

Научная статья

УДК 669.295

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-14-27

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОРИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ VT1-00 И VT6

А.А. Ширяев¹, А.А. Арисланов¹, С.В. Путырский¹, Н.Ф. Востриков¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследований структуры и физико-механических свойств пористых полуфабрикатов, изготовленных методом спекания в вакуумных печах из порошков титановых сплавов марок VT1-00 и VT6. Показано, что разработанный режим обеспечивает уровень механических свойств и степень пористости полуфабрикатов, достаточные для применения в авиационно-космической отрасли, энергетике и пищевой промышленности. Изготовлены образцы изделий из пористых полуфабрикатов титановых сплавов VT1-00 и VT6 с применением технологии высокотемпературной пайки для формирования неразъемных соединений.

Ключевые слова: титановые сплавы, пористые полуфабрикаты, термическая обработка, микроструктура, рентгеновская компьютерная томография, механические свойства

Для цитирования: Ширяев А.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Востриков Н.Ф. Опыт применения отходов аддитивного производства при изготовлении пористых полуфабрикатов из титановых сплавов VT1-00 и VT6 // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-14-27.

Scientific article

EXPERIENCE OF USING ADDITIVE MANUFACTURING WASTE IN THE PRODUCTION OF POROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM TITANIUM ALLOYS VT1-00 AND VT6

A.A. Shiryayev¹, A.A. Arislanov¹, S.V. Putyrskiy¹, N.F. Vostrikov¹

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 article presents the results of studies of the structure and physical and mechanical properties of porous half-blanks manufactured by sintering in vacuum furnaces from powder of VT1-00 and VT6 titanium alloys. It is shown that the designed mode provides the level of mechanical properties and the degree of porosity of semi-finished products sufficient for use in the aerospace industry, energy and food industries. Samples of products were manufactured from porous semi-finished products of titanium alloys VT1-00 and VT6 using high-temperature soldering technology to form permanent joints.

Keywords: titanium alloys, cellular semi-finished products, heat treatment, microstructure, X-ray computed tomography, mechanical properties

For citation: Shiryayev A.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Vostrikov N.F. Experience of using additive manufacturing waste in the production of porous semi-finished products from titanium alloys VT1-00 and VT6. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-14-27.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается повышенный интерес к пористым металлам и пенометаллам, которые, помимо своей низкой массы, обусловленной высокой пористостью, обладают рядом преимуществ по технологическим свойствам и возможностям применения [1, 2].

В общем виде пористый металл – это металлическая пена из технически чистых металлов или сплавов либо ячеистая структура, содержащая большое количество равномерно распределенных по объему пор, заполненных газом, и перемычек из металла. При этом пористость может быть как открытого, так и закрытого типа, что определяет физико-механические и эксплуатационные свойства пористого металла, а также области его применения. Характер распределения пористости, форма и объемная доля пор и плотность материала во многом взаимосвязаны с типом сырья и применяемой технологией изготовления пористого металла.

Потенциал и области применения пенометаллов на основе различных металлов необычайно широки и разнообразны, что обусловлено возможностью управления комплексом их характеристик. В зависимости от своей структуры и конфигурации пор пенометалл по сравнению с деформированным полуфабрикатом имеет крайне низкую регулируемую плотность и может обладать высоким уровнем удельных механических свойств, а также высокой демпфирующей способностью и шумопоглощением, низкой тепло- и электропроводностью [1]. Пористые металлы имеют большие перспективы применения в качестве материалов конструкционного и функционального назначения в авиационно-космической и военной промышленности, пищевой отрасли, строительстве, автомобилестроении и медицине [3] для изготовления фильтров для очистки бытовой воды, промышленных стоков, газов и аэраторов различного назначения, сэндвич-панелей для обшивки пола, перегородок, тепло-, шумо- и вибропоглощающих панелей, амортизирующих элементов для гашения энергии [4], электродов для вторичных аккумуляторов и топливных элементов, теплообменников, биосовместимых медицинских имплантатов [5–7].

Существует несколько наиболее распространенных технологий изготовления пенометаллов [8], в том числе посредством спекания металлопорошковых композиций с применением порообразующих веществ или без него [9–11], горячего изостатического прессования (ГИП) порошковых композиций [12], вспенивания металлического расплава в жидком виде газом [13] и других менее распространенных способов [14–17].

Известно, что в процессе изготовления порошков из титановых сплавов для аддитивного производства образуется большое количество отходов в виде отсева нецелевых фракций. Вовлечение порошков титановых сплавов нецелевых фракций в производственные процессы невозможно ввиду повышенного содержания кислорода в полученных слитках вторичного производства, содержащих в своем составе металлопорошковые композиции. Отсутствует также техническая возможность сухого прессования компактированных электродов и технологий их последующей переработки на плавильном и литейном оборудовании, используемом для выплавки слитков.

Таким образом, возможность использования нецелевых фракций порошков для переработки является актуальной и важной задачей. Однако данный тип отходов может применяться при изготовлении пористых полуфабрикатов из титановых сплавов по некоторым применяемым в промышленности технологиям.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [18].

Материалы и методы

Исследования проведены на металлопорошковых монокомпозициях из титановых сплавов марок ВТ1-00 ($Mo_{\text{экв}} = 0$; фракция 100–200 мкм) и ВТ6 ($Mo_{\text{экв}} = 3,2$ [19]; фракции 63–100 или 100–200 мкм), являющихся побочным продуктом аддитивного производства и полученных методом индукционной плавки исходных заготовок в инертной среде и газовой атомизации (распыление расплава потоком аргона). Химический состав сплавов соответствует требованиям ОСТ 1 90013–81.

