

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Исследование структуры и дефектности титановых сплавов при наплавке / И.С. Хомутинин, С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, Е.А. Кривоносова, Я.В. Лямин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 70–78. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.09

Please cite this article in English as:

Homutinin I.S., Akulova S.N., Myshkina A.V., Krivonosova E.A., Lyamin Yu.V. Investigation of the structure and defectiveness of titanium alloys during surfacing. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 1, pp. 70-78. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.09

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 24, № 1, 2022**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.1.09

УДК 621.791.755

**И.С. Хомутинин, С.Н. Акулова,  
А.В. Мышкина, Е.А. Кривоносова, Я.В. Лямин**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДЕФЕКТНОСТИ  
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ НАПЛАВКЕ**

Представлены результаты исследования основных закономерностей формирования структуры и свойств жаропрочного титанового сплава BT-20 системы Ti–Al–V–Mo–Zr в ремонтных технологиях аргонодуговой и лазерной порошковой наплавки.

Существенным недостатком технологий восстановительной наплавки являются некоторые структурные особенности формирования наплавленного материала, в частности, вероятность появления несплавлений как по границе с основным металлом, так и между наплавленными слоями, неблагоприятная структура, анизотропия и, как следствие, снижение механических свойств.

Лазерная порошковая наплавка производилась на установке MLS FL 040 на базе волоконно-оптического диодного лазера. Аргонодуговая наплавка осуществлялась на типовом оборудовании.

Были проведены структурные исследования наплавленного материала, зон сплавления между слоями с применением световой микроскопии, проведены количественный металлографический анализ и испытания прочностных свойств.

Микроструктура наплавленного металла состоит из пластинчатой  $\alpha$ -фазы, что типично для псевдо- $\alpha$ -сплавов с очень невысоким коэффициентом  $\beta$ -стабилизации, к которым относится сплав BT-20.

Исследован уровень дефектности наплавленного материала, морфология структуры наплавленных слоев.

Установлено, что структура наплавленного лазерной технологией материала имеет существенно более низкий уровень дефектности наплавки: пор и трещин не выявлено, участки несплавления незначительны по протяженности.

Показано, что лазерная порошковая наплавка способствует измельчению структуры наплавленного титанового сплава, повышению дисперсности пластин  $\alpha$ -фазы, что сопровождается ростом микротвердости до среднего уровня 250 HV.

В качестве основной ремонтной технологии для выбранных изделий из титановых сплавов предложена технология лазерной порошковой наплавки.

**Ключевые слова:** титановые сплавы, аргонодуговая наплавка, лазерная порошковая наплавка, макроструктура, микроструктура, дефектность, несплавления, микротвердость.

I.S. Homutinin, S.N. Akulova,

A.V. Myshkina, E.A. Krivonosova, Yu.V. Lyamin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND DEFECTIVENESS OF TITANIUM ALLOYS DURING SURFACING

This paper presents the results of a study of the main regularities in the formation of the structure and properties of the heat-resistant titanium alloy VT-20 of the Ti-Al-V-Mo-Zr system in the repair technologies of argon-arc and laser powder surfacing.

A significant disadvantage of recovery surfacing technologies is some structural features of the formation of the deposited material, in particular, the likelihood of non-fusion both along the border with the base metal and between the deposited layers, unfavorable structure, anisotropy, and, as a result, a decrease in mechanical properties.

Laser powder surfacing was carried out on an MLS FL 040 installation based on a fiber-optic diode laser. Argon-arc surfacing was carried out on standard equipment.

Structural studies of the deposited material, fusion zones between layers were carried out using light microscopy, quantitative metallographic analysis and tests of strength properties were carried out.

The deposited metal microstructure consists of a lamellar  $\alpha$ -phase, which is typical for pseudo- $\alpha$ -alloys with very low  $\beta$ -stabilization coefficients, which include the VT-20 alloy.

The level of defectiveness of the deposited material, the morphology of the structure of the deposited layers have been studied.

It has been established that the structure of the material deposited by laser technology has a significantly lower level of defectiveness of surfacings: no pores and cracks have been identified, and non-fusion areas are insignificant in length.

It is shown that laser powder surfacing contributes to the refinement of the structure of the deposited titanium alloy, increasing the fineness of the  $\alpha$ -phase plates, which is accompanied by an increase in microhardness to an average level of 250 HV.

The technology of laser powder surfacing is proposed as the main repair technology for selected products made of titanium alloys.

**Keywords:** titanium alloys, argon-arc surfacing, laser powder surfacing, macrostructure, microstructure, defects, non-melting, microhardness.

### Введение

Применение процессов наплавки в ремонтных технологиях дает возможность восстанавливать конфигурацию и размеры изношенных деталей в высокотехнологичных изделиях авиа- и двигателестроения, что позволяет получить значительную экономию металла и многократно сократить стоимость процесса [1–5]. Это в полной мере относится к технологиям производства изделий из таких дорогостоящих материалов, как титановые сплавы.

В работе применялись одни из самых эффективных технологий ремонтной наплавки – лазерная и аргонодуговая наплавка. Аргонодуговой метод является традиционным, хорошо зарекомендовавшим себя методом восстановления изношенных поверхностей изделий из высоколегированных сталей и сплавов, в том числе титановых. Использование лазерной наплавки обеспечивает ряд преимуществ как с технологической, так и экономической точки зрения. К ним можно отнести высокую точность при восстановлении изделий сложной формы, регулирование в широких пределах теплопередачи в основной и наплавляемый материал и, как следствие, управление глубиной и шириной проплавления, структурой, составом и свойствами формируемого материала [2; 6–8].

