

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 669; 621.791.13; 620.22

doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-27-34

**КОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ
С ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ
И РЕГУЛИРУЕМЫМ УРОВНЕМ СВОЙСТВ**

Алексей Олегович Кривенков^{1✉}, Дмитрий Борисович Крюков², Максим Сергеевич Гуськов³, Антон Алексеевич Акимов⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

² ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

³ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

⁴ fanfcbn@mail.ru

Аннотация

Целью исследования является разработка композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением на основе сплавов алюминия и титана, сочетающих в себе требуемый уровень механических характеристик. Задачи, решению которых посвящена статья, заключаются в разработке способа создания пулестойкого композиционного материала, обеспечивающего возможность управления его структурой и уровнем свойств в широком диапазоне. В качестве методов исследования применялся математический расчет режимов сварки взрывом для получения композиционного материала на основе сплавов алюминия и титана, проведение термической обработки полученного композита и оценка механических свойств материала.

Новизна работы заключается в применении запатентованных технических решений, позволяющих создавать сваркой взрывом композиционные металлические пулестойкие материалы, включаю-

щих новые способы армирования и формирования упрочняющих интерметаллических слоев регулируемой толщины в структуре композита.

Результаты исследования показали, что данные материалы востребованы и в России, и за рубежом; новые металлические пулестойкие материалы создаются; актуальным направлением в области создания пулестойких материалов является создание гетерогенных композиционных материалов. Получен композит, в структуре которого для исключения расслаивания твердых интерметаллидных слоёв при ударных нагрузках листы выполнялись перфорированными, что ограничит распространение трещин, сохраняя целостность материала при динамическом воздействии. Регулируя толщину и количество слоёв можно в широких пределах управлять свойствами, плотностью и пулестойкостью материала.

Ключевые слова: материал, сварка, армирование, интерметаллидные слои, сплав, композит.

Финансирование: исследования выполнены в рамках конкурса исследовательских проектов «Ректорские гранты» для обучающихся Пензенского государственного университета.

Ссылка для цитирования:

Кривенков А.О. Композиционный металлический материал с интерметаллическим упрочнением и регулируемым уровнем свойств / А.О. Кривенков, Д.Б. Крюков, М.С. Гуськов, А.А. Акимов // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 7. – С. 27-34. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-27-34.

Original article

Open Access Article

COMPOSITE METAL MATERIAL WITH INTERMETALLIC HARDENING AND ADJUSTABLE LEVEL OF PROPERTIES

Aleksey Olegovich Krivenkov^{1✉}, Dmitry Borisovich Kryukov², Maksim Sergeevich Guskov³, Anton Alekseevich Akimov⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ krivenkov80@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1614-2487>

² ddbbkk@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>

³ Suralab@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

⁴ fanfcban@mail.ru

Abstract

The study objective is to develop composite metal materials with intermetallic hardening based on aluminum and titanium alloys that combine the required level of mechanical characteristics. The tasks to which the paper is devoted are to develop a method for creating a bulletproof composite material that provides the ability to control its structure and level of properties over a wide range. The research methods used include mathematical calculation of explosion welding modes to obtain a composite material based on aluminum and titanium alloys, heat treatment of the resulting composite and evaluation of the mechanical properties of the material.

The novelty of the work is in the application of patented technical solutions that make it possible to create composite bulletproof metal materials by explosion welding, including new methods of reinforcement

and the formation of reinforcing intermetallic layers of adjustable thickness in the composite structure.

The study results show that these materials are in demand both in Russia and abroad; new bulletproof metal materials are being created; the current direction in the field of making bulletproof materials is the development of heterogeneous composite materials. A composite is obtained which structure contains perforated sheets in order to avoid delamination of solid intermetallic layers under shock loads. This will limit the spread of cracks, preserving the integrity of the material under dynamic impact. By adjusting the thickness and number of layers, the properties, density, and bullet resistance of the material can be widely controlled.

Keywords: material, welding, reinforcement, intermetallic layers, alloy, composite.

Funding: the study was carried out within *Rector's Grants* research project competition for students of Penza State University.

Reference for citing:

Krivenkov AO, Kryukov DB, Guskov MS, Akimov AA. Composite metal material with intermetallic hardening and adjustable level of properties. *Transport Engineering*. 2025;7:27-34. doi: 10.30987/2782-5957-2025-7-27-34.

