

УДК 621.77.04

Н.К. Толочко, Н.Н. Романюк, В.Н. Еднач, А.Н. Макаренко, И.Ш. Бережная

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АГРАРНЫХ УНИВЕРСИТЕТАХ

Аннотация. В представленной статье подробно рассматриваются организационно-методические аспекты внедрения аддитивных технологий в образовательную, научную и производственную деятельность аграрных университетов. Основное внимание уделяется опыту двух вузов: Белгородского государственного аграрного университета имени В.Я. Горина и Белорусского государственного аграрного технического университета. В публикации подчёркивается необходимость интеграции новейших технических достижений в учебную программу и научно-исследовательскую деятельность, что способствует росту продуктивности сельского хозяйства. Аддитивные технологии представляют особый интерес благодаря своей способности производить высококачественные изделия для техники, используемой в аграрном секторе. Эти технологии обладают несомненным преимуществом, позволяя создать точные и долговечные компоненты сельскохозяйственной техники, что является критически важным фактором в условиях интенсивного земледелия, где надёжность машин определяет эффективность производственных процессов. Кроме того, авторы приводят реальные примеры успешной реализации проектов с применением аддитивных технологий в обоих вузах. Описанные кейсы демонстрируют, каким образом теоретические знания применяются на практике, формируя основу для будущих научных исследований и образовательных инициатив. Такие мероприятия открывают новые горизонты для аграрных специальностей, способствуя модернизации отраслей и увеличению уровня подготовки молодых специалистов. В заключение стоит отметить, что представленная работа важна для широкого круга читателей, включая преподавателей, аспирантов и учёных, работающих над проблемами адаптации инновационных решений в сельское хозяйство. Статья ярко показывает перспективность аддитивных технологий и стимулирует дальнейшие разработки и внедрение прогрессивных методов в отечественный аграрный сектор.

Ключевые слова: аддитивные технологии, аграрные университеты, детали сельскохозяйственной техники.

PRACTICAL APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN AGRARIAN UNIVERSITIES

Abstract. This article examines in detail the organizational and methodological aspects of implementing additive manufacturing in the educational, scientific, and production activities of agricultural universities. It focuses on the experiences of two universities: the Gorin Belgorod State Agrarian University and the Belarusian State Agrarian Technical University. The publication emphasizes the need to integrate the latest technological advances into the curriculum and research activities, which contributes to increased agricultural productivity. Additive manufacturing is of particular interest due to its ability to produce high-quality components for agricultural machinery. These technologies offer a clear advantage, enabling the creation of precise and durable components for agricultural machinery, a critical factor in intensive farming, where machine reliability determines the efficiency of production processes. Furthermore, the authors provide real-world examples of successful projects using additive manufacturing at both universities. The described cases demonstrate how theoretical knowledge is applied in practice, forming the basis for future scientific research and educational initiatives. Such events open new horizons for agricultural specialties, contributing to the modernization of industries and improving the training of young specialists. In conclusion, it is worth noting that this work is relevant for a wide range of readers, including teachers, graduate students, and researchers working on the adaptation of innovative solutions to agriculture. The article clearly demonstrates the potential of additive technologies and stimulates further development and implementation of progressive methods in the domestic agricultural sector.

Keywords: additive technologies, agricultural universities, agricultural machinery parts.

Введение. Технология аддитивного производства (АМ-технологии), происходящие от английского термина Additive Manufacturing, или попросту говоря технология трехмерной печати, продолжает активно внедряться практически во всех производственных сферах промышленности. Эта тенденция становится всё более заметной с каждым годом, поскольку потребности современного производства требуют быстрого и точного решения множества инженерных задач. Одновременно с расширением сфер применения растёт и спрос на профессионалов высокого класса, хорошо подготовленных именно в области аддитивных технологий. Появляется острая нехватка компетентных сотрудников, способных эффективно применять современные методы моделирования и печати объектов сложной формы, используя разнообразные материалы и подходы. Это обстоятельство неизбежно ведёт к изменению парадигмы университетского образования, которое должно отвечать новым требованиям индустрии. Сегодня многие образовательные учреждения начинают уделять значительное внимание развитию курсов и программ, ориентированных на изучение методов и возможностей аддитивных технологий. Внедрение лабораторий и центров аддитивного производства в структуру образовательных учреждений способствует подготовке специалистов нового поколения, востребованных на рынке труда. Приобретаемые студентами навыки работы с новейшими инструментами и методами помогают обеспечить конкурентоспособность выпускников на международном уровне, обеспечивая развитие отраслей промышленности, в которых используются аддитивные технологии. Таким образом, дальнейшее активное внедрение АМ-технологий в университетские программы представляется неизбежным процессом, необходимым для удовлетворения потребностей современной экономики и технологического прогресса [1].

Данная статья посвящена анализу перспектив развития АМ-технологий в аграрных университетах. В ней обсуждены организационно-методические аспекты применения АМ-технологий в образовательной, научной и производственной деятельности аграрных университетов, в том числе на примере Белгородского государственного аграрного университета имени В.Я. Горина (Белгородский ГАУ) и Белорусского государственного аграрного технического университета (БГАТУ), а также рассмотрены возможности изготовления деталей сельскохозяйственной техники с использованием АМ-технологий, получивших развитие в указанных университетах, таких как: FDM-технология (Fused Deposition Modeling) (Белгородский ГАУ и БГАТУ), SLM-технология (Selective Laser Melting) (Белгородский ГАУ) и SL-технология (Sheet Lamination) (БГАТУ).

Особенности развития АМ-технологий в аграрных университетах. АМ-технологии начали развиваться в университетах в последние 5-10 лет. Преимущественно они применяются в технических университетах, где ведётся подготовка АМ-специалистов для нужд промышленного производства, в первую очередь для машиностроения, поскольку эти технологии наиболее распространены именно в машиностроении [2]. В гораздо меньшей мере АМ-

технологии получили развитие в аграрных университетах, где они являются объектом изучения в рамках подготовки АМ-специалистов для нужд агропромышленного комплекса.