Однако существенным недостатком технологий восстановительной наплавки являются некоторые структурные особенности формирования наплавленного материала, в частности, вероятность появления несплавлений как по границе с основным металлом, так и между наплавленными слоями, неблагоприятная структура, анизотропия и, как следствие, снижение механических свойств [9–13].

Целью данной работы являлось исследование основных закономерности формирования структуры и свойств жаропрочного титанового сплава VT-20 системы Ti–Al–V–Mo–Zr в технологиях ремонтной наплавки с использованием дуговых и лазерных процессов. Особое внимание уделено изучению качества соединения наплавленного металла с основой.

Наплавочный материал – сплав VT-20, в основу которого положена характерная для большинства высокопрочных титановых сплавов тройная система Ti–Al–V, относится к псевдо- $\alpha$ -сплавам. В соответствии с принципами жаропрочного легирования титановых сплавов многокомпонентный сплав легирован  $\alpha$ -стабилизаторами (Al),  $\beta$ -стабилизаторами (V, Mo, Fe, Zr) и нейтральными упрочнителями (C, N), что обеспечивает эффективное сочетание дисперсионного и твердорастворного механизмов упрочнения [10–14]. Состав жаропрочного матричного  $\alpha$ -раствора подобран так, чтобы диффузионная подвижность атомов была по возможности минимальной и растворноосадительные механизмы, приводящие к укрупнению дисперсных фаз, протекали с наименьшей скоростью. Алюминий при введении более 5 масс.% не только сам по себе повышает жаропрочность псевдо- $\alpha$ -сплавов, но и в заметной степени увеличивает растворимость изоморфных  $\beta$ -стабилизаторов (железо, ванадий, молибден) в  $\alpha$ -фазе, создавая дополнительные возможности твердорастворного упрочнения сплава этими элементами. Легирование ванадием дополнительно обеспечивает низкую склонность к водородной хрупкости. Из неметаллов

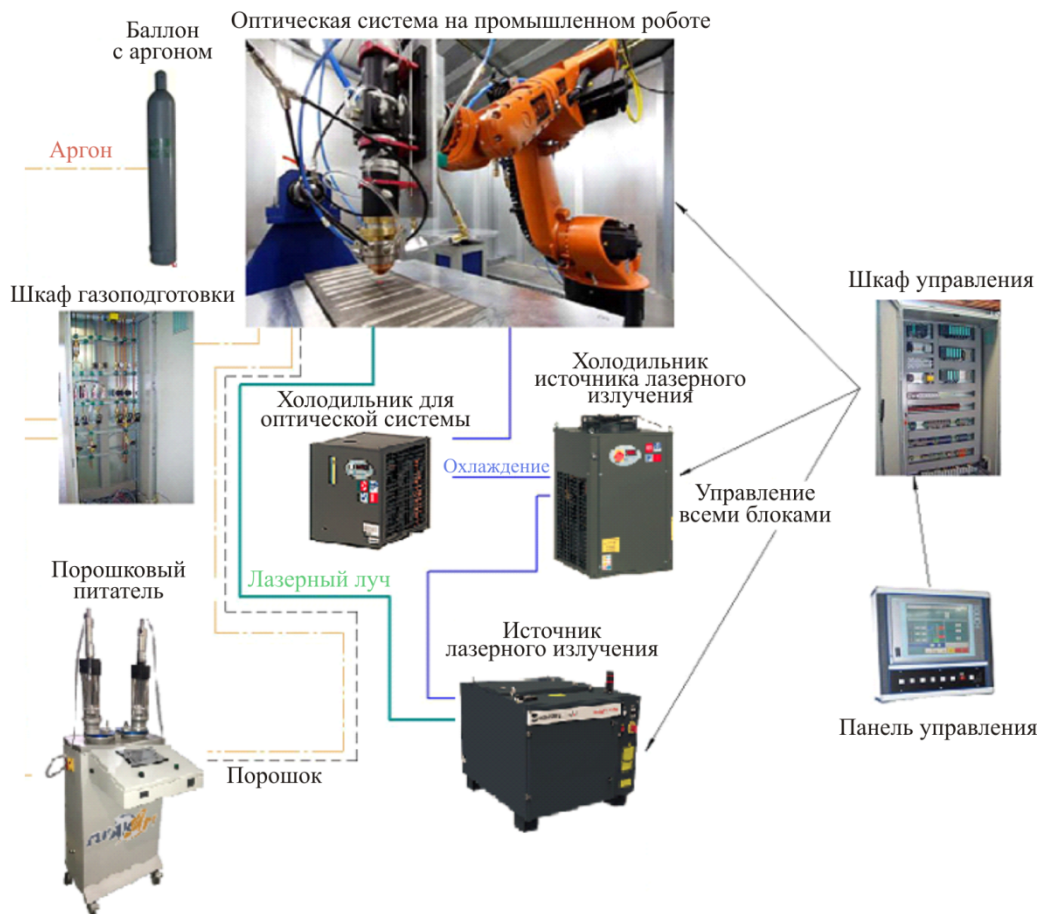


Рис. 1. Схема установки лазерной наплавки MLS FL 040

Таблица 1

Химический состав наплавочной проволоки ВТ20-2св

Содержание элементов, масс. %										
Al	V	Mo	Zr	Si	Fe	C	N	O	Ti	H
5,5–7,0	0,8–2,5	0,5–2	1.5–2.5	До 0,1	До 0,3	До 0,1	До 0,05	До 0,15	85,15–91,4	До 0,015

для сплава ВТ-20 особое значение для повышения жаропрочности имеет кремний, действующий по механизму блокирования дислокации при высоких температурах и препятствующий их скольжению вследствие большого параметра размерного несоответствия атомов Si и Ti [12], а также элементы, образующие твердые растворы внедрения – углерод, азот.

