

УДК 669

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-29-35

Д.Б. Крюков, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов

## СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрены новые схемные решения по созданию гетерогенных броневых материалов сваркой взрывом. Предложена новая схема армирования. В качестве исходных материалов для создания композита использованы сплавы на основе алюминия и титана. Исследована микроструктура зоны сварного шва гетерогенного бронематериала после

термической обработки. Методом микрорентгено-спектрального анализа изучен элементный состав структурных составляющих композиционного гетерогенного материала.

**Ключевые слова:** композиционный гетерогенный материал, броня, армирование, интерметаллид, сварка.

D. B. Kryukov, A. O. Krivenkov, S. N. Chugunov

## CIRCUITRY , STRUCTURE AND PROPERTIES OF HETEROGENEOUS MATERIALS

Currently, heterogeneous materials based on titanium and aluminum alloys are widely used as promising armor materials. When a ballistic object is exposed to the armor material, brittle cracks that occur at the contact point spread in such a way that composite material is in state of decay both deep into and along the interlayer boundaries of the joint, while there is a violation of the composite structure and loss of the mechanical strength of the armor element. In this regard, the task of developing new reinforcement schemes for composite armor is urgent. One of the most promising technologies in the field of creating and developing new composite non-metallic armor materials is explosion bonding. The authors of the work proposed a new scheme for reinforcing a heterogeneous metal material by means of explosion bonding, which uses internal perforated reinforcing layers that serve as elements preventing the development of brittle fracture at the point of ballistic contact. To increase the efficiency of the destruction of a ballistic

object in the composite structure, the authors proposed the formation of highly solid intermetallic compounds at the boundary between the metal of the base of a viscous metal matrix and the reinforcing element by subsequent heat treatment of the material. The conducted micro-X-ray spectral analysis of intermetallic compounds showed their correspondence to the chemical compound  $\alpha$ -titanium ( $TiAl_3$ ). Comparison of the obtained level of physical and mechanical properties of the developed heterogeneous armored material with analogues suggests that the expected level of the composite protection class against small arms is in the range from Br4 to Br5 according to GOST R 50963-96 with an armor thickness of 40 to 60 mm, which makes it possible to reduce the weight of armored vehicles significantly and, as a result, increase its tactical and technical characteristics.

**Key words:** composite heterogeneous material, armor, reinforcement, intermetallic compound, welding.

### Введение

В качестве перспективных бронематериалов широко используются гетерогенные материалы на основе сплавов титана и алюминия [1, 2]. На их основе изготавливают элементы бронирования кабин вертолётов, лёгких катеров, машин пехоты, боевых роботов и т.д. Сочетание слоёв алюминия и титана в гетерогенной броне формирует механизм последовательного торможения и разрушения сердечника баллистического объекта, а также способствует удержа-

нию осколков, образовавшихся при его разрушении в слое композита.

Однако существует ряд недостатков, которые качественным образом влияют на тактико-технические характеристики бронированной техники при использовании вышеуказанных композиционных гетерогенных броней. При воздействии баллистического объекта на броневой материал возникающие в точке контакта хрупкие трещины распространяются таким образом, что разрушение

композиционного материала происходит как вглубь, так и по межслойным границам соединения, при этом происходит расслоение композита и потеря механи-

### Методика и материалы

Одной из наиболее перспективных технологий в области создания и разработки новых композиционных металлических броневых материалов является сварка материалов взрывом. Использование данной технологии позволяет получать не свариваемые традиционными способами композиции из металлов с различной температурой плавления плотностью и физико-механическими свойствами.

Авторами работы была предложена новая схема армирования гетерогенного металлического материала (рис. 1) сваркой взрывом, в который используются внутренние перфорированные армирующие слои, выполняющие роль элементов, препятствующих развитию хрупкого разрушения в точке баллистического контакта [3, 4].

