



Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники

П. В. Сенин, М. Н. Чаткин, Е. А. Кильмяшкин✉

*Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет*

(г. Саранск, Российская Федерация)

✉ 40252@mail.ru

Аннотация

Введение. В статье поднимается проблематика ремонта современной сельскохозяйственной техники. Из-за усложнения конструкций узлов машин возникает проблема отказа входящих в большое количество в их состав деталей. Зачастую эти детали производители отдельно не продают, что делает невозможным ремонт вышедших из строя узлов. В этом случае требуется покупка узла в сборе. Существующая проблема поставок запасных частей значительно усугубляет состояние вопроса. Увеличивается время устранения отказа, что негативно сказывается на рентабельности производства из-за крайне ограниченного времени на выполнение большинства сельскохозяйственных работ. Решение вопроса с поставками запчастей, снижение стоимости ремонта и времени простоя предлагаются в самостоятельном производстве деталей с использованием аддитивных технологий.

Цель исследования. Изучение полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати, вакуумного литья в силиконовые формы для уменьшения расходов на реновацию технических средств в агропромышленном комплексе. **Материалы и методы.** Аддитивная технология – метод послойного выращивания объектов. Оборудование, применяемое в данной технологии, включает в себя компьютер, 3D-принтер, 3D-сканер. 3D-принтер, основываясь на данных CAD-модели, распределяет материал на поверхности построения, где с помощью различных технологий (спекания, склеивания или расплавления) придает форму будущей детали. 3D-сканер позволяет создать трехмерную CAD-модель существующей детали для дальнейшей обработки с целью усовершенствования, модернизации, расширения или просто копирования с возможностью последующей распечатки. Помимо производства изделий 3D-печатью очень популярно направление вакуумного литья полимеров в силиконовые формы. Данная технология может использоваться в качестве мастер-модели прототипы, распечатанные на 3D-принтере или полученные классическим способом производства.

Результаты исследования. Для исследования состояния вопроса использовался материал, полученный в НИР на базе Центра проектирования и быстрого прототипирования «Рапид-Про» Национального исследовательского Мордовского государственного университета. Полагаясь на статистические данные за последние 5 лет, пришли к выводу, что изучение всех видов работ цикла аддитивного производства в последнее время становится актуальным. Наблюдается тенденция увеличения спроса на услугу 3D-сканирования и реверс-инжиниринг.

Обсуждение и заключение. Использование аддитивных технологий позволяет быстро изготовить детали любой сложности и существенно сократить время научных исследований и проектирования. Для этого необходимо создавать в образовательных, производственных и научных учреждениях специальные участки, сектора и центры,

© Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмяшкин Е. А., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.



оснащенные оборудованием, позволяющим работать в области аддитивного производства. Проблему осложняет отсутствие подготовленных кадров, базовых знаний об аддитивных технологиях и навыков использования имеющегося оборудования и связанного с ним производства. Это существенно снижает скорость внедрения в ремонтные предприятия указанных технологий и создания соответствующих участков на предприятиях агропромышленного комплекса, что требует обучения специалистов и проведения переподготовки.

Ключевые слова: 3D-печать, 3D-сканирование, реверс-инжиниринг, аддитивная технология, литье

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают признательность сторонним участникам, которые внесли определенный вклад в исследование.

Для цитирования: Сенин П. В., Чаткин М. Н., Кильмяшкин Е. А. Аддитивные технологии для производства и ремонта сельскохозяйственной техники // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 4. С. 584–596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>

Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment

P. V. Senin, M. N. Chatkin, E. A. Kilmyashkin✉

National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)

✉ 40252@mail.ru

Abstract

Introduction. The article raises the issue of repairing modern agricultural machinery. Because of increasing the complexity of the design of machine components, there is a problem of failure of their parts. Manufacturers often do not sell these parts separately that makes it impossible to repair failed machine components. In this case, the purchase of a machine component assembly is required. The problem of supplying service parts is very significant. This significantly increases the repair time that negatively affects the agricultural production profitability due to the extremely limited time for farming operations. A solution to the issue of supplying service parts, reducing the cost of repairs and breakdown time is in the independent production of parts using additive technologies.

Aim of the Study. The study is aimed at examining the complete cycle of additive manufacturing using 3D scanning, 3D printing, and vacuum casting in silicone molds to reduce the renovation cost of technical equipment for agriculture.

