

УДК 621.701.12

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-50-61>

Научная статья

Research article



## Влияние особенностей плазменной узкоструйной резки на качество сварного шва при лазерной сварке титановых сплавов

С.В. Анахов<sup>1</sup>, Б.Н. Гузанов<sup>1</sup>, Н.С. Мичуров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный профессионально-педагогический университет  
Россия, 620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11

<sup>2</sup> Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России  
Россия, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, 22

✉ Сергей Вадимович Анахов ([sergej.anahov@rsvpu.ru](mailto:sergej.anahov@rsvpu.ru))

**Аннотация:** Исследованы особенности формирования структуры и свойств неразъемных соединений при лазерной сварке титановых сплавов типа ВТ1-0/ВТ1-0, полученных после резки новым узкоструйным плазмотроном типа ПМВР-5.3, имеющим ряд конструктивных особенностей в системе газодинамической стабилизации (ГДС) плазменной дуги. Достигнутое преимущество в эффективности ГДС способствует повышению степени прецизионности и качества реза и, как следствие, увеличению коэффициента поглощения излучения, коэффициента проплавления и эффективности лазерной сварки. По результатам исследований показано, что при получении углекислотным лазером сварных соединений типа ВТ1-0/ВТ1-0 происходит формирование узкого шва со структурой, соответствующей литому состоянию сплава, и участков с крупными равноосными зернами в центральной части шва, уменьшающимися по размерам в донной части по сравнению с расположенными в поверхностной области. Защита сплава от газонасыщения в структуре сварного шва не позволяет избежать формирования мелких микропор в структуре сварного шва, однако их количество незначительно и они не создают критических скоплений в микрообъемах шва и не влияют на прочностные характеристики неразъемного соединения, при этом средние значения микротвердости материала шва выше, чем материала основы. В результате испытаний на статическое растяжение, а также определения значения микротвердости установлено, что материал сварного шва является достаточно прочным и существенно превышает прочность самого титанового сплава, а рельеф поверхности разрушения образцов соответствует вязкому разрушению. При циклических испытаниях образцов сварных соединений разрушение происходило не по шву, а по основному металлу с ростом доли зон долома в сечении образцов при увеличении значений максимального напряжения цикла. По результатам исследований можно сделать вывод о применимости технологий прецизионной узкоструйной воздушно-плазменной резки и сварки углекислотным лазером непрерывного действия для реализации процесса получения сварных соединений ВТ1-0/ВТ1-0 с высокой степенью эффективности и прочности на уровне соединяемых материалов.

**Ключевые слова:** лазерная сварка, плазменная резка, титановые сплавы, сварной шов, зона термического влияния, структурные превращения, дефекты, качество, эффективность.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00111.

Авторы выражают благодарность Е.Б. Трушиной за помощь в проведении исследований фрактографии поверхности образцов после механического испытания и к.т.н. Д.И. Вычужанину за помощь в проведении механических испытаний.

**Для цитирования:** Анахов С.В., Гузанов Б.Н., Мичуров Н.С. Влияние особенностей плазменной узкоструйной резки на качество сварного шва при лазерной сварке титановых сплавов. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(4):50–61.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-50-61>

# Influence of plasma narrow-jet cutting parameters on the weld quality during laser welding of titanium alloys

S.V. Anakhov<sup>1</sup>, B.N. Guzanov<sup>1</sup>, N.S. Michurov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian State Vocational Pedagogical University  
11 Mashinostroiteley Str., Ekaterinburg 620012, Russia

<sup>2</sup> Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM  
22 Mira Str., Ekaterinburg 620062, Russia

✉ Sergey V. Anakhov (sergej.anahov@rsvpu.ru)

**Abstract:** The study investigates the structural and mechanical characteristics of permanent joints produced by laser welding of VT1-0/VT1-0 titanium alloys after cutting with a newly designed PMVR-5.3 narrow-jet plasma torch, which features a gas-dynamic stabilization (GDS) system with several design innovations. The improved GDS efficiency enhances cutting precision and surface quality, thereby increasing the radiation absorption coefficient, weld penetration, and overall laser-welding efficiency. Experimental results show that continuous-wave CO<sub>2</sub> laser welding of VT1-0/VT1-0 plates forms a narrow weld with a structure corresponding to the as-cast state of the alloy and large equiaxed grains in the central part of the weld, which decrease in size toward the root compared with those in the surface region. Although gas shielding does not completely prevent the formation of fine micropores in the weld metal, their amount is insignificant; they do not form critical clusters within the microvolumes of the weld and have no adverse effect on the strength characteristics of the welded joint. The average microhardness of the weld metal was found to be higher than that of the base metal. According to tensile and microhardness testing, the weld metal demonstrates high strength, significantly exceeding that of the titanium alloy, and exhibits a ductile fracture morphology. Under cyclic loading, fracture occurred in the base metal rather than in the weld metal, with the fraction of the final rupture zones increasing as the maximum cyclic stress rose. The findings confirm the applicability of precision narrow-jet air-plasma cutting and continuous-wave CO<sub>2</sub> laser welding technologies for producing VT1-0/VT1-0 welded joints with high efficiency and mechanical strength comparable to those of the base material.

**Keywords:** laser welding, plasma cutting, titanium alloys, weld metal, heat-affected zone, structural transformations, defects, quality, efficiency.

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00111.

The authors thank E.B. Trushina for assistance with fractographic examination of specimen fracture surfaces after mechanical testing, and D.I. Vychuzhanin (Cand. Sci. (Eng.)), for assistance with the mechanical tests.

**For citation:** Anakhov S.V., Guzanov B.N., Michurov N.S. Influence of plasma narrow-jet cutting parameters on the weld quality during laser welding of titanium alloys. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(4):50–61. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-4-50-61>

## Введение

Многочисленные комплексные исследования титана и его сплавов, выполненные в последние годы, однозначно показывают, что по своим физико-механическим, химическим и технологическим свойствам они во многом превосходят большинство современных конструкционных материалов, включая такие самые распространенные, как сталь и алюминий. Постоянное увеличение масштаба их применения обусловлено тем, что, имея низкую плотность, титановые сплавы обладают высокими показателями прочности и жаростойкости при умеренных температурах и сохраняют при этом высокую коррозионную стойкость. Все это сделало титан универсальным конструкционным материалом, особенно в высокотехнологичном производстве, где титановые сплавы с различными характеристиками являются ключевыми, а в

ряде случаев и безальтернативными для стратегических отраслей, к которым относятся авиа- и ракетостроение, атомная энергетика, судостроение, химическая промышленность и т.п. [1–3].