Введение

В настоящее время в качестве легких бронематериалов широко используются сплавы на основе алюминия и титана. Главное их достоинство - низкая плотность. Благодаря этому конструкция на основе алюминиевого или титанового сплава, сохраняя свои функциональные и габаритные размеры, имеет меньший вес по сравнению с аналогичным изделием из конструкционной стали. Снижение веса может достигать до 25 % [2, 3]. Однако, монобронни имеют ряд недостатков. Основным недостатком алюминиевой брони является невозможность обеспечения сопоставимой со стальной броней противоснарядной стойкости. Титановые сплавы

из-за структурных особенностей, связанных с высокой степенью локализации титаном внешнего деформационного воздействия, в чистом виде в качестве броневых материалов ограничены к применению. Невозможность реализации высокой динамической твердости титаном связана с недостатком, который заключается в создании условий для сквозного пробития за счет сдвига комплексов атомов в структуре титана по плоскости скольжения. В настоящее время разработка и применение комбинированных (гетерогенных) броней на основе сплавов титана и алюминия является перспективной и актуальной задачей.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследованиями в области создания композиционных металлических материа-

лов на основе системы Ti-Al, используемых в качестве броневых, занимаются Рос-

сийские и зарубежные компании: НИИ «Стали» (Россия), *Explomet* (Польша) [4], *College of Mechanical and Electrical Engineering (Harbin Engineering University, Harbin, Китай)* [5] и др. Однако, разработанные ими многослойные материалы обладают следующими недостатками: отсутствует связь между металлическими слоями высокопрочной основы композита (Ti), которые разделены послойно менее прочными слоями (Al); в точке контакта композита с баллистическим объектом происходит полное расслоение композиции и потеря конструкционной целостности броневых материалов; распространение хрупких трещин носит обширный характер относительно места динамического воздействия на материал, а развитие трещины после того, как она возникла, происходит самопроизвольно без дальнейшего увеличения приложенного напряжения; в структуре композита отсутствуют упрочняющие интерметаллические слои.

Решением данной задачи может стать создание композита нового типа, в структуре которого в определенной последовательности чередуются вязкие металлические и твердые упрочняющие интерметаллические слои. Модель разработанного гетерогенного материала приведена на рис. 1.

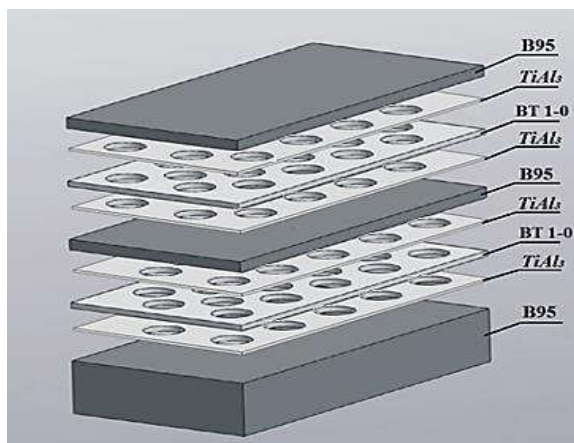


Рис. 1. Модель разработанного композиционного материала на основе титанового и алюминиевого сплавов

Fig. 1. Model of the developed composite material based on titanium and aluminum alloys

Особенностью структуры разработанного композита является то, что в ар-

мирующих титановых листах в определенном порядке выполнены перфорации, которые обеспечивают связь слоев алюминиевой матрицы композита. Расположение армирующих слоев в структуре композита выполняться таким образом, чтобы перфорации в первом армирующем слое располагались в шахматном порядке и не накладывались одна на другую относительно последующих армирующих слоев. Упрочнение композиционного материала достигается как за счет наличия в схеме армирования перфораций, обеспечивающих высокопрочное соединение матрицы, так и за счет формирования в его структуре на границах матрицы и перфорированного армирующего элемента интерметаллических высокотвердых слоев на основе $TiAl_3$ регулируемой толщины последующей комплексной термической обработкой. Интерметаллид $TiAl_3$ имеет низкую плотность $3,4 \text{ г/см}^3$, высокую микротвердость $465...670 \text{ кг/мм}^2$. В основе предлагаемого решения лежит запатентованный авторами разработки способ получения композиционного материала сваркой взрывом [6].

При создании композиционного материала были учтены показатели механических и эксплуатационных свойств материалов его составляющих. В качестве основы металлической матрицы композита использовали отожженный высокопрочный алюминиевый сплав марки В95, используемый, в том числе и в качестве броневых. На основе сплава В95 изготавливается целая линейка военной техники легкого класса бронирования, от бронемашин пехоты до катеров и боевых роботов.

