

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 628.1

doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-21-29

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ НА СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗЛИЧНЫМ ФАЗАМ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Оганес Валерьевич Оганесян^{1✉}, Олег Васильевич Бурлаченко²

^{1,2}Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ogoganesyan@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2050-2302>

²oburlachenko@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7923-6742>

Аннотация

Целью данного исследования является выявление современных технологий, применяемых на стадии производства практически на всех фазах жизненного цикла. Для достижения указанной цели выполнен анализ статей и проведен обзор зарубежных исследований, опубликованных в основном за период 2016–2020 гг., в журналах, входящих в наукометрические базы данных SCOPUS и WoS, а также исследований российских ученых за последние десять лет, которые индексируются как в отмеченных выше международных наукометрических базах, так и в национальной системе РИНЦ. В проанализированных в данной работе публикациях содержатся доказательства того, что с точки зрения получения качественной продукции на современном этапе развития производства аддитивные тех-

нологии уступают комбинированным (аддитивно-субтрактивным, аддитивно-субтрактивно-упрочненным и др.) технологиям.

Выводы: предлагается на этапе моделирования ЖЦ машиностроительной продукции или изделия в общую модель включить стадию капитального ремонта и модернизации, что может стать верным направлением для выбора наиболее эффективной технологии независимо от фазы ЖЦ; выбор технологии для стадии производства конкретного изделия или детали должен быть обоснованным с точки зрения улучшения основных эксплуатационных свойств и повышения остаточного ресурса.

Ключевые слова: цикл, фазы, стадия, производство, аддитивно-субтрактивная обработка.

Ссылка для цитирования:

Оганесян О.В. Современные технологии, используемые на стадии производства, применительно к различным фазам жизненного цикла изделий и деталей машин / О.В.Оганесян, О.В. Бурлаченко // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 03. – С. 21 – 29. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-21-29.

Original article

Open Access Article

MODERN PRODUCTION TECHNOLOGIES APPLIED TO VARIOUS LIFE CYCLE PHASES OF PRODUCTS AND MACHINE PARTS

Oganes Valeryevich Oganesyan^{1✉}, Oleg Vasilyevich Burlachenko²

^{1,2}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ogoganesyan@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2050-2302>

²oburlachenko@yandex.ru; <http://orcid.org/0000-0001-7923-6742>

Abstract

The study objective is to identify modern production technologies used at almost all phases of the life cycle. To achieve this objective, there have been analyzed and reviewed papers and foreign studies published mainly within 2016-2020 in journals covered by SCOPUS and WoS indexing services, as well as studies of Russian scientists over the past ten years, which

are indexed in the above-mentioned international services, as well as in the national RSCI system. The references analyzed in this paper prove that additive technologies are inferior to combined (additive-subtractive, additive-subtractive-hardened, etc.) technologies from the point of view of obtaining high-quality products at the present stage of production development.

Conclusions: it is proposed to include the stage of capital repairs and updating of the general model at the stage of modeling the life cycle of machine-building products, which can be the right direction for choosing the most effective technology regardless of the life cycle phase; the choice of technology for the

production stage of a particular product or part should be justified in terms of improving the basic operational properties and increase of the residual resource.

Keywords: cycle, phases, stage, production, additive-subtractive treatment.

Reference for citing:

Oganesyan OV, Burlachenko OV. Modern production technologies applied to various life cycle phases of products and machine parts. Transport Engineering. 2023; 3:21-29. doi: 10.30987/2782-5957-2023-3-21-29.

