

Научная статья

УДК 669.715

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-52-67

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА VAS1 ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ВЕРТОЛЕТНОЙ ТЕХНИКИ АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ

И. Бенариев¹, И.Д. Савичев¹, Д.В. Хасиков¹, А.М. Денисов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований, полученных в ходе освоения высокотехнологичного алюминиевого сплава марки VAS1 для производства деталей вертолетной техники методом селективного лазерного сплавления (СЛС). Изучено влияние технологических параметров СЛС на качество материала, включая микроструктуру, пористость и шероховатость. Представлены экспериментальные данные по механическим свойствам материала в исходном состоянии и после упрочняющей термической обработки. Опробовано изготовление опытной детали типа кронштейн с допустимыми отклонениями геометрической формы и без критических дефектов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, весовая эффективность, топологическая оптимизация, механические свойства, пористость, шероховатость, рентгеновская компьютерная томография

Для цитирования: Бенариев И., Савичев И.Д., Хасиков Д.В., Денисов А.М. Применение высокотехнологичного алюминиевого сплава VAS1 для изготовления деталей вертолетной техники аддитивным методом // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-52-67.

Scientific article

APPLICATION OF HIGH-TECH ALUMINUM ALLOY VAS1 FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF HELICOPTER PARTS

I. Benariev¹, I.D. Savichev¹, D.V. Khasikov¹, A.M. Denisov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The study presents the results of research on the development of advanced high-tech aluminum alloy VAS1 for production of helicopter parts by selective laser melting (SLM). The effect of SLM process parameters on material quality, including microstructure, porosity and roughness has been investigated. Experimental data on the mechanical properties of the material in the as-built state and after strengthening heat treatment are presented. A prototype bracket-type part has been successfully fabricated meeting all geometric tolerances and being free from critical defects.

Keywords: additive technologies, selective laser melting, weight efficiency, topology optimization, mechanical properties, porosity, roughness, X-ray computed tomography

For citation: Benariev I., Savichev I.D., Khasikov D.V., Denisov A.M. Application of high-tech aluminum alloy VAS1 for additive manufacturing of helicopter parts. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-52-67.

Введение

В настоящее время актуальными задачами в вертолетной технике являются снижение массы конструкции, сокращение сроков и трудоемкости производства, что возможно достичь с помощью преимуществ аддитивных технологий. Для аддитивного производства деталей из алюминиевых сплавов на сегодняшний день наиболее подходящей является технология селективного лазерного сплавления (СЛС), которая заключается в выращивании детали на платформе построения (3D-печати) путем последовательного селективного сплавления (синтеза) наложенных друг на друга слоев металлического порошка с использованием высокоэнергетического лазерного излучения. Высокие скорости кристаллизации при СЛС обеспечивают формирование достаточно однородной диспергированной структуры и позволяют избежать нежелательных структурных дефектов, характерных для литья [1–12].

В качестве материала для опробования изготовления типовых деталей сложной конфигурации (кронштейн, качалка, фитинг и др.) предложен разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ высокотехнологичный термически упрочняемый алюминиевый сплав марки ВАС1 на базе системы Al–Si–Mg–Cu [3, 13–19] – первый в России материал на основе алюминия для аддитивных технологий, прошедший общую квалификацию (паспортизацию). Сплав обладает повышенным на 30–40 % уровнем прочности по сравнению с базовыми сплавами типа AlSi7Mg и AlSi10Mg, при этом обеспечиваются высокие скорости печати.

В случае применения сплава ВАС1 для получения деталей вертолетной техники по аддитивной технологии СЛС взамен традиционных технологий (литья, фрезерования) ожидается достижение следующих целевых показателей: снижение массы конструкции до 30 % за счет использования новых способов проектирования (рис. 1), сокращение сроков производства в 1,5 раза, уменьшение трудоемкости изготовления деталей до 20 %, повышение коэффициента использования материала до 50 %.

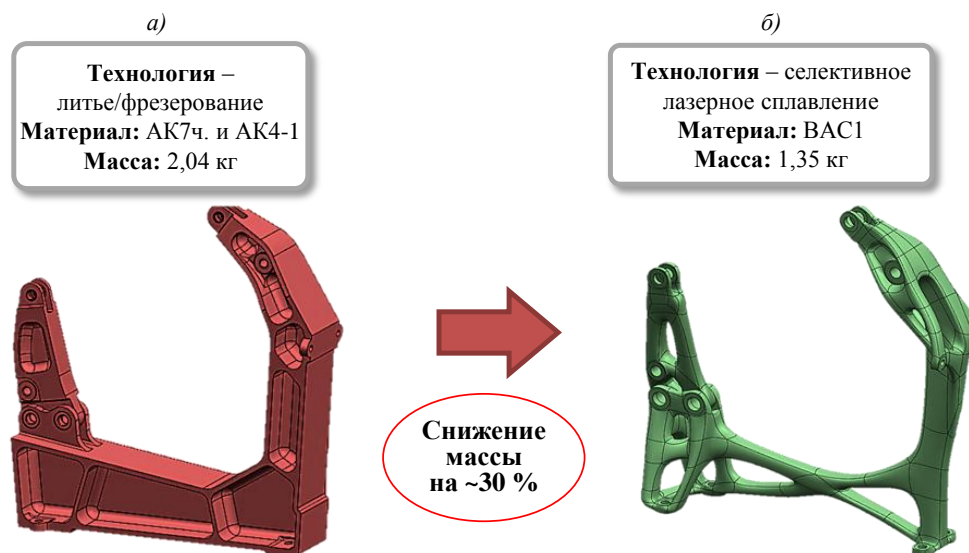


Рис. 1. Сравнение массы деталей, изготовленных по традиционной технологии (а) и по аддитивной СЛС-технологии (после топологической оптимизации) (б)

Качество изделия, формируемого аддитивным методом СЛС, при одинаковых режимах синтеза может существенно зависеть от модели установки для печати. Это обуславливает необходимость корректировки режимов при переходе с одной установки на другую с учетом ее конструктивных и технических особенностей (максимальная мощность лазера, габариты рабочей камеры, температура платформы построения,

система подачи порошка и т. д.). На момент начала работы сплав ВАС1 был освоен на однолазерной установке для СЛС с максимальной мощностью лазера 400 Вт и подогревом платформы построения [13–15]. Для получения требуемой номенклатуры деталей возникла необходимость в адаптации данного материала на новой однолазерной установке, отличающейся, в частности, повышенной максимальной мощностью лазера (500 Вт) и отсутствием функции подогрева платформы построения.

Цель данной работы – исследование качества образцов и опытной детали типа кронштейн из перспективного алюминиевого сплава ВАС1, изготовленных методом СЛС на новой установке.

Материалы и методы

Материал для исследований – экспериментальные образцы, опытная деталь и образцы-свидетели из алюминиевого сплава марки ВАС1, изготовленные методом СЛС на однолазерной установке с максимальной мощностью лазера 500 Вт в защитной атмосфере аргона (без подогрева платформы построения). Исходным сырьем для процесса СЛС служила металлопорошковая композиция (МПК) из данного сплава, полученная в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ из предварительно подготовленных шихтовых заготовок путем газовой атомизации с последующей классификацией и рассевом на целевую фракцию [18, 20].

