  - материалдың аққыштық шегі;  $\sigma_{max}$  - максималды эквивалентті кернеу.

Материал үшін:  $\sigma_y = 6,204 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ ;  $\sigma_{max} = 1,189 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  есептеу нәтижесінде:

$$n_s = \frac{6,204 \cdot 10^8}{1,189 \cdot 10^7} = 52,17 \approx 52,2$$

Алынған нәтиже ротор конструкциясының беріктік қорының жоғары екенін көрсетті.

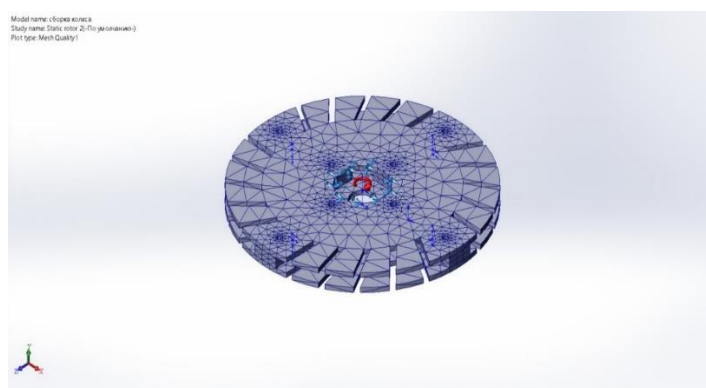
Бұл мән ротор конструкциясының жоғары қаттылыққа ие екенін және эксплуатациялық режим кезінде геометриялық тұрақтылық сақталатынын көрсетті.

Ротордың үшөлшемді CAD моделі негізінде centrifugal force жүктемесі әсеріндегі статикалық талдау орындалды (Н.Н. Рахымтай, Д.С. Мырзалиев, К.К. Сейтказенова & Н.А. Кадиров, О.Б. Сейдуллаева, 2025). Есептеу барысында ротордың орталық аймағына fixed support шекаралық шарты беріліп, модельге 3000 айн/мин айналу жылдамдығына сәйкес келетін айналу жүктемесі енгізілді.

Сандық модельде blended curvature-based mesh пайдаланылды. Торлық модель құрамында 27532 түйін және 13470 соңғы элемент болды.

### 3-кесте. Торлық модельдің негізгі параметрлері

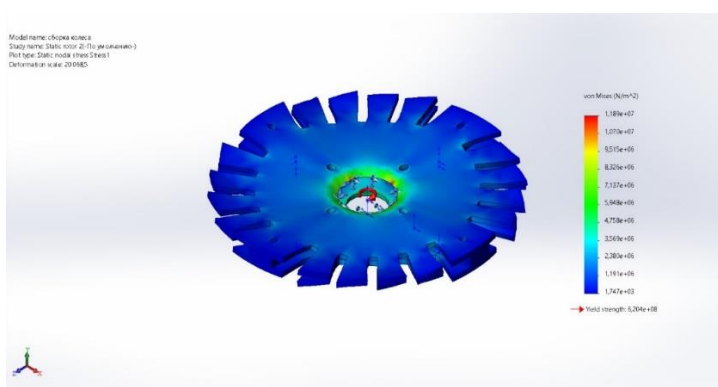
| Параметрлер                                    | Мәні   |
|------------------------------------------------|--------|
| Жалпы түйіндер саны                            | 27532  |
| Жалпы соңғы элементтер саны                    | 13470  |
| Максималды Aspect Ratio                        | 10,492 |
| Aspect Ratio < 3 болатын элементтердің үлесі:  | 87     |
| Aspect Ratio > 10 болатын элементтердің үлесі: | 0,0297 |
| Деформацияланған элементтер                    | 0      |
| Ескерту – авторлар құрастырған                 |        |



### 3-сурет. Ротордың торлық моделі

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Алынған торлық модель сапасы инженерлік есептеулер жүргізу үшін жеткілікті деңгейде екені анықталды. Элементтердің басым бөлігінің aspect ratio көрсеткіші 3-тен төмен болғандықтан, есептеу нәтижелерінің дәлдігі мен тұрақтылығы қамтамасыз етілді.