Введение

Любая продукция, в том числе и машиностроительная, имеет свой жизненный цикл (ЖЦ), состоящий из различных стадий и фаз. При этом в научной литературе нет единого мнения относительно количества стадий. Например, в работах [1, 2] перечислены следующие стадии ЖЦ: «проектирование, разработка технологий, оформление конструкторско-технологической документации, создание прототипов, проведение тестовых испытаний, производство, складирование, отгрузка, утилизация и другие необходимые мероприятия». В статье [3] подчеркивается, что количество стадий ЖЦ зависит от сложности и функционального назначения продукции. Краткий обзор существующих моделей ЖЦ технических систем, в том числе сложных, представлен в работе [4]. Имеется ряд публикаций, где в ЖЦ машиностроительной продукции включены условно объединенные или укрупненные стадии, среди которых основными являются проектирование, производство, эксплуатация и утилизация. Таким образом, речь идет о разомкнутом ЖЦ продукции, имеющем только одну (начальную) фазу. Объединенные стадии ЖЦ характеризуются определенными преимуществами, особенно управленческого характера, что описано в статье [5].

Необходимо отметить, что согласно действующему в России стандарту в ЖЦ изделия (ЖЦИ) входят следующие условно выделяемые стадии: «обоснование разработки, разработка технического задания (ТЗ), проведение опытно-конструкторских работ, производство и испытание, модернизация, использование (эксплуатация), ликвидация» (ГОСТ Р 53791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического

назначения. Общие положения). Эти этапы соответствуют начальной фазе ЖЦИ, и базовая кривая (график), описывающая подобную модель ЖЦИ в теории маркетинга, называется традиционной (нормальной). После утилизации (ликвидации) изделия завершается его ЖЦ, получается некий разомкнутый ЖЦИ, что с точки зрения экономики не всегда неэффективно.

Одним из основных направлений ресурсосбережения является продление ЖЦИ, что вполне осуществимо с помощью современных технологий.

Перед утилизацией, с учетом физического износа продукции (изделия), принимаются необходимые экономико-экологические и технические решения о возможности капитального ремонта (или модернизации). При положительном решении продукция входит в новую (вторую) фазу, что соответствует классическому пониманию замкнутой модели ЖЦ. Отметим, что новых фаз ЖЦИ может быть несколько (в теории маркетинга описываются кривыми «повторного цикла», «гребешковой» и др.). На новой фазе продукция проходит такие же основные, «укрупненные» стадии (проектирование, производство, эксплуатация) и при этом увеличивается продолжительность ЖЦ.

Учитывая современные технологии, позволяющие продлить ЖЦ изделия, особенно на стадии производства, необходимо при моделировании ЖЦ продукции или изделия рассмотреть вопрос целесообразности формирования стадии капитального ремонта и модернизации.

В публикации [6] совершенно справедливо подчеркивается, что «система управления жизненным циклом продукта (PLM) требует рассмотрения и обеспечения эффективных рабочих условий для

наиболее загруженных частей продукта не только на стадии проектирования продукта, но и на стадии производства. Эксплуатационные свойства изделия можно значительно улучшить, если учесть формирование параметров износостойкости функциональных поверхностей уже на этапе планирования структуры технологического процесса и параметров механической обработки изделия». Добавим, что вместо механической обработки можно применять

комбинированные или гибридные технологии обработки.

Целью данного исследования является выявление на основе обзора и анализа научных публикаций отечественных и зарубежных авторов современных технологий, применяемых на стадии производства на всех фазах ЖЦ и позволяющих повысить эксплуатационные свойства и остаточный ресурс изделия или продукции в целом.

Технологии поддержки стадии производства жизненного цикла изделия

В настоящее время технологии, позволяющие улучшать эксплуатационные качества и повышать остаточный ресурс машиностроительной продукции, а также – частично – ее изделий, деталей, основных узлов, на всех стадиях ЖЦ непосредственно связаны с цифровыми технологиями [7, 8]. Одним из перспективных вариантов таких технологий являются аддитивные технологии.

В исследовании [9] отмечается, что на современном этапе в качестве одного из актуальных и многообещающих направлений в развитии машиностроения следует принимать создание и внедрение технологий так называемого быстрого производства изделий (англ. *rapid fabrication*). Данные технологии основаны на послойном построении того или иного изделия, из любого порошкового материала, опираясь на принципы трехмерного (твердотельного) моделирования, для чего создается соответствующая CAD-модель (используется такое программное обеспечение, как *SolidWorks, CATIA, ProE, AutoCAD* и др.).

