

Особенности структурообразования переходной зоны в слоистом композиционном материале, полученном сваркой взрывом

© 2022

Розен Андрей Евгеньевич^{1,3}, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Харина Ирина Лазаревна^{2,4}, кандидат технических наук, главный научный сотрудник лаборатории коррозионных испытаний

Гуденко Андрей Сергеевич^{2,5}, кандидат технических наук, заведующий отделом физико-химических методов исследования металлов

Прыщак Алексей Валерьевич^{1,6}, кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Хорин Александр Владимирович^{*1,7}, кандидат технических наук, доцент кафедры «Контроль и испытания материалов»

Батрашов Виктор Михайлович^{1,8}, кандидат технических наук, доцент кафедры «Контроль и испытания материалов»

Гуськов Максим Сергеевич^{1,9}, кандидат технических наук, доцент кафедры «Контроль и испытания материалов»

Розен Андрей Андреевич^{1,10}, аспирант кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Козлов Дмитрий Вячеславович^{1,11}, аспирант кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

¹ Пензенский государственный университет, Пенза (Россия)

² АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва (Россия)

*E-mail: alexkho154@yandex.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3362-9617>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1847-2917>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6459-9516>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1770-6678>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7164-7942>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

¹⁰ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3970-1707>

¹¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2501-7768>

Поступила в редакцию 08.07.2021

Принята к публикации 25.02.2022

Аннотация: Приведены исследования особенностей структурообразования в переходных зонах слоистого металлического материала из конструкционных углеродистых и легированных нержавеющей сталей с внутренним протектором. Определена последовательность расположения слоев. Промышленным способом производства такого материала была принята технология сварки взрывом, обеспечивающая получение 3-, 4- и 6-слойных материалов с одним и двумя внутренними протекторами за один подрыв. Выбор оптимальных параметров процесса осуществляли при помощи компьютерного моделирования с использованием программного продукта *LS-DYNA*. Расчетом определяли основные технологические параметры процесса, обеспечивающие в контактной зоне на каждой межслойной границе соотношение амплитуды образующихся волн к их длине в диапазоне от 0,3 до 0,5. Проведены механические испытания многослойных заготовок. Величина прочности сцепления слоев на срез составила от 320 до 410 МПа, временного сопротивления на разрыв основного слоя – от 520 до 710 МПа, ударной вязкости – от 290 до 740 кДж/м², угол загиба при статическом нагружении – 140 градусов и выше. Определен фазовый состав и характеристики кристаллографической структуры переходных зон слоистого металлического материала с внутренним протектором. Установлено наличие γ -Fe с гранецентрированной кристаллической решеткой, две кубические структуры, по одной гексагональной и орторомбической. На образцах с искусственным питтнгом установлено их влияние на скорость анодного растворения протекторного слоя при контакте с агрессивной средой. Показано, что наибольшей коррозионной стойкостью обладают межслойные границы с однородной структурой и минимальной толщиной.

Ключевые слова: слоистый металлический материал; внутренний протектор; сварка взрывом; межслойная граница; компьютерное моделирование.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта № 0748-2020-0013 «Научные принципы формирования гетерогенных структур методами физико-химического диспергирования» (государственное задание вузу в сфере научной деятельности. Заказчик: Министерство науки и высшего образования РФ).

Авторы выражают благодарность сотрудникам специализированной лаборатории АО «НПО «ЦНИИТМАШ» (г. Москва), АО «Институт реакторных материалов» (г. Заречный, Свердловская область), ООО «Средневожский

сертификационно-диагностический центр "Дельта"» (г. Тольятти, Самарская область) и Центру коллективного пользования ООО «РОМЕТ» (г. Пенза) за помощь в проведении экспериментов.

Для цитирования: Розен А.Е., Харина И.Л., Гуденко А.С., Прыщак А.В., Хорин А.В., Батрашов В.М., Гуськов М.С., Розен А.А., Козлов Д.В. Особенности структурообразования переходной зоны в слоистом композиционном материале, полученном сваркой взрывом // *Frontier Materials and Technologies*. 2022. № 1. С. 61–72. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-61-72.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным в области атомной, химической и газонефтедобывающей промышленности является обеспечение высокой стойкости конструкционного материала к коррозионному поражению. Наиболее распространенными для их производства являются высоколегированные монометаллические нержавеющие и двухслойные (биметаллические) стали. Срок службы монометалла определяется безопасной глубиной его коррозионного поражения, при которой сохраняется прочность конструкции. В биметалле допускается сквозное поражение коррозионностойкого плакирующего слоя. Срок его применения регламентируется толщиной. Прочность конструкции в этом случае определяется толщиной основного слоя. Разработка новых коррозионностойких сталей и сплавов в основном идет по пути увеличения содержания легирующих элементов, в первую очередь никеля, хрома и молибдена, повышения степени очистки от примесей [1; 2]. Однако такой подход практически исчерпал себя, так как повышение электрохимического потенциала таких материалов неизбежно повышает интенсивность протекания питтинговой коррозии, которая способна к сквозной перфорации в исключительно малых объемах [3–5].

Интерес в этой связи представляют слоистые металлические материалы (СММ) с внутренним протектором (ВП)¹. Условием повышения их коррозионной стойкости являются металлические слои с различным электрохимическим потенциалом. Это приводит к трансформации коррозионного процесса, в результате которой он разбивается на отдельные стадии в условиях последовательно протекания питтингового и язвенного поражения [1; 2; 6]. Принцип коррозионной защиты, заложенный в архитектуру СММ с ВП, основан на известных и широко применяемых в материаловедении и электрохимии процессах [7–9]. Принципиально новым в данном материале является применение протекторного слоя, расположенного между внешним и защищающими слоями [10–12]. Появляется возможность задействовать несколько протекторных слоев. Скорость проникновения коррозионного поражения при этом многократно снижается. Данное техническое решение запатентовано в 11 странах мира². Предварительные исследова-

ния, проведенные в АО «НПО «ЦНИИТМАШ», свидетельствуют о возможности многократно повысить коррозионную стойкость СММ с ВП в сравнении с нержавеющими сталями аустенитного класса [11; 12].

Существует десять промышленных способов получения СММ с ВП, начиная от пакетной прокатки, электрошлаковой и дуговой наплавки, газодинамического напыления и заканчивая сваркой взрывом. Последний способ является наиболее эффективным, так как позволяет за один технологический прием формировать неограниченное число слоев с высокими механическими свойствами на всех межслойных границах в условиях узкой переходной зоны и наименьшей себестоимости процесса.

