

УДК 621.9

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Шарипов Ильнар Ильдарович
Канд. техн. наук
SPIN – код автора: 8046-8265
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Хакимова Сабина Бахтиёровна
Студент
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Агропромышленный комплекс (АПК) широко использует разнообразную технику, и своевременное обеспечение ее запасными частями является ключевым фактором бесперебойной работы. Однако традиционная система снабжения запчастями сталкивается с проблемами: детали не всегда доступны, трудно прогнозировать спрос, а хранение запасов дорого. Современные аддитивные технологии, включая 3D-печать, предлагают инновационный подход к производству запчастей по требованию, сокращая простой оборудования и снижая зависимость от складских запасов. Настоящий обзор обобщает актуальные исследования (журналы Q1–Q2) по применению 3D-печати для изготовления запасных частей в АПК, с акцентом на математические, статистические и инструментальные методы анализа эффективности и качества аддитивных технологий. Описаны математические модели (например, расчет затрат и имитация нагруженности), позволяющие оценить экономическую и техническую целесообразность печати деталей, статистические методы (планирование экспериментов, анализ надежности) для оптимизации параметров печати и свойств изделий, а также инструментальные подходы к испытаниям напечатанных деталей (механические тесты, анализ износостойкости, микроструктурный контроль). Результаты исследований свидетельствуют, что аддитивное производство может существенно повысить доступность запчастей и снизить затраты на их поставку, обеспечивая при этом достаточную прочность и износостойкость деталей для многих сельскохозяйственных применений. В отдельных случаях применение 3D-печати позволило снизить себестоимость изготовления деталей в десятки раз

UDC 621.9

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURING OF SPARE PARTS FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Sharipov Inar Ildarovich
Cand.Tech.Sci.
RSCI SPIN-code: 8046-8265
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Khakimova Sabina Bakhtiyorovna
Student
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The agro-industrial complex (AIC) extensively utilizes various types of machinery, and timely supply of spare parts is a key factor in ensuring uninterrupted operation. However, the traditional spare parts supply system faces several challenges: parts are not always readily available, demand is difficult to predict, and inventory storage is costly. Modern additive technologies, including 3D printing, offer an innovative approach to on-demand spare parts production, reducing equipment downtime and dependency on stockpiled inventories. This review summarizes recent studies (Q1–Q2 journals) on the application of 3D printing for manufacturing spare parts in the AIC, with a focus on mathematical, statistical, and instrumental methods for analyzing the efficiency and quality of additive technologies. The paper describes mathematical models (such as cost estimation and load simulation) that enable the assessment of the economic and technical feasibility of printing parts, statistical methods (experimental design, reliability analysis) for optimizing printing parameters and product properties, as well as instrumental approaches for testing printed parts (mechanical testing, wear resistance analysis, microstructural examination). Research findings indicate that additive manufacturing can significantly improve spare parts availability and reduce supply costs while ensuring sufficient strength and wear resistance for various agricultural applications. In some cases, the use of 3D printing has reduced the cost of manufacturing parts by several times compared to traditional methods. However, certain limitations have been identified, particularly regarding the need for improved materials and technologies for printing critical components requiring high reliability. It is concluded that the comprehensive use of mathematical, statistical, and instrumental analysis

по сравнению с традиционными методами. Тем не менее, выявлены и ограничения, связанные с необходимостью совершенствования материалов и технологий для печати ответственных узлов, требующих повышенной надежности. Сделан вывод, что комплексное использование математических, статистических и инструментальных методов анализа позволяет эффективно внедрять аддитивные технологии в производство запчастей для АПК. Дальнейшее развитие этих подходов будет способствовать переходу к более устойчивой и гибкой системе обеспечения и обслуживания сельскохозяйственной техники

Ключевые слова: 3D-ПЕЧАТЬ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЗАПАСНЫЕ ЧАСТИ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

methods allows for the effective integration of additive technologies into spare parts manufacturing for the AIC. Further development of these approaches will contribute to a more sustainable and flexible system for supplying and maintaining agricultural machinery