Изготовление пористых полуфабрикатов проводили путем спекания металлопорошковых композиций по экспериментальным режимам в вакуумной печи сопротивления. Механические свойства определяли в соответствии с ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 25.503–97 на универсальных испытательных машинах. Ударную вязкость определяли по ГОСТ 9454–78. Определение плотности проводили методом обмера и взвешивания по ГОСТ 20018–74.

В данной работе пористость рассчитана по формуле $P = (1 - \rho_v/\rho_t)100 \%$, где ρ_t – истинная плотность материала (справочные значения); ρ_v – измеренная плотность пористого полуфабриката.

Образцы для исследования микроструктуры изготавливали по стандартной методике (ПИ 1.2.785–2009). Травление полированных микрошлифов осуществляли в реактиве на водной основе с содержанием 5 % (объемн.) фтористоводородной кислоты (HF) и 15 % (объемн.) азотной кислоты (HNO_3).

Анализ микроструктуры методом оптической металлографии проводили в соответствии с ПИ 1.2.785–2009 визуально на травленых микрошлифах на металлографическом микроскопе. Травление микрошлифов осуществляли в том же растворе. Анализ методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) проводили с применением сканирующего электронного микроскопа.

Исследования образцов, а также построение трехмерных изображений, проведены методом рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) путем сбора проекционных изображений на рентгеновском томографе с использованием специализированного программного обеспечения.

Металлографический анализ проводили методом РЭМ при увеличениях $\times 1000$ и $\times 5000$.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

С целью оценки применимости отсева нецелевых фракций (63–100 и 100–200 мкм) металлопорошковых монокомпозиций преимущественно сферической формы из титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6 (отходов аддитивного производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) для изготовления пористых полуфабрикатов проведен анализ используемых в отрасли технологий и предъявляемых требований к исходному сырью.

В результате анализа научно-технических источников информации (научных статей, патентов, отчетов) установлено, что применительно к данному сырью и технологическим возможностям оборудования НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ возможна реализация следующих способов изготовления пористых полуфабрикатов (рис. 1):

- спекание под давлением в установках ГИП [20];
- спекание в вакуумных печах (в том числе в смеси с порообразующими веществами);
- предварительное компактирование путем холодной обработки давлением с дальнейшим спеканием в вакуумных печах.

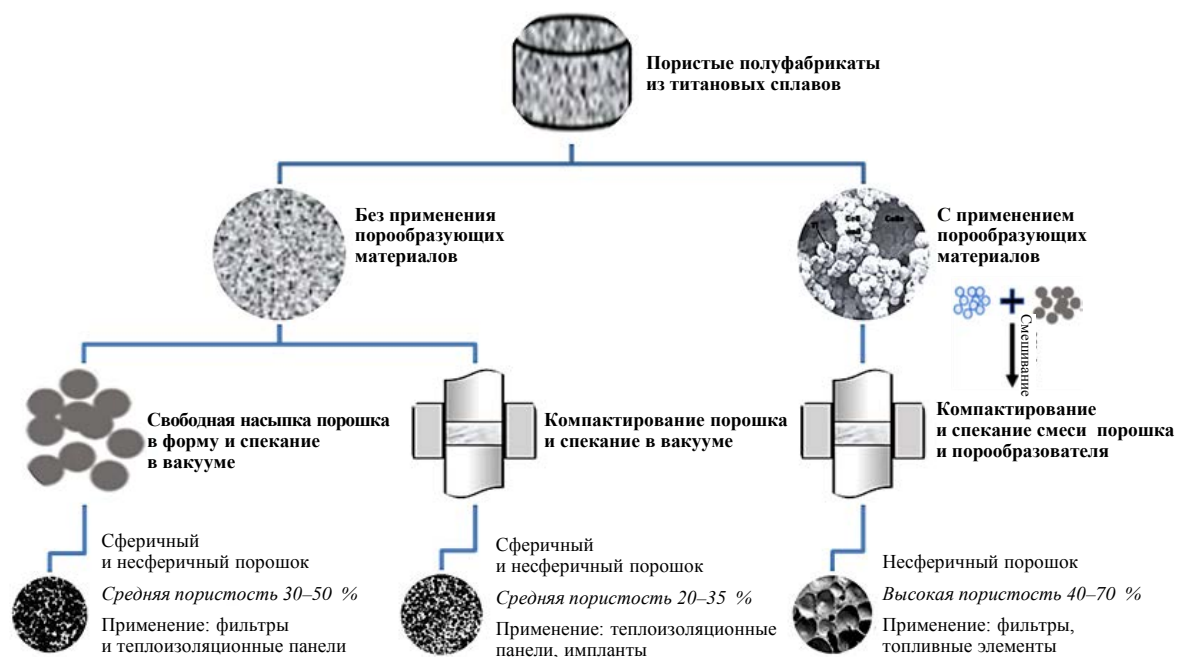


Рис. 1. Классификация технологических подходов, доступных для реализации в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

С целью оценки применимости выбранных методов для изготовления пористых полуфабрикатов проведены предварительные исследования влияния экспериментальных режимов изготовления на физико-механические свойства одной из металлопорошковых монокомпозиций (сплав ВТ6 фракции 100–200 мкм). Экспериментальные режимы изготовления пористых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные режимы изготовления пористых полуфабрикатов из титанового сплава марки ВТ6 (порошок фракции 100–200 мкм)

