

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

УДК 620.179.16

doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-8

Совершенствование метода акустического контроля новых многослойных композиционных материалов, полученных сваркой взрывом

К. Д. Куликов¹, А. В. Хорин², А. Е. Розен³

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

¹poxitive993@gmail.com, ²alexkho154@ya.ru, ³aerozen@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Большие перспективы по применению в различных отраслях промышленности, таких как атомная, химическая и нефтегазовая, получили многослойные металлические материалы. Пропорционально с увеличением объема производства данных материалов происходит повышение требований к качеству продукции, достигающейся снижением дефектов. В связи с этим особое внимание уделяется неразрушающим методам контроля, в частности, ультразвуковому контролю. Цель – разработать методику проведения ультразвукового контроля и составить карты технологического процесса для нового металлического многослойного материала. *Материалы и методы.* Метод исследования – ультразвуковой неразрушающий контроль. Объект исследования – новый многослойный материал с протекторной питтинг-защитой, позволяющий переводить питтинг в общую коррозию. *Результаты.* В ходе выполнения научной работы для нового многослойного материала с протекторной питтинг-защитой были рассчитаны скорости метаемых пластин и углы их соударения. Для конкретизации технологических процессов ультразвукового контроля разработана методика. Для детализации процесса неразрушающего контроля материала с одним и двумя внутренними протекторами разработана технологическая карта. Для настройки чувствительности ультразвукового контроля изготовлен прототип стандартного образца предприятия. В результате проведения контроля недопустимых дефектов не обнаружено. *Выводы.* Разработанная методика ультразвукового контроля для нового материала с протекторной питтинг-защитой позволяет наиболее качественно проводить поиск несплошностей на каждой из межслойных границ с последующей корректировкой кинематических параметров сварки взрывом.

Ключевые слова: многослойный композиционный материал, сварка взрывом, ультразвуковой контроль, сплошность, дефект

Финансирование: работа выполнена в рамках конкурса «Ректорские гранты» Пензенского государственного университета, договор №ХП-269/22 от 01.04.2022.

Для цитирования: Куликов К. Д., Хорин А. В., Розен А. Е. Совершенствование метода акустического контроля новых многослойных композиционных материалов, полученных сваркой взрывом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 107–117. doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-8

Improving the method of acoustic testing of new multilayer composite materials produced by explosion welding

K.D. Kulikov¹, A.V. Khorin², A.E. Rozen³

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

¹poxitive993@gmail.com, ²alexkho154@ya.ru, ³aerozen@bk.ru

Abstract. *Background.* Multilayer metal materials have great prospects for application in various industries, such as nuclear, chemical and oil and gas. Proportionally, with the increase in the volume of production of these materials, there is an increase in the requirements for the quality of products, which is achieved by reducing defects. In this regard, special attention is paid to non-destructive testing methods, in particular, ultrasonic testing. The goal is to develop a technique for conducting ultrasonic testing and to make process maps for a new metal multilayer material. *Materials and methods.* The research method is ultrasonic non-destructive testing. The object of the research is a new multilayer material with tread pitting protection, which allows to translate pitting into general corrosion. *Results.* In the course of scientific work for a new multilayer material with tread pitting protection, the velocities of the plates being thrown and the angles of their collision were calculated. A technique has been developed to specify the technological processes of ultrasonic control. To detail the process of non-destructive testing of a material with one and two internal protectors, a technological map has been developed. To adjust the sensitivity of ultrasonic control, a prototype of the standard sample of the enterprise was made. As a result of the control, no unacceptable defects were found. *Conclusions.* The developed method of ultrasonic testing for a new material with tread pitting protection allows the most qualitative search for discontinuities on each of the interlayer boundaries with subsequent correction of kinematic parameters of explosion welding.

Keywords: multilayer composite material, explosion welding, ultrasonic inspection, continuity, defect

Financing: The work was performed within a framework of the competition “Rector’s Grants” of the Penza State University No. XII-269/22 from April 1, 2022.