Обучение в АМ-сфере проводится в разных организационных формах:

- 1) преподавание отдельных дисциплин по АМ-тематике для студентов, обучающихся по традиционным агроинженерным специальностям;
- 2) обучение студентов по специальностям АМ-профиля;
- 3) подготовка специалистов в АМ-сфере на курсах повышения квалификации.

В университетах, проводящих обучение в АМ-сфере, создаются специализированные подразделения, которые, наряду с учебной, обеспечивают научную деятельность, связанную с совершенствованием АМ-технологий, разработкой и изготовлением АМ-изделий и АМ-оборудования.

АМ-обучение в университетах не ограничивается ознакомлением с процессами 3D-печати и работой 3D-принтеров, а является более широким. Так, будущие АМ-специалисты должны владеть современными методами проектирования с учетом возможностей АМ-технологий; знать свойства материалов, используемых в АМ-технологиях, и уметь осуществлять их рациональный выбор для разных видов АМ-технологий; прогнозировать экономические и экологические последствия применения АМ-технологий. В производственной практике АМ-технологии часто применяют в сочетании с традиционными технологиями обработки материалов, поэтому программы АМ-обучения следует составлять таким образом, чтобы будущие АМ-специалисты могли использовать полученные знания и навыки в области аддитивного производства в традиционных производственных системах.

АМ-технологии являются не только объектом изучения, но и средством обучения, способствующим более эффективному преподаванию различных учебных дисциплин, совершенствованию форм и методик обучения, повышению мотивации к обучению и развитию новых компетенций студентов. Применение АМ-технологий при изучении различных учебных дисциплин в основном сводится к созданию наглядных пособий в виде 3D-моделей изучаемых объектов, которые могут дать гораздо большее представление об объектах, их форме, структуре и свойствах, чем их двумерные репродукции в книгах. Особенно значительный эффект обучения с применением АМ-технологий может быть достигнут при преподавании технических дисциплин, когда студентам предоставляется возможность изучать во взаимосвязи особенности проектирования и изготовления различных технических устройств или их отдельных деталей. Применение АМ-технологий способствует повышению уровня образования студентов не только при изучении учебных дисциплин, но также при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Особенности развития АМ-технологий в каждом конкретном университете определяются в значительной мере теми типами АМ-оборудования, которое имеется в распоряжении университета. Ниже кратко рассмотрены особенности развития АМ-технологий в ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ и БГАТУ.

В ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ на инженерном факультете мощным стимулом для внедрения АМ-технологий в деятельность учреждения стало открытие в 2024 г. Центра аддитивных технологий общего доступа (ЦАТОД). Центр создан совместными усилиями ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ и бизнес-направления «Аддитивные технологии» в структуре Топливной компании «ТВЭЛ». ЦАТОД является частью концептуальной эко-системы «Детский сад - Школа - Университет - Производство», разработанной Госкорпорацией «Росатом», что стимулирует развитие кадрового потенциала в области аддитивных технологий с учетом потребности в инженерно-технических специалистах предприятий отрасли и Российской Федерации. ЦАТОД работает на регион присутствия, где уже сегодня можно реализовать заявки на 3D-печать и реверс-инжиниринг от реального сектора экономики, в т.ч. сельского хозяйства (запчасти для сельскохозяйственной техники, ремонт узлов, вышедших из строя, расходники). Он оснащен современным оборудованием для промышленной 3D-печати, в частности, FDM 3D-принтерами марок FORA и F2 Lite (РФ). В ближайшее время в нем планируется создать участок металлической 3D-печати на основе использования SLM 3D-принтера марки RusMelt 300M (РФ).

В БГАТУ на факультете «Технический сервис в АПК» получили развитие FDM-технология – на основе использования FDM 3D-принтера марки NYCS-3D-2 (Китай) (по аналогии с ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ) и SL-технология – на основе использования лазерного станка марки LaserCUT-1515-6-2-N-RT (РБ), позволяющего осуществлять лазерный контурный раскрой листовых металлов. В последние 3-5 лет АМ-технологии изучаются в рамках преподавания учебных дисциплин для студентов по специальности «Материально-техническое обеспечение агропромышленного комплекса» и магистрантов по специальностям «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники» и «Техническое обеспечение производства сельскохозяйственной продукции». Также на факультете выполняются научные исследования и технические разработки, связанные с созданием для нужд агропромышленного комплекса пластиковых деталей с помощью FDM-технологии и металлических деталей с помощью SL-технологии.

АМ-технологии в производстве и ремонте сельскохозяйственной техники. При производстве сельскохозяйственной техники АМ-технологии применяют по следующим направлениям:

- 1) быстрое создание прототипов на стадии разработки новых деталей;
- 2) создание конечных функциональных деталей;
- 3) создание формообразующих элементов технологической оснастки или инструментов для последующего изготовления деталей по традиционным технологиям [1].

АМ-технологии снимают значительную часть ограничений на конструкцию проектируемых деталей, обусловленных традиционными технологиями, позволяют изготавливать детали сложной геометрии – такой, какую трудно или невозможно обеспечить с помощью традиционных технологий. Более того, АМ-технологии открывают возможности для реализации таких перспективных методов проектирования деталей, как генеративное проектирование, топологическая оптимизация, бионическое проектирование, которые позволяют максимально адаптировать конструкцию и, следовательно, функциональные свойства деталей под конкретные запросы потребителей.

