



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)



Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Структурные особенности и технология получения легких броневых композиционных материалов с механизмом локализации хрупких трещин

Дмитрий Крюков*

Пензенский государственный университет, ул. Красная, 40, г. Пенза, 440028, Россия

 <https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>,  ddebkk@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 531.58: 621.791.13

История статьи:

Поступила: 04 июля 2022

Рецензирование: 13 июля 2022

Принята к печати: 21 июля 2022

Доступно онлайн: 15 сентября 2022

Ключевые слова:

Композиционный металлический материал

Сварка взрывом

Армирование

Трещиностойкость

Пулестойкость

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Традиционно используемые в изделиях вооружений военной и специальной техники монометаллические брони имеют ряд ключевых недостатков, оказывающих существенное влияние на тактико-технические характеристики изделий, а именно существенный вес и толщину. При этом широко используемые в последнее время в качестве альтернативного варианта композиционные неметаллические брони, в свою очередь, не способны выдерживать множественные попадания в локальные области конструкции вследствие полного своего разрушения или расслоения. **Цель работы:** разработка технологии получения нового класса многослойных металлических бронематериалов на основе легких металлов и сплавов сваркой взрывом, сочетающих в себе высокие показатели пулестойкости и конструкционной прочности наряду с низким удельным весом. **В работе представлена** новая схема армирования композита с применением технологии сварки взрывом, позволяющая локализовать развитие хрупких трещин по межслойным границам при внешнем баллистическом воздействии на объект. **Результаты и обсуждение.** Сваркой взрывом получен армированный композиционный материал на основе сплавов титана и алюминия. Определены рациональные режимы ударно-волнового нагружения, обеспечивающие получение композиционного материала требуемого качества, проведена оценка прочности композита. С целью улучшения тактико-технических характеристик композита было предложено формирование в его структуре высокотвердых интерметаллических слоев за счет термической обработки. Определены рациональные режимы высокотемпературного отжига, обеспечивающие формирование интерметаллических слоев заданной толщины в структуре композита. Изучен фазовый состав прослоек интерметаллида. Исследованы структурные особенности композиционного материала. Описан механизм локализации хрупких трещин в структуре композита при баллистическом воздействии на него.

Для цитирования: 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. – DOI:10.17212/1994-6309-2022-24.3-103-111.

Введение

Традиционно используемые в системах бронирования сталь и композиционные материалы имеют свои узко специфические области применения. Бронированные изделия из высокопрочной стали давно зарекомендовали себя в качестве основы для тяжелой бронетехники, тогда

как брони на основе композиционных материалов широко используются для легких бронемашин, авиационной техники, боевых роботов и средств индивидуальной защиты [1–4].

Композиционные материалы чаще всего применяют в тех случаях, где масса бронирования имеет критическое значение. По мнению ряда экспертов [5–8], при замене моностали на композит можно достичь снижения массы изделия примерно в два раза, что, в свою очередь, позволит повысить снаряженность и улучшить тактико-технические характеристики машины или изделия.

*Адрес для переписки

Крюков Дмитрий Борисович, к.т.н., доцент

Пензенский государственный университет,

ул. Красная, 40,

440028, г. Пенза, Россия

Тел.: 8 (8412) 666 262, e-mail: ddebkk@yandex.ru

На сегодняшний день, в качестве основы для легких композиционных броней широко используют армидные, угле- и стекловолокна, керамику, а также полиэтилен с комплексом различных связующих материалов. При этом технология изготовления бронезащитных элементов на основе таких материалов требует применения достаточно сложных технических решений и дорогостоящего оборудования. Сами бронезащитные элементы на основе вышеуказанных композитов, имеющие сопоставимые с монометаллическими бронями баллистические характеристики, не выдерживают конкуренции с ними по требованию многоударности, т. е. не способны выдерживать множественные попадания в локальные области вследствие полного разрушения или расслоения [7, 9, 14–16]. Разработка нового класса композиционных броневых материалов, сочетающих в себе высокие показатели пулестойкости и конструкционной прочности наряду с низким удельным весом, является актуальной задачей.

На кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» разработана не имеющая аналогов уникальная технология изготовления армированных композиционных броневых материалов на основе легких металлов и сплавов [10, 11]. В качестве металлической основы данных материалов предложено использование броневых алюминиевых сплавов (В95), а в качестве армирующих слоев – титановых сплавов (ВТ1–0).

Металлический композит изготавливается с применением технологии сварки взрывом, которая позволяет получать качественные сварные соединения из материалов и сплавов, не свариваемых традиционными способами, к которым относят вышеуказанные материалы. Неразъемные металлические соединения, получаемые технологией сварки взрывом, формируются на межзатомном уровне без существенного теплового вложения в зону контакта материалов. При этом прочность самого сварного соединения выше прочности наименее прочного металла композиции [19].

Цель данной работы – разработка технологии получения нового класса многослойных металлических бронематериалов на основе легких металлов и сплавов сваркой взрывом, сочетающих в себе высокие показатели пулестойкости

и конструкционной прочности наряду с низким удельным весом. Это позволит существенно улучшить тактико-технические характеристики бронированной техники и изделий специального назначения.

Задачи исследования – разработка новой схемы армирования композиционных металлических материалов на основе легких металлов и сплавов, определение рациональных режимов ударно-волнового нагружения, обеспечивающих получение композиционного материала требуемого качества сваркой взрывом, описание механизма локализации хрупких трещин в структуре композита при баллистическом воздействии на него.

Методика исследований

В схеме армирования композиционного материала предусмотрено использование специальных перфорированных армирующих слоев, изготовленных из титанового сплава (рис. 1) [12].

Количество таких слоев в композите может составлять от двух и более. При этом перфорации располагаются в армирующих слоях таким образом, чтобы каждый последующий слой не совпадал по перфорациям с предыдущим и обеспечивал их перекрытие. Такой характер расположения перфораций в структуре композита не позволяет осуществить возможное сквозное прохождение через них баллистического объекта.

На основе анализа технологических схем получения сваркой взрывом композиционных металлических материалов для изготовления композиционного материала состава В95 + ВТ1–0 + В95 использовали плоскопараллельную схему сварки взрывом, представленную на рис. 2.

Толщины свариваемых листов композиционного материала (состава В95 + ВТ1–0 + В95 + ВТ1–0 + В95) имели 2 + 1 + 2 + 1 + 10 мм соответственно.

В качестве взрывчатого вещества для сварки взрывом использовали «Игданит» (смесь аммиачной селитры с дизельным топливом в соотношении 96:4). Сварку взрывом проводили в широком диапазоне скоростей точки контакта от 1800 до 2400 м/с.