Keywords: 3D PRINTING, ADDITIVE TECHNOLOGIES, SPARE PARTS, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, MATHEMATICAL ANALYSIS, STATISTICAL METHODS, INSTRUMENTAL TESTING

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-207-045>

Введение. Аддитивные технологии (включая 3D-печать) представляют собой современный подход к производству деталей путем послойного синтеза материала. Благодаря высокой гибкости дизайна и возможности изготавливать сложные формы, 3D-печать получила широкое распространение в таких отраслях, как авиация, медицина и машиностроение. Кроме того, при малосерийном производстве аддитивные методы часто более экономичны по сравнению с традиционными технологиями. В последние годы наблюдается рост интереса к применению 3D-печати в сельском хозяйстве и смежных отраслях, особенно для производства запасных частей к сельскохозяйственной технике. Традиционно производители обязаны обеспечивать наличие запчастей в течение многих лет после выпуска техники, что ведет к созданию крупных складских запасов и сложностям логистики. В агропромышленном комплексе (АПК) простой машин из-за поломки и ожидания нужной детали приводят к экономическим потерям и срыву сезонных работ.

<http://ej.kubagro.ru/2025/03/pdf/45.pdf>

3D-печать запасных частей непосредственно в месте эксплуатации или в сервисных центрах способна решить проблему дефицита деталей и долгих поставок. Цифровые «склады» моделей деталей и производство по требованию обещают снизить затраты и ускорить ремонтную деятельность. Более того, печать деталей по мере необходимости уменьшает отходы и нереализованные запасы, что способствует формированию экономики замкнутого цикла. Аддитивное изготовление позволяет выпускать комплектующие, уже снятые с производства, продлевая срок службы техники. К настоящему времени в литературе и промышленной практике накоплен определенный опыт использования аддитивных технологий для этих целей. Например, компания CNH Industrial с 2019 года успешно печатает пластиковые запчасти для тракторов и другой техники, сократив время их ожидания с недель до дней. Исследования отмечают, что напечатанные детали способны обеспечивать требуемые характеристики, если при их проектировании и изготовлении применяются обоснованные методы анализа и контроля качества. В данном обзоре рассматриваются достижения и текущие направления исследований в области аддитивного производства запчастей для АПК. Особое внимание уделено методам математического моделирования, статистической оптимизации и инструментального контроля, применяемым для оценки эффективности и повышения надежности данной технологии.

Состояние исследований и актуальность проблемы. За последние годы появилось значительное число публикаций, посвященных применению аддитивных технологий в АПК. Проводятся как общие обзоры, так и прикладные исследования конкретных решений. Так, Lu и соавт. (2024) представили обзор использования 3D-печати в сельском хозяйстве, отметив ее преимущества (гибкость конструкции, снижение затрат при малых сериях, экологическая устойчивость) и описав текущие

проблемы внедрения [3]. Ряд исследований фокусируется на оценке экономической эффективности и технической реализуемости печати запчастей. В работе Gu и соавт. (2020) с помощью модели затрат показано, что в отдельных случаях 3D-печать позволяет снизить себестоимость изготовления детали примерно в десять раз по сравнению с традиционным производством [1], при этом функциональность полученных деталей была достаточной для применения на сельскохозяйственных агрегатах.

Большое внимание уделяется обеспечению качества и надежности напечатанных деталей. В обзоре Espino и др. (2023) отмечается, что для оптимизации прочностных свойств изделий широко используются статистические методы планирования экспериментов (например, метод Тагучи) и анализ надежности материалов [2]. Параллельно, инструментальные методы контроля – испытания на прочность, износ, микроструктурный анализ – применяются для сопоставления характеристик напечатанных образцов с традиционно изготовленными и верификации результатов моделирования.