Сваркой взрывом был получен броневой гетерогенный материал, где металлической матрицей является алюминиевый сплав АМг5М (слой Б – рис. 2 б, в, г), а роль армирующих элементов выполняют листы перфорированного титана ВТ1-0 (слой А – рис. 2 б, в, г). Два армирующих слоя в броневом материале расположены таким образом, чтобы перфорации не накладывались, а перекрывали друг друга (рис. 2 а). Это необходимо для того чтобы исключить возможность сквозного прохождения баллистического объекта через слой металлической матрицы. Для повышения эффективности разрушения баллистического объекта в структуре композита авторами было предложено формирование высоко твёрдых интерметаллических слоев на границе между металлом основы вязкой металлической матрицы и армирующего

ческой прочности бронезлемента. В этой связи актуальной является задача разработки новых схем армирования композиционных броней.

элемента путём последующей термической обработки материала (рис. 2 б, в, г) [5, 6].

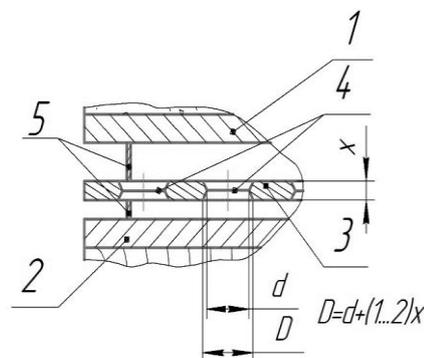


Рис. 1. Схема установки армирующих элементов перед сваркой: 1, 2 – пластины из сплава алюминия; 3 – армирующая пластина из титана; 4 – перфорация; 5 – элемент для обеспечения зазора между свариваемыми элементами

Термическую обработку композита проводили в диапазоне температур от 550 до 650 °С с временем выдержки под нагревом от 3 до 36 часов. На полученных образцах микроструктурным анализом исследовали толщину формируемых интерметаллических прослоек в зоне сварного шва. Полученные результаты (рис. 3) показали, что интенсивность роста интерметаллических прослоек снижается через 21 час выдержки в печи во всем интервале температур. Максимальная скорость роста прослоек интерметаллида выявлена при температуре 630 °С. Толщина прослоек интерметаллида после выдержки в печи в течение 36 часов составила 35-45 мкм при температуре нагрева 550 °С, 75-80 мкм при температуре нагрева 600 °С, 95-105 мкм при температуре нагрева 630 °С.