Использование сварки, которая позволяет получать неразъемные соединения с высоким качеством сварного шва (СШ), дало возможность значительно расширить суммарные объемы применения титана и его сплавов при изготовлении технических изделий и металлоконструкций различной сложности и назначения. Необходимо, однако, принять во внимание, что сварочные работы с титаном и его сплавами сопряжены с определенными трудностями и сложностями, связанными, в частности, с высокой активностью этих материалов к азоту, кислороду и водороду при повышенных температурах и в расплавленном состоянии.

В результате происходит потеря пластичности за счет образования устойчивых соединений с газами, а также дефектов в виде пор. Все это требует обеспечения надежной защиты зоны сварки и обратной стороны корня шва от вредного воздействия атмосферного воздуха, а также создания условий в процессе сварки для минимизации времени нагрева соединяемых деталей [4].

Весьма существенным недостатком титановых сплавов считается склонность к образованию крупнозернистой структуры в процессе сварки как в самом сварном шве, так и в околошовной зоне термического влияния, что способствует потере прочности неразъемного соединения за счет образования гетерогенной микроструктуры, отличной от основного металла заготовок [5; 6]. Так как при высокотемпературном нагревании различных участков в зоне сварного соединения происходит образование металла с разной степенью зернистости, возникают также проблемы с выбором режима сварки, обеспечивающего минимальный нагрев околошовной зоны. С этих позиций лазерная сварка рассматривается как возможная альтернатива традиционным видам получения неразъемных соединений [7], поскольку кратковременность и локальность высокоэнергетического воздействия лазерного луча определяют наиболее благоприятные условия формирования сварных швов изделий из титана и его сплавов [8; 9].

## Технологии и постановка задачи исследования

Отмечая ряд несомненных достоинств применения лазерных технологий в сварочных процессах при изготовлении различных металлоконструкций [10; 11], необходимо принимать во внимание некоторые особенности лучевой обработки. В первую очередь, это относится к довольно низкому значению КПД процесса, так как результативность обработки зависит от отражающих характеристик поверхности свариваемых металлов. Существуют различные способы повышения коэффициента поглощения и, как следствие, коэффициента проплавления и эффективности сварки. Как показано в работе [12], коэффициент поглощения зависит от свойств материала, качества и метода обработки поверхности кромки, определяющих, в свою очередь, разную степень шероховатости реза и форму зазора при выполнении стыковых соединений пластин. Проведение комплексных исследований по оценке соотноше-

ния между коэффициентом поглощения и качеством поверхности кромки реза показало заметное увеличение уровня отраженного излучения на более шероховатых поверхностях по сравнению с более отполированными [13–15]. В этой связи следует заметить, что шероховатость реза, образующаяся при раскрое листа в процессе заготовительных операций, имеет разную геометрию в зависимости от способа обработки и изменяется в довольно широких пределах.

Авторами были проведены сравнительные исследования по оценке качества реза с применением высокоэнергетических технологий разделки для производства сварных соединений, позволившие сделать вывод, что высокие результаты по всем нормируемым показателям можно получить при использовании прецизионной воздушно-плазменной резки металлических материалов с применением плазмотрона ПМВР-5.3 (авторская разработка производства ООО НПО «Полигон» (г. Екатеринбург) [16]). Особенностью данной разработки является внедрение новой конструкции газозащитного тракта плазмотрона с симметричным вводом плазмообразующего газа в систему деления потока и газодинамического стабилизатора потока, использующего два завихрителя (формирующего и стабилизирующего) с переменным числом каналов завихрения в системе газодинамической стабилизации плазменной дуги. Внимание при исследовании было обращено на такие нормируемые показатели, как наличие грат, капель и цветов побежалости, а также на появление осцилляций (изменение линейности микронеровностей на поверхности реза) и отклонение от вертикали кромок реза. В целях количественного обоснования сделанных по результатам визуального анализа выводов было проведено исследование параметров микрорельефа поверхности с помощью измерителя шероховатости TR 200 [17]. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Наиболее приемлемыми по геометрическим параметрам и чистоте поверхности реза после высокоэнергетической обработки для последующей лазерной сварки можно считать резку с помощью плазмотрона ПМВР-5.3, который был разработан как импортозамещающий зарубежные аналоги плазменных устройств подобного класса. В то же время авторами в работе [17] было показано, что увеличение глубины проплавления с формированием качественного сварного шва при лазерной обработке было получено на уровне шероховатости реза  $Ra \sim 2,0 \div 6,3$  мкм, что должно способ-

Таблица 1. Сравнение средних показателей шероховатости реза при различных технологиях высокотемпературной разделки

Table 1. Comparison of average surface roughness parameters for various high-temperature cutting technologies

Образец	Технология резки	Устройство	Режим резки	$Ra$	$Rz$	$Rt$
1	Воздушно-плазменная	Плазмотрон УК200Н (Huaquan FLG-400HD, КНР)	$I = 175 \text{ A}$ $U = 155 \text{ В}$ $V = 1500 \text{ мм/мин}$ $D_{\text{сопла}} = 1,9 \text{ мм}$	3,30	4,22	34,82
2	Воздушно-плазменная	Плазмотрон ПМВР-5.3 (ООО НПО «Полигон», РФ)	$I = 175 \text{ A}$ $U = 137 \text{ В}$ $V = 1500 \text{ мм/мин}$ $D_{\text{сопла}} = 1,9 \text{ мм}$ $P = 4,5 \text{ атм}$	2,17	2,70	58,48
3	Газокислородная	Система механизированной газовой резки «Longteng» (КНР)	$P_{\text{O}_2} = 5 \text{ атм}$ $P_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,5 \text{ атм}$ $V = 1500 \text{ мм/мин}$	3,71	4,65	33,86
4	Лазерная	Trulaser 5030 Classic, CO <sub>2</sub> (Trumpf Group, Германия)	$N = 1,7 \text{ кВт}$ $f = 2 \text{ кГц}$ $V = 600 \text{ мм/мин}$ $P = 0,6 \text{ бар}$	10,78	12,61	69,41