Условный номер режима	Метод получения	Технологические параметры*	Технологические особенности
1	Спекание	Выдержка при $T_{п.п} + 120$ °С в течение t_2	–
2		Выдержка при $T_{п.п} + 20$ °С в течение t_2	Гранулы легко истираются, вымываются и выкрашиваются
3		Выдержка при $T_{п.п} + 120$ °С в течение t_1	
4		Выдержка при $T_{п.п} + 220$ °С в течение t_2	–
5	Компактирование и спекание	Компактирование методом прессования с последующим спеканием по режиму 2	Сложности с прессованием сферичного порошка, который плохо уплотняется; сцепление гранул и диффузионная сварка слабые, капсулы имеют склонность к разрушению
6	Горячее изостатическое прессование	Выдержка при $T_{п.п} - 5$ °С и давлении	–

* $T_{п.п}$ – температура полиморфного превращения; t_1 и t_2 – продолжительности спекания ($t_1 < t_2$).

Процесс спекания в вакуумной печи сопротивления осуществлен посредством свободной насыпки порошка без утрамбовывания в титановые контейнеры или графитовые тигли.

Физико-механические свойства образцов из пористых полуфабрикатов, изготовленных по некоторым из представленных в табл. 1 технологиям и режимам, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства (средние значения) пористых полуфабрикатов из титанового сплава марки ВТ6 (порошок фракции 100–200 мкм)

Условный номер режима	Физические свойства		Механические свойства при температуре 20 °С				
	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при сжатии, ГПа	Условный предел текучести при сжатии, МПа	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
1	2,66	40	15	40	17	58	0,5
2	2,61	41	–	–	9,3	40	–
б	4,36	2	–	–	126	980	58
Деформированный полуфабрикат по ОСТ и ТУ	4,43	0	120	950	–	900	30–50

Анализ плотности экспериментальных образцов из сплава ВТ6 показал, что значения плотности и пористости несущественно зависят от температуры и продолжительности спекания в исследованных диапазонах. Однако при спекании при температурах <1100 °С формируется недостаточно прочная связь между гранулами, что приводит к выкрашиванию частиц порошка при последующей механической обработке пористых полуфабрикатов. Предварительное прессование порошка в контейнере (режим 5, по сравнению с режимом 2) незначительно повышает плотность (с 2,61 до 2,89 г/см³) и уменьшает пористость (с 41 до 35 %) образца, при этом также несущественно снижается склонность к выкрашиванию гранул при механической обработке полуфабрикатов. По-видимому, это связано с тем, что гранулы сферической формы имеют (по сравнению с несферической) небольшую площадь контакта, которая не может быть существенно увеличена путем их перераспределения в объеме или локальной пластической деформации «вхолодную». В свою очередь, увеличение давления прессования приводит к разрушению контейнера, при этом существенного улучшения эффективности компактирования порошка не происходит вследствие сферической формы гранул (компактированные заготовки расслаиваются и рассыпаются).

Для пористых полуфабрикатов, спеченных по режиму 1, характерен невысокий уровень механических свойств, но достаточный для проведения механической обработки на станках, предназначенных для обработки титана, и изготовления различных изделий из них.

Применение ГИП с нагревом вблизи температуры полиморфного превращения (режим б) приводит к существенному увеличению плотности и снижению значения пористости практически до уровня деформированного полуфабриката [21], что не отвечает задачам, поставленным в рамках данного исследования. Уровень механических свойств также близок к уровню свойств деформированного полуфабриката.

По результатам анализа физико-механических свойств показано, что среди исследованных в данной работе способов наилучший уровень плотности и пористости для планируемых сфер применения обеспечивают технологии спекания в вакуумной печи (без применения порообразующих веществ) свободно насыпанного порошка, а также компактирование методами обработки металлов давлением с последующим спеканием (режим 5). Вследствие меньшей трудоемкости для последующих исследований выбрана технология спекания по режиму 1. Отказ от применения порообразующих веществ позволит существенно сократить загрязнение внутривспечного пространства, обеспечить приемлемый уровень вакуумной гигиены и возможность применения одного и того же термического оборудования как для спекания порошков, так и для вакуумной термической обработки деформированных полуфабрикатов и деталей из титановых сплавов.

На образце пористого полуфабриката из сплава ВТ6, изготовленного по выбранному режиму спекания, методом РКТ проведены исследования внутренней структуры. По результатам анализа трехмерных изображений образца не обнаружено внутренних дефектов в виде пустот, несплошностей и инородных включений. Выбранный режим спекания пористого полуфабриката из сплава ВТ6 (фракция 100–200 мкм) обеспечивает необходимую прочность диффузионной связи гранул и может применяться для порошка фракции 63–100 мкм, а также с корректировкой значения температуры полиморфного превращения для порошка из сплава ВТ1-00.

По выбранному в результате проведенных исследований режиму спекания в вакуумных печах сопротивления из порошков титановых сплавов ВТ1-00 (фракция 100–200 мкм) и ВТ6 (фракции 63–100 или 100–200 мкм) изготовлена партия пористых полуфабрикатов размером до 180×110×80 мм.

Микроструктура образцов, отобранных от заготовок изготовленной партии пористых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ1-00 (фракция порошка 100–200 мкм) и ВТ6 (фракции порошка 63–100 и 100–200 мкм), представлена гранулами (рис. 2), имеющими пластинчатую морфологию структурных составляющих, типичную для вышеуказанных сплавов [22–26]. Форма гранул варьируется от неправильной до сферической. В микроструктуре всех образцов отчетливо прослеживаются исходные гранулы, в некоторых гранулах наблюдаются поры.