### 4-сурет. Von Mises бойынша эквивалентті кернеу

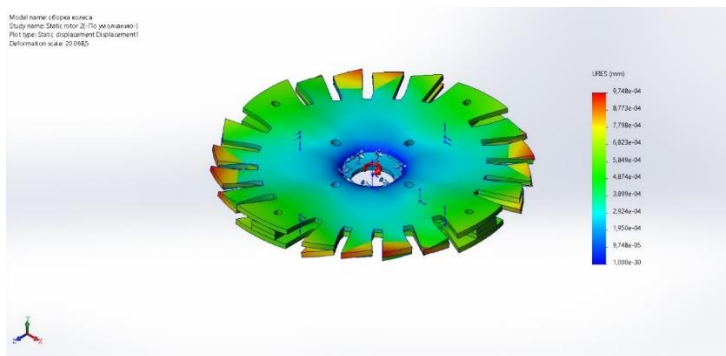
Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Есептеу нәтижелері бойынша ротордағы максималды эквивалентті von Mises кернеуі  $\sigma_{max} = 1,189 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  мәнін көрсетті. Кернеулердің ең жоғары концентрациясы орталық бекіту аймағында және қалақша ойықтарының түбінде байқалды.

Ротордың толық деформациясының максималды мәні  $\delta_{max} = 9,748 \cdot 10^{-4}$  мм болды. Бұл алынған деформация мәндерінің өте төмен екенін және конструкцияның жеткілікті қаттылыққа ие екенін көрсетті.

#### Аддитивті технологиялардың инженерлік тиімділігін бағалау

Жүргізілген инженерлік талдау аддитивті өндіріс технологиялары күрделі ротор конструкцияларын дайындау кезінде бірқатар артықшылықтар беретінін көрсетті.

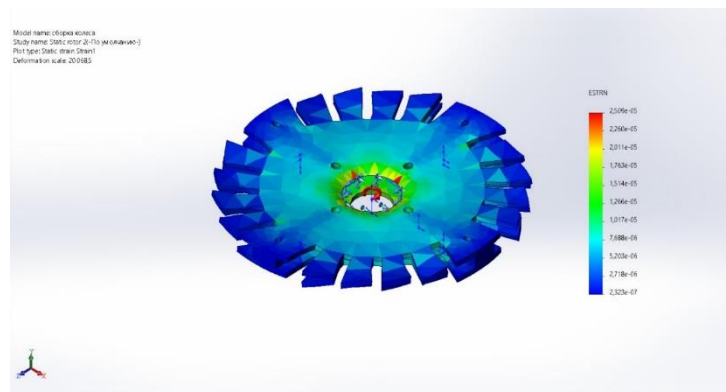


**5-сурет.** Толық деформация

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Атап айтқанда:

- күрделі геометрияларды дайындау мүмкіндігі;
- конструкция массасын төмендету;
- ішкі салқындату арналарының енгізілуі;
- материал шығынын азайту;
- параметрлік геометрияны оңтайландыру мүмкіндігі.



**6-сурет.** Эквивалентті деформация

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған

Сонымен қатар инженерлік талдау барысында аддитивті өндірістің кейбір технологиялық шектеулері анықталды:

- геометриялық ойықтар аймағында кернеу концентрациясының пайда болуы;
- материал анизотропиясының ықтимал әсері;
- қалдық кернеулердің қалыптасу қаупі;
- беттік кедір-бұдырлықтың жоғары болуы;
- кейінгі механикалық өңдеу қажеттілігі.

Алынған нәтижелер бойынша есептелген кернеулер материалдың рұқсат етілетін шектерінен айтарлықтай төмен болғандықтан, зерттелген ротор конструкциясы 3000 айн/мин айналу жылдамдығы кезінде сенімді жұмыс істей алады деген қорытынды жасалды.

## Салыстырмалы инженерлік талдау

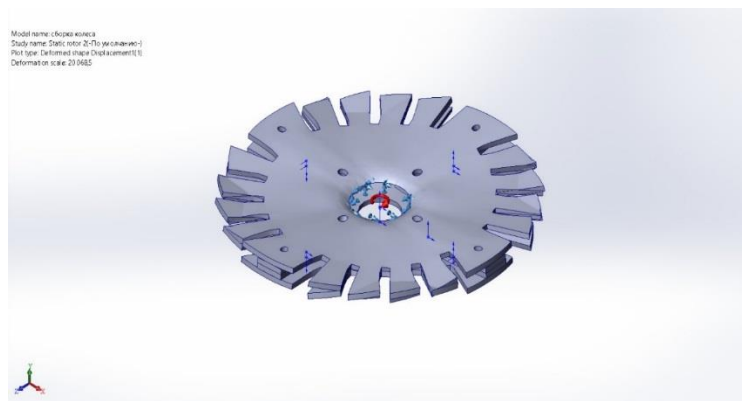
Аdditивті өндіріс технологияларын салыстыру барысында LPBF технологиясының жоғары геометриялық дәлдік пен күрделі конфигурацияларды дайындауда тиімді екені анықталды. Алайда бұл технологияда жоғары температуралық градиенттердің әсерінен қалдық кернеулердің қалыптасу қаупі байқалады.

