



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5, 005.6, 621.762.06, 621.763
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-115-126

К ВОПРОСУ О КАЧЕСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Михеева Н.В.¹, Тимофеев А.Н.², Логачёва А.И.², Басков Ф.А.², Воейко О.А.¹

¹ «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» – филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», Королёв, Россия

²АО «Композит», Королёв, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Внедрение аддитивных технологий в производство требует обеспечения высокой производительности при стабильно высоком качестве продукции. Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) представляет собой перспективную технологию для изготовления крупногабаритных деталей сложной геометрии из порошковых материалов в ракетно-космической отрасли, что позволяет отказаться от традиционных подходов. Данная технология относится к классу аддитивных методов 3D-печати металлических изделий с прямым подводом энергии и материала. Однако процесс ПЛВ характеризуется высокой чувствительностью к технологическим параметрам, что может приводить к разбросу физико-механических свойств и образованию дефектов, таких как поры. Существующие методы постпроцессного контроля готовых изделий не позволяют прогнозировать и предотвращать возникновение дефектов, а также зачастую экономически неэффективны. **Цель работы.** Проведение анализа причинно-следственных связей, обуславливающих возникновение пор, для обеспечения гарантированного качества крупногабаритных изделий, изготавливаемых методом ПЛВ. **Используемые методы.** Комплексное управление качеством деталей, основанное на системном и процессном подходах с применением инструментов качества – диаграммы Исикава, диаграммы Ганта, экспертного метода МСА, а также метрологического обеспечения производства. **Новизна.** Применение комплексного подхода управления качеством на всех этапах жизненного цикла производства крупногабаритных изделий (диаметром более 2000 мм и высотой более 1500 мм), направленного на обеспечение требуемого качества и установление оптимальных технологических параметров для метода ПЛВ. **Результат.** В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния технологических параметров на свойства изделий из алюминиевого порошка марки РС-320. На основе проведенных исследований по рекомендованным технологическим режимам методом прямого лазерного выращивания была изготовлена обечайка корпуса летательного аппарата в виде тонкостенного полого цилиндра «с ребрами жесткости вафельного типа». **Практическая значимость.** ПЛВ расширяет технологические и конструкторские возможности за счет значительного повышения производительности (приблизительно в 10 раз), возможности изготовления сложнопрофильных крупногабаритных конструкций, автоматизации процесса, улучшения эксплуатационных свойств готовой продукции и снижения массы при сохранении прочностных характеристик. Внедрение сквозного контроля на всех этапах производства позволяет гарантировать стабильное качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание (ПЛВ), управление качеством крупногабаритных металлических изделий, диаграмма Исикавы, диаграмма Ганта, метод МСА

© Михеева Н.В., Тимофеев А.Н., Логачёва А.И., Басков Ф.А., Воейко О.А., 2026

Для цитирования

К вопросу о качестве крупногабаритных сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов, полученных методом прямого лазерного выращивания / Михеева Н.В., Тимофеев А.Н., Логачёва А.И., Басков Ф.А., Воейко О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 115-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-115-126>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ON THE QUALITY OF LARGE-SCALE COMPLEX-SHAPED ALUMINUM ALLOY COMPONENTS MANUFACTURED BY DIRECT LASER DEPOSITION

Mikheeva N.V.¹, Timofeev A.N.², Logacheva A.I.², Baskov F.A.², Voeyko O.A.¹

¹ Leonov Moscow Region University of Technology, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev, Russia

² JSC Compozit, Korolev, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The implementation of additive manufacturing technologies in industrial production requires ensuring high productivity while maintaining consistently high product quality. Direct Laser Deposition (DLD) is a promising technology for manufacturing large-scale components with complex geometries from powder materials in the aerospace industry, enabling the replacement of conventional manufacturing approaches. This technology belongs to the class of metal additive manufacturing methods based on directed energy and material deposition. However, the DLD process is highly sensitive to technological parameters, which may lead to variations in physical and mechanical properties and the formation of defects such as porosity. Existing post-process inspection methods for finished products do not allow prediction and prevention of defect formation and are often economically inefficient. **Objectives.** The research is aimed at analyzing the cause-and-effect relationships leading to pore formation in order to ensure the guaranteed quality of large-scale products manufactured by Direct Laser Deposition. **Methods Applied.** It is the integrated quality management of components based on system and process approaches using quality management tools, including the Ishikawa diagram, Gantt chart, Measurement System Analysis (MSA), and metrological support of production processes. **Originality.** It lies in the application of an integrated quality management approach throughout all stages of the life cycle of large-scale products (with diameters exceeding 2000 mm and heights exceeding 1500 mm), aimed at ensuring the required quality and determining optimal technological parameters for the DLD process. **Result.** The paper presents the results of an experimental study on the influence of process parameters on the properties of products manufactured from RS-320 aluminum powder. Based on the conducted research and recommended processing conditions, an aircraft structural shell in the form of a thin-walled hollow cylinder with waffle-type stiffening ribs was fabricated using the Direct Laser Deposition process. **Practical Relevance.** DLD expands technological and design capabilities through a significant increase in productivity (approximately tenfold), the ability to manufacture large-scale components with complex geometries, process automation, improved service properties of finished products, and weight reduction while maintaining strength characteristics. The implementation of comprehensive quality control at all stages of production ensures stable and guaranteed product quality.

Keywords: Direct Laser Deposition (DLD), quality management of large-scale metal products, Ishikawa diagram, Gantt chart, Measurement System Analysis (MSA)

For citation

Mikheeva N.V., Timofeev A.N., Logacheva A.I., Baskov F.A., Voeyko O.A. On the Quality of Large-Scale Complex-Shaped Aluminum Alloy Components Manufactured by Direct Laser Deposition. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 115-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-115-126>

Введение

Одной из главных задач современного производства летательных аппаратов (ЛА) является создание новых технологических процессов изготовления крупногабаритных сложнопрофильных деталей (далее – деталей), обеспечивающих повышение надежности и экономичности изделий при снижении их массы [1]. Снижение массы летательных аппаратов достигается за счет использования сложных геометрий деталей, производство которых часто невозможно с применением традиционных методов обработки [2]. В этой связи для ракетно-космической отрасли становится критически важным переход на инновационные технологии [3], обусловленный сменой тех-

нологического уклада и глобальной трансформацией производства в сторону комплексной автоматизации и цифровизации [4].