Materials and Methods. Additive manufacturing is a technology for creating three-dimensional objects through layer-by-layer building. In this technology, there are used a computer, 3D printer and 3D scanner. The 3D printer, based on the CAM model data, distributes the material on the construction surface, and through various sintering or melting technologies, gives the shape of the future part. A 3D scanner allows creating a three-dimensional model of the finished product for subsequent improvement, modernization, expansion or simply copying with the possibility of subsequent printing. In addition to the production of parts by 3D printing, vacuum casting of polymers into silicone molds is very popular. This technology can use prototypes printed on a 3D printer or obtained using a classical production method as a master model.

Results. To study the state of the issue, we have used research materials of the Design and Rapid Prototyping Technology Center “RAPID-PRO” of the National Research N.P. Ogarev Mordovia State University. Analyzing the statistical data over the past 5 years, we have concluded that the demand for all types of work in the additive manufacturing cycle has recently become urgent. There is a trend of increasing demand for 3D scanning and reverse engineering services.

Discussion and Conclusion. The use of additive technologies makes it possible to produce quickly the parts of any complexity and therefore to reduce significantly the time for scientific research and design. At scientific, educational and industrial institutions special sectors, there should be created areas and centers, equipped for working in the field of additive manufacturing. However, the lack of trained personnel, the lack of basic knowledge about additive technologies and skills in using the equipment significantly reduces the speed of implementation of these technologies at the repair facilities of the agricultural sector and requires retraining and training of specialists.

Keywords: 3D printing, 3D scanning, reverse engineering, additive technology, casting

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments: The authors would like to thank the external participants who made significant contributions to the study.

For citation: Senin P.V., Chatkin M.N., Kilmyashkin E.A. Additive Technologies for Production and Repair of Agricultural Equipment. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(4):584–596. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202404.584-596>

Введение. Наряду с большим количеством так называемых классических технологий производства и ремонта в последнее время активно развиваются новые, к которым относятся аддитивные технологии.

Классический способ заключается в следующем: из поступающих в производство заготовок с помощью процессов литья,ковки,штамповки,металлообработки формируются будущие изделия. Использование режущего инструмента приводит к перерасходу материала заготовки, что увеличивает затраты на процесс. Изделия также подвергаются термической обработке: отжигу, нормализации, закалке или отпуску. Для придания требуемых свойств поверхностям изделий применяют механические, электрофизические и физико-химические процессы.

Традиционное производство с помощью различных методов позволяет создавать как универсальные, так и сложные узкоспециализированные изделия с заранее заданными характеристиками. Сырье, используемое при производстве металлических и пластиковых изделий, сравнительно недорогое. Но получение продукции сложной геометрической формы с высокими требованиями к точности изготовления приводят к необходимости применения сложного и достаточно дорогостоящего оборудования. Стоимость напрямую зависит от точности обработки и производительности. Производство деталей сложной формы требует большого количества операций и перехода с одного типа оборудования на другой. Для классического метода характерна низкая «гибкость» производства, поскольку изменение номенклатуры выпускаемой продукции требует перенастройки оборудования, написания новых управляющих программ, а в некоторых случаях – переобучения персонала.

Аддитивное производство – технологии создания трехмерных объектов посредством послойного наращивания. Здесь в качестве материала используется мелкодисперсный порошок, листовый материал и т. д., сделанные как из различных металлов, так и полимеров. В качестве оборудования используется 3D-принтер. На основании данных САД-модели происходит распределение материала на поверхности, где посредством различных технологий спекания или расплавления он принимает форму будущей детали.

Стоимость изделий зависит от применяемого материала. На сегодняшний день наиболее дорогими являются изделия из металла. Высокая стоимость таких изделий в большей степени обусловлена применением дорогостоящего оборудования и материалов. Но 3D-принтеры, работающие с полимерными материалами, позволяют получить продукцию с достаточно низкой себестоимостью, что делает их на сегодняшний день наиболее доступными и распространенными. Для 3D-принтера нет ограничений в воспроизведении деталей по форме, точности и сложности. Применение данной технологии значительно сокращает расход материала и время производства.

В статье проведен анализ аддитивных технологий с применением полимеров как наиболее доступных на сегодняшний день материалов.

Помимо производства изделий 3D-печатью очень популярно направление вакуумного литья полимеров в силиконовые формы. Данная технология может использоваться в качестве мастер-модели. Прототипами являются распечатанные на 3D-принтере или полученные классическим способом производства модели. Мастер-модель определяет качество всего тиража, поэтому к ее разработке выдвигаются серьезные требования.

Целью исследования является изучение полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати, вакуумного литья в силиконовые формы и возможности его применения в агропромышленном комплексе (АПК) с целью уменьшения расходов на реновацию технических средств.