Основными технологическими параметрами СЛС являются: мощность лазера (P , Вт), скорость сканирования (v , мм/с), межтрековое расстояние (s , мм), толщина насыпного слоя МПК (t , мм), температура платформы построения (T_0 , °С), а также отступ для поверхностных элементов (мм). За обобщающую характеристику основных параметров синтеза принимается удельная плотность энергии лазера (далее – плотность энергии), Дж/мм³: для основного металла – $E = P/(v \cdot s \cdot t)$, для контура – $E = P/(v \cdot s)$. При оценке производительности процесса синтеза учитывается теоретическая скорость печати основного металла (built rate): $BR = v \cdot s \cdot t$ (см³/ч).

Разработка режимов СЛС для производства серийных деталей является комплексным трудоемким процессом, который включает следующие основные этапы [1, 11]:

- отработку режима экспонирования основного металла на образцах типа кубик размером 10×10×10 мм и на тонких пластинках толщиной 1 мм;
- отработку режимов экспонирования поверхностных элементов на специальных образцах;
- отработку режима экспонирования поддерживающих структур;
- опробование изготовления опытной детали на разработанных технологических режимах и оценку их пригодности для получения требуемого качества изделия.

Таким образом, для этой цели составлена экспериментальная сетка режимов и суммарно изготовлено 107 образцов различных размеров и конфигурации (рис. 2). При отработке режима экспонирования основного металла варьировали параметры P , v и s . В соответствии с этим изменялись параметры: E – от 40 до 90 Дж/мм³; BR – от 14 до 40 см³/ч.

Упрочняющую термическую обработку на состояние Т6 (закалка + искусственное старение на максимальную прочность) полученного синтезированного материала проводили по серийному режиму на образцах, подвергнутых механической обработке (образцы типа II по ГОСТ 1497–2023).

Далее на основе разработанных режимов СЛС перпендикулярно платформе построения (направление Z) изготовлены заготовка детали и образцы-свидетели (20 шт.) в виде столбиков размером Ø14×80 мм, которые затем подвергнуты упрочняющей термической обработке (по серийному режиму) без отделения от платформы построения.

Исследование микроструктуры и механических свойств материала проводили с использованием современного сертифицированного оборудования в соответствии с действующими стандартами и методиками РФ.

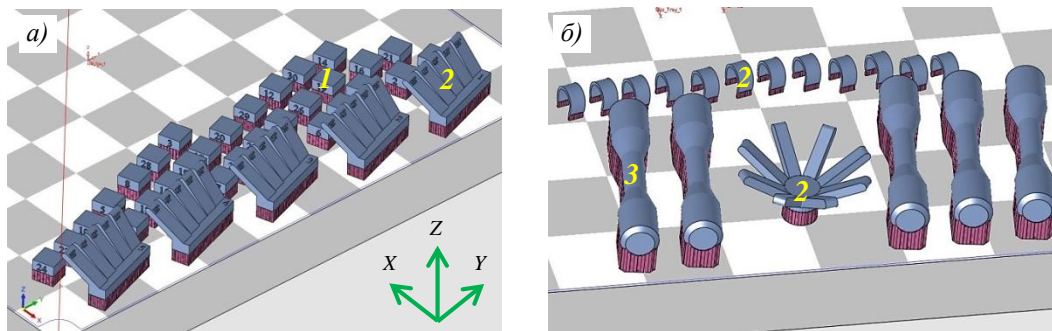


Рис. 2. Примеры экспериментальных образцов (в виде САD-моделей) для отработки режимов синтеза сплава ВАС1 – основного металла и поддержек (1), поверхностных элементов (2), а также образцы для механических испытаний (3)

Микроструктурный анализ образцов выполнен методом световой микроскопии на металлографическом микроскопе при увеличениях $\times 100$ и $\times 200$. Травление микрошлифов для выявления структурных составляющих осуществляли в растворе Келлера. Объемную долю несплошностей (пористость p , %) определяли на основе количественного анализа изображений нетравленных микрошлифов в автоматическом режиме с помощью специализированного программного обеспечения (ПО). Механические испытания при растяжении проводили на стандартных образцах типа II по ГОСТ 1497–2023. Шероховатость поверхности образцов оценивали на основе визуального осмотра и путем определения параметра R_a по ГОСТ 2789–73 на конфокальном лазерном микроскопе в режиме 3D-сканирования рельефа поверхности.

Отклонение геометрической формы изготовленной опытной детали от геометрической формы САD-модели измеряли путем бесконтактного сканирования поверхностей на измерительной машине с созданием графической карты отклонений с допуском $\pm 0,5$ мм с использованием специализированного ПО. Рентгенографический контроль внутренних дефектов опытной детали осуществляли методом рентгеновской компьютерной томографии с использованием специализированного ПО, который включал три основных этапа [2]:

- получение набора проекционных изображений объекта;
- реконструкцию, в ходе которой генерируется трехмерная модель объекта и определяются значения ослабления рентгеновского излучения в каждой точке;
- исследование модели объекта.

Результаты и обсуждения

Исследование качества экспериментальных образцов из сплава ВАС1

Основными критическими (недопустимыми) дефектами, возникающими в материале при СЛС, являются трещины, несплавления и крупные поры (размером >150 мкм). Во избежание их образования необходимо проводить рациональный выбор режима синтеза основного металла на основе комплексных исследований, которые включают изучение особенностей формирования структуры материала при синтезе, анализ зависимости пористости от плотности энергии E , исследование свойств и др. [21–27].

Плотность энергии E характеризует величину тепловложения в синтезируемый материал. При недостаточном тепловложении происходит неполное расплавление МПК, что приводит к нарушению стабильности ванны расплава и образованию несплошностей (несплавлений). При избыточном тепловложении в материале значительно

повышается количество крупных газовых пор. Из опыта работы и научно-технических литературных данных известно, что величина E для сплавов типа AlSi10Mg должна находиться в интервале от 40 до 100 Дж/мм³ во избежание образования указанных дефектов [5, 6, 13–15].

На образование тех или иных дефектов влияют особенности формирования ванн расплава, каждая из которых образует после кристаллизации микросварной шов (трек). Поэтому при выборе режима синтеза также учитывается его влияние:

- на размер (глубина, ширина) и форму поперечного сечения трека, в частности на его отклонение от сферичности (отношение глубины ванны к полуширине);
- на стабильность образования ванн расплава и формирование трека, который не должен иметь разрывов по всей длине и значительно менять форму поперечного сечения;
- на взаимное расположение треков, в частности на их перекрытие (часть ширины трека, переплавляемая следующим треком в текущем слое).

