

УДК 621.791.13

doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-12

Аспекты разработки и исследования свойств нового типа броневых гетерогенных материалов на основе алюминия и титана, полученных с применением технологии сварки взрывом

Д. Б. Крюков¹, А. О. Кривенков², М. С. Гуськов³

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

¹ddbkk@yandex.ru, ²krivenkov80@yandex.ru, ³suralab@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Алюминиевые сплавы давно доказали свою эффективность в качестве материала для бронирования и получили широкое применение. Хотя они и не смогли полностью заменить традиционные стальные брони, в ряде случаев они стали отличной альтернативой благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая прочность при малом весе, устойчивость к коррозии и жесткость. При этом наилучшую эффективность на сегодня показывают сложные гетерогенные структуры на основе алюминия, однако есть ряд существенных недостатков, связанных с методами их получения. Основными из них являются различия в физико-химических и физико-механических свойствах исходных материалов, наличие межслойной коррозии, расслоение, низкий коэффициент адгезии и др. Наиболее перспективной технологией получения такого рода материалов является сварка взрывом. Цель работы – провести оценку комплекса физико-механических свойств, полученного сваркой взрывом нового броневое гетерогенного материала на основе алюминия и титана. *Материалы и методы.* Основным подходом для достижения поставленной цели является проведение комплекса исследований свойств композита: оценку макроструктуры материала, оценку количественного химического состава металлической основы композита и его околосшовной зоны, оценку пулестойкости. Исследование вышеуказанных свойств проводилось по методикам в соответствии с ГОСТ на поверенном оборудовании аттестованным персоналом. *Результаты.* Оценка состояния композиционного материала после сварки взрывом посредством визуально-измерительного контроля и его макроструктуры позволила выбрать рациональный режим сварки, на котором обеспечиваются наилучшее качество композита, без образования в нем участков расслоений и несплавов. Оценка макроструктуры и количественного химического состава металлической основы композита и его околосшовной зоны дала возможность определить свойства и характер роста интерметаллических фаз в зоне сварного шва. Исследование величины пулестойкости полученного композита показало его соответствие классу защитной структуры БрЗ, что при заданной толщине существенно выше аналогичного показателя монометаллической брони. *Выводы.* Применение нового типа броневое гетерогенного материала на основе алюминия и титана, полученного сваркой взрывом, позволило повысить живучесть брони за счет применения новой схемы армирования с механизмом локализации развития хрупких трещин в структуре композита при баллистическом воздействии. Полученный в рамках исследований броневой материал позволяет также снизить вес бронированной техники на 20–25 % при условии сохранения заданного уровня пулестойкости в сравнении с монометаллической алюминиевой броней.

Ключевые слова: сварка взрывом, броневой композиционный материал, прочность, микротвердость, микроструктура, трещиностойкость, интерметаллид, пулестойкость

Для цитирования: Крюков Д. Б., Кривенков А. О., Гуськов М. С. Аспекты разработки и исследования свойств нового типа броневых гетерогенных материалов на основе

алюминия и титана, полученных с применением технологии сварки взрывом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2025. № 3. С. 157–174. doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-12

Aspects of development and research of properties of new type of armor heterogeneous materials based on aluminum and titanium, obtained using explosion welding technology

D.B. Kryukov¹, A.O. Krivenkov², M.S. Guskov³

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

¹ddbbkk@yandex.ru, ²krivenkov80@yandex.ru, ³suralab@yandex.ru

Abstract. *Background.* Aluminum alloys have long proven their effectiveness as armor materials and have been widely adopted. Although they have not completely replaced traditional steel armor, in certain cases they have become an excellent alternative due to their unique properties, such as high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and rigidity. Currently, the most effective solutions are complex heterogeneous structures based on aluminum. However, there are several significant drawbacks associated with their production methods. These include differences in the physicochemical and mechanical properties of the base materials, interlayer corrosion, delamination, low adhesion coefficients, and others. In this context, explosive welding is considered the most promising technology for producing such materials. The purpose of this work is to evaluate the complex of physico-mechanical properties of a new heterogeneous armor material based on aluminum and titanium, produced by explosive welding. *Materials and methods.* The primary approach to achieving the stated goal involves conducting a comprehensive study of the composite's properties: assessing the macrostructure of the material, evaluating the quantitative chemical composition of the metallic base of the composite and its heat-affected zone, and assessing bullet resistance. These studies were carried out in accordance with GOST standards using calibrated equipment by certified personnel. *Results.* Evaluation of the composite material's condition after explosive welding through visual and dimensional inspection, as well as analysis of its macrostructure, allowed for the selection of an optimal welding regime that ensures the highest quality of the composite without areas of delamination or incomplete bonding. Assessment of the macrostructure and quantitative chemical composition of the metallic base of the composite and its heat-affected zone provided insights into the properties and growth patterns of intermetallic phases in the weld zone. Testing the bullet resistance of the obtained composite demonstrated its compliance with the Br3 protective structure class, which, at a given thickness, is significantly higher than that of monolithic armor. *Conclusions.* The use of a new type of heterogeneous armor material based on aluminum and titanium, produced by explosive welding, has improved armor survivability through a novel reinforcement scheme that localizes the development of brittle cracks in the composite structure under ballistic impact. The armor material developed in this study also allows for a 20-25% reduction in the weight of armored vehicles while maintaining the required level of bullet resistance compared to monolithic aluminum armor.

Keywords: explosion welding, armor composite material, strength, microhardness, microstructure, crack resistance, intermetallic compound, bullet resistance

For citation: Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Guskov M.S. Aspects of development and research of properties of new type of armor heterogeneous materials based on aluminum and titanium, obtained using explosion welding technology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2025;(3):157–174. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2025-3-12

Введение

Алюминиевая броня в последнее время стала одним из ключевых элементов в обеспечении защиты боевой техники от различных видов угроз. Ее эффективность проявляется в превосходстве перед стальной броней при защите от бронебойных пуль крупного и малого калибра, кроме того, алюминий обладает высокой технологичностью, хорошо сваривается и имеет уникальные характеристики противоминной и противоосколочной защиты. История использования алюминия в бронировании началась с разработки специальных алюминиевых сплавов в США, где был создан первый бронетранспортер с алюминиевым корпусом [1]. Затем другие страны, такие как Россия, Англия и Франция, также приступили к разработке собственных алюминиевых бронированных конструкций для своей боевой техники. С появлением специально разработанных алюминиевых броневых сплавов системы Al-Zn-Mg возможности алюминиевой брони значительно расширились. Эти сплавы обеспечивают оптимальное сочетание прочности и пластичности, что делает их идеальными для применения в авиационной технике, танках, бронетранспортерах, боевых роботах, беспилотниках и других боевых машинах.