For citation: Kulikov K.D., Khorin A.V., Rozen A.E. Improving the method of acoustic testing of new multilayer composite materials produced by explosion welding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2023;(2):107–117. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-2-8

Введение

Оборудование химической, нефтеперерабатывающей и атомной отрасли машиностроения подвержено действию агрессивных рабочих сред, высоких перепадов температур и воздействию внешних климатических факторов. Проведение внеплановых ремонтных, монтажных и пуско-наладочных работ, нарушение технологического цикла производства ведет к увеличению прямых и косвенных потерь, возникающих при несвоевременном предупреждении коррозионного разрушения изделий.

По оценкам специалистов промышленно развитых стран ежегодные потери от коррозии составляют до 4,0 % валового национального продукта (ВНП) и достигают 2,2 трлн. долл.

К наиболее подверженным различным видам коррозии относятся такие отрасли промышленности, как атомная, химическая, нефтегазовая и целлюлозно-бумажная [1, 2]. Проблема коррозионного разрушения металлокон-

струкций является наиболее важной при конструировании изделий. Применяемые на сегодня промышленностью коррозионно-стойкие материалы и биметаллические композиты на их основе не способны обеспечить повышение ресурса работы изготавливаемых из них изделий, работающих при воздействии повышенных температур и агрессивных сред.

В связи с этим применение многослойных материалов с одним и двумя внутренними протекторами (ВП), имеющих 3 и более слоя, отличающихся повышенным ресурсом работы, позволит решить ряд существующих в настоящее время проблем. Наиболее эффективный способ получения указанных материалов является сварка взрывом [2, 3].

Основной целью работы является разработка методики проведения ультразвукового контроля и составление карт технологического процесса для многослойных композиционных материалов с одним и двумя внутренними протекторами.

Материалы и методы

Питтинговая коррозия является наиболее опасным видом коррозионного разрушения, которая характерна для аустенитной стали и хромоникелевых сплавов. Основная опасность коррозионного поражения вследствие питтинга – многочисленная сквозная перфорация материала [2].

Создан новый материал с протекторной питтинг-защитой, позволяющий переводить питтинг в общую коррозию. Количество слоев в многослойном материале может варьировать от трех до шести слоев [3]. Средние слои, состоящие из углеродистой стали с низким электрохимическим потенциалом, являются протектором, т.е. жертвенным слоем по отношению к внешнему (защищаемому) слою, и постепенно растворяются. В результате растворения протектора образуется линза. Третий слой находится в пассивном состоянии и защищает от коррозии последующие слои. Такой инновационный технологический прием позволяет снизить скорость коррозионного разрушения [4].

Ударно-волновая обработка – наиболее эффективный метод получения многослойных металлических композиционных материалов с одним и двумя ВП. На рис. 1–3 представлена схема сварки взрывом трех-, четырех- и шести-слойного композиционного материала с одним и двумя ВП.

Соударяемые пластины располагаются с определенным технологическим зазором на опорах. Толщина метаемых пластин 2,0 мм. Толщина стального основания составляет 20 мм.

Для указанных схем сварки взрывом произведен расчет технологических и кинематических параметров сварки взрывом для получения многослойного крупногабаритного композиционного материала с одним и двумя внутренними протекторами. В качестве исходных материалов для нечетных слоев использовали сталь 12Х18Н10Т толщиной 2 мм, в качестве материала протекторного слоя сталь СтЗпс толщиной 2 мм, в качестве основного конструкционного слоя сталь 09Г2С толщиной 10 мм.

Данные о плотности, модуле упругости и скорости звука исходных материалов представлены в табл. 1.

Приведен пример расчета шестислойного композиционного материала с двумя внутренними протекторами. Определение параметров соударения пластин начинается с определения безразмерного параметра по формуле [1]:

$$r = \frac{H \cdot \rho_{\text{ВВ}}}{\delta_1 \cdot \rho_1}, \quad (1)$$

где r – безразмерный параметр; H – высота слоя взрывчатого вещества, мм; $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность взрывчатого вещества, кг/м³; δ_1 – толщина метаемой пластины, мм; ρ_1 – плотность материала метаемой пластины, кг/м³.