На рис. 3 приведены выявленные с помощью световой микроскопии характерные изображения микроструктуры материала в верхних слоях образца. Материал имеет типичную после СЛС «трековую» структуру, сформированную в результате наложения треков при сплавлении МПК под воздействием лазера. Видно, что формирование единичного трека зависит от мощности лазера P и скорости сканирования v при постоянных параметрах s и t . С ростом плотности энергии E увеличивается тепловой поток вглубь материала и, соответственно, продолжительность существования ванны расплава, глубина проплавления металла, а также ширина и перекрытие треков. При этом размер ванны зависит в первую очередь от скорости сканирования v . На треках малых размеров возростала вероятность разрывов.

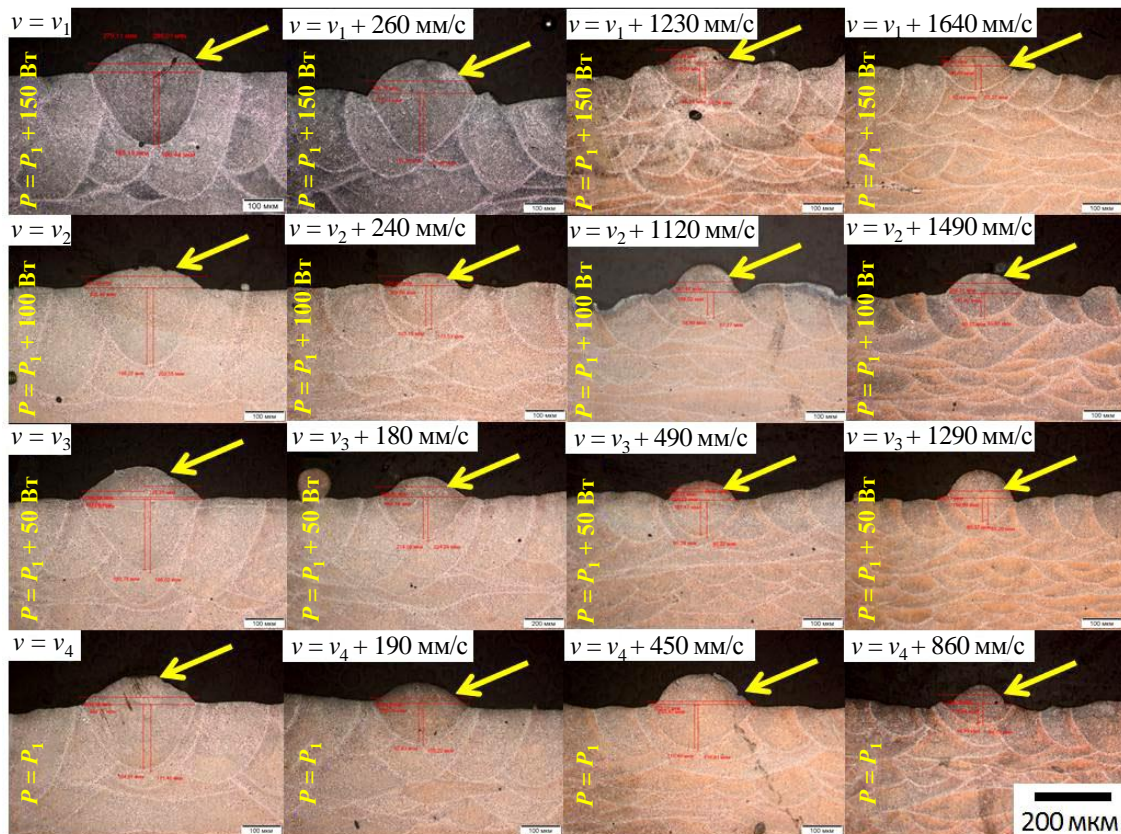


Рис. 3. Влияние режима синтеза (v – скорость сканирования, P – мощность лазера) на формирование единичного трека при селективном лазерном сплавлении в экспериментальных образцах из сплава ВАС1 (стрелками указано расположение единичных треков)

Проведенное исследование определяет широкое «энергетическое окно» допустимых режимов экспонирования основного металла ($E = 55 \div 80$ Дж/мм³). При этом для всех рассмотренных режимов трещины и несплавления в структуре полностью отсутствуют, что свидетельствует о высокой технологичности сплава при СЛС (рис. 4). Основным дефектом являются крупные поры округлой формы различных размеров при повышенных значениях E (рис. 4, б). Таким образом, разработан высокопроизводительный режим печати ($BR = 36$ см³/ч), обеспечивающий получение качественного материала и используемый в дальнейшем в качестве режима экспонирования основного металла.

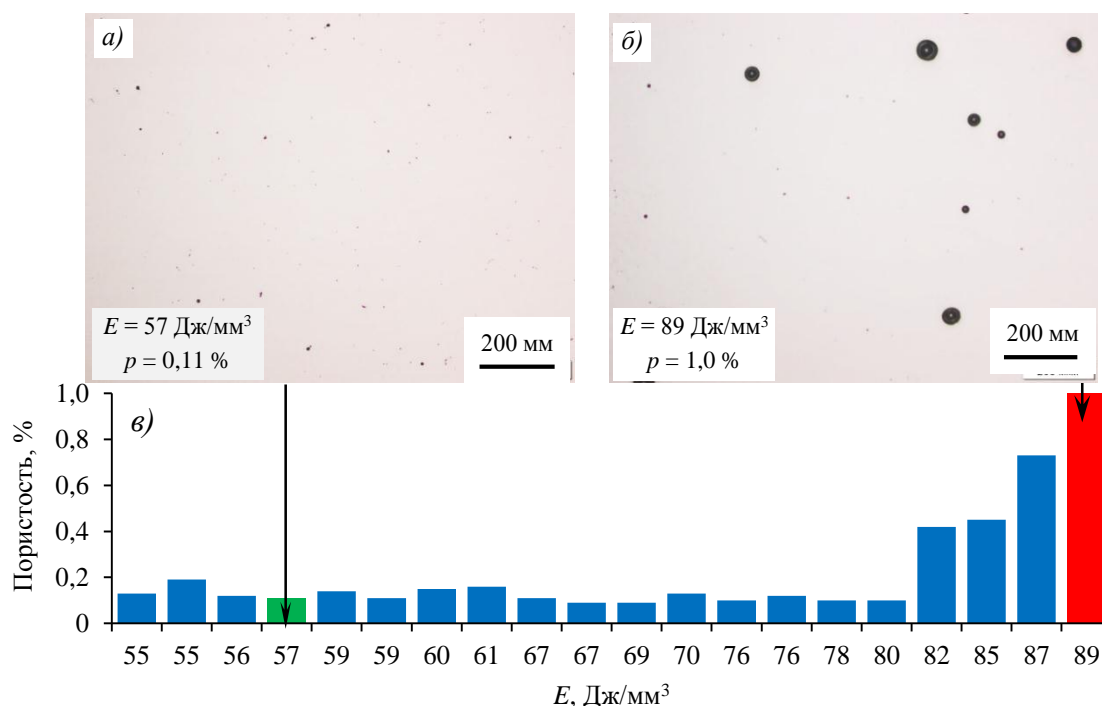


Рис. 4. Влияние режима синтеза на пористость синтезированного сплава VAC1: а, б – изображения микроструктуры; в – влияние плотности энергии E на величину пористости p

Установлено, что синтезированный материал в исходном состоянии имеет достаточно высокий уровень прочности (σ_b – до 560 МПа) (рис. 5, а, табл. 1) при относительно хорошей пластичности (по сравнению с отливками), что указывает на высокое качество полученного материала. Высокая прочность сплава обусловлена получением благоприятной структуры после высокоскоростной кристаллизации при СЛС, что позволяет повысить эффективность действия ряда механизмов упрочнения [17]. Наблюдается относительно широкий диапазон значений свойств в исходном состоянии, что, как правило, типично для материала после СЛС. Выявлена тенденция к более низким значениям предела текучести и относительного удлинения в направлении Z по сравнению с направлением XU (анизотропия): $\sigma_{0,2}$ в среднем меньше на 11 %, а δ – на 20 %.