Особенно актуальна проблема получения всевозможных корпусных деталей ЛА, изготавливаемых из листовых материалов (баки, обечайки, конуса, детали сферической, параболической и оживальной формы и др.), диаметром и высотой свыше 1000 мм. По условиям эксплуатации они, как правило, подвергаются всевозможным нагрузкам, особенно при полете ЛА в сложных условиях окружающей среды, в том числе в условиях открытого космоса [1].

Особый интерес с точки зрения совершенствования технологий представляют обечайки корпусов ЛА в виде тонкостенных полых цилиндров с вафельным

фоном на внутренней либо наружной поверхности. Наличие вафельного фона вызвано необходимостью снижения массы изделия, что является основным требованием в конструкции летательного аппарата с обеспечением достаточной жесткости конструкции корпуса ЛА [5]. На **рис. 1** показаны основные способы формирования вафельных конструкций.

Известно, что электрофизические методы трудоемки и энергоемки. Электрохимическое фрезерование используется для формирования неглубокого фона, доработок обечаек по массе либо по толщине оставшегося полотна. При сворачивании возникают дефекты из-за большой разности напряжений сжатия и растяжения по ребрам и стенке корпуса, поэтому такое решение вызывает некоторые проблемы при эксплуатации изделия [5].

Основным методом формирования вафельного фона является механическое фрезерование в листе, полуоболочках и в обечайке после свертки на станках с ЧПУ [6]. Процесс изготовления из полуоболочек требует наличия дополнительного продольного шва, что снижает один из показателей, гарантирующих качество изделия – надежность, включающая свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности [5, 7]. В процессе фрезерования часть нагартованного слоя, образованного при прокатке, удаляется

в стружку, что приводит к снижению прочности и жесткости конструкции. В стружку уходит до 86 % всей массы заготовки. Применяемый в настоящее время метод получения вафельного фона механической обработкой не позволяет наращивать производство и снижать затраты [5].

Вместе с тем задача создания технологий, позволяющих в едином технологическом цикле (**рис. 2**) получать такие изделия, остается, и одним из перспективных способов, как следствие развития порошковой металлургии в части аддитивных технологий, является прямое лазерное выращивание (ПЛВ) из металлических порошковых материалов. Востребована технология аддитивного производства для деталей размером до 3000 мм в диаметре и 2000 мм высотой, позволяющая получать сложнопрофильные, точные заготовки [8-12].

Разработка аддитивных технологий обусловлена возможностью с их помощью существенно сокращать время от разработки изделия до выпуска готовой продукции, материалоемкость продукции, потребление энергоресурсов, а также возможность изготовления изделий с улучшенными свойствами и сложных конструкций, которые ранее не представлялось возможным производить из-за технологических ограничений [13].



Рис. 1. Способы обработки вафельного фона [5]

Fig. 1. Methods of waffle structure processing [5]

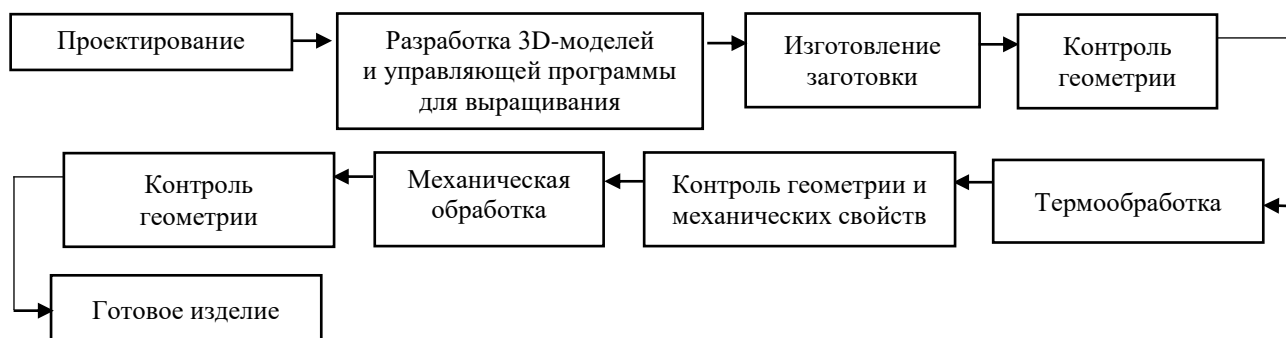


Рис. 2. Схема процесса изготовления детали методом ПЛВ

Fig. 2. Diagram of part manufacturing by the DLD process

Внедрение технологии ПЛВ изготовления деталей невозможно без разработки комплексного подхода к управлению технологическими операциями в обеспечении качества продукции. Традиционный постпроцессный контроль для аддитивных технологий себя исчерпал и не позволяет прогнозировать и предотвращать дефекты. Работы [14, 15] подтверждают значимость устранения ошибок на ранних стадиях проектирования, а также неустранимости образующихся дефектов в готовой детали, а как следствие, необходимости выращивания детали заново. Поэтому в соответствии с правилом десятикратного увеличения стоимости устранения ошибок (рис. 3 [16]) контроль после изготовления не только неэффективен и технически ограничен, но и экономически нецелесообразен. К настоящему времени информация об управлении качеством деталей, полученных методом ПЛВ, имеет разрозненный характер по:

1) параметрам процесса (мощности лазерного излучения, размера пятна лазерного луча, ширины валика, скорости процесса, расхода подаваемого порошка, смещения по высоте и др. [2]);

2) контролю качества (входной контроль) металлопорошковой композиции (МПК в соответствии с ГОСТ Р 59035 п. 3.1 [17]);

3) последующей постобработке. В этой связи сквозной цикл управления, заключающийся в предиктивном проектировании, адаптивном in-situ-управлении процессом в реальном времени и многоэтапном контроле.