ствовать повышению коэффициента поглощения на поверхности кромок. При дальнейшем росте шероховатости увеличивается зазор между сопрягаемыми свариваемыми пластинами, значительная часть лазерного луча может как бы «проваливаться» сквозь зазор, и коэффициент поглощения уменьшается, что снижает качество и повышает дефектность СШ.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы являлось исследование особенностей формирования структуры и свойств неразъемных соединений при лазерной сварке титановых сплавов с использованием для раскроя листа узкоструйной технологии воздушно-плазменной резки с помощью плазмотрона ПМВР-5.3.

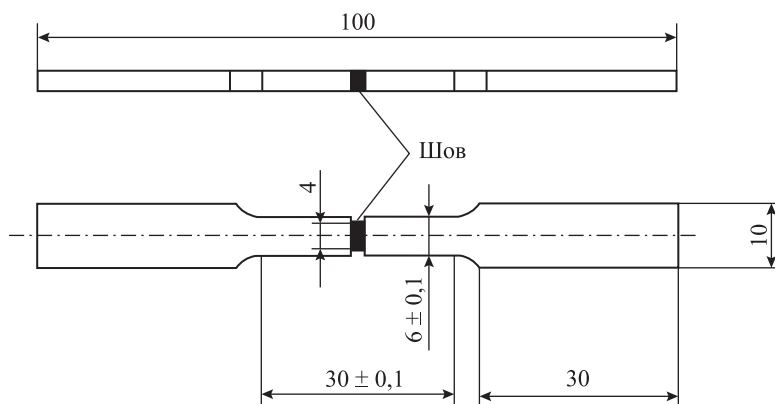
## Материалы и методы исследования

Известно, что сплавы титана имеют склонность к закалке из-за наличия в них ряда легирующих элементов, которые способствуют образованию неравновесных структур и снижению пластичности, вплоть до образования холодных трещин [18; 19]. По этой причине в качестве материала для исследования был выбран технически чистый титан ВТ1-0, при сварке которого в зоне неразъемного соединения формируется только

литая структура исходного титана, что позволяет оценить качество сварного шва в чистом виде без учета возможных фазовых и структурных превращений.

Сварку титановых пластин толщиной 3 мм после плазменной резки осуществляли углекислотным лазером непрерывного действия (его максимальная мощность 3 кВт) с линзой из селенида цинка (фокусное расстояние 254 мм) плоскопараллельным лучом диаметром 30 мм по следующему режиму: скорость перемещения лазерного луча  $V = 46,6 \text{ мм/с}$ , мощность  $W = 2,1 \text{ кВт}$ , фокусное расстояние  $F = 0 \text{ мм}$ . Для защиты сварной ванны и околошовных зон была использована газозащита смесью углекислого газа и воздуха в соотношении 1:7 (в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14175-2010<sup>1</sup>) с давлением 12 торр (1,6 кПа). Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «Neophot 21» (Германия). Выявление структуры титана и сварного шва, а также подготовку поверхности для микроиндентирования осуществляли химическим трав-

<sup>1</sup> ГОСТ Р ИСО 14175-2010. Материалы сварочные. Газы и газовые смеси для сварки плавлением и родственных процессов. М.: Стандартинформ, 2011.



**Рис. 1.** Схематическое изображение образца для испытаний на растяжение

**Fig. 1.** Schematic representation of the specimen used for tensile testing

лением в реактивах. Особенности строения СШ и околосшовных зон определяли на образцах, вырезанных из различных участков зоны неразъемного соединения с учетом особенностей формирования структуры сплава при кристаллизации после высокотемпературной обработки. Величину зерна определяли в соответствии с ГОСТ 21073.3-75<sup>1</sup> методом подсчета пересечения границ. Для определения значений микротвердости по ширине СШ проводили инструментальное микроиндентирование алмазной пирамидкой Виккерса на инструментированном микротвердомере «Fischerscope НМ 2000 ХУm» (Helmut Fischer GmbH, Германия). Характеристики прочности сварных соединений оценивали по результатам испытаний на сервогидравлической машине «Instron 8801» (Instron, США) в соответствии с ГОСТ 6996-66<sup>2</sup>. Использовались плоские образцы типа Б, предназначенные для определения прочности металла шва сварного соединения. С целью гарантированного разрушения только по сварному шву, на образцах по всей ширине СШ была выполнена специальная выточка, уменьшающая площадь поперечного сечения образца на 30 % (рис. 1).

Циклические испытания на усталость плоских образцов проводили по синусоидальному циклу с частотой нагружения 5 Гц и коэффициентом несимметрии, равным 0, в соответствии

с РД 50-345-82<sup>3</sup>. Рельеф поверхности разрушения образцов после механических испытаний исследовали на растровом электронном микроскопе «Tescan Vega-II XMU» (Carl Zeiss, Чехия) и описывали с использованием терминов и основных понятий в соответствии с РД 50-672-88<sup>4</sup>.

## Результаты исследования

При получении сварного соединения ВТ1-0/ВТ1-0 был сформирован узкий шов с коэффициентом формы (отношение глубины проплавления к ширине шва), равным 2,5 (рис. 2). Несмотря на высокие скорости охлаждения, размер зерна в зонах сварного шва (ЗСШ) и термического влияния (ЗТВ) значительно выше по сравнению с основным металлом (табл. 2). Строение ЗСШ соответствует литому состоянию сплава: в центре располагаются равноосные полиэдрические зерна, от которых к основе вытянуты вдоль направления теплоотвода более крупные зерна (рис. 3, а). В донной части швов размеры зерен в 1,5–2,0 раза меньше по сравнению с расположенными в поверхностной области, и они более равноосны (рис. 3, б).

