

## Материаловедение и технологии материалов Materials science and materials technology

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.791.13; 620.22

doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-61-68

### РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, КАК АЛЬТЕРНАТИВЫ КЛАССИЧЕСКИМ СПЛАВАМ-МАГНАЛИЯМ, ОБЛАДАЮЩЕГО ПОВЫШЕННЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ И ПЛАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Максим Сергеевич Гуськов<sup>1</sup> ✉, Александр Владимирович Хорин<sup>2</sup>, Виктор Михайлович Батрашов<sup>3</sup>, Дмитрий Борисович Крюков<sup>4</sup>, Алексей Олегович Кривенков<sup>5</sup>, Антон Дмитриевич Вавилов<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

<sup>2</sup> alexkho154@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7164-7942>

<sup>3</sup> shift150887@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

<sup>4</sup> ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

<sup>5</sup> krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

<sup>6</sup> tony.vawilow@yandex.ru

#### Аннотация

Основной целью исследования является создание композиционного материала на основе алюминиевого сплава, обладающего повышенными прочностными и пластическими свойствами по сравнению с традиционно используемыми в машиностроении алюминиевыми сплавами. Задачи, решению которых посвящена статья заключаются в разработке технологии создания указанного композиционного материала и изучению его основных механических свойств. В качестве методов исследования применялся сравнительный анализ на этапе определения актуальности работы, математический расчет параметров сварки взрывом для получения композита и проведение испытаний на разрывной машине с целью получения значений прочностных и пластических параметров. Новизна работы заключается в применении комплекса технологических операций, которые придают материалу тот набор свойств, которым он не обладал в исходном состо-

янии. Результаты исследования показали, что данное направление востребовано как в России, так и за рубежом; новые улучшенные алюминиевые сплавы создаются; наиболее актуальным способом придания свойств является создание композиционного материала. Получен композит, у которого по сравнению с исходным материалом на 40% выше предел прочности и на 3% выше относительное удлинение. При сравнении с традиционно используемым сплавом АМг5М, разработанный композит имеет преимущество в 35% по прочностным параметрам и 70% по пластичности. Также данный материал имеет преимущество по прочности и пластичности перед сплавом 1565с МУ.

**Ключевые слова:** композиционный материал, прочность, пластичность, сварка, армирование.

Ссылка для цитирования:

Гуськов М.С. Разработка композиционного материала, как альтернативы классическим сплавам-магналиям, обладающего повышенными прочностными и пластическими свойствами / М.С. Гуськов, А.В. Хорин, В.М. Батрашов, Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, А. Д. Вавилов // Транспортное машиностроение. – 2024. - № 6. – С. 61-68. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-61-68.

Original article

Open Access Article

### DEVELOPMENT OF A COMPOSITE MATERIAL, AS AN ALTERNATIVE TO CLASSICAL MAGNALIA ALLOYS HAVING INCREASED STRENGTH AND DUCTILITY PROPERTIES

# Maksim Sergeevich Guskov<sup>1✉</sup>, Aleksandr Vladimirovich Khorin<sup>2</sup>, Viktor Mikhailovich Batrashov<sup>3</sup>, Dmitry Borisovich Kryukov<sup>4</sup>, Aleksey Olegovich Krivenkov<sup>5</sup>, Anton Dmitrievich Vavilov<sup>6</sup>

<sup>1-6</sup> Penza State University, Penza, Russia;

<sup>1</sup> Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

<sup>2</sup> alexkho154@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7164-7942>

<sup>3</sup> shift150887@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

<sup>4</sup> ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

<sup>5</sup> krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

<sup>6</sup> tony.vavilow@yandex.ru

## Abstract

The main study objective is to make a composite material based on an aluminum alloy with increased strength and plastic properties compared to aluminum alloys traditionally used in mechanical engineering. The tasks to which the paper is devoted are to develop a technology for making a specified composite material and to study its basic mechanical properties. Comparative analysis at the stage of determining the relevance of the work, mathematical calculation of explosion welding parameters to obtain a composite and testing on a tensile machine in order to obtain values of strength and plastic parameters are used as research methods. The novelty of the work is in the application of technological operations that give the ma-

terial a set of properties that it did not possess in its original state. The study results show that this area is in demand both in Russia and abroad; new improved aluminum alloys are made; the most relevant way to improve properties is to make a composite material. A composite is obtained, which has a 40% higher tensile strength and 3% higher elongation compared to the starting material. When compared with the traditionally used AMg5M alloy, the developed composite has an advantage of 35% in strength parameters and 70% in plasticity. Also, this material has an advantage in strength and ductility over 1565ч MY alloy.

