

Сінчук Олег Миколайович, д.т.н, проф. кафедри електричної інженерії, +38(096)387-65-59, sinchuk@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9637-7069

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027

Сінчук Ігор Олегович, к.т.н, доцент кафедри електричної інженерії, +38(067)465-55-54, olegovich.s@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7702-4030

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027

Омельчук Максим Максимович, аспірант кафедри електричної інженерії, +38(066)976-63-57, omellejr@knu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0008-0763-1717

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027

Джура Микола Іванович, асистент кафедри електричної інженерії, +38(096)109-55-99, dzhura@knu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-5774-1293

Криворізький національний університет

вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027

Кутовий Юрій Михайлович, к.т.н, проф.кафедри автоматизованих електромеханічних систем, +38(067)998-98-38, Yurii.Kutovyi@khpі.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3905-2575

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002

АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ У КОНТЕКСТІ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Анотація. В статті робиться спроба коректного опонування існуючих та прогнозування новітнього спрямування технологій виготовлення як окремих деталей електричних машин, так і в їхньому агрегативному форматі в умовах перспектив сьогодення їхнього виробництва на вітчизняних підприємствах електромашинобудівного комплексу. Проведено аналіз з ухилом оцінювання доцільності та рівня ефективності при виготовленні деталей варіативними форматами адитивних технологій. Підкреслена очікуєма ефективність цих заходів. Доведено, що адитивне виробництво, часто зване 3D-друком, являє собою фундаментальний зсув від традиційних субтрактивних або формувальних методів виробництва. Цей процес передбачає поширене виготовлення тривимірних об'єктів на основі цифрових моделей, що дозволяє створювати складні, запутані та індивідуальні структури, які раніше були недосяжними в виробництві. Приведено системоутворюючі аргументи в необхідності масового застосування адитивних технологій в процес виготовлення вітчизняних електричних машин, що дасть можливість підвищити їхню конкурентоспроможність на світовому ринку даного виду продукції.

Ключові слова: електричні машини, адитивне виробництво, 3D-друк, Powder Bed Fusion, Binder Jetting.

Sinchuk Oleh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Engineering, +38(096)387-65-59, sinchuk@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9637-7069

Kyryvy Rih National University

11 Vitalii Matusevych St., Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

Sinchuk Ihor, Ph.D, Associate Professor, Department of Electrical Engineering, +38(067)465-55-54, olegovich.s@knu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7702-4030

Kryvyi Rih National University

11 Vitalii Matusevych St., Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

Omelchuk Maksym, PhD Student, Department of Electrical Engineering, +38(066)976-63-57, omellejr@knu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0008-0763-1717

Kryvyi Rih National University

11 Vitalii Matusevych St., Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

Dzhura Mykola, Assistant Lecturer, Department of Electrical Engineering, +38(096)109-55-99, dzhura@knu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-5774-1293

Kryvyi Rih National University

11 Vitalii Matusevych St., Kryvyi Rih, Ukraine, 50027

Kutovyi Yurii, Ph.D, Professor, Department of Automated Electromechanical Systems, +38(067)998-98-38, Yurii.Kutovyi@khp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3905-2575

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2, St. Kirpychova, Kharkiv, Ukraine, 61002

ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF ELECTRICAL MACHINE MANUFACTURING

Abstract. The article attempts to provide a well-grounded critique of existing approaches and to forecast emerging trends in the technologies used for manufacturing individual components of electric machines, as well as their aggregate assemblies, in the context of current and future prospects for production at domestic electromechanical engineering enterprises. An analysis is conducted with an emphasis on evaluating the feasibility and efficiency of producing components using various additive manufacturing formats. The anticipated effectiveness of these measures is highlighted. It is demonstrated that additive manufacturing, often referred to as 3D printing, represents a fundamental shift away from traditional subtractive or formative production methods. This process involves layer-by-layer fabrication of three-dimensional objects based on digital models, enabling the creation of complex, intricate, and customized structures that were previously unattainable in conventional manufacturing. The article presents system-forming arguments for the necessity of widespread adoption of additive technologies in the domestic production of electric machines, which would significantly enhance their competitiveness in the global market for this type of product.

Keywords: electrical machines, additive manufacturing, 3D printing, Powder Bed Fusion, Binder Jetting.