<sup>1</sup> ГОСТ 21073.3-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечения границ. М.: Изд-во стандартов, 2002.

<sup>2</sup> ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2006.

<sup>3</sup> РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы циклических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. М.: Изд-во стандартов, 1983.

<sup>4</sup> РД 50-672-88. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. М.: Изд-во стандартов, 1989.



Таблица 2. Характеристики материала сварного соединения ВТ1-0/ВТ1-0

Table 2. Characteristics of the VT1-0/VT1-0 welded joint material

Образец	Параметры ЗСШ				Параметры ЗТВ				Размер зерна $d$ , мкм		
	$l$ , мм	$HV_{0,05}$			$l$ , мм	$HV_{0,05}$			Основа	ЗТВ	ЗСШ
		max	min	среднее		max	min	среднее			
1	1,2	370	210	280	0,75	280	195	230	20	40	300
2	1,2	275	175	230	0,70	275	220	247	20	50	300

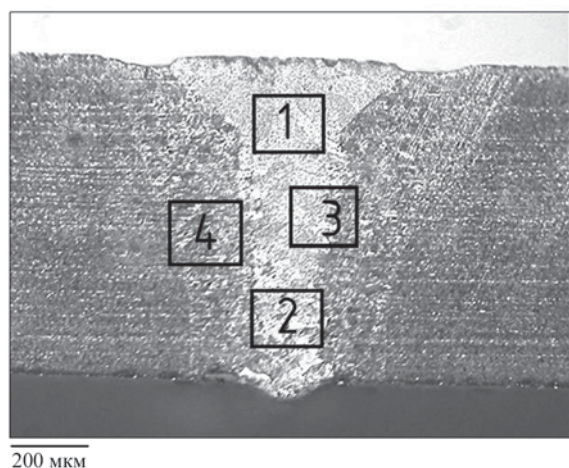


Рис. 2. Макроструктура сварного соединения ВТ1-0/ВТ1-0

Fig. 2. Macrostructure of the VT1-0/VT1-0 welded joint

Микроструктура литого сплава ВТ1-0 представляет собой  $\beta$ -превращенные зерна размером  $\sim 300$  мкм, которые состоят из пачек параллельных  $\alpha$ -пластин, толщина которых составляет 4–10 мкм, а длина сравнима с размером первичного  $\beta$ -зерна. Известно [20; 21], что при полиморфном  $\beta$ — $\alpha$ -превращении  $\alpha$ -фаза растет согласно принципу ориентационного и размерного соответствия, в результате чего образуются  $\alpha$ -пластины, параллельно расположенные и направленные в одну сторону. При этом колонии пластин  $\alpha$ -фазы создают внутри бывших зерен  $\beta$ -фазы своеобразную внутризеренную текстуру.

В то же время в материале ЗТВ на границе раздела с основой формируется смешанная микроструктура, представляющая собой совокупность светлых полиэдрических зерен  $\beta$ -фазы и пластинок  $\alpha$ -фазы (рис. 3, в). Следует заметить, что размер зерна  $\alpha$ -фазы в ЗТВ в  $\sim 1,5$ – $2,0$  раза больше, чем в основном металле (см. табл. 2). В целом, материал зоны термического влияния сварного шва был

идентифицирован как неполностью рекристаллизованный, где было выявлено большое количество деформированных зерен  $\alpha$ -фазы с высоким уровнем остаточных напряжений, которые влияют на ориентировку кристаллов, формируют текстуру и определяют особенности структурообразования самого сварного шва (рис. 3, г).

Исследования показали, что, несмотря на защиту сплава от газонасыщения, в структуре СШ наблюдаются мелкие микропоры размерами  $\sim 2$ – $3$  мкм, которые можно увидеть на представленной ниже фотографии (рис. 7, б) микроучастка шевронного излома. Следует заметить, что их количество незначительно и они не создают критических скоплений в микрообъемах шва и в целом не влияют на прочностные характеристики сварного соединения (табл. 3). По структуре ВТ1-0 относится к однофазным  $\alpha$ -сплавам, в которых всегда присутствует определенное количество второй  $\beta$ -фазы, располагающейся в виде тонких пластинок на границах  $\alpha$ -зерен. В результате двухфазное строение определило неравномерное распределение микротвердости исходного сплава, минимальные значения которой соответствуют  $\beta$ -фазе, а максимальные —  $\alpha$ -фазе [22]. В структуре сварного шва, как было показано выше, образуется смешанная микроструктура, в которой участки, богатые  $\beta$ -фазой, при резком охлаждении из расплава достигают высокой прочности, что способствует среднему повышению микротвердости по ширине СШ с достижением максимальных значений в его литой микроструктуре [23]. При этом измельчение размеров сформированных фаз способствовало увеличению величины разброса значений микротвердости по длине линии измерений. Усредненный характер изменения микротвердости приведен на рис. 4.

Результаты испытаний на статическое растяжение показали, что материал сварного шва, несмотря на некоторую внутреннюю пористость,

Таблица 3. Результаты механических испытаний образцов сварного соединения VT1-0/VT1-0

Table 3. Mechanical test results for VT1-0/VT1-0 welded joint specimens

Образец	Материал	Растяжение		Усталостные испытания		
		Место разрыва	$\sigma_B$ , МПа	Число циклов	$\sigma$ , МПа	$\sigma/\sigma_B^*$
1	Основной металл	—	500	Не определяли		
2	СШ	СШ	620	5770	433	0,7
3	СШ	СШ	660	485856	257	0,4

\* Сравнивались образцы с одинаковым отношением максимального напряжения цикла ( $\sigma$ ) к определенному при испытаниях на растяжение значению временного сопротивления отрыву ( $\sigma_B$ ).