В действующем отечественном нормативном документе (ГОСТ Р 57558-2017/*ISO/ASTM 52900:2015*. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения) термины «аддитивное производство» и «аддитивный технологический процесс» (от англ. *additive manufacturing*) выступают как синонимы и определяются следующим образом: это «процесс изготовления деталей, который основан на создании физического объекта по электронной геометрической модели путем добавления материала, как правило, слой за слоем». При этом

внимание акцентируется на отличии данного процесса от субтрактивного (от англ. *subtraction* – «вычитание») производства, то есть механической обработки, и таких традиционных формообразующих технологий, как штамповка и литье.

В специальной литературе, в том числе в интернет-источниках, встречается также термин *additive fabrication (AF)*, что соответствует терминологии организации *ASTM International (American Society for Testing and Materials)*, занимающейся «разработкой технических стандартов для широкого спектра материалов, изделий, систем и услуг» [9]. Под *AF* также понимается «процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от „вычитающих“ производственных технологий» [9].

Раскрывая основные преимущества аддитивного производства (*AM*), авторы публикации [10] отмечают, что эта технология позволяет наносить материалы на существующие детали (таким образом, речь идет о второй фазе жизненного цикла изделия). Далее подчеркивается, что достигается это с помощью систем наплавленного отвода энергии, благодаря чему появляется возможность выполнять ремонт сломанных или изношенных элементов. Указывается также, что технология была использована для создания новой детали.

В исследовании [11] предлагается новый метод постобработки образцов *SLM 316L* для улучшения характеристик образцов *SLM (Selective Laser Melting)*, разновидности *SLS (Selective Laser Sintering* –

послойное лазерное спекание) – технологии и возможности применения образцов *SLM* в области прецизионной механической передачи. Авторы отмечают, что «существующая технология печати *SLM* не может производить механические детали, полностью отвечающие требованиям высокой точности и прочности», поэтому предлагается дополнительно произвести многослойное покрытие, которое имело бы структуру, состоящую из нанокристаллов, на основе нитрида титана и нитрида титана-алюминия, что позволит добиться высоких показателей по таким параметрам, как уровень твердости и коррозионная стойкость, обеспечит снижение коэффициента трения; кроме того, в целом благодаря этому можно получить весьма высокие физико-механические свойства. В частности, вопросам создания подобных покрытий, обладающих высокими трибологическими характеристиками, посвящено исследование [12]. Помимо этого, специалистами было доказано, что механические свойства многослойных нанопокровов, в частности *TiAlN*, в значительной степени обусловлены длительностью процесса ионной бомбардировки [13].

В научной публикации [14] авторами изучено влияние процессов *SLM* и *SLA* (лазерное легирование поверхности) на микроструктуру, твердость, износостойкость и шероховатость поверхности на стадии производства (вторая фаза ЖЦ) различных деталей машин. Авторы отмечают, что «результаты образцов, полученные при применении *LSM* и *LSA* технологий, показывают однородную структуру, эффективное сцепление порошков сплава с основным металлом и поверхность без трещин. При этом твердость материала при *SLM*-технологии повышается в четыре раза, а при *SLA* – в 2,62 раза». Трибологические испытания показали также улучшенную износостойкость образцов, особенно при применении технологии *SLM*.

Особый интерес представляет исследование [15], авторы которого предлагают новый способ повышения таких механических свойств, как твердость и износостойкость, изношенных дисковых фрез тоннелепроходческих механизированных ком-

плексов, благодаря чему обеспечивается безопасность их повторного использования с экологической точки зрения. Так как режущие кольца эксплуатируются длительное время и при этом тесно взаимодействуют с различными твердыми породами грунта, они быстро изнашиваются. Авторский подход основан на повышении твердости и износостойкости резцов на основе применения лазерной облицовки (нанесения слоя наночастиц порошка карбида вольфрама на изношенную поверхность резцов), так как замена режущего кольца – дорогостоящая, трудоемкая и громоздкая работа. Далее экспериментальным путем доказано преимущество лазерного покрытия для уменьшения износа режущего кольца.