Cold Spray технологиясында материал құрылымының термиялық бұзылуы азаяды, бірақ қабатаралық адгезия мәселелері туындауы мүмкін.

Микроэкструзия технологиясы прототиптік элементтерді жылдам дайындауға мүмкіндік береді, алайда оның механикалық беріктігі мен геометриялық дәлдігі салыстырмалы түрде төмен.

Жүргізілген салыстырмалы инженерлік талдау нәтижесінде электр машиналарының жоғары жүктемелі ротор элементтері үшін LPBF технологиясы неғұрлым перспективалы екені анықталды.

Жүргізілген stress analysis нәтижелері ротор конструкциясының кейбір аймақтарында локальды кернеу концентрацияларының пайда болатынын көрсетті.



### 7-сурет. Деформацияланған күй

Ескерту – авторлар SolidWorks Corporation. (2024) деректері негізінде құрастырған.

Мұндай тәсілдер ротордың массасын төмендетіп, оның динамикалық және термиялық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

## Дәстүрлі және аддитивті ротор конструкцияларын салыстыру

Жүргізілген әдеби талдау мен инженерлік модельдеу нәтижелерін ескере отырып, дәстүрлі өндіріс әдістерімен дайындалған ротор мен аддитивті технологиялар арқылы жасалған ротор конструкцияларының негізгі сипаттамалары салыстырылды (4-кесте).

**4-кесте.** Дәстүрлі және аддитивті ротор конструкцияларын салыстыру

|                                       |                |                 |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|
| Көрсеткіш                             | Дәстүрлі ротор | Аддитивті ротор |
| Геометриялық күрделілік               | Төмен          | Жоғары          |
| Ішкі салқындату арналары              | Шектеулі       | Мүмкін          |
| Материал шығыны                       | Жоғары         | Төмен           |
| Өндіріс икемділігі                    | Орташа         | Жоғары          |
| Жекелеген бөлшектер саны              | Көп            | Аз              |
| Топологияны оңтайландыру              | Қиын           | Қолайлы         |
| <i>Ескерту – авторлар құрастырған</i> |                |                 |

Кестеден көрініп тұрғандай, аддитивті технологиялар роторларды дайындауға, ішкі салқындату арналары бар құрылымдарды қалыптастыруға және материал шығынын азайтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар аддитивті өндіріс топологиялық оңтайландыруды тиімді жүзеге асыруға жағдай жасап, электр машиналарының массалық-габариттік көрсеткіштерін жақсартуға мүмкіндік береді.

#### **Нәтижелердің сенімділігін бағалау**

Алынған нәтижелер әдебиеттерде келтірілген ұқсас ротор конструкциялары үшін жүргізілген есептік зерттеулермен сапалық тұрғыдан сәйкес келеді. Максималды кернеулер негізінен бекіту аймақтарында шоғырланғаны анықталды, бұл айналмалы бөлшектердің жұмыс ерекшеліктеріне сәйкес келеді.

Сонымен қатар алынған максималды эквивалентті кернеу 11,89 МПа мәні Alloy Steel материалының аққыштық шегінен (620,4 МПа) бірнеше есе төмен. Қауіпсіздік коэффициентінің 52,2 мәніне тең болуы ротор конструкциясының жеткілікті беріктік қорына ие екенін көрсетеді. Сондықтан жүргізілген модельдеу нәтижелері механика теориясына сәйкес келеді және конструкцияның сенімді жұмыс істеу мүмкіндігін растайды.