Главное достоинство алюминиевых сплавов – их низкая плотность. Благодаря этому конструкции на основе алюминиевых сплавов, сохраняя свои функциональные и габаритные размеры, имеют меньший вес по сравнению с аналогичным изделием из конструкционной стали. Такое снижение веса может использоваться для улучшения тактико-технических характеристик бронемашин и средств индивидуальной защиты для повышения пуле- и бронестойкости, увеличения степени защиты экипажа, повышения объема полезной нагрузки и степени вооруженности [2].

Алюминиевые брони хорошо зарекомендовали себя в условиях малых и больших углов обстрела. При малом угле обстрела (менее 40°) алюминиевые сплавы эффективно поглощают энергию баллистического объекта, исключая сквозное пробитие бронеконструкции. При большом угле обстрела (свыше 40°) баллистический объект ricoшетирует от поверхности изделия, не нарушая целостности брони. Однако несмотря на все указанные выше преимущества, основным недостатком алюминиевой брони является невозможность обеспечения сопоставимой со стальной броней противоснарядной стойкости, вследствие чего тяжелая бронированная техника изготавливается по-прежнему на основе стальных моно- и многослойных броней.

Другими широко применяемыми бронематериалами являются сплавы на основе титана. Оценка их пулестойкости различными средствами поражения показывает перспективность их использования как для изготовления средств индивидуальной защиты, так и для легкобронированной техники. Общее снижение веса конструкции на их основе по сравнению со стальной может достигать от 10 до 25 %. Однако ввиду определенных структурных особенностей, связанных с высокой степенью локализации титаном внешнего деформационного воздействия, в чистом виде в качестве броневых материалов с высокой степенью пулестойкости титановые сплавы ограничены к применению. Невозможность реализации высокой динамической твердости титаном связана с эффектом «среза пробки», который заключается в создании условий для сквозного пробития за счет сдвига комплексов атомов в структуре титана по плоскости скольжения [3].

Материалы и методы

На сегодня наиболее перспективным является применение комбинированных (гетерогенных) броней на основе сплавов титана и алюминия, сочетающих в себе весь комплекс преимуществ вышеуказанных сплавов. На кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета разработан новый тип композиционных броневых материалов на основе высокопрочного алюминиевого сплава [4–6]. В качестве основы композита предложено использовать броневой алюминиевый сплав марки В95, являющийся одним из наиболее прочных легких конструкционных сплавов, используемых в том числе и в качестве броневых. На основе сплава В95 изготавливается широкая линейка военной техники легкого класса бронирования – от бронемашин пехоты до катеров и боевых роботов.

Химический состав и механические свойства алюминиевого сплава В95 в соответствии с ГОСТ 4784–97 приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав сплава В95, % (ГОСТ 4784–97)

Fe	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
до 0,5	до 0,5	0,2–0,6	до 0,1	0,1–0,25	до 0,05	86,3–91,5	1,4–2	1,8–2,8	5–7	Прочие, каждая 0,05; всего 0,1

Примечание. Al – основа; процентное содержание Al дано приблизительно.

Таблица 2

Механические свойства сплава В95 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГОСТ 4784–97)

Сортамент	ГОСТ	Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести, σ_t , МПа	Относительное удлинение, δ , %
Лента отожженная	ГОСТ 13726–97	550–570	–	10
Плита	ГОСТ 17232–99	470–490	390–410	2–4

В качестве армирующих листов композита было предложено использовать титановый сплав марки ВТ1-0. Титановый сплав ВТ1-0 отличается легкостью и жаропрочностью. Изготовленный на его основе прокат имеет небольшую плотность и высокую пластичность. Эти свойства позволяют получать из него изделия любой геометрической формы путем последующего технологического передела.

Химический состав и механические свойства титанового сплава ВТ1-0 в соответствии с ГОСТ 19807–91 приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Химический состав сплава ВТ1-0, % (ГОСТ 19807–91)

Fe	C	Si	N	Ti	O	H	Примеси
до 0,25	до 0,07	до 0,1	до 0,04	99,24 - 99,7	до 0,2	до 0,01	Прочие 0,3

Примечание. Ti – основа; процентное содержание Ti дано приблизительно. Допускается содержание алюминия до 0,7 %.

Таблица 4

Механические свойства сплава ВТ1-0 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГОСТ 19807–91)

Сортамент	ГОСТ	Предел прочности, σ_b , МПа	Относительное сужение, ψ , %	Относительное удлинение, δ , %
Лист	ГОСТ 22178–76	375	–	20–30
Плита	ГОСТ 23755–79	370–570	24	10

Результаты и обсуждение

В армирующих титановых листах предварительно изготавливают перфорации диаметром 25 мм с целью обеспечения процесса формирования через них соединения между слоями металлической алюминиевой основы матрицы композита. Схема сборки пакета композиционного материала перед сваркой взрывом приведена на рис. 1.