Обзор литературы. В аддитивном производстве-технологии создания трехмерных объектов посредством послойного наращивания [1; 2] в качестве конструкционного материала используется мелкодисперсный порошок, листовый материал и т. д., сделанные как из различных металлов, так и неметаллов¹. Оборудованием является 3D-принтер [3; 4]. Разнообразие применяемых в последнее время материалов при 3D-печати позволяет изготавливать изделия с различными характеристиками, но лишь в некоторых случаях делает полученные детали пригодными для использования непосредственно в узлах машин. Особенно востребованной является печать деталей из металла. Это стало возможным благодаря разработке более совершенных технологий печати [5; 6]. К сожалению, такие способы изготовления деталей из металла на сегодняшний день все еще достаточно редко можно встретить на предприятиях. Причиной тому является очень высокая стоимость оборудования, расходных материалов и в целом всего технологического процесса [7]. Однако в работе [8] авторы, исследуя применение технологии стереолитографии с использованием в качестве материала для печати фотополимера, утверждают, что вполне целесообразно применять дорогие технологии в аддитивном производстве, так как в конечном результате материальные и временные расходы снижаются. Проводя сравнительный анализ 3D-печати и технологии вакуумного литья полимеров в силиконовые формы, можно заключить, что для выпуска многомиллионных партий деталей такая технология не подойдет, так как в этом случае используют пресс-формы (металлические оснастки). Это дорогостоящее

¹ Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров. М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

решение, на реализацию которого уходит много времени и средств. Воспользоваться этой технологией [9] можно, если необходимо изготовить небольшое количество изделий (до 10–1 000 ед.). В технологии литья в силиконовые формы применяются двухкомпонентные полиуретаны, которые после полимеризации начинают обладать различными свойствами. Отливки из полиуретанов могут имитировать механические свойства АБС (результат совместной полимеризации акрилонитрила, бутадиена и стирола), РР (полипропилена), ПА12 (полиамида) или эластомеров с различной твердостью [10]. Оптические детали могут быть изготовлены из прозрачных полиуретанов с возможностью тонирования. Литьем в силикон можно получить термостойкие, гибкие или предназначенные для пищевого применения детали.

3D-печать необходима как средство производства прототипов² [11], но как средство мелкосерийного производства, на наш взгляд, не совсем подходит ввиду высокой стоимости, низкой производительности и ограниченности номенклатуры материалов печати (не всегда возможно получить изделие с требуемыми физико-механическими свойствами). В зависимости от применяемой технологии печати, получаемые изделия зачастую не пригодны для восприятия внешних нагрузок из-за высокой пористости и низкой межслойной адгезии, слабой стойкости к агрессивной внешней среде [12; 13].

Литье в силиконовые формы позволяет в короткие сроки изготовить небольшие партии изделий высокого качества с требуемыми свойствами материала. Стоимость изделий зависит от партии: чем она больше, тем ниже цена. Единичное изготовление данной технологией экономически не целесообразно.

Наряду с рассмотренными технологиями необходимо отметить и 3D-сканирование [14]. Эта технология позволяет создавать пространственные модели объектов в виде цифровых моделей (САD-модель). Полученные модели деталей можно изменять, усовершенствовать или просто копировать.

Сканирующее оборудование имеет достаточно высокую точность (менее 10–15 микрон), что позволяет проводить сравнительный анализ проектной документации (исходной САD-модели) и произведенных деталей на наличие отклонений размеров и форм [15].

Сканирование позволяет создавать необходимую проектную документацию для дальнейшего использования в производстве (особенно в производстве деталей со сложной геометрической формой). 3D-сканирование широко используется в различных инженерных расчетах [16; 17].

Проведя анализ литературы, отметим, что в большей части авторами рассматриваются отдельно взятые технологии и этапы аддитивного производства. В целом же примеров полного технологического процесса от проектирования до получения конечного товарного продукта крайне мало. В одной из таких работ приведено проектирование, прототипирование и испытание в реальных условиях адаптивного центробежного рабочего органа разбрасывателя удобрений [18].

² Федоренко В. Ф., Голубев И. Г. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники. 2-е изд. М. : Юрайт, 2024. 137 с.; Возможности применения 3D-технологий в ремонтном производстве / Ю. В. Башкирцев [и др.]. М.: ФГБОУ «РИИАМА», 2020. 44 с.

Материалы и методы. На сегодняшний день в научных, образовательных и производственных учреждениях нужно создавать подразделения с определенным оснащением, позволяющим работать в сфере аддитивных технологий.