Детали, полученные методом СЛС, для ответственного применения необходимо подвергать стабилизирующей термической обработке, обеспечивающей устранение высокого уровня остаточных напряжений в результате синтеза, а также способствующей повышению пластичности материала и снижению анизотропии свойств. Однако высокотемпературное термическое воздействие на синтезированный материал из данного типа сплава приводит к его значительному разупрочнению. Тем не менее для термически упрочняемого сплава VAC1 это возможно нивелировать за счет использования эффекта

упрочнения по механизму дисперсионного твердения, реализуемого в случае применения закалки и искусственного старения на состояние Т6. Установлено, что после такой термообработки сплав обеспечивает требуемый уровень механических характеристик ($\sigma_B \geq 385$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 315$ МПа, $\delta \geq 5,8$ %), при этом практически устраняется анизотропия по прочности (рис. 5, б, табл. 1) и повышается термическая стабильность материала.

Следует отметить незначительное увеличение пористости в синтезированном материале во время термической обработки, что, по-видимому, обусловлено выделением газообразного водорода в результате высокотемпературного нагрева под закалку.

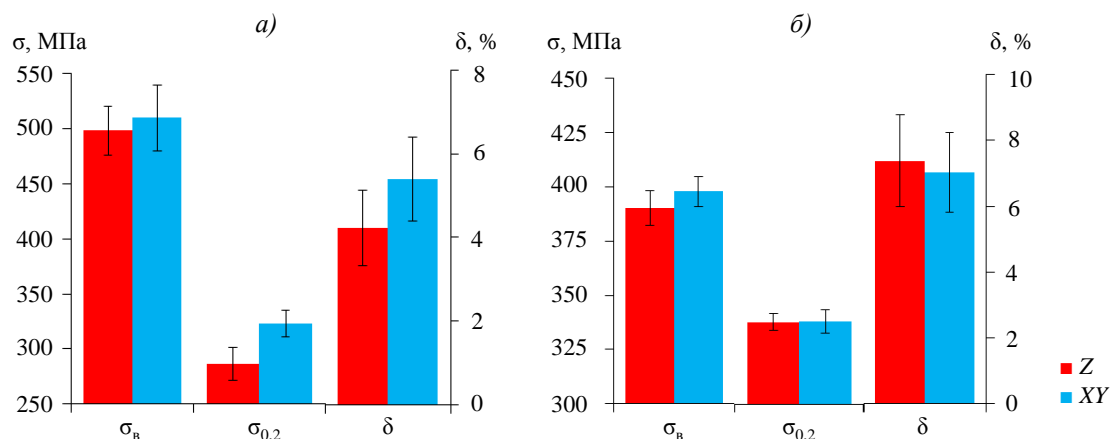


Рис. 5. Механические свойства экспериментальных образцов из синтезированного сплава ВАС1 ($E = 57$ Дж/мм³) в исходном состоянии (а) и после закалки + искусственного старения (б)

Таблица 1

Механические свойства и пористость (средние значения) экспериментальных образцов из синтезированного сплава ВАС1 в зависимости от состояния материала и направления выращивания

Состояние материала	Направление выращивания	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	Пористость, %
		МПа			
В исходном состоянии	Z	500	285	4,2	0,19
	XY	510	325	5,4	
Закалка + искусственное старение (Т6)	Z	390	325	7,4	0,43
	XY	400	325	7,0	

Технологию СЛС, как правило, применяют для изготовления деталей со сложной геометрической формой поверхности, к которой предъявляются высокие требования по шероховатости. Шероховатость поверхности заготовки детали после СЛС может быть относительно высокой вследствие особенностей ее формирования в процессе послойного синтеза и налипания окружающего нерасплавленного порошка. Это приводит к дополнительным затратам при механической обработке для получения требуемого качества поверхности. Кроме того, в результате синтеза у поверхности заготовок, как правило, формируется область повышенной (приконтурной) пористости (рис. 6, б), что может оказывать негативное влияние как на усталостные характеристики, так и на коррозионную стойкость материала.

В связи с этим обеспечение минимальных значений шероховатости поверхности и приконтурной пористости – важнейшая задача при разработке технологии СЛС для серийных деталей. Для ее решения проводится отработка технологических параметров синтеза различных поверхностных элементов, что является достаточно трудоемким процессом [1, 11].

Шероховатость определяется размером и формой ванны расплава контурного элемента, которая зависит в первую очередь от толщины насыпного слоя, скорости сканирования, мощности лазера, отступа ванны от поверхности (рис. 6, а, б). Участок ванны расплава, выходящий на поверхность, во многом определяет ее шероховатость и зависит от угла наклона поверхности. Поверхности, близкие к нормали относительно платформы построения, как правило, имеют значительно меньшую шероховатость, чем поверхности с большими углами наклона. Это обусловлено увеличением длины «ступеньки» при смещении последующего слоя с уменьшением угла наклона относительно платформы построения.

К поверхностным элементам относят: стандартный (вертикальный) контур; контур верхней поверхности (*upskin*), обращенной плоскостью от платформы построения; контур нижней поверхности (*downskin*), обращенной плоскостью на платформу построения. Минимальная шероховатость обеспечивается на поверхности *upskin*, а наибольшая – на поверхности *downskin*, промежуточные значения достигаются на наклонных поверхностях. Основное внимание уделяется анализу шероховатости поверхностей для стандартного контура и для поверхности *downskin*, на которой также характерна повышенная приконтурная пористость (рис. 6, в).