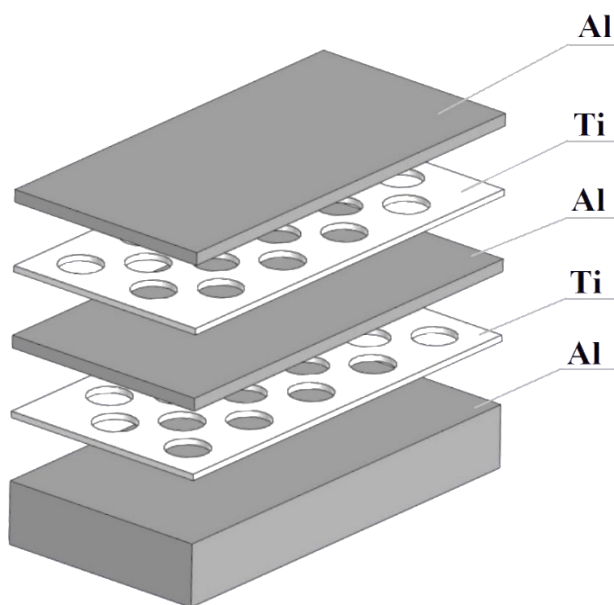


Рис. 1. Схема сборки пакета композиционного материала перед сваркой взрывом

Общее количество слоев броневых композиционных материалов составляет 5 и более, при этом промежуточные 2-й и 4-й армирующие слои располагают таким образом, чтобы отверстия в них перекрывали друг друга, исключая возможное сквозное прохождение через них баллистического объекта (рис. 2) [7].

При получении гетерогенных композиционных материалов на основе сплавов алюминия и титана традиционными способами (пакетная прокатка, диффузионная сварка и др.) возникают сложности с обеспечением прочного соединения между исходными материалами из-за их различия в физико-химических и физико-механических свойствах, например, высокой твердости и прочности одного материала и высокой пластичности при низкой плотности другого. В этой связи авторами было предложено в качестве способа по-

лучения композиционного материала использовать технологию сварки материалов взрывом, не имеющую вышеуказанных ограничений [7–11].

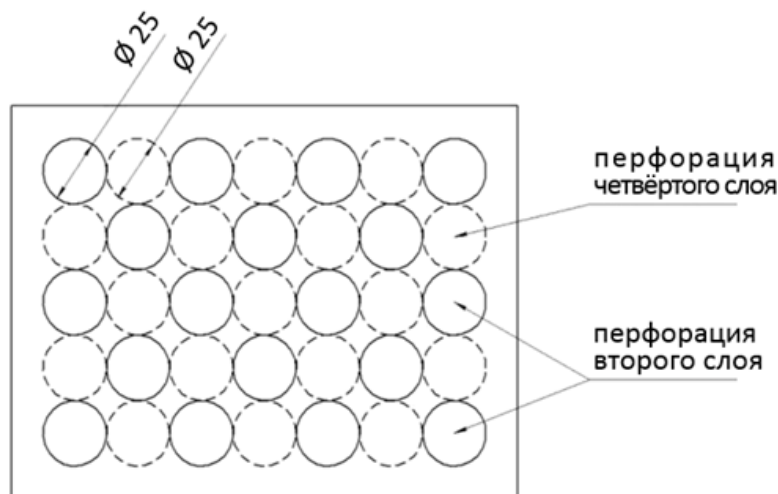


Рис. 2. Схема расположения отверстий в армирующих слоях

На основе анализа технологических схем получения сваркой взрывом композиционных металлических материалов для изготовления композиционного материала было предложено использовать плоскопараллельную схему сварки взрывом (рис. 3).

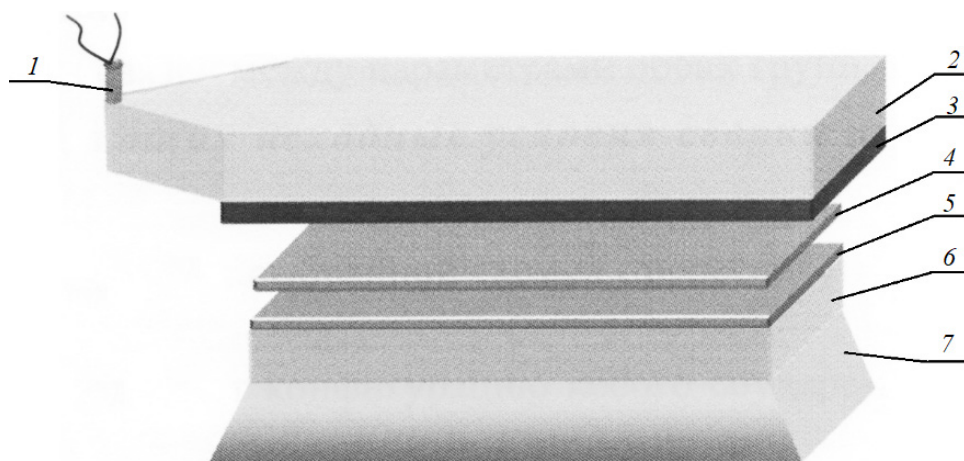


Рис. 3. Схема сварки композиционного материала взрывом: 1 – электродетонатор; 2 – контейнер с взрывчатым веществом; 3 – метаемая пластина; 4 – промежуточная пластина; 5 – неподвижная пластина; 6 – металлическое основание; 7 – грунт

Сварку взрывом производили с использованием взрывчатого вещества, представляющего собой смесь аммиачной селитры с дизельным топливом. На основе анализа состояния композиционного материала после сварки взрывом посредством визуально-измерительного контроля, а также результатов ультразвукового исследования материала был определен рациональный диапазон

технологических параметров ударно-волнового нагружения, обеспечивающий получение качественного композита.

Дальнейший спектр исследований композиционного материала был направлен на изучение его микроструктуры. В ходе исследования было показано, что сваренный на рациональном режиме композиционный материал имеет преимущественно безволновой характер зоны соединения слоев с отсутствием непроваров и интерметаллических включений. Макрошлиф композиционного армированного материала после сварки взрывом представлен на рис. 4.



Рис. 4. Макрошлиф композиционного материала

Выбор композиции сплавов алюминия и титана для изготовления броневых материалов был обусловлен также тем обстоятельством, что на заключительной стадии формирования комплекса свойств композита в структуре материала термической обработкой формируются высокотвердые интерметаллические слои, которые выполняют роль дробящих баллистический объект преград.

Анализ литературных данных и диаграммы состояний бинарной системы Ti–Al (рис. 5) показал, что основным типом интерметаллида, возникающим при взаимной термодиффузии в зоне контакта алюминия и титана, является $TiAl_3$ [12].