Согласно исследованиям, проведенным методом РЭМ, показано, что микроструктура гранул однородная пластинчатая и состоит из колоний пластинок вторичной α -фазы, разделенных β -прослойками. В пределах одной гранулы для сплава ВТ1-00 может наблюдаться несколько различно ориентированных α -колоний. Существенных различий в микроструктуре образцов пористых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 фракций 63–100 или 100–200 мкм не обнаружено.

На образцах партии пористых полуфабрикатов методом РКТ проведены исследования внутренней структуры, получено и исследовано трехмерное изображение образцов для определения наличия внутренних дефектов. На рис. 3 представлено 3D-изображение образцов и профили сечения в различных направлениях. На каждом 3D-изображении продемонстрированы три секущие плоскости, пересечение которых является выбранной точкой.

Хотя отдельные поры и их форма на полученных 3D-изображениях трудно различимы, данный метод позволяет обнаружить неоднородности распределения пористости (и, соответственно, плотности) в объеме полуфабрикатов в макромасштабе (миллиметры и сантиметры) [1].

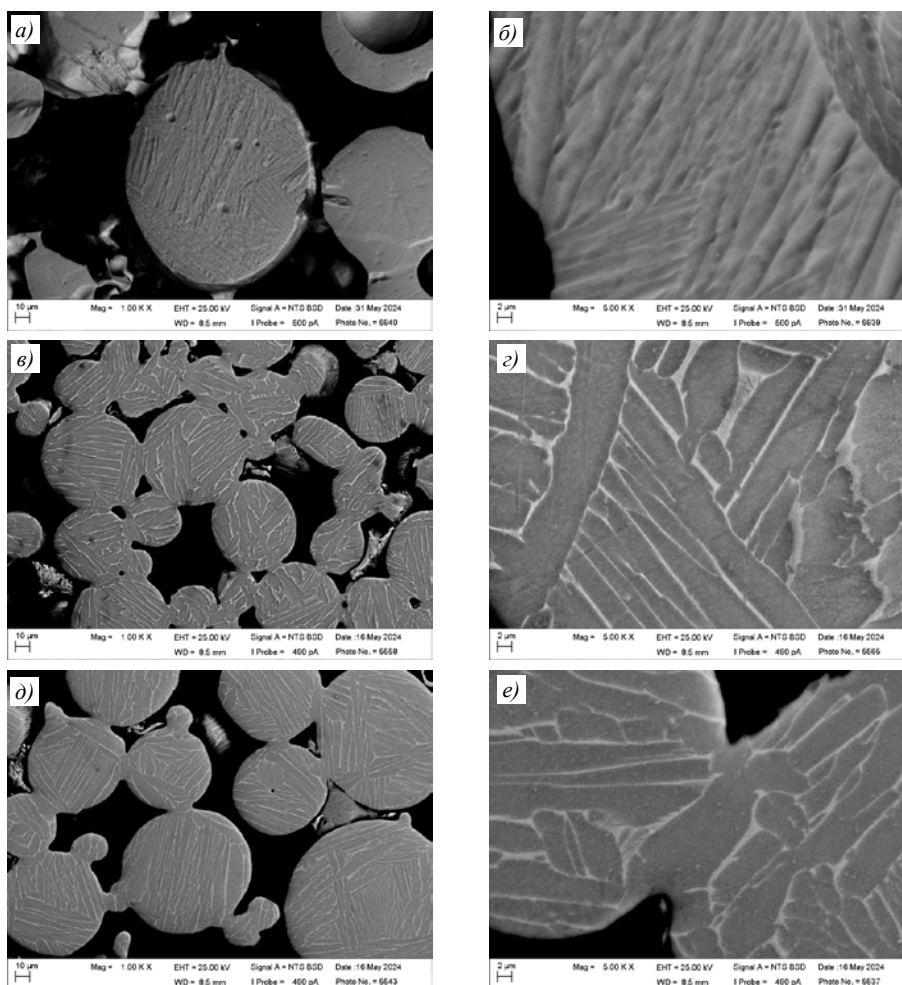


Рис. 2. Микроструктуры (РЭМ; *a, в, д* – $\times 1000$; *б, з, е* – $\times 5000$) пористых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ1-00 (*a, б*; фракция порошка 100–200 мкм) и ВТ6 с фракциями порошка 63–100 мкм (*в, з*) и 100–200 мкм (*д, е*)