Данный подход также будет применим к другим аддитивным процессам с учетом их особенностей. Таким образом, комплексная модель управления качеством деталей из порошкового алюминиевого материала является крайне актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

ПЛВ является наиболее перспективной технологией для внедрения аддитивного производства деталей в ракетно-космической промышленности [18]. Данная технология позволяет изготавливать детали цельной конструкции без паяных, сварных соединений.

Аддитивные технологии имеют множество преимуществ перед традиционными. Благодаря прямому построению деталей становится возможным получение изделий любых форм и размеров. При переходе от детали с одной геометрией к деталям с другой геометрией не требуется дополнительной дорогостоящей оснастки. Становится возможным получение изделий с топографическим дизайном, с градиентной структурой. При этом происходит значительный рост производительности и снижение затрат исходного сырья [2, 19]. Автономные и роботизированные производственные системы совершают революцию в производстве инструментов и деталей для космических аппаратов [20], к тому же способствуют сокращению цикла изготовления. Для сравнения и наглядного представления технологических циклов традиционного и аддитивного производства были разработаны диаграммы Ганта [21] для традиционного производства (рис. 4, а) и аддитивного (рис. 4, б). Этот графический инструмент применяется для визуализации технологических операций, их последовательности и длительности. Для аддитивной технологии есть возможность проводить технологические операции параллельно (этапы 1 и 2).

Одним из преимуществ технологии ПЛВ является получение сложных изделий с толщиной стенки менее 3 мм. Так, исследователями из Санкт-Петербургского морского технического университета получены габаритные изделия с толщиной стенки 1,8–2 мм [22].



Рис. 3. Правило десятикратного увеличения стоимости устранения ошибки [16]

Fig. 3. Tenfold cost escalation rule for error correction [16]

Этапы изготовления	7 7 7 7	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	7 7 7 7 7 7 7 7	7 7 7 7 7 7 7 7	Срок
1 Конструирование и проектирование	■				7 дн
2 Технологическая подготовка	■	■			112 дн
3 Изготовление			■	■	154 дн
4 Механообработка				■	70 дн
5 Сборка				■	28 дн
6 Термообработка				■	14 дн
7 Финал. механообработка, контроль				■	14 дн
Итого для традиционного производства					~ 1 год

а

Этапы изготовления	7 7 7 7 7 7 7 7	Срок
1 Разработка 3D-модели и управ-й программы	■	14 дн
2 Технологическая подготовка	■	7 дн
3 Выращивание	■	21 день
4 Контроль геометрии	■	2 дн
5 Термообработка	■	7 дн
6 Механообработка и контроль	■	7 дн
Итого для аддитивного производства (ПЛВ)		~ 2 мес

б

Рис. 4. Длительность технологического цикла традиционного производства (а) и аддитивного производства (б)
 Fig. 4. Duration of the production cycle in conventional manufacturing (a) and additive manufacturing (б)

Схема процесса ПЛВ представлена на рис. 5.

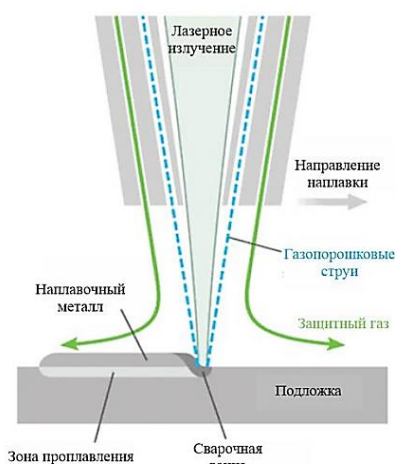


Рис. 5. Схема процесса ПЛВ [1]
 Fig. 5. Scheme of the DLD process [1]

Через медное сопло, расположенное коаксиально лазерному излучению, подается металлический порошок фракцией от 40 до 200 мкм. На подложке или предыдущем слое под воздействием лазерного излучения формируется ванна расплава, в которую попадает металлический порошок. В процессе кристаллизации формируется валик [1].

При последовательной наплавке валиков по заданным траекториям формируется готовое изделие. Коаксиальное сопло крепится к лазерной голове, которое, в свою очередь, крепится к роботу или системе приводов [1]. Подложки могут крепиться к многоосевому позиционеру, что позволяет выращивать изделия сложной формы. Максимальные габариты наплавляемых изделий зависят от размера технологического комплекса. ПЛВ – технологически сложный

процесс, так как на конечный результат влияет много параметров. Это и параметры, относящиеся к источнику нагрева – лазеру, такие как мощность излучения, диаметр и форма распределения энергии пятна, а также параметры самого процесса: скорость движущегося инструмента и форма наплавляемого валика, а также стратегия наплавки [1].

Также имеют значение показатели качества порошкового материала: его форма и размер частиц, физические свойства основного металла и т.д. В работе [23] часть параметров объединены в показатель объемной плотности энергии, который помогает на первоначальных этапах выбору режима наплавки. Объемная плотность энергии E , Дж/мм³, записывается как формула

$$E = P/(v \cdot h \cdot d), \quad (1)$$

где P – мощность лазерного излучения, Вт; v – скорость наплавки, мм/с; h – высота слоя, мм; d – диаметр лазерного пятна, мм.

Следует отметить, что данная формула широко распространена для технологий селективного лазерного плавления (СЛП), где толщина слоя h является строго задаваемым параметром. В случае ПЛВ высота наплавляемого валика в значительной степени зависит от динамики процесса и расхода порошка, поэтому прямое использование этой формулы требует осторожности и экспериментальной проверки применительно к ПЛВ.

Свойства конечного изделия, как и во всех методах порошковой металлургии, зависят не только от свойств исходного материала и параметров выращивания, но и от режимов последующей обработки. Критически важным этапом является термообработка полученной детали для снятия остаточных напряжений.

Технология ПЛВ является сложным и многофакторным процессом с большим количеством параметров, влияющих на конечный результат. Поэтому для понимания взаимосвязей между параметрами и получением изделий с заданными характеристиками исследования необходимо проводить комплексно [24].

Для анализа производственного процесса была разработана диаграмма Исикавы [25], или диаграмма рыбьего скелета (рис. 6), которая представляет собой наглядный графический метод причинно-следственных связей. Принцип диаграммы заключается в объективной оценке, идентификации возможных причин несоответствий и дефектов и выявлении потенциальных проблем технологического процесса изготовления деталей методом ПЛВ.