#### Технологии, исследовательские методики и материалы

Лазерная порошковая наплавка производилась на установке MLS FL 040 на базе волоконно-оптического диодного лазера, разработанной АО «Плакарт», схема процесса показана на рис. 1.

Основной материал – сплав ВТ8-М. В качестве наплавляемого материала для лазерной наплавки использован порошок ВТ20.

Аргондугловая наплавка осуществлялась на типовом оборудовании. Химический состав наплавочной проволоки ВТ-20св приведен в табл. 1.

При подготовке изношенных изделий под наплавку выполнено удаление остатков детонационного покрытия химическим способом с последующей фрезеровкой поверхности и фиксацией геометрических размеров. После наплавки выполнена механическая обработка, полировка восстановленных поверхностей, отжиг, контроль наличия дефектов люминесцентным ЛЮМ1-ОВ и рентгеновскими методами, контроль геометрии изделий [15]. Исследования проводились по двум локальным зонам (зона 1 и зона 2) на четырех изделиях для каждого из вариантов наплавки.

После наплавки были проведены структурные исследования наплавленного материала, зон сплавления между слоями с применением световой микроскопии (Neophot 32). Для металлографического

Таблица 2

Результаты рентгеновского контроля восстановленных изделий аргонодуговой и лазерной наплавками

Вид наплавки	№ обр.	Зона 1	Зона 2
Аргонодуговая наплавка	1	Несплавление	Несплавление
	2	Линия сплавления и индикация	Линия сплавления
	3	Линия сплавления	Несплавление
	4	Линия сплавления и несплавление	Несплавление
Лазерная порошковая наплавка	1	Без замечаний	Без замечаний
	2	Без замечаний	Пора
	3	Без замечаний	Без замечаний
	4	Без замечаний	Черновины

исследования по контактным поверхностям изделий с аргонодуговой наплавкой и с лазерной порошковой наплавкой были изготовлены продольные и поперечные микрошлифы. Количественный металлографический анализ проводили на автоматизированном программно-аппаратном комплексе анализа изображений и моделирования структур «Видеотест-металл» на базе металлографического микроскопа «Альтами-587». Испытания микротвердости проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 200 г с шагом 0,15 мм. Испытания прочностных свойств осуществляли в соответствии с ГОСТ 9454–78, испытательный комплекс INSTRON 5982, анализ химического состава методом спектрального анализа по ГОСТ 7727-81.

**Исследование дефектности слоев сплава ВТ20, наплавленных аргонодуговой и лазерной технологией**

В табл. 2 представлены результаты рентгеновского исследования дефектности слоев сплава ВТ20, наплавленных аргонодуговой и лазерной технологией.

Фиксировалось наличие дефектов типа несплавлений, пор, трещин, в различных зонах наплавки, а также места их локализации и размеры.

Анализ данных рентгеновского контроля показал наличие видимой линии сплавления с основой на всех образцах, наплавленных аргонодуговым методом, кроме того, в металле присутствуют несплавления в различных зонах наплавки как по линии сплавления с основой, так и между слоями наплавки.

На образцах, выполненных лазерной наплавкой, линии сплавления с основой не выявляются, количество несплавлений значительно меньше.

На рис. 2. показаны примеры результатов индикации дефектов при контроле люминесцентным методом ЛЮМ1-ОВ.

**Исследования микроструктуры наплавленных слоев сплава ВТ-20**

Для детального исследования микроструктуры наплавленного металла были изготовлены образцы в продольном и поперечном сечении относительно слоев наплавки. Для характеристики размеров несплавлений, имеющих дугообразную форму, использовали параметр, равный диаметру описанной окружности  $D_{\varnothing}$ , мм [15; 16].

**Аргонодуговая наплавка**

На рис. 3, а, показана макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя при аргонодуговой наплавке для зоны 1. Микроструктура наплавленного металла и основы представлен на рис. 3, б.

На рис. 4, а, показана макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя при аргонодуговой наплавке для зоны 2. Микроструктура наплавленного металла и основы представлена на рис. 4, б, в.

В зоне 1 образца, полученного аргонодуговой наплавкой, в средней части изделия высота наплавки составляет 0,288...0,300 мм (см. рис. 3). Трещин и пор в наплавленном металле нет, ЗТВ чистая. По месту расположения дугообразной индикации в металле наплавки на линии сплавления наблюдается дугообразное несплавление  $D_{\varnothing} = 0,519$  мм, вдоль линии сплавления наплавки с основным материалом наблюдаются протяженные продольные несплавления длиной 0,288...3,076 мм. В зоне 1 наплавки трещин и пор нет, наблюдается несплавление  $D_{\varnothing} = 0,190$  мм на границе наплавки с основным материалом. Высота наплавки в средней части изделия составляет 0,230...0,235 мм.