В работе была применена параллельная схема сварки взрывом скользящей ударной волной (рис. 1). Актуальным при сварке взрывом СММ с ВП является решение вопроса по соответствию условий идентичности формирования межслойных границ многослойного пакета. Это вызвано различием энергетических условий соударения пластин. Под действием продуктов детонации верхняя пластина 3, на которой расположено взрывчатое вещество 2, начинает разгоняться. Скорость, приобретаемая верхней пластиной в технологическом зазоре, увеличивается от нуля до нескольких сотен м/с. Первая пластина соударяется со второй и вовлекает ее в процесс движения. Масса металлических пластин увеличивается, а скорость снижается. При одинаковом зазоре условия формирования межслойных границ между первой и второй, а также второй и третьей пластинами будут различными. Особенно заметно подобное различие на первой и пятой межслойных границах при сварке взрывом, например, шестислойного материала. Различия в кинетической энергии и приобретенных импульсах на межслойных границах будут изменяться по мере вовлечения в движение новых пластин [13–15].

Для обеспечения равной прочности сцепления всех межслойных границ важно соблюсти идентичность пластического деформирования при прохождении ударной волны. Данное условие можно оценить характеристиками профиля межслойных границ: амплитуда (A) и длина волны (λ). Авторы работ [13; 16; 17] указывают на схожесть механических характеристик каждой из межслойных границ при условии, что соотношении A/λ находится в диапазоне от 0,3 до 0,5 и не содержит литых структур. Для этого необходимо стремиться к условию, чтобы все энергетические и кинематические характеристики были тождественны.

Выполнение указанного требования возможно лишь при соблюдении определенных технологических параметров сварки взрывом, а именно высоты заряда ($H_{вз}$),

¹ Родионова И.Г., Тишков В.Я., Дзарахохов К.З., Шекин В.В., Рябинкова В.К., Голованов А.В., Сорокин В.П., Анциферова И.В., Фельдгандлер Э.Г. Способ получения трехслойных листов и полос: патент РФ № RU 2063852, заявка № 93016441/08 от 31.03.1993, опубликован 20.07.1996. 4 с.

² Лось И.С., Первухин Л.Б., Перельгин Ю.П., Гордополов Ю.А., Первухина О.Л., Кирий Г.В., Абрамов П.И., Усатый С.Г., Крюков Д.Б., Денисов И.В., Розен А.А., Розен А.Е. Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения: Евразийский патент № 016878 ЕАПВб выдан 30.06.2012; приоритет от 26.09.2008.

Title of the invention: multilayer material with enhanced corrosion resistance (variants) and methods for preparing same patent: patent of South Korea № 10-1300674 from 21.08.2013, reg. date: 2013-08-21, filing date: 2011-04-11.

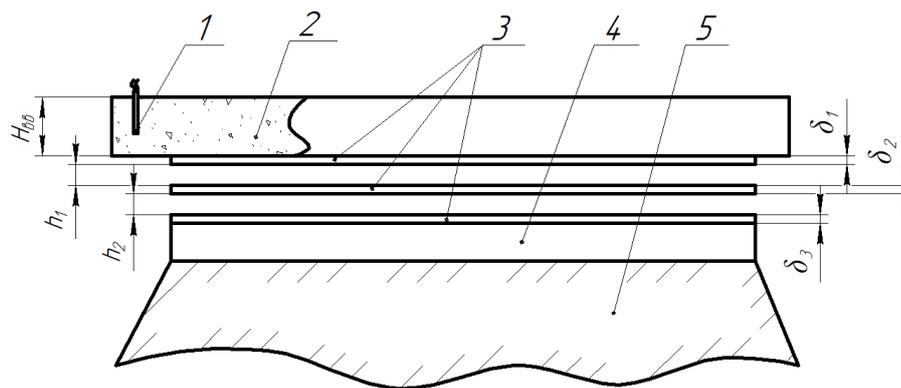


Рис. 1. Схема сварки взрывом трехслойного металлического композиционного материала с внутренним протектором:

H_{BB} – толщина заряда взрывчатого вещества; h_1, h_2 – технологические зазоры;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщины пластин, используемых в архитектуре;

1 – электродетонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – соединяемые пластины;

4 – неподвижная пластина основания; 5 – грунт

Fig. 1. The scheme of explosion welding of a three-layer metal composite material with inner protector:

H_{BB} – the explosive charge thickness; h_1, h_2 – technological gaps; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – the thickness of plates used in architecture;

1 – electric detonator; 2 – an explosive charge; 3 – joinable plates; 4 – base fixed plates; 5 – ground

скорости детонации (D_{BB}) взрывчатого вещества, величины технологического зазора (h). Для выбора указанных значений использовали математический аппарат [17–19] с привлечением программного продукта *LS-DYNA*. Он предназначен для решения двух- и трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела, тепло- и массопереноса, механики жидкости и газа. Программно реализовано более сорока моделей материалов и пять уравнений их состояния.

Цель исследования – изучение особенностей структурообразования на межслойных границах слоистых металлических материалов с внутренним протектором и улучшения их механических и эксплуатационных свойств в условиях оптимизации процесса сварки взрывом за счет использования компьютерного моделирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В созданном взрывом СММ с ВП была применена слоистая конфигурация металла, состоящая из нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T с высоким электрохимическим потенциалом (+0,4 В) и низкоуглеродистой стали ферритно-перлитного класса Ст3сп с низким электрохимическим потенциалом (–0,4 В). Для 4- и 6-слойных конфигураций в качестве основного конструкционного слоя использовали сталь 09Г2С.

СММ с ВП получали методом сварки взрывом в условиях открытого полигона. Выбор кинематических и технологических параметров процесса осуществляли по результатам компьютерного моделирования волновой поверхности межслойных границ из условия, что соотношение амплитуды к длине волны будет находиться при указанном выше соотношении. Расчет осуществляли с применением программного пакета *LS-DYNA*. Особен-

ностями решения задачи являлось использование многокомпонентного лагранжево-эйлерового метода, лагранжевое описание движения метаемой пластины и применение лагранжево-эйлерового связывания.

Моделирование процесса волнообразования на контактных поверхностях при сварке взрывом было проведено при помощи многокомпонентного эйлерового подхода. Каждый элемент эйлеровой сетки содержит определенную часть представленного в рассматриваемой системе материала. Характеристики расчетной модели для 3-, 4- и 6-слойной композиций представлены в таблице 1.

Результатом компьютерного моделирования стала графическая картина волновой поверхности межслойных границ с расчетными значениями амплитуды и длины волн. Методом итерации осуществляли выбор оптимальных параметров ударно-волнового нагружения.