В работах [16, 17] особое внимание уделяется вопросам использования цифровых технологий в промышленности применительно к российским системам программирования (например, система *SprutCAM*): речь идет о программировании обработки деталей с помощью роботов; технологии послойного, на основе 3D-модели «выращивания» изделий; программировании токарно-фрезерной обработки и др.

Авторы статьи [18] отмечают, что для достижения высоких показателей качества и эффективности российского машиностроения необходимо активное внедрение робототехнических комплексов (РТК), состоящих из различных роботов определенного функционального назначения. При этом авторами данной публикации представлена трактовка термина «робототехнический комплекс», предложена соответствующая концептуальная модель и выявлены наиболее перспективные сферы использования в соответствии с главными принципами, провозглашенными Индустрией 4.0.

Как указывает автор работы [19], качественные изменения в машиностроительной промышленности, которые по праву можно назвать революционными, стали своего рода импульсом к разработке и внедрению новых технологий, базирующихся на комбинированной аддитивно-субтрактивной обработке. Также автор ак-

центрирует внимание на том, что использование именно роботов и станков с числовым программным управлением (ЧПУ), а не 3D-принтеров, во-первых, снимает (при наличии необходимого инструмента) проблему с размерами, а во-вторых, благодаря механической обработке решается проблема точности.

Установлено, что в общем случае металлические материалы, полученные с применением аддитивной технологии (вне зависимости способа создания слоев) имеют механические характеристики (упругость, пластичность, прочность, износостойкость и др.) по сравнению с прокатом. Для полного или частичного устранения этого недостатка используют дополнительные упрочняющие операции. Одним из таких решений является технология, основанная на совмещении процессов аддитивной и субтрактивной обработки с добавлением процесса упрочнения материала [20]. Разработанная аддитивно-субтрактивно-упрочняющая технология лишена недостатков аддитивной и аддитивно-субтрактивной технологий. Авторы отмечают, что такая технология позволила повысить твердость материала изделия почти в два раза, по сравнению с твердостью материала, выращенного без использования процесса упрочнения. Технологические возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии, в результате повышающие производительность выращивания и качество выращенного металла, подтверждены патентами [21, 22].

Особенности реализации, требования к оборудованию и оснастке, преимущества и проблемы комплексной аддитивно-субтрактивной технологии рассмотрены в [23]. Авторы, на основе опыта создания и эксплуатации специального оборудования

Заключение

На современном этапе моделирования ЖЦ машиностроительной продукции или изделия в общую модель необходимо включить стадию капитального ремонта, предшествующую стадии утилизации. Современные технологии (особенно комбинированные технологии систем класса

для аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии провели анализ возможности получения ответственных изделий сложной формы в рамках одной операции на одной единице оборудования. Дана также оценка эффективности использования таких процессов на современном этапе развития производства.

Следует отметить, что имеется общая тенденция к созданию технологического оборудования, обеспечивающего чередование в определенной последовательности операций аддитивного и субтрактивного производства. При этом обработка осуществляется в пределах одного рабочего места, имеется возможность изготовления деталей сложной конфигурации с высокими требованиями по точности размеров и качеству поверхностного слоя. В числе требований к конструкции оборудования – сочетание возможности производства деталей, обладающих значительными размерами [24].

В настоящее время на мировом рынке разработана и представлена довольно широкая номенклатура оборудования, объединяющего аддитивные, субтрактивные и другие технологии [25], в том числе разработки российских ученых. Авторы отмечают, что реализация комбинированных технологий, являются стратегическим направлением. Области рационального использования таких технологий весьма широки [26, 27]: высокоточное аддитивное-субтрактивное производство; изготовление в рамках одного технологического цикла изделий и деталей из двух и более материалов, материалов имеющих различные структуры и др. При этом такие технологии эффективны на основных этапах жизненного цикла изделия: создание, ремонт и восстановление деталей и конструкций.