В последнее время на базе производств и учебных заведений создаются и уже функционируют подразделения, работающие в области аддитивных технологий. Такие Центры в своем оснащении используют высокотехнологичное оборудование, позволяющее заниматься не только проектированием, но и производством готовых изделий. Например, в госкорпорации РОСАТОМ реализуется бизнес-направление «Аддитивные технологии», в рамках которого созданы Центры аддитивных технологий общего доступа (ЦАТОД) с функциями обучения. В 2015 г. на базе Института механики и энергетики Национального исследовательского Мордовского государственного университета был создан Центр проектирования и быстрого прототипирования «Рапид Про».

Центр включает в себя обучающий класс, участок быстрого прототипирования и проектирования, участок производства. Здесь осуществляется разработка программ по обучению и повышению квалификации специалистов, планирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области цифровых технологий, разработки цифровых моделей деталей и узлов, изготовление прототипов деталей, опытное производство нестандартных деталей.

Основной задачей Центра является разработка и реализация полного цикла аддитивного производства с использованием 3D-сканирования, 3D-печати, вакуумного литья в силиконовые формы.

Данное подразделение оснащено 3D-принтерами SLS- и FDM-технологии, оптическим 3D-сканером, вакуумно-литьевыми машинами и др.

На данных САД-модели 3D-принтер распределяет материал в области построения, где методом технологий УФ-полимеризации или расплавления придает форму будущей детали. 3D-сканер позволяет создать трехмерную модель готового изделия для последующего усовершенствования, модернизации, расширения или просто копирования с возможностью последующей распечатки. Помимо производства изделий 3D-печатью в Центре используется вакуумное литье полимеров в силиконовые формы. В данной технологии в качестве мастер-модели могут использоваться прототипы, распечатанные на 3D-принтере или полученные классическим способом производства.

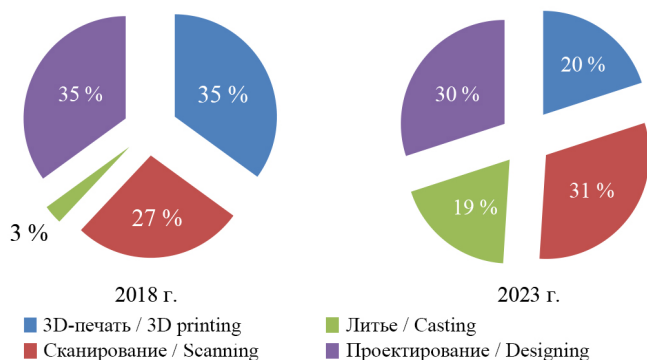
Имеющееся оборудование и технологии позволяют получать изделия только из пластика. Широкая номенклатура деталей из полимеров, применяемых в узлах современных машин, пользуется большим спросом, и производство вышедших из строя пластиковых изделий очень востребовано. При использовании технологии вакуумного литья полимеров в силиконовые формы можно получить детали с различными физико-механическими свойствами ввиду большого разнообразия используемых полимеров, что делает возможным использование изготовленных образцов не в качестве прототипов, а уже непосредственно в рабочей машине.

Результаты исследования. Проводя анализ состояния оснащения предприятий оборудованием для аддитивного производства и его использования в производственном процессе, можно заключить, что скорость их внедрения существенно

затруднена. Оборудование есть, но оно в полной мере не используется, либо его нет, и есть необходимость в его приобретении. Причиной такого состояния вопроса является отсутствие подготовленных специалистов, базовых знаний об аддитивных технологиях и навыков использования оборудования связанного с ним.

Для решения сложившейся проблемы в Центре «Рапид Про» разработана учебная программа «Технологии и средства быстрого прототипирования в машиностроении». В рамках этой программы сотрудники Центра систематически проводят повышение квалификации специалистов предприятий, в том числе АПК.

За время существования Центра было разработано множество проектной документации, прототипов для ряда научно-исследовательских работ, произведено большое количество функциональных деталей мелкими сериями.



Р и с. 1. Статистика востребованности услуг с 2018 по 2023 г.