Интерметаллид $TiAl_3$ имеет самую низкую плотность $3,4 \text{ г/см}^3$, высокую микротвердость $465\text{--}670 \text{ кг/мм}^2$ и лучшую стойкость к окислению даже при 1000°C .

Полный цикл термической обработки броневых композиционных материалов заключается в отжиге на интерметаллид путем нагрева от 550 до 625°C с последующей выдержкой в печи от 6 до 300 ч. Далее следует закалка образцов при температуре от 460 до 470°C с последующим охлаждением в воде, подогретой до 100°C . После проводится искусственное старение образцов при температуре 110°C с выдержкой в печи в течение 10 ч с последующим охлаждением в печи.

Слои интерметаллида формируются в результате термодиффузионных процессов на границах сваренных слоев композита, при этом скорость роста и толщина интерметаллических прослоек регулируется величиной температуры отжига и временем выдержки материала в печи. Исследование диффу-

зионных процессов на различных температурах позволило определить зависимость скорости роста интерметаллида. Основные результаты приведены на графике (рис. 6).

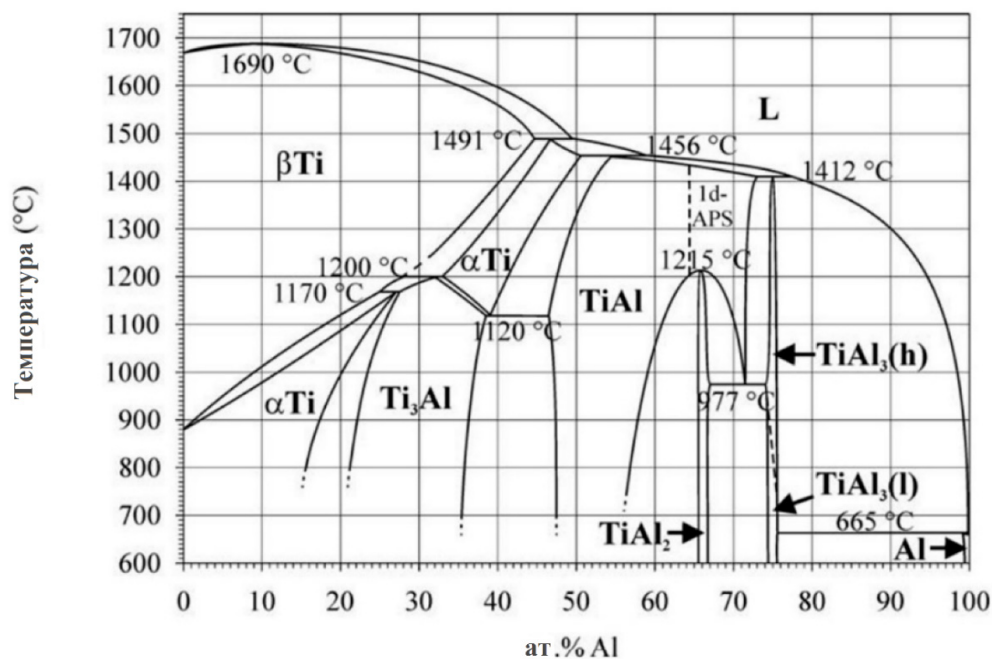


Рис. 5. Диаграмма состояний бинарной системы Ti–Al

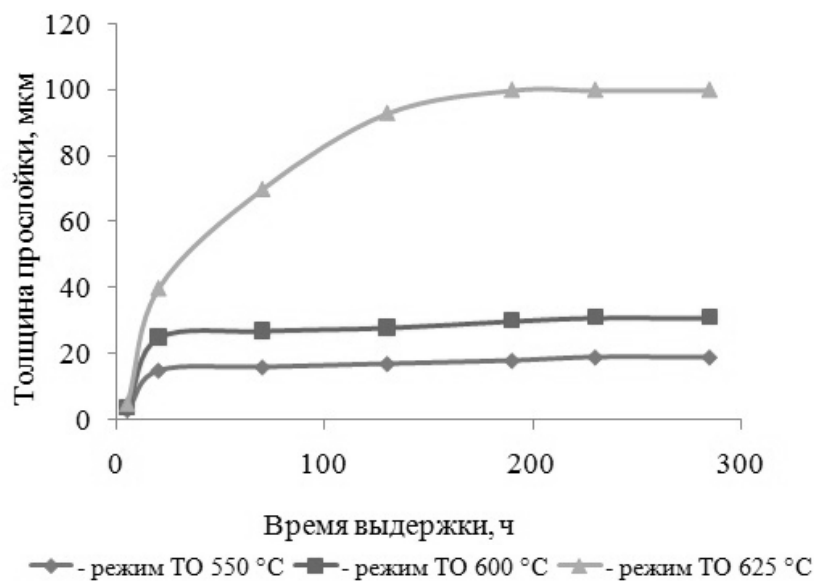


Рис. 6. Зависимость скорости роста интерметаллида

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что максимальная толщина прослойки интерметаллида порядка 90–100 мкм может быть получена при условии выдержки композита в печи с температурой

625 °С в течение 200 ч. Дальнейшая выдержка в печи не показывает существенного увеличения толщины слоя интерметаллида, что свидетельствует о существенном замедлении термодиффузионных процессов и обуславливает технологическую и экономическую целесообразность такого цикла термической обработки броневых композиционных материала.

Исследование химического состава прослоек интерметаллида методом рентгенофазового анализа позволило идентифицировать их как соединение $TiAl_3$ [13]. На рис. 7 представлена микроструктура граничной зоны соединения композиционного гетерогенного материала, прошедшего термообработку.