Вступ. Існуючі технології виготовлення електричних машин (ЕМ) в умовах вітчизняних електромеханічних підприємствах являють собою в певному сенсі зразки анахронізму. В значній мірі це пояснюється тим, що ці технології виготовлення таких складних виробів не відносяться до розряду тривіальних. Це дещо стримувало, а нерідко взагалі не давало можливостей втілення в практику електромашинобудування нових потенційно перспективних типів та видів зразків. В відомій мірі це не дало і, поки що, мало надає позитиву в прогресі розвитку в

першу чергу вітчизняного машинобудування, що в свою чергу, стримує розвиток електроенергетичної галузі у відповідності до вимог сучасного вбачання показника енергоефективності.

Значний позитив у процес вирішення проблеми усучаснення технології виготовлення ЕМ вніс факт створення адитивного виробництва – техніки створення тривимірних об'єктів [1,2].

Актуальність досліджень. Протягом десятиліть адитивне виробництво переживало своє зростання, інтегруючись у різноманітні сектори, такі як аерокосмічна, автомобільна та медична промисловість. Його можливості сприяли швидкому прототипуванню, широкій персоналізації та виробництву складних технічних геометрій, перетворившись з інструменту переважно для прототипування на наріжний камінь промислового виробництва. Цей перехід знаменує собою більше, ніж просто поступове технологічне вдосконалення - він представляє зміну парадигми у філософії виробництва і застосування нових електротехнічних матеріалів.

Традиційні методи, такі як механічна обробка, лиття та формування, за своєю суттю обмежені інструментами та процесами видалення/формування матеріалу. Адитивне виробництво, будуючи шар за шаром, принципово переосмислює ці обмеження. Внутрішня «свобода дизайну» даного методу дозволяє інженерам розробляти оптимальні конструкції, не обмежуючись традиційними виробничими обмеженнями. Це дозволяє здійснювати «функціональну інтеграцію» та створювати надзвичайно складні структури, що особливо важливо для електричних машин, де складні геометрії можуть значно підвищити продуктивність виготовлення цього продукту.

Одними з найпоширеніших з когорти сучасних процесів адитивного виробництва, в тому числі деталей ЕМ, є Powder Bed Fusion (PBF) та Binder Jetting (BJ) [3]. Перший з наведених видів виробництв технологічно створює деталі шляхом сплавлення атомізованого порошку з залученням до цього селективного лазерного плавлення.

Binder Jetting відрізняється тим, що вибірково наносить рідкий зв'язуючий агент на шар порошкових частинок для формування конкретної деталі. Порівняння технологій PBF та BJ наведено в табл. 1.

Мета дослідження. Аналіз та обґрунтування доцільності застосування адитивних технологій та рекомендацій щодо вибору варіантів їхнього застосування у вітчизняну практику розробки та виготовлення електричних машин.

Викладення основного матеріалу. Електричні машини традиційно покладаються на м'які магнітні матеріали, головним чином тонкі ламінації феросиліцієвих (Fe-Si) сплавів (товщиною 0,1–0,5 мм), для їх високої магнітної проникності [4]. Ці матеріали мають вирішальне значення для керування магнітними полями та мінімізації втрат потужності шляхом зменшення вихрових струмів. Адитивне виробництво відкриває нові можливості для м'яких магнітних матеріалів сердечників, дозволяючи адаптувати магнітні властивості за допомогою точного контролю над складом матеріалу та методами обробки. Це включає використання сплавів, таких як кобальт-залізо (Co-Fe) або нікель-залізо (Ni-Fe).

Електричні ізоляційні матеріали є незамінними для забезпечення належного функціонування та безпеки електричних машин, слугуючи для ізоляції провідних та магнітних компонентів [4,5]. Матеріали, такі як оксид алюмінію (глинозем) та діоксид цирконію (цирконій), особливо підходять для електричної ізоляції завдяки своїй високій термостійкості, твердості, зносостійкості та відмінним діелектричним властивостям. Глинозем, зокрема, відомий своєю високою чистотою (>99,8 %), вищою теплопровідністю та низьким тангенсом діелектричних втрат, що робить його чудовим вибором для електричних ізоляторів та теплообмінників. Цирконій, особливо стабілізований оксидом ітрію (YSZ), демонструє високу міцність, в'язкість, хімічну інертність та стійкість до високих температур, включаючи розплавлені метали. Ці властивості роблять його придатним для електричної ізоляції у екстремальних умовах [5, 6]. Дані в табл. 2 підкреслюють та вказують на те, що глинозем (Alumina 99,8) демонструє вищі

показники діелектричної міцності, значно вищий об'ємний опір та набагато нижчий тангенс діелектричних втрат порівняно з цирконієм (Zirconia YSZ).