Общий вид многослойного биметалла с условно снятым лицевым слоем

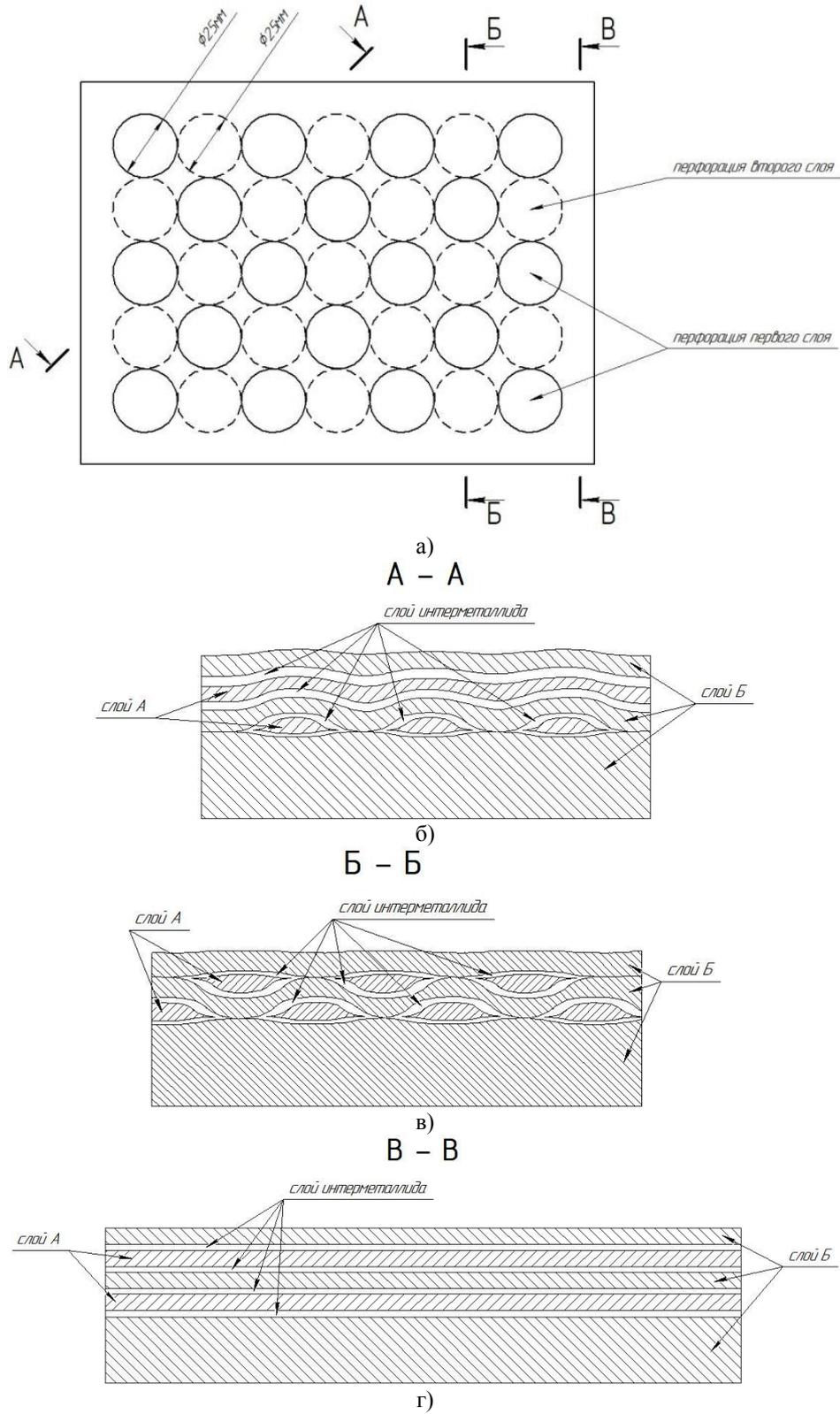


Рис. 2. Схема гетерогенного бронематериала после ТО

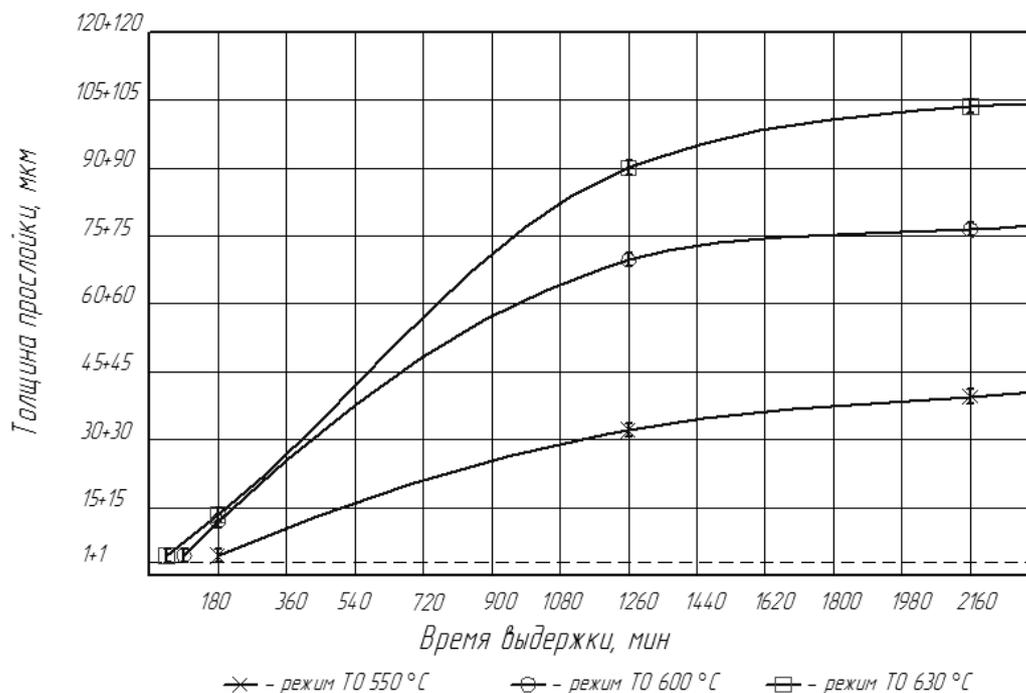


Рис. 3. Влияние времени выдержки в печи на толщину интерметаллического слоя

Полученный таким образом броневой гетерогенный материал включает в себя минимум три листа матрицы основы, два армирующих перфорированных листа и

четыре слоя интерметаллического соединения на границе между металлом матрицы и армирующим элементом (рис. 2 г).

### Обсуждение полученных результатов

При исследовании микроструктуры зоны сварного шва гетерогенного броневого материала, полученного сваркой взры-

вом по предложенной схеме армирования, зон расплава металла, микротрещин, несплошностей не обнаружено (рис. 4).