**Keywords:** composite material, strength, ductility, welding, reinforcement.

## Reference for citing:

Guskov MS, Khorin AV, Batrashov VM, Kryukov DB, Krivenkov AO, Vavilov AD. Development of a composite material as an alternative to classical magnolia alloys with increased strength and ductility properties. *Transport Engineering*. 2024;6:61-68. doi: 10.30987/2782-5957-2024-6-61-68.

## Введение

В настоящее время у компаний, занимающихся производством таких изделий как топливозаправщики, бензовозы, емкости для хранения бензина и керосина, наблюдается заинтересованность в новых материалах, обладающих пониженным удельным весом по сравнению с традиционно используемыми алюминиевыми сплавами. В России это сплавы АМг5М, АМг4.5М, 1565чМУ, зарубежные аналоги данных сплавов – 5083 H111 и 5186 H111. Оба зарубежных сплава, ввиду санкционной политики иностранных производителей, стало проблематично получать в

условиях крупносерийной регулярной поставки. А у классических сплавов-магналиев наблюдается занижение одно из трех главных показателей в системе прочность/пластичность/технологичность. Поэтому создание материала, обладающего улучшенным комплексом механических и технологических свойств, находящегося примерно в том же ценовом диапазоне, что и традиционно используемые сплавы и производящегося на территории Российской Федерации является важной и актуальной задачей.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Используя базовые знания классического легирования, на сегодняшний момент было создано несколько основных сплавов для рассматриваемой отрасли промышленности (АМг5, АМг4.5, 1565ч, 5083, 5186). Их химический состав приведен в табл. 1. Другие сплавы, близкие по

свойствам представленным сплавам не нашли такого широкого применения.

Так как номенклатура толщин применяемого листового материала из этих сплавов достаточно большая от 1 до 10 мм, и механические свойства из-за толщины могут незначительно отличаться, то для проведения сравнительной характеристики

была выбрана наиболее востребованная толщина в 5 мм. Механические характеристики приведены в табл. 2.

Из табл. 1, 2 видно, что специалисты в области материаловедения и металлур-

гии создают новые сплавы, обладающие повышенном комплексом механических и технологических свойств.

Химический состав рассматриваемых алюминиевых сплавов

Таблица 1

Table 1

*Chemical composition of aluminum alloys under study*

Марка материала	Содержание химического элемента в %									
	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Be</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>	<i>Al</i>	<i>Cr</i>
АМг4.5 по ГОСТ 4784-97	≤0,40	≤0,40	0,40 – 1,00	≤0,15	≤0,10	≤0,005	4,0 – 4,9	≤0,25	92,545 – 95,55	0,05 – 0,25
АМг5 по ГОСТ 4784-97	≤0,50	≤0,50	0,30 – 0,80	0,02 – 0,10	≤0,10	0,0002 – 0,005	4,8 – 5,8	≤0,20	91,9 – 94,68	-
1565ч по ТУ 1-802-460-2012	≤0,20	≤0,10	0,60 – 0,85	0,02 – 0,05	0,05 – 0,10	≤0,001	5,5 – 6,0	0,45 – 0,70	основа	0,02 – 0,05
5083 по EN 573-3:2009	≤0,40	≤0,40	0,40 – 1,00	≤0,15	≤0,10	-	4,0 – 4,9	≤0,25	основа	0,05 – 0,25
5186 по EN 573-3:2009	≤0,40	≤0,45	0,20 – 0,50	≤0,15	≤0,25	-(≤0,05Zr)	3,8 – 4,8	≤0,40	основа	≤0,15