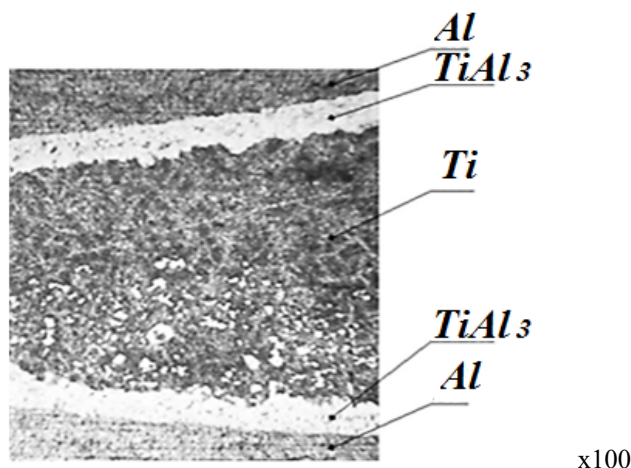


Рис. 7. Микроструктура граничной зоны соединения композиционного гетерогенного броневых материала

Обладая высоким значением твердости, сопоставимой с твердостью закаленной стали, интерметаллические $TiAl_3$ слои в составе композиционного гетерогенного материала будут способствовать гашению кинетической энергии баллистического объекта 1 тем самым фрагментируя его на более мелкие осколки 5, которые в свою очередь будут удерживаться высоковязкими алюминиевыми слоями металлической основы матрицы композита. Схема работы композиционной брони при наличии в ней интерметаллических слоев, приведена на рис. 8.

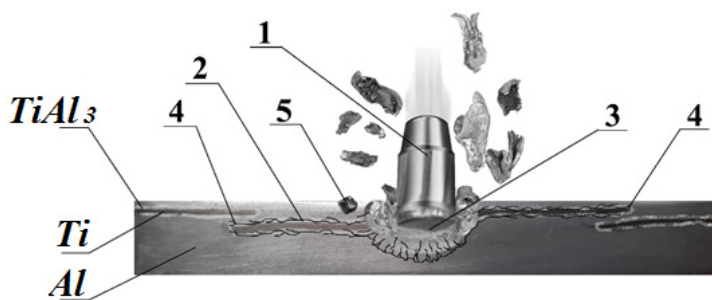


Рис. 8. Схема разрушения баллистического объекта при контакте с композиционным гетерогенным броневым материалом: 1 – баллистический объект; 2 – хрупкая трещина; 3 – точка контакта баллистического объекта с материалом; 4 – место локализации развития хрупкой трещины; 5 – осколок баллистического объекта

Данная схема носит условный характер и получена на основании результатов натурных испытаний по оценке пулестойкости композита на образцах размером 600×600 мм, скриншоты хода которых приведены на рис. 9. Съемка хода испытания производилась на высокоскоростную камеру Evercam 1000-16-M в монохромном формате со скоростью съемки 1000 к/с с разрешением 1280×800 пиксел.

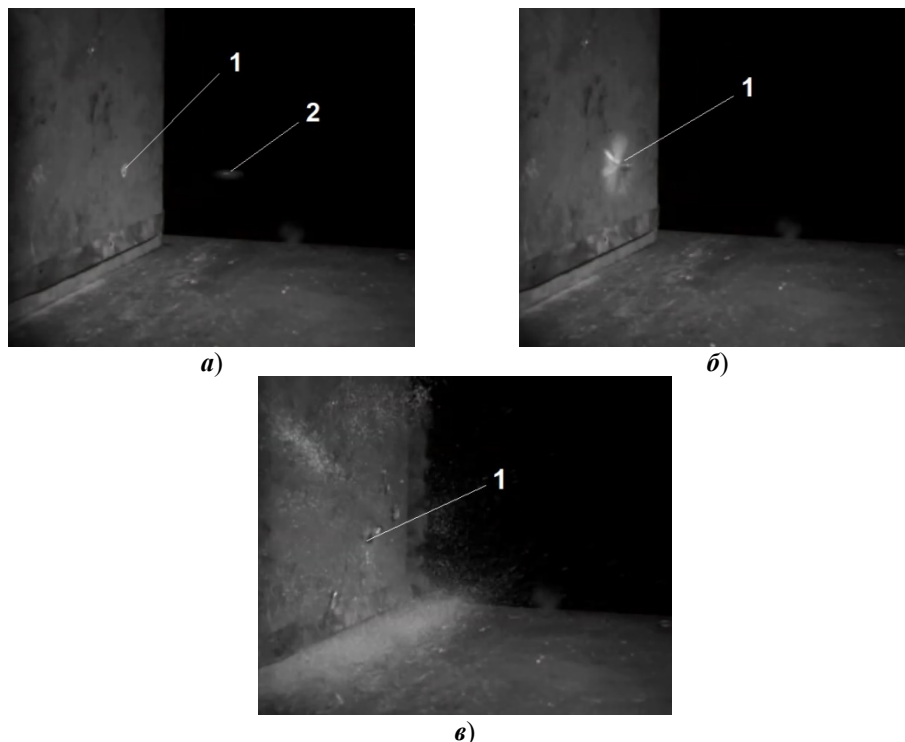


Рис. 9. Высокоскоростная съемка баллистических испытаний: 1 – точка контакта баллистического объекта с материалом; 2 – баллистический объект; а – стоп-кадр до встречи баллистического объекта с испытуемым образцом; б – стоп-кадр в момент встречи баллистического объекта с испытуемым образцом; в – стоп-кадр в момент разрушения баллистического объекта (непробитие)

На скриншотах (рис. 9,б,в) видно, что баллистический объект при контакте с композиционным гетерогенным броневым материалом разрушается с образованием большого количества осколков.

Наличие перфораций в промежуточных титановых слоях между основными слоями алюминиевой матрицы композита позволило локализовать механизм развития хрупких трещин при баллистическом воздействии на материал, тем самым повысив живучесть самой алюминиевой брони. При взаимодействии с баллистическим объектом 1 (см. рис. 8) в материале образуются хрупкие трещины, которые преимущественно формируются и растут в высокопрочных интерметаллических слоях 2, расположенных вдоль границы соединения алюминия и титана. Эти трещины распространяются от точки контакта с баллистическим объектом 3 и, достигнув области перехода от края перфорации к зоне сварки вязкой металлической основы композитной

матрицы 4, останавливаются, что приводит к прекращению их дальнейшего развития. Последний факт обеспечивает условие выхода на максимально возможный уровень прочности соединения, соответствующий прочности металлической основы матрицы композита. Проведенные испытания по оценке прочности показали, что по сравнению с монометаллом матрицы основы композита увеличение прочности композита составило более 20 %.