Применение АМ-технологий при ремонте сельскохозяйственной техники связано, прежде всего, с созданием запасных частей, служащих для замены деталей, вышедших из строя и не подлежащих восстановлению, тем самым обеспечивая переход к концепции цифровых запчастей, т.е. к новой форме организации ремонта сельскохозяйственной техники, предполагающей хранение всех данных о запчастях в цифровом виде [1]. Согласно этой концепции, запчасти изготавливают в соответствии с реальными потребностями с помощью 3D-принтеров, которые обычно расположены географически близко к конечному потребителю. Благодаря использованию цифровых запчастей повышается эффективность ремонта: улучшается доступность запчастей, сокращаются сроки их доставки, а изготовление отдельных деталей или небольших партий деталей

становится экономически выгодным. Помимо затрат на производство, важно также учитывать затраты от простоя, которые могут стать настолько большими, что цена самой запчасти будет по сравнению с ними мала.

АМ-технологии активно развиваются с 1990-х годов, за это время они получили довольно широкое распространение при изготовлении деталей разных типов машин. Но лишь в последние несколько лет их начали сравнительно широко применять при изготовлении деталей сельскохозяйственной техники, о чем свидетельствует ряд обзорных статей [3-6]. Ниже кратко рассмотрены особенности изготовления деталей сельскохозяйственной техники с помощью следующих видов АМ-технологий, получивших развитие в ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ и БГАТУ:

- FDM-технология, согласно которой волокно из термопластичного полимера, нагретое до полужидкого состояния, подается послойно непосредственно в место построения изделия, где нанесенные слои соединяются между собой и затвердевают в результате охлаждения;

- SLM-технология, согласно которой металлический порошок наносится послойно на платформу, каждый слой подвергается селективному плавлению (переплавке) лазерным лучом, сканирующим поверхность слоя;

- SL-технология, согласно которой детали создают непосредственно из металлических листов; наибольший практический интерес представляет один из вариантов этой технологии – CSB-SL-технология, которая реализуется по схеме «cut-stack-bond» (CSB), т.е. характеризуется следующей последовательностью операций: контурный раскрой листового металла на лазерных или фрезерных раскройных станках, пакетирование листовых выкроек и их соединение между собой известными способами – с помощью механического крепежа, клея и т.п.

Примеры реализации аддитивных технологий. FDM-технология применяется для изготовления многочисленных пластиковых деталей сельскохозяйственной техники, которые при эксплуатации обычно не подвергаются значительным механическим нагрузкам. Типичные примеры таких деталей, изготавливаемых с помощью FDM-технологии: кронштейны и корпуса для датчиков сельхозмашин, корпуса для фильтрующих устройств, крышки для фиксации расходомеров [7]; инжекторы распылительных устройств для внесения жидких удобрений [8]; дозаторы устройств для посева семян [9]; защёлки для открытия окон тракторов [10]; сборщики фруктов с высоких деревьев [11]; разветвители и адаптеры садовых шлангов [11]; лущилки кукурузы [12] и т.д. Нередко такие детали при эксплуатации сельскохозяйственной техники выходят из строя, однако фирмы, производящие соответствующую сельскохозяйственную технику, как правило, не выпускают для замены запасные детали. Поэтому, чтобы не приобретать новые дорогостоящие узлы, содержащие такие детали, выгодно быстро и дешево сделать требуемые запасные детали с помощью FDM-технологии.

На сегодняшний день Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина успешно реализует проекты по изготовлению разнообразных деталей для сельхозпроизводителей, демонстрируя эффективность внедрения аддитивных технологий в сельское хозяйство. Одним из ярких примеров является разработка специализированных 3D-моделей для мясоперерабатывающей отрасли. Так, были созданы оригинальные конструкции кронштейнов, обеспечивающих надежное крепление элементов технологических линий по производству колбасных изделий. Это позволило значительно повысить производительность процессов переработки мяса, сделав оборудование более устойчивым и удобным в обслуживании.

Еще одним важным достижением стало проектирование эргономичных рукояток для обвалочных ножей, используемых при обработке мяса вручную. Использование технологий трехмерной печати позволило учесть анатомические особенности рук работников, создав удобные инструменты, снижающие нагрузку на мышцы и суставы операторов, повышая качество и скорость обработки продуктов.

Отдельно стоит отметить значительный опыт взаимодействия университета с предприятиями разных направлений сельского хозяйства, связанный с производством крыльчаток различного назначения (рисунок 1). Эти изделия широко применяются в вентиляционных системах животноводческих комплексов, охлаждающем оборудовании, насосах и другом техническом оснащении. Создание крыльчаток посредством аддитивных технологий обеспечивает высокую точность форм и размеров, улучшенную прочность и долговечность деталей, что существенно снижает затраты на ремонт и обслуживание производственного оборудования.



1 – крыльчатка охлаждения на маховик для двигателей, 2 – крыльчатка пластиковая для компрессора, 3 – крыльчатка охлаждения водяного насоса, 4 – крыльчатка охлаждения электродвигателя

Рис. 1 – Крыльчатки, изготовленные с помощью FDM-технологии

Одним из характерных примеров активного использования FDM-технологии (метод послойного наплавления материала) в производстве сельскохозяйственной техники является создание пластиковых деталей для беспилотных летательных аппаратов (дронов) [13, 14]. Этот метод применяется для изготовления ключевых компонентов, таких как элементы корпуса (фюзеляжа), лопастей винтов (пропеллеры) и других структурных частей.

Преимущества аддитивных технологий позволяют проектировщикам и инженерам оптимизировать конструктивные характеристики устройств на этапе разработки. Возможность вносить изменения в цифровую модель, экспериментируя с формой и функциональностью отдельных элементов, повышает общую эффективность устройства. Например, применение аддитивных технологий позволяет уменьшить вес конструкции, увеличить прочность и устойчивость к внешним воздействиям, улучшить аэродинамические свойства и снизить стоимость производства.

Примером удачного применения аддитивных технологий в Белгородском государственном аграрном университете стал проект по созданию крышки емкости для распыливания химикатов на агродрон AGRAS T40 (Рис. 2). Используя технологию FDM, специалисты разработали легкую и прочную деталь, соответствующую высоким стандартам прочности и устойчивости к агрессивным средам.