Таблица 2

Основные механические свойства рассматриваемых алюминиевых сплавов

Table 2

*Main mechanical properties of aluminum alloys under study*

Марка материала	Механические свойства			
	$\sigma_s$ , МПа	$\delta_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Радиус изгиба
АМг4.5М экспериментальные данные	≥265	≥135	≥16	1,5 <i>t</i> для 180°
АМг5М по ГОСТ 21631-2019	≥275	≥130	≥15	1,5 <i>t</i> для 180°
1565ч МУ по ТУ 1-802-460-2012	≥330	≥135	≥18	2,5 <i>t</i> для 180°
5083 H111 по DIN EN 485-2:2018-12	275 – 350	≥125	≥15	1,5 <i>t</i> для 90°
5186 H111 по DIN EN 14286:2008	≥275	≥125	≥26	1,5 <i>t</i> для 180°
Примечание: 1,5 <i>t</i> – радиус стержня в зависимости от толщины при испытании на изгиб				

Наиболее свежим примером является разработка компанией «Алкоа Россия» совместно с ЦНИИ «Прометей» и НИИСтали сплава 1565ч на основе системы Al–Mg. Данный сплав обладает пределом прочности на 25 % выше, чем аналог АМг5 при схожей пластичности и рекомендован авторами [1, 2] в качестве замены классическому сплаву. Но, как показала практика, некоторым производителям недостаточно значений в 18 % по относительному удлинению, потому что при штамповке, отбортовке и гибке листов из этого сплава

происходит растрескивание листов, что является трудно исправимым дефектом. Поэтому сплавы, полученные по стандартным методикам легирования, полноценно не могут удовлетворить потребности промышленников.

Решением данной задачи может стать создание композиционного листового материала, с прочностью на уровне показателей АМг5 и повышенной пластичностью не ниже 20 %. Особенностью композиционных материалов является сочетание свойств исходных материалов и приобре-

тения новых или улучшенных свойств в процессе образования композита. Так в Пензенском государственном университете активно ведутся работы по модернизации технологии повышения прочностных свойств алюминиевых листов за счет различных способов армирования [3].

Для реализации поставленной задачи в качестве основных исходных материалов были выбраны листы АМг4 и титановая проволока ВТ1-0. Технология отработывалась на листах с габаритными размерами 200×300×2,5 мм и проволокой Ø1,0 мм. Технологическим процессом, позволяю-

щим получить из данных исходных материалов композиционный материал является сварка взрывом. Данный метод позволяет получать качественный листовой композит при соединении разнородных материалов без оплавлений на границе раздела материалов, что очень важно для последующего технологического передела композита [4]. Схема сварки взрывом представлена на рис. 1. Для получения композиционного материала были рассчитаны основные кинематические и технологические параметры сварки взрывом, которые были сведены в табл. 3.

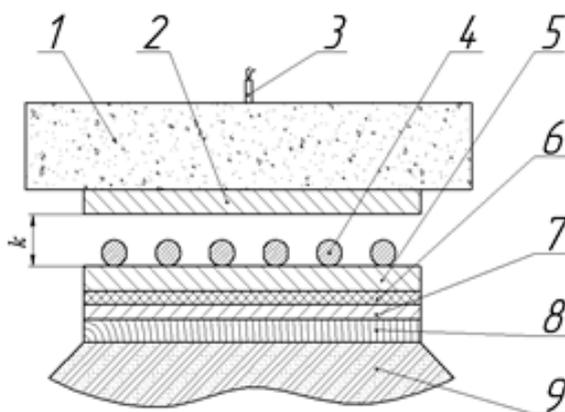


Рис. 1. Схема армирования проволокой: 1 – заряд ВВ; 2 – метаемая пластина матрицы; 3 – электродетонатор; 4 – проволока; 5 – неподвижная пластина матрицы; 6 – изоляционный слой; 7 – стальное основание; 8 – дополнительное основание; 9 – грунт; k – зазор между матричными пластинами

Fig. 1. Wire reinforcement scheme: 1 – explosive charge; 2 – throwable matrix plate; 3 – electric detonator; 4 – wire; 5 – fixed matrix plate; 6 – insulating layer; 7 – steel base; 8 – additional base; 9 – soil; k – gap between matrix plates

Таблица 3

Результаты расчета основных параметров процесса сварки образцов композиционного материала

Table 3

Calculation results of main parameters of welding composite material samples

Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки				Результаты расчета		
	Взрывчатое вещество			Величина зазора между пластинами, k, мм	Скорость точки контакта свариваемых пластин, V <sub>к</sub> , м/с	Скорость соударения свариваемых пластин, V <sub>с</sub> , м/с	Угол соударения, γ, град
	Скорость детонации взрывчатого вещества, D <sub>ВВ</sub> , м/с	Высота взрывчатого вещества, H <sub>ВВ</sub> , мм	Плотность взрывчатого вещества, ρ <sub>ВВ</sub> , г/см <sup>3</sup>				
Игданит	1900	30	0,84	2	1912	598	18

## Результаты

После проведения полигонных работ был получен полуфабрикат размером 212×319×4,8 мм. Данный полуфабрикат представлен на рис. 2. Промежуточные технологические операции в виде рекристаллизационного отжига и обрезки позволили придать полуфабрикату состояние для формирования конечного комплекса свойств.