#### **ҚОРЫТЫНДЫ**

Аддитивті технология дәстүрлі өндіріс әдістеріне қарағанда конструкциялық икемділікті арттырады. Күрделі салқындату арналары, арнайы пішінделген катушкалар және магниттік өзектер оңай жасалады. Дегенмен, магниттік және механикалық қасиеттерде белгілі шектеулер бар, мысалы материалдардың анизотропиясы және микроқұрылым біркелкілігі. Гибридті өндіріс әдістерін қолдану перспективалы болып отыр.

Аддитивті технологиялар электр машиналарын жобалауда жаңа мүмкіндіктер ашады: бөлшектер жасау, салмақты азайту, энергия тиімділігін арттыру. Алдағы уақытта технологияларды жетілдіру жоғары тиімді электр машиналарын жасауға жол ашады.

Аддитивті технологиялардың қарқынды дамуы электр машиналарын жобалау үдерісін жаңа деңгейге көтеріп, олардың құрылымын оңтайландыруға тың мүмкіндіктер ашуда. Мұндай өндіріс тәсілдері дәстүрлі әдістер арқылы жүзеге асыруға қиын немесе мүлде мүмкін емес пішіндерге ие бөлшектер мен тораптарды дайындауға жағдай жасайды. Алдағы уақытта аддитивті технологияларды жетілдіру қазіргі заман талаптарына сай, тиімділігі жоғары электр машиналарын жасауға кеңінен жол ашады.

Зерттеу барысында электр машиналары конструкцияларында аддитивті технологияларды қолданудың инженерлік және технологиялық ерекшеліктері кешенді түрде талданды. Әдеби дереккөздерді жүйелеумен қатар, ротор конструкциясына CAD/CAE негізінде авторлық инженерлік есептеулер жүргізілді.

SolidWorks Simulation ортасында орындалған механикалық талдау нәтижесінде ротордың 3000 айн/мин айналу режиміндегі кернеулік-деформациялық күйі бағаланды.

Инженерлік талдау нәтижелері аддитивті өндіріс технологиялары арқылы:

- ротор массасын төмендетуге;
- ішкі салқындату арналарының тиімділігін арттыруға;
- материал шығынын азайтуға;
- электр машиналарының энергия тиімділігін жоғарылатуға
- мүмкіндік бар екенін көрсетті.

Сонымен қатар зерттеу барысында аддитивті өндірістің бірқатар технологиялық шектеулері анықталды:

- материал анизотропиясы;
- қалдық кернеулер;
- қабатаралық адгезия мәселелері;
- беттік кедір-бұдырлық;
- кейінгі механикалық өңдеу қажеттілігі.

Салыстырмалы талдау нәтижесінде LPBF технологиясының жоғары дәлдік пен күрделі геометрияларды қалыптастыруда тиімді екені анықталды. Ал микроэкструзия мен Cold Spray технологиялары белгілі бір өндірістік міндеттер үшін тиімді болғанымен, олардың механикалық және технологиялық шектеулері байқалады.

Жалпы алғанда, жүргізілген инженерлік есептеулер мен CAD/CAE модельдеу нәтижелері аддитивті технологиялардың электр машиналары конструкцияларын жетілдіруде жоғары перспективаға ие екенін көрсетті.

Практикалық тұрғыдан алынған нәтижелер электр қозғалтқыштарының және генераторлардың роторларын жобалау кезінде аддитивті технологияларды қолданудың тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Ұсынылған ротор конструкциясы электр қозғалтқыштары мен генераторларда қолданылуы мүмкін. Аддитивті технологияларды пайдалану масса мен материал шығынын азайтып, күрделі салқындату арналары бар конструкцияларды өндіруге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер аддитивті технологиялар арқылы өндірілетін жоғары жылдамдықты электр қозғалтқыштарының, жел генераторларының және энергия тиімді электр машиналарының роторларын жобалауда қолданылуы мүмкін.

**МҮДДЕЛЕР ҚАЙШЫЛЫҒЫ:** Авторлар мүдделер қайшылығы жоқ екенін мәлімдейді.

**ҚАРЖЫЛАНДЫРУ:** жоқ

**ИНСТИТУЦИОНАЛДЫҚ ЭТИКА КОМИТЕТІНІҢ ҚОРЫТЫНДЫСЫ:** зерттеу таза техникалық сипатта болып, адам қатысушылары мен жануарларды қамтымағандықтан, бұл бөлім қолданылмайды

**ЕРІКТІ КЕЛІСІМ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ:** Қолданылмайды

**ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ ТУРАЛЫ МӘЛІМДЕМЕ:** Осы техникалық зерттеудің нәтижелерін растайтын деректерді тиісті сұраныс бойынша жауапты автордан алуға болады; балама түрде, жұмыс сандық модельдеу мен теориялық талдауға негізделгендіктен, жаңа эксперименттік деректер жиналмаған.

