

УДК 621.7.01

Повышение эффективности изготовления деталей в мелкосерийном производстве за счет использования аддитивных технологий

Е.Б. Щелкунов¹, М.Е. Щелкунова¹, А.А. Акулина², Е.А. Рубан²¹ ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»² Филиал ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» — Комсомольский-на-Амуре авиационный завод им. Ю.А. Гагарина

Improving the efficiency of manufacturing parts in small-scale production through the use of additive technologies

E.B. Shchelkunov¹, M.E. Shchelkunova¹, A.A. Akulina², E.A. Ruban²¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University² Branch of PJSC United Aircraft Corporation — Komsomolsk-na-Amure Aviation Plant named after Yu.A. Gagarin

Технологический процесс изготовления деталей сложной геометрической формы характеризуется высокой трудоемкостью механической обработки и низким коэффициентом использования материала, а следовательно, и высокой себестоимостью получаемого изделия. Это во многом связано с тем, что в качестве заготовок деталей используют сортовой материал. В качестве способа решения указанной проблемы предложено получать заготовки методом 3D-печати. Отмечены достоинства применения 3D-печати в качестве метода изготовления заготовок деталей сложной формы в мелкосерийном производстве.

EDN: HBJCIY, <https://elibrary/hbjciy>

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, заготовка детали «Качалка», технологический процесс

The technological process of manufacturing parts of complex geometric shapes is characterized by high labor intensity of mechanical processing and low coefficient of material utilization, and, consequently, high cost of the resulting product. This is largely due to the fact that graded material is used as blanks for parts. As a solution to the voiced problem, it is proposed to obtain blanks by 3D printing. The advantages of using 3D printing as a method for manufacturing blanks for parts of complex shapes in small-scale production are shown.

EDN: HBJCIY, <https://elibrary/hbjciy>

Keywords: additive technologies, selective laser melting, blank of the Rocking Chair part, technological process

Авиастроение — высокотехнологичная и активно развивающаяся отрасль машиностроения. В настоящее время в нашей стране существенно выросли объемы производства как военных самолетов, так и гражданских. Для авиастроения характерны большая номенклатура и сложность пространственных форм деталей, составляющих узлы и агрегаты самолета. Отдельные детали самолетов изготавливают в количестве, не превышающем объемы мелкосерийного производства.

Для получения деталей сложной пространственной формы в мелкосерийном производстве методы литья и штамповки часто не применимы из-за высокой себестоимости. Поэтому обычно в качестве заготовки выступает нарезанный сортовой материал (круг, шестигранник, полоса и др.). Такие заготовки имеют значительные припуски на механическую обработку, вследствие чего технологический процесс характеризуется высокой трудоемкостью механической обработки и низким коэффициентом использования материала. Для уменьшения припусков на механическую обработку необходимо менять вид заготовки.

Одним из путей решения этой проблемы является интеграция методов аддитивного производства, основанных на послойном добавлении материала, в существующие технологические процессы производства [1]. К основным достоинствам аддитивных технологий относятся возможность создания различных изделий сложной пространственной формы, экономия сырья, отсутствие необходимости в применении инструментальной и технологической оснастки при построении изделий, высокая скорость наладки печатающего устройства на производство продукции, возможность создания нескольких изделий разной формы одновременно [2–6].

Цель работы — повышение эффективности изготовления сложнопрофильных деталей в условиях мелкосерийного производства за счет использования 3D-печати в качестве метода получения заготовок на примере типовой для авиастроения детали «Качалка».

Технология изготовления детали. Качалка представляет собой сложнопрофильную деталь размером 46×31×30 мм с проушинами и отверстиями в них (рис. 1). Отверстия должны быть изготовлены с точностью по седьмому качеству и шероховатостью $Ra = 1,6$ мкм, поверхности проушин — с шероховатостью $Ra = 6,3$ мкм.