Исследование микроструктуры образцов, полученных сваркой взрывом, проводили на металлографическом микроскопе *NIKON EPIPHOT 200*. Параметры ударно-волнового воздействия оценивали с помощью программы анализа изображения *VESTRA Imaging System*.

Были изготовлены 3-, 4- и 6-слойные листовые заготовки габаритными размерами 2500×1250 мм и общей площадью более 200 м² (рис. 2).

После изготовления СММ с ВП осуществляли термическую обработку образцов при температуре 860 °С, их правку и ультразвуковой контроль сплошности всех межслойных границ в объеме 100 %.

Коррозионную стойкость СММ с ВП оценивали относительным показателем коррозионной стойкости (ОПКС), который рассчитывают по формуле

$$\text{ОПКС}_n = \frac{t_{\text{СМ}}}{t_{\text{Моно}}},$$

где n – число слоев в СММ с ВП;
 $t_{см}$ – суммарное время сквозного коррозионного разрушения слоев СММ с ВП, ч;
 $t_{моно}$ – среднее время сквозного проникновения единичным питтингом монометаллического материала равной толщины, ч.

Оценку механических свойств осуществляли по величинам ударной вязкости согласно ГОСТ 9454-78 [14], пределу прочности на растяжение согласно ГОСТ 1497-

84 [15], углу загиба при статическом нагружении плакирующими слоями внутрь и/или наружу согласно ГОСТ 14019-2003.

Фазовый анализ образцов на межслойных границах проводили методом рентгеновской дифракции с применением установки ДРОН-7 на специально подготовленных шлифах, имеющих малый угол в поперечной плоскости (так называемый «косой срез»). Съемку образцов осуществляли в медном K_{α} -излучении. Данные обрабатывали

Таблица 1. Экспериментальные и теоретические характеристики для оценки расчетных моделей
Table 1. Experimental and theoretical characteristics to estimate simulation models

Параметр моделирования	Характеристика
Взрывчатое вещество	
Состав	Микропористая селитра со специальными добавками
Диапазон толщина, мм	От 40,0 до 80,0 с шагом 5,0
Модель	Уилкинса – Гейроуха
Уравнение состояния	Джонса – Уилкинса – Ли
Металлические пластины для 3-слойного материала с одним внутренним протектором	
Первая (толщина, мм)	Нержавеющая сталь аустенитного класса (2,0)
Вторая (толщина, мм)	Низкоуглеродистая сталь феррито-перлитного класса (2,0)
Третья (толщина, мм)	Нержавеющая сталь аустенитного класса (2,0)
Модель	Джонсона – Кука
Уравнение состояния	Ми – Грюнайзена
Металлические пластины для 4-слойного материала с одним внутренним протектором	
Первая (толщина, мм)	Нержавеющая сталь аустенитного класса (2,0)
Вторая (толщина, мм)	Низкоуглеродистая сталь феррито-перлитного класса (2,0)
Третья (толщина, мм)	Нержавеющая сталь аустенитного класса (2,0)
Четвертая (толщина, мм)	Низкоуглеродистая низколегированная сталь феррито-перлитного класса (10,0)
Модель	Джонсона – Кука
Уравнение состояния	Ми – Грюнайзена
Металлические пластины для 6-слойного материала с двумя внутренними протекторами	
Первая (толщина, мм)	Нержавеющая сталь аустенитного класса (2,0)
Вторая (толщина, мм)	Низкоуглеродистая сталь феррито-перлитного класса (2,0)
Третья (толщина, мм)	Нержавеющая сталь аустенитного класса (2,0)
Четвертая (толщина, мм)	Низкоуглеродистая сталь феррито-перлитного класса (2,0)
Пятая (толщина, мм)	Нержавеющая сталь аустенитного класса (2,0)
Шестая (толщина, мм)	Низкоуглеродистая низколегированная сталь феррито-перлитного класса (10,0)
Модель	Джонсона – Кука
Уравнение состояния	Ми – Грюнайзена

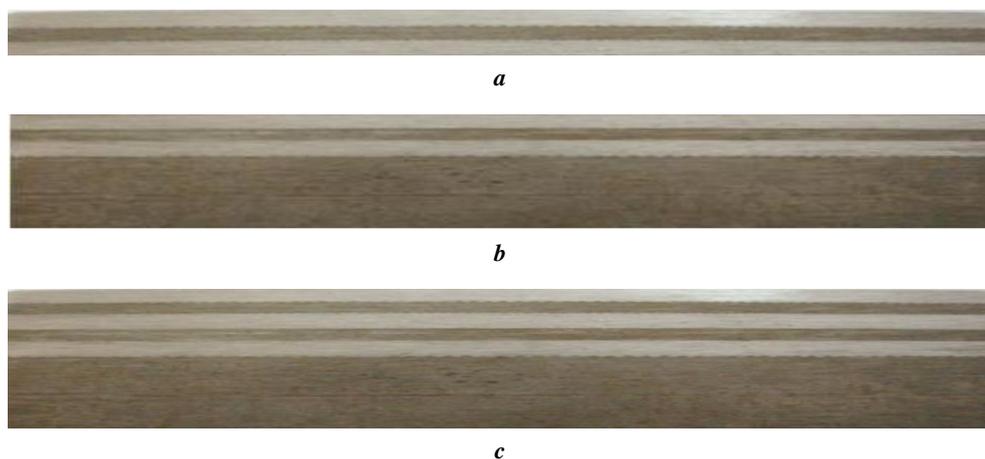


Рис. 2. Фотографии поперечной структуры пластин 3-слойного (а), 4-слойного (б) и 6-слойного (с) металлического материала с одним и двумя внутренними протекторами, полученные по технологии сварки взрывом
Fig. 2. Photographs of a transverse structure of planes of a three-layer (a), four-layer (b), and six-layer (c) metal material with one and two inner protectors produced by the explosion welding technology

с помощью программного комплекса *Retrieve and Search-Match*, который содержит встроенный пакет математической кристаллографии и в автоматическом режиме осуществляет полный анализ фазового состава и характеристик кристаллографической структуры.

Для изучения особенности коррозионного поражения внутреннего протектора в образцах СММ с ВП использовали методику ускоренных испытаний с искусственным питтингом [10]. Образцы выдерживали 72 ч в 10-процентном растворе хлорида железа (III) (плотность $1,049 \pm 0,002$ г/см³). Анодное растворение протектора оценивали гравиметрическим методом по потере массы и микроструктурным анализом поперечного сечения по месту искусственного питтинга после коррозионных испытаний [20].