Таблиця 1 – Порівняння ключових адитивних технологій спікання порошків (PBF та Binder Jetting)

Технологія	Принцип	Типові матеріали	Основні переваги	Основні недоліки
SLS	Спікання лазером	Термопласти (наприклад, нейлон)	Міцні функціональні деталі, складні геометрії, відмінні механічні властивості, порошок діє як опора	Високі витрати на обладнання, кваліфіковані оператори
SLM	Повне плавлення лазером	Метали (алюміній, титан, сталь, нікель, кобальт-хром)	Повністю щільні металеві компоненти, висока точність, швидше за SLS	Високі енергетичні витрати, потреба в інертному газі, низька енергоефективність (10-20%)
DMLS	Спікання/ плавлення лазером	Метали (ті ж, що й для SLM)	Аналог SLS, але для металів, повністю щільні металеві компоненти	Внутрішні напруження, потреба в постобробці
EBM	Плавлення електронним променем	Метали	Виняткові механічні властивості, висока якість поверхні, швидше та дешевше за ЧПК для титану	Вимагає вакууму, кваліфікований оператор
Binder Jetting	Вибіркове нанесення рідкого зв'язуючого агента	Метали, кераміка, пісок	Висока швидкість виробництва, широкий вибір матеріалів, нижчі витрати на обладнання	Потребує значної постобробки (спікання), можливі деформації, менша міцність у "зеленому" стані

Таблиця 2 – Електричні властивості глинозему та цирконію, виготовлених адитивним способом

Властивість	Одиниця	Цирконій YSZ (Kyocera CAM)	Глинозем 99,8 (Kyocera CAM)
Діелектрична міцність	кВ/мм	11	17
Об'ємний опір (20°C)	Ом·см	1,5E+12	>1,0E+14
Об'ємний опір (300°C)	Ом·см	8,3E+06	2,5E+13
Об'ємний опір (500°C)	Ом·см	8,8E+06	5,8E+10
Діелектрична проникність (1МГц)	-	33,7	9,9
Тангенс діелектричних втрат (1МГц)	$\times 10^{-4}$	17	<1

Глинозем є кращим електричним ізолятором у більшості стандартних застосувань, оскільки він ефективніше запобігає протіканню струму та мінімізує втрати енергії в змінному електричному полі.

Незважаючи на те, що цирконій має вищу діелектричну проникність, що може бути корисним у деяких конденсаторних застосуваннях, для чистої ізоляції перевага надається матеріалам з нижчим значенням.

Отже, доцільно вибір ізоляційного матеріалу для адитивного виробництва електричних машин повинен ґрунтуватися на конкретних вимогах до таких показників як робоча температура, частота та необхідний рівень ізоляції. При цьому потенційна можливість «налаштовувати» властивості компонентів шляхом вибору відповідних матеріалів та процесів в структурі технології адитивного виробництва є значною перевагою перед іншими і, в першу чергу, перед існуючими технологіями.

Адитивне виробництво також дозволяє створювати композитні матеріали та функціонально градієнтні матеріали (ФГМ), які мають властивості, що змінюються просторово. Це дозволяє створювати компоненти з оптимізованими характеристиками, наприклад, поєднуючи високу міцність з високою провідністю або інтегруючи зони охолодження. Наприклад, металеві матричні композити (ММК), такі як алюміній-карбід кремнію (Al-SiC), поєднують високу пластичність металів з високою жорсткістю та низькою щільністю кераміки. ФГМ можуть бути застосовані до електричних обмоток для оптимізації втрат постійного та змінного струму та покращення охолодження шляхом зміни профілю провідника та впровадження прямих каналів охолодження [6-9, 13].