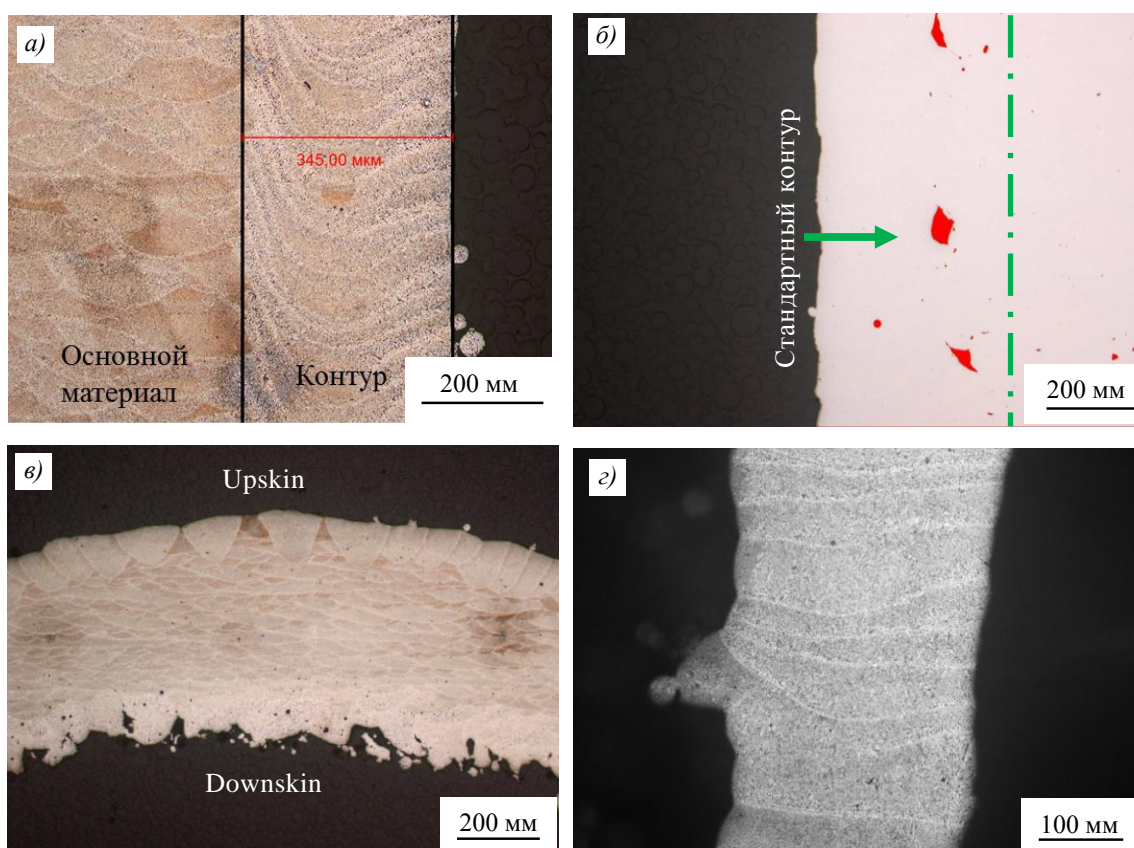


Рис. 6. Микроструктура поверхностных элементов (а–в) и технологических поддержек (д) из синтезированного сплава ВАС1: а – стандартный контур; б – приконтурная пористость; в – *upskin* и *downskin*

Разработку и выбор режимов экспонирования поверхностных элементов проводили на основе исследований специальных образцов (рис. 2). На рис. 7 в качестве примера представлены некоторые полученные зависимости шероховатости поверхности и приконтурной пористости от параметров синтеза. Из анализа полученных результатов

определены режимы синтеза поверхностных элементов, при которых достигается наименьшее значение параметра шероховатости R_a (<7 мкм) и приконтурной пористости ($<0,3$ %).

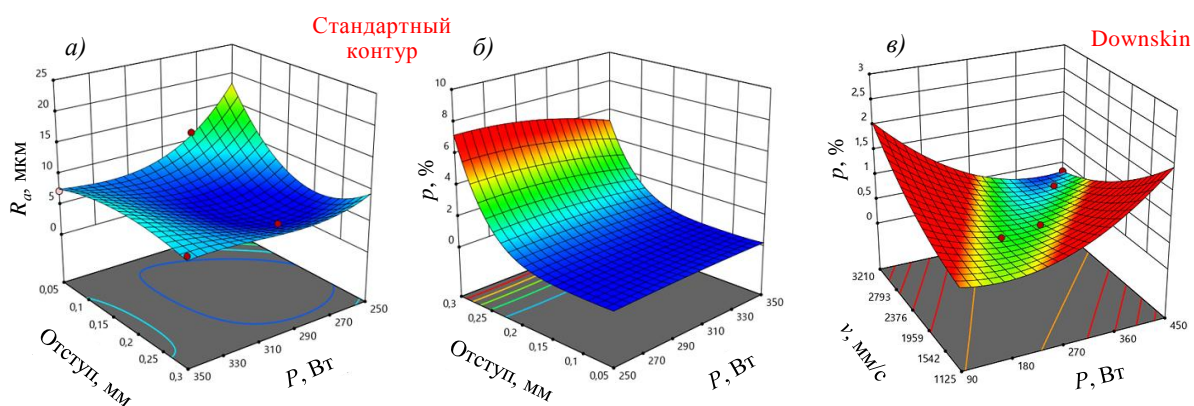


Рис. 7. Графики зависимости параметра шероховатости поверхности R_a (а) и приконтурной пористости (б, в) от параметров синтеза

Поддерживающие структуры (поддержки) являются важными элементами в технологическом процессе СЛС, особенно при производстве деталей сложной формы [2]. Поддержки предназначены для выполнения следующих функций:

- удержание нависающих частей объекта, не имеющих опоры на материал, сплавленный в нижележащих слоях;
- фиксация объекта на платформе построения во избежание его перемещения при нанесении порошка;
- обеспечение равномерного и достаточно быстрого теплоотвода от места печати.

После процесса СЛС поддерживающие структуры удаляются от заготовки детали с помощью механической обработки.

При проектировании поддерживающих структур необходимо учитывать ряд особенностей. Поддержки синтезируются единичным прохождением лазера (без перекрытия) по порошку с использованием различных стратегий штриховки. Расстояние между поддержками и их конфигурация влияют на их время построения и трудоемкость при дальнейшей механической обработке детали. Проход лазерного луча на каждом новом слое происходит по одному и тому же месту, при этом меньший теплоотвод в материале поддержки, по сравнению с основным металлом, может значительно повлиять на пористость и ширину трека. Поддержки являются довольно тонкими элементами, в которых возникают высокие внутренние напряжения в процессе синтеза, поэтому их проектирование необходимо проводить обоснованно с учетом обеспечения критерия достаточной прочности. Время, затрачиваемое на построение поддержек, может занимать половину времени построения в случае получения сложнопрофильных деталей.

Выбор оптимальных режимов синтеза поддержек из сплава ВАС1 (рис. 6, з) в данной работе проведен на основании влияния мощности и скорости сканирования на особенности формирования единичного трека при условии соблюдения ряда требований, в том числе:

- обеспечение формирования стабильного трека для получения плотного материала с достаточной прочностью;
- минимизация количества поддержек и обеспечение высокой скорости экспонирования для повышения производительности процесса печати.