Результаты механических, технологических и эксплуатационных испытаний 3-, 4- и 6-слойного СММ с ВП представлены в таблице 2. Результаты

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетные значения основных технологических параметров были использованы для получения сваркой взрывом пластин из СММ с ВП. Проведены комплексные исследования микроструктуры и фазового состава межслойных границ, механические и коррозионные испытания. Результаты механических, технологических и эксплуатационных испытаний 3-, 4- и 6-слойного СММ с ВП представлены в таблице 2. Результаты

Таблица 2. Механические, технологические и эксплуатационные свойства
Table 2. Mechanical, technological, and performance characteristics

Техническая характеристика	Архитектура слоистого металлического материала		
	3-слойная с одним ВП	4-слойная с одним ВП	6-слойная с двумя ВП
Относительный показатель коррозионной стойкости (ОПКС)*	6	9	25
Прочность сцепления слоев на каждой межслойной границе, $\sigma_{ср}$, Н/мм ²	от 320 до 410 (требование ГОСТ 10885 – не менее 140)		
Временное сопротивление на разрыв основного слоя, σ_b , Н/мм ²	от 640 до 710 (не менее 530)	от 520 до 590 (не менее 470)	
Ударная вязкость основного слоя, КСУ, кДж/м ²	от 290 до 310 (не менее 250)	от 690 до 740 (не менее 640)	
Угол загиба, $\alpha_{град}$, не менее	147		
	Рис. 4 а	Рис. 4 б	Рис. 4 с, 4 д

Примечание: *В качестве эталонного (ОПКС=1) принят образец из высоколегированной нержавеющей стали аустенитного класса марки 12Х18Н10Т; в скобках указаны значения по ГОСТ 10885, ТУ 27.32.09.010-2005 и ТУ 24.33.30-001-09494191-2021.

Note: *A sample of 12H18N10T high-alloy stainless steel is accepted as a standard sample (RCRI=1, relative corrosion resistance index); in brackets, the values according to GOST 10885, TS 27.32.09.010-2005, and TS 24.33.30-001-09494191-2021 are indicated.

фазового состава и характеристик кристаллографической структуры основных составляющих переходных зон приведены в таблицах 3 и 4.

Результаты компьютерного моделирования технологических параметров сварки взрывом при обеспечении заданного диапазона амплитуды и длины волны на межслойных границах на примере 3-слойного СММ с одним ВП показаны на рис. 3. Расчетные значения сравнивали с результатами структурных исследований. На рис. 4 представлены результаты испытаний на статический изгиб 3-, 4- и 6-слойного СММ с ВП. Процесс растворения внутреннего протектора по межслойным границам показан на рис. 5. Результаты исследования микроструктуры межслойных границ в 3-слойном СММ с ВП приведены на рис. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью регулировки установочного зазора между пластинами на каждой из межслойных границ, полученных расчетным путем при применении компьютерного моделирования, удалось обеспечить условие, при котором на всех межслойных границах отношение A/λ находилось в диапазоне от 0,3 до 0,5. Отклонение экспериментальных и расчетных значений не превышает 24 %.

Оптимизация технологических режимов сварки взрывом обеспечила условие равнопрочности на каждой межслойной границе (рис. 3) и, соответственно, высокие механические свойства материала. Это подтверждается данными таблицы 2 и рис. 4. В частности, прочность сцепления слоев составила от 320 до 410 МПа, временное сопротивление на разрыв основного слоя – от 520 до 710 МПа, ударная вязкость основного слоя – от 290 до 740 кДж/м², угол загиба при статическом нагружении – не менее 147.

Ускоренные коррозионные испытания подтвердили высокую эффективность слоистых металлических материалов с внутренним протектором. Величина относительного показателя коррозионной стойкости в сравнении с высоколегированными нержавеющими сталями аустенитного класса для 3-слойных материалов с одним внутренним протектором повышается в 4-, 6-слойных с одним внутренним протектором – в 9 раз и 6-слойных с двумя внутренними протекторами – в 25 раз.

Микроструктурными исследованиями первой и второй межслойных границ в 3-слойном СММ с ВП (рис. 6 а) установлено, что на первой межслойной границе ширина переходной зоны составляет от 11,0 до 12,5 мкм, и, как указывает рентгенофазовый анализ, она содержит γ -железо с гранцентрированной кристаллической решеткой, две кубические структуры, одну гексагональную, одну орторомбическую.

Таблица 3. Фазовый состав и характеристика кристаллографической структуры нержавеющей аустенитной стали на первой межслойной границе

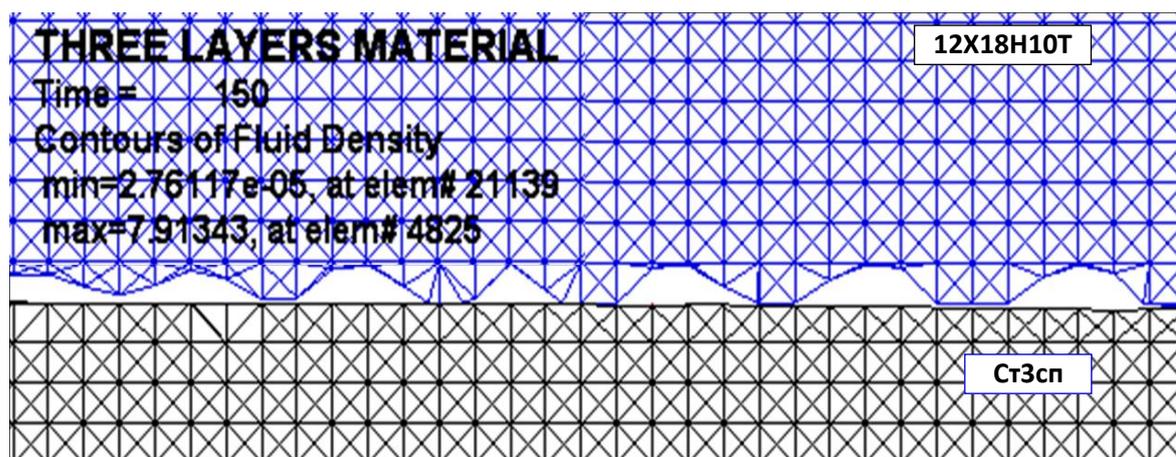
Table 3. Phase composition and characteristics of a crystallographic structure of stainless austenitic steel at the first interlayer boundary