**АЛҒЫС БІЛДІРУ:** Авторлар әдістемелік қолдау мен пайдалы пікірлері үшін әріптестеріне, сондай-ақ мақаланың сапасын арттыруға септігін тигізген анонимді рецензенттерге алғыс білдіреді.

**ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТУРАЛЫ ХАБАРЛАМА:** Бұл жұмыста деректерді талдау барысында OpenAI компаниясының ChatGPT (GPT-5) жасанды интеллект құралы пайдаланылды.

## ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Industrie 4.0 Working Group. (2013). Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. acatech. [http://www.acatech.de/fileadmin/user\\_upload/Baumstruktur\\_nach\\_Website/Acatech/root/de/Material\\_fuer\\_Sonderseiten/Industrie\\_4.0/Final\\_report\\_\\_Industrie\\_4.0\\_accessible.pdf](http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf)
- Шваб К. (2016). Четвертая промышленная революция. Эксмо. // Shvab, K. (2016). Chetvertaya promyshlennaya revolyutsiya [The Fourth Industrial Revolution]. Eksmo. (In Russ.)
- Myrzaliyev, D. S., Cieslik, J., Seidullayeva, O. B., & Amanov, A. (2025). Analysis of the stress-strain state of gears by the finite element method in SolidWorks. Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Техникалық ғылымдар және технологиялар сериясы, 153(4), 152–167. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-152-166> // Myrzaliyev, D. S., Cieslik, J., Seidullayeva, O. B., & Amanov, A. (2025). Analysis of the stress-strain state of gears by the finite element method in SolidWorks. L.N. Gumilev atyndaǵy Euraziia ulttyq universitetiniń khabarshysy. Tekhnikalıyq ǵylymdar jáne tekhnologiıalar seriiasy [Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series], 153(4), 152–167. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-153-4-152-166> (In Eng.)
- Мырзалиев Д.С., Цеслик Яцек, Сейдуллаева О.Б., & Усеров А.Б. (2025). Мойынтірек құрылымының статикалық жүктеме кезіндегі кернеу және деформация сипаттамалары. Вестник Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева, 4, 97–105. [https://doi.org/10.51885/1561-4212\\_2025\\_4\\_97](https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_4_97) // Myrzaliyev, D. S., Tseslik, Yatsek, Seidullayeva, O. B., & Userov, A. B. (2025). Moyyntirek qurylymynyn statikalıy zhukteme

- kezindegi kerneu zhane deformatsiya sipattamalary [Stress and deformation characteristics of bearing structure under static loading]. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva* [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University], 4, 97–105. [https://doi.org/10.51885/1561-4212\\_2025\\_4\\_97](https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_4_97) (In Kazakh)
- Zawadzki, P., & Żywicki, K. (2016). Smart product design and production control for effective mass customization in the Industry 4.0 concept. *Management and Production Engineering Review*, 7(3), 105–112.
- Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25(1), 185–200. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting: A review. *International Materials Reviews*, 61(5), 361–377. <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289>
- Rayna, T., & Striukova, L. (2015). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Spoerk, M., Savandaiah, C., Arbeiter, F., Sapkota, J., & Holzer, C. (2019). Optimization of mechanical properties of glass-spheres-filled polypropylene composites for extrusion-based additive manufacturing. *Polymer Composites*, 40(2), 638–651. <https://doi.org/10.1002/pc.24701>
- Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Carneiro, O. S., Silva, A. F., & Gomes, R. (2015). Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*, 83.
- Grigoriev, A., Polozov, I., Sufiiarov, V., & Popovich, A. (2017). In-situ synthesis of Ti2AlNb-based intermetallic alloy by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 704, 434–442.
- Selema, A., Van Den Abbeele, J., Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2023). Novel 3D printed coils for high power density electrical machine and traction applications. In *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMDC55163.2023.10239022>
- Singh, S., Payarou, T., Boby, M., Lamarre, J. M., Bernier, F., Ibrahim, M., & Pillay, P. (2023). Cold-spray additive manufacturing of a petal-shaped surface permanent magnet traction motor. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(3), 3636–3648. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3233779>
- Ajamloo, A. M., Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2024). Design considerations of a new IPM rotor with efficient utilization of PMs enabled by additive manufacturing. *IEEE Access*, 12, 61036–61048. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394739>
- Sethuraman, L., & Vijayakumar, G. (2022). A new shape optimization approach for lightweighting electric machines inspired by additive manufacturing. In *Joint MMM-Intermag Conference (INTERMAG)* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INTERMAG-39746.2022.9827714>
- Selema, A., Van Den Abbeele, J., Ibrahim, M. N., & Sergeant, P. (2023). Innovative 3D printed coil and cooling designs for weight-sensitive energy-saving electrical machine. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1–12. <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3322522>