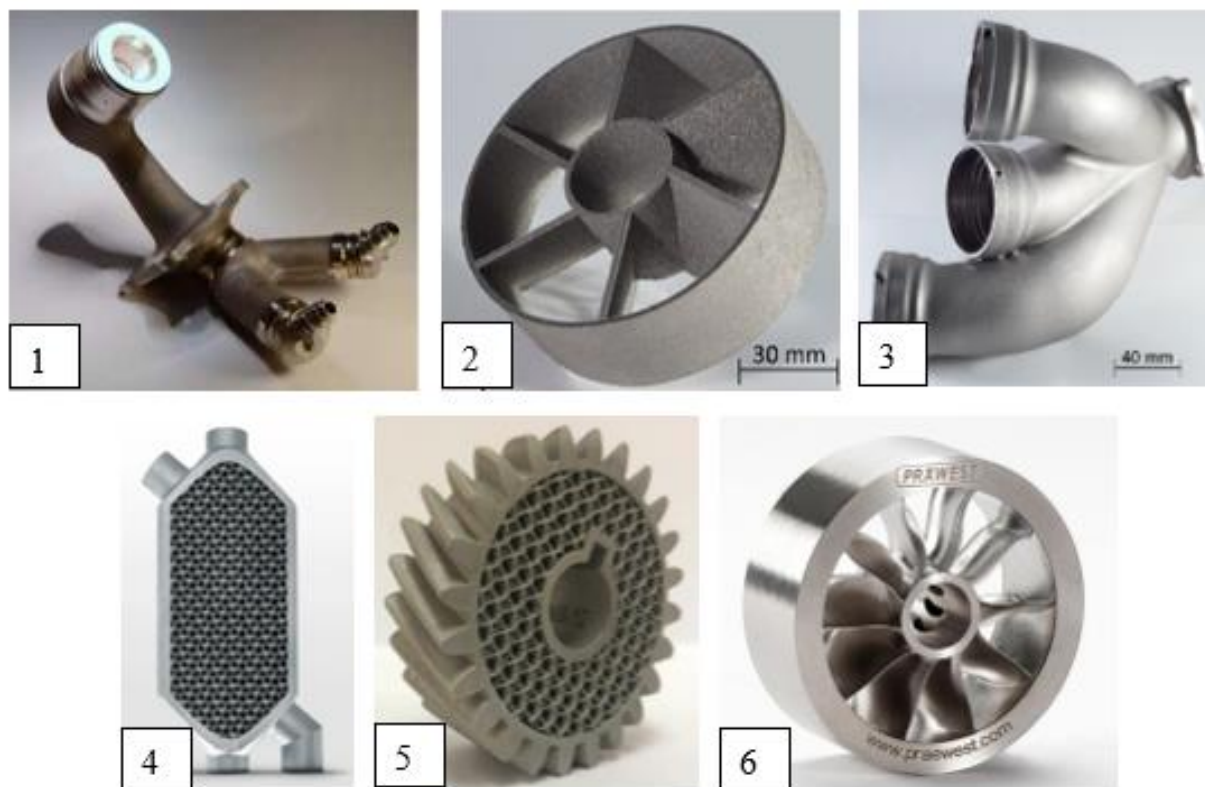
Этот пример ярко иллюстрирует преимущества аддитивных технологий в конструировании и изготовлении деталей сельскохозяйственной техники, подчеркивая их значимость для устойчивого развития высокотехнологичного агропромышленного комплекса.



1 – общий вид агрономического дрона AGRAS T40, 2 – крышка в сборе вид сверху,
3 – крышка в сборе вид снизу

Рис. 2 – Крышка емкости для распыливания химикатов агродрона AGRAS T40, изготовленная с помощью FDM-технологии

SLM-технология является гораздо дороже, чем FDM-технология, что обусловлено высокой стоимостью SLM-3D-принтеров, а также используемых металлических порошков. Поэтому SLM-технология применяется в основном для изготовления ответственных металлических деталей сложной геометрии, которые трудно или невозможно изготовить с помощью традиционных технологий [15-19]. Типичные примеры таких деталей общемашиностроительного назначения показаны на рисунке 3.



1 – топливная форсунка, 2 – рабочее колесо, 3 – выпускной коллектор,
4 – теплообменник, 5 – шестерня, 6 – завихритель

Рис. 3 – Детали машин, изготовленные с помощью SLM-технологии

SL-технология (технология листового ламинирования) начала активно развиваться, в том числе применительно к изготовлению металлических деталей сельскохозяйственной техники, недавно – в последние 3-5 лет [20]. По сравнению с SLM-технологией, которая также позволяет получать металлические детали, SL-технология характеризуется меньшей стоимостью технологического оборудования, в качестве которого обычно используются лазерные раскройные станки, получившие распространение на ряде промышленных предприятий [21]. Эти станки обладают большими размерами рабочей зоны построения, которые определяются размерами раскройного стола и достигают 1-2 м и более, что значительно превышает размеры рабочей зоны SLM-3D-принтеров. SL-технология имеет высокую производительность, поскольку создаваемая деталь наращивается сразу же готовыми слоями – листовыми выкройками, в то время как в SLM-технологии каждый наращиваемый слой формируется путем построчного сканирования лазерным лучом специально наносимого слоя порошка.

SL-технология может успешно применяться как для прямого изготовления деталей, когда готовые детали получают непосредственно в результате реализации SL-технологии, так и для непрямого изготовления, когда сначала, используя SL-технологии, создают формообразующую оснастку (штамповую, литейную и др.), с помощью которых затем получают готовые детали по традиционным технологиям.

Возможности прямого изготовления деталей сельскохозяйственной техники с помощью SL-технологии рассмотрены ниже на примере изготовления грядиля плуга в условиях производственной деятельности Минского завода шестерен (МЗШ) [22].