В зоне 2 образца, полученного аргонодуговой наплавкой (см. рис. 4), в самом наплавленном металле трещин и пор нет, вдоль линии сплавления наплавки с основным материалом наблюдаются

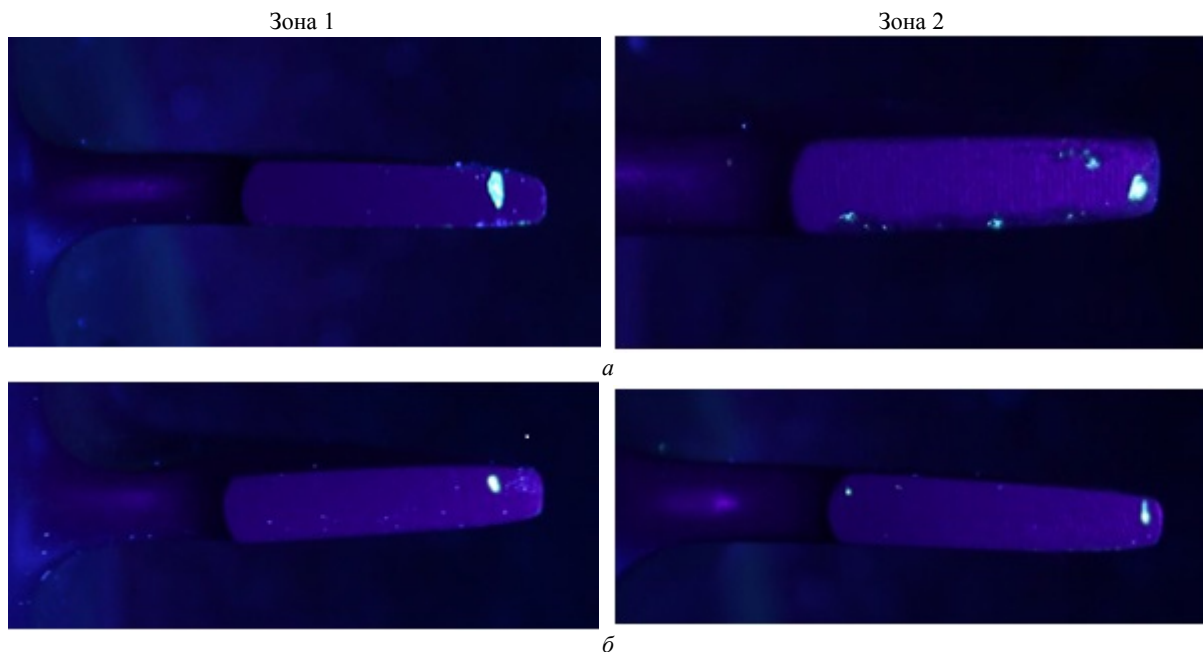


Рис. 2. Вид изделия с индикаций при контроле ЛЮМ1-ОВ: а – аргонодуговая наплавка; б – лазерная наплавка

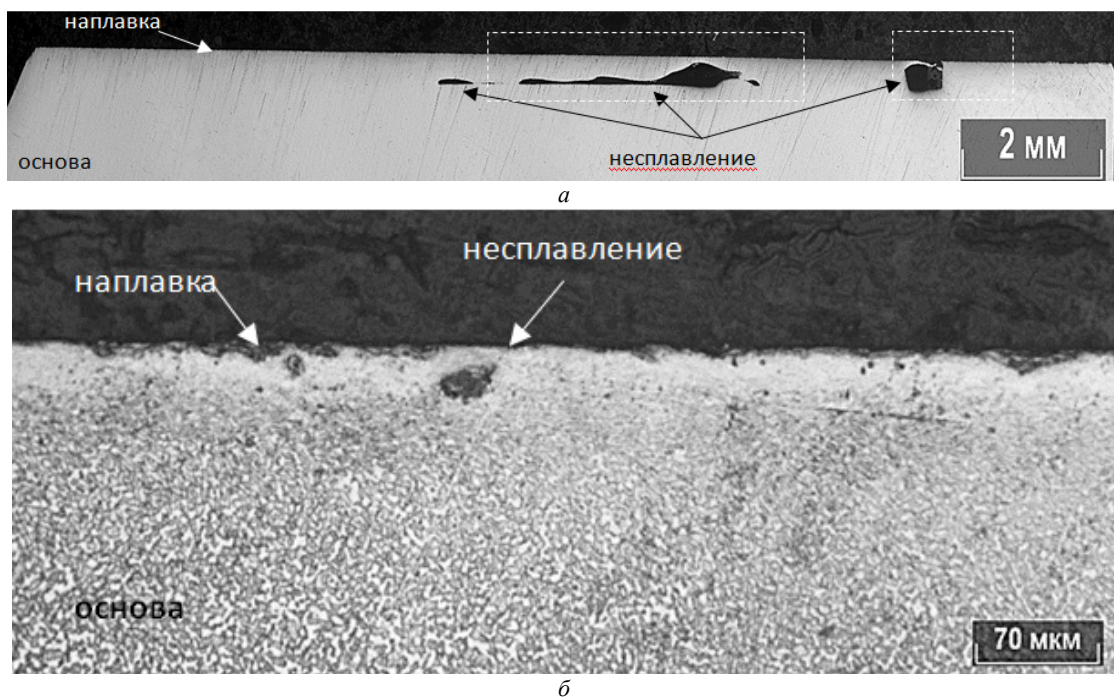


Рис. 3. Структура зоны 1 образца, полученно аргонодуговой наплавкой: а – макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя, б – микроструктура

протяженные несплавления  $D_{\varnothing} = 0,615 \dots 2,150$  мм. По месту расположения дугообразной индикации в наплавке наблюдается несплавление  $D_{\varnothing} = 2,15$  мм. Высота наплавки в средней части полки составляет  $0,190 \dots 0,200$  мм.