Фазовый состав	Структурный тип	Периоды, нм		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
γ -Fe (ГЦК)	<i>Fm3m</i> (225), кубическая	0,3645	–	–
(Cr, Ni)	<i>Fm3m</i> (225), кубическая	0,3591	–	–
Cr ₇ C ₃	<i>P6₃mc</i> (186), гексагональная	0,1401	–	0,4532
Cr ₂₃ C ₆	<i>Fm3m</i> (225), кубическая	1,06599	–	0,29806
Cr ₃ C ₂	<i>Stct</i> (63), орторомбическая	0,285	0,925	0,696

Таблица 4. Фазовый состав и характеристика кристаллографической структуры низкоуглеродистой феррито-перлитной стали на второй межслойной границе

Table 4. Phase composition and characteristics of a crystallographic structure of low-carbon ferritic-pearlitic steel at the second interlayer boundary

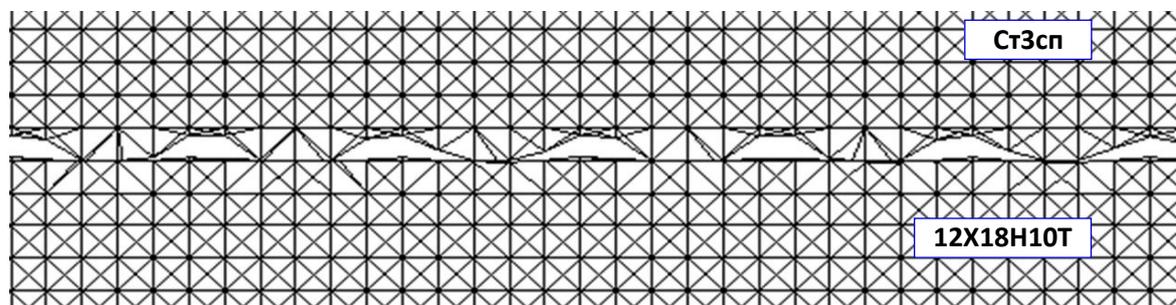
Фазовый состав	Структурный тип	Периоды, нм		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
α -Fe (ОЦК)	<i>Im3m</i> (229), кубическая	0,28606	–	–
Fe ₃ C	<i>Pbnm</i> (62), орторомбическая	0,45144	0,50787	0,67297
(Cr _{0,2} Fe _{0,8})	<i>Im3m</i> (229), кубическая	0,28664	–	–



a



b



c



d

Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования (a, c) и фотография макроструктуры (b, d) первой (a, b) и второй (c, d) межслойных границ 3-слойного металлического материала с одним внутренним протектором при сварке взрывом
Fig. 3. The results of computer simulation (a, c) and a photograph of a microstructure (b, d) of the first (a, b) and the second (c, d) interlayer boundaries of a three-layer metal material with one inner protector at explosion welding

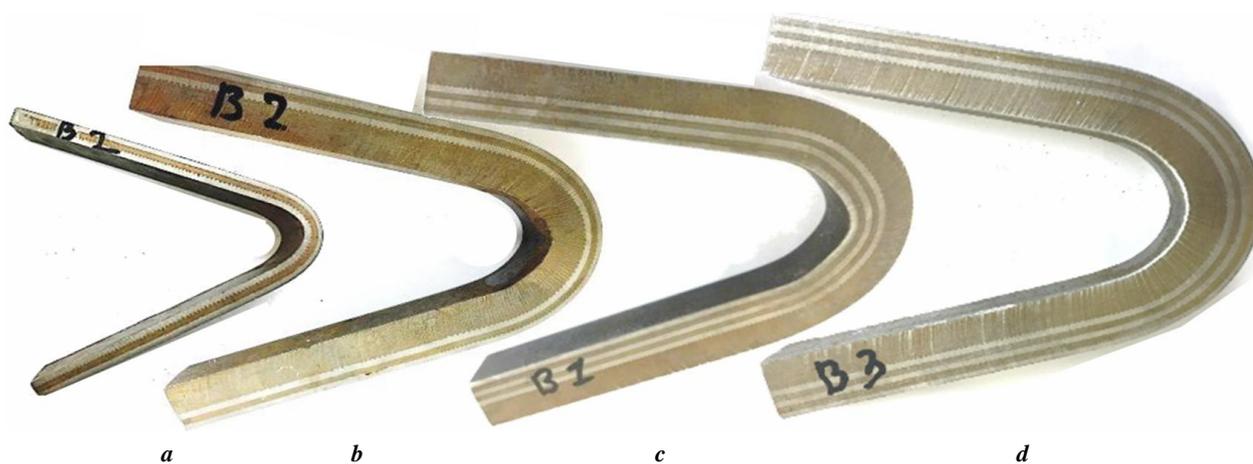


Рис. 4. Образцы 3- (a), 4- (b) и 6-слойных (c, d) металлических материалов с одним (a, b) и двумя (c, d) внутренними протекторами при статическом изгибе

Fig. 4. Specimens of three- (a), four- (b), and six-layer (c, d) metal materials with one (a, b) and two (c, d) inner protectors at static bending

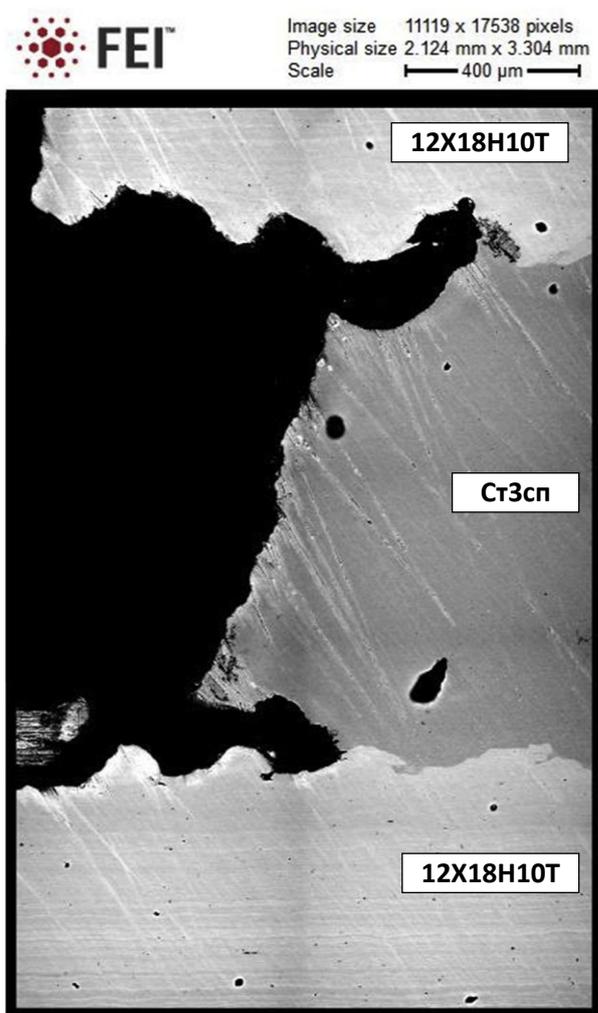


Рис. 5. Картированный участок 3-слойного металлического материала с искусственным питтингом