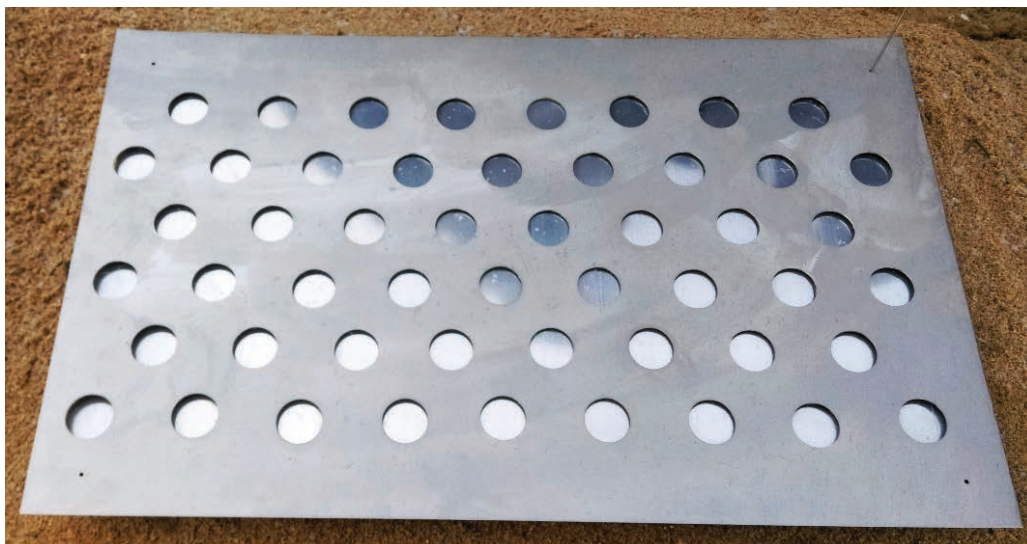


Рис. 1. Перфорированный армирующий слой

Fig. 1. Perforated reinforcing layer

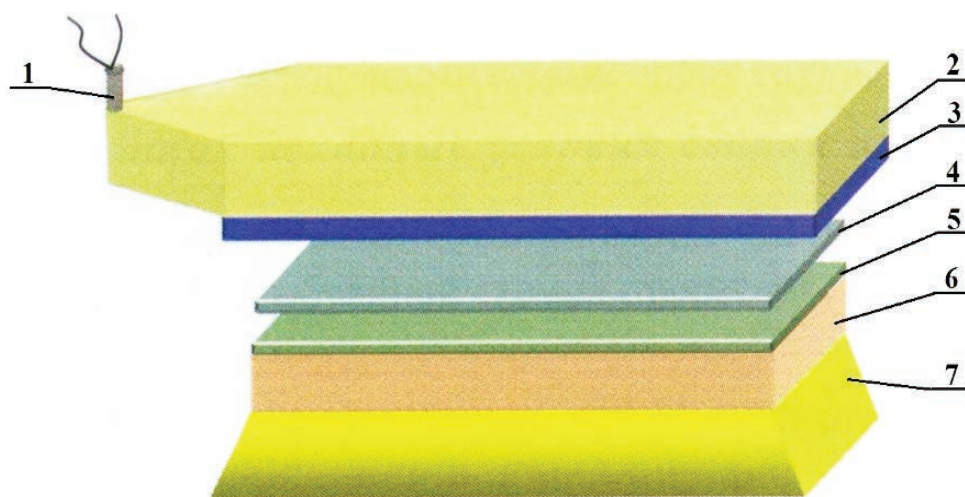


Рис. 2. Схема сварки взрывом:

1 – электродетонатор; 2 – контейнер с взрывчатым веществом; 3 – метаемая пластина;
4 – промежуточная пластина; 5 – неподвижная пластина; 6 – металлическое основание;
7 – грунт

Fig. 2. Explosive Welding Diagram:

1 – electric detonator; 2 – container with explosive substance; 3 – driver plate; 4 – intermediate plate; 5 – fixed plate; 6 – metal base; 7 – ground

Результаты и их обсуждение

По результатам визуально-измерительного и ультразвукового контроля качества сваренных образцов композиционного материала в качестве рационального режима сварки взрывом был выбран режим со следующими технологическими параметрами (высота взрывчатого вещества 55 мм, скорость точки контакта 2200 м/с, зазор между свариваемыми элементами 2 мм). Кри-

териями выбора рационального режима сварки взрывом служило отсутствие краевых и внутренних несплошностей композита, а также внешнее состояние его поверхности. Так, в частности, результатами вышеуказанных методов контроля было установлено, что на режимах сварки взрывом со скоростью точки контакта менее 2200 м/с наблюдалось отсутствие сварки слоев в краевой области композита с частичной обрубкой металлических элементов. Состояние композита, сваренного

со скоростью точки контакта более 2200 м/с, характеризовалось частичным разрушением его поверхности с большим количеством внутренних зон непроваров слоев.

Анализ макроструктуры композита, сваренного на выбранном рациональном режиме, свидетельствует о высоком качестве соединения материала по межслойным границам, сварной шов композиционного материала по всем межслойным границам имеет преимущественно безволновой характер.

Внешний вид макроструктуры армированного композиционного материала после сварки взрывом показан на рис. 3.



Рис. 3. Макроструктура армированного композиционного материала на основе легких металлов и сплавов

Fig. 3. Macrostructure of reinforced composite material based on light metals and alloys

Роль перфораций в предложенном схемном решении заключается в формировании вязкого однородного слоя металлической основы матрицы композита на основе алюминиевого сплава, представляющего собой сварное соединение через перфорацию армирующего элемента. При контакте с баллистическим объектом 1 возникающие в нем хрупкие трещины, распространяясь от точки контакта 3 по межслойным границам композита 2, достигнув точки перехода от края перфорации к зоне сварки вязкой металлической основы матрицы композита 4, останавливаются на ней, и развитие хрупкой трещины прекращается. Это позволяет локализовать зону баллистического разрушения композиционной брони в пределах локальной зоны сварки слоев алюминия и титана 2, сохранив целостность конструкции изделия и его комплексную пулестойкость без обязательной замены новым бронезащитным элементом. Схема локализации хрупкой трещины в структуре композита при контакте баллистическим объектом представлена на рис. 4.