Микроструктура наплавленного металла состоит из пластинчатой  $\alpha$ -фазы, что типично для псевдо- $\alpha$ -сплавов с очень невысоким коэффициентом  $\beta$ -стабилизации, к которым относится

сплав ВТ-20. Микроструктура основы представляет собой  $\alpha + \beta$ -структуру, характерную для двухфазных сплавов типа ВТ-8М [17–20].

#### Лазерная порошковая наплавка

На рис. 5, б, показана макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя при лазерной наплавке для зоны 1. Микроструктура наплавленного металла и основы представлен на рис. 5, а.

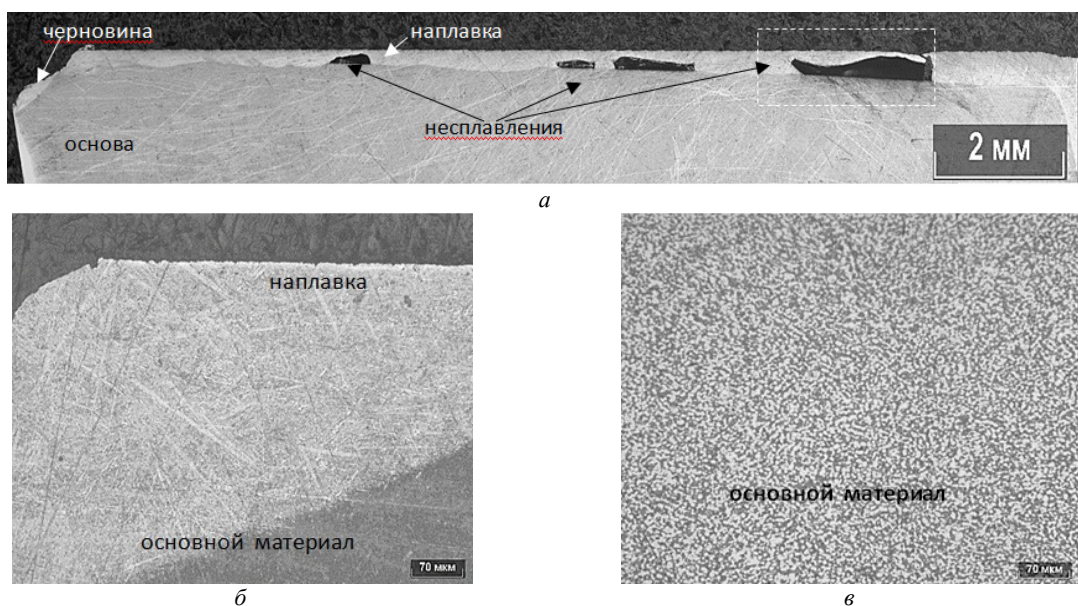


Рис. 4. Структура зоны 2 образца, полученного аргонодуговой наплавкой: *а* – макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя, *б* – микроструктура наплавленного и основного материала, *в* – микроструктура основы

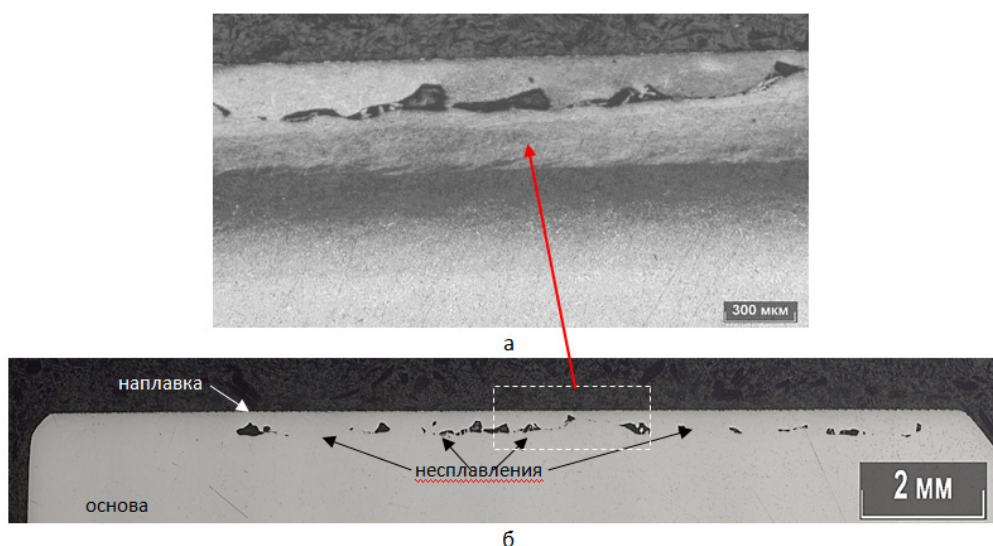


Рис. 5. Структура зоны 1 образца, полученного лазерной наплавкой: *а* – микроструктура, *б* – макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя

На рис. 6, *а*, показана макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя при лазерной наплавке для зоны 2. Микроструктура наплавленного металла и основы представлена на рис. 6, *б*, *в*.

Высота наплавки в средней части зоны 1 составляет 0,650...0,670 мм, зоны 2 – 0,504...0,544 мм.

Анализ микроструктуры наплавленного лазерной технологией материала выявил существенно более низкий уровень дефектности наплавки. Особенно это характерно для металла зоны 2 на рис. 6, в котором не зафиксировано практически ни одного значительного участка несплавления.