«Индустрия 3.0» и «Индустрия 4.0», выполняемые на одной производственной платформе) на этапе производства начальной фазы ЖЦ позволяют выпускать изделия с повышенными эксплуатационными качествами, стадия капитального ремонта

обеспечивает повышение остаточного ресурса изделий.

Анализ научных публикаций отечественных и зарубежных исследователей показывает, что на текущий момент аддитивные технологии имеют ряд недостатков, к которым относятся большая шероховатость полученных покрытий и невозможность обеспечения точности геометрических размеров, особенно сложных в конфигурации изделий и деталей. Однако комбинация аддитивных технологий с тра-

диционными, среди которых аддитивно-субтрактивные и аддитивно-субтрактивно-упрочняющие, позволяет не только устранить недостатки, присущие аддитивным технологиям, но и обеспечить повышенные эксплуатационные свойства изделия.

Естественно, со временем существующие цифровые технологии будут совершенствоваться, что, вероятно, повлияет на эволюционные процессы в управлении ЖЦ изделий и на самих цифровые технологий для отдельных стадий ЖЦИ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Огородникова О. М. Исследовательская роль программ САЕ в сквозных технологиях CAD/CAE/CAM / О.М. Огородникова // Вестник машиностроения. – 2012. – №1. – С. 25-31.
2. Доросинский Л.Г. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделия / Л.Г. Доросинский, О.М. Зверева. – Ульяновск : Зebra, 2016. – 243 с.
3. Способы организации жизненного цикла машиностроительной продукции / В. Д. Кухарь, А. А. Маликов, А. Л. Сабина, А. Н. Ивутин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – Вып. 12. – Ч. 2. – С. 302-314.
4. Федотова А. В. Грануляция информации при моделировании жизненного цикла сложных технических систем / А. В. Федотова, В. Б. Тарасов, А. Н. Ветров. – Текст : электронный // Интернет-журнал Науковедение. : электронный научный журнал. – 2013. – №5 (18). – С. 53. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/53tvn513.pdf>. (дата обращения: 18.10.2022).
5. Гарина И. О. Техничко-экономические аспекты разработки и внедрения специализированной онтологии для управления жизненным циклом продукции в машиностроительной отрасли / И.О. Гарина // Вопросы инновационной экономики. – 2020. – Том 10. – № 3. – С. 1147-1166. - DOI: 10.18334/vinec.10.3.110602
6. Stupnyskyu V., Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology. *Archive of Mechanical Engineering*. 2020 · May; 67(2):149-67. DOI: 10.24425/ame.2020.131688.
7. Роль цифровых технологий при строительстве и повышении остаточного ресурса промышленной и строительной продукции / С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко, О. В. Оганесян, А. О. Бурлаченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. - 2020. - Вып. 4 (81). - С. 429-437. 2020.
8. Оганесян О. В. Информационные (цифровые) технологии в машиноведении / О. В. Оганесян, О. В. Бурлаченко, С. Г. Абрамян // The scientific heritage. - 2020. - Том 1. - N 57. - С. 20-24/
9. Чемодуров А. Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения / А. Н. Чемодуров // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – Вып. 8. – Ч. 2. – С. 210-217.
10. Simoneau L., Bois-Brochu A., Blais C. Tensile Properties of Built and Rebuilt/Repaired Specimens of 316L Stainless Steel Using Directed Energy Deposition. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020 Sep; Early Access. DOI: 10.1007/s11665-020-05087-z.
11. Lyu YL, Chen YZ, Wan YL. A novel post-processing method for 316L steel specimen generated by SLM using TiN/TiAlN multilayer coating. *Rapid Prototyping Journal*. 2020 Aug; Early Access. DOI: 10.1108/RPJ-07-2019-0199.
12. Сошина Т. О. Проектирование многослойного покрытия TiAlN–TiN–TiAlN с высокими трибологическими свойствами / Т. О. Сошина, В. А. Плюснина, О. И. Сошина // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 21–27. - DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.03.
13. Модификация структуры покрытий TiAlN путем предварительной бомбардировки стальной подложки ионами Ti / А. Р. Шугуров, А. А. Акуликин, А. В. Панин [и др.] // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 3. С. 91–97.
14. Jeyaprakash N., Yang CH, Duraiselvam M., Sivasankaran S. Comparative study of laser melting and pre-placed Ni-20% Cr alloying over nodular iron surface. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2020 Feb; 20(1): Article number: 20. DOI: 10.1007/s43452-020-00030-4.
15. Agrawal AK., Chattopadhyaya S., Murthy VMSR, Legutko S., Krolczyk G. A Novel Method of Laser Coating Process on Worn-Out Cutter Rings of Tunnel Boring Machine for Eco-Friendly Reuse. *Symmetry-Basel*. 2020 Mar; 12(3): Article number: 471. DOI: 10.3390/sym12030471.