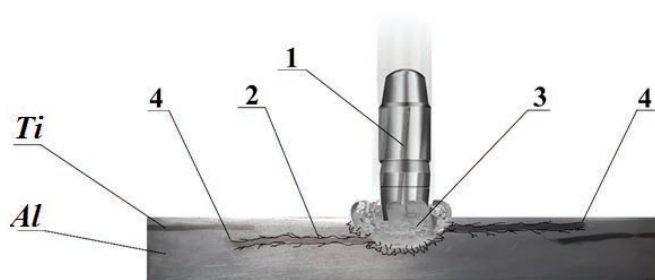


Рис. 4. Схема локализации хрупких трещин в структуре композита

Fig. 4. Diagram of brittle cracks localization in the composite structure

Помимо этого наличие тонких перфорированных слоев в структуре металлического композиционного материала также способствует повышению его прочностных показателей [17]. Оценку прочностных показателей и подготовку образцов для испытаний проводили по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 1497–84. Проведенный комплекс исследований показал, что наилучшим сочетанием физико-механических свойств, таких как прочность и относительное удлинение, обладают образцы, сваренные на выбранном рациональном режиме. Относительное удлинение для них составило от 3,1 до 3,7 %, а величина прочности находится в диапазоне от 570,2 до 594,1 МПа.

При условии, что прочность монометалла матрицы основы композита аналогичной толщины составила порядка 482,1...489,8 МПа, общее увеличение прочности композита по сравнению с ним составило 21,3 % [18, 20].

С целью улучшения тактико-технических характеристик, разрабатываемых композиционных броневых материалов на основе легких металлов и сплавов, авторами было предложено формирование в структуре композита высокопрочных интерметаллических слоев за счет термической обработки.

Интерметаллические слои формируются за счет взаимной термодиффузии металлов, входящих в состав композита на межслойных границах. Максимальная толщина интерметаллических слоев регулируется параметрами термической обработки, а именно температурой и временем выдержки при отжиге. Проведенный комплекс исследований позволил установить зависимость роста толщины прослоек интерметаллида от времени выдержки, результаты представлены на рис. 5.

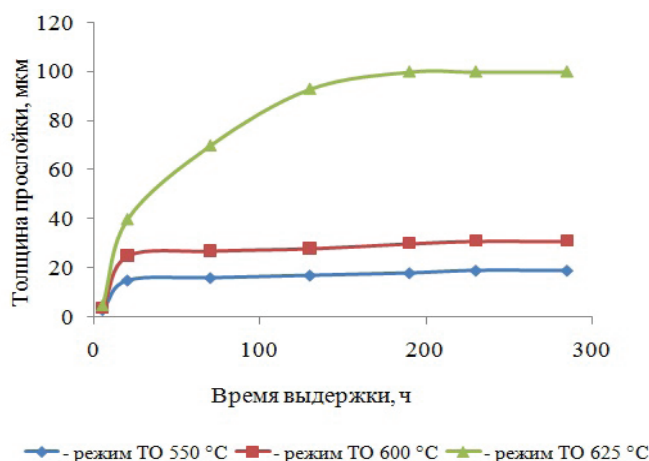


Рис. 5. Зависимость роста толщины прослойки интерметаллида от времени выдержки в печи

Fig. 5. Dependence of growth of intermetallide layer thickness on furnace holding time

Анализ полученных данных свидетельствует, что максимальная толщина прослойки интерметаллида составляет порядка 90...100 мкм, при этом время выдержки при температуре 625 °C составляет порядка 300 часов.

Последующая более длительная выдержка материала в печи не приводит к росту интерметаллической прослойки, что по всей видимости связано с полным прекращением диффузионных процессов.

Формирование интерметаллических прослоек вдоль сварного шва композиционного броне-материала после термической обработки показано на рис. 6.