Микроструктура наплавленного металла для этого способа состоит из более мелкодисперсной пластинчатой  $\alpha$ -фазы, чем на лопатке с аргонодуговой наплавкой: средняя толщина игл  $\alpha$ -фазы составляет 80 мкм против 100 мкм (рис. 7).

#### Исследование микротвердости наплавленного сплава ВТ-20 при аргонодуговой и лазерной порошковой наплавке

В табл. 3 представлены результаты испытания микротвердости материала, полученного наплавлением сплава ВТ-20 при аргонодуговой и лазерной порошковой наплавке на сплав ВТ8-М.

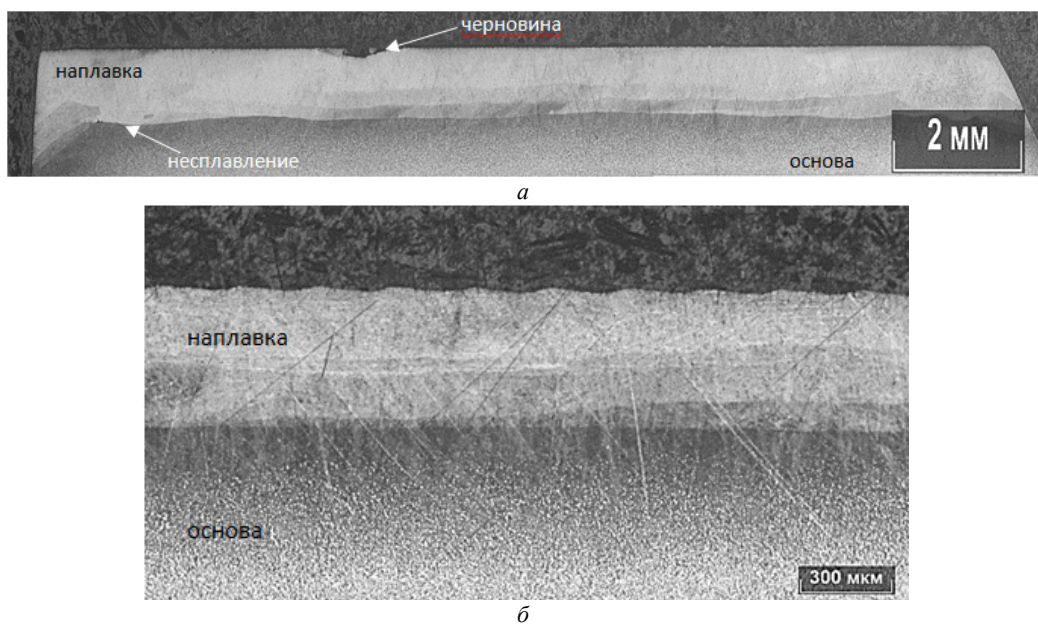


Рис. 6. Структура зоны 2 образца, полученного лазерной наплавкой:  
 а – макроструктура и распределение дефектов по длине наплавленного слоя,  
 б – микроструктура наплавленного и основного материала

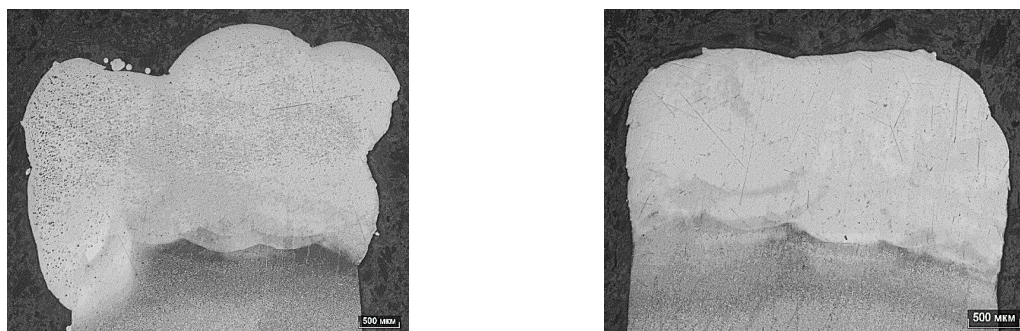


Рис. 7. Микроструктура наплавленного металла при лазерной порошковой наплавке

Таблица 3

Микротвердость сплава ВТ-20, наплавленного различными технологиями и основного материала

Характерные участки наплавки	Микротвердость HV <sub>0,05</sub> , кгс/мм <sup>2</sup>	
	аргонодуговая наплавка	лазерная порошковая наплавка
Наплавленный металл (ВТ20)	189–225	241–257
Зона термовлияния	203–223	221–262
Основной материал (ВТ-8М)	227–255	230–257

### Выводы

1. Проведенные исследования показали, что ремонтные технологии аргонодуговой и лазерной порошковой наплавки позволяют использовать жаропрочный титановый сплав ВТ-20 для восстановления изношенных участков изделий, как в виде сварочной проволоки, так и в виде порошка.

2. Установлено, что структура наплавленного лазерной технологией материала имеет существенно более низкий уровень дефектности наплавков:

пор и трещин не выявлено, участки несплавлений незначительны по протяженности.

3. Установлено, что лазерная порошковая наплавка способствует измельчению структуры наплавленного титанового сплава, повышению дисперсности пластин α-фазы, что сопровождается ростом микротвердости до среднего уровня 250 HV.

Таким образом, в качестве основной ремонтной технологии для выбранных изделий из титановых сплавов предложена технология лазерной порошковой наплавки.