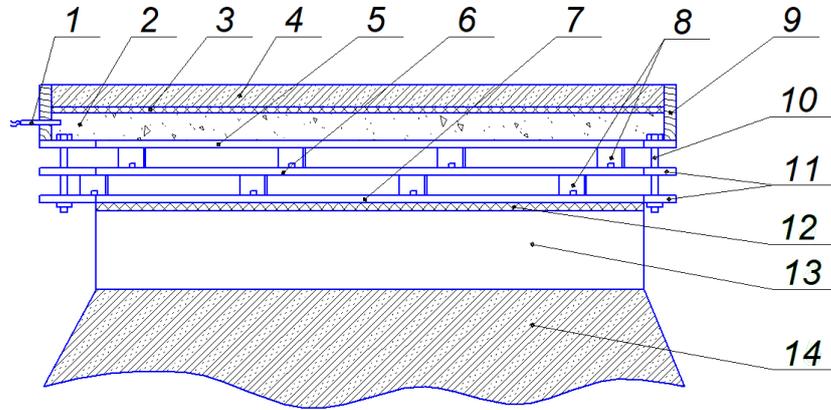


Рис. 1. Схема сварки взрывом трехслойного материала:

- 1 – электродетонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – слой рубероида;
 4 – слой песка; 5 – лист 1; 6 – лист 2; 7 – лист 3; 8 – V-образные опоры; 9 – опалубка;
 10 – болт с гайкой; 11 – технологические пластины, 12 – полиэтиленовая пленка;
 13 – пластина подложки; 14 – опора из песка или отсева щебня

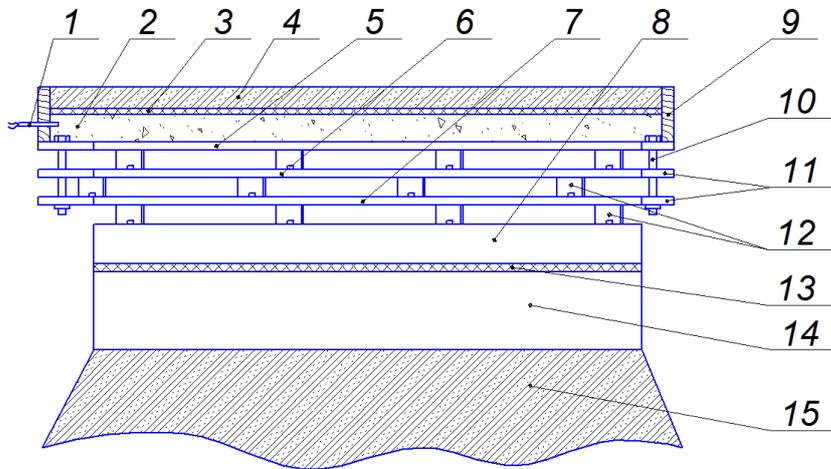


Рис. 2. Схема сварки взрывом четырехслойного материала:

- 1 – электродетонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – слой рубероида;
 4 – слой песка; 5 – лист 1; 6 – лист 2; 7 – лист 3; 8 – лист 4;
 9 – опалубка; 10 – болт с гайкой; 11 – технологические пластины;
 12 – V-образные опоры; 13 – полиэтиленовая пленка; 14 – пластина подложки;
 15 – опора из песка или отсева щебня