Рентгенофазовый анализ прослоек интерметаллида на дифрактометре ДРОН-3М показал их состав, соответствующий интерметаллиду $TiAl_3$ [13]. Фазовый состав композита в зависимости от времени выдержки в печи представлен на рис. 7.

Высокопрочные интерметаллические слои ($TiAl_3$) в структуре композиционной брони 2 способствуют разрушению баллистического объекта 1 на более мелкие части, что существенно снижает его кинетическую энергию, а высоковязкие алюминиевые слои композита эффективно удерживают в себе образовавшиеся осколки 5 баллистического объекта. Схема работы композиционной брони при наличии в ней интерметаллических слоев продемонстрирована на рис. 8.

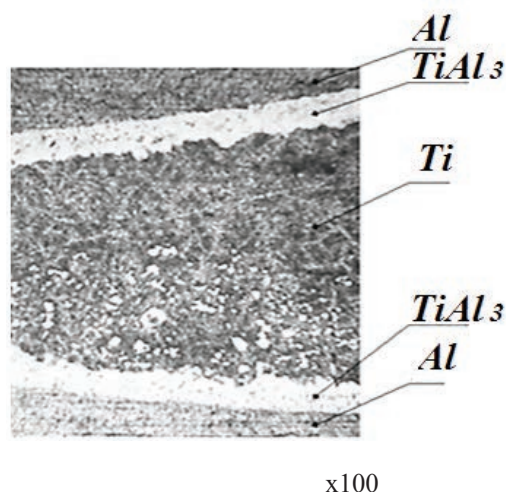


Рис. 6. Микроструктура армированного композиционного материала на основе легких металлов и сплавов после термической обработки

Fig. 6. Microstructure of reinforced composite material based on light metals and alloys after heat treatment

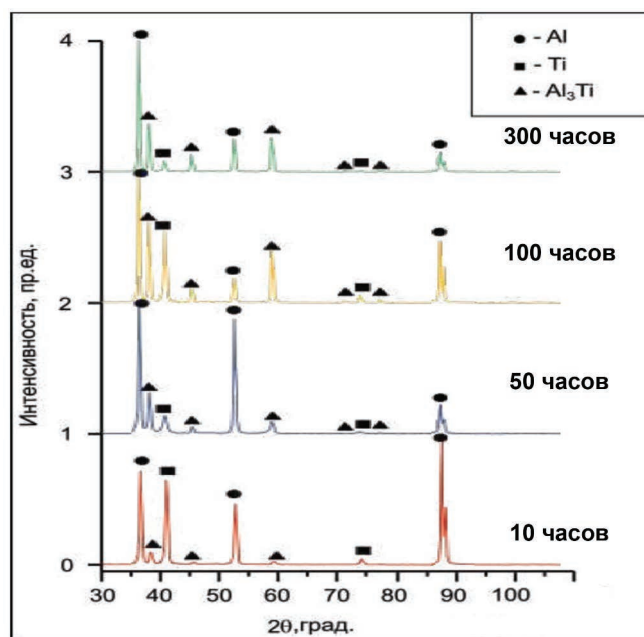


Рис. 7. Фазовый состав композита после отжига при температуре 625 °C с различным временем выдержки в печи

Fig. 7. The phase composition of the composite after annealing at a temperature of 625°C with different furnace holding time

Механизм локализации хрупких трещин в структуре композита с прослойками интерметаллида при баллистическом воздействии на него аналогичен описанному выше. При контакте с баллистическим объектом 1 возникающие в нем

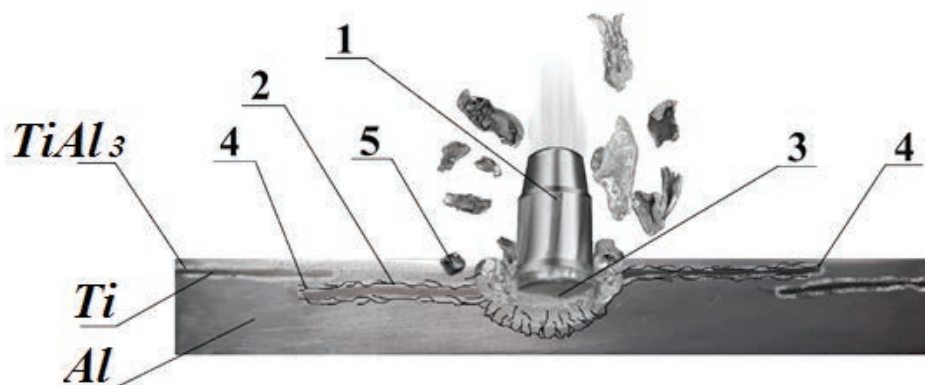


Рис. 8. Схема работы композиционной брони при наличии в ней интерметаллических слоев