Можливість створювати багатоматеріальні та функціонально градієнтні структури є ключовою перевагою адитивного виробництва, дозволяючи розробляти компоненти з властивостями, які раніше були недосяжними за допомогою традиційних методів. Це дозволяє створювати деталі з різними властивостями та функціями в різних регіонах, зменшуючи потребу в постобробці та складанні. Це особливо актуально для статорів та роторів, які є основними елементами електричних машин. Традиційно статори та ротори виготовляються

шляхом штампування та укладання тонких ламінацій електричної сталі, а обмотки створюються шляхом намотування мідних проводів. Цей процес є трудомістким і обмежує свободу дизайну. Адитивне виробництво, навпаки, дозволяє створювати статори та ротори з оптимізованими формами, зменшеною масою та інтегрованими функціями. Наприклад, адитивне виробництво може виготовляти легкі роторні вузли з ґратчастою структурою, що призводить до значного зменшення маси та моменту інерції. Це також дозволяє створювати "безреберні" ротори з внутрішніми постійними магнітами (IPM), які покращують використання магнітів та крутний момент, усуваючи витoki потоку, пов'язані з традиційними ребрами. Завдяки даним технологіям можна інтегрувати канали охолодження безпосередньо в корпус двигуна або в самі обмотки, що значно покращує тепловий менеджмент та дозволяє підвищити щільність потужності. Наприклад, корпус двигуна з інтегрованими каналами рідинного охолодження, виготовлений адитивним способом, показав покращення загального теплового менеджменту на 20 % [10, 11, 13].

Ще одним критичним компонентом електричних машин є їхні обмотки. Традиційно вони виготовляються шляхом намотування мідних проводів, що може бути складним і обмежувати коефіцієнт заповнення пазів. Застосування технологій 3D-друку пропонує можливість виготовляти обмотки зі складною геометрією, змінним профілем провідника та інтегрованими каналами охолодження. Це дозволяє оптимізувати розподіл струму, зменшити втрати змінного струму та підвищити ефективність охолодження, що призводить до вищої щільності потужності. Наприклад, досліджувані 3D-друковані котушки продемонстрували вдвічі більшу пропускну здатність струму при 53 % ваги порівняно зі звичайними мідними котушками [12–14]. Дослідження також зосереджені на багатоматеріальному друку мідних котушок з керамічною ізоляцією, що дозволяє інтегрувати електричну ізоляцію безпосередньо під час виготовлення.

Ще одним позитивом адитивних технологій, як зазначалось раніше, є їхня ефективність при виготовленні постійних магнітів (ПМ), котрі є ключовими для

багатьох типів та видів електродвигунів, але їх виробництво часто залежить від дорогих рідкоземельних матеріалів. Застосування технологій порошкового спікання феромагнітних сплавів – складне і комплексне питання, що потребує детального дослідження і аналізу, котрий лежить за межами тематики даної публікації. Втім, згідно результатів наукової роботи профільних спеціалістів, можемо підсумувати вплив методів адитивного виробництва на даний напрямок [3, 13]. Використання технологій 3D-друку і лазерного спікання порошків дозволяє виготовляти зв'язані ПМ (наприклад, NdFeB з поліамідом), які можуть бути на 30 % дешевше, ніж спечені магніти, та зменшити залежність від рідкоземельних елементів. Це також дозволяє створювати ПМ з оптимізованими формами, що покращує магнітні властивості та зменшує втрати [15].

Загалом, адитивне виробництво дозволяє інтегрувати функціональність для підвищення продуктивності. Це означає, що замість складання багатьох окремих компонентів, адитивне виробництво може створювати єдині, багатофункціональні деталі, які виконують кілька ролей одночасно. Наприклад, корпус двигуна може бути надрукований з інтегрованими каналами охолодження, що усуває потребу в окремих радіаторах або трубках. Це не тільки зменшує кількість деталей та спрощує складання, але й дозволяє оптимізувати дизайн для кращої теплової та електромагнітної продуктивності, що було б неможливо за допомогою традиційних методів. Ця можливість створювати компоненти з оптимізованою конструкцією є ключовою перевагою адитивного виробництва, що дозволяє розробляти електричні машини з вищою щільністю потужності, ефективністю та зменшеною масою.