Исследование качества опытной детали типа кронштейн из сплава ВАС1

С учетом конструкторских требований, методов проектирования для аддитивного метода и прочностных характеристик материала спроектирована 3D-модель детали (типа кронштейн) для крепления носового обтекателя вертолета (рис. 8). С помощью специализированного ПО выбрана ориентация детали на платформе построения и спроектирована система технологических поддержек с учетом минимизации внутренних напряжений при синтезе и времени печати.

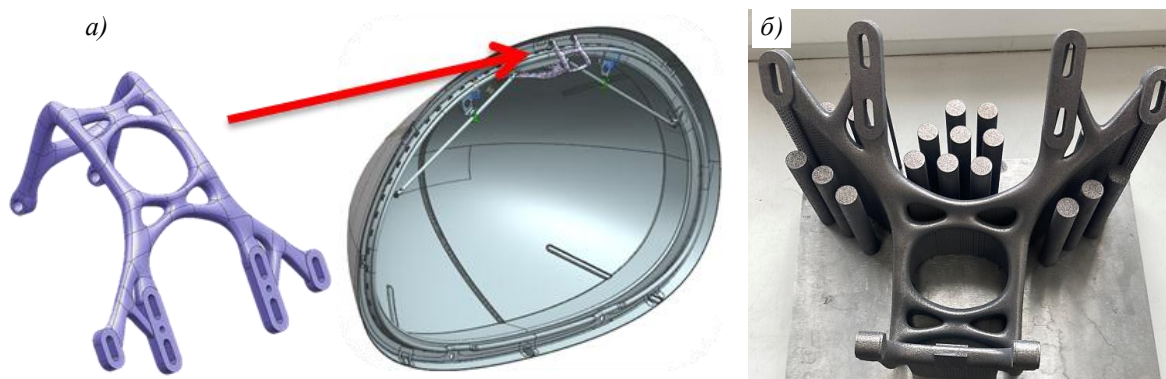


Рис. 8. CAD-модель детали для носового обтекателя вертолета (а) и внешний вид заготовки детали с образцами-свидетелями на платформе построения после термообработки (б)

Технологический цикл изготовления опытной детали из сплава ВАС1 состоял из трех основных этапов:

- синтез заготовки детали с образцами-свидетелями на платформе построения;
- упрочняющая термическая обработка (закалка + искусственное старение) по серийному режиму (рис. 8, б) [15];
- финишная (механическая) обработка, включающая отделение заготовок от платформы построения, удаление технологических поддержек и поверхностную обработку для достижения требуемой чистоты поверхности.

При этом термообработка проходила без предварительного отделения от платформы построения с целью снижения коробления детали при закалке за счет жесткой фиксации детали с помощью технологических поддержек.

Оценку качества полученной детали проводили на основе результатов рентгеновской компьютерной томографии и металлографического анализа образцов-свидетелей. Подтверждено отсутствие в материале таких критических дефектов, как трещины, несплавления, крупные поры (рис. 9). Анализ геометрической формы бесконтактным методом показал, что отклонение размеров детали от 3D-модели не превышает допустимые значения. Небольшие отклонения в отдельных локальных участках обусловлены незначительным короблением детали вследствие внутренних напряжений, неизбежно возникающих при синтезе и при термической обработке (закалочном охлаждении).

Сплав ВАС1 в термически обработанном состоянии при допустимой пористости ($p < 0,46$ %) демонстрирует оптимальный комплекс механических характеристик ($\sigma_b \geq 390$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 310$ МПа, $\delta \geq 6$ %), превышающий в 1,5–2 раза свойства традиционного сплава АК7ч. (А356, А357), применяемого для получения аналогичной детали из отливки, а также более чем на 20 % прочность того же сплава, полученного методом СЛС (табл. 2).

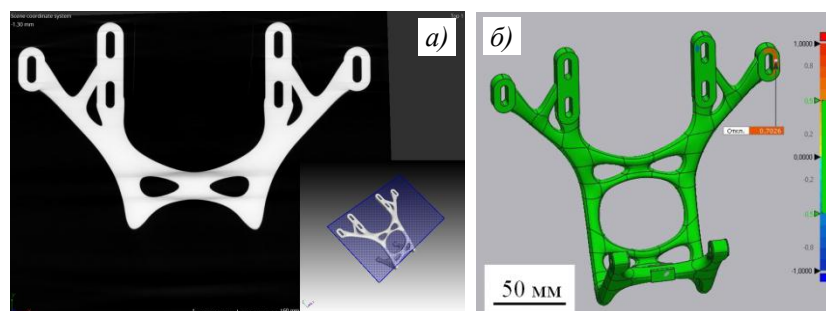


Рис. 9. Результаты рентгеновской компьютерной томографии (а) и графическая карта отклонений (б) готовой опытной детали из сплава ВАС1

Таблица 2

**Механические свойства (минимальные значения)
образцов-свидетелей из синтезированного сплава ВАС1 (в направлении Z)
в сравнении с научно-техническими литературными данными
для сплавов-аналогов по применению**

Сплав	Технология изготовления	Состояние материала	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
			МПа		
ВАС1	СЛС	В исходном состоянии	480	270	3
		Закалка + искусственное старение (Т6)	390	310	6
АК7ч. (А356, А357) [28–33]	Литье	В исходном состоянии	155	–	2
		Закалка + искусственное старение (Т6)	235	205	2

Механические свойства образцов-свидетелей (в направлении Z) соответствуют требуемым, однако следует отметить незначительное снижение значений прочности (на 5–7 %) по сравнению с экспериментальными образцами, что требует отдельных исследований.

Заключения

Представлены результаты исследований, полученные при освоении перспективного алюминиевого сплава марки ВАС1 для изготовления деталей вертолетной техники методом СЛС:

- на основе комплексного подхода при проведении экспериментальных исследований разработаны технологические режимы синтеза основного металла, поверхностных элементов и поддерживающих структур с обеспечением высокой производительности печати (для основного металла $BR = 36 \text{ см}^3/\text{ч}$) и достижением требуемых показателей качества материала (механические свойства, пористость);

- установлено, что в исходном состоянии материал демонстрирует высокий уровень кратковременной прочности ($\sigma_b \geq 480 \text{ МПа}$), однако имеется анизотропия механических свойств: предел текучести в направлении Z в среднем меньше на 11 %, а относительное удлинение (δ) – на 20 % по сравнению с аналогичными показателями в направлении XY. После термической обработки (состояние Т6) достигается выравнивание свойств, но наблюдается небольшое увеличение пористости;

- сплав в термически обработанном состоянии характеризуется хорошим комплексом механических характеристик ($\sigma_b \geq 390 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} \geq 310 \text{ МПа}$, $\delta \geq 6 \%$), превышающим в 1,5–2 раза свойства сплава-аналога по применению АК7ч. (А356, А357), что позволяет рекомендовать его для снижения массы конструкции с учетом преимуществ проектирования по аддитивной технологии СЛС;

– опробовано изготовление опытной детали типа кронштейн, спроектированной с использованием топологической оптимизации, с допустимыми отклонениями геометрической формы и без критических дефектов. Деталь успешно прошла стендовые испытания в составе узла изделия на статическую прочность и усталостную долговечность.