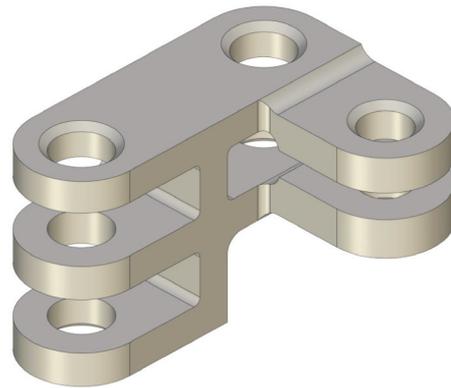


Рис. 1. 3D-модель детали «Качалка»

Материал детали — алюминиевый сплав АК4-1чТ1. Реальный объем производства деталей составляет 300 шт/год, что с учетом массы детали, равной 0,15 кг, соответствует мелкосерийному производству.

Базовый технологический процесс изготовления детали включает в себя заготовительную операцию, термическую обработку (отжиг), несколько операций механической и слесарной обработки. Недостатками базового технологического процесса являются низкий коэффициент использования материала (0,26) и высокая трудоемкость станочных операций.

Одним из наиболее востребованных методов аддитивного производства металлических изделий сложной формы, нашедших применение в авиационной промышленности, является послойное селективное лазерное сплавление (Selective Laser Melting — SLM).

В качестве сырья выступают дисперсные металлические порошки. Процесс построения изделия происходит путем последовательного расплавления слоев порошка лучом лазера при его сканирующих движениях по заданной программе. При правильно подобранных технологических параметрах (характеристиках дисперсного порошка и лазерного излучения, стратегии сканирования) созданные с помощью SLM изделия не уступают, а зачастую и превосходят по механическим свойствам получаемые другими методами (например, литьем) [3, 7–9].

Процесс изготовления изделий методом SLM включает в себя разработку управляющей программы для 3D-принтера, построение изделия, его очистку от несплавленных остатков металлического порошка, термическую обработку изделия для снятия внутренних напряжений, отделение от плиты построения и окончательную обработку.

При наличии в конструкции изделия нависающих или выступающих частей существует риск их неправильного формирования вследствие стекания расплавленного металла и деформации при застывании. Во избежание этого в 3D-модели предусмотрены поддерживающие элементы, выполняющие функцию опор для нависающих частей создаваемого изделия. Поддерживающие элементы печатаются совместно с изделием из того же материала, что и оно. Форма поддерживающих элементов может быть различной.

После отделения будущего изделия от плиты построения поддерживающие элементы срезают, а места их соединения с изделием обрабатывают слесарным способом или на металло-режущем оборудовании [10].

Так как объект, построенный методом SLM, как правило, требует доработки, его следует считать заготовкой, максимально приближенной по форме и размерам к готовому изделию [11]. SLM выбрано в качестве метода производства заготовки детали «Качалка».

Заготовка детали «Качалка» (рис. 2) спроектирована с учетом припусков на механическую обработку поверхностей, контактирующих с поверхностями ответных деталей и предназначенных для исполнения детали служебного назначения. Обрабатываемыми поверхностями являются пазы, формирующие проушины, и отверстия в них.

Для 3D-печати выбран порошковый алюминиевый сплав AlSi10Mg, который наиболее близок по составу и свойствам к сплаву АК4-1чТ1.

Технологический процесс изготовления детали «Качалка» с применением 3D-технологии включает в себя следующие операции: постро-

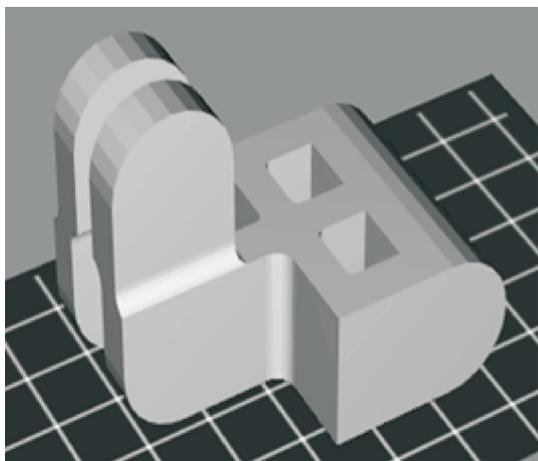


Рис. 2. 3D-модель заготовки детали «Качалка»

ение заготовки на 3D-принтере, термическую обработку заготовки, механическую обработку пазов и отверстий, отделение заготовки от плиты построения и обработку нижней поверхности от остатков поддерживающих элементов.