Виклики та обмеження в застосуванні адитивних виробництв в технологіях виготовлення електричних машин. Незважаючи на значні переваги різні методи адитивного виробництва так чи інакше стикаються з низкою викликів та обмежень, які впливають на їхнє широке впровадження у виробництво електричних машин. Розуміння цих перешкод є вирішальним для подальшого розвитку та оптимізації цих технологій в процесі подальшого удосконалення виробництв ЕМ.

Одним з основних обмежень в застосування новітніх технологій при створенні ЕМ є відносно звужений асортимент матеріалів, які можна використовувати, особливо одночасно, порівняно з традиційними виробничими методами. Хоча асортимент доступних матеріалів постійно розширюється, він залишається набагато меншим від необхідного, що може вплинути і впливає на продуктивність, довговічність та якість кінцевих продуктів. Наприклад, традиційне виробництво може поєднувати різні метали, пластмаси та композити в одному процесі, тоді як адитивне виробництво часто обмежується використанням одного типу матеріалу за раз або кількох сумісних. Це може призвести до того, що продукти не відповідатимуть бажаним або розрахунковим вимогам щодо міцності, гнучкості або довговічності. Крім того, змішування твердих магнітних матеріалів з іншими матеріалами для 3D-друку може послабити їх електромагнітні властивості.

Також такі технології, як наприклад SLS або BJ є відносно повільними, оскільки кожен елемент створюється шар за шаром, що може зайняти значний час, особливо для складних або великих деталей. Це обмежує їхню придатність для великомасштабного виробництва. Для високих обсягів виробництва адитивне виробництво стає неефективним та трудомістким порівняно з традиційними методами, які можуть масово виробляти елементи швидко та економічно. Історично, впровадження подібних методів виробництва деталей і компонентів електричних машин стримувалося обмеженнями швидкості та розміру побудови, хоча нові зразки 3D-принтерів і лазерних верстатів частково вирішують ці проблеми [10, 11, 15, 16].

Ключовою та системоутворюючою, як факт, проблемою є поки що висока вартість даного типу виробництва в структурі формування собівартості виготовлення ЕМ, особливо при значних його об'ємах. Це пов'язано з такими факторами як високі початкові інвестиції, особливо для металевих процесів (наприклад, машини SLM коштують від 500 000 до 1,5 мільйона доларів), висока вартість матеріалів (металеві порошки для PBF можуть бути в 5–10 разів дорожчими, ніж сировина для традиційних методів) та витрати на постобробку.

Ці, а також інші (якість поверхні, обмеження розмірів) виробничі перешкоди підкреслюють, що, хоча адитивне виробництво пропонує безпрецедентну гнучкість дизайну та можливість створювати складні деталі, воно ще не є універсальним рішенням для масового виробництва. Проблеми, пов'язані з обмеженнями матеріалів, низькою швидкістю та високою вартістю, вимагають подальших досліджень та розробок для досягнення зрілості технології. Це також означає, що для промислового впровадження важливо проводити ретельний "аналіз економічної доцільності", щоб визначити, коли адитивне виробництво є економічно вигіднішим, ніж традиційні методи, особливо для низькооб'ємного виробництва або високоскладних деталей, де переваги даних технологій можуть компенсувати їхні недоліки [16–18].

Висновки. Впровадження адитивних технологій спікання порошків, таких як Powder Bed Fusion та Binder Jetting, у виробництво електричних машин являє собою трансформаційний етап у галузі електромашинобудування. Ці технології пропонують безпрецедентну свободу дизайну, що дозволяє інженерам створювати складні геометрії, інтегрувати функції та оптимізувати компоненти таким чином, що б було неможливим за допомогою традиційних виробничих методів. Це призводить до значних покращень у ключових показниках, що підтверджується кількісними даними з поточних досліджень та тематичних досліджень.

Можливість використовувати нові матеріали, такі як висококремнієві сплави для м'яких магнітних сердечників або оптимізовані мідні сплави для провідників, а також розробляти багатоматеріальні та функціонально градієнтні структури, відкриває нові шляхи для проектування високоефективних електричних машин. Крім того, інтеграція передових систем теплового менеджменту безпосередньо в компоненти, виготовлені адитивним способом, є вирішальним фактором для підвищення їхньої продуктивності, довговічності та надійності.