Грядиль представляет собой деталь плуга в виде стального бруса прямоугольного поперечного сечения, посредством которого обеспечивается крепление корпуса плуга к балке плуга. Во время работы плуга грядиль жестко удерживает корпус в заданном направлении движения и передает ему тяговое усилие от трактора.

В качестве объекта конструкторско-технологических разработок был выбран грядиль, устанавливаемый на оборотный плуг, показанный в традиционной конструкции на рисунке 4, а. Габаритные размеры грядиля: высота $H = 0,722$ м, длина $L = 0,420$ м; размеры поперечного сечения: высота $h = 0,080$ м, толщина $b = 0,045$ м. Грядиль имеет 6 крепежных отверстий – по 3 отверстия с каждой стороны. Одной из сторон грядиля крепится при помощи трех болтов к балке, к другой стороне грядиля прикрепляется корпус, также при помощи трех болтов. Грядиль изготовлен из стали 35ХГСА, его исходный вес – 27,024 кг.

Плуг предназначен для вспашки каменистых почв с удельным сопротивлением (показателем энергоёмкости процесса вспашки) до 0,1 МПа. Во время работы плуга грядиль испытывает переменные изгибающие нагрузки, величина которых непрерывно изменяется, при этом кратковременные пиковые нагрузки существенно (в 2,7 раза) превосходят средние значения.

Традиционный технологический процесс изготовления грядиля в заводских условиях включал следующие операции: отрезная, нагрев, гибка, контроль ОТК, вертикально-фрезерная, фрезерно-сверлильная, слесарная (чистка заусенцев), контроль ОТК, объемная закалка, отпуск, дробеочистка.

При изготовлении грядиля с использованием SL-технологии претерпели модифицирование как конструкция шестерни, так и технологический процесс его изготовления.

Модифицированный технологический процесс изготовления грядиля включал следующие операции: лазерная резка, слесарно-сборочная, объемная закалка, отпуск, дробеочистка, слесарно-сборочная.

В результате перехода от традиционного технологического процесса изготовления грядиля к модифицированному, основанному на использовании SL-технологии, общая трудоемкость изготовления уменьшилась с 6,2 час до 3,8 час, что соответствовало увеличению производительности приблизительно в 1,6 раза. Вместе с тем, как показали экономические расчеты, переход от традиционного технологического процесса изготовления грядиля к модифицированному обеспечил уменьшение себестоимости изготовления приблизительно в 1,4 раза. Увеличение производительности и уменьшение себестоимости изготовления грядиля обусловлено сокращением количества выполняемых операций, в том числе тех из них, которые характеризуются повышенной трудоёмкостью и энергоёмкостью.

С целью уменьшения металлоемкости конструкции грядиля и, соответственно, уменьшения массы грядиля и, как следствие, массы всего плуга, было исследовано напряженно-деформированное состояние 3D-модели грядиля методом конечных элементов с использованием программного пакета APM FEM CAD-системы КОМПАС-3D. На рисунке 4 б, в и г показан облегченный грядиль, полученный из листовых выкроек с оптимизированной топологией с использованием SL-технологии.



Рис. 4 – Грядиль плуга с традиционной конструкцией (а) и с модифицированной многослойной конструкцией (б, в, г), изготовленной с использованием SL-технологии (грядиль находится в составе плуга)

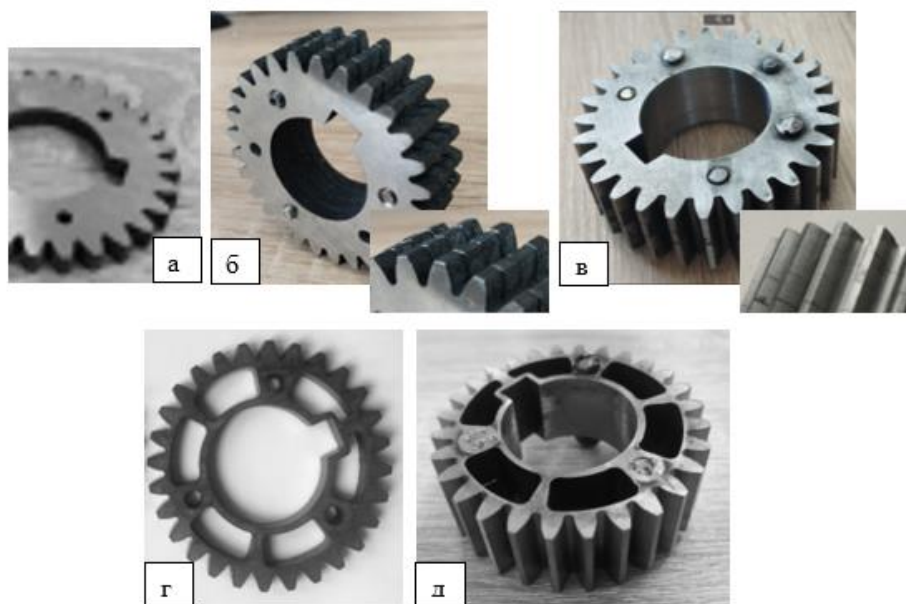
Грядиль, изготовленный с помощью SL-технологии, был испытан в полевых условиях в рамках приемочных испытаний на соответствие оборотного плуга требованиям СТБ 1388-2019 «Плуги тракторные лемешные общего назначения. Общие технические условия». Грядиль был установлен на один из корпусов плуга, агрегированного с трактором «Кировец» модели К-742М Стандарт 1 и трактором «Беларус» модели 3522. Испытания проводили в течение 12 рабочих смен, общая наработка плуга с установленным грядилем за время испытаний составила 192 га. В ходе испытаний отказов в работе, повреждений (деформаций, трещин и др.) грядиля не было выявлено, значения показателей вспашки соответствовали нормам ТНПА.

Еще один пример применения SL-технологии в условиях производственной деятельности МЗШ – прямое изготовление шестерен.