Fig. 8. Diagram of composite armor operation in the presence of intermetallic layers in it

хрупкие трещины формируются и развиваются в основном в высокотвердых интерметаллических слоях 2, расположенных вдоль зоны соединения алюминия и титана. Распространяясь от точки контакта с баллистическим объектом 3 и достигнув точки перехода от края перфорации к зоне сварки вязкой металлической основы матрицы композита 4, трещины останавливаются на ней и их развитие прекращается (рис. 8).

Оценка прочности композита в состоянии после термической обработки показала ее увеличение в диапазоне от 610,7 до 633,8 МПа, однако при этом наблюдается незначительное снижение пластичности, характеризуемое относительным удлинением в диапазоне от 2,1 до 2,7 %.

Разработанные авторами работы прототипы новых композиционных броневых материалов на основе легких металлов и сплавов в ходе баллистических испытаний подтвердили высокий уровень заявленных авторами свойств и соответствие высокому классу защитной структуры СЗБ по ГОСТ Р 51112–97 и ГОСТ 34282–2017.

Выводы

1. Анализ научно-технической литературы показал, что традиционно используемые монометаллические брони имеют ряд ключевых недостатков, оказывающих влияние на тактико-технические характеристики изделий, а именно существенный вес и толщину. При этом отмечается, что композиционные неметаллические брони, в свою очередь, не способны выдержи-

вать множественные попадания в локальные области конструкции вследствие полного своего разрушения или расслоения.

2. Представлена новая схема армирования композита с применением технологии сварки взрывом, позволяющая локализовать развитие хрупких трещин по межслойным границам при внешнем баллистическом воздействии на объект.

3. Сваркой взрывом получен армированный композиционный материал на основе сплавов титана и алюминия. Определены рациональные режимы ударно-волнового нагружения, обеспечивающие получение композиционного материала требуемого качества, проведена оценка прочности композита. С целью улучшения тактико-технических характеристик композита было предложено формирование в его структуре высокотвердых интерметаллических слоев за счет термической обработки.

4. Определены рациональные режимы высокотемпературного отжига, обеспечивающие формирование интерметаллических слоев заданной толщины в структуре композита. Исследован фазовый состав прослоек интерметаллида. Описан механизм локализации хрупких трещин в структуре композита при баллистическом воздействии на него.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности предложенной схемы армирования композиционного материала с использованием сварки взрывом и изготовления на его основе новых типов бронематериалов для широкого комплекса изделий на их основе, сочетаю-

щих в себе высокие показатели пулестойкости и конструкционной прочности наряду с низким удельным весом.

Список литературы

1. Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications / ed. by A. Bhatnagar. – 2nd ed. – Amsterdam [et. al.]: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2016. – 482 p. – DOI: 10.1016/C2014-0-03657-X.

2. Patent № 0089597 US. Lightweight composite armor: publ. 26.04.2007 / Ma Z.D.

3. Patent № 6709736 US. Armored products made of fiber reinforced composite material with ceramic matrix: publ. 23.03.2004 / Gruber U., Heine M., Kienzle A., Nixdorf R.

4. Patent № 6314858 V1 US. Fiber reinforced ceramic matrix composite armor: publ. 13.11.2001 / Strasser T.E., Atmur S.D.

5. Advanced fibrous composite materials for ballistic protection / ed. by X. Chen. – 2nd ed. – Amsterdam [et. al.]: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2016. – 548 p. – DOI: 10.1016/C2014-0-01733-9.

6. Lightweight composite structures in transport: design, manufacturing, analysis and performance / ed. by J. Njuguna. – Woodhead Publishing, 2016. – 474 p. – DOI: 10.1016/C2014-0-02646-9.