## Список литературы

1. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осколков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников, Е.Л. Кротова // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3.
2. Ермолаев А.С., Иванов А.М., Василенко С.А. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя / Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 35.
3. Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys / E.A. Krivonosova, Yu.D. Schitsin, D.N. Trushnikov, S.N. Myshkina, A.V. Akulova, S.D. Neulybin, A.Yu. Dushina // Metallurgist. – 2019. – Vol. 63, no. 1–2. – P. 197–205. DOI 10.1007/s11015-019-00810-1
4. Лясоцкая В.С. Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. – М.: ЭКОМЕТ, 2003. – 351 с.
5. Microstructural and mechanical characterization of Ti6Al4V refurbished parts obtained by laser metal deposition / R. Raju, M. Duraiselvam, V. Petley, S. Verma, R. Rajendran // Mater Sci Eng A. – 2015. – Vol. 643 (3). – P. 64–71.
6. Хорев А.И. Фундаментальные и прикладные работы по конструкционным титановым сплавам и перспективные направления их развития [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ (электронный научн.-техн. журнал). – 2013. – № 2. – С. 4. – URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 28.08.2021).
7. Исследование влияния режимов изотермического деформирования и термической обработки на структуру и механические свойства опытного жаропрочного Ti-сплава / Н.А. Ночовная, В.Г. Анташев, А.А. Ширяев, Е.Б. Алексеев // Технология легких сплавов. – 2012. – № 4. – С. 92–98.
8. Бурнашов М.А., Степанова Е.Ю., Степанов Ю.С. Аддитивные и гибридные технологии в производстве инструмента и технологической оснастки: состояние, экономика, перспективы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 8, ч. 1–2. – С. 141–146.
9. О влиянии схем плазменной наплавки на формирование структуры и свойств титанового сплава / С.Н. Акулова, А.В. Мышкина, С.В. Варушкин, С.Д. Неулыбин, Е.А. Кривonosova, Ю.Д. Щицын, Т.В. Ольшанская // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2021. – № 3 (Т. 23). – С. 75–83.
10. Сварка плавлением титанового сплава VT18U / В.И. Лукин, Е.Н. Иода, М.Д. Пантелеев, А.А. Скупов // Труды ВИАМ. – 2015. – № 5. – С. 1–13.
11. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- $\alpha$ -титановых сплавов / О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, А.Р. Истракова, В.С. Калашников // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 5. – С. 73–80.
12. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Е.А. Борисова, Г.А. Бочвар [и др.]. – М.: Металлургия, 1980.
13. Колчанов Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005.
14. Шоршоров М.Х., Мещеряков В.Н. Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке: атлас. – М.: Наука, 1973. – 157 с.
15. Маквиллэн М.К. Фазовые превращения в титане и его сплавах: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1967. – 75 с.
16. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МИСИС, 2001.

17. Исследование механических свойств и структуры листов из титановых сплавов VT8, VT18U и VT25U в термоупрочненном состоянии / М.С. Калиенко, М.О. Ледер, А.В. Волков [и др.] // Технология легких сплавов. – 2017. – № 4. – С. 37–41.
18. Кондратьева О.В., Кондратьев С.Ю., Швецов О.В. Исследование режимов упрочняющей термической обработки титанового сплава VT23 // МиТОМ. – 2018. – № 11. – С. 28–35.
19. Гордиенко Л.К., Шипко А.А. Структура и фазовые превращения в титановых сплавах при быстром нагреве. – Минск: Наука и техника, 1983. – 335 с.
20. Микроструктура и свойства сплава Ti – 6Al – 4V, полученного по технологии послойного электронно-лучевого синтеза / Ю.А. Соколов, Л.Е. Афанасьева, И.А. Барабанова [и др.] // МиТОМ. – 2015. – № 6. – С. 45–50.

## References

1. Peredovye tekhnologii additivnogo proizvodstva metallicheskih izdelii [Advanced technologies for additive manufacturing of metal products]. A.A. Oskolkov, E.V. Matveev, I.I. Bezukladnikov, D.N. Trushnikov, E.L. Krotova. *Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 3.
2. Ermolaev A.S., Ivanov A.M., Vasilenko S.A. Lazernye tekhnologii i protsessy pri izgotovlenii i remonte detalei gazoturbinnogo dvigatelja [Laser technologies and processes for manufacturing and repairing gas turbine engine parts]. *Vestnik PNIPIU. Aerokosmicheskaja tekhnika*, 2013, no. 35.
3. Influence of surfacing technologies on structure formation of high-temperature nickel alloys. E.A. Krivonosova, Yu.D. Schitsin, D.N. Trushnikov, S.N. Myshkina, A.V. Akulova, S.D. Neulybin, A.Yu. Dushina. *Metallurgist*, 2019, vol. 63, no. 1–2, pp. 197–205. DOI 10.1007/s11015-019-00810-1
4. Liasotskaia V.S. Termicheskaia obrabotka svarnykh soedinenii titanovykh splavov [Heat treatment of welded joints of titanium alloys]. Moscow: EKOMET, 2003, 351 p.
5. Raju R., Duraiselvam M., Petley V., Verma S., Rajendran R. Microstructural and mechanical characterization of Ti6Al4V refurbished parts obtained by laser metal deposition. *Mater Sci Eng A.*, 2015, vol. 643(3), pp. 64–71.
6. Khorev A.I. Fundamental'nye i prikladnye raboty po konstruksionnym titanovym splavam i perspektivnye napravleniia ikh razvitiia [Fundamental and applied works on structural titanium alloys and promising directions of their development]. *Trudy VIAM (elektronnyi nauchn.-tekhn. zhurnal)*, 2013, no. 2, pp. 4. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashcheniia 28.08.2021).
7. Nochovnaia N.A., Antashev V.G., Shiriaev A.A., Alekseev E.B. Issledovanie vliianiia rezhimov izotermicheskogo deformirovaniia i termicheskoi obrabotki na strukturu i mekhanicheskie svoistva opytnogo zharoprochnogo Ti-splava [Study of the effects of isothermal deformation and heat treatment modes on the structure and mechanical properties of an experimental heat-resistant Ti alloy]. *Tekhnologiia legkikh splavov*, 2012, no. 4, pp. 92–98.
8. Bumashov M.A., Stepanova E.Iu., Stepanov Iu.S. Additivnye i gibridnye tekhnologii v proizvodstve instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki: sostoianie, ekonomika, perspektivy [Additive and Hybrid Technologies in Toolmaking and Tooling Production: State, Economics, and Prospects]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 8, part 1, 2, pp. 141–146.
9. O vliianii skhem plazmennoi naplavki na for-mirovanie struktury i svoistv titanovogo splava [On the influence of plasma surfacing schemes on the formation of the structure and properties of titanium alloy]. S.N. Akulova, A.V. Myshkina, S.V. Varushkin, S.D. Neulybin, E.A. Krivonosova, Iu.D. Shchitsyn, T.V. Ol'shanskaia. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo*