Заготовку изготавливают на 3D-принтере 3DLAM Max1 2.0. Механическую обработку выполняют на 5-координатном бесконсольном вертикально-фрезерном станке с ЧПУ. Для обработки пазов и отверстий выбраны те же оборудование, инструмент и режимы обработки, что и в базовом технологическом процессе.

Точность обработки во многом зависит от точности и надежности закрепления заготовки в приспособлении. Обычно в единичном и мелкосерийном производстве для обработки заготовки применяют универсальную оснастку (тиски, прихваты и т. п.). Однако ее использование для базирования сложнопрофильных заготовок (к которым относится и рассматриваемая деталь) не всегда возможно без нарушения принципов базирования или деформации заготовки. В таких случаях можно задействовать искусственные технологические базы — поверхности заготовки, применяемые для ее базирования на станке, но не входящие в состав конструкции готового изделия.

Искусственные базы можно изготовить на 3D-принтере заедно с заготовкой, после чего их срезают, а материал идет в отходы. В качестве искусственной базы можно было бы использовать плиту построения 3D-принтера. Однако рабочая поверхность плиты построения выбранного принтера имеет диаметр 315 мм, что в несколько раз превышает размеры изделия. К тому же, в процессе обработки заготовки на станке поверхность плиты построения может быть повреждена. Это делает использование плиты построения в качестве элемента искусственной базы неудобным.

Более рациональным решением будет изготовление заготовки непосредственно на плите построения 3D-принтера, а на расставленных на ней индивидуальных подложках. Форма и размеры подложки могут зависеть от конструктивных параметров области построения 3D-принтера, будущего изделия, станочного оборудования и технологической оснастки. Вариант конструктивного исполнения подложки для детали «Качалка» приведен на рис. 3.

Подложка 3 выполнена в виде плиты правильной призматической формы с размерами в

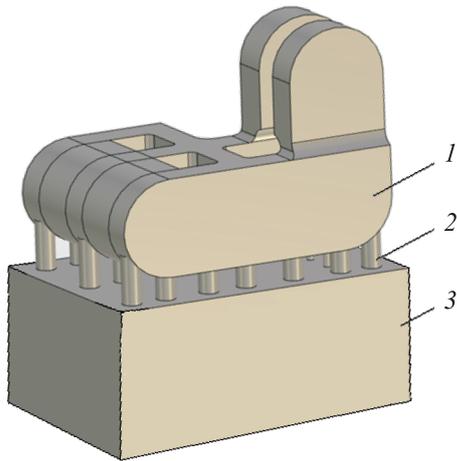


Рис. 3. Вариант конструктивного исполнения подложки для детали «Качалка»

плане (длина и ширина), соответствующими размерам основания изделия. Поддерживающие элементы 2 представляют собой цилиндрические столбики, которые прочно связывают заготовку 1 с подложкой так, что эти детали составляют одно целое. Поэтому поверхности подложки могут выполнять функцию искусственных баз для заготовки при ее обработке на станке с ЧПУ. После отделения от заготовки подложку можно использовать снова.

Поддерживающие элементы должны обладать достаточной жесткостью для надежной фиксации заготовки от смещения под действием нагрузок в процессе резания. При этом они

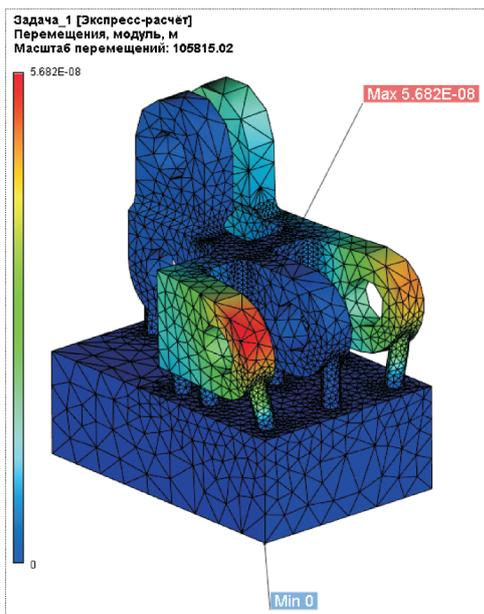


Рис. 4. Результат анализа состояния модели заготовки под действием силы резания в процессе обработки

не должны препятствовать подходу режущего инструмента к обрабатываемым поверхностям заготовки.