F i g. 1. Statistics on demand for services from 2018 to 2023

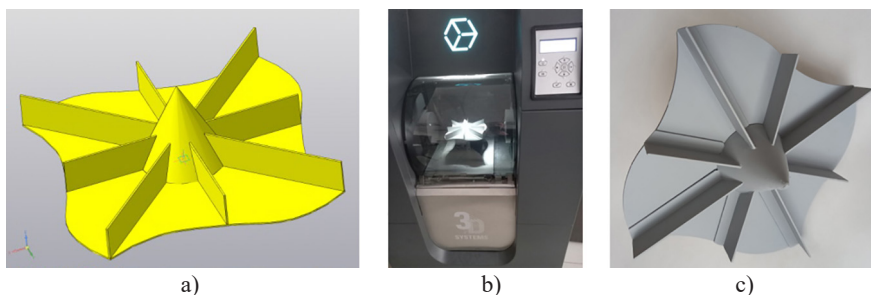
Источник: составлено авторами статьи.
Source: compiled by the authors of the article.

Анализируя статистические данные нашей работы (рис. 1) за последние 5 лет, мы можем заключить, что востребованность всех видов работ цикла аддитивного производства в последнее время становится примерно одинаковой. Наблюдается тенденция увеличения спроса на услугу 3D-сканирования и реверс-инжиниринг. В современных условиях санкционного давления со стороны западных стран проблема обеспечения запчастями для иностранной техники стоит очень остро. Многие отечественные производители готовы сосредоточить свое производство на выпуске наиболее востребованных деталей. Однако из-за отсутствия конструкторской документации быстрая реализация невозможна, особенно если речь идет о деталях сложной геометрической формы. В данном случае основным инструментом создания такой документации является 3D-сканер.

Наличие большой номенклатуры оборудования в рамках одного центра позволяет охватить весь спектр работ и сделать технологический процесс аддитивного производства замкнутым (от проектирования до товарного продукта).

Примерами научно-исследовательских работ Центра являются разработки:

1) центробежного адаптивного рабочего органа для внесения минеральных удобрений [18] (рис. 2).

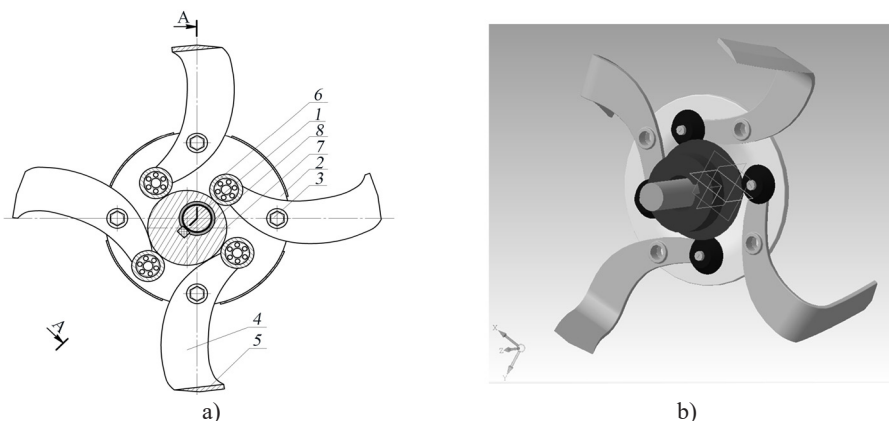


Р и с. 2. Прототипирование центробежного адаптивного рабочего органа: а) 3D-модель; б) распечатка на 3D-принтере ProJet 3000; в) прототип рабочего органа из пластика

F i g. 2. Prototyping a centrifugal adaptive working element: а) 3D model; б) printout on a ProJet 3000 3D printer; в) prototype of the working element made of plastic

Источник: составлено по материалам [18].
Source: compiled from materials [18].

2) почвообрабатывающей фрезы (рис. 3), обеспечивающей постоянство угла резания во всем диапазоне изменения ее поступательной скорости, обусловленного физико-механическими свойствами почвы.



Р и с. 3. Конструкция фрезерного рабочего органа с механизмом регулирования угла резания: а) схема фрезы: 1 – основной вал; 2 – водило; 3 – ось; 4 – шатун; 5 – нож; 6 – конический ролик; 7 – кулачок; 8 – корпус; б) 3D-фрагмент фрезы