Наличие армирующей титановой проволоки оказывает несущественное влияния на прочностные свойства композита. Для повышения прочности необходимо армирование высокомодульными материалами, которыми в данной композиции выступили интерметаллиды титана  $TiAl_3$ . Механизм их образования и роста более подробно описан в работах [5, 6, 7]. Подобранный режим термообработки таким образом, чтобы от исходной армирующей титановой проволоки осталась сердцевина

диаметром 150...200 мкм, а остальной титан перешел в интерметаллид, можно существенно повысить прочность конечного композита [8, 9]. Для того чтобы подтвердить это предположение из готового композиционного материала со сформированной интерметаллической прослойкой на границе раздела матрица – армирующая проволока были вырезаны образцы для проведения статического одноосного нагружения. Так как регламентированной методики по испытанию армированных композитов пока нет, то использовалась методика для оценки прочностных и пластических свойств по ГОСТ 1497-84 для монометаллов. Армирующие элементы при испытании были расположены вдоль направления прикладываемой нагрузки [10]. Образцы до нагружения и после проведенного испытания представлены на рис. 3.



Рис. 2. Фотография листового композиционного полуфабриката после сварки взрывом  
*Fig. 2. Photo of a sheet composite semi-finished product after explosion welding*

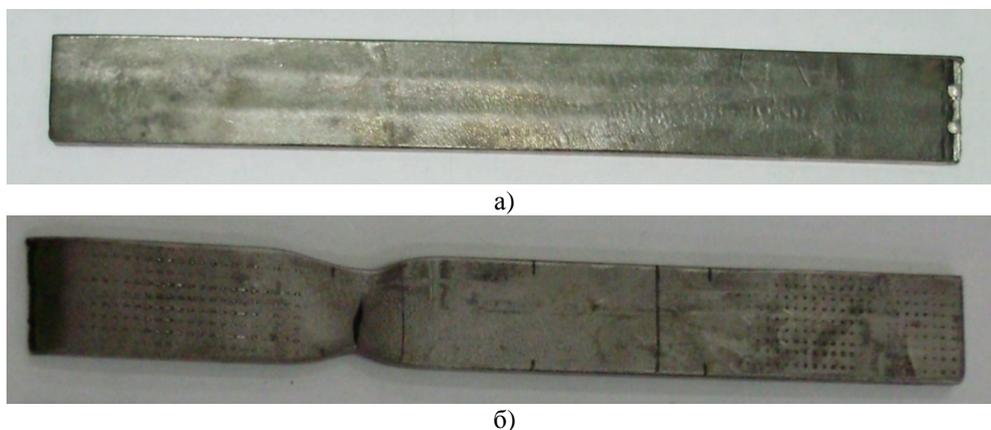


Рис. 3. Фотография образцов для проведения статического одноосного нагружения:  
а – до испытания; б – после испытания

*Fig. 3. Photo of samples for static uniaxial loading: a) before the test; b) after the test*

В результате проведения статического одноосного нагружения образцов из армированного композиционного материала были получены значения прочностных и

пластических параметров, которые сведены в табл. 4. Для сравнения в табл. 4 добавлены параметры исходного листа АМг4М.