Полученные в данной работе результаты позволили изготовить необходимый перечень аналогичных деталей из сплава ВАС1, а также успешно провести общую квалификацию (паспортизацию) синтезированного материала, полученного на новой установке.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 года») [34, 35].

Статья подготовлена на основе материалов доклада, представленного на IX Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (АНТЭ-2024) [36].

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалисту НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ Кузнецовой П.Е. за большой вклад в проведенные исследования.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М. и др. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электromеталлургия*. 2022. № 1. С. 2–12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М. и др. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 2. Компенсация и контроль отклонений, ГИП и термическая обработка // *Электromеталлургия*. 2022. № 2. С. 2–12.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В. и др. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электromеталлургия*. 2022. № 4. С. 15–25.
4. Захаров В.В. Алюминиевые сплавы для аддитивных технологий // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2021. № 5 (791). С. 3–8.
5. Рябов Д.К., Грушин И.А., Сеферян А.Г. Некоторые особенности формирования структуры и свойств новых алюминиевых сплавов при аддитивном производстве // *Станкоинструмент*. 2022. № 1 (26). С. 44–51.
6. 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.
7. Zhu Z., Hu Z., Li H. et al. Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2023. Vol. 190. P. 104047.
8. Montanari R., Palombi A., Richetta M., Varone A. Additive manufacturing of aluminum alloys for aeronautic applications: Advantages and problems // *Metals*. 2023. Vol. 13. No. 4. P. 716.
9. Rometsch P., Jia Q., Yang K.V., Wu X. Aluminum alloys for selective laser melting-towards improved performance // *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Elsevier, 2019. P. 301–325.
10. Blakey-Milner B., Du Plessis A., Gradl P. et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review // *Materials & Design*. 2021. Vol. 209. P. 110008.
11. Бакрадзе М.М., Роголев А.М., Сухов Д.И., Асланян Г.Г. Особенности формирования поверхности методом селективного лазерного сплавления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022. № 2 (800). С. 40–48.

12. Сухов Д.И., Неруш С.В., Беляков С.В., Мазалов П.Б. Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства // Известия вузов. Машиностроение. 2017. № 9 (690). С. 73–84.
13. Иванова А.О., Заводов А.В., Дынин Н.В., Фомина М.А. Эффективность введения малых добавок переходных металлов в сплавы типа AlSi10Mg, предназначенные для получения изделий по технологии селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2017. № 7 (55). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-1-1.
14. Дынин Н.В., Заводов А.В., Оглодков М.С., Хасиков Д.В. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1.
15. Dynin N.V., Antipov V.V., Khasikov D.V., Benarieb I., Zavodov A.V., Evgenov A.G. Structure and mechanical properties of an advanced aluminium alloy AlSi10MgCu (Ce, Zr) produced by selective laser melting // Materials Letters. 2021. Vol. 284. Art. 128898. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128898.
16. Козлов И.А., Волков И.А., Фомина М.А., Захаров К.Е. Особенности химического оксидирования полуфабрикатов, полученных методом селективного лазерного сплавления из металлопорошковой композиции сплава ВАС1 // Труды ВИАМ. 2023. № 11 (129). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения: 11.02.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-90-98.
17. Бенариеб И., Дынин Н.В., Кузнецова П.Е., Сбитнева С.В. Изменение структуры и механических свойств при термической обработке алюминиевого сплава AlSi10MgCu, полученного методом селективного лазерного сплавления // Технология легких сплавов. 2023. № 4. С. 5–18.
18. Щетинина Н.Д., Кузнецова П.Е., Дынин Н.В., Селиванов А.А. Сплавы на основе алюминия с добавками скандия и циркония в аддитивном производстве (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 3 (64). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 14.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
19. Сбитнева С.В., Зайцев Д.В., Бенариеб И. Особенности структуры термически упрочняемого алюминиевого сплава AlSi10MgCu, полученного методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения: 21.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-15-24.
20. Князев А.Е., Востриков А.В. Рассев порошков в аддитивном и гранульном производствах (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 11 (93). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
21. Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Коберник Н.В., Филимонов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учеб. пособие для вузов. М.: Юрайт, 2020. 115 с.
22. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: НАМИ, 2015. 220 с.
23. Морозова Л.В., Раевских А.Н. Исследование методами микроскопии дефектов в металлических материалах, полученных селективным лазерным сплавлением // Вестник машиностроения. 2019. № 10. С. 74–79.
24. Мовенко Д.А., Шуртаков С.В. Причины образования микротрещин и снижение плотности их распределения в изделиях из никелевых жаропрочных сплавов, изготовленных методом СЛС (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.04.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
25. Лаптева М.А., Белова Н.А., Раевских А.Н., Филонова Е.В. Исследование зависимости шероховатости, морфологии поверхности и количества дефектов структуры от мощности лазера, скорости сканирования и типа штриховки в жаропрочном сплаве, синтезированном методом СЛС // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-9-9.

26. Караваев А.К., Пучков Ю.А. Исследование структуры и свойств сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2020. № 5 (134). С. 71–85.
27. Григорьянц А.Г., Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О. Влияние основных параметров процесса селективного лазерного плавления на стабильность формирования единичных дорожек при выращивании изделий из медных сплавов // Известия вузов. Машиностроение. 2019. № 6 (711). С. 20–29.
28. Vanzetti M., Virgillito E., Aversa A. et al. Short heat treatments for the F357 aluminum alloy processed by laser powder bed fusion // Materials. 2021. Vol. 14. No. 20. P. 6157.
29. Yang K.V., Rometsch P., Davies C.H.J. et al. Effect of heat treatment on the microstructure and anisotropy in mechanical properties of A357 alloy produced by selective laser melting // Materials & Design. 2018. Vol. 154. P. 275–290.
30. Lorusso M., Trevisan F., Calignano F. et al. A357 Alloy by LPBF for industry applications // Materials. 2020. Vol. 13. No. 7. P. 1488.
31. Pereira J.C., Gil E., Solaberrieta L. et al. Comparison of AlSi7Mg0.6 alloy obtained by selective laser melting and investment casting processes: Microstructure and mechanical properties in as-built/as-cast and heat-treated conditions // Materials Science and Engineering: A. 2020. Vol. 778. P. 139124.
32. Ponnusamy P., Rashid R.A.R., Masood S.H. et al. Mechanical properties of SLM-printed aluminium alloys: a review // Materials. 2020. Vol. 13. No. 19. P. 4301–4351.
33. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ. Т. 4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Ч. 2: Литейные алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия, 2008. С. 58–59.
34. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 8. С. 7–17.
35. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
36. Бенариев И., Савичев И.Д., Хасиков Д.В., Оглодков М.С. Опыт изготовления деталей вертолетной техники методом селективного лазерного сплавления из алюминиевого сплава ВАС1 // Мат. IX Всерос. науч.-технич. конф. «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2024)». Казань, 2024. С. 61–62.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M. et al. New-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts by FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1. pp. 2–12.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M. et al. New-generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts by FSUE VIAM. Part 2. Compensation and control of deviations, GIP and heat treatment. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 2, pp. 2–12.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V. et al. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts FSUE «VIAM». Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 15–25.
4. Zakharov V.V. Aluminum alloys for additive technologies. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2021, no. 5 (791), pp. 3–8.
5. Ryabov D.K., Grushin I.A., Seferyan A.G. Some features of the formation of the structure and properties of new aluminum alloys in additive manufacturing. *Stankoinstrument*, 2022, no. 1 (26), pp. 44–51.
6. Popkova I.S., Zolotarevsky V.S., Solonin A.N. Production of products from aluminum and its alloys by selective laser melting. *Tekhnologiya legkikh spлавov*, 2015, no. 4, pp. 14–24.
7. Zhu Z., Hu Z., Li H. et al. Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, vol. 190, p. 104047.