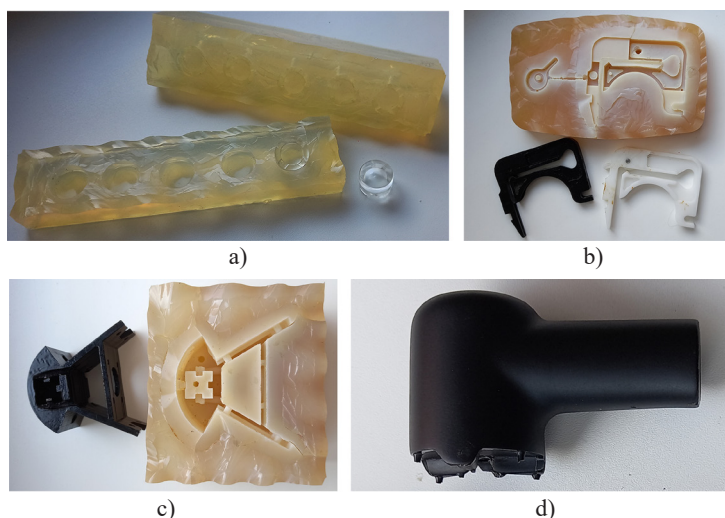
F i g. 3. Construction of a milling working element with a mechanism for adjusting the cutting angle: а) milling cutter diagram: 1 – main shaft; 2 – carrier; 3 – axle; 4 – connecting rod; 5 – knife; 6 – tapered roller; 7 – cam; 8 – housing; б) the model is built with the use of the KOMPAS-3D program.

Источник: а) составлено по материалам Международной научно-практической конференции³; б) модель построена в программе КОМПАС-3D.

Source: а) compiled based on materials from the International Scientific and Practical Conference; б) the model is built with the use of the KOMPAS-3D program.

³ Князьков А. С., Кильмяшкин Е. А. Использование 3D-технологий для физического моделирования рабочих органов почвообрабатывающих фрез / Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти проф. С. А. Лапшина (20 – 21 апреля 2017 г., г. Саранск). Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2017. С. 448–452. URL: <https://mrsu.ru/upload/iblock/386/Lapshinskiie-chteniya-13.pdf> (дата обращения: 25.05.2024).

На базе Центра систематически выполняются работы по производству деталей мелкими сериями и созданию прототипов (рис. 4, 5). Заказчиками чаще всего выступают предприятия агропромышленного комплекса.

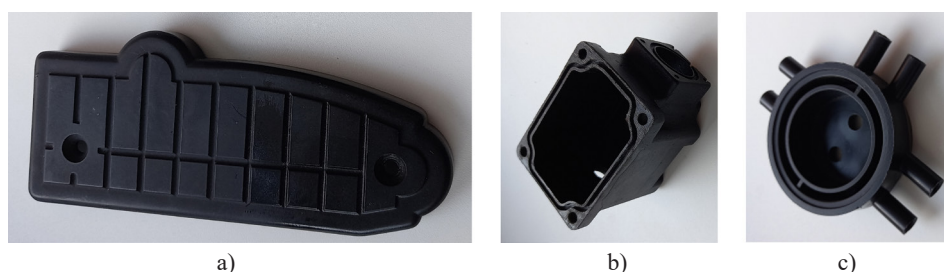


Р и с. 4. Мелкосерийное производство деталей методом вакуумного литья в силиконовые формы: а) линза ходовых огней трактора; б) зажим-дозатор химических реактивов установки по производству удобрений; в) элемент корпуса; д) кронштейн зеркала трактора

F i g. 4. Small-scale production of parts by vacuum casting in silicone molds: а) lens for tractor running lights; б) clamp-dispenser for chemical reagents of a fertilizer production plant; в) body element; д) bracket for tractor mirror

Источник: фотографии сделаны Е. А. Кильмяшкиным при испытаниях метода вакуумного литья в силиконовые формы в Центре проектирования и быстрого прототипирования «Рapid Про» (2018–2023 гг.).

Source: the photographs have been taken by the E. A. Kilmyashkin during the tests of the vacuum casting method in silicone molds at the Design and Rapid Prototyping Center “RAPID-PRO” (2018–2023).



Р и с. 5. Прототипы, изготовленные на 3D-принтере: а) крышка гидрораспределителя; б) корпус электронного блока; в) корпус вакуумного дозатора доильной установки

F i g. 5. 3D printed prototypes: а) hydraulic distributor cover; б) electronic unit housing; в) milking machine vacuum dispenser housing

Источник: фотографии сделаны Е. А. Кильмяшкиным при испытаниях метода 3D-печати в Центре проектирования и быстрого прототипирования «Рapid Про» (2018–2023 гг.).

Source: the photographs have been taken by the E. A. Kilmyashkin during testing the 3D printing method at the Design and Rapid Prototyping Center “RAPID-PRO” (2018–2023).