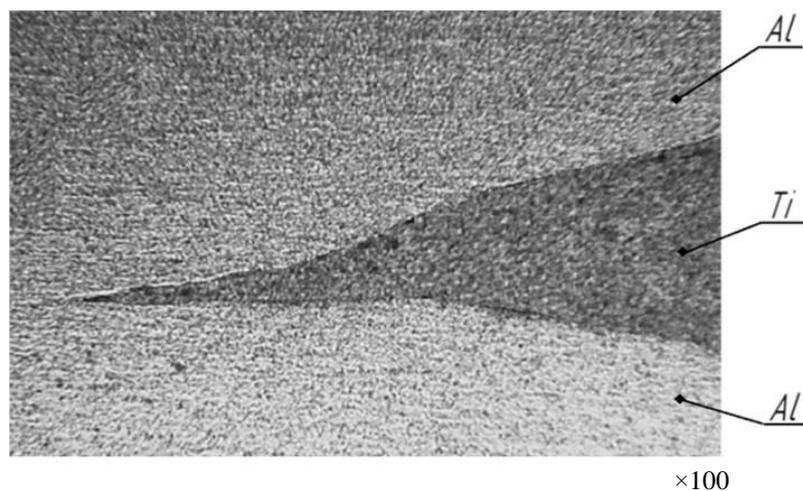


Рис. 4. Микроструктура гетерогенного бронематериала после сварки взрывом

На рис. 5 показана микроструктура зоны сварного шва гетерогенного бронематериала после термической обработки с сформированными прослойками интерме-

таллида в зоне сварного шва и точки микрорентгеноспектрального анализа, результаты которого приведены в таблице.

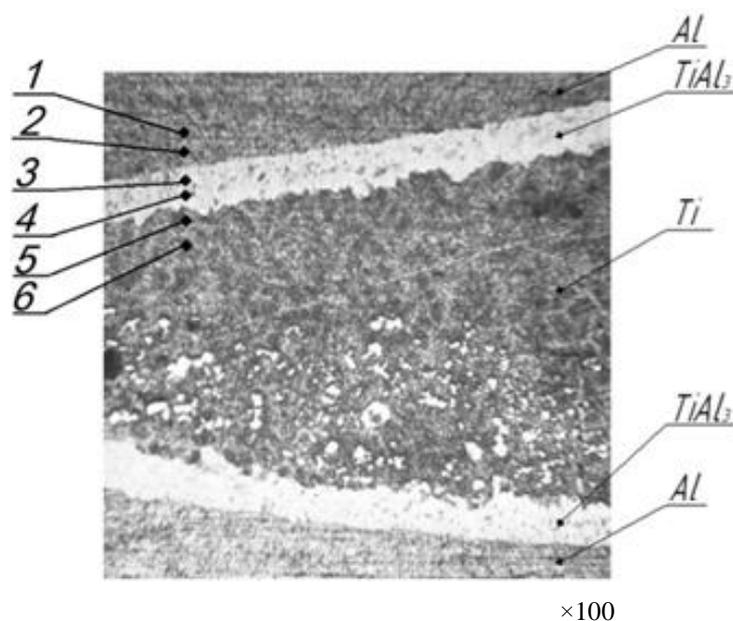


Рис. 5. Микроструктура гетерогенного бронематериала после ТО:  
1 - 6 точки анализа элементного состава зоны соединения

Проведенный микрорентгеноспектральный анализ в точках 3 и 4 свидетельствует, что исследуемая интерметалличе-

ская прослойка соответствует химическому соединению  $\alpha$ -титана ( $TiAl_3$ ).