Fig. 5. Mapping area of a three-layer metallic material with artificial pitting

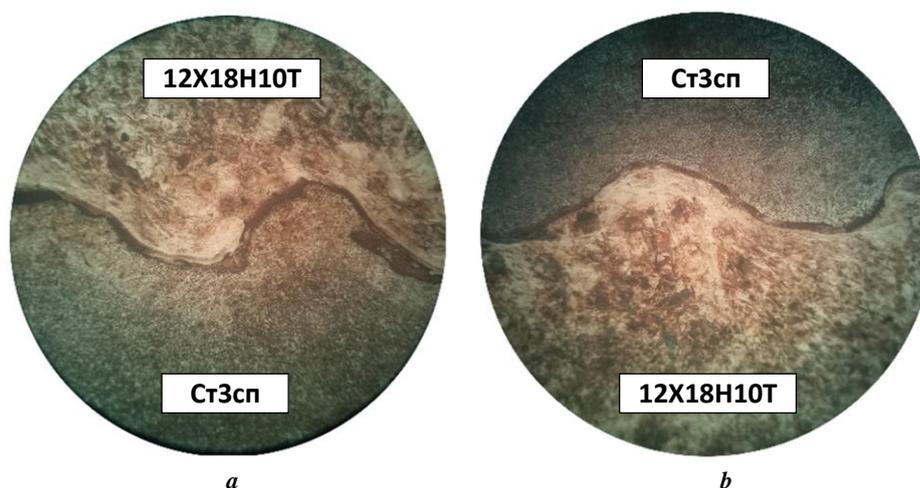


Рис. 6. Микроструктура межслойных границ в 3-слойном металлическом материале с внутренним протектором: *a* – первой межслойной границы; *b* – второй межслойной границы
Fig. 6. A microstructure of the interlayer boundaries in a three-layer metallic material with inner protector: *a* – of the first interlayer boundary; *b* – of the second interlayer boundary

Вторая межслойная граница (рис. 6 б) имеет толщину от 5,0 до 7,5 мкм и содержит два типа структуры: орторомбическую и кубическую.

Картирование участка коррозионного поражения 3-слойного образца с искусственным питтингом (рис. 5) указывает, что скорость растворения межслойных границ превышает скорость анодного растворения протекторного слоя. Процесс анодного растворения происходит особенно активно в зонах с наибольшим количеством растворенных фаз.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Выбор оптимальных параметров процесса осуществлен использованием компьютерного моделирования с применением программного продукта *LS-DYNA*. При оптимизации добивались условия, чтобы в контактной зоне на каждой межслойной границе соотношение амплитуды образующихся волн к их длине находилось в диапазоне от 0,3 до 0,5.

Оптимизация технологических режимов сварки обеспечила высокие механические свойства слоистых металлических материалов с внутренним протектором: величина прочности сцепления слоев на срез составила от 320 до 410 МПа, временного сопротивления на разрыв основного слоя – от 520 до 710 МПа, ударной вязкости – от 290 до 740 кДж/м², угол загиба при статическом нагружении – не ниже 147°.

Проведены фазовые исследования переходных зон межслойных границ исследуемого материала. Полученные данные свидетельствуют о возможности регулировать их толщину и фазовый состав, а следовательно, и коррозионное поведение при контакте с агрессивными средами. Установлено, что наибольшей устойчивостью против коррозии обладают межслойные границы минимальной толщины и максимально однородной структуры.

Показана эффективность замены высоколегированных нержавеющей сталей аустенитного класса на

слоистые металлические материалы с внутренним протектором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akpanyung K.V., Loto R.T. Pitting corrosion evaluation: a review // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1378. № 2. Article number 022088. DOI: [10.1088/1742-6596/1378/2/022088](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022088).
2. Jafarzadeh S., Chen Z., Bobaru F. Computational modeling of pitting corrosion // *Corrosion reviews*. 2019. Vol. 37. № 5. P. 419–439. DOI: [10.1515/corrrev-2019-0049](https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0049).
3. Xiang Y., Li C., Hesitao W., Long Z., Yan W. Understanding the pitting corrosion mechanism of pipeline steel in an impure supercritical CO₂ environment // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. Vol. 138. P. 132–142. DOI: [10.1016/j.supflu.2018.04.009](https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.04.009).
4. Frankel G.S., Li T., Scully J.R. Localized corrosion: Passive film breakdown vs pit growth stability // *Journal of the electrochemical society*. 2017. Vol. 164. № 4. P. C180–C181. DOI: [10.1149/2.1381704.jes](https://doi.org/10.1149/2.1381704.jes).
5. Chi G., Yi D., Liu H. Effect of roughness on electrochemical and pitting corrosion of Ti-6Al-4V alloy in 12 wt.% HCl solution at 35 °C // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 2. P. 1162–1174. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.11.044](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.044).
6. Obeyesekere N. Pitting corrosion // *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*. 2017. P. 215–248. DOI: [10.1016/B978-0-08-101105-8.00009-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00009-7).
7. Ha H.-Y., Lee T.-H., Lee C.-G., Yoon H. Understanding the relation between pitting corrosion resistance and phase fraction of S32101 duplex stainless steel // *Corrosion Science*. 2019. Vol. 149. P. 226–235. DOI: [10.1016/j.corsci.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.001).
8. Wei L., Liu Y., Li Q., Cheng Y.F. Effect of roughness on general corrosion and pitting of (FeCoCrNi)_{0.89}(WC)_{0.11} high-entropy alloy composite in 3.5 wt.% NaCl solution // *Corrosion Science*. 2019. Vol. 146. P. 44–57. DOI: [10.1016/j.corsci.2018.10.025](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.10.025).