Обсуждение и заключение. Использование наукоемких современных технологий аддитивного производства и вакуумного литья в силиконовые формы должно значительно повлиять на процесс восстановления работоспособности устройств, особенно импортного производства. Каждая технология используется индивидуально на этапе проектирования, прототипирования и производства небольших серий деталей. Отсутствие требуемой номенклатуры запасных частей или отремонтированных деталей приводит к простоям машин и систем, что является причиной значительных экономических издержек. Использование аддитивных технологий позволяет частично решить эти проблемы, быстро изготовить детали любой сложности и существенно сократить время на их производство. Все вышперечисленные преимущества аддитивных технологий создают на них спрос, что приводит к необходимости создания в образовательных, научных и производственных учреждениях специальных участков, секторов и центров, оснащенных оборудованием, позволяющим работать в этой области. Однако отсутствие подготовленных кадров с базовыми знаниями об аддитивных технологиях и с навыками использования соответствующего оборудования существенно снижает скорость их внедрения в ремонтное производство в аграрном секторе экономики. Для внедрения аддитивных технологий в производство и ремонт сельскохозяйственной техники требуется обучение соответствующих специалистов и проведение переподготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литунов С. Н., Слободенюк В. С., Мельников Д. В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 1 // Омский научный вестник. 2016. № 1 (145). С. 12–17. URL: <https://clck.ru/3DXM4T> (дата обращения: 26.06.2024).
2. Katkar R. A., Taft R. M., Grant G. T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing) // Dental Clinics of North America. 2018. Vol. 62, Issue 3. P. 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
3. Мальцева О. В. Развитие мирового рынка 3D-принтеров // Российский внешнеэкономический вестник. 2018. № 9. С. 88–97. URL: <https://journal.vavt.ru/rfej/article/view/1610> (дата обращения: 17.06.2024).
4. Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling / F. Ning [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2015. Vol. 80. P. 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
5. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges / T. D. Ngo [et al.] // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
6. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Overtraditional Manufacturing // Business Horizons. 2017. Vol. 60, Issue 5. P. 677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
7. Анализ аддитивного оборудования для 3D-печати деталей / И. Г. Голубев [и др.] //Технический сервис машин. 2019. №1 (134). С. 194–200. EDN: ZCGKHB
8. Suryatal B. K., Sarawade S. S., Deshmukh S. P. Fabrication of Medium Scale 3D Components Using Stereolithography System for Rapid Prototyping // Jornal of King Saud Univercity – Engineering Sciences. 2023. Vol. 35, Issue 1. P. 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.012>
9. Kuo Ch.-Ch., Chen Y.-R. Rapid Optical Inspection of Bubbles in the Silicone Rubber // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. 2013. Vol. 124, Issue 13. P. 1480–1485.

10. Антибас И. П., Дьяченко А. Г. Моделирование, изучение и изготовление стойки культиватора из композитных материалов // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 366–378. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378>
11. Karande A. M., Kalbande D. R. Weight Assignment Algorithms for Designing Fully Connected Neural Network // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2018. Vol. 10, No. 6. P. 68–76. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.08>
12. Sanatgar R. H., Campagne C., Nierstrasz V. Investigation of the Adhesion Properties of Direct 3D Printing of Polymers and Nanocomposites on Textiles: Effect of FDM Printing Process Parameters // Applied Surface Science. 2017. Vol. 403. P. 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.112>
13. Dev S., Srivastava R. Experimental Investigation and Optimization of FDM Process Parameters for Material and Mechanical Strength // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 26. Part 2. P. 1995–1999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.435>
14. Перспективы применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники / И. Г. Голубев [и др.] // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 214–219. EDN: YVGNHL
15. Rapid Prototyping for Assembly Training and Validation / A. Ahmad [et al.] // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, Issue 3. P. 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.116>
16. Нефёлов И. С. Восстановление изношенных деталей машин при помощи дополнительных ремонтных деталей, изготовленных методами аддитивных технологий // Ремонт, восстановление, модернизация. 2018. № 11. С. 15–17. <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
17. Скороходов Д. М. Влияние факторов на точность контроля качества запасных частей сельскохозяйственной техники автоматизированным измерительным устройством // Агроинженерия. 2018. № 2 (84). С. 44–49. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-44-49>
18. Разработка адаптивного центробежного рабочего органа для внесения минеральных удобрений с применением технологий быстрого прототипирования / В. А. Овчинников [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 222–234. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