В качестве армирующих листов композита использовали титановый сплав марки ВТ1-0. Изготовленный на его основе прокат имеет небольшую плотность и высокую пластичность. Эти свойства позволяют получать изделия требуемой формы.

Для создания экспериментальных образцов композиционного материала были выбраны материалы, марка и размер которых приведены в табл. 1.

Разработанный композит представляет собой металлический многослойный материал следующего состава: В95 + ВТ1-0 + В95 + ВТ1-0 + В95. Сварку взрывом

осуществляли с использованием рациональных технологических параметров ударно-волнового нагружения с учетом

состава, свойств и толщины отдельных элементов композита, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Марка материалов и размеры заготовок

Table 1

Material brands and dimensions of workpieces

Материал композита	Размеры заготовок, мм
B95 + BT1-0 + B95 + BT1-0 + B95	габаритные размеры 500×300 толщина слоев: 1,8; 1; 1,8; 1; 6

Таблица 2

Рациональные технологические параметры сварки взрывом разработанного композита

Table 2

Rational technological parameters of explosion welding of the developed composite

Исходные режимы сварки взрывом							Расчетные режимы сварки взрывом				
Характеристики взрывчатого вещества			Зазор между листами композита k , мм				Скорость точки контакта свариваемых листов V_k , м/с	Скорость соударения свариваемых листов V_c , м/с			
Скорость детонации $D_{вв}$, м/с	Высота $H_{вв}$, мм	Плотность $\rho_{вв}$, г/см ³						1-2	2-3	3-4	4-5
2900	41	0,75	2	2	2	2	2900	520 - 530	550 - 560	530 - 540	480 - 490

На заключительной стадии, для формирования требуемого комплекса свойств композита, в его структуре посредством комплексной упрочняющей термической

обработки формировали твердые интерметаллические слои на основе $TiAl_3$, обеспечивающие эффективное снижение энергии и разрушение баллистического объекта.

Результаты

Получены экспериментальные образцы композиционного материала состава B95 + BT1-0 + B95 + BT1-0 + B95. Фотография экспериментального образца после операции гидроабразивной резки представлена на рис. 2.

Наличие армирующих титановых листов в составе композита не оказывают существенного влияния на прочностные свойства материала. В качестве основных операций термической обработки для упрочнения композиционного материала использовали отжиг на интерметаллид, закалку и искусственное старение. Механизм

формирования упрочняющих фаз подробно описан в работах [7–10].

В результате проведенных исследований определены рациональные режимы термообработки обеспечивающего формирование слоев интерметаллида по границам армирующих титановых листов толщиной до 250 мкм на сторону. Упрочняющая термическая обработка обеспечивает значительное повышение прочностных характеристик разработанного гетерогенного материала [11–13].

Исследования механических характеристик композита после сварки взрывом и полного цикла упрочняющей термиче-

ской обработки включали оценку твердости, предела прочности, предела текучести и относительного удлинения материала. Оценка твердости (микротвердости HV) выполняли на подготовленных микрошлифах с использованием стационарного твердомера ПМТ-3 по методике ГОСТ 9450-76 с нагрузкой на инденторе 200 гр. ($HV_{0.2}$). Оценка предела прочности, предела текучести и относительного удлинения материала выполняли на подготовленных образцах методом статического одноосного нагружения по ГОСТ 1497-84 при нормальной температуре на разрывной машине ИР 5145-500.

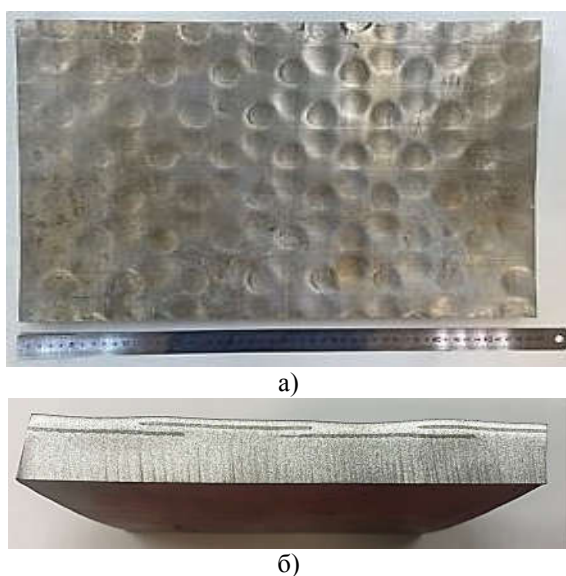


Рис. 2. Фотографии экспериментального образца композиционного металлического материала после сварки взрывом и гидроабразивной резки: а – внешний вид композита; б – поперечный срез композита в плоскости перфораций в армирующих слоях