Для проверки предлагаемой идеи выполнен анализ деформации поддерживающих элементов в процессе механической обработки путем симуляции нагрузки в среде T-FLEX CAD Анализ. Конечно-элементная модель заготовки строилась совместно с подложкой. К обрабатываемым поверхностям заготовки прикладывались усилия, соответствующие силам резания, создаваемым при обработке этих поверхностей. Закрепление заготовки в тисках за поверхности подложки.

По результатам проведенных симуляций установлено, что приложенные нагрузки не вызывают заметной деформации элементов поддерживающей структуры, а следовательно, предлагаемое технологическое решение можно использовать при изготовлении подобных деталей (рис. 4).

Экономическая оценка предлагаемой технологии. Для определения экономической целесообразности применения 3D-печати в качестве заготовительной операции при изготовлении детали «Качалка» вычисляли следующие параметры: коэффициент использования материала; стоимость материала, необходимого для изготовления одной детали; потребность в режущем инструменте; время, затрачиваемое на механическую обработку одной детали; общее время изготовления одной детали. Вычисленные параметры сравнивали с таковыми для базового технологического процесса.

В принтере 3DLAM MAXI 2.0 одновременно могут работать до четырех лазеров, что существенно ускоряет процесс печати. Если печатается одна деталь, то площадь каждого создаваемого слоя детали распределяется между четырьмя лазерами.

При выборе технологических параметров печати, влияющих на качество и производительность, использовали рекомендации, приведенные в работах [7, 12–14].

Время печати заготовки определяли как произведение вычисленного в программе слайсер количества слоев печати и среднего времени печати одного слоя с учетом дополнительного времени работы 3D-принтера во время процесса сплавления, затрачиваемого на нанесение очередного слоя порошка, опускание рабочей платформы после построения каждого

Параметры базового и предлагаемого технологического процессов изготовления детали «Качалка»

Параметр	Технологический процесс	
	базовый	предлагаемый
Масса заготовки, кг	0,15	0,05
Коэффициент использования материала	0,26	0,71
Цена одной тонны материала, руб.	800 000	1 800 000
Масса отходов, кг	0,111	0,016
Стоимость отходов от одной заготовки, руб.	3,33	0,48
Стоимость материала, требуемого для изготовления одной заготовки, руб.	116,67	89,52
Общее количество наименований режущего инструмента, задействованного в технологическом процессе	12	6
Время, затрачиваемое на механическую обработку одной детали, ч	0,56	0,23
Трудоемкость изготовления одной детали, ч	1,47	0,70

слоя [15]. С учетом сложности формы детали общее время печати составило 0,12 ч.

Коэффициент использования материала определяли как

$$K_m = \frac{m_d}{m_z + m_n},$$

где m_d и m_z — масса детали и заготовки, кг; m_n — потери материала, кг.

В зависимости от размеров и геометрической формы построенного изделия потери материала (часть порошкового материала заготовки, не попадающая в переработку), связанные с угаром при сплавлении и термообработке и с неполной очисткой заготовки в камере построения 3D-принтера, могут достигать 20 % массы изделия [14, 15]. Чем больше в конструкции построенного изделия труднодоступных полостей, тем сложнее собрать остатки порош-

ка с поверхностей изделия при его очистке перед выемкой из камеры построения. Указанные остатки удаляют при дальнейшей очистке изделия вручную или в специальных установках. Для рассматриваемой заготовки потери могут составлять до 10 % массы заготовки.

Стоимость материала, требуемого для изготовления одной заготовки, ориентировочно определяли по формуле

$$C_z = (m_z + m_n)C_m - (m_z - m_d)C_o,$$

где C_m — оптовая стоимость одного килограмма материала заготовки; C_o — стоимость одного килограмма отходов.

Параметры базового и предлагаемого технологических процессов изготовления детали «Качалка» приведены в таблице.