Однак, незважаючи на ці багатообіцяючі досягнення, широке промислове впровадження адитивного виробництва у виробництво електричних машин стикається з кількома значними викликами, що були розглянуті у вищенаведеному розділі даної роботи.

Майбутні напрямки досліджень та розробок зосереджені на подоланні цих перешкод. Прогрес у багатоматеріальному виробництві, що дозволяє інтегрувати провідні, магнітні та ізоляційні матеріали в єдиний процес, є ключовим. Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання обіцяє революціонізувати оптимізацію дизайну, контроль процесу та забезпечення якості, що призведе до більш ефективних та надійних виробничих циклів. Зрештою, прагнення до повністю інтегрованого виробництва, де електричні машини можуть бути виготовлені за один крок з мінімальною потребою в складанні, є кінцевою метою в завданні проблематики оцінювання та доцільності застосування тих чи інших технологій.

Підсумовуючи вищенаведені аргументи зазначимо, що хоча адитивне виробництво для електричних машин все ще знаходиться на стадії розвитку, як і відповідні матеріали та порошкові сплави, що використовуються в технології їхнього виготовлення, є підґрунтя значного економікотехнічного потенціалу.

Постійні інвестиції в дослідження та розробки, зосереджені на матеріалознавстві, оптимізації процесів та інтеграції нових технологій, будуть вирішальними для реалізації повного потенціалу цієї технології та оптимізації виробництва електричних машин.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Selema A., Ibrahim M. N., Sergeant P. Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements. *Energies*, 2022. Vol. 15. No. 3. P. 1076. – URL: <https://doi.org/10.3390/en15031076>
2. Naseer M. U. et al. A Review on Additive Manufacturing Possibilities for Electrical Machines // *Energies*, 2021. Vol. 14. No. 7. P. 1940. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14071940>
3. Pham T., Kwon P., Foster S. Additive Manufacturing and Topology Optimization of Magnetic Materials for Electrical Machines—A Review. *Energies*, 2021. Vol. 14. No. 2. P. 283. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14020283>
4. Giannotta N. et al. A Review of Additive Manufacturing of Soft Magnetic Materials in Electrical Machines. *Machines*, 2023. Vol. 11. No. 7. P. 702. – URL: <https://doi.org/10.3390/machines11070702>
5. Lamichhane T. N. et al. Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines – a review. *Materials Today Physics*, 2020. Vol. 15. P. 100255. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100255>
6. Lakhdar Y. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, 2021. Vol. 116. P. 100736. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>
7. Lacelle T. et al. Additive manufacturing of polymer derived ceramics: Materials, methods, and applications. *APL Materials*, 2023. Vol. 11. No. 7. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0151661>

8. Abdelkader M. et al. Ceramics 3D Printing: A Comprehensive Overview and Applications, with Brief Insights into Industry and Market. *Ceramics*, 2024. Vol. 7. No. 1. P. 68–85. – URL: <https://doi.org/10.3390/ceramics7010006>
9. Grechko O. Modern additive technologies and 3D printing. Overview of recent advances in various spheres of human life. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2019. No. 1. P. 63–75. – URL: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.12>
10. Zanini F. et al. Laser powder bed fusion process optimization for the production of high-performance and efficient high-silicon steel electrical motor components. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40964-025-00993-x>
11. Baco-Carles V. et al. Laser powder bed fusion applied to the manufacture of bulk or structured magnetic cores. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. Vol. 18. P. 599–610. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.118>
12. Wragge-Morley R. et al. Additive Manufacturing of Next Generation Electrical Machine Windings: Opportunities in Fusion Engineering? *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2024. P. 1–0. – URL: <https://doi.org/10.1109/tps.2024.3359709>
13. Dilberoglu U. M. et al. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 2017. Vol. 11. P. 545–554. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
14. Simpson N. et al. Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020. Vol. 56, No. 3. P. 2510–2519. – URL: <https://doi.org/10.1109/tia.2020.2975763>
15. Wu J. et al. Additive manufacturing of Nd-Fe-B permanent magnets and their application in electrical machines. *IEEE Access*, 2024. P. 1. – URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3436643>
16. Bernier F. et al. Additive manufacturing of soft and hard magnetic materials used in electrical machines. *Metal Powder Report*. 2020. Vol. 75. No. 6. P. 334–343. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.12.002>
17. Kareem F. A., Michael P. A. An investigation on applications of additive manufacturing of electrical machines. *Materials Today: Proceedings*, 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.590>
18. Selema A., Ibrahim M. N., Sergeant P. Advanced Manufacturability of Electrical Machine Architecture through 3D Printing Technology. *Machines*, 2023. Vol. 11. No. 9. P. 900. – URL: <https://doi.org/10.3390/machines11090900>