16. Евгеньев Г. Б. Российские технологии создания систем класса «Индустрия 4.0». Часть 1. / Г. Б. Евгеньев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 8 (701). – С. 50–63. – DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-50-63.
17. Евгеньев Г. Б. Российские технологии создания систем класса «Индустрия 4.0». Часть 2. / Г. Б. Евгеньев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 9 (702). – С. 18–27. – DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-18-27.
18. Евгеньев Г. Б. Обработывающие робототехнологические комплексы в машиностроении / Г. Б. Евгеньев, С. С. Крюков, А. В. Частухин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 5 (686). – С. 60–71. – DOI: 10.18698/0536-1044-2017-5-60-71.
19. Евгеньев Г. Б. Методы программирования комбинированной аддитивно-субтрактивной обработки / Г. Б. Евгеньев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 4 (685). – С. 47-56. – DOI: 10.18698/0536-1044-2017-4-47-56.
20. Возможности аддитивно-субтрактивноупрочняющей технологии / А. В. Киричек, Д. Л. Соловьев, А. А. Жирков [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (52). – С. 151-160.
21. Патент № 2 750 603 С1 Российская Федерация, СПК В33У 30/00 (2021.02); В23К 9/04 (2021.02); В23К 26/342 (2021.02); В23К 26/70 (2021.02); С21Д 9/50 (2021.02). Устройство для создания деталей аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологией : № 2020129073 : заявл. 02.09.2020 : опубл. 29.06.21 / Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Жирков А.А., Терехов М. В. ; заявитель Фонд перспективных исследований (RU) – 13 с.
22. Патент № 2 760 020 С1 Российская Федерация, СПК В33У 10/00 (2021.08); В23К 9/04 (2021.08); В23К 28/02 (2021.08); С21Д 7/06 (2021.08); В23К 26/70 (2021.08); В24В 39/00 (2021.08). Способ создания деталей аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологией : № 2020129876 : заявл. 10.09.2020; опубл. 22.11.21 / Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Жирков А. А., Хандожко А. В., Шмат А. С., Федонина С. О. ; заявитель Фонд перспективных исследований (RU) – 10 с.
23. Аддитивно-субтрактивные технологии - эффективный переход к инновационному производству / А. В. Киричек, О. Н. Федонин, Д. Л. Соловьев [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 8. С.4 -10. DOI:10.30987/article_5d6cbe42004700.14416796.
24. Merklein M. Junker D., Schaub, A., Neubauer F. Hybrid additive manufacturing technologies — an analysis regarding potentials and applications. Phys. Procedia. 2016; 83:549–559. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.057.
25. Краснова, Е. В. Гибридные технологии и оборудование / Е.В. Краснова, Б.П. Саушкин // РИТМ машиностроения. – 2021. – № 4. – С. 73 – 83. URL: <https://ritm-magazine.com/en/node/9914>. (дата обращения: 18.10.2022).
26. Popov V.V., Fleisher A. Hybrid additive manufacturing of steels and alloys. Manufacturing Review. 2020 Jan; 7:9. DOI: 10.1051/mfreview/2020005.
27. Yamazaki T. Development of a hybrid multitasking machine tool: Integration of additive technology with CNC machining. Proc. CIRP. 2016; 42:81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