REFERENCES

1. Litunov S.N., Slobodenyuk V.S., Melnikov D.V. [Review and Analysis of Additive Technologies. Part 1]. *Omsk Scientific Bulletin*. 2016;1(145):12–17. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3DXM4T> (accessed 26.06.2024).
2. Katkar R.A. Taft R.M., Grant G.T. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing). *Dental Clinics of North America*. 2018;62(3):393–402. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.03.003>
3. Mal'tseva O.V. World Market Development for 3D Printers. *Russian Foreign Economic Journal*. 2018;9:88–97. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://journal.vavt.ru/rfej/article/view/1610> (accessed 17.06.2024).
4. Ning F., Cong W., Qiu J., Wei J., Wang S. Additive Manufacturing of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Fused Deposition Modeling. *Composites Part B: Engineering*. 2015;80:369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;143:172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
6. Mohsen A. The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over traditional Manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5):677–688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
7. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I., Spitsyn I.A. Analysis of Additive Equipment for 3D Printing of Parts. *Technical Servis of Cars*. 2019;1(134):194–200. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZCGKHB

8. Suryatal B.K., Sarawade S.S., Deshmukh S.P. Fabrication of Medium Scale 3D Components Using Stereolithography System for Rapid Prototyping. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2023;35(1):40–52. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.02.012>
9. Ch.-Ch. Kuo, Y.-R. Chen Rapid Optical Inspection of Bubbles in the Silicone Rubber. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. 2013;124(13):1480–1485.
10. Antypas I.R., Dyachenko A.G. Modeling, Studying and Manufacturing a Cultivator Rack from Composite Materials. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(3):366–378. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.366-378>
11. Karande A.M., Kalbande D.R. Weight Assignment Algorithms for Designing Fully Connected Neural Networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*. 2018;10(6):68–76. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2018.06.08>
12. Sanatgar R.H., Campagne C., Nierstrasz V. Investigation of the Adhesion Properties of Direct 3D Printing of Polymers and Nanocomposites on Textiles: Effect of FDM Printing Process Parameters. *Applied Surface Science*. 2017;403:551–563. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.112>
13. Dev S., Srivastava R. Experimental Investigation and Optimization of FDM Process Parameters for Material and Mechanical Strength. *Materials Today: Proceedings*. 2020;26(2):1995–1999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.435>
14. Golubev I.G., Spitsyn I.A., Bykov V.V., Golubev M.I. Prospects of Application of Additive Technologies in the Repair of Agricultural Machinery. *Proceedings of GOSNITI*. 2018;130:214–219. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YVGNHL
15. Ahmad A., Darmoul S., Ameen W., Abidi M.H., Al-Ahmari A.M. Rapid Prototyping for Assembly Training and Validation. *IFAC-PapersOnLine*. 2015;48(3):412–417. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.116>
16. Nefelov I.S. [Restoration of Worn-Out Machine Parts Using Additional Repair Parts Manufactured Using Additive Technologies]. *Repair, Restoration, Modernization*. 2018;11:15–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-2561-2018-0-11-15-17>
17. Skorokhodov D.M. Determinants of Quality Control Accuracy of Automated Measuring Device for Spare Parts of Agricultural Machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2018;2(84):44–49. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-44-49>
18. Ovchinnikov V.A., Kilmlyashkin E.A., Knyazkov A.S., Ovchinnikova A.V., Zhalin N.A., Zysin E.S. Development of an Adaptive Centrifugal Working Tool for Mineral Fertilization Using Rapid Prototyping Technologies. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):222–234. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.222-234>

Об авторах:

Сенин Петр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технического сервиса машин Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-код: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Чаткин Михаил Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, SPIN-код: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

Кильмяшкин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, SPIN-код: 6497-0730, 40252@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

П. В. Сенин – постановка задач исследования, общее руководство.

М. Н. Чаткин – общее руководство, формулировка выводов.

Е. А. Кильмашкин – теоретический анализ, формулировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 24.07.2024; поступила после рецензирования 16.08.2024;
принята к публикации 23.08.2024*

About the authors:

Petr V. Senin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technical Service of Machines, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, Researcher ID: H-1219-2016, SPIN-code: 3197-5080, vice-rector-innov@adm.mrsu.ru

Mikhail N. Chatkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, SPIN-code: 3600-3720, chatkinm@yandex.ru

Eugen A. Kilmyshkin, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4827-8277>, Researcher ID: CAF-9821-2022, SPIN-code: 6497-0730, 40252@mail.ru

Authors contribution:

P. V. Senin – formulation of research objectives, general management.

M. N. Chatkin – general management, formulation of conclusions.

E. A. Kilmyashkin – theoretical analysis, formulation of conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 24.07.2024; revised 16.08.2024; accepted 23.08.2024