Таблица 1

Элементный состав композиционного материала в точках анализа

Точки анализа	Содержание элементов, ат. %				
	Mg	Al	Si	Ti	Mn
1	4.1	91.6	-	0.2	0.5
2	5.0	92.3	-	-	0.5
3	0.9	72.5	0.8	24.4	0.4
4	1.8	79.8	-	24.2	0.4
5	-	0.7	-	99.3	-
6	-	0.9	-	99.1	-

Сравнение полученного уровня физико-механических свойств разработанного гетерогенного бронематериала с аналогами позволяет говорить о том, что ожидаемый уровень класса защиты от стрелкового оружия композита находится в диапазоне от Бр4 до Бр5 по ГОСТ Р 50963-96 при толщине брони 40 до 60 мм. При этом аналогичный уровень бронестойкости у аналогов достигается при толщине композиционной брони от 80 до 120 мм., что дает возможность существенно снизить вес бронированной техники и, как следствие,

повысить её тактико-технические характеристики.

Схемные решения армирования композиционных материалов, предложенные авторами защищены патентами РФ на изобретение и промышленный образец [7-9].

Полученные авторами работы результаты, позволяют говорить о высокой эффективности применения гетерогенных металлических броней на основе сплавов титана и алюминия для новых образцов вооружений, военной и специальной техники.

**Выводы**

1. Предложена новая схема армирования гетерогенного металлического материала сваркой взрывом с использованием внутренних перфорированных армирующих слоев, препятствующих развитию хрупкого разрушения в точке баллистического контакта.

2. Исследована кинетика роста интерметаллических прослоек в зоне свар-

ного шва при ТО в диапазоне температур от 550 до 650 °С с временем выдержки под нагревом от 3 до 36 часов.