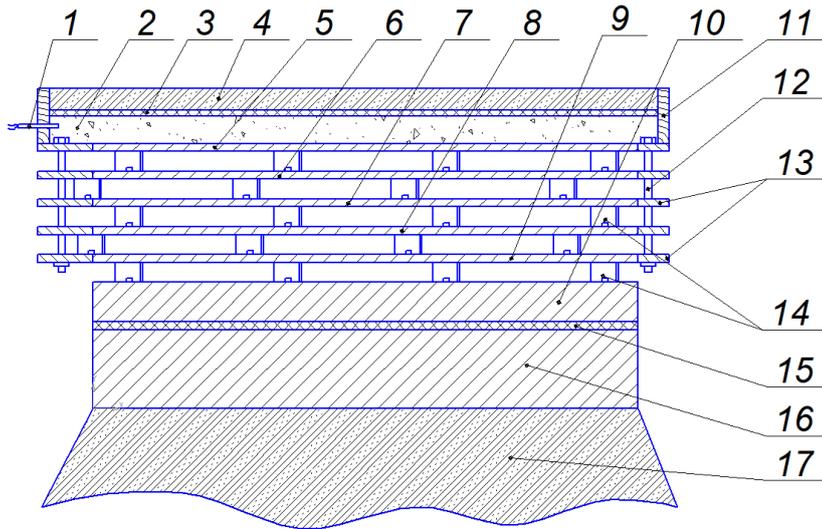


Рис. 3. Схема сварки взрывом шестислойного композита системы 12Х18Н10Т – 09Г2С: 1 – электродетонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – слой рубероида; 4 – слой песка; 5 – лист 1; 6 – лист 2; 7 – лист 3; 8 – лист 4; 9 – лист 5; 10 – лист 6; 11 – опалубка; 12 – болт с гайкой; 13 – технологические пластины; 14 – V-образные опоры; 15 – полиэтиленовая пленка; 16 – пластина подложки; 17 – опора из песка или отсева щебня

Таблица 1

Свойства свариваемых материалов

Материал	Сталь 09Г2С	Сталь 12Х18Н10Т
Плотность ρ , кг/м ³	7860	7920
Модуль E , МПа·10 ⁻⁵	1,99	1,98
Скорость звука c , м/с	5850	5740

В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использована смесь амиачной селитры и дизельного топлива в соотношении 96:4. Скорость детонации при толщине ВВ 35 мм составляет 2280 м/с, плотность заряда 950 кг/м³.

Скорость движения точки контакта ϑ_k (первый кинематический параметр) характеризует скорость распространения зоны высокого давления по свариваемым поверхностям. При начальном параллельном расположении пластин скорость движения точки контакта равна скорости детонации ($\vartheta_k = D$).

Для обеспечения соединения при сварке взрывом необходимо соблюдение условия $\vartheta_k < c_0$ (c_0 – скорость звука в соединяемых металлах).

Скорость метаемой пластины оценивают по формуле [2]:

$$\vartheta_0 = 1,2D \frac{\sqrt{1 + \frac{32}{27}r - 1}}{\sqrt{1 + \frac{32}{27}r + 1}}, \quad (2)$$

где ϑ_0 – скорость метаемой трубы, м/с; D – скорость детонации, м/с.

Для определения параметров соударения последующих метаемых пластин использовали энергетический подход, основанный на допущении о том, что при соударении пластин кинетическая энергия системы остается постоянной и не расходуется на тепловыделение, деформацию, фазовые переходы и процессы. Скорость n -й метаемой пластины определяется по формуле [3]:

$$\vartheta_n = \vartheta_{n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} \delta_i \rho_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i \rho_i}}, \quad (3)$$

где ϑ_n – скорость n -й метаемой пластины, м/с; ϑ_{n-1} – скорость $(n-1)$ -й метаемой пластины, м/с; δ_i – толщина i -й метаемой пластины, мм; ρ_i – плотность материала i -й метаемой пластины, кг/м³.

Угол соударения γ является вторым кинематическим параметром. При параллельном расположении пластин угол соударения γ определяем по формуле [4]:

$$\gamma = 2 \arcsin \left[\frac{\vartheta_0}{2D} \right], \quad (4)$$

где γ – угол соударения, град.

Для определения зазора между свариваемыми листами использовали систему уравнений [5–7]:

$$\eta = \frac{16}{27} \cdot \frac{H \rho_{ВВ}}{\delta_1 \rho_1}; \quad (5)$$

$$\theta_V = \frac{1 + \eta \left(1 - \frac{\vartheta_0}{D} \right) + \sqrt{\eta^2 \left(1 - \frac{\vartheta_0}{D} \right)^2 - 2\eta \frac{\vartheta_0}{D}}}{1 + 2\eta}; \quad (6)$$

$$h = H \frac{(1 - \theta_V)^2}{(1 + 2\eta)\theta_V^2 - 1}, \quad (7)$$

где η – безразмерная приведенная масса; θ_V – безразмерное приведенное время; H – высота заряда ВВ, м; h – зазор между листами, м.

Относительная простота расчета и технологичность схемы с параллельным расположением свариваемых пластин обосновывает ее выбор для обеспечения расчета технологических и кинематических параметров сварки взрывом для получения четырехслойного и шестислойного композита [7, 8].