Fig. 2. Photos of an experimental sample of composite metal material after explosive welding and waterjet cutting: a) external appearance of composite; b) cross-section of composite in the plane of perforations in reinforcing layers

Результаты исследования твердости металлических слоев композита представлены на рисунке 3. Исследования установили, что твердость алюминиевого сплава В95 (замеры в точках №1 и №5) составила 140-145 HV , твердость титанового сплава ВТ 1-0 (замер в точке №3) – 156...158 HV . Следовательно, термообработка оказала незначительное влияние на изменение твердости металлических слоев композита.

Значение твердости в слое зарождающегося интерметаллида на границе с металлом матрицы (замер в точке №2) составило 296-302 HV , а в сплошном слое сформировавшегося интерметаллида (замер в точке №4) – 552...556 HV . Следовательно, в результате термообработки композиционного материала, на границе раздела металлов формируется высокотвердый интерметаллидный слой, твердость которого превышает твердость металлических слоев композита в 3,5...3,8 раза.

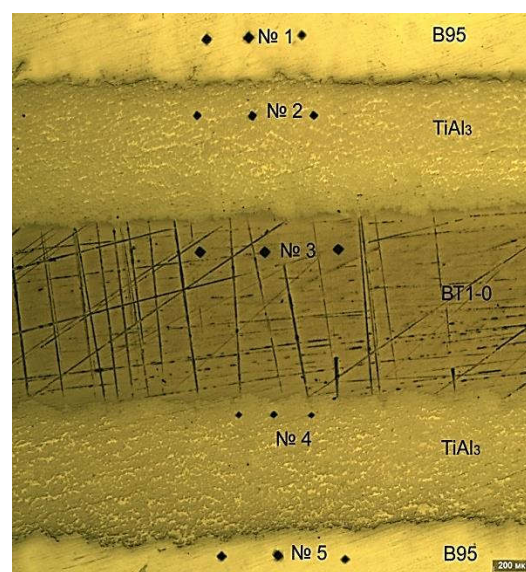


Рис. 3. Фото микрошлифа при оценке твердости слоев композита

Fig. 3. Photo of a microsection when assessing the hardness of composite layers

Для испытаний композита на статическое одноосное нагружение изготавливали образцы в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, контроль геометрических параметров образцов до и после разрыва контролировали с точностью 0,1 мм. Образцы для испытаний изготавливались таким образом, чтобы сохранить целостность перфораций в армирующих слоях композита и обеспечить расположение перфораций по направлению прикладываемой к образцу нагрузки. Образец для испытаний композита на статическое одноосное нагружение представлен на рис. 4.

Результаты испытаний экспериментальных образцов композиционных материалов на статическое одноосное нагружение приведены в табл. 3.

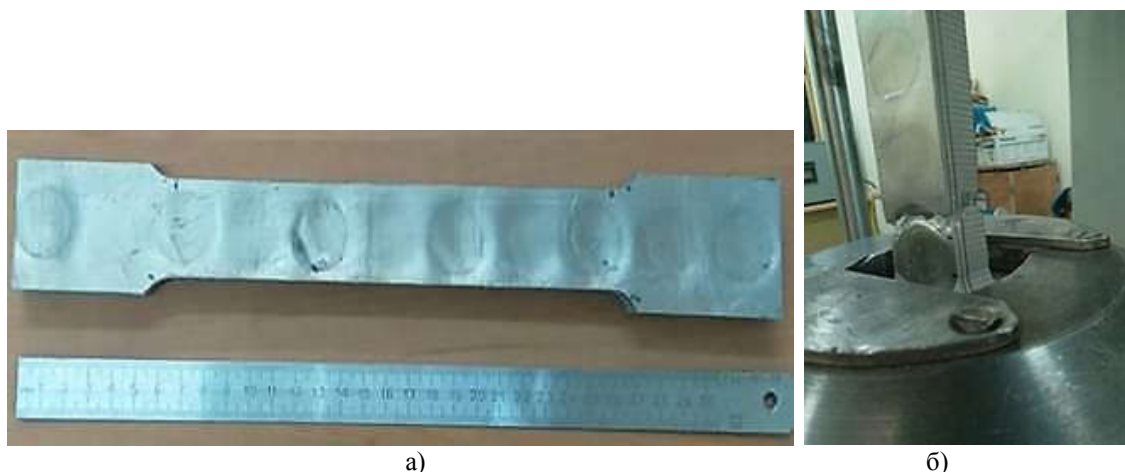


Рис. 4. Фотография образцов композита для оценки прочностных характеристик и пластичности: а - до испытания; б - после испытания