Основными категориями технологии ПЛВ являются исходное сырье (порошковый материал), технология и оборудование, постобработка, а также персонал.

Базовая концепция управления производством ПЛВ основывается на развитии стандартизации, методов управления качеством и внедрении системы

качества с применением процессного подхода, регламентируемом международными стандартами ISO серии 9000, а также возможностью выбора управленческих решений в режиме реального времени.

Наиболее востребованными конструкционными материалами, используемыми в аэрокосмической отрасли являются алюминиевые сплавы, применение которых дает возможность снизить массу изделий (плотность ρ менее $3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) [26]. Объем их применения составляет около 70 % от общего количества конструкционных материалов в составе ракеты-носителя по массе [28]. При этом самое широкое распространение получил алюминиевый сплав АМг6 [27], химический состав сплава представлен в табл. 1.

Механические испытания осуществлялись по ГОСТ 1497 [34] на машине для испытаний конструкционных материалов УТС 111.2-50-22 (№ 56294-11 в федеральном информационном фонде обеспечения единства измерений (далее – ФИФ ОЕИ)). Полученные результаты представлены в табл. 2.

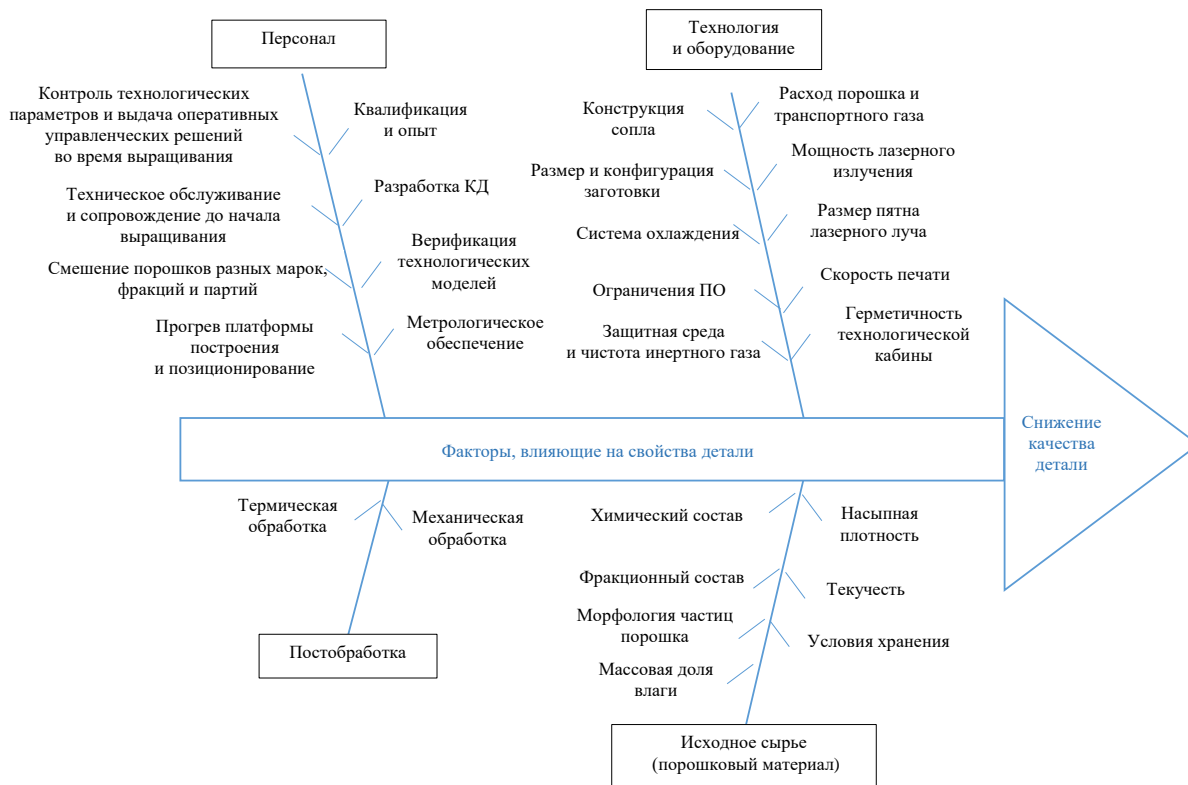


Рис. 6. Причинно-следственная связь процесса изготовления детали методом ПЛВ
 Fig. 6. Cause-and-effect relationship in part manufacturing by the DLD process

Таблица 1. Химический состав АМг6, % [26]
 Table 1. Chemical composition of АМг6, % [26]

Mg*	Mn	Ti	Be	Al	Fe	Si	Zn	Cu	Прочие примеси	
									каждая	Сумма
5,8-6,8	0,5-0,8	0,02-0,1	0,0002-0,005	Основа	0,4	0,4	0,2	0,1	Не более	
									0,05	0,1

*Выгорание магния при лазерной наплавке алюминиевых сплавов является важной технологической проблемой аддитивных технологий. Контроль содержания магния до и после процесса ПЛВ позволит гарантировать требуемый химический состав, а также механические свойства готового изделия.

Таблица 2. Механические свойства изделий из АМг6
Table 2. Mechanical properties of АМг6 alloy products

Марка порошка	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
АМг6	299 ± 31	147 ± 9	22 ± 11

Высокий разброс свойств материала, выражающийся в широком доверительном интервале, связан с методом его изготовления. В первую очередь, в процессе послойного сплавления материал кристаллизуется в метастабильном состоянии, а из-за постоянного градиента температуры (плавления с последующей быстрой кристаллизацией) возникают остаточные термические напряжения. Данная особенность, характерная для всех материалов, полученных методом послойного сплавления, и приводит к увеличению разброса механических свойств и, как следствие, что для большинства алюминиевых сплавов, используемых в изготовлении таких деталей, как отсеки и другие конструкционные элементы, минимально достаточный показатель пластичности составляет 5,5%.