7. Ceramic armor and armor systems / ed. by E. Medvedovski. – John Wiley and Sons, 2012. – 200 p. – ISBN 111840680X. – ISBN 9781118406809.

8. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. – М.: РадиоСофт, 2008. – 406 с.

9. Hazell P.J., Roberson C.J., Moutinho M. The design of mosaic armour: the influence of tile size on ballistic performance // Materials and Design. – 2008. – Vol. 29. – P. 1497–1503.

10. Патент № 2606134 Российская Федерация. Способ получения композиционного материала: № 2015134788: заявл. 18.08.2015: опубл. 10.01.2017,

Бюл. № 16 / Первухин Л.Б., Казанцев С.Н., Крюков Д.Б., Чугунов С.Н., Кривенков А.О., Розен А.Е.

11. Kinetics of diffusion processes occurring in a composite titanium–aluminum material / L.B. Pervukhin, D.B. Kryukov, A.O. Krivenkov, S.N. Chugunov // Metallurgist. – 2017. – Vol. 60. – P. 1004–1007. – DOI: 10.1007/s11015-017-0399-7.

12. Григолюк Э.И., Фильштинский Э.И. Перфорированные пластины и оболочки. – М.: Наука, 1970. – 556 с.

13. Structural transformations and properties of titanium–aluminum composite during heat treatment / L.B. Pervukhin, D.B. Kryukov, A.O. Krivenkov, S.N. Chugunov // Physics of Metals and Metallography. – 2017. – Vol. 118, N 8. – P. 759–763. – DOI: 10.1134/S0031918X17080105.

14. Rice R.W. Mechanical properties of ceramics and composites: grain and particle effects. – New York: Marcel Dekker, 2000. – 712 p.

15. Medvedovski E. Alumina ceramics for ballistic protection: Part 1 // American Ceramic Society Bulletin. – 2002. – Vol. 81, N 3. – P. 27–32.

16. Jiang D.T., Thomson K., Kuntz J.D. Effect of sintering temperature on a single-wall carbon nanotube-toughened alumina-based nanocomposite // Scripta Materialia. – 2007. – Vol. 56, N 11. – P. 959–962.

17. Development of new composite material reinforcement schemes based on intermetallic strengthening / L.B. Pervukhin, A.E. Rozen, D.B. Kryukov, A.O. Krivenkov, S.N. Chugunov // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60. – P. 953–958. – DOI: 10.1007/s11015-017-0399-7.

18. Конструкционные материалы: справочник / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

19. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.

20. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Structural features and technology of light armor composite materials with mechanism of brittle cracks localization

Dmitry Kryukov*

Penza State University, 40 Krasnaya st., Penza, 440028, Russian Federation

<https://orcid.org/0000-0003-0393-9550>, dabbkk@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 04 July 2022

Revised: 13 July 2022

Accepted: 21 July 2022

Available online: 15 September 2022

Keywords:

Composite metal material

Explosion welding

Reinforcement

Crack resistance

Bullet resistance

Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. Monometallic armor traditionally used in military and special equipment armaments has a number of key disadvantages that have a significant impact on the tactical and technical characteristics of the products, namely, significant weight and thickness. At the same time, composite non-metallic armors, which have been widely used recently as an alternative, in turn, are not able to withstand multiple hits in local areas of the structure due to its complete destruction or delamination. **The purpose of the work:** to develop the technology of obtaining a new class of multilayer metal armor materials based on light metals and alloys by explosive welding, combining high indicators of bullet resistance and structural strength along with low specific gravity. **The work presents** a new scheme for reinforcing the composite using explosive welding technology, which allows localizing the development of brittle cracks along interlayer boundaries with external ballistic impact on the object. **Results and discussion.** Reinforced composite material based on titanium and aluminum alloys is obtained by explosive welding. Rational modes of shock-wave loading, which ensure production of composite material of required quality are determined; evaluation of strength of composite is carried out. In order to improve the tactical and technical characteristics of the composite, it was proposed to form high-solid intermetallic layers in its structure due to heat treatment. Rational modes of high-temperature annealing are defined, which ensure formation of intermetallic layers of preset thickness in composite structure. The phase composition of intermetallic pro-layers is studied. Structural features of the composite material are investigated. Mechanism of brittle cracks localization in composite structure at ballistic impact on it is described.