В качестве объекта конструкторско-технологических разработок была выбрана цилиндрическая прямозубая шестерня, выполненная из стали 65Г.

Конструкция шестерни в соответствии с послойным характером ее аддитивного построения приобрела многослойную (слоистую) структуру, в которой каждый слой представлял собой листовую выкройку. В свою очередь, использование SL-технологии на начальной стадии изготовления шестерни, связанной с вырезкой листовых выкроек, привело к изменениям в общем технологическом процессе ее изготовления, включая изменения как самих операций, так и условий их выполнения.

В соответствии с SL-технологией заготовки для изготовления шестерни представляли собой листовые выкройки, которые по форме соответствовали самой шестерни, но имели толщину металлического листа, из которого их вырезали (рисунок 5, а). Выкройки получали путем лазерного контурного раскроя листа из стали 65 с использованием лазерного станка. Стальной лист имел толщину 5 мм, так что для изготовления шестерни толщиной 20 мм необходимо было вырезать 4 одинаковых выкройки [23].



а – листовая выкройка, б и в – многослойная шестерня до и после шлифования зубьев,
г – листовая выкройка с оптимизированной топологией,
д – многослойная облегченная шестерня

Рис. 5 – Шестерня, изготовленная с использованием SL-технологии

Полученные листовые выкройки закаливали для обеспечения требуемой твердости (43...46 HRC), затем их пакети- ровали, свинчивали и заштифтовывали. На последующих операциях шлифования обрабатывали различные поверхности собранной шестерни. Особое внимание уделяли обеспечению требуемого качества рабочих поверхностей зубьев, включая боковые поверхности, поверхности вершин и впадин. Дело в том, что в собранной шестерни до шлифования рабочие по- верхности зубьев, составленных из отдельных фрагментов, имели неровности, особенно отчетливо видные в местах стыка листовых выкроек (рисунок 5, б). После шлифования эти поверхности становились гладкими, как и в зубьях шестерен, по- лученных традиционным путем (рисунок 5, в).

В результате перехода от традиционного технологического процесса изготовления шестерни к модифицированному, основанному на использовании SL-технологии, общая трудоемкость изготовления уменьшилась с 9,5 час до 6,5 час, что соответствовало увеличению производительности приблизительно в 1,5 раза. Вместе с тем, как показали экономические расчеты, переход от традиционного технологического процесса изготовления шестерни к модифицированному обеспечил уменьшение себестоимости изготовления приблизительно на 5 %. Увеличение производительности и уменьшение себесто- имости изготовления обусловлено сокращением количества выполняемых операций, в том числе тех из них, которые харак- теризуются повышенной трудоемкостью и энергоемкостью (по аналогии с изготовлением грядиля).

С целью уменьшения металлоемкости конструкцию шестерни подвергали топологической оптимизации (по анало- гии с конструкцией грядиля). На рисунке 5, г показана листовая шестерни выкройка с оптимизированной топологией, а на рисунке 5, д – облегченная шестерня (после шлифования зубьев). Облегченная конструкция шестерни обеспечивала сниже- ние металлоёмкости и, соответственно, массы почти в 1,6 раза за счёт выполнения дополнительных отверстий (масса ис- ходной шестерни ~ 0,27 кг, облегченной ~ 0,17 кг).

Заключение.

1. С целью реализации на перспективу активного применения аддитивных технологий (AM-технологий) крайне важна квалифицированная подготовка кадров для агропромышленного комплекса, которые обладают глубокими знаниями и компетенциями в области аддитивных технологий. Данная задача решается в рамках подготовки специалистов в сфере AM- технологий в университетской системе, включая ведущие аграрные учебные заведения, такие как Белгородский государ- ственный аграрный университет имени В.Я. Горина и Белорусский государственный аграрный технический университет.

2. Оснащение аграрных вузов современным оборудованием для аддитивных технологий необходимо для создания условий эффективного образовательного процесса, способствующего формированию необходимых профессиональных навыков и компетенций будущих инженеров и технологов. Это создаст условия для обеспечения высокого уровня научно- исследовательских работ и прикладных разработок.

3. Научные исследования и прикладные разработки становятся неотъемлемой частью учебного процесса, направ- ленного на разработку новых видов сельскохозяйственной техники и совершенствование существующих моделей. Следова- тельно, студенты приобретают не только теоретические знания, но и практические навыки, которые будут востребованы в реальной производственной среде.

4. Внедрение аддитивных технологий в систему университетского образования и оснащение вузов современными лабораториями способствует повышению уровня инженерно-технических кадров, улучшению качества выпускаемых ком- понентов сельскохозяйственной техники и укреплению позиций отечественного машиностроительного сектора в условиях растущих требований рынка.

Библиография

1. Толочко Н.К., Романюк Н.Н., Авраменко П.В. Аддитивные технологии и высшая школа // Вышэйшая школа. 2021. № 1. С. 38–43.