Актуальность направления обусловлена необходимостью адаптации 3D-печати к жестким условиям эксплуатации агротехники. Исследователи изучают новые материалы и технологии для повышения надежности изделий. Таким образом, текущее состояние исследований свидетельствует о высокой актуальности проблемы, над решением которой работают специалисты. исследования в области применения 3D-печати в агропромышленном комплексе демонстрируют значительный прогресс, охватывая как экономические аспекты, так и вопросы надежности, материаловедения и цифровизации производства. Анализ литературы показывает, что аддитивные технологии позволяют существенно снизить затраты на изготовление запасных частей, минимизировать простой техники и повысить оперативность ремонта. Однако полное внедрение 3D-печати в сельскохозяйственный сектор требует решения ряда проблем,

связанных с обеспечением прочности и долговечности деталей, адаптацией конструкций под аддитивные технологии, а также развитием интеллектуальных систем контроля качества. Дальнейшие исследования в этой области будут способствовать интеграции 3D-печати в цепочки поставок АПК, делая техническое обслуживание более гибким, эффективным и экономически оправданным.

Цель исследований. Проанализировать современное состояние исследований по применению 3D-печати в производстве запасных частей для агропромышленного комплекса. В рамках обзора обобщены сведения о математических, статистических и инструментальных методах анализа аддитивных технологий, используемых для оценки качества и эффективности печати деталей, а также выявлены основные преимущества, ограничения и перспективы внедрения аддитивных технологий в АПК.

Материалы и методы исследований. Настоящая работа представляет собой аналитический обзор научных публикаций. Для отбора источников были использованы международные библиографические базы данных (Web of Science, Scopus), а также ресурсы открытого доступа (DOAJ, PubMed и др.). Основными критериями послужили: (1) публикации в ведущих рецензируемых журналах (квартиль Q1–Q2), (2) свежесть исследований (работы последних ~5–7 лет), (3) тематический фокус на аддитивных технологиях в контексте агропромышленного комплекса, особенно на производстве и анализе запасных частей. Использовались поисковые запросы на английском языке (ключевые слова: “3D printing”, “additive manufacturing”, “agriculture”, “spare parts”, “analysis” и др.).

В обзор вошли как обзорные, так и экспериментальные и модельные исследования, непосредственно связанные с темой. Детально изучено порядка 20 отобранных публикаций, наиболее значимые результаты из них приводятся в данном обзоре. При анализе литературы особое внимание

уделялось описанию методов исследования: математического моделирования (экономические модели, прочностные расчеты, имитационные эксперименты), статистического анализа (планирование экспериментов, регрессионный анализ, оценка надежности) и инструментальных методик (лабораторные испытания материалов и прототипов, методы неразрушающего контроля). Выявлены ключевые показатели эффективности аддитивного производства запчастей (стоимостные, временные, эксплуатационные) и факторы, влияющие на эти показатели. Сопоставляя данные разных источников, автор провел качественный синтез результатов. На этой основе сформулированы выводы о текущем уровне развития технологий 3D-печати в АПК и определены направления дальнейших исследований. Все цитируемые источники оформлены в списке литературы согласно ГОСТ.

Результаты исследований. Анализ публикаций показал, что применение аддитивных технологий для запчастей АПК дает ощутимые эффекты. 3D-печать повышает доступность деталей и сокращает время простоя техники за счет производства по требованию. По оценкам, себестоимость напечатанной детали может быть до десяти раз ниже, чем при традиционном изготовлении, а время на ее получение сокращается с нескольких недель до нескольких дней. Практический опыт подтверждает эти выводы: например, компания CNH Industrial печатает ряд пластиковых деталей для своей техники, заменяя хранение запасов цифровыми моделями и печатью по запросу. Крупные производители (Caterpillar и др.) также сообщили о появлении первых серийных партий напечатанных запчастей (десятки наименований), что свидетельствует о поступательном прогрессе внедрения технологии.