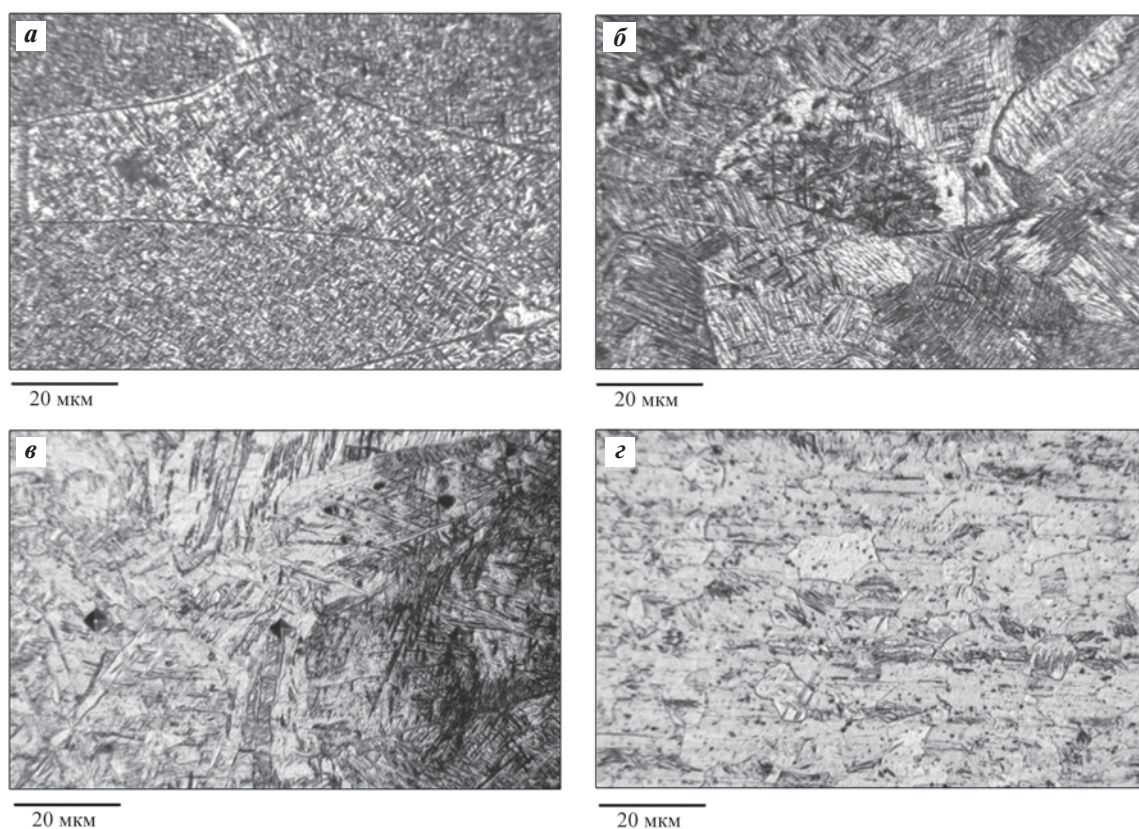


Рис. 3. Микроструктура сварного соединения VT1-0/VT1-0

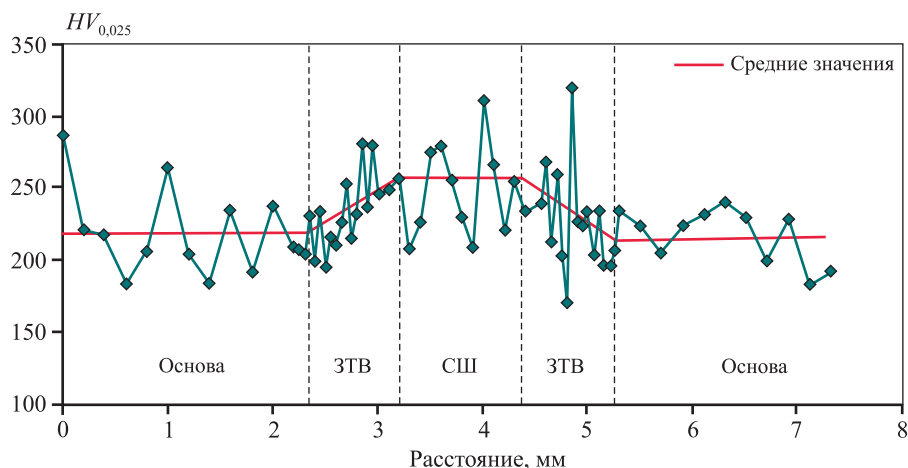
*a* — верхняя часть ЗСШ (зона 1 на рис. 2); *б* — корень ЗСШ (зона 2 на рис. 2); *в* — граница ЗСШ и ЗТВ (зона 3 на рис. 2); *г* — ЗТВ (зона 4 на рис. 2)

Fig. 3. Microstructure of the VT1-0/VT1-0 welded joint

*a* — upper part of the fusion zone (area 1 in Fig. 2); *б* — root of the fusion zone (area 2 in Fig. 2); *в* — boundary between FZ and HAZ (area 3 in Fig. 2); *г* — heat-affected zone (area 4 in Fig. 2)

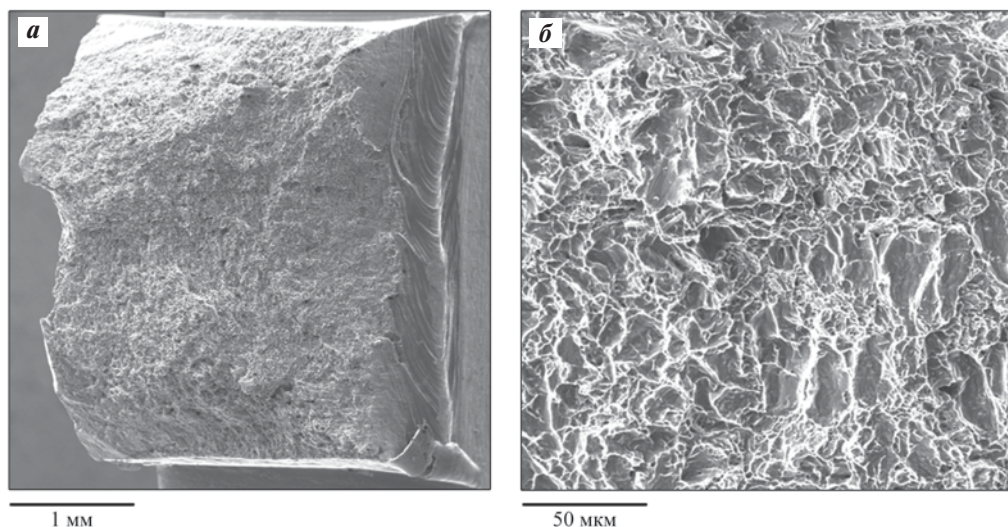
является прочным (табл. 3), с существенным превышением прочности самого сплава. Рельеф поверхности разрушения образцов после статического растяжения соответствует вязкому разрушению (рис. 5, *a, б*). На поверхности разрушения сварных швов наряду с ямками различной глубины наблюдали отдельные фрагменты сотового рельефа