В условиях открытого полигона с помощью сварки взрывом по рассчитанным значениям технологических параметров получена партия листовых многослойных металлических материалов с одним и двумя внутренними протекторами системы 12Х18Н10Т – 09Г2С длиной 2500 мм и шириной 1500 мм.

На рис. 4 представлен внешний вид сваренных многослойных компози- тов с одним и двумя внутренними протекторами.



Рис. 4. Внешний вид многослойного металлического материала после сварки взрывом: *а* – 4-слойного с одним внутренним протектором; *б* – 6-слойного с двумя внутренними протекторами

Неразрушающий контроль любого технологического процесса является неотъемлемой частью общего технологического процесса изготовления объектов ответственного назначения [9]. На сегодня наиболее эффективным неразрушающим методом контроля качества сплошности соединения слоев является акустический. Ультразвуковой контроль – это один из наиболее универсальных способов неразрушающего контроля. Главное преимущество заключается в том, что при его использовании нет необходимости в разрушении и повреждении исследуемого образца [10, 11].

Результаты

В результате последовательной подстановки исходных данных в формулы (1)–(3) получены следующие значения скоростей метаемых пластин: $v_1 = 778$ м/с; $v_2 = 551$ м/с; $v_3 = 449$ м/с; $v_4 = 389$ м/с; $v_5 = 347$ м/с.

Расчетный угол соударения метаемых пластин 1–5 по формуле (4) составил соответственно: $\gamma_1 = 19,6^\circ$; $\gamma_2 = 13,9^\circ$; $\gamma_3 = 11,3^\circ$; $\gamma_4 = 9,8^\circ$; $\gamma_5 = 8,7^\circ$.

При совместном решении уравнений (5)–(6) технологический зазор между метаемыми и неподвижной пластинами составил соответственно: $h_{1-2} = 6,6$ мм; $h_{2-3} = 3,4$ мм; $h_{3-4} = 1,9$ мм; $h_{4-5} = 1,2$ мм; $h_{5-6} = 0,8$ мм.

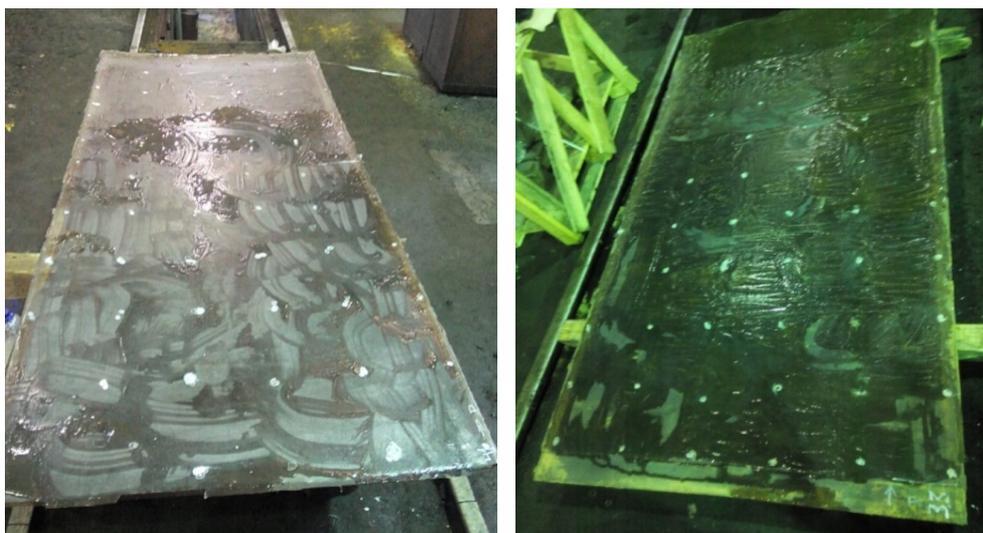
В ходе выполнения научной работы разработана методика проведения ультразвукового контроля и составлены карты технологического процесса. Изготовлен прототип стандартного образца предприятия для настройки чувствительности ультразвукового прибора. Прототип представляет собой образец композиционного материала с внутренними протекторами, в котором на каждую межслойную границу нанесены плоскодонные отверстия диаметром от 3 до 15 мм. На рис. 5 показан внешний вид прототипа стандартного образца предприятия. Проведена проверка чувствительности пьезоэлектрических

преобразователей, показано, что несплошности диаметром от 5 до 12 мм хорошо различимы, границы дефекта выявляются четко. Дефекты диаметром от 3 до 5 мм – различимы, установлена сложность выявления точного условного размера. Дефекты диаметром менее 3 мм не выявляются, что связано с характером движения ультразвуковых волн в чередующихся слоях аустенитной стали.