АМг6 обладает высокой технологичностью, однако термической обработкой не упрочняется, что является существенным недостатком для аддитивного производства, поскольку комплекс физических, механических, технологических и коррозионных свойств сплавов определяется не только химическим и фазовым составом, но и способом получения и режимом термической обработки [26]. Термические методы применяются для уменьшения остаточных напряжений.

Институтом легких материалов и технологий (ИЛМиТ) (научно-производственный центр АО «РУСАЛ») для аддитивных технологий разработана

Таблица 3. Химический состав РС-320, мас.% [29]
Table 3. Chemical composition of RS-320, wt.% [29]

Основные элементы					Примеси, не более				
Al	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Ti	Zn	Каждая	Сумма
Основа	10,5-11,3	0,30-0,60	0,50-0,80	0,15-0,25	0,30-0,70	0,12-0,25	0,03	0,05	0,15

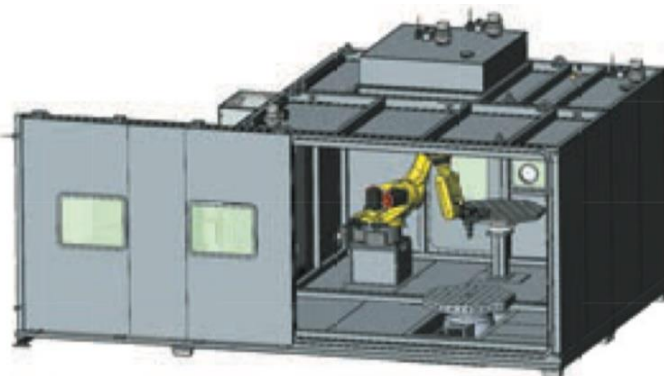


Рис. 7. Общий вид установки лазерной наплавки (фото с презентации ИЛИСТ СПбГМТУ)
Fig. 7. General view of the laser cladding system (photo from the presentation of the Institute of Laser and Welding Technologies, St. Petersburg State Marine Technical University)

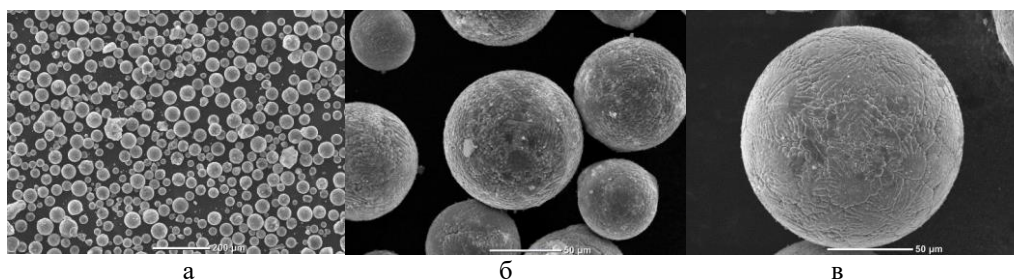


Рис. 8. Вид гранул порошка РС-320 при увеличении: а – ×100; б – ×500; в – ×600
 Fig. 8. Morphology of RS-320 powder particles at magnifications: a is ×100; б is ×500; в is ×600

Качество деталей, полученных ПЛВ, складывается из взаимодействия множества факторов, которые разделяются на прямые (непосредственно влияющие на процесс наплавки) и косвенные (влияющие на стабильность процесса наплавки). Оценка уровня качества выпускаемой продукции определяется путем сравнения совокупности показателей качества и базового образца, соответствующего мировому уровню или лучшим отечественным образцам [7]:

$$K_i = P_i / P_{oi}, \quad (2)$$

где P_i – показатель качества продукции; P_{oi} – базовое значение показателя качества эталонного (базового) образца.

Наиболее значимые факторы, влияющие на качество детали, определены экспертным анализом на основании разработанной причинно-следственной связи (см. рис. 6). Инструментом для оценки был выбран метод МСА (Multicriteria analysis) [32] по следующим критериям: влияние на геометрическую точность наплавки, влияние на образование дефектов и влияние на стабильность процесса наплавки. Экспертный анализ значимости факторов проводили квалифицированной группой, состоящей из конструктора, технолога, материаловеда и оператора установки для наплавки. В результате определены наиболее приоритетные параметры (критически значимые), которые могут приводить к дефектам (табл. 4).

Таблица 4. Прямые и косвенные влияющие факторы
 Table 4. Direct and indirect influencing factors

Фактор	Влияние
Прямое воздействие	
Химический состав и свойства порошкового материала	Определяет температуру плавления, теплопроводность и наследственную микроструктуру
Мощность лазерного излучения	Определяет количество подводимой энергии
Скорость наплавки (сканирования)	Определяет время воздействия лазера и кристаллизации, а также глубину проплавления
Диаметр лазерного пятна	Определяет площадь распределения подводимой энергии
Расход и скорость подачи порошка	Определяет количество порошка, поступающего в ванну расплава
Смещение по ширине между валиками в слое	Определяет перекрытие между валиками, оказывает влияние на шероховатость поверхности и появление дефектов в виде непроваров
Стратегия обработки для управляющей программы	Влияет на теплораспределение по всей детали
Косвенное воздействие	
Массовая доля влаги в порошке	Влияет на процесс наплавки и свойства детали по причине парообразования, рассеивания лазерного излучения, появления газовых пор
Содержание кислорода в технологической кабине	Влияет на появление пористости и неметаллических включений
Стабильность подачи порошка	Неоднородность геометрии
Качество и подготовка подложки	Чистота, шероховатость и прогрев влияют на сплавление выращиваемой заготовки, теплообмен
Калибровка технологического инструмента и позиционера, прохождение техосмотра, а также засорение сопла	Влияет на технологические параметры наплавки (на прямые факторы)
Термическая обработка	Влияет на остаточные напряжения и получаемую микроструктуру, механические свойства
Механическая обработка	Влияет на качество поверхности изделия и геометрические параметры
Метрологическое обеспечение	Влияет на контроль и воспроизведение технологических параметров (прямых факторов), а также на результаты измерений и испытаний (достоверность получаемой информации)

Эксперимент и результаты исследования

Для экспериментальной отработки и поиска приемлемых технологических параметров процесса наплавки был выбран алюминиевый порошок РС-320 фракцией 60-140 мкм. Поскольку технология ПЛВ применяется в основном для изготовления ответственных крупногабаритных деталей в мелкосерийном (и единичном) производстве, для получения гарантированных бездефектных структур необходимо проводить предварительные изготовления образцов как на металлографические исследования, так и на механические испытания [2]. На рис. 9 представлена схема выращивания технологических проб для проведения испытаний для определения физико-механических свойств.