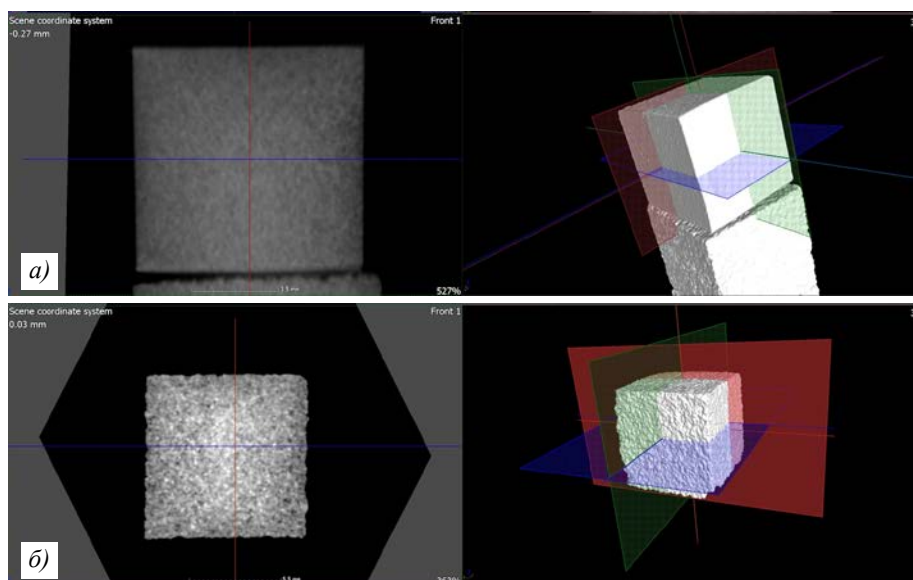


Рис. 3. 3D-изображения пористых полуфабрикатов (фракция порошков 100–200 мкм, режим спекания по нормативной документации) из титановых сплавов ВТ6 (*a*) и ВТ1-00 (*б*) и профили их сечений в различных направлениях

По результатам анализа трехмерных изображений образцов не обнаружено внутренних дефектов в виде пустот, несплошностей и инородных включений.

Результаты исследования физико-механических свойств пористых полуфабрикатов из титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства (средние значения) пористых полуфабрикатов из титановых сплавов марок ВТ1-00 и ВТ6, изготовленных по выбранному режиму спекания (режим 1)

Сплав (фракция порошка)	Физические свойства		Механические свойства при температуре 20 °С			
	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при сжатии, ГПа	Условный предел текучести при сжатии, МПа	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
ВТ1-00 (100–200 мкм)	2,49	45	15	6,3	12	0,4
Деформированный полуфабрикат по ОСТ и ТУ	4,50	0	392	110	340	60–120
ВТ6 (63–100 мкм)	3,03	32	96	23	130	0,8
ВТ6 (100–200 мкм)	2,69	39	52	12	55	0,5
Деформированный полуфабрикат по ОСТ и ТУ	4,43	0	950	–	900	30–50

Сравнительный анализ механических свойств пористых полуфабрикатов, изготовленных из порошка сплава ВТ6 фракции 100–200 мкм по одинаковому режиму спекания (режим 1 в табл. 2 и 3), показал, что выбранный режим в целом обеспечивает получение идентичных результатов.

При изготовлении пористых полуфабрикатов в соответствии с требованиями разработанной нормативной документации из порошка сплава ВТ6 меньшей фракции (63–100 мкм) обеспечивается сниженное значение пористости, увеличенные значения плотности и всех исследованных характеристик механических свойств, что обусловлено увеличенной площадью поверхностей контакта гранул на единицу объема полуфабриката. Пористый полуфабрикат из сплава ВТ1-00 обладает повышенным уровнем пористости, более низкой плотностью, но также более низким уровнем механических свойств как в абсолютных, так и относительных величинах.

Согласно проведенному анализу физико-механических свойств изготовленных пористых полуфабрикатов из сплавов ВТ1-00 и ВТ6 разработаны технические условия.

Вследствие того, что изделия из пенометаллов зачастую характеризуются сложной формой, а при их изготовлении требуется формирование прочного неразъемного соединения, разработанные в данной работе технологические режимы спекания пористых полуфабрикатов реализованы в сочетании с высокотемпературной пайкой при изготовлении пробных изделий. Поскольку у полученных полуфабрикатов наблюдается преимущественно открытый тип пористости, одной из наиболее подходящих сфер применения являются фильтры, пламегасители, теплообменники и катализаторы [1].

В рамках данной работы проведен анализ сортамента выпускаемой продукции данного типа из пористых металлов и пенометаллов некоторых производителей

отрасли, в частности SaiFilter (веб-сайт www.saifilter.com) и FilsonFilter (www.filsonfilters.com), и выбраны конструкции пробных изделий для изготовления по разработанной авторами технологии спекания отходов аддитивного производства.

Помимо разработки чертежей непосредственно прототипов фильтрующих изделий, осуществлено проектирование оснастки из графита для их изготовления. Применение графита (предпочтительно конструкционного марок МПГ-6 и МПГ-7) для изготовления образцов изделий обусловлено достаточным уровнем прочности оснастки, изготовленной из него, при комнатной и повышенной температурах, ее химической инертностью и отсутствием прилипания к титану при спекании пористых полуфабрикатов в вакууме. Это обуславливает (в отличие от оснастки из титана) возможность многоразового применения оснастки из конструкционного графита при изготовлении различных по конфигурации пористых полуфабрикатов, в том числе коротких трубчатых элементов с толщиной стенки ~5 мм.

В данной работе изготавливали следующие изделия:

- картридж колонного фильтра из сплава ВТ6 (фракции 63–100 или 100–200 мкм);
- большой и малый фильтры-аэраторы из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм);
- трехслойную паяную сэндвич-панель конфигурации «лист ВТ1-0 – пористый полуфабрикат из сплава ВТ6 фракции 63–100 мкм – лист толщиной 1 мм ВТ1-0».

Фотографии образцов-изделий представлены на рис. 4.