3. Проведенный микрорентгено-спектральный анализ показал, что исследуемая интерметаллическая прослойка соответствует химическому соединению  $\alpha$ -титана ( $TiAl_3$ ).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Григорян, В. А.** Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков. - М.: Радио Софт. - 2008. - 406 с.
2. **Гладышев, С. А.** Броневые стали / С. А. Гладышев, В. А. Григорян. - М.: Интернет Инжиниринг. - 2010. - 334 с.
3. **Первухин, Л. Б.** Структурные превращения и свойства композиционного материала титан-алюминий при термической обработке / Л. Б. Первухин, Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов // Физика металлов и металловедение, 2017. – т. 118. - № 8. – С. 801-805.
4. **Розен, А. Е.** Способы получения композиционных материалов методами высокоэнергетического воздействия / А. Е. Розен, А. О. Кривенков, Д. Б. Крюков [и др.]. – Изд-во ПГУ. - Пенза. – 2016. - 138 с.
5. **Первухин, Л. Б.** Кинетика диффузионных процессов протекающих в композиционном материале титан-алюминий / Л. Б. Первухин, Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов. - Metallurg. - №9. - 2016. - С. 101-103.
6. **Первухин, Л. Б.** Разработка новых схем армирования композиционных материалов на основе интерметаллического упрочнения / Л. Б. Первухин, Д. Б. Крюков, А. О. Кривенков, С. Н. Чугунов. - Metallurg. - №7. - 2016. - С. 85-87.
7. **Патент № 2522505 Российская Федерация.** Способ получения композиционного материала: Бюл. № 20: 2014 / Розен А. Е., Крюков Д. Б., Кирилин Е. М., Гуськов М. С., Хорин А. В., Усатый С. Г., Любомирова Н. А.
8. **Патент № 2606134 Российская Федерация.** Способ получения композиционного материала: Бюл. № 16: 2017 / Первухин Л. Б., Казанцев С. Н., Крюков Д. Б., Чугунов С. Н., Кривенков А. О., Розен А. Е.
9. **Патент №122742 Российская Федерация.** Слоистый композиционный материал: промышленный образец: Бюл. №12: дата регистрации: 24.11.2020 / Гуськов М. С., Крюков Д. Б., Казанцев С. Н., Хорин А. В., Батрашов В. М.
1. **Grigoryan, V. A.** Materials and protective structures for local and individual booking / V. A. Grigoryan, I. F. Kobylkin, V. M. Marinin, E. N. Chistyakov. - - Moscow: Radio Soft. - 2008. - 406 p
2. **Gladyshev, S. A.** Armor steels / S. A. Gladyshev, V. A. Grigoryan. - M.: Internet Engineering. - 2010. - 334 p.
3. **Pervukhin, L. B.** Structural transformations and properties of a composite material titanium-aluminum under heat treatment / L. B. Pervukhin, D. B. Kryukov, A. O. Krivenkov, S. N. Chugunov // Physics of Metals and metallovedenie, 2017. - vol. 118. - No. 8. - pp. 801-805.
4. **Rosen, A. E.** Techniques for producing composite materials by high-powered impact methods / A. E. Rosen, A. O. Krivenkov, D. B. Kryukov [et al.]. – Publ. house of PSU. - Penza. - 2016. - 138 p.
5. **Pervukhin, L. B.** Kinetics of diffusion processes occurring in a composite material titanium-aluminum / L. B. Pervukhin, D. B. Kryukov, A. O. Krivenkov, S. N. Chugunov. - Metallurgist. - No. 9. - 2016. - pp. 101-103.
6. **Pervukhin, L. B.** Development of new reinforcement schemes for composite materials based on intermetallic hardening / L. B. Pervukhin, D. B. Kryukov, A. O. Krivenkov, S. N. Chugunov. - Metallurgist. - No. 7. - 2016. - pp. 85-87.
7. **Patent No. 2522505 Russian Federation.** Technique for producing a composite material, Bul. No. 20: 2014 / Rosen A. E., Kryukov D. B., Kirin E. M., Guskov M. S., Khorin A.V., Usatii S. G., Lyubomirova N. A.
8. **Patent No. 2606134 Russian Federation.** Technique for producing a composite material, Bul. No.16: 2017 / Pervukhin L. B., Kazantsev S.

N., Kryukov D. B., Chugunov S. N., Krivenkov A. O., Rosen A. E.

9. **Patent No. 122742 Russian Federation.** Layered composite material: industrial design: Bul.

No. 12: registration date: 24.11.2020 / Guskov M. S., Kryukov D. B., Kazantsev S. N., Khorin A.V., Batrashov V. M

Ссылка для цитирования:

Крюков, Д.Б. Схемные решения, структура и свойства гетерогенных материалов / Д.Б. Крюков, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 9. – С. 29 - 35. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-9-29-35.

Статья поступила в редакцию 13.05.21.

Рецензент: д.т.н., профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета

Соловьев Д.Л.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 26.08.21.

#### Сведения об авторах:

**Крюков Дмитрий Борисович**, к.т.н., доцент кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного технического университета, e-mail: ddbbkk@yandex.ru.

**Кривенков Алексей Олегович**, к.т.н., доцент кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного тех-

нического университета, e-mail: krivenkov80@yandex.ru.

**Чугунов Сергей Николаевич**, к.т.н., доцент кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного технического университета. e-mail: chugunow80@mail.ru.

**Kryukov Dmitry Borisovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding, Foundry Production and Material Sciences, Penza State Technical University, e-mail: ddbbkk@yandex.ru.

**Krivenkov Alexey Olegovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding, Foundry Production and Material Sciences,

Penza State Technical University, e-mail: krivenkov80@yandex.ru.

**Chugunov Sergey Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding, Foundry Production and Material Sciences, Penza State Technical University, e-mail: chugunow80@mail.ru.