Fig. 4. Photo of composite samples for evaluation of strength characteristics and plasticity: a) before the test; b) after the test

Таблица 3

Результаты испытаний на статическое одноосное нагружение

Table 3

Results of static uniaxial loading tests

Композиционный материал: B95 + BT1-0 + B95 + BT1-0 + B95	Механические свойства		
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Состояние после сварки взрывом	280 - 290	220 - 228	7 - 8
Состояние после сварки взрывом и рекристаллизационного отжига (разупрочнение материала для формообразования)	255 - 265	195 - 210	10 - 11
Состояние после сварки взрывом и после полного цикла упрочняющей термообработки	780 - 810	620 - 648	≥ 6

Таким образом, в результате проведенных исследований был получен композиционный металлический материал на основе сплавов алюминия и титана, определены рациональные параметры упрочняющей термической обработки, включающей отжиг на интерметаллид, закалку и старение. Упрочняющая термообработка обеспечила значительное повышение прочностных характеристик композита до 3...3,3 раз, за счет упрочнения матрицы композита (сплава B95) и формирования на границе раздела исходных материалов высокотвердой интерметаллической про-

слойки (TiAl_3) регулируемой толщины. Разработки позволят в широком диапазоне управлять структурой, плотностью и свойствами композита, что позволит регулировать уровень пулестойкости разработанного материала, применять его в качестве бронезащиты и создавать перспективные виды легких броней гражданского, коммерческого и военного назначения. Для оценки уровня пулестойкости, осколочной стойкости разработанных композиционных материалов необходимо проведение дополнительных исследований.

Заключение

1. В настоящее время перспективным направлением повышения баллистических характеристик броневых материалов является создание гетерогенных структур. В этой связи, разработка композиционного гетерогенного материала на основе

сплавов алюминия и титана с требуемым комплексом механических свойств, является актуальной задачей;

2. Получены экспериментальные образцы композиционного материала состава

В95 + ВТ1-0 + В95 + ВТ1-0 + В95 на рациональных режимах сваркой взрывом;

3. Определены виды и рациональные параметры упрочняющей термической обработки, обеспечивающей формирование твердого интерметаллида $TiAl_3$ регулируемой толщины в структуре композита для повышения прочностных характеристик материала;

4. Выполнен комплекс исследований механических свойств экспериментальных

образцов разработанного композита, в результате которого установлено существенное увеличение прочностных характеристик материала до 3...3,3 раз по сравнению с исходными материалами;

5. Установлена возможность управлять структурой, плотностью и свойствами композита, что позволит регулировать уровень пулестойкости разработанного материала и применять его в качестве бронезащиты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. М.: Машиностроение, 1987. 216 с.
2. Федосеев С. Алюминиевая броня БМД // Техника и вооружение. 2006. № 11. С. 23-24.
3. Чернышов, Е. А. Развитие материалов для баллистической защиты на основе алюминиевых сплавов / Е. А. Чернышов, А. Д. Романов, Е. А. Романова // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 10. С. 43-47.
4. Walk Z, Koslik P, Galka A. Protective multilayer AlTi material with enhanced ballistic resistance. Coimbra, Portugal, NOKTURN 2016, June 20-24 2016. P. 209.
5. Cao Y, Zhu S, Guo C, Vecchio KS, Jiang F. Numerical investigation of the ballistic performance of metal- intermetallic laminate composites. Applied Composite Materials. 2015; 22(4): 437– 456.
6. Патент № 2606134 Российская Федерация, МПК В23К 20/08 (2006.01), В32В 7/04 (2006.01). Способ получения композиционного материала: №2015134788: заявл. 18.08.2015: опубл. 10.01.2017 / Первухин Л.Б., Казанцев С.Н., Крюков Д.Б., Чугунов С.Н., Кривенков А.О., Розен А.Е.; заявитель ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет». – 6 с.
7. 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. Перелыгина. Том Выпуск XV. –