Таким образом, разрабатываемый композиционный материал представляет собой многослойную композицию (рис. 10), состоящую из нечетного количества слоев. Требуемые характеристики материала обеспечиваются особенностью его структуры, представляющей собой чередование в определенной последовательности прочных титановых, высокотвердых интерметаллических и вязких алюминиевых слоев, а также контактом между слоями металлической матрицы композита через перфорации заданной геометрии в армирующих слоях. 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 регулируемой толщины последующей термической обработкой [4, 5].

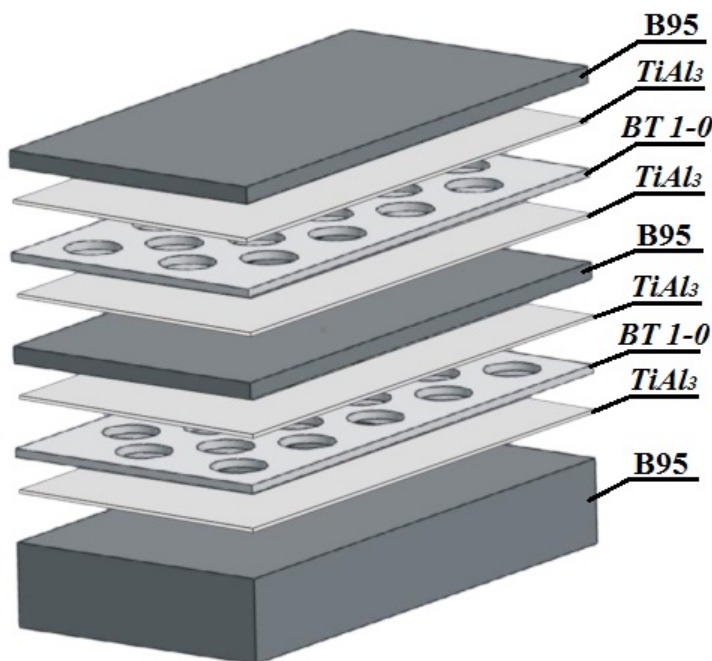


Рис. 10. Внешний вид модели композиционного гетерогенного броневых материала на основе сплавов титана и алюминия

Для оценки броневых характеристик композиционного материала были проведены оценочные испытания на пулестойкость экспериментальных образцов. Испытания проводились в Государственной испытательной станции Российской Федерации по испытаниям ручного огнестрельного оружия и патронов к нему и технических средств защиты (АО «ЦНИИТОЧМАШ», г. Москва).

Для проведения оценочных испытаний экспериментальных образцов композиционного броневых материала на пулестойкость допускается применение как ГОСТ Р 51112–97 «Средства защитные банковские. Требования по пулестойкости и методы испытаний», так и ГОСТ 34286–2017 «Бронеодежда. Классификация и общие технические требования» [14, 15]. Это возможно в связи с тем, что в данных нормативных документах предъявляются одинаковые требования к регламентированным средствам поражения, а также допускается проведение оценочных испытаний экспериментальных образцов.

При проведении испытаний допускается использование баллистических стволов или огнестрельного оружия, перечисленного в указанных нормативно-технических документах, имеющих аналогичные значения (оружию, перечисленному определяющих параметров – длина ствола, количество, глубина и угол наклона нарезов.

Испытания проводились в нормальных климатических условиях. Испытаниям подвергались экспериментальные образцы композиционных броневых материалов, прошедшие полный цикл термической обработки.

Размеры образцов для испытания на пулестойкость составляли 120×120 мм (рис. 11). Крестами на образцах обозначались места попадания соответствующих поражающих элементов.



Рис. 11. Внешний вид подготовленного для испытания на пулестойкость экспериментального образца композиционного броневых материала

Для оценки пулестойкости по классу защиты Бр3 образцы закреплялись на стенде неподвижно с углом встречи с пулей 90° . По классу защитной структуры БРЗ обстрел образцов производился с дальности $5 \pm 0,1$ м. Для оценки пулестойкости по классу защитной структуры Бр4 обстрел образцов производился с дальности $10 \pm 0,1$ м. Замер расстояния осуществлялся дальномером лазерным Leica D1S70 D8.

При обстреле производилось фиксирование скорости полета пуль V_3 , измеренной на расстоянии 3 м от дульного среза оружия. Замер скорости пули осуществлялся регистратором скорости полета пули РС-4М.

Обстрел экспериментальных образцов по классу защиты Бр3 производился баллистическим стволом пистолета Ярыгина (ПЯ) калибром 9 мм. Средствами поражения являлись патроны калибра 9×19 мм, инд. 7Н21 с пулей Пст, п. Г.83-13-539 (тип сердечника – стальной термоупрочненный). Характеристики поражающего элемента – масса 7,0 г; средняя скорость полета пуль $V_3 = 410 \pm 10$ м/с.

Обстрел экспериментальных образцов по классу защиты Бр4 производился баллистическим стволом автомата АКМ, калибр 7,62 мм. Средствами поражения являлись патроны калибра $7,62 \times 39$ мм, 57-Н-231, с пулей ПС (тип сердечника – стальной термоупрочненный). Характеристики поражающего элемента: масса 7,9 г, средняя скорость полета пуль $V_3 = 720 \pm 15$ м/с.

После каждого выстрела оценивался результат воздействия пули (Пробитие/Непробитие). Образец считают выдержавшим испытания, если отсутствуют сквозное пробитие образца, в том числе при скорости пули выше предельного значения, для данного типа баллистического ствола или огнестрельного оружия; следы пробития экрана-свидетеля вторичными поражающими элементами. Результаты оценочных испытаний на класс защитной структуры представлены в табл. 5 и 6 и на рис. 12 и 13.