Рис. 9. Схема выращивания технологических проб
Fig. 9. Scheme of manufacturing technological test specimens

В качестве контролируемого параметра была выбрана пористость, являющаяся одним из критических дефектов аддитивных технологий в частности и для ПЛВ-деталей из алюминиевых сплавов, влияющих на качество конечных изделий. Пористость зависит от выбранных технологических параметров наплавки. В работе технологические пробы изготавливались по коммерческим режимам сплавления (режимы №1–4). В эксперименте варьированию подвергались мощность лазерного излучения от 2200 до 3400 Вт, диаметр пятна лазерного луча от 1,9 до 3,0 мм. В качестве инертного газа применялся аргон.

Серия экспериментов проводилась для исследования влияния технологических параметров на появление пористости с применением метода оптической микроскопии. Оценку осуществляли на поверенном средстве измерений – комплексе программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел Thixomet (№ 48386-11 в ФИФ ОЕИ). Принцип действия основан на получении изображений структуры поверхности шлифов (изготовленных из технологических проб) при заданном увеличении на металлографическом микроскопе AxioVert A1 с фиксацией изображения цифровой видеокамерой EZIS PM. Результаты представлены в табл. 5.

Для режимов № 3 и 4 лучшие результаты пористости – 2,06 об. %, что не соответствует предъявляемым требованиям – не более 1,0 об.%.

Таблица 5. Результаты металлографического анализа
Table 5. Results of metallographic analysis

Номер пробы	Мощность лазерного излучения, Вт	Пористость, об.%
Режим №1		
1	3000	1,04
2	3200	1,29
3	3400	1,11
4	2200	1,39
5	2400	0,82
6	2600	1,67
7	2800	1,00
Режим №2		
1	3000	1,20
2	3200	1,10
3	3400	0,99
4	2200	1,40
5	2400	1,56
6	2600	1,34
7	2800	1,60

Механические свойства исследовались в соответствии с ГОСТ 1497 [33] на машине для испытаний конструкционных материалов УТС 111.2-50-22 (№ 56294-11 в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (ФИФ ОЕИ)). Полученные данные представлены в табл. 6. Результаты испытаний демонстрируют, что материал, полученный методом ПЛВ из сплава РС-320, обладает более высокими механическими характеристиками по сравнению с традиционным сплавом АМг6 (см. табл. 2) при сохранении удовлетворительного уровня пластичности. На основании этого сплав РС-320 можно рассматривать в качестве перспективного материала для замены сплава АМг6 при изготовлении ответственных конструкций.

Таблица 6. Механические свойства образцов, изготовленных из технологических проб
Table 6. Mechanical properties of specimens manufactured from technological test samples

Марка порошка	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
РС-320	355 ± 10	265 ± 5	7 ± 1

Заключение

1. Установлено, что основными технологическими параметрами ПЛВ, определяющими формирование пор в алюминиевом сплаве РС-320, являются мощность лазера (оптимальный диапазон (3000 ± 200) Вт в зависимости от толщины детали) и скорость подачи порошка (до 150 г/мин).

2. Внедрен комплексный подход к контролю качества, включающий:

- предиктивный анализ технологических параметров;
- in-situ-мониторинг всего технологического процесса;
- автоматизированную систему принятия решений для коррекции режимов.

3. Апробированы оптимальные режимы ПЛВ, позволившие изготовить крупногабаритные заготовки с содержанием пор менее 1,0 об. % и пределом прочности не менее 320 МПа.