- Пенза: Автономная некоммерческая научно-образовательная организация «Приволжский Дом знаний», 2015. – С. 60-64.
8. Первухин Л.Б., Розен А.Е., Кривенков А.О. [и др.]. Металлические композиционные материалы, армированные интерметаллическими упрочняющими элементами // Metal composite materials reinforced by intermetallic reinforcing members. Металлург. 2015. №10. С. 74-77.
 9. Первухин Л.Б., Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н. Разработка новых схем армирования композиционных материалов на основе интерметаллического упрочнения. Металлург. 2016. №7. С. 85-87.
 10. 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.
 11. Первухин Л. Б., Крюков Д. Б., Кривенков А. О. [и др.]. Структурные превращения и свойства композиционного материала титан-алюминий при термической обработке. Физика металлов и металловедение. 2017. Т. 118. № 8. С. 801-805.
 12. Гуськов М.С., Хорин А.В., Кривенков А.О. [и др.]. Влияние схемы армирования на прочность композиционного материала, полученного сваркой взрывом. Транспортное машиностроение. 2024. № 11 (35). С. 71-78.
 13. Розен А.Е., Кривенков А.О., Крюков Д.Б. [и др.]. Способы получения композиционных материалов методами высокоэнергетического воздействия: монография. Пенза: Изд - во ПГУ, 2016 г. 138 с. ISBN 978-5-906913-5.

REFERENCES

1. Konon YuA, Pervukhin LB, Chudnovsky AD. Explosion welding. Moscow: Mashinostroyeniye; 1987.
2. Fedoseev S. BMD aluminum armor. Tekhnika I Vooruzhenie. 2006;11:23-24.
3. Chernyshov EA, Romanov AD, Romanova EA. Development of materials for ballistic protection

- based on aluminum alloys. Blanking Production in Mechanical Engineering. 2015;10:43-47.
4. Walk Z, Koslik P, Galka A. Protective multilayer AlTi material with enhanced ballistic resistance. NOKTURN 2016, June 20-24 2016; Coimbra, Portugal. p. 209.

5. Cao Y, Zhu S, Guo C, Vecchio KS, Jiang F. Numerical investigation of the ballistic performance of metal–intermetallic laminate composites. *Applied Composite Materials*. 2015; 22(4): 437–456.
6. Pervukhin LB, Kazantsev SN, Kryukov DB, Chugunov SN, Krivenkov AO, Rosen AE. RF Patent No. 2606134. МПК B23K 20/08 (2006.01), B32B 7/04 (2006.01). Method of obtaining composite material. 2017 Jan 10.
7. 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 and Practical Conference, April 30, 2015: Environmental Safety of Russian Regions and the Risk from Man-made Accidents and Catastrophes*; Penza: Volga House of Knowledge; 2015.
8. Pervukhin LB, Rosen AE, Krivenkov AO. Metal composite materials reinforced by intermetallic reinforcing members. *Metallurgist*. 2015;10:74-77.
9. Pervukhin LB, Kryukov DB, Krivenkov AO, Chugunov SN. Development of new reinforcement schemes for composite materials based on intermetallic hardening. *Metallurgist*. 2016;7:85-87.
10. Assari AH, Eghbali B. Microstructure and kinetics of intermetallic phase formation under conditions of solid-phase diffusion welding in a bimetallic Ti/Al composite. *Physics of Metals and Metallography*. 2019;120(3):280-290.
11. Pervukhin LB, Kryukov DB, Krivenkov AO. Structural transformations and properties of titanium–aluminum composite material during heat treatment. *Physics of Metals and Metallography*. 2017;118(8):801-805.
12. Guskov MS, Khorin AV, Batrashov VM, Kryukov DB, Krivenkov AO, Khomenko AS, Fedyashov AS. The effect of reinforcement scheme on the strength of a composite obtained by explosion welding. *Transport Engineering*. 2024;11:71-78.
13. Rosen AE, Krivenkov AO, Kryukov DB. Methods of obtaining composite materials by high-energy exposure: monograph. Penza: PSU Publishing House; 2016.

Информация об авторах:

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

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

Krivenkov Aleksey Olegovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University; phone: 89053652342.

Kryukov Dmitry Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University; phone: 89033249734.

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

Акимов Антон Алексеевич – студент каф. СЛПиМ Пензенского государственного университета, тел: 89272874507.

Guskov Maksim Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Control and Testing of Materials at Penza State University; phone: 89603294929.

Akimov Anton Alekseevich – Student of the Department of Welding, Foundry and Materials Science at Penza State University; phone: 89272874507.

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 11.04.2025; одобрена после рецензирования 15.05.2025; принята к публикации 26.06.2025. 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 11.04.2025; approved after review on 15.05.2025; accepted for publication on 26.06.2025. 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*.