REFERENCES

1. Ogorodnikova OM. Research function of SAE programs in the open-end SAE/CAD/SAE/CAM technologies. Vestnik Mashinostroeniya. 2012;1:25-31.
2. Dorosinsky LG, Zvereva OM. Information technologies for product life cycle support. Ulyanovsk: Zebra; 2016.
3. Kukhar VD, Malikov AA, Sabinina AL, Ivutin AN. Methods to arrange the life cycle of engineering products. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2012;12(2):302-314.
4. Fedotova AV, Tarasov VB, Vetrov AN. Granulation of information in modeling the life cycle of complex technical systems. Online journal Naukovedenie [Internet]. 2013;5(18):53 [cited 2022 Nov 18]. Available from: <https://naukovedenie.ru/PDF/53tvn513.pdf>.
5. Garina IO. Technical and economic aspects of the development and implementation of specialized ontology for product life cycle management in the engineering industry. Russian Journal of Innovation Economics. 2020;10(3):1147-1166. DOI: 10.18334/vinec.10.3.110602
6. Stupnitskiy V, Hrytsay I. Comprehensive analysis of the product's operational properties formation considering machining technology. Archive of Mechanical Engineering. 2020;67(2):149-67. DOI: 10.24425/ame.2020.131688.
7. Abramyan SG, Burlachenko OV, Oganessian OV, Burlachenko AO. The life cycle management system for the capital construction objects using digital technologies. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. Oganessian O. V. Oganessian, O. V. Burlachenko, S. G. Abrahamyan, 2020;4(81):429-437.
8. Oganessian O V. Information (digital) technologies in machine science. The Scientific Heritage. 2020;1(57): 20-24.
9. Chemodurov AN. Application of additive technologies in the production of engineering products. Izvestiya Tula State University. Technical sciences. 2016;8(2):210-217.
10. Simono L, Bois-Brochu A, Blais S. Tensile Properties of Built and Rebuilt/Repaired Specimens of