9. Mohammed S., Hua Y., Barker R., Neville A. Investigating pitting in X65 carbon steel using potentiostatic polarization // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 423. P. 25–32. DOI: [10.1016/j.apsusc.2017.06.015](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.015).
10. Grachev V.A., Rozen A.E., Perelygin Y.P., Kireev S.Y., Los I.S., Rozen A.A. Measuring corrosion rate and protector effectiveness of advanced multilayer metallic materials by newly developed methods // *Heliyon*. 2018. Vol. 4. № 8. Article number e00731. DOI: [10.1016/j.heliyon.2018.e00731](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00731).
11. Розен А.Е., Киреев С.Ю., Дуб А.В., Сафонов И.А., Макарова Е.А., Розен А.А., Исаков Е.Г., Корольков А.О. Особенности дуговой сварки слоистого коррозионностойкого материала // *Frontier Materials & Technologies*. 2021. № 4. С. 57–68. DOI: [10.18323/2782-4039-2021-4-57-68](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2021-4-57-68).
12. Grachev V.A., Rozen A.E., Perelygin Yu.P., Kireev S.Yu., Los' I.S., Rozen A.A. Accelerated Corrosion Tests of a New Class of Multilayer Metallic Materials with an Internal Protector // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. № 3. P. 247–256. DOI: [10.1134/S0036029519030030](https://doi.org/10.1134/S0036029519030030).
13. Розен А.Е., Корнеев А.Е., Хорин А.В., Прыщак А.В., Гуденко А.С., Розен А.А., Козлов Д.В. Структурообразование межслойных границ слоистого металлического материала при сварке взрывом // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 11. С. 41–45. DOI: [10.35211/1990-5297-2020-11-246-41-45](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-11-246-41-45).
14. Saikov I.V., Malakhov A.Y., Saikova G.R., Denisov I.V., Gulyaev P.Y. Influence of Explosive Welding Parameters on the Structure of Interface in Brass–Invar Thermobimetal // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. № 2. P. 448–452. DOI: [10.1134/S2075113320020331](https://doi.org/10.1134/S2075113320020331).
15. Malakhov A.Y., Saikov I.V., Denisov I.V. Brass–Invar Bimetal Interface in the Joint Formed by Explosive Welding // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2021. Vol. 2021. № 10. P. 1289–1293. DOI: [10.1134/S0036029521100219](https://doi.org/10.1134/S0036029521100219).
16. Батаев И.А., Лазуренко Д.В., Малютин Ю.Н., Никулина А.А., Батаев А.А., Матц О.Э., Кучумова И.Д. Сверхвысокие скорости охлаждения на границе свариваемых взрывом материалов и их влияние на формирование структуры зон перемешивания // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54. № 2. С. 122–130. DOI: [10.15372/FGV20180213](https://doi.org/10.15372/FGV20180213).
17. Батаев И.А. Формирование структуры сваренных взрывом материалов: экспериментальные исследования и численное моделирование // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2017. № 4. С. 55–67. DOI: [10.17212/1994-6309-2017-4-55-67](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-55-67).
18. Мухутдинов А.Р., Гарифуллин Р.Ш., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Моделирование процесса сварки взрывом с использованием Ansys autodyn // *Взрывное дело*. 2019. № 125-82. С. 65–73.
19. Маринин М.А., Хохлов С.В., Ишейский В.А. Моделирование режима протекания процесса сварки плоских листовых деталей взрывом // *Записки Горного института*. 2019. Т. 237. С. 275–280. DOI: [10.31897/pmi.2019.3.275](https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.275).
20. Лось И.С. Оценка коррозионной стойкости многослойных металлических материалов // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 3. С. 138–144.

REFERENCES

1. Akpanyung K.V., Loto R.T. Pitting corrosion evaluation: a review. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1378, no. 2, article number 022088. DOI: [10.1088/1742-6596/1378/2/022088](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022088).
2. Jafarzadeh S., Chen Z., Bobaru F. Computational modeling of pitting corrosion. *Corrosion reviews*, 2019, vol. 37, no. 5, pp. 419–439. DOI: [10.1515/corrrev-2019-0049](https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0049).
3. Xiang Y., Li C., Hesitao W., Long Z., Yan W. Understanding the pitting corrosion mechanism of pipeline steel in an impure supercritical CO₂ environment. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2018, vol. 138, pp. 132–142. DOI: [10.1016/j.supflu.2018.04.009](https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.04.009).
4. Frankel G.S., Li T., Scully J.R. Localized corrosion: Passive film breakdown vs pit growth stability. *Journal of the electrochemical society*, 2017, vol. 164, no. 4, pp. C180–C181. DOI: [10.1149/2.1381704.jes](https://doi.org/10.1149/2.1381704.jes).
5. Chi G., Yi D., Liu H. Effect of roughness on electrochemical and pitting corrosion of Ti-6Al-4V alloy in 12 wt.% HCl solution at 35 °C. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 1162–1174. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.11.044](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.044).
6. Obeyesekere N. Pitting corrosion. *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*, 2017, pp. 215–248. DOI: [10.1016/B978-0-08-101105-8.00009-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00009-7).
7. Ha H.-Y., Lee T.-H., Lee C.-G., Yoon H. Understanding the relation between pitting corrosion resistance and phase fraction of S32101 duplex stainless steel. *Corrosion Science*, 2019, vol. 149, pp. 226–235. DOI: [10.1016/j.corsci.2019.01.001](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.001).
8. Wei L., Liu Y., Li Q., Cheng Y.F. Effect of roughness on general corrosion and pitting of (FeCoCrNi)_{0.89}(WC)_{0.11} high-entropy alloy composite in 3.5 wt.% NaCl solution. *Corrosion Science*, 2019, vol. 146, pp. 44–57. DOI: [10.1016/j.corsci.2018.10.025](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.10.025).
9. Mohammed S., Hua Y., Barker R., Neville A. Investigating pitting in X65 carbon steel using potentiostatic polarization. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 423, pp. 25–32. DOI: [10.1016/j.apsusc.2017.06.015](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.015).
10. Grachev V.A., Rozen A.E., Perelygin Y.P., Kireev S.Y., Los I.S., Rozen A.A. Measuring corrosion rate and protector effectiveness of advanced multilayer metallic materials by newly developed methods. *Heliyon*, 2018, vol. 4, no. 8, article number e00731. DOI: [10.1016/j.heliyon.2018.e00731](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00731).
11. Rozen A.E., Kireev S.Yu., Dub A.V., Safonov I.A., Makarova E.A., Rozen A.A., Isakov E.G., Korolkov A.O. Special aspects of arc welding of a laminated corrosion-resistant material. *Frontier Materials & Technologies*, 2021, no. 4, pp. 57–68. DOI: [10.18323/2782-4039-2021-4-57-68](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2021-4-57-68).
12. Grachev V.A., Rozen A.E., Perelygin Yu.P., Kireev S.Yu., Los' I.S., Rozen A.A. Accelerated Corrosion Tests of a New Class of Multilayer Metallic Materials with an Internal Protector. *Russian Metallurgy*