Рис. 5. Прототип стандартного образца предприятия с плоскодонными отверстиями

Проведен 100 % контроль сплошности слоев партии листовых многослойных металлических материалов с одним и двумя внутренними протекторами. Ультразвуковой контроль проводили в соответствии ГОСТ 22727–88 «Прокат листовой. Методы ультразвукового контроля». Оценка сплошности полученных материалов проводили по классу *D3Э*. На рис. 6 представлены результаты ультразвукового контроля. Белым маркером отмечены места несплошности материала на различных межслойных границах. По результатам контроля составлены протоколы испытаний.



a)

б)

Рис. 6. Внешний вид многослойного металлического материала:
a – 4-слойного с одним внутренним протектором;
б – 6-слойного с двумя внутренними протекторами

По результатам ультразвукового контроля в соответствии с ГОСТ 22727–88 недопустимых дефектов не обнаружено. Материал успешно прошел испытания на механические и технологические свойства, подтвердил высокую коррозионную стойкость.

Расчетные значения технологических и кинематических параметров многослойных металлических композиционных материалов с одним и двумя внутренними протекторами позволили получить качественное соединение слоев композита на образцах, размер которых сопоставим промышленному производству. Прототип стандартного образца предприятия с плоскодонными отверстиями позволил произвести настройку акустического прибора и с высоким качеством определить несплошности на межслойных границах образцов партии композита.

Обсуждение

Для конкретизации приемов процесса неразрушающего контроля новых многослойных материалов с одним и двумя внутренними протекторами разработана методика.

Для того чтобы детально отразить процедуру ультразвукового контроля новых материалов, разработана технологическая карта, в которой содержится информация об объекте контроля, выбранной аппаратуре, правилах и нормах оценки результата контроля.

Для настройки ультразвукового прибора, используемого при контроле, разработан стандартный образец предприятия, параметры отражателей которого указаны в технологической карте.

Все результаты, полученные в ходе проведения работы, могут служить в качестве дополнения к курсу в средних профессиональных и высших учебных заведениях.

Список литературы

1. Перельгин П. Ю., Лось И. С., Киреев С. Ю. Коррозия и защита металлов от коррозии : учеб. пособие для студентов технических специальностей. 2-е изд., доп. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 88 с.
2. Пеев А. П., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Кузьмин Е. В., Дородников А. Н. Формирование структуры и свойств свариваемых взрывом соединений под воздействием ультразвука // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116, № 8. С. 861–866.
3. Иванов М. М. Использование композитов для защиты от коррозионного воздействия // Инновационная наука. 2017. № 12. С. 38–41.
4. Rozen A. E., Reformatskaya I. I., Kuznetsov E. V. [et al.]. Corrosion resistance of multilayer explociad metals // Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations. X International Symposium on Explosive Production of New Materials: collection of abstracts. Moscow : Torus press, 2010. С. 63.
5. Лось И. С., Розен А. Е., Перельгин Ю. П., Первухин Л. Б., Усатый С. Г., Хорин А. В. Исследование структуры и свойств многослойного коррозионностойкого материала, полученного сваркой взрывом // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. № 5 (65). С. 93–96.
6. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом. М. : Машиностроение, 1987. 214 с.
7. Станюкович К. П., Баум Ф. А., Шехтер Б. И. Физика взрыва. М. : Книга по Требованию, 2013. 800 с.
8. Rosen A. E., Pervukhin L. B., Kryukov D. B. [et al.]. Multilayer clad metals by explosive welding // Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials. 7th International Symposium. Moscow : Torus press, 2006. С. 111.
9. Розен А. Е., Корнеев А. Е., Хорин А. В. [и др.]. Структурообразование межслойных границ слоистого металлического материала при сварке взрывом // Известия

Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 11 (246). С. 41–45.