politekhničeskogo universiteta. *Mashinostroenie, Materialovedenie*, 2021, no. 3 (vol. 23), pp. 75–83.

10. Lukin V.I., Ioda E.N., Panteleev M.D., Skupov A.A. Svarka plavleniem titanovogo splava VT18U [Fusion welding of VT18U titanium alloy]. *Trudy VIAM*, 2015, no. 5, pp. 1–13.

11. Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. Povyshenie prochnostnykh kharakteristik zharop-rochnykh psevdо- $\alpha$ -titanovykh splavov [Increasing the strength characteristics of heat-resistant pseudo- $\alpha$ -titanium alloys]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. 5, pp. 73–80.

12. Borisova E.A., Bochvar G.A. et al. Titanovye splavy. Metallografiia titanovykh splavov [Titanium alloys. Metallography of titanium alloys]. Moscow: Metallurgiiia, 1980.

13. Kolchanov B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka tsvetnykh metallov i splavov [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: MISIS, 2005.

14. Shorshorov M.Kh., Meshcheriakov V.N. Fazovye prevrashcheniia i izmeneniia svoistv splavov titana pri svarke: atlas [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Nauka, 1973, 157 p.

15. Makkvillen M.K. Fazovye prevrashcheniia v titane i ego splavakh [Phase transformations in titanium and its alloys]. Moscow: Metallurgiiia, 1967, 75 p.

16. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka tsvetnykh metallov i splavov: uchebnik dlia vuzov [Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys: textbook for universities]. Moscow: Izdatelstvo MISIS, 2001.

17. Kalienko M.S., Leder M.O., Volkov A.V. et al. Issledovanie mekhanicheskikh svoistv i struktury listov iz titanovykh splavov VT8, VT18U i VT25U v termouprochnennom sostoianii [Study of mechanical properties and structure of sheets of VT8, VT18U and VT25U titanium alloys in heat-strengthened state]. *Tekhnologiiia legkikh splavov*, 2017, no. 4, pp. 37–41.

18. Kondrat'eva O.V., Kondrat'ev S.Iu., Shvetsov O.V. Issledovanie rezhimov uprochniaiushchei termicheskoj obrabotki titanovogo splava VT23 [Study of hardening heat treatment modes of VT23 titanium alloy]. *MiTOM*, 2018, no. 11, pp. 28–35.

19. Gordienko L.K., Shipko A.A. Struktura i fazovye prevrashcheniia v titanovykh splavakh pri bystrom nagreve [Structure and phase transformations in titanium alloys during rapid heating]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1983, 335 p.

20. Sokolov Iu.A., Afanas'eva L.E., Barabonova I.A. et al. Mikrostruktura i svoistva splava Ti-6Al-4V, poluchennogo po tekhnologii posloinogo elektronno-luchevogo sinteza [Microstructure and properties of alloy Ti-6Al-4V, obtained by layer-by-layer electron-beam synthesis technology]. *MiTOM*, 2015, no. 6, pp. 45–50.

Поступила: 28.01.2022

Одобрена: 21.02.2022

Принята к публикации: 22.02.2022

### Сведения об авторах

**Хомутинин Илья Сергеевич** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29; e-mail: khomutininiya@yandex.ru).

**Акулова Светлана Николаевна** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производ-

ства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29; e-mail: veta-ru@yandex.ru).

**Мышкина Альбина Васильевна** (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29; e-mail: albina\_myshkina@mail.ru).

**Кривоносова Екатерина Александровна** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29; e-mail: katerinakkkk@mail.ru).

**Лямин Яков Васильевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29).

### About the authors

**Ilya S. Khomutinin** (Perm, Russian Federation) – master's student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: khomutininiya@yandex.ru).

**Svetlana N. Akulova** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: veta-ru@yandex.ru).

**Albina V. Myshkina** (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: albina\_myshkina@mail.ru).

**Ekaterina A. Krivososova** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: katerinakkkk@mail.ru).

**Yakov V. Lyamin** (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Material Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation).

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) Проект № 21-19-00715 «Управление микроструктурой, прочностью, остаточными напряжениями и искажениями геометрии при гибридном аддитивном производстве» (Соглашение № 21-19-00715 от 20.03 2021).

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов** равноценен.