Из таблицы следует, что при предлагаемом технологическом процессе коэффициент использования материала в 2,7 раза больше, чем при базовом, благодаря чему при более высокой стоимости порошкового алюминиевого сплава расходы на материал сокращены в 1,3 раза. Существенно уменьшена потребность в режущем инструменте и станочном оборудовании, а также вдвое уменьшена трудоемкость изготовления детали.

Трудоемкость изготовления детали можно снизить, если печатать одновременно несколько деталей. Вариант размещения шести заготовок на плите построения 3D-принтера 3DLAM Maxi 2.0 показан на рис. 5. Каждая заготовка выращивается на индивидуальной подложке, благодаря чему время изготовления детали уменьшится на 10 %.

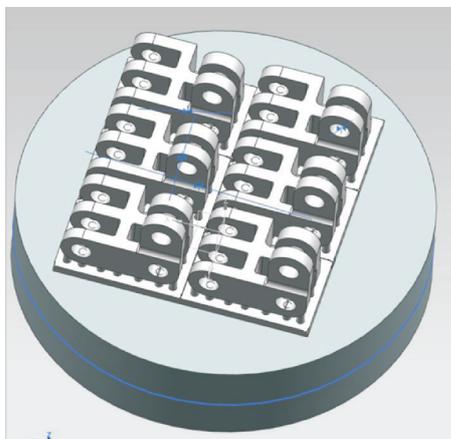


Рис. 5. Вариант размещения шести заготовок на плите построения 3D-принтера 3DLAM Maxi 2.0

При одновременном построении шести заготовок сокращается количество перемещений рабочей платформы 3D-принтера. Время построения одной заготовки снизится на 35 %, а общее время изготовления детали — на 25 %.

Выводы

1. Предложен способ повышения эффективности изготовления сложнопрофильных деталей в условиях мелкосерийного производства за счет использования 3D-печати в качестве метода изготовления заготовок.

2. В качестве примера реализации предложенного способа рассмотрена технология изго-

товления детали «Качалка». Заготовка детали, изготавливаемая методом SLM на специальной подложке, затем выступает в качестве искусственной базы при механической обработке детали на станке.

3. Выполнено сравнение экономических составляющих предложенного и базового технологических процессов изготовления детали «Качалка».

4. Предполагаемая экономическая эффективность от реализации предложенного решения достигается путем снижения трудоемкости изготовления детали, затрат на сырье, потребности в режущем инструменте и станочном оборудовании.

Литература

- [1] Акулина А.А., Немолякина Е.А., Щелкунов Е.Б. Повышение эффективности изготовления детали «качалка» за счет применения 3D-печати. *Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. Мат. III Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых.* Комсомольск-на-Амуре, КнАГУ, 2025, с. 3–5.
- [2] Лепехина С.Ю., Сухоруков С.И., Давыдов Ю.А. Комплекс алгоритмов работы системы управления роботизированного комплекса трехмерной печати. *Ученые записки КнАГТУ*, 2023, № 1, с. 68–75, doi: <https://doi.org/10.17084/20764359-2023-65-68>
- [3] Высоцкий А.А. SLM-печать в двигателестроении. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2016, № 12, с. 188–189.
- [4] Сухоруков С.И., Годяев А.И., Овсянников А.Р. Разработка структуры системы управления роботизированного комплекса трехмерной печати металлических изделий. *Ученые записки КнАГТУ*, 2024, № 3, с. 103–111.
- [5] Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2016, № 8–2, с. 210–217.
- [6] Чечуга А.О. Применение аддитивных технологий в инструментальном производстве. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2022, № 10, с. 452–454.
- [7] Безъязычный В.Ф., Федосеев Д.В., Коретко С.Е. Качество поверхности изделий, полученных методом селективного лазерного плавления. *Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста. Мат. Всерос. науч.-тех. конф.* Уфа, УГАТУ, 2019, с. 419–423.
- [8] Мельникова М.А., Колчанов Д.С., Мельников Д.М. Селективное лазерное плавление: применение и особенности формирования трехмерных конструктивных технологических элементов. *Фотоника*, 2017, № 2, с. 42–49, doi: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.62.2.42.49>
- [9] Ерошенко В.О., Асоян А.Р. Обоснование выбора технологии 3D-формообразования высокопрочных лопаток турбин. *Проблемы машиностроения и автоматизации.* 2021, № 1, с. 35–39, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2021_1_35
- [10] Ермаков Д.В., Карпов И.А., Таранина Ю.А. и др. Исследование корпуса двигателя-маховика, изготовленного по аддитивной технологии. *Решетневские чтения*, 2017, т. 1, с. 500–501. EDN: YLYYMG
- [11] Рубан Е.А., Акулина А.А., Щелкунов Е.Б. Повышение эффективности изготовления деталей, объединяющего традиционные и аддитивные технологии. *Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению. Мат. III Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых.* Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2025, с. 82–85.
- [12] Jiang Z., Sun J., Berto F. и др. Усталость и разрушение сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного плавления. *Физическая мезомеханика*, 2023, № 2, с. 5–29, doi: https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_2_5