Таблица 5

Результаты оценочных испытаний
по классу защиты по пулестойкости Бр3 по ГОСТ 34286–2017

Образец	Условия испытаний	Оружие	Средство поражения	V_3 , м/с	Результат
Образец № 1	Нормальные $T = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	Баллистический ствол калибра 9×19 мм	Патроны 9×19 мм инд. 7Н21, с пулей Пст	404	НЕпробитие

Таблица 6

Результаты оценочных испытаний
по классу защиты по пулестойкости Бр4 по ГОСТ 34286–2017

Образец	Условия испытаний	Оружие	Средство поражения	V_3 , м/с	Результат
Образец № 1	Нормальные $T = (20 \pm 5) ^\circ\text{C}$	Баллистический ствол калибра $7,62 \times 35$ мм	Патроны $7,62 \times 39$ мм инд. 57-Н-231, с пулей ПС (ТУС)	731	Пробитие

Результаты оценочных испытаний показали, что при обстреле пяти-слойных экспериментальных образцов композиционных броневых материалов по классу защитной структуры Бр3 в нормальных климатических условиях пробития не получены патроном 9×19 мм, инд. 7Н21, с пулей Пст. Следовательно, образцы соответствуют классу защитной структуры Бр3.

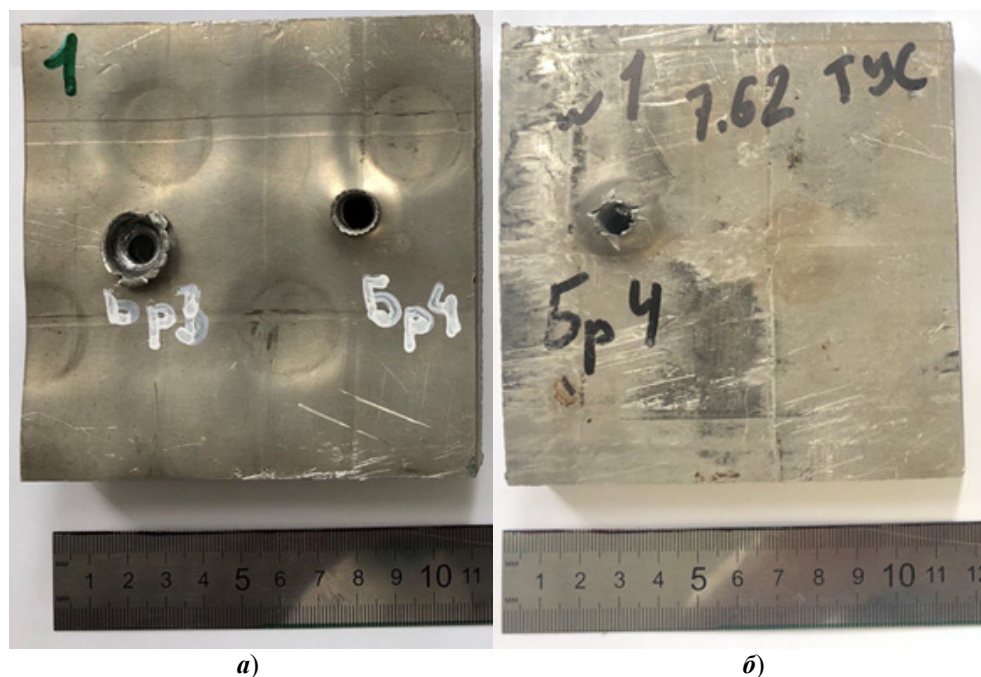


Рис. 12. Результат оценочных испытаний по классу защиты по пулестойкости Бр3 и Бр4 по ГОСТ 34286–2017 (вид сверху): *а* – лицевая сторона; *б* – тыльная сторона



Рис. 13. Результат оценочных испытаний по классу защиты по пулестойкости Бр3 и Бр4 по ГОСТ 34286–2017 (вид сбоку)

При оценочных испытаниях пятислойных экспериментальных образцов композиционных броневых материалов по классу защитной структуры Бр4 в нормальных климатических условиях получены пробития патроном 7,62 × 39 мм, инд. 57-Н-231, с пулей с пулей ПС (ТУС).

Согласно доступным данным для защиты экипажа бронированных машин от бронебойных пуль калибра 7,62 мм на практике толщина брони составляет порядка 40 мм и обстрел ведется с расстояния 75–150 м [2]. При оценочных испытаниях разработанного композиционного броневых материала толщиной 17 мм обстрел калибром 7,62 мм производился с расстояния 10 м, т.е. практически в упор. Данное обстоятельство свидетельствует о высокой боевой эффективности композиционного материала и предложенного

в нем нового способа армирования. Обеспечение необходимого уровня пулестойкости на расстоянии в 7 раз меньшем, чем в условиях обычного боевого взаимодействия, свидетельствует о высоких тактико-технических характеристиках брони и изделий, полученных на ее основе.

Для оценки весовых характеристик изделий на основе разработанного броневое гетерогенного материала, полученного сваркой взрывом, был произведен сравнительный расчет его веса для 1 м^2 площади. Также был произведен аналогичный расчет веса моноброни на основе броневое алюминиевого сплава В95, являющегося основой металлической матрицы разработанного гетерогенного материала.

С учетом того, что заданный уровень пулестойкости Бр3 моноброня на основе сплава В95 обеспечивает при толщине 22 мм и более, рассчитываем ее вес при данной толщине и получаем 59 кг. С учетом того, что разрабатываемый нами композиционный материал представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из листов сплава титана ВТ1-0 и металлической матрицы на основе броневое алюминиевого сплава В95 (состава В95 + ВТ1-0 + В95 + ВТ1-0 + В95) толщиной слоев 2 + 1 + 2 + 1 + 10 мм соответственно, а также того, что армирующие титановые слои имеют перфорации, площадь которых составляет около 50 % от площади самого листа, вес всей композиции толщиной 16 мм составил порядка 46 кг. Таким образом, суммарное снижение веса 1 м^2 разработанного броневое гетерогенного материала при этом составляет порядка от 20 до 25 % при условии сохранения заданного уровня пулестойкости Бр3.

Обработка экспериментальных данных в данной работе производилась с использованием традиционных статистических процедур – средств описательной статистики на основе выборочного метода.