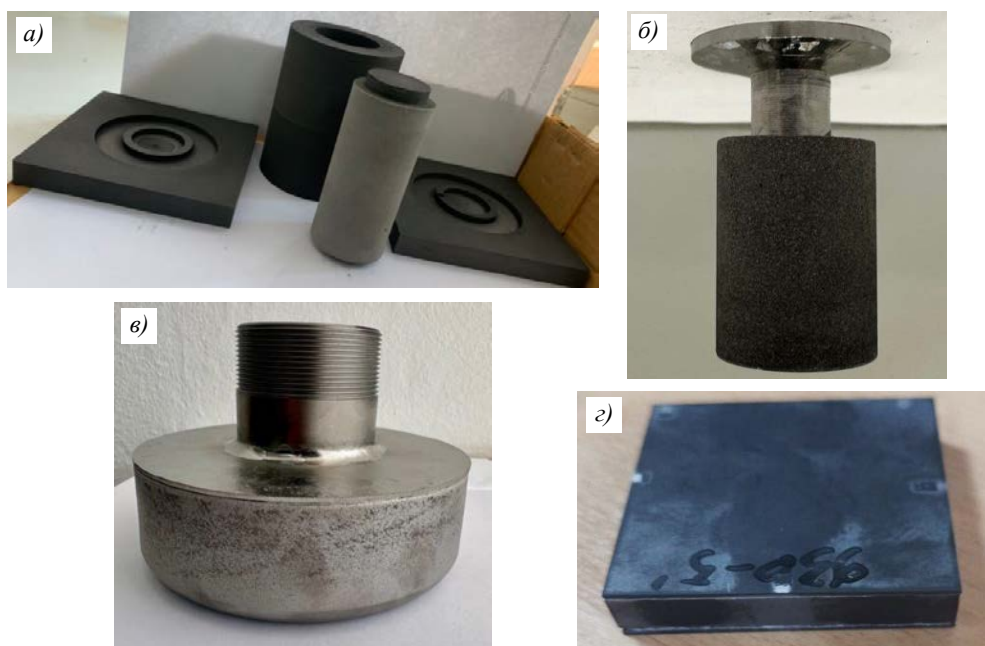


Рис. 4. Внешний вид вспомогательной графитовой оснастки и образцов-изделий (фильтры, аэраторы, сэндвич-панели), изготовленных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ: *a* – пористый фильтрующий элемент с графитовой оснасткой картриджа колонного фильтра из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм); *б, в* – малый и большой фильтры-аэраторы из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм); *г* – сегмент трехслойной паяной сэндвич-панели

Пористые элементы фильтров изготовлены посредством спекания по разработанным режимам в вакуумной печи в графитовой оснастке с последующей механической обработкой (при необходимости). Корпусные элементы образцов-изделий изготовлены путем механической обработки заготовок из титанового сплава ВТ1-0. Соединение корпусных элементов и пористых заготовок большого фильтра-

аэратора осуществлено посредством пайки (работы по отработке технологии пайки выполнены А.Н. Афанасьевым-Ходыкиным) с применением ленты порошкового припоя ВПр16 толщиной 0,5 мм по экспериментальным режимам [27, 28]. Применение припоя данной марки позволяет получать паяные соединения титановых сплавов с высокой коррозионной стойкостью (практически на уровне соединяемых сплавов), работоспособные до температуры 500 °С.

Микроструктура паяного соединения по выбранному в результате исследований режиму представлена на рис. 5.

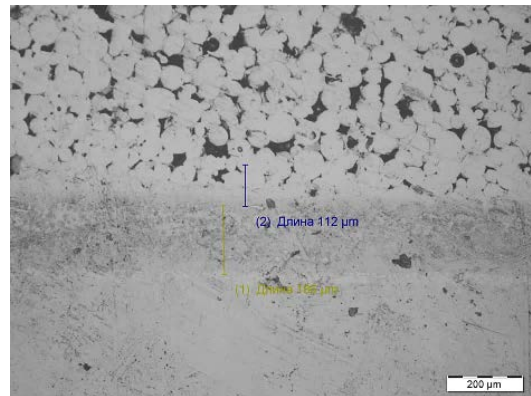


Рис. 5. Микроструктура паяного соединения пористого полуфабриката из порошка сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм). Припой ВПр16 толщиной 0,5 мм. Пайка при температуре $T_{п.п} - 50$ °С в течение t_0

Анализ микроструктуры показал, что припой при выбранной температуре обладает оптимальной жидкотекучестью, хорошо смачивает поверхность пористого материала и подложку из деформированного полуфабриката из титанового сплава ВТ1-00. При этом припой преимущественно остается в паяемом зазоре, что благоприятно сказывается на качестве и свойствах соединения.

Аналогичным методом изготовлен сегмент трехслойной сэндвич-панели конфигурации «лист толщиной 1 мм из сплава ВТ1-0 + пористый полуфабрикат толщиной 10 мм из сплава ВТ6 (фракция 63–100 мкм) + лист толщиной 1 мм из сплава ВТ1-0». Сэндвич-панели аналогичной конфигурации (как с открытым, так и с закрытым типом пористости), как правило, применяют в авиакосмической отрасли в качестве панелей различного назначения, в том числе в качестве вибро-звукоизоляционных панелей и облегченных, но более эффективных теплоизоляционных противопожарных перегородок (рис. 4, з).

Заключения

Исследованы структура, в том числе посредством РКТ, и физико-механические свойства пористых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6, изготовленных по различным технологиям и экспериментальным режимам.

По результатам проведенных исследований и с учетом взаимосвязи характера процессов спекания титановых металлопорошковых композиций с температурой полиморфного превращения разработаны технология и режим изготовления пористых полуфабрикатов из порошков нецелевых фракций титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6, являющихся отходами аддитивного производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Показано, что разработанный режим спекания обеспечивает уровень механических свойств и степень пористости полученных полуфабрикатов,

необходимые для применения в авиационно-космической отрасли, энергетике и пищевой промышленности.