(рис. 5, *б*) — скопление мелких плоских ямок в виде сот, характерных для разрушения литых сплавов. Сотовый рельеф свидетельствует о малой доле локальной пластической деформации при разрушении, однако подобный рельеф относится к вязкому разрушению и характерен для пластичных материалов [20; 24].



**Рис. 4.** Характер изменения микротвердости по ширине сварного соединения VT1-0/VT1-0

**Fig. 4.** Variation of microhardness across the width of the VT1-0/VT1-0 welded joint



**Рис. 5.** Макро- (а) и микро- (б) рельеф поверхности разрушения образца сварного соединения VT1-0/VT1-0 после статического растяжения

**Fig. 5.** Macro- (a) and micro- (b) relief of the fracture surfaces of a VT1-0/VT1-0 welded joint specimen after tensile testing

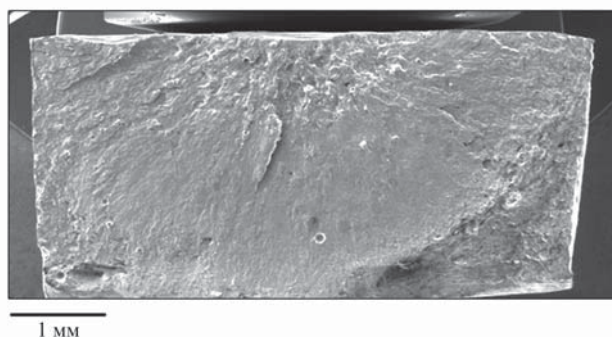
При циклических испытаниях образцов сварных соединений VT1-0/VT1-0 при условии  $\sigma/\sigma_B \geq 0,72$  разрушение образца происходило не по шву, а по основному металлу. При этом имели место значительные пластические деформации с образованием шейки на последних циклах деформирования. Это явление объясняется тем, что сплав VT1-0 является циклически разупрочняющимся [18].

Поверхность разрушения всех образцов имела характерные признаки усталостного излома — зоны, отличающиеся по рельефу поверхности (очаг;

усталостные бороздки; рубцы, представляющие собой следы слияния отдельно расположенных соседних трещин, распространяющихся в одном направлении, как правило от очага), а также зоны долома с признаками вязкого разрушения. Рельеф поверхности разрушения образцов сварных соединений VT1-0/VT1-0 показан на рис. 6.

Излом в очагах — хрупкий, перистый, распространяющийся вдоль нескольких направлений. Наряду с сохранением общей направленности развития усталостных трещин наблюдается ее изменение в соседних зернах (рис. 7, а). На характер





**Рис. 6.** Макрорельеф поверхности разрушения образца сварного соединения VT1-0/VT1-0 при максимальной нагрузке цикла 265 МПа

**Fig. 6.** Macroscopic fracture surface of a VT1-0/VT1-0 welded joint specimen at a maximum cyclic load of 265 МПа

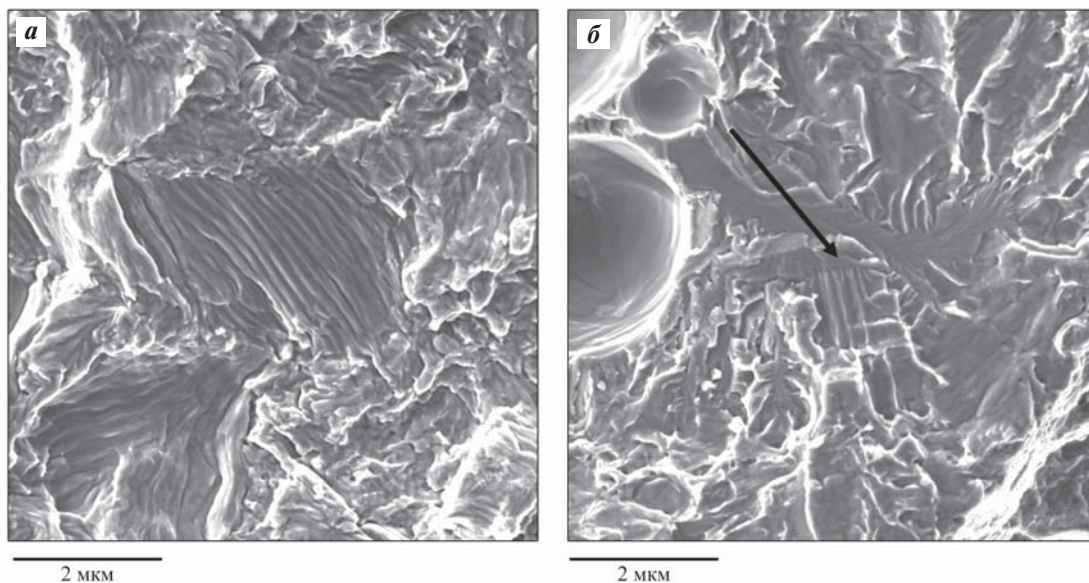
распространения усталостных трещин в очагах, несомненно, оказывает влияние пластинчатое строение  $\alpha$ -фазы в материале ЗСШ, поэтому гладкие притертые участки чередуются с рельефными ступеньками, которые можно принять за хрупкие сколы, хотя на самом деле это боковые поверхности  $\alpha$ -пластин.