8. Montanari R., Palombi A., Richetta M., Varone A. Additive manufacturing of aluminum alloys for aeronautic applications: Advantages and problems. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 4, p. 716.
9. Rometsch P., Jia Q., Yang K.V., Wu X. Aluminum alloys for selective laser melting-towards improved performance. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Elsevier, 2019, pp. 301–325.
10. Blakey-Milner B., Du Plessis A., Gradl P. et al. Metal additive manufacturing in aerospace: a review. *Materials & Design*, 2021, vol. 209, p. 110008.
11. Bakradze M.M., Rogalev A.M., Sukhov D.I., Aslanyan G.G. Features of surface formation by selective laser melting. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2022, no. 2 (800), pp. 40–48.
12. Sukhov D.I., Nerush S.V., Belyakov S.V., Mazalov P.B. Study of surface layer roughness parameters and manufacturing accuracy of additive manufacturing products. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*, 2017, no. 9 (690), pp. 73–84.
13. Ivanova A.O., Zavodov A.V., Dynin N.V., Fomina M.A. Efficiency of complex alloying AlSi10Mg type alloy with transition metals for selective laser melting technologies. *Trudy VIAM*, 2017, no. 7 (55), paper no. 1. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-1-1.
14. Dynin N.V., Zavodov A.V., Oglodkov M.S., Khasikov D.V. The influence of process parameters of selective laser melting on the structure of aluminum alloy Al–Si–Mg system. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-1-1.
15. Dynin N.V., Antipov V.V., Khasikov D.V., Benarieb I., Zavodov A.V., Evgenov A.G. Structure and mechanical properties of an advanced aluminium alloy AlSi10MgCu (Ce, Zr) produced by selective laser melting. *Materials Letters*, 2021, vol. 284, art. 128898. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128898.
16. Kozlov I.A., Volkov I.A., Fomina M.A., Zakharov K.E. Features of chemical oxidation of semi-finished products obtained by selective laser melting from a metal powder composition of the alloy VAS1. *Trudy VIAM*, 2023, no. 11 (129), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 11, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-90-98.
17. Benarieb I., Dynin N.V., Kuznetsova P.E., Sbitneva S.V. Changes in the structure and mechanical properties during heat treatment of aluminum alloy AlSi10MgCu obtained by selective laser melting. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2023, no. 4, pp. 5–18.
18. Shchetinina N.D., Kuznetsova P.E., Dynin N.V., Selivanov A.A. Aluminum alloys with additions of Sc and Zr in additive manufacturing (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 14, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-19-34.
19. Sbitneva S.V., Zaytsev D.V., Benarieb I. Features of the structure of age-hardenable aluminum alloy AlSi10MgCu produced by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 21, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-15-24.
20. Knyazev A.E., Vostrikov A.V. Sieving of powders additive and powder manufacturings (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 11 (93), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-11-20.
21. Galinovsky A.L., Golubev E.S., Kobernik N.V., Filimonov A.S. *Additive technologies in the production of aerospace products: a textbook for universities*. Moscow: Yurait, 2020, 115 p.
22. Zlenko M.A. *Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers*. Moscow: NAMI, 2015, 220 p.
23. Morozova L.V., Raevskikh A.N. Study of defects in metallic materials obtained by selective laser melting using microscopy methods. *Vestnik mashinostroyeniya*, 2019, no. 10, pp. 74–79.
24. Movenko D.A., Shurtakov S.V. Microcrack formation and controlling in nickel superalloys processed by selective laser melting (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.

25. Lapteva M.A., Belova N.A., Raevskih A.N., Filonova E.V. Dependence of roughness, surface morphology structure and number of defects on the power of the laser, scanning speed and the type of hatching in the high-temperature alloys synthesized by SLS. *Trudy VIAM*, 2016, no. 9 (45), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 17, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-9-9.
26. Karavaev A.K., Puchkov Yu.A. Study of the structure and properties of the AlSi10Mg alloy obtained by selective laser melting. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroyenie*, 2020, no. 5 (134), pp. 71–85.
27. Grigoryants A.G., Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O. Influence of the main parameters of the selective laser melting process on the stability of the formation of single tracks when growing products from copper alloys. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyenie*, 2019, no. 6 (711), pp. 20–29.
28. Vanzetti M., Virgillito E., Aversa A. et al. Short heat treatments for the F357 aluminum alloy processed by laser powder bed fusion. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 20, p. 6157.
29. Yang K.V., Rometsch P., Davies C.H.J. et al. Effect of heat treatment on the microstructure and anisotropy in mechanical properties of A357 alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 2018, vol. 154, pp. 275–290.
30. Lorusso M., Trevisan F., Calignano F. et al. A357 Alloy by LPBF for industry applications. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 7, p. 1488.
31. Pereira J.C., Gil E., Solaberrieta L. et al. Comparison of AlSi7Mg0.6 alloy obtained by selective laser melting and investment casting processes: Microstructure and mechanical properties in as-built/as-cast and heat-treated conditions. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 778, p. 139124.
32. Ponnusamy P., Rashid R.A.R., Masood S.H. et al. Mechanical properties of SLM-printed aluminium alloys: a review. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 19, pp. 4301–4351.
33. *Aviation materials: a reference book in 13 volumes*. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., rev. and add. Moscow: VIAM, vol. 4: Aluminum and beryllium alloys, part 2: Cast aluminum alloys and beryllium-based alloys, 2008, pp. 58–59.
34. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
35. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
36. Benarieb I., Savichev I.D., Khasikov D.V., Oglodkov M.S. Experience in manufacturing helicopter parts by selective laser melting from aluminum alloy VAS1. *Proc. IX All-Rus. Sc. and Tech. Conf. «Problems and Prospects for the Development of Aviation, Ground Transport and Energy (ANTE-2024)»*. Kazan, 2024, pp. 61–62.

Информация об авторах

Бенариеб Ильяс, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Савичев Илья Дмитриевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Хасиков Дмитрий Владимирович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Денисов Анатолий Михайлович, начальник участка, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ilyas Benarieb, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ilya D. Savichev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitriy V. Khasikov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Anatoly M. Denisov, Head of Production Area, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 17.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.03.2025.

The article was submitted 17.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 27.03.2025.