2. Толочко Н.К., Нукешев С.О., Романюк Н.Н., Мендалиева С.И. Аддитивные технологии в производстве и ремонте машин: учебное пособие. Нур-Султан : КАТУ им. С. Сейфуллина, 2022. 184 с.
3. Crisostomo J.L.B., Dizon J.R.C. 3D Printing applications in agriculture, food processing, and environmental protection and monitoring // *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology (ASSET)*. 2021. Vol. 3. № 2. P. 0210202-1–0210202-10.
4. Faidallah R.F., Szakal Z., Oldal I. Introduction to 3D printing: techniques, materials and agricultural applications // *Hungarian agricultural engineering*. 2021. № 40. P. 47–58.
5. Kushwah A., Yadav R., Chowdhury M. Revolutionizing Agriculture: Unleashing the Potential of 3D Printing in Agricultural // *Engineering, Food and Scientific Reports*. 2023. № 4. P. 7–11.
6. Lu Y. [et al]. Review and Research Prospects on Additive Manufacturing Technology for Agricultural Manufacturing // *Agriculture*. 2024. № 14. P. 1207 (17 pp.).
7. Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. (2023). 3D-печать для сельского хозяйства, ВИМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/3d-printing-case-vim.html> (дата обращения: 16.04.2025).
8. Marin E., Gheorghe G.-V., Baltatu C., Matescu M. Application of 3D printing technology for the design and manufacture of some component parts of spraying machine with solution recovery // *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 67. № 2. P. 147–154.
9. 3D Printing Helps Test Crop Seeding System. (2015) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dprint.com/48469/3d-printing-groundbreaking> (дата обращения: 10.05.2025 г.).
10. Зашёлка для открытия окна трактора. (2021) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.instagram.com/lablexys3d/p/CLkFY5WroEU/?img_index=2 (дата обращения: 10.05.2025 г.).
11. Pearce J. M. Applications of Open Source 3-D Printing on Small Farms // *Organic Farming*. 2015. Vol. 1. Iss. 1. P. 19–35.
12. Faidallah R.F., Faidallah Z., Faidallah, Oldal I. Introduction to 3D printing: techniques, materials and agricultural applications // *Hungarian agricultural engineering*. 2021. № 40. P. 47–58.
13. Venegas J.A., et al. Development of 3D-Printed Agricultural Drone (Ardufarmer) // *Engineering Innovations*. 2022. Vol. 1. Pages 39–51.
14. Toroidal propeller on a drone DIY 3D printer. (2023) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=UWoXfDRhPKc> (дата обращения: 10/05.2025 г.).
15. Зубков А. Третья промышленная революция. Аддитивные технологии 3D-печати в наукоемких отраслях промышленности // *Технологии в электронной промышленности*. 2015. № 7. С. 73–78.
16. Boschetto B.F.A., Bottini L., Macera L., Veniali F. Post-Processing of Complex SLM Parts // *Appl. Sci*. 2020. № 10. P. 1382 (19 pp.).
17. Additive Manufacturing by selective laser melting (SLM). (2025) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-bed/lasertec-30-slm> (дата обращения: 10.05.2025 г.).
18. SLM and DMLS 3D printing. (2025) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.zeal3dprinting.com.au/slm-and-dmls-3d-printing> (дата обращения: 10.05.2025 г.).
19. 3D-печать металлами: 5 очевидных преимуществ на практическом примере // *Аддитивные технологии*. 2025. № 2 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-pechat-metallami-5-ochevidnyh-preimushchestv-na-prakticheskom-primere.html> (дата обращения: 10.05.2025 г.).
20. Толочко Н.К. и др. Изготовление металлических деталей сельхозтехники с использованием аддитивной технологии листового ламинирования // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2025. № 1. С. 59–65.
21. Толочко Н.К., Сокол О.В. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования // *Вестник машиностроения*. 2020. № 10. С. 11–15.
22. Толочко Н.К., Андрушевич А.А., Чугаев П.С., Богданович Т.А. Прямое изготовление металлических деталей с применением lom-технологии // *Литье и металлургия*. 2018. № 1(90). С. 137–143.
23. Толочко Н.К., Сокол О.В. Листовая штамповка металлов с помощью штампов, изготовленных с использованием аддитивной LOM-технологии // *Агропанорама*. 2019. № 4(134). С. 19–21.

References

1. Tolochko N.K., Romanyuk N.N., Avramenko P.V. Additivnie tehnologii i visshaya shkola [Additive technologies and higher education] // *Visheishaya shkola*. 2021. № 1. P. 38–43.
2. Tolochko N.K., Nukeshev S.O., Romanyuk N.N., Mendaliev S.I. Additivnie tehnologii v proizvodstve i remonte mashin [Additive technologies in machine production and repair]: uchebnoe posobie. Nur-Sultan : KATU im. S. Seifullina, 2022. P. 184.
3. Crisostomo J.L.B., Dizon J.R.C. 3D Printing applications in agriculture, food processing, and environmental protection and monitoring // *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology (ASSET)*. 2021. Vol. 3. № 2. P. 0210202-1–0210202-10.
4. Faidallah R.F., Szakal Z., Oldal I. Introduction to 3D printing: techniques, materials and agricultural applications // *Hungarian agricultural engineering*. 2021. № 40. P. 47–58.
5. Kushwah A., Yadav R., Chowdhury M. Revolutionizing Agriculture: Unleashing the Potential of 3D Printing in Agricultural // *Engineering, Food and Scientific Reports*. 2023. № 4. P. 7–11.
6. Lu Y. [et al]. Review and Research Prospects on Additive Manufacturing Technology for Agricultural Manufacturing // *Agriculture*. 2024. № 14. P. 1207 (17 pp.).
7. Federal'nyy nauchnyy agroinzhenernyy tsentr VIM. (2023). 3D-pechat' dlya sel'skogo khozyaystva [3D printing for agriculture], VIM. Elektronnyy resurs. Dostup: https://top3dshop.ru/blog/3d_printing_case_vim.htmlsrsltid=AfmBOorKQBCiOM9iQysdIAbsmgLSDoKpv1FTKpvWzlgXKM44zvgn13X1 (data obrascheniya: 16.04.2025).
8. Marin E., Gheorghe G.-V., Baltatu C., Matescu M. Application of 3D printing technology for the design and manufacture of some component parts of spraying machine with solution recovery // *Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 67. № 2. P. 147–154.
9. 3D Printing Helps Test Crop Seeding System. (2015). Elektronnyy resurs. Dostup: <https://3dprint.com/48469/3d-printing-groundbreaking> (data obrascheniya: 10.05.2025 g.).
10. Zashchotka dlya otkrytiya okna traktora [Tractor window latch]. (2021). Elektronnyy resurs. Dostup: https://www.instagram.com/lablexys3d/p/CLkFY5WroEU/?img_index=2 (data obrascheniya: 10.05.2025 g.).
11. Pearce J.M. Applications of Open Source 3-D Printing on Small Farms // *Organic Farming*. 2015. Vol. 1. Iss. 1. P. 19–35.
12. Faidallah R.F., Faidallah Z., Faidallah, Oldal I. Introduction to 3D printing: techniques, materials and agricultural applications // *Hungarian agricultural engineering*. 2021. № 40. P. 47–58.