- (*Metally*), 2019, no. 3, pp. 247–256. DOI: [10.1134/S0036029519030030](https://doi.org/10.1134/S0036029519030030).
13. Rozen A.E., Korneev A.E., Khorin A.V., Pryshchak A.V., Gudenko A.S., Rozen A.A., Kozlov D.V. Structural formation of interlayer boundaries layered metal material in explosion welding. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 11, pp. 41–45. DOI: [10.35211/1990-5297-2020-11-246-41-45](https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-11-246-41-45).
 14. Saikov I.V., Malakhov A.Y., Saikova G.R., Denisov I.V., Gulyaev P.Y. Influence of Explosive Welding Parameters on the Structure of Interface in Brass–Invar Thermobimetal. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 448–452. DOI: [10.1134/S2075113320020331](https://doi.org/10.1134/S2075113320020331).
 15. Malakhov A.Y., Saikov I.V., Denisov I.V. Brass–Invar Bimetal Interface in the Joint Formed by Explosive Welding. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2021, vol. 2021, no. 10, pp. 1289–1293. DOI: [10.1134/S0036029521100219](https://doi.org/10.1134/S0036029521100219).
 16. Bataev I.A., Lazurenko D.V., Malyutina Y.N., Nikulina A.A., Bataev A.A., Mats O.E., Kuchumova I.D. Ultra-high cooling rates at the interface of explosively welded materials and their effect on the formation of the structure of mixing zones. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2018, vol. 54, no. 2, pp. 238–245. DOI: [10.15372/FGV20180213](https://doi.org/10.15372/FGV20180213).
 17. Bataev I.A. Structure of explosively welded materials: experimental study and numerical simulation. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2017, no. 4, pp. 55–67. DOI: [10.17212/1994-6309-2017-4-55-67](https://doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-55-67).
 18. Mukhutdinov A.R., Garifullin R.Sh., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Explosion welding simulation using Ansys autodyne. *Vzryvnoe delo*, 2019, no. 125-82, pp. 65–73.
 19. Marinin M.A., Khokhlov S.V., Isheyskiy V.A. Modeling of the welding process of flat sheet parts by an explosion. *Zapiski Gornogo instituta*, 2019, vol. 237, pp. 275–280. DOI: [10.31897/pmi.2019.3.275](https://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.275).
 20. Los I.S. Corrosion-resistance evaluation of multi-layered metal materials. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 3, pp. 138–144.

Special aspects of structure formation of a transition zone in a layer composite produced by explosion welding

© 2022

Andrey E. Rozen^{1,3}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Head of Chair “Welding, Foundry Engineering, and Materials Science”
Irina L. Kharina^{2,4}, PhD (Engineering), chief researcher of the Laboratory of Corrosion Tests
Andrey S. Gudenko^{2,5}, PhD (Engineering),
Head of Department of Physical and Chemical Methods of Metal Research
Aleksey V. Pryshchak^{1,6}, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Welding, Foundry Engineering, and Materials Science”
Aleksandr V. Khorin^{*1,7}, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Control and Material Tests”
Viktor M. Batrashov^{1,8}, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Control and Material Tests”
Maksim S. Guskov^{1,9}, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Control and Material Tests”
Andrey A. Rozen^{1,10}, postgraduate student of Chair “Welding, Foundry Engineering, and Materials Science”
Dmitry V. Kozlov^{1,11}, postgraduate student of Chair “Welding, Foundry Engineering, and Materials Science”

¹*Penza State University, Penza (Russia)*

²*JSC “RPA “CNITMASH”, Moscow (Russia)*

*E-mail: alexkho154@yandex.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3362-9617>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1847-2917>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6459-9516>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1770-6678>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7164-7942>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8475-2987>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-576X>

¹⁰ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3970-1707>

¹¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2501-7768>

Received 08.07.2021

Accepted 25.02.2022

Abstract: The paper presents the research on special aspects of structure formation in the transition zones of a layer metal material made of structural carbon and alloy stainless steels with an internal protector. The authors specify the order of layers arrangement. As an industrial method of producing such a material, the explosion welding technology was selected, which ensures the production of three-, four- and six-layer materials with one and two internal protectors per one explosion. The selection of optimal process parameters was carried out using computer modeling in the *LS-DYNA* software product. By calculation, the authors determined the main technological parameters of the process, which provide in the contact zone at each interlayer boundary the ratio of the amplitude of the generated waves to their length in the range from 0.3 to 0.5. Mechanical tests of multilayer workpieces were carried out. The shear strength of layers was from 320 to 410 MPa, the ultimate tensile strength of the main layer was from 520 to 710 MPa, the impact resistance was from 290 to 740 kJ/m², and the bending angle under static loading was 140 degrees and higher. The authors determined the phase com-

position and characteristics of the crystallographic structure of transition zones of a layer metal material with an internal protector. The study identified the presence of γ -Fe with a face-centered crystal lattice, two cubic structures, one hexagonal, and one orthorhombic. On the samples with artificial pitting, the authors determined their influence on the rate of anodic dissolution of a protective layer when contacting with an aggressive environment. The study shows that the interlayer boundaries with a homogeneous structure and minimal thickness have the highest corrosion resistance.

Keywords: layer metal material; internal protector; explosion welding; interlayer boundary; computer simulation.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project No. 0748-2020-0013 “Scientific principles of formation of heterogeneous structures by the physical-chemical dispersion methods” (state assignment to the university in the field of scientific activity. Customer: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation).

The authors express gratitude to the employees of the specialized laboratory of JSC “RPA “CNIITMASH” (Moscow), JSC Institute of Nuclear Materials (Zarechny, the Sverdlovsk Region), OOO Mid-Volga Region Certification and Diagnostic Center “Delta” (Togliatti, the Samara Region), and to Core Facility Center “ROMET” (Penza) for assistance in carrying out the experiments.

For citation: Rozen A.E., Kharina I.L., Gudenko A.S., Pryshchak A.V., Khorin A.V., Batrashov V.M., Guskov M.S., Rozen A.A., Kozlov D.V. Special aspects of structure formation of a transition zone in a layer composite produced by explosion welding. *Frontier Materials and Technologies*, 2022, no. 1, pp. 61–72. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-61-72.