Список источников

1. Свицерский В.П. Разработка технологического обеспечения изготовления тонкостенных крупногабаритных корпусных деталей летательных аппаратов с применением комбинированной деформирующей обработки: автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.02 / Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ). Москва, 2004. 37 с.
2. Вильданов А.М. Исследование особенностей формирования макродефектов объемной лазерной наплавки и разработка метода получения бездефектных наплавленных слоев: дис. ... канд. техн. наук : 2.5.8. / Вильданов Артур Маратович; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Санкт-Петербург, 2022. 129 с.
3. Бельский А.Н., Карасев Д.В., Тихонова Н.А. Развитие современной ракетно-космической отрасли: роль научно-технических инноваций // Молодой ученый. 2016. № 20 (124). С. 124-127. URL: <https://moluch.ru/archive/124/34155>
4. Распоряжение Правительства РФ от 05.11.2020 № 2869-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года».
5. Батрутдинов Р.Г., Сысоев С.К. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики». 2011. Т.1. №7. С. 7-8.
6. Кузнецов С.В. Актуальный репортаж: Интервью генерального конструктора ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. 02.03.2020. <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=3&nid=3794>
7. Захаров В.И. Взаимозаменяемость, качество продукции и контроль в машиностроении: общие сведения, ЕСДП СЭВ, приборы и калибры, госприемка. Л.: Лен-издат, 1990. 302 с.
8. Campbell T.A., Ivanova O.S. Additive manufacturing as a disruptive technology: implications of three-dimensional printing // Technol. Innov. 2013, no. 15 (1), pp. 67-79.
9. Qualification and certification of metal additive manufactured hardware for aerospace applications / R. Russell, et al. // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Elsevier. 2019, pp. 33-66.
10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition, Springer New York, New York, NY, 2015.
11. Murr L.E. Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance, Springer International Publishing, Cham, 2015.
12. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016, no. 83 (1-4), pp. 389-405.
13. Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 № 1913-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года».
14. Елисеева О.В., Беляев Н.Д. Технология прямого лазерного выращивания элементов узла уплотнения дейдвудного устройства // Оригинальные исследования (ОРИС). 2023. № 3. С. 243-250.
15. Прямое лазерное выращивание – прорыв в изготовлении крупногабаритных изделий / Туричин Г.А., Скляр М.О., Бабкин К.Д., Климова-Корсмик О.Г., Земляков Е.В. // Аддитивные технологии. 2017. №3. С. 32-35.
16. Боровков А.И. Деловой форум «Стратегия России», доклад «Цифровая трансформация высокотехнологичной промышленности: новые бизнес-процессы и бизнес-модели на основе цифровых двойников».
17. ГОСТ Р 59035 – 2020. Аддитивные технологии. Металлопорошковые композиции. Общие требования.
18. Особенности получения качественных изделий из титановых сплавов, изготовленных технологией прямого лазерного выращивания / М.О. Гущина, О.Г. Климова-Корсмик, С.А. Шальнова, А.М. Вильданов, Е.А. Валдайцева // Фотоника. 2019. Т. 13. № 8. С. 722-735.
19. Исследование влияния параметров процесса 3D-наплавки проволочных материалов на формирование остаточных деформаций / Сметанников О.Ю., Максимов П.В., Трушников Д.Н., Пермяков Г.Л., Бельский В.Я., Фарберов А.С. // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. №2. С. 181-194.
20. Subin Antony Jose, Jordan Jackson, Jayden Foster, Terrence Silva, Ethan Markham, Pradeep L. Menezes. In-Space Manufacturing: Technologies, Challenges, and Future Horizons. 5 March 2025. <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/3/84>
21. Quality Glossary Definition: Gantt chart. What is a Gantt Chart? <https://asq.org/quality-resources/gantt-chart>
22. Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small 125 trial samples / Babkin Konstantin, Kovchik Anton, Arkhipov Andrey, Gushchina Marina // 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7-10, 2020. Procedia CIRP. 2020, 94, 310-313. 10.1016/j.procir.2020.09.058.
23. Еремеев А.Д. Особенности формирования структуры и механические свойства металла при лазерной наплавке алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. 132 с.
24. Технологические основы высокоскоростного прямого лазерного выращивания изделий методом гетерофазной порошковой металлургии / Г. Туричин, О. Климова, Е. Земляков и др. // Фотоника. 2015. № 4 (52). С. 68-83. <https://asq.org/quality-resources/fishbone>
25. Авиационные материалы: справочник. В 9 т. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы / [подгот. Н.А. Аристова, В.П. Батраков, В.Ф. Беренсон и др.]; науч. ред. д. т. н. М.Б. Альтман. М., 1986. 132 с.
26. Компания «Формунг». Изготовление деталей для космической отрасли. <https://formung.ru/space?ysclid=mh84e4t0um279191025>
27. Казаков М.С. Улучшение структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники совершенствованием режимов технологических воздействий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.6.17 / Казаков Михаил Сергеевич; ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Самара, 2023. 21 с. : ил.
28. ТУ 24.42.00-002-44669951-2019. Порошок из сплава на основе алюминия. Технические условия.

30. ГОСТ 19440 – 94. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Ч. 1. Метод с использованием воронки. Ч. 2. Метод волюмометра Скотта.
31. ГОСТ 20899 – 98 (ИСО 4490-78). Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла).
32. https://research.unl.pt/ws/portalfiles/portal/96582884/Advancing_Sustainable_Decision_Making_in_Additive_Manufacturing.pdf
33. ГОСТ 1497–2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2nd ed. New York: Springer, 2015.
11. Murr L.E. Handbook of materials structures, properties, processing and performance. Cham: Springer International Publishing; 2015.
12. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016;(83(1-4)):389-405.
13. Order of the Government of the Russian Federation “On Approval of the Strategy for the Development of Additive Manufacturing Technologies in the Russian Federation until 2030” No. 1913-r dated July 14, 2021 (as amended on October 21, 2024).
14. Eliseeva O.V., Belyaev N.D. Direct laser deposition technology for stern tube sealing assembly components. *Originalnye issledovaniya (ORIS) [Original Research]*. 2023;(3):243-250. (In Russ.)
15. 15. Turichin G.A., Sklyar M.O., Babkin K.D., Klimova-Korsmik O.G., Zemlyakov E.V. Direct laser deposition as a breakthrough in manufacturing large-sized products. *Additivnye tekhnologii [Additive Technologies]*. 2017;(3):32-35. (In Russ.)
16. Borovkov A.I. Digital transformation of high-tech industry: new business processes and business models based on digital twins. Proceedings of the Business Forum “Strategy of Russia”. (In Russ.)
17. State Standard GOST R 59035–2020. Additive Technologies. Metal Powder Compositions. General Requirements.
18. Gushchina M.O., Klimova-Korsmik O.G., Shalnova S.A., Vildanov A.M., Valdaytseva E.A. Production of high-quality titanium alloy products by direct laser deposition technology. *Fotonika [Photonics]*. 2019;13(8):722-735. (In Russ.)
19. Smetannikov O.Yu., Maksimov P.V., Trushnikov D.N., Permyakov G.L., Belenkiy V.Ya., Farberov A.S. Influence of wire-feed additive manufacturing parameters on residual deformations. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Bulletin. Mechanics]*. 2019;(2):181-194. (In Russ.)
20. Jose S.A., Jackson J., Foster J., Silva T., Markham E., Menezes P.L. In-Space Manufacturing: Technologies, Challenges, and Future Horizons. Designs. March 5, 2025. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/3/84>
21. Quality Glossary Definition: Gantt Chart. Available at: <https://asq.org/quality-resources/gantt-chart>
22. Babkin K., Kovchik A., Arkhipov A., Gushchina M. Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small 125 trial samples. 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7-10, 2020. *Procedia CIRP*. 2020;94:310-313. doi:10.1016/j.procir.2020.09.058.
23. Ereemeev A.D. *Osobennosti formirovaniya struktury i mekhanicheskie svoystva metalla pri lazernoy naplavke aluminievyykh splavov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Structure formation and mechanical properties of aluminum alloys produced by laser deposition. Ph.D. dissertation]*. Saint Petersburg, 2022. 132 p.
24. Turichin G., Klimova O., Zemlyakov E., et al. Technological foundations of high-speed direct laser deposition using heterophase powder metallurgy. *Fotonika [Photonics]*. 2015;(4(52)):68-83. (In Russ.)
25. Available at: <https://asq.org/quality-resources/fishbone>.