- Selema, A., Beretta, M., Van Coppenolle, M., Tiismus, H., Kallaste, A., Ibrahim, M.N., Rombouts, M., Vleugels, J., Kestens, L. A. I., & Sergeant, P. (2023). Evaluation of 3D-printed magnetic materials for additively manufactured electrical machines. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 569, Article 170426. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170426>
- Рахымтай Н. Н., Мырзалиев Д. С., Сейтказенова К. К., Кадиров Н. А., & Сейдуллаева О. Б. (2025). Исследование температуры в зоне резания методом конечных элементов при токарной обработке. *Вестник Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева*, 2, 61–70. [https://doi.org/10.51885/1561-4212\\_2025\\_2\\_61](https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_2_61) // Rakhymtai, N. N., Myrzaliyev, D. S., Seitkazenova, K. K., Kadirov, N. A., & Seidullayeva, O. B. (2025). Issledovanie temperatury v zone rezaniya metodom konechnykh elementov pri tokarnoy obrabotke [Study of temperature in the cutting zone by the finite element method during turning]. *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva* [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University], 2, 61–70. [https://doi.org/10.51885/1561-4212\\_2025\\_2\\_61](https://doi.org/10.51885/1561-4212_2025_2_61) (In Russ.)

**Авторлар туралы мәліметтер**  
**Информация об авторах**  
**Information about authors**



**Усеров Алтынбек Батырбекұлы** – «Машинажасау» БББ бойынша докторант, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,

**Усеров Алтынбек Батырбекович** – докторант по ОП «Машиностроение», факультет «Механика и нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,

**Usserov Altynbek** – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M.Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent

e-mail: usserov.sirmecc@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1275-1290>



**Мырзалиев Дархан Сапарбайұлы** – т.ғ.к., доцент, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,

**Мырзалиев Дархан Сапарбаевич** – к.т.н., доцент, факультет «Механика и нефтегазовое дело» НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,

**Myrzaliyev Darkhan Saparbaevich** – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent

e-mail: darkhan-m7@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4465-4140>



**Печерский Владимир Николаевич** – т.ғ.д., профессор, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,

**Печерский Владимир Николаевич** – д.т.н., профессор, факультет «Механика и нефтегазовое дело» НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,

**Pecherskiy Vladimir Nicolaevich** – doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, Kazakhstan,

e-mail: vn-pecherskiy@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6277-6827>



**Сейдуллаева Орынғұл Бахытқызы** – хат-хабар авторы, «Машинажасау» БББ бойынша докторант, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,

**Сейдуллаева Орынғұл Бахытовна** – автор для корреспонденции, докторант по ОП «Машиностроение», факультет «Механика и нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент, Казахстан,

**Seidullayeva Oryngul Bakhytkyzy** – corresponding author, Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M.Auezov South Kazakhstan Research University», Shymkent, Kazakhstan,

e-mail: orynkul\_s@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-0683>



**Рахымтай Нұрсая Нұрғалиқызы** – БББ бойынша докторант, «Механика және мұнайгаз ісі» факультеті, «М.Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті» КЕАҚ, Шымкент қ., Қазақстан,

**Рахымтай Нұрсая Нұрғалиқызы** – докторант по ОП «Машиностроение», факультет «Механика и нефтегазовое дело», НАО «Южно-Казахстанский исследовательский университет им.М.Ауэзова», г. Шымкент Казахстан,

**Rakhymtay Nursaya Nurgalikyzy** – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M.Auezov South Kazakhstan Research University», Kazakhstan, Shymkent

e-mail: saya\_rakhumtay@mail.ru,

ORCID: 0000-0003-1973-3709