Проведен анализ сортамента выпускаемой продукции из пористых металлов и пенометаллов ряда производителей отрасли (в частности, SaiFilter и FilsonFilter), выбранны конструкции экспериментальных изделий и изготовлены образцы изделий (фильтры, аэраторы, сэндвич-панели) из пористых полуфабрикатов титановых сплавов ВТ1-00 и ВТ6, в том числе в соединении с листами из титановых сплавов с применением технологии высокотемпературной пайки для формирования неразъемных соединений.

Список источников

1. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams // *Progress in Materials Science*. 2001. Vol. 46. P. 559–632.
2. Хохлов М.А., Ищенко Д.А. Конструкционные сверхлегкие пористые металлы (обзор) // *Автоматическая сварка*. 2015. № 3–4. С. 60–65.
3. Cabezas-Villa J.L., Olmos L., Bouvard D. et al. Processing and properties of highly porous Ti6Al4V mimicking human bones // *Journal of Materials Research*. 2018. Vol. 33. P. 650–661. DOI: 10.1557/jmr.2018.35.
4. Tang E., Zhang X., Han Y. Experimental research on damage characteristics of CFRP/aluminum foam sandwich structure subjected to high velocity impact // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8 (5). P. 4620–4630.
5. Valanezhad A., Savabi O., Nejatidanesh F. et al. The Effect of Vacuum Leak Rate on Sintering of Porous Titanium Scaffold // *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*. 2019. Vol. 17. P. 184–188. DOI: 10.1380/ejsnt.2019.184.
6. Oh I.-H., Nomura N., Hanada S. Microstructures and Mechanical Properties of Porous Titanium Compacts Prepared by Powder Sintering // *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43. No. 3. P. 443–446.
7. Kato K., Yamamoto A., Ochiai S. et al. Cell Proliferation, Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Novel Titanium Foam with Sheet Shape // *Materials Transactions*. 2012. Vol. 53. No. 4. P. 724–732.
8. Parveez B., Jamal N.A., Anuar H. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review // *Materials*. 2022. Vol. 15. Art. 5302. DOI: 10.3390/ma15155302.
9. Jain H., Mondal D.P., Gupta G. et al. Microstructure and high temperature compressive deformation in lightweight open cell titanium foam // *Manufacturing Letters*. 2021. Vol. 27. P. 67–71.
10. Jha N., Mondal D.P., Majumdar J.D. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route // *Materials and Design*. 2013. Vol. 47. P. 810–819.
11. Ye B., Dunand D.C. Titanium foams produced by solid-state replication of NaCl powders // *Materials Science and Engineering A*. 2010. Vol. 528. P. 691–697.
12. Bolzoni L., Ruiz-Navas E.M., Zhang D., Gordo E. Modification of Sintered Titanium Alloys by Hot Isostatic Pressing // *Key Engineering Materials*. 2012. Vol. 520. P. 63–69.
13. Nakamura T., Gnyloskurenko S.V., Sakamoto K. et al. Development of New Foaming Agent for Metal Foam // *Materials Transactions*. 2002. Vol. 43. No. 5. P. 1191–1196.
14. Yue X.-Z., Matsuo K., Kitazono K. Compressive Behavior of Open-Cell Titanium Foams with Different Unit Cell Geometries // *Materials Transactions*. 2017. Vol. 58. No. 11. P. 1587–1592.
15. Yue X.-Z., Fukazawa H., Maruyama K. et al. Effect of Post Heat Treatment on the Mechanical Properties of Porous Ti–6Al–4V Alloys Manufactured through Powder Bed Fusion Process // *Materials Transactions*. 2019. Vol. 60. No. 1. P. 74–79.
16. Nakajima H. Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores // *Proceedings of Japan Academy, Series B*. 2010. Vol. 86. No. 9. P. 884–899.

17. Li J.P., Li S.H., Van Blitterswijk C.A., de Groot K. A novel porous Ti6Al4V: Characterization and cell attachment // *Journal of Biomedical Materials Research, Part A*. 2005. Vol. 73A. Is. 2. P. 223–233. DOI: 10.1002/jbm.a.30278.
18. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // *Директор по маркетингу и сбыту*. 2017. № 5–6. С. 40–44.
19. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
20. Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications / Ed. C. Leyens, M. Peters. Wiley–VCH, 2003. 513 p.
21. Агеев С.В., Гиршов В.Л. Горячее изостатическое прессование в порошковой металлургии // *Металлообработка*. 2015. № 4 (88). С. 56–60.
22. Панин П.В., Ночовная Н.А., Каблов Д.Е., Алексеев Е.Б., Ширяев А.А., Новак А.В. Практическое руководство по металлографии сплавов на основе титана и его интерметаллидов: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2020. 200 с.
23. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
24. Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путьрский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.
25. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путьрский С.В., Анисимова А.Ю. Исследование закономерностей формирования структуры прутков из титанового сплава ВТ6 в зависимости от различных технологических схем изготовления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
26. Путьрский С.В., Плохих А.И., Арисланов А.А., Наприенко С.А., Анисимова А.Ю. Исследование структуры и механических свойств материала со слоистой структурой на основе композиции из титановых сплавов ВТ1-0 и ВТ47 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.10.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
27. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. № SP2. С. 79–87.
28. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // *Тр. Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность»*. Якутск: ИФТПС СО РАН, 2012. С. 21–30.