10. Бояркин Е. В., Кочетков А. С., Бехер С. А. Физические основы ультразвукового контроля : учеб. пособие. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2018. 38 с.
11. Коновалов Н. Н. Оценка показателей достоверности ультразвукового контроля сварных соединений // Дефектоскопия. 2003. № 9. С. 4–8.
12. Киселев В. И. Анализ методов ультразвукового контроля качества сварных соединений как одного из основных для обеспечения промышленной безопасности производственных объектов // Ползуновский Альманах. 2015. № 4. С. 20–22.

References

1. Perelygin P.Yu., Los' I.S., Kireev S.Yu. *Korroziya i zashchita metallov ot korrozii: ucheb. posobie dlya studentov tekhnicheskikh spetsial'nostey. 2-e izd., dop. = Corrosion and protection of metals from corrosion: textbook for students of engineering specialties. The 2nd edition, supplemented.* Penza: Izd-vo PGU, 2015:88. (In Russ.)
2. Peev A.P., Kuz'min S.V., Lysak V.I., Kuz'min E.V., Dorodnikov A.N. Formation of the structure and properties of explosion-welded joints under the influence of ultrasound. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallurgy.* 2015;116(8):861–866. (In Russ.)
3. Ivanov M.M. Using composites to protect against corrosion. *Innovatsionnaya nauka = Innovative science.* 2017;(12):38–41. (In Russ.)
4. Rozen A.E. Reformatskaya I.I., Kuznetsov E.V. et al. Sorrosion resistance of multilayer explociad metals. *Explosive production of new materials: science, technology, business, and innovations. X International Symposium on Explosive Production of New Materials: collection of abstracts.* Moscow: Torus press, 2010:63.
5. Los' I.S., Rozen A.E., Perelygin Yu.P., Pervukhin L.B., Usatyy S.G., Khorin A.V. The study of the structure and properties of multilayer corrosion-resistant material obtained by explosion welding. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University.* 2010;(5):93–96. (In Russ.)
6. Konon Yu.A., Pervukhin L.B., Chudnovskiy A.D. *Svarka vzryvom = Explosion welding.* Moscow: Mashinostroenie, 1987:214. (In Russ.)
7. Stanyukovich K.P., Baum F.A., Shekhter B.I. *Fizika vzryva = Physics of explosion.* Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2013:800. (In Russ.)
8. Rosen A.E., Pervukhin L.B., Kryukov D.B. et al. Multilayer clad metals by explosive welding. *Shock-Assisted Synthesis and Modification of Materials. 7th International Symposium.* Moscow: Torus press, 2006:111.
9. Rozen A.E., Korneev A.E., Khorin A.V. et al. Structure formation of interlayer boundaries of layered metal material during explosion welding. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Volgograd State Technical University.* 2020;(11):41–45.
10. Boyarkin E.V., Kochetkov A.S., Bekher S.A. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovogo kontrolya: ucheb. posobie = Physical basis of ultrasonic testing: textbook.* Novosibirsk: Izd-vo SGUPS, 2018:38. (In Russ.)
11. Konovalov N.N. Assessment of reliability indicators of ultrasonic testing of welded joints. *Defektoskopiya = Flaw detection.* 2003;(9):4–8. (In Russ.)
12. Kiselev V.I. Analysis of methods for ultrasonic quality control of welded joints as one of the main ones for ensuring industrial safety of production facilities. *Polzunovskiy Al'manakh = Polzunovsky Almanac.* 2015;(4):20–22. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Кирилл Дмитриевич Куликов

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: poxitive993@gmail.com

Kirill D. Kulikov

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Владимирович Хорин

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры контроля и испытания материалов, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: alexkho154@ya.ru

Aleksandr V. Khorin

Candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of materials control and testing, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Евгеньевич Розен

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

E-mail: aerozen@bk.ru

Andrey E. Rozen

Doctor of engineering sciences, professor, professor of the sub-department of welding, foundry 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 02.02.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.03.2023

Принята к публикации / Accepted 15.04.2023