For citation: Kryukov D.B. Structural features and technology of light armor composite materials with mechanism of brittle cracks localization. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 103–111. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.3-103-111. (In Russian).

References

1. Bhatnagar A., ed. *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*. 2nd ed. Amsterdam, Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2016. 482 p. DOI: 10.1016/C2014-0-03657-X.
2. Ma Z.D. *Lightweight composite armor*. Patent US, no. 0089597, 2007.
3. Gruber U., Heine M., Kienzle A., Nixdorf R. *Armored products made of fiber reinforced composite material with ceramic matrix*. Patent US, no. 6709736, 2004.
4. Strasser T.E., Atmur S.D. *Fiber reinforced ceramic matrix composite armor*. Patent US, no. 6314858 V1, 2001.
5. Chen X., ed. *Advanced fibrous composite materials for ballistic protection*. 2nd ed. Amsterdam, Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2016. 548 p. DOI: 10.1016/C2014-0-01733-9.
6. *Lightweight Composite Structures in Transport. Design, Manufacturing, Analysis and Performance* / James Njuguna // Woodhead Publishing. – 2016. – P. 474. – DOI: 10.1016/C2014-0-02646-9

* Corresponding author

Kryukov Dmitry B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
Penza State University
40 Krasnaya st.,
440028 Penza, Russian Federation
Tel.: 8 (8412) 666 262, e-mail: dabbkk@yandex.ru

7. Medvedovski E., ed. *Ceramic armor and armor systems*. John Wiley and Sons, 2012. 200 p. ISBN 111840680X. ISBN 9781118406809.
8. Grigoryan V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M., Chistyakov E.N. *Materialy i zashchitnye struktury dlya lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya* [Materials and protective structures for local and individual reservation]. Moscow, RadioSoft Publ., 2008. 406 p.
9. Hazell P.J., Roberson C.J., Moutinho M. The design of mosaic armour: the influence of tile size on ballistic performance. *Materials and Design*, 2008, vol. 29, pp. 1497–1503.
10. Pervukhin L.B., Kazantsev S.N., Kryukov D.B., Chugunov S.N., Krivenkov A.O., Rozen A.E. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo materiala* [Method of producing composite material]. Patent RF, no. 2606134, 2017.
11. Pervukhin L.B., Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Chugunov S.N. Kinetics of diffusion processes occurring in a composite titanium–aluminum material. *Metallurgist*, 2017, vol. 60, pp. 1004–1007. DOI: 10.1007/s11015-017-0399-7.
12. Grigolyuk E.I., Fil'shtinskii E.I. *Perforirovannye plastiny i obolochki* [Perforated plates and shells]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 556 p.
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, no. 8, pp. 759–763. DOI: 10.1134/S0031918X17080105.
14. Rice R.W. *Mechanical properties of ceramics and composites: grain and particle effects*. New York, Marcel Dekker, 2000. 712 p.
15. Medvedovski E. Alumina ceramics for ballistic protection: Part 1. *American Ceramic Society Bulletin*, 2002, vol. 81, no. 3, pp. 27–32.
16. Jiang D.T., Thomson K., Kuntz J.D. Effect of sintering temperature on a single-wall carbon nanotube-toughened alumina-based nanocomposite. *Scripta Materialia*, 2007, vol. 56, no. 11, pp. 959–962.
17. Pervukhin L.B., Rozen A.E., Kryukov D.B., Krivenkov A.O., Chugunov S.N. Development of new composite material reinforcement schemes based on intermetallic strengthening. *Metallurgist*, 2016, vol. 60, pp. 953–958. DOI: 10.1007/s11015-017-0399-7.
18. Arzamasov B.N., ed. *Konstruktsionnye materialy* [Structural materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 688 p.
19. Konon Yu.A., Pervukhin L.B., Chudnovskii A.D. *Svarka vzryvom* [Explosion welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 216 p.
20. Livshits B.G., Kraposhin V.S., Lipetskii Ya.L. *Fizicheskie svoistva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 320 p.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2022 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).