Таблица 4

Таблица сравнения механических свойств полученного композиционного материала со свойствами аналогов

Table 4

*Table of comparing the mechanical properties of the composite obtained with the properties of its analogue*

Марка материала	Механические свойства		
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
АМг4М экспериментальные данные	$\geq 270$	$\geq 140$	$\geq 23$
Полученный армированный композиционный материал	360...380	155...163	23...26
АМг5М по ГОСТ 21631-2019	$\geq 275$	$\geq 130$	$\geq 15$
1565ч МУ по ТУ 1-802-460-2012	$\geq 330$	$\geq 135$	$\geq 18$
5083 H111 по DIN EN 485-2:2018-12	275...350	$\geq 125$	$\geq 15$
5186 H111 по DIN EN 14286:2008	$\geq 275$	$\geq 125$	$\geq 26$

Таким образом, в результате проведенной работы был получен композиционный материал, у которого по сравнению с исходным материалом на 40 % выше предел прочности и на 3 % выше относительное удлинение. При сравнении с традиционно используемым сплавом АМг5М, разработанный композит имеет преимущество в 35 % по прочностным параметрам и 70 % по пластичности. Также данный материал имеет преимущество по прочности и пластичности перед сплавом 1565ч МУ. Кроме указанных преимуществ разработанный

композит потенциально будет обладать и недостатками, связанными с технологическими свойствами листов с полностью сформированным комплексом свойств. Также, при изготовлении емкостных конструкции из этого композита, необходимо проработать вопрос, связанный со сваркой этих листов. Поэтому для того, чтобы композиционный материал, разработанный по предлагаемой технологии, стал полноценной заменой традиционно используемых материалов, необходимо проведение дополнительных исследований.

## Заключение

1. На основании запросов производителей емкостных конструкций установлено что разработка композита на основе алюминиевого сплава, обладающего повышенными прочностными и пластическими свойствами, является актуальной задачей;

2. Определены и отработаны параметры сварки взрывом для получения качественного композита состоящего из алюминиевого сплава АМг4М и титановой проволоки ВТ1-0;

3. Установлено, что выращивание твердого высокомодульного интерметаллида  $TiAl_3$  на границе раздела материалов за счет термообработки приводит к повышению прочностных свойств композита в целом

4. Получен композиционный материал, у которого по сравнению с исходным материалом на 40 % выше предел прочности и на 3 % выше относительное удлинение. При сравнении с традиционно используемым сплавом АМг5М, разработанный композит имеет преимущество в 35 % по

прочностным параметрам и 70 % по пластичности. Также данный материал имеет

преимущество по прочности и пластичности перед сплавом 1565ч МУ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дриц, А. М. Технологические свойства листов из свариваемого алюминиевого сплава 1565ч для производства цистерн / А. М. Дриц, В. В. Овчинников, Р. Н. Растопчин // Технология легких сплавов. 2012. № 3. С. 20-29.
2. Овчинников, В. В. Разработка свариваемого алюминиевого сплава средней прочности для изготовления цистерн / В. В. Овчинников, А. М. Дриц, Р. Н. Растопчин // Научно-технические исследования в машиностроении. 2012. № 7(13). С. 18-25.
3. Крюков, Д. Б. Разработка модели нового композиционного армированного материала системы титан-алюминий в программе *SolidWorks* / Д. Б. Крюков, А. В. Прыщак, М. С. Гуськов // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами *CAD/CAM/CAE/PDM* : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Пенза, 28–29 апреля 2014 года / Под редакцией В.З. Зверовщикова, И.И. Воячека, Д.В. Кочеткова. Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2014. С. 45-49.
4. Экспериментальное исследование структуры и свойств смесей аммиачной селитры с дизельным топливом применительно к условиям сварки взрывом / О. Л. Первухина, И. В. Денисов, Л. Б. Первухин, В. А. Клышнатый // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 11(270). – С. 44-53.
5. Гуськов, М. С. Создание высокопрочного композиционного материала титан-алюминий с перфорированным интерметаллическим слоем и оксидокерамическим покрытием: специальность 05.16.09 "Материаловедение (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гуськов Максим Сергеевич, 2015. 151 с.

6. Особенности фазовых превращений при термической обработке в композиционных материалах, полученных высокоэнергетическими методами воздействия / Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов [и др.] // Экологическая безопасность регионов России и риск от техногенных аварий и катастроф : Сборник статей XV Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 апреля 2015 года / Под редакцией Ю. П. Перельгина. Том Выпуск XV. Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2015. С. 60-64.
7. Амир Хусейн Ассари. Микроструктура и кинетика формирования интерметаллической фазы в условиях твердофазной диффузионной сварки в биметаллическом *Ti/Al* композите / Амир Хусейн Ассари, Бейаталла Эгхбали // Физика металлов и металловедение. 2019. Т. 120, № 3. С. 280-290.
8. Structural and mechanical properties of metallic-intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing / I. A. Bataev, A. A. Bataev, D. V. Pavliukova, V. I. Mali // *Materials and Design*. 2012. Vol. 35. P. 225-234.
9. Лазуренко, Д. В. Структура и свойства слоистых композиционных материалов с интерметаллидной составляющей : специальность 05.16.09 "Материаловедение (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Лазуренко Дарья Викторовна, 2020. 421 с.
10. Хорин, А.В. Медно-алюминиевые композиционные материалы, полученные сваркой взрывом / И. С. Лось, Д. Б. Крюков, А. В. Хорин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2010. – № 5(65). – С. 88-92.