Рядом с микропорами можно наблюдать отдельные участки характерного шевронного излома

(отмечен стрелкой на рис. 7, б), являющегося признаком малой пластической деформации и образующегося при растяжении с изгибом в зоне нестабильного развития трещины или участка хрупкого транскристаллитного усталостного разрушения. Поры изменяют направление роста усталостных трещин, что проявляется в изменении направления усталостных бороздок, причем в очагах встречаются отдельные участки вязкого усталостного излома с усталостными бороздками, плато, участки межкристаллитного роста усталостных трещин.

Исследование изменения рельефа поверхности разрушения образцов после усталостных испытаний с разными значениями максимального напряжения цикла показало, что доля зоны долома в сечении образцов при значениях максимальных напряжений цикла 264 МПа составляет 35 об. %. При этом соотношение площади поверхности разрушения, занимаемой зоной усталостного разрушения, и площади поверхности зоны долома увеличилось до 1,9. На всех исследованных образцах зоны долома имели ямочный излом с относительно большой глубиной ямок, что свидетельствует о большой работе разрушения.

С увеличением значений максимального напряжения цикла, как и следовало ожидать, повы-



**Рис. 7.** Микрорельеф поверхности разрушения образца сплава VT1-0

**а** — изменение направления роста усталостной трещины вблизи очага

**б** — микроучасток шевронного излома вблизи микропоры (отмечен стрелкой)

**Fig. 7.** Macroscopic fracture surface of a VT1-0 alloy specimen

**а** — change in fatigue crack propagation direction near the initiation site

**б** — microregion of a chevron fracture near a micropore (indicated by an arrow)

шалась доля зон долома в сечении образцов — при максимальном напряжении цикла 425 МПа зоны долома занимают 55 об. %. Это свидетельствует о значительном вкладе зоны долома в прочность образцов титанового сплава со сварными швами при усталостных нагрузках. Как известно, ямочный излом соответствует условно высокой работе разрушения, поэтому большее количество циклов до разрушения выдержали образцы, в которых собственно усталостный рост трещин происходил в объеме сплава, в 2 раза меньшем, по сравнению с зоной долома.

## Выводы

1. При подготовке сварных соединений можно использовать разделительную воздушно-плазменную резку с применением узкоструйных плазматронов типа ПМВР-5.3, обеспечивающую высокую степень прецизионности и качества реза, а также способствующую повышению коэффициента поглощения и, как следствие, коэффициента проплавления и эффективности лазерной сварки.

2. При получении углекислотным лазером сварных соединений типа ВТ1-0/ВТ1-0 происходит формирование узкого шва со структурой, соответствующей литому состоянию сплава, и участков с крупными равноосными зернами в центральной части шва, вытянутыми вдоль направления теплоотвода ближе к его границам в центре и уменьшающимися по размерам в донной части по сравнению с расположенными в поверхностной области. Микроструктура сварного шва представляет собой совокупность светлых полиэдрических зерен и пластинок  $\alpha$ -фазы с размером зерна  $\alpha$ -фазы в зоне термического влияния в 1,5–2,0 раза большим, чем в основном металле.

3. Защита сплава от газонасыщения в структуре сварного шва не позволяет избежать формирования мелких микропор в структуре сварного шва и, как следствие, неравномерного распределения микротвердости, однако за счет тонкопластинчатой морфологии  $\alpha$ -фазы средние значения микротвердости оказались несколько выше для материала шва по сравнению с основой. Согласно результатам испытаний на статическое растяжение, материал сварного шва, несмотря на некоторую внутреннюю пористость, является прочным, с существенным превышением прочности самого сплава, а рельеф поверхности разрушения образцов соответствует вязкому разрушению.

4. При циклических испытаниях образцов сварных соединений ВТ1-0/ВТ1-0 разрушение образца происходило не по шву, а по основному металлу. С увеличением значений максимального напряжения цикла ожидаемо возрастает доля зон долома в сечении образцов, что свидетельствует о значительном вкладе зоны долома в прочность образцов титанового сплава со сварными швами при усталостных нагрузках.

5. Применение технологий прецизионной узкоструйной воздушно-плазменной резки и сварки углекислотным лазером непрерывного действия позволяет осуществлять процесс получения сварных соединений ВТ1-0/ВТ1-0 с высокой степенью эффективности и прочности на уровне соединяемых материалов.

## Список литературы/References

1. Александров А.В., Леднов С.В., Давыдкина Е.А. Состояние дел в титановой отрасли и перспективы развития. *Технология легких сплавов*. 2021;(2):76–81. <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2021-2-76-81>  
Aleksandrov A.V., Lednov S.V., Davydkina E.A. State of the affairs in the titanium industry and development prospects. *Tekhnologiya legkikh splovov*. 2021;(2):76–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2021-2-76-81>
2. Kishawy H.A., Hosseini A. Machining difficult-to-cut materials. Chapter: Titanium and titanium alloys. Springer: Ser. Materials forming, machining and tribology, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95966-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95966-5_3)
3. Бубнов В.А., Князев А.Н. Титан и его сплавы в машиностроении. *Вестник Курганского государственного университета*. 2016;(3):92–96.  
Bubnov V.A., Knyazev A.N. Titanium and its alloys in mechanical engineering. *Bulletin of Kurgan State University*. 2016;(3):92–96. (In Russ.).
4. Пульцин Н.М. Взаимодействие титана с газами. М.: Металлургия, 1969. 213 с.
5. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М.: Наука, 1994. 304 с.
6. Germain L., Gey N., Humbert M., Vo P., Jahazi M., Bocher Ph. Texture heterogeneities induced by subtransus processing of near  $\alpha$  titanium alloys. *Acta Materialia*. 2008;56(15):4298–4308.
7. Groche P., Wohletz S., Brenneis M., Pabst P., Resch F. Joining by forming — A review on joint mechanisms, applications and future trends. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;212(10):1972–1994.