13. Venegas J.A., et al. Development of 3D-Printed Agricultural Drone (Ardufarmer) // Engineering Innovations. 2022. Vol. 1. P. 39–51.
14. Toroidal propeller on a drone DIY 3D printer. (2023). Elektronnyy resurs. Dostup: <https://www.youtube.com/watch?v=UWoXFdRhPKc> (data obrashcheniya: 10.05.2025 g.).
15. Zubkov A. Tretya promishlennaya revolyuciya. Additivnie tehnologii 3D-pechati v naukoemkikh otraslyah promishlennosti [The Third Industrial Revolution: Additive 3D Printing in High-Tech Industries] // Tehnologii v elektronnoi promishlennosti. 2015. № 7. P. 73–78.
16. Boschetto B.F.A., Bottini L., Macera L., Veniali F. Post-Processing of Complex SLM Parts // Appl. Sci. 2020. № 10. P. 1382 (19 pp.).
17. Additive Manufacturing by selective laser melting (SLM) (2025). Elektronnyy resurs. Dostup: <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-bed/lasertec-30-slm> (data obrashcheniya: 10.05.2025).
18. SLM and DMLS 3D printing. (2025). Elektronnyy resurs. Dostup: <https://www.zeal3dprinting.com.au/slm-and-dmls-3d-printing> (data obrashcheniya: 10.05.2025 g.).
19. 3D-pechat' metallami: 5 ochevidnykh preimushchestv na prakticheskom primere [3D Metal Printing: 5 Obvious Advantages in a Practical Example] // Additivnyye tekhnologii. 2025. № 2. Elektronnyy resurs. Dostup: <https://additiv-tech.ru/publications/3d-pechat-metallami-5-ochividnyh-preimushchestv-na-prakticheskom-primere.html> (data obrashcheniya: 10.05.2025 g.).
20. Tolochko N.K. i dr. Izgotovlenie metallicheskih detalei sel'hoztehnik s ispol'zovaniem additivnoi tehnologii listovogo laminirovaniya [Manufacturing of metal parts for agricultural machinery using additive sheet lamination technology] // Mehanika mashin, mekhanizmov i materialov. 2025. № 1. P. 59–65.
21. Tolochko N.K., Sokol O.V. Metodologicheskie aspekty ocenki effektivnosti additivnoi tehnologii listovogo laminirovaniya [Methodological aspects of assessing the effectiveness of additive sheet lamination technology] // Vestnik mashinostroeniya. 2020. № 10. P. 11–15.
22. Tolochko N.K., Andrushevich A.A., Chugayev P.S., Bogdanovich T.A. Pryamoye izgotovleniye metallicheskih detaley s primeneniye lom-tekhnologii [Direct manufacturing of metal parts using LOM technology] // Lit'ye i metallurgiya. 2018. № 1(90). P. 137–143.
23. Tolochko N.K., Sokol O.V. Listovaya shtampovka metallov s pomoshch'yu shtampov, izgotovlennykh s ispol'zovaniyem additivnoy LOM-tekhnologii [Sheet metal stamping using dies manufactured using additive LOM technology] // Agropanorama. 2019. № 4(134). P. 19–21.

Сведения об авторах

Толочко Николай Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и организации технического сервиса, УО Белорусский государственный аграрный технический университет, просп. Независимости, 92/2, г. Минск, Беларусь, 220023, тел. +375-44-5572518, e-mail: n.tolochko1951@mail.ru;

Романюк Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ректор, УО Белорусский государственный аграрный технический университет, просп. Независимости, 92/2, г. Минск, Беларусь, 220023, тел. + 375 44 776-26-63, e-mail: romanyuk-nik@tut.by;

Еднач Валерий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, декан факультета «Технический сервис в АПК», УО Белорусский государственный аграрный технический университет, просп. Независимости, 92/2, г. Минск, Беларусь, 220023, тел. +375 29 310-31-94, e-mail: valeryednatch@yandex.by;

Макаренко Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, декан инженерного факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский район, Белгородская обл., Россия, 308503, тел. +7 (4722) 39-12-27, e-mail: makarenko_an@belgau.ru;

Бережная Ирина Шамилиевна, директор Центра аддитивных технологий общего доступа, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский район, Белгородская обл., Россия, 308503, тел. +79511571188, e-mail: berejnaya_i@belgau.ru.

Information about authors

Tolochko Nikolay Konstantinovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, professor of the department of technologies and organization of technical service, Educational Institution Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti Ave., 92/2, Minsk, Belarus, 220023, tel. +375-44-5572518, e-mail: n.tolochko1951@mail.ru;

Romanyuk Nikolay Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor, rector, Educational Institution Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti Ave., 92/2, Minsk, Belarus, 220023, tel. + 375 44 776-26-63, e-mail: romanyuk-nik@tut.by;

Yednach Valery Nikolaevich, PhD in engineering, associate professor, dean of the faculty of technical service in the agro-industrial complex, Educational Institution Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti Ave., 92/2, Minsk, Belarus, 220023, tel. +375 29 310-31-94, e-mail: valeryednatch@yandex.by;

Makarenko Aleksey Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor, dean of the engineering faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», ul. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, tel. +7 (4722) 39-12-27, e-mail: makarenko_an@belgau.ru;

Berejnaya Irina Shamilievna, direktor Centra additivnih tehnologii, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Agrarian University named after V. Gorin», ul. Vavilova, 1, 308503, Maiskiy, Belgorod region, Russia, tel. +79511571188, e-mail: berejnaya_i@belgau.ru.