- 316L Stainless Steel Using Directed Energy Deposition. *Journal of Materials Engineering and Performance*. September 2020; Early access. DOI: 10.1007/s11665-020-05087-z.
11. Lui IL Chen IZ, Wang IL. A new method for the subsequent processing of a 316L steel sample obtained by SLM using a multi-layer TiN/TiAlN coating. *Rapid Prototyping Magazine*. August 2020; Early access. DOI: 10.1108/RPJ-07-2019-0199 .
 12. Soshina TO, Plyusnina VA, Soshina OI. Designing a multilayer TiAlN–TiN–TiAlN coating with high tribological properties *Bulletin of PNRPU. Mechanical Engineering. Materials Science*. 2022;24(1):21-27. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.03 .
 13. Shugurov AR, Akulinkin AA, Panin AV. Modification of TiAlN coating structure by preliminary Ti ion bombardment of a steel substrate. *Technical Physics*. 2016;86(3):91-97.
 14. Jeyaprakash N, Yang Ch, Duraiselvam M, Sivasankaran S. Comparative study of laser melting and pre-placed Ni-20% Cr alloying over nodular iron surface. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2020 Feb; 20(1). DOI: 10.1007/s43452-020-00030-4 .
 15. Agrawal AK, Chattopadhyaya S, Murti VMSR, Legutko S, Krolchik G. A new method of applying laser coating to worn-out cutting rings of a tunnel boring machine for environmentally friendly reuse. *Symmetry-Basel*. 2020 March; 12(3). DOI: 10.3390/sym12030471.
 16. Yevgenev GB. Russian technologies for creation of Industry 4.0 systems. Part 1. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2018;8(701):50-63. - DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-50-63.
 17. Yevgenev GB. Russian technologies for creation of Industry 4.0 systems. Part 2. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2018;9(702):18-27. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-18-27.
 18. Yevgenev GB, Kryukov SS, Chastukhin AV. Machining robotic technology systems in mechanical engineering. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2017;5(686):60-71. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-5-60-71.
 19. Yevgenev GB. Programming methods of combined additive-subtractive processing. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2017;4(685):47-56. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-4-47-56.
 20. Kirichek AV, Solovyov DL, Zhirkov AA. Potentials in additive-subtractive strengthening techniques. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2016;4(52):151-160.
 21. Kirichek AV, Solovyov DL, Zhirkov AA, Terekhov MV. Patent No. 2,750,603 C1 Russian Federation, СПК В33Y 10/00 (2021.08); В23K 9/04 (2021.08); В23K 28/02 (2021.08); С21D 7/06 (2021.08); В23K 26/70 (2021.08); В24B 39/00 (2021.08). Device for creating parts with additive-subtractive-strengthening technology: No. 2020129073. 2021 Jun 29.
 22. Kirichek AV, Solovyov DL, Zhirkov AA, Khandozhko AV, Shmat AS, Fedonina SO. Patent No. 2,760,020 C1 Russian Federation, СПК В33Y 10/00 (2021.08); В23K 9/04 (2021.08); В23K 28/02 (2021.08); С21D 7/06 (2021.08); В23K 26/70 (2021.08); В24B 39/00 (2021.08). Method of creating parts with additive-subtractive-strengthening technology: No. 2020129876. 2021 Nov 22.
 23. Kirichek AV, Fedonin ON, Solovyov DL. Additive-subtractive technologies - effective transition to innovative production. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2019;8:4-10. DOI:10.30987/article_5d6cbe42004700.14416796.
 24. Merklein M, Junker D, Schaub A, Neubauer F. Hybrid additive manufacturing technologies — analysis of potential opportunities and applications. *Phys. Procedure*. 2016;83:549-559. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.057.
 25. Krasnova EV, Saushkin BP. Hybrid technologies and equipment. *RHYTHM of Machinery [Internet]*. 2021;4:73 – 83 [cited 2022 Oct 18]. Available from: <https://ritm-magazine.com/en/node/9914> .
 26. Popov VV, Fleisher A. Hybrid additive manufacturing of steels and alloys. *Manufacturing Review*. 2020 Jan 7:9. DOI: 10.1051/mfreview/2020005.
 27. Yamazaki T. Development of a hybrid multitasking machine: integration of additive technology with CNC machining. *Proc. CIRP*. 2016;42:81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

Информация об авторах:

Оганесян Оганес Валерьевич - аспирант, тел. +7(988) 000-88-77, Scopus-Author ID scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196038412, Author-ID-РИНЦ elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=853422.
Бурлаченко Олег Васильевич – профессор, доктор технических наук, тел. +7(937) 101-90-84, заместитель директора по научной работе Института архитектуры и строительства, заведующий кафедрой «Технологий

строительного производства», гл. редактор журнала «Вестник ВолгГАСУ. Серия: Архитектура и строительство», Scopus-Author ID scopus.com/authid/detail.uri?authorId=41761032900, Research-ID-Web of Science researcherid.com/rid/ABF-4172-2020, Author-ID-РИНЦ elibrary.ru/author_profile.asp?id=282520.

Oganesyanyan Oganess Valeryevich – Postgraduate Student; phone: +7(988) 000-88-77, Scopus-Author ID scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196038412, Author-ID-RSCI elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=853422.

scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196038412, Author-ID-RSCI elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=853422.

Burlachenko Oleg Vasilyevich - Professor, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director of Science at the Institute of Architecture and Construction, Head of the Department of Construction Production Technologies, Editor-in-chief of *VolgGASU Vestnik*, Series: Construction and Architecture; phone: +7(937) 101-90-84,

Scopus-Author ID scopus.com/authid/detail.url?authorId=41761032900, Research- ID-Web of Science researcherid.com/rid/ABF-4172-2020, Author-ID- RSCI elibrary.ru/author_profile.asp?id=282520.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 31.10.2022; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 27.02.2023. Рецензент – Хандожко А.В., доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, главный редактор журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 31.10.2022; approved after review on 13.02.2022; accepted for publication on 27.02.2023. The reviewer is Khandozhko A.V., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.