## REFERENCES

1. Drits AM, Ovchinnikov VV, Rastopchin RN. Technological properties of castings made of 1565ч welded aluminum alloy for the production of tanks. *Technology of Light Alloys*. 2012;3:20-29.
2. Ovchinnikov VV, Drits AM, Rastopchin RN. Development of a welded aluminum alloy of medium strength for the production of tanks. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2012;7(13):18-25.
3. Kryukov DB, Pryshchak AV, Guskov MS. Development of a model of a new composite reinforced titanium-aluminum material in *SolidWorks* program. *Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, April 28-29, 2014: Systems of Design, Modeling, Pre-production and*

*Project Management CAD/CAM/CAE/PDM*; Penza: Privolzhsky Dom Znany; 2014.

4. Pervukhina OL, Denisov IV, Pervukhin LB, Klyshnaty VA. Experimental study of the structure and properties of mixtures of ammonium nitrate with diesel fuel in relation to explosion welding conditions. *Izvestia VSTU*. 2022;11(270):44-53.
5. Guskov MS. Development of a high-strength composite titanium-aluminum material with a perforated intermetallic layer and oxide-ceramic coating [dissertation]. 2015.
6. Kryukov DB, Krivenkov AO, Chugunov SN. Features of phase transformations during thermal treatment in composite materials obtained by high-

energy exposure methods. Collection of Papers of the XV International Scientific Practical Conference, April 30, 2015: Ecological Safety of Russian Regions and Risk from Technogeneous Accidents and Catastrophes; Penza: Privolzhsky Dom Znany; 2015.

7. Assari AH, Eghbali B. Microstructure and dynamics of intermetallic phase formation under conditions of solid-phase diffusion welding in bimetallic Ti/Al composite. *Physics of Metals and Metallography*. 2019;120(3):280-290.

8. Bataev IA, Bataev AA, Pavliukova DV, Mali VI. Structural and mechanical properties of metallic-intermetallic laminate composites produced by explosive welding and annealing. *Materials and Design*. 2012;35:225-234.
9. Lazurenko DV. Structure and properties of layered composite materials with an intermetallic compound [dissertation]. 2020.
10. Khorin AV, Los IS, Kryukov DB. Copper-aluminum composite materials obtained by explosion welding. *Izvestia VSTU*. 2010;5(65):88-92.

#### **Информация об авторах:**

**Гуськов Максим Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры КиИМ Пензенского государственного университета, тел. 89603294929.

**Хорин Александр Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры КиИМ Пензенского государственного университета, тел. 89875069771.

**Батрашов Виктор Михайлович** – кандидат технических наук, и.о. заведующего кафедрой КиИМ Пензенского государственного университета, тел. 89273663056.

**Guskov Maksim Sergeevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of KiIM Department at Penza State University; phone: 89603294929.

**Khorin Aleksandr Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of KiIM Department at Penza State University; phone: 89875069771.

**Batrashov Viktor Mikhailovich** – Candidate of Technical Sciences, Acting Head of KiIM Department at Penza State University; phone: 89273663056.

**Крюков Дмитрий Борисович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел. 89033249734.

**Кривенков Алексей Олегович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел. 89053652342.

**Вавилов Антон Дмитриевич** – магистрант кафедры СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел. 89093222263.

**Kryukov Dmitry Borisovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of SLPiM Departments at Penza State University; phone: 89033249734.

**Krivenkov Aleksey Olegovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of SLPiM Departments at Penza State University; phone: 89053652342.

**Vavilov Anton Dmitrievich** – Master's Degree Student of SLPiM Departments at Penza State University; phone: 89093222263.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 15.04.2024; принята к публикации 26.05.2024. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 03.04.2024; approved after review on 15.04.2024; accepted for publication on 26.05.2024. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**