Исследования доказали, что при соблюдении необходимых условий напечатанные детали обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики. Показано, что аддитивные методы позволяют получать

прочные и долговечные изделия из подходящих материалов. Например, детали, изготовленные методом лазерного сплавления порошков, обладают малым весом и сложной геометрией без потери прочности, что облегчает ремонт узлов сельхозмашин. 3D-печать обеспечивает высокую точность изготовления и требуемую термо- и химическую стойкость деталей, не уступающую традиционным образцам. Механические испытания и полевые тесты подтверждают работоспособность напечатанных компонентов в реальных условиях эксплуатации.

Выявлены и текущие ограничения технологии. Аддитивное производство металлических и сильно нагруженных деталей пока применяется ограниченно из-за высокой стоимости и сложности обеспечения безотказности таких изделий. Для ответственных узлов (например, элементов двигателя или трансмиссии) требуется дальнейшее совершенствование материалов и процессов 3D-печати. Отмечается, что в экстремальных условиях (сильный холод, ударные нагрузки) поведение напечатанных сплавов может отличаться от традиционных, что требует дополнительных исследований для гарантии долговечности. Кроме того, для интеграции 3D-печати в систему обслуживания АПК необходима адаптация конструкции деталей под возможности аддитивного производства. Тем не менее, общая тенденция очевидна: аддитивные технологии уже успешно решают задачи изготовления многих запасных частей, и по мере удешевления оборудования и материалов их применение станет еще более выгодным. Экспертные прогнозы указывают, что 3D-печать станет одним из ключевых драйверов развития технического сервиса в сельском хозяйстве в ближайшем будущем.

Выводы. 3D-печать запасных частей для агропромышленного комплекса доказала свою эффективность в ряде прикладных случаев, обеспечивая экономию времени и средств при обслуживании техники. Современные исследования подтверждают, что аддитивные технологии

способны удовлетворять требования по прочности и надежности деталей при условии грамотного применения методик анализа – от математического моделирования до лабораторных испытаний. Применение этих методов позволяет выявлять оптимальные параметры печати и своевременно устранять недостатки, тем самым повышая качество напечатанных изделий. Несмотря на сохраняющиеся ограничения (особенно для металлических и высоконагруженных компонентов), отраслевые тенденции указывают на дальнейшее распространение аддитивного производства запчастей. Ожидается, что по мере совершенствования материалов и снижения себестоимости технологий 3D-печать станет неотъемлемой частью системы технического обслуживания сельскохозяйственной техники.

Библиографический список

1. Gu W., Styger E., Warner D.H. Assessment of Additive Manufacturing for Increasing Sustainability and Productivity of Smallholder Agriculture // 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2020. – Vol.7, №6. – P.300–310.
2. Espino M.T., Tuazon B.J., Espera A.H. и др. Statistical methods for design and testing of 3D-printed polymers // MRS Communications. – 2023. – Vol.13, №2. – P.193–211.
3. Lu Y., Xu W., Leng J., Liu X., Xu H., Ding H., Zhou J., Cui L. Review and Research Prospects on Additive Manufacturing Technology for Agricultural Manufacturing // Agriculture. – 2024. – Vol.14, №8. – P.1207.

References

1. Gu W., Styger E., Warner D.H. Assessment of Additive Manufacturing for Increasing Sustainability and Productivity of Smallholder Agriculture // 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2020. – Vol.7, №6. – P.300–310.
2. Espino M.T., Tuazon B.J., Espera A.H. Statistical methods for design and testing of 3D-printed polymers // MRS Communications. – 2023. – Vol.13, №2. – P.193–211.
3. Lu Y., Xu W., Leng J., Liu X., Xu H., Ding H., Zhou J., Cui L. Review and Research Prospects on Additive Manufacturing Technology for Agricultural Manufacturing // Agriculture. – 2024. – Vol.14, №8. – P.1207.