References

1. Sviderskiy V.P. *Razrabotka tekhnologicheskogo obespecheniya izgotovleniya tonkostennykh krupnogabaritnykh korpusnykh detaley letatelnykh apparatov s primeneniem kombinirovannoy deformiruyushchey obrabotki: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk [Development of technological support for manufacturing thin-walled large-sized aircraft structural parts using combined deformation processing. Extended abstract of Dr.Sc. dissertation]*. Moscow: Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky (MATT), 2004. 37 p.
2. Vildanov A.M. *Issledovanie osobennostey formirovaniya makrodefektov obemnoy lazernoy naplavki i razrabotka metoda polucheniya bezdefektnykh naplavlennykh sloev: dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of macrodefect formation during laser metal deposition and development of a method for producing defect-free deposited layers. Ph.D. dissertation]*. Saint Petersburg, 2022. 129 p.
3. Belenkiy A.N., Karasev D.V., Tikhonova N.A. Development of the modern rocket and space industry: the role of scientific and technological innovations. *Molodoy uchenyy [Young Scientist]*. 2016;20(124):124-127. Available at: <https://moluch.ru/archive/124/34155> (In Russ.)
4. Order of the Government of the Russian Federation “On Approval of the Strategy for the Development of the Machine Tool Industry until 2035” No. 2869-r dated November 5, 2020 (as amended on October 21, 2024).
5. Batrutdinov R.G., Sysoev S.K. Manufacturing technology of waffle structures in aerospace shells]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики [Current Problems of Aviation and Cosmonautics]*. 2011;1(7):7-8. (In Russ.)
6. Kuznetsov S.V. Interview with the General Designer of The Khronichev State Research and Production Space Center. March 2, 2020. Available at: <http://www.khronichev.ru/main.php?id=3&nid=3794>.
7. Zakharov V.I. *Vzaimozamenyaemost, kachestvo produktsii i kontrol v mashinostroenii: Obshchie svedeniya, ESDP SEV, pribory i kalibry, gospriemka [Interchangeability, Product Quality and Quality Control in Mechanical Engineering. Background, Unified system of tolerances and fits, instrumentation and calibration testing, state quality control]*. Leningrad: Lenizdat, 1990, 302 p. (In Russ.)
8. Campbell T.A., Ivanova O.S. Additive manufacturing as a disruptive technology: implications of three-dimensional printing. *Technol. Innov.* 2013;15(1):67-79.
9. Russell R., et al. Qualification and certification of metal additive manufactured hardware for aerospace applications. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Elsevier; 2019. pp. 33-66.

26. Aristova N.A., Batrakov V.P., Berenson V.F., et al. *Aviatsionnye materialy: spravochnik*. V 9 t. T. 4. *Al-yuminiyevye i berillievye splavy* [Aviation Materials Handbook. In 9 Volumes. Vol. 4. Aluminum and Beryllium Alloys]. Ed. By M.B. Altman, Dr.Sc. Moscow, 1986, 132 p. (In Russ.)
27. Formung Company. Manufacturing of Parts for the Space Industry. Available at: <https://formung.ru/space?ysclid=mh84e4t0um279191025>
28. Kazakov M.S. *Uluchshenie struktury i svoystv al-yuminiyevykh splavov dlya izdeliy perspektivnoy raketno-kosmicheskoy tekhniki sovershenstvovaniem rezhimov tekhnologicheskikh vozdeystviy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of structure and properties of aluminum alloys for advanced aerospace products by optimizing technological treatment modes. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Samara, 2023, 21 p.
29. Technical Specifications TU 24.42.00-002-44669951-2019. Aluminum alloy powder. Specifications.
30. State Standard GOST 19440-94. Metal powders. Determination of apparent density. Part 1. Funnel method. Part 2. Scott volumeter method.
31. State Standard GOST 20899-98 (ISO 4490-78). Metal Powders. Determination of flow rate by means of a calibrated funnel (Hall flowmeter).
32. Available at: https://research.unl.pt/ws/portalfiles/portal/96582884/Advancing_Sustainable_Decision_Making_in_Additive_Manufacturing.pdf
33. State Standard GOST 1497-2023. Metals. Tensile testing methods.

Поступила 10.12.2025; принята к публикации 10.02.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 10/12/2025; revised 10/02/2026; published 30/06/2026

Михеева Наталья Владимировна – начальник группы,
Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,
Королёв, Россия.
Email: n_v_mikheeva@mail.ru.

Тимофеев Анатолий Николаевич – доктор технических наук,
заместитель генерального директора по научной работе,
АО «Композит», Королёв, Россия.
Email: info@kompozit-mv.ru

Логачёва Алла Игоревна – доктор технических наук, начальник отделения металлических материалов и металлургических технологий,
АО «Композит», Королёв, Россия.
Email: ailogacheva@yandex.ru

Басков Федор Алексеевич – кандидат технических наук, начальник сектора,
АО «Композит», Королёв, Россия.
Email: baskov_fa@mail.ru. ORCID 0000-0001-6238-4378

Воейко Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления качеством и стандартизации,
Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», Королёв, Россия.
Email: voeйко@ut-mo.ru

Natalia V. Mikheeva – Head of the Group,
Leonov Moscow Region University of Technology, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev, Russia.
Email: n_v_mikheeva@mail.ru.

Anatoly N. Timofeev – DrSc (Eng.), Deputy General Director for Scientific Work,
JSC Compozit, Korolev, Russia.
Email: info@kompozit-mv.ru

Alla I. Logacheva – DrSc (Eng.), Head of the Department of Metal Materials and Metallurgical Technologies,
JSC Compozite, Korolev, Russia.
Email: ailogacheva@yandex.ru

Fedor A. Baskov – PhD (Eng.), Head of the Sector,
JSC Compozit, Korolev, Russia.
Email: baskov_fa@mail.ru. ORCID 0000-0001-6238-4378

Olga A. Voeйко – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Quality Management and Standardization,
Leonov Moscow Region University of Technology, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev, Russia.
Email: voeйко@ut-mo.ru