- [13] Дынин Н.В., Заводов А.В., Оглодков М.С. и др. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg. *Труды ВИАМ*, 2017, № 10, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1>
- [14] Попкова И.С., Золоторевский В.С., Солонин А.Н. Производство изделий из алюминия и его сплавов методом селективного лазерного плавления. *Технология легких сплавов*, 2015, № 4, с. 14–24.
- [15] Никируй А.Э., Лымарь С.В., Дроговоз П.А. Время и стоимость изготовления деталей методом селективного лазерного спекания при организации прецизионного производства. *Современные наукоемкие технологии*, 2022, № 2, с. 72–77, doi: <https://doi.org/10.17513/snt.39040>

References

- [1] Akulina A.A., Nemolyakina E.A., Shchelkunov E.B. [Increasing the efficiency of “rocker” part manufacturing through the use of 3D printing]. *Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idey k vnedreniyu. Mat. III Vseros. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh* [Science, Innovations and Technology: from Idea to Realization. Proc. III Russ. Sci.-Pract. Conf. of Young Scientists]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGU Publ., 2025, pp. 3–5. (In Russ.).
- [2] Lepekhina S.Yu., Sukhorukov S.I., Davydov Yu.A. Algorithm set for the operation of the control system of a robotic three-dimensional printing complex. *Uchenye zapiski KnAGTU* [Scientific Notes of Komsomolsk-On-Amour State Technical University], 2023, no. 1, pp. 68–75, doi: <https://doi.org/10.17084/20764359-2023-65-68> (in Russ.).
- [3] Vysotskiy A.A. SLM printing in engine building. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2016, no. 12, pp. 188–189. (In Russ.).
- [4] Sukhorukov S.I., Godyaev A.I., Ovsyannikov A.R. Development of a control system structure for a robotic complex for 3D printing metal products. *Uchenye zapiski KnAGTU* [Scientific Notes of Komsomolsk-On-Amour State Technical University], 2024, no. 3, pp. 103–111. (In Russ.).
- [5] Chemodurov A.N. The use of additive technologies in the production of engineering products. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2016, no. 8–2, pp. 210–217. (In Russ.).
- [6] Chechuga A.O. Application of additive technologies in tool manufacturing. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula state university. Technical sciences], 2022, no. 10, pp. 452–454. (In Russ.).
- [7] Bezyazychnyy V.F., Fedoseev D.V., Koretko S.E. [Surface quality of products obtained by selective laser melting]. *Stankostroenie i innovatsionnoe mashinostroenie. Problemy i tochki rosta. Mat. Vseros. nauch.-tekh. konf.* [Machine Tool Building and Innovative Machine Building. Problems and Growth Points. Proc. Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Ufa, UGATU, 2019, pp. 419–423. (In Russ.).
- [8] Melnikova M.A., Kolchanov D.S., Melnikov D.M. Selective laser melting: application and formation features of three-dimensional structural engineering elements. *Fotonika* [Photonics Russia], 2017, no. 2, pp. 42–49, doi: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.62.2.42.49> (in Russ.).
- [9] Eroshenko V.O., Asoyan A.R. Substantiation of the choice of 3D-forming technology of high-strength turbine blades. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering & Automation Problems], 2021, no. 1, pp. 35–39, doi: https://doi.org/10.52261/02346206_2021_1_35 (in Russ.).
- [10] Ermakov D.V., Karpov I.A., Taranina Yu.A. et al. The study of the engine-flywheel housing made by additive technology. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], 2017, vol. 1, pp. 500–501. EDN: YLYYMG (in Russ.).
- [11] Ruban E.A., Akulina A.A., Shchelkunov E.B. [Improving the efficiency of parts manufacturing combining traditional and additive technologies]. *Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idey k vnedreniyu. Mat. III Vseros. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh* [Science, Innovations and Technology: from Idea to Realization. Proc. III Russ. Sci.-Pract. Conf. of Young Scientists]. Komsomolsk-na-Amure, KnAGTU Publ., 2025, pp. 82–85. (In Russ.).