8. Патон Б.Е., Шелягин В.Д., Ахонин С.В., Топольский В.Ф., Хаскин В.Ю., Петриченко И.К., Бернацкий А.В., Мищенко Р.Н., Сиора А.В. Лазерная сварка титановых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2009;(10):35–39.  
Paton B.E., Shelyagin V.D., Akhonin S.V., Topolskii V.F., Khaskin V.Yu., Petrichenko I.K., Bernatskii A.V., Mishchenko R.N., Siora A.V. Laser welding of titanium alloys. *Avtomaticheskaya svarka*. 2009;(10):35–39. (In Russ.).
9. Sokolov M., Salminen A. Improving laser beam welding efficiency. *Engineering*. 2014;6(09):559–571.  
<https://doi.org/10.4236/ENG.2014.69057>
10. Akman E., Demir A., Canel T., Sınmazçelik T. Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(8):3705–3713.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.026>
11. Zhang Y., Sun D., Gu X., Li H. A hybrid joint based on two kinds of bonding mechanisms for titanium. *Materials Letters*. 2016;15(185):152–155.
12. Riccardi G., Cantello M. Laser material interactions: Absorption coefficient in welding and surface treatment. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 1994;1: 171–175.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.03.025>
13. Sokolov M., Salminen A. Experimental investigation of the influence of edge morphology in high power fiber laser welding. *Physics Procedia*. 2012;39:33–42.  
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.0115>
14. Covelli L., Jovane F., De Lori L., Tagliaferri V. Laser welding of stainless steel: Influence of the edges morphology. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*. 1988;37:545–548.
15. Sokolov M., Salminen A., Somonov V., Kaplan A.F. Laser welding of structural steels: Influence of the edge roughness level. *Optics & Laser Technology*. 2012;44(7):2064–2071.
16. Пыкин Ю.А., Анахов С.В., Матушкин А.В. Плазмотрон: Патент 2754817 (РФ). 2021.
17. Анахов С.В., Гузанов Б.Н., Матушкин А.В., Мичуров Н.С. О соблюдении регламентных норм на качество резки при производстве сварных соединений. *Компетентность*. 2024;(5):56–62.  
<https://doi.org/10.24412/1993-8780-2024-5-56-62>  
Anakhov S.V., Guzanov B.N., Matushkin A.V., Michurov N.S. On compliance with regulatory standards for cutting quality in the production of welded joints. *Competency*. 2024;(5):56–62. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.24412/1993-8780-2024-5-56-62>
18. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справочник. М.: ВИЛС—МАТИ, 2009. 520 с.
19. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2014. 137 с.
20. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. Учеб. пос. для вузов. М.: МИСИС, 2007. 264 с.
21. Gnusov S.F., Klimenov V.A., Alkhimov Yu.V., Budnitsky A.D., Orishich A.M., Cherepanov A.N., Afonin Yu.V. Formation of the structure of titanium and corrosion-resistant steel during laser welding. *Welding International*. 2012;(1):17–22.
22. Иванов М.Б., Колобов Ю.Р., Манохин С.С., Голосов Е.В. Исследование структурно-фазового состояния медицинских титановых сплавов современными методами аналитической электронной микроскопии. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012;78(1):43–54.  
Ivanov M.B., Kolobov Yu.R., Manokhin S.S., Golosov E.V. Investigation of the structural and phase state of medical titanium alloys by modern methods of analytical electron microscopy. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2012;78(1):43–54. (In Russ.).
23. Польшкин И.С., Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В. Легирование, фазовый состав и механические свойства титановых сплавов. *Технология легких сплавов*. 2022;(2):4–13.  
<https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-2-4-13>  
Polkin I.S., Egorova Yu.B., Davydenko L.V. Alloying, phase composition and mechanical properties of titanium alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2022;(2): 4–13. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-2-4-13>
24. Alkhimov Yu.V., Gnusov S.F., Kapranov B.I., Klimenov V.A., Orishich A.M. Investigation of laser-welded titanium and stainless steel specimens using digital radiography methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2012;48(4):238–244.  
<https://doi.org/10.1134/S106183091204002X>

## Информация об авторах

**Сергей Вадимович Анахов** — д.т.н., доцент, заведующий кафедрой математических и естественно-научных дисциплин Российского государственного профессионально-педагогического университета (РГППУ).

<https://orcid.org/0000-0003-1460-6305>

E-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru

**Борис Николаевич Гузанов** — д.т.н., проф., заведующий кафедрой инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии РГППУ.

<https://orcid.org/0000-0001-5698-0018>

E-mail: guzanov\_bn@mail.ru

**Николай Сергеевич Мичуров** — ст. преподаватель кафедры пожарной безопасности в строительстве Уральского института ГПС МЧС России.

<https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>

E-mail: n.michurov@ya.ru

## Information about the authors

**Sergey V. Anakhov** — Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of mathematical and natural sciences, Russian State Vocational Pedagogical University (RSVPU).

<https://orcid.org/0000-0003-1460-6305>

E-mail: sergej.anahov@rsvpu.ru

**Boris N. Guzanov** — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of engineering and vocational training in mechanical engineering and metallurgy, RSVPU.

<https://orcid.org/0000-0001-5698-0018>

E-mail: guzanov\_bn@mail.ru

**Nikolay S. Michurov** — Senior Lecturer, Department of fire safety in construction, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia.

<https://orcid.org/0000-0003-1775-6181>

E-mail: n.michurov@ya.ru

## Вклад авторов

**С.В. Анахов** — постановка цели и задачи исследования, подготовка текста статьи, формулировка выводов.

**Б.Н. Гузанов** — научное руководство, формирование основной концепции, корректировка текста и выводов.

**Н.С. Мичуров** — подготовка и проведение экспериментов, осуществление расчетов, подготовка текста статьи.

## Contribution of the authors

**S.V. Anakhov** — formulation of the research objective and tasks, preparation of the manuscript, and formulation of conclusions.

**B.N. Guzanov** — scientific supervision, development of the main concept, and revision of the manuscript and conclusions.

**N.S. Michurov** — preparation and execution of experiments, calculations, and manuscript preparation.

*Статья поступила в редакцию 11.09.2024, доработана 01.10.2024, подписана в печать 06.11.2024*

*The article was submitted 11.09.2024, revised 01.10.2024, accepted for publication 06.11.2024*