Заключение

Проведен анализ научно-технической литературы. Показано, что традиционные монометаллические броневые материалы обладают рядом существенных недостатков, которые негативно влияют на тактико-технические характеристики изготовленных из них изделий. Основные из них – это значительный вес и большая толщина. В то же время композиционные неметаллические броневые материалы не способны противостоять многократным попаданиям в одну и ту же область конструкции из-за полного разрушения или расслоения. Предложена новая схема армирования композита с использованием технологии сварки взрывом. С помощью сварки взрывом был создан новый армированный композиционный материал на основе сплавов титана и алюминия. Были определены оптимальные параметры ударно-волнового воздействия, обеспечивающие получение композита необходимого качества, а также проведена оценка его прочности. Для улучшения тактико-технических характеристик материала было предложено формирование в его структуре высокотвердых интерметаллических слоев путем термической обработки. Установлены оптимальные режимы высокотемпературного отжига, которые позволяют создавать интерметаллические слои заданной толщины в структуре композита. Исследован фазовый состав интерметаллических прослоек и описан механизм, предотвращающий распространение хрупких трещин в материале при баллистическом воздействии на материал. Проведены испытания

на пулестойкость, которые показали, что разработанный композит соответствует классу защитной структуры Бр3. Полученные результаты подтверждают перспективность предложенной схемы армирования композита. Это открывает возможности для создания новых типов броневых материалов, сочетающих высокую пулестойкость, конструкционную прочность и низкий удельный вес, что делает их пригодными для широкого спектра изделий.

Список литературы

1. Складов В. А., Гребенников С. Ф. Бронетанковая техника: история, конструкция, применение. М. : Воениздат, 2005. 320 с.
2. Федосеев С. В. Боевые машины пехоты и бронетранспортеры. М. : Экспринт, 2003. 256 с.
3. Foss C. *Jane's Armour and Artillery*. 2020 ed. Jane's Information Group, 2020. 720 p.
4. Крюков Д. Б. Структурные особенности и технология получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2022. Т. 24, № 3. С. 103–111.
5. Крюков Д. Б. Перспективные легкие трещиностойкие брони, полученные с применением технологии сварки взрывом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2022. Т. 18, № 10 (214). С. 440–443.
6. Крюков Д. Б. Аспекты получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин в структуре при баллистическом воздействии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2023. № 1 (25). С. 20–28.
7. Патент Российская Федерация № 2606134. Способ получения композиционного материала / Первухин Л. Б., Казанцев С. Н., Крюков Д. Б. [и др.]. Бюллетень № 16 от 10.01.2017.
8. Конон Ю. А., Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / под ред. В. М. Кудинова. М. : Машиностроение, 1987. 216 с.
9. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. М. : Металлургия, 1978. 166 с.
10. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. Минск : Наука и техника, 1990. 205 с.
11. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск : Наука, 1980. 220 с.
12. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение : учебник для высших учебных заведений. М. : Машиностроение, 1990. 528 с.
13. Pervukhin L. B., Kryukov D. B., Krivenkov A. O., Chugunov S. N. Structural Transformations and Properties of Titanium–Aluminum Composite during Heat Treatment // *Physics of Metals and Metallography*. 2017. Vol. 118, № 8. P. 759–763.

References

1. Sklyarov V.A., Grebennikov S.F. *Bronetankovaya tekhnika: istoriya, konstruktsiya, primeneniye* = *Armored vehicles: history, design, application*. Moscow: Voenizdat, 2005:320. (In Russ.)
2. Fedoseev S.V. *Boevye mashiny pekhoty i bronetransportery* = *Infantry fighting vehicles and armored personnel carriers*. Moscow: Eksprint, 2003:256. (In Russ.)
3. Foss C. *Jane's Armour and Artillery*. 2020 ed. Jane's Information Group, 2020:720.
4. Kryukov D.B. Structural features and technology for producing lightweight armor composite materials with a mechanism for localizing brittle cracks. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal processing (technology, equipment, tools)*. 2022;24(3):103–111. (In Russ.)

5. Kryukov D.B. Promising lightweight crack-resistant armor produced using explosion welding technology. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya = Hardening technologies and coatings*. 2022;18(10):440–443. (In Russ.)
6. Kryukov D.B. Aspects of obtaining lightweight armor composite materials with a mechanism for localizing brittle cracks in the structure under ballistic impact. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii = Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Materials. Designs. Technologies*. 2023;(1):20–28. (In Russ.)
7. Patent Rossiyskaya Federatsiya № 2606134. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo materiala = Method for producing composite material*. Pervukhin L.B., Kazantsev S.N., Kryukov D.B. et al. Bull. № 16 from 10.01.2017. (In Russ.)
8. Konon Yu.A., Konon Yu.A., Pervukhin L.B., Chudnovskiy A.D. *Svarka vzryvom = Explosive welding*. Moscow: Mashinostroenie, 1987:216. (In Russ.)
9. Kudinov V.M., Koroteev A.Ya. *Svarka vzryvom v metallurgii = Explosive welding in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1978:166. (In Russ.)
10. Zakharenko I.D. *Svarka metallov vzryvom = Explosive welding of metals*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990:205. (In Russ.)
11. Deribas A.A. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom = Physics of explosive hardening and welding*. Novosibirsk: Nauka, 1980:220. (In Russ.)
12. Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie: uchebnik dlya vysshikh uchebnykh zavedeniy = Materials science: textbook for Higher Education Institutions*. Moscow: Mashinostroenie, 1990:528. (In Russ.)
13. Pervukhin L.B., Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Chugunov S.N. Structural Transformations and Properties of Titanium–Aluminum Composite during Heat Treatment. *Physics of Metals and Metallography*. 2017;118(8):759–763.

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Борисович Крюков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ddbbkk@yandex.ru

Dmitriy B. Kryukov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Алексей Олегович Кривенков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: krivenkov80@yandex.ru

Aleksey O. Krivenkov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Максим Сергеевич Гуськов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры сварочного, литейного
производства и материаловедения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: suralab@yandex.ru

Maksim S. Guskov

Candidate of engineering sciences, associate
professor, associate professor
of the sub-department of welding,
foundry production and materials science,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 15.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 22.08.2025

Принята к публикации / Accepted 10.09.2025