REFERENCES:

1. Selema A., Ibrahim M. N., Sergeant P. Metal Additive Manufacturing for Electrical Machines: Technology Review and Latest Advancements. *Energies*, 2022. Vol. 15. No. 3. P. 1076. – URL: <https://doi.org/10.3390/en15031076>
2. Naseer M. U. et al. A Review on Additive Manufacturing Possibilities for Electrical Machines // *Energies*, 2021. Vol. 14. No. 7. P. 1940. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14071940>
3. Pham T., Kwon P., Foster S. Additive Manufacturing and Topology Optimization of Magnetic Materials for Electrical Machines—A Review. *Energies*, 2021. Vol. 14. No. 2. P. 283. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14020283>
4. Giannotta N. et al. A Review of Additive Manufacturing of Soft Magnetic Materials in Electrical Machines. *Machines*, 2023. Vol. 11. No. 7. P. 702. – URL: <https://doi.org/10.3390/machines11070702>
5. Lamichhane T. N. et al. Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines – a review. *Materials Today Physics*, 2020. Vol. 15. P. 100255. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100255>
6. Lakhdar Y. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. *Progress in Materials Science*, 2021. Vol. 116. P. 100736. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100736>
7. Lacelle T. et al. Additive manufacturing of polymer derived ceramics: Materials, methods, and applications. *APL Materials*, 2023. Vol. 11. No. 7. – URL: <https://doi.org/10.1063/5.0151661>

8. Abdelkader M. et al. Ceramics 3D Printing: A Comprehensive Overview and Applications, with Brief Insights into Industry and Market. *Ceramics*, 2024. Vol. 7. No. 1. P. 68–85. – URL: <https://doi.org/10.3390/ceramics7010006>
9. Grechko O. Modern additive technologies and 3D printing. Overview of recent advances in various spheres of human life. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, 2019. No. 1. P. 63–75. – URL: <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.12>
10. Zanini F. et al. Laser powder bed fusion process optimization for the production of high-performance and efficient high-silicon steel electrical motor components. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40964-025-00993-x>
11. Baco-Carles V. et al. Laser powder bed fusion applied to the manufacture of bulk or structured magnetic cores. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. Vol. 18. P. 599–610. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.02.118>
12. Wragge-Morley R. et al. Additive Manufacturing of Next Generation Electrical Machine Windings: Opportunities in Fusion Engineering? *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2024. P. 1–0. – URL: <https://doi.org/10.1109/tps.2024.3359709>
13. Dilberoglu U. M. et al. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 2017. Vol. 11. P. 545–554. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
14. Simpson N. et al. Additive Manufacturing of Shaped Profile Windings for Minimal AC Loss in Electrical Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020. Vol. 56, No. 3. P. 2510–2519. – URL: <https://doi.org/10.1109/tia.2020.2975763>
15. Wu J. et al. Additive manufacturing of Nd-Fe-B permanent magnets and their application in electrical machines. *IEEE Access*, 2024. P. 1. – URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3436643>
16. Bernier F. et al. Additive manufacturing of soft and hard magnetic materials used in electrical machines. *Metal Powder Report*. 2020. Vol. 75. No. 6. P. 334–343. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.12.002>
17. Kareem F. A., Michael P. A. An investigation on applications of additive manufacturing of electrical machines. *Materials Today: Proceedings*, 2022. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.590>
18. Selema A., Ibrahim M. N., Sergeant P. Advanced Manufacturability of Electrical Machine Architecture through 3D Printing Technology. *Machines*, 2023. Vol. 11. No. 9. P. 900. – URL: <https://doi.org/10.3390/machines11090900>

Стаття надійшла до редакції: 22.08.2025; рецензування: 30.08.2025;

прийнята до публікації 03.09.2025. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 22.08.2025; revised on 30.08.2025; and accepted for publication on 03.09.2025. The authors read and approved the final version of the manuscript.