References

1. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 2001, vol. 46, pp. 559–632.
2. Khokhlov M.A., Ishchenko D.A. Structural ultra-light porous metals (review). *Avtomaticheskaya svarka*, 2015, no. 3–4, pp. 60–65.
3. Cabezas-Villa J.L., Olmos L., Bouvard D. et al. Processing and properties of highly porous Ti6Al4V mimicking human bones. *Journal of Materials Research*, 2018, vol. 33, pp. 650–661. DOI: 10.1557/jmr.2018.35.
4. Tang E., Zhang X., Han Y. Experimental research on damage characteristics of CFRP/aluminum foam sandwich structure subjected to high velocity impact. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, vol. 8 (5), pp. 4620–4630.

5. Valanezhad A., Savabi O., Nejatidanesh F. et al. The Effect of Vacuum Leak Rate on Sintering of Porous Titanium Scaffold. *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, 2019, vol. 17, pp. 184–188. DOI: 10.1380/ejsnt.2019.184.
6. Oh I.-H., Nomura N., Hanada S. Microstructures and Mechanical Properties of Porous Titanium Compacts Prepared by Powder Sintering. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 3, pp. 443–446.
7. Kato K., Yamamoto A., Ochiai S. et al. Cell Proliferation, Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Novel Titanium Foam with Sheet Shape. *Materials Transactions*, 2012, vol. 53, no. 4, pp. 724–732.
8. Parveez B., Jamal N.A., Anuar H. et al. Microstructure and Mechanical Properties of Metal Foams Fabricated via Melt Foaming and Powder Metallurgy Technique: A Review. *Materials*, 2022, vol. 15, art. 5302. DOI: 10.3390/ma15155302.
9. Jain H., Mondal D.P., Gupta G. et al. Microstructure and high temperature compressive deformation in lightweight open cell titanium foam. *Manufacturing Letters*, 2021, vol. 27, pp. 67–71.
10. Jha N., Mondal D.P., Majumdar J.D. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route. *Materials and Design*, 2013, vol. 47, pp. 810–819.
11. Ye B., Dunand D.C. Titanium foams produced by solid-state replication of NaCl powders. *Materials Science and Engineering A*, 2010, vol. 528, pp. 691–697.
12. Bolzoni L., Ruiz-Navas E.M., Zhang D., Gordo E. Modification of Sintered Titanium Alloys by Hot Isostatic Pressing. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 520, pp. 63–69.
13. Nakamura T., Gnyloskurenko S.V., Sakamoto K. et al. Development of New Foaming Agent for Metal Foam. *Materials Transactions*, 2002, vol. 43, no. 5, pp. 1191–1196.
14. Yue X.-Z., Matsuo K., Kitazono K. Compressive Behavior of Open-Cell Titanium Foams with Different Unit Cell Geometries. *Materials Transactions*, 2017, vol. 58, no. 11, pp. 1587–1592.
15. Yue X.-Z., Fukazawa H., Maruyama K. et al. Effect of Post Heat Treatment on the Mechanical Properties of Porous Ti–6Al–4V Alloys Manufactured through Powder Bed Fusion Process. *Materials Transactions*, 2019, vol. 60, no. 1, pp. 74–79.
16. Nakajima H. Fabrication, properties, and applications of porous metals with directional pores. *Proceedings of Japan Academy, Series B*, 2010, vol. 86, no. 9, pp. 884–899.
17. Li J.P., Li S.H., Van Blitterswijk C.A., de Groot K. A novel porous Ti6Al4V: Characterization and cell attachment. *Journal of Biomedical Materials Research, Part A*, 2005, vol. 73A, is. 2, pp. 223–233. DOI: 10.1002/jbm.a.30278.
18. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft construction and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
19. Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties: reference book*. Moscow: VILS-MATI, 2009, 520 p.
20. *Titanium and titanium alloys. Fundamentals and applications*. Ed. C. Leyens, M. Peters. Wiley–VCH, 2003, 513 p.
21. Ageev S.V., Gurshov V.L. Hot isostatic pressing in powder matallurgy. *Metallrobrabotka*, 2015, no. 4 (88), pp. 56–60.
22. Panin P.V., Nochovnaya N.A., Kablov D.E., Alekseev E.B., Shiryaev A.A., Novak A.V. *Practical guide to metallography of titanium-based alloys and its intermetallics: tutorial*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2020, 200 p.
23. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
24. Yakovlev A.L., Arislanov A.A., Putyrsky S.V., Nochovnaya N.A. Study of mechanical properties and structure of large-sized semi-finished products made of VT6ch titanium alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 12–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-12-18.

25. Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. Investigation of the regularities of the formation of the structure of rods made of titanium alloy VT6 depending on various technological schemes of manufacture. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
26. Putyrskiy S.V., Plokhikh A.I., Arislanov A.A., Naprienko S.A., Anisimova A.Yu. Study of structure and mechanical properties of the laminar structure material based on titanium alloys VT1-0 and VT47. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-36-50.
27. Kablov E.N., Evgenov A.G., Rylnikov V.S., Afanasyev-Khodykin A.N. Study of finely dispersed solder powders for diffusion vacuum brazing obtained by melt atomization. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser.: Mashinostroenie*, 2011, no. SP2, pp. 79–87.
28. Kablov E.N., Lukin V.I., Ospennikova O.G. Welding and brazing in the aerospace industry. *Reports All-Russian scientific-practical conf. «Welding and Safety»*. Yakutsk: IPTPS SB RAS, 2012, pp.21–30.

Информация об авторах

Ширяев Андрей Александрович, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Арисланов Аскаджон Абдурасулович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Путырский Станислав Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Востриков Никита Федорович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey A. Shiryaev, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Askadzhon A. Arislanov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav V. Putyrskiy, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikita F. Vostrikov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.12.2024.
The article was submitted 28.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 04.12.2024.