- [12] Jiang Z., Sun J., Berto F. et al. Fatigue and fracture behavior of AlSi10Mg manufactured by selective laser melting: a review. *Fizicheskaya mezhmekhanika* [Physical Mesomechanics], 2023, no. 2, pp. 5–29, doi: https://doi.org/10.55652/1683-805X_2023_26_2_5 (in Russ.).
- [13] Dynin N.V., Zavodov A.V., Oglodkov M.S. et al. The influence of process parameters of selective laser melting on the structure of aluminum alloy Al-Si-Mg system. *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 10, doi: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1> (in Russ.).
- [14] Popkova I.S., Zolotarevskiy V.S., Solonin A.N. Fabrication of products in aluminium and its alloys by the selective laser melting technique. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2015, no. 4, pp. 14–24. (In Russ.).
- [15] Nikiruy A.E., Lyamar S.V., Drogovoz P.A. Time and cost of manufacturing parts by selective lasering method in the organization of precision production. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2022, no. 2, pp. 72–77, doi: <https://doi.org/10.17513/snt.39040> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 14.05.2025

Информация об авторах

ЩЕЛКУНОВ Евгений Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение». ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: galinamarina5@mail.ru).

ЩЕЛКУНОВА Марина Евгеньевна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем». ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (681013, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, пр-т Ленина, д. 27, e-mail: Shchelkunova.me@email.knastu.ru).

АКУЛИНА Александра Анатольевна — технолог. Филиал ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация». Комсомольский-на-Амуре авиационный завод им. Ю.А. Гагарина (681018, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Советская, д. 1, e-mail: Aleksandra.akulina@mail.ru).

РУБАН Екатерина Андреевна — технолог. Филиал ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация». Комсомольский-на-Амуре авиационный завод им. Ю.А. Гагарина (681018, Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация, ул. Советская, д. 1, e-mail: nemolyakina81@mail.ru).

Information about the authors

SHCHELKUNOV Evgeniy Borisovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation, Lenina Ave., Bldg. 27, e-mail: galinamarina5@mail.ru).

SHCHELKUNOVA Marina Evgenievna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor of the Department of Design, Management and Development of Information Systems. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Komsomolsk-na-Amure State University (681013, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation, Lenina Ave., Bldg. 27, e-mail: Shchelkunova.me@email.knastu.ru).

AKULINA Alexandra Anatolyevna — Technologist. Branch of PJSC United Aircraft Corporation — Komsomolsk-na-Amure Aviation Plant named after Yu.A. Gagarin (681018, Komsomolsk-na-Amure, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 1, e-mail: Aleksandra.akulina@mail.ru).

RUBAN Ekaterina Andreevna — Technologist. Branch of PJSC United Aircraft Corporation — Komsomolsk-na-Amure Aviation Plant named after Yu.A. Gagarin (681018, Komsomolsk-na-Amur, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 1, e-mail: nemolyakina81@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Щелкунов Е.Б., Щелкунова М.Е., Акулина А.А., Рубан Е.А. Повышение эффективности изготовления деталей в мелкосерийном производстве за счет использования аддитивных технологий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 2, с. 53–60.

Please cite this article in English as:

Shchelkunov E.B., Shchelkunova M.E., Akulina A.A., Ruban E.A. Improving the efficiency of manufacturing parts in small-scale production through the use of additive technologies. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 2, pp. 53–60.