

Особенности дуговой сварки слоистого коррозионностойкого материала

© 2021

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

Киреев Сергей Юрьевич^{1,4}, доктор технических наук, доцент,
декан факультета машиностроения и транспорта

Дуб Алексей Владимирович^{2,5}, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов

Сафонов Иван Александрович^{2,6}, кандидат технических наук, доцент

Макарова Екатерина Александровна^{2,7}, аспирант

Розен Андрей Андреевич^{1,8}, аспирант

Исаков Евгений Григорьевич^{1,9}, магистрант

Корольков Андрей Олегович^{*1,10}, магистрант

¹ Пензенский государственный университет, Пенза (Россия)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва (Россия)

*E-mail: andreykorolkovracer@yandex.ru

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

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1295-7814>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9660-7370>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8828-4532>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9477-8806>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3970-1707>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0679-6647>

¹⁰ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1367-623X>

Аннотация: Показана востребованность коррозионностойких материалов для химической промышленности, а также перспективность создания слоистых металлических материалов с внутренним протектором (СММ с ВП). Предложены архитектура и состав слоев СММ с ВП, обеспечивающие устойчивую работу в высокоагрессивных средах. Установлена возможность повышения коррозионной стойкости в сравнении с высоколегированными нержавеющими сталями аустенитного класса в 10 и более раз. Указана эффективность применения сварки взрывом для получения СММ с ВП. Рассмотрен пример получения четырехслойного материала с одним внутренним протектором из низколегированной, низкоуглеродистой стали следующей архитектуры: слои 12Х18Н10Т + 09Г2С + 12Х18Н10Т по 2 мм каждый и основной слой 09Г2С – 10 мм. Разработаны технологические схемы выполнения стыкового сварного соединения такого материала, определены особенности формирования его микроструктуры и свойств. Применен энергодисперсионный микроанализ для получения карт распределения характерных химических элементов в слоях и межслойных границах. Исследованы особенности коррозионного поражения сварного шва и околошовной зоны. Показана необходимость применения облицовочного слоя в сварном шве. Полученные результаты подтверждены микроструктурными, рентгеномографическими, гравиметрическими исследованиями. Для оценки качества сварного соединения были проведены коррозионные испытания сварного шва и околошовной зоны, выполнен визуально-измерительный контроль, рентгеновская томография. Коррозионные испытания производили с применением 10%-го водного раствора хлорида железа III. Представлены результаты испытаний сварного соединения на статический изгиб. Критерием оценки служило отсутствие излома, расслоений и трещин. Установлена возможность получать бездефектное сварное соединение СММ с ВП с высокой коррозионной стойкостью и повышенными механическими свойствами.

Ключевые слова: питтинговая коррозия; слоистый металлический материал; СММ; внутренний протектор; ВП; электрохимический потенциал; ЭХП; дуговая сварка слоистых материалов; дуговая сварка СММ; картирование сварного шва; 10Х23Н60М9; Св-08Г2С; Св-06Х19Н9Т; 12Х18Н10Т; 09Г2С.

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) и конкурса «Ректорские гранты» Пензенского государственного университета, договор № ХП-71/21 от 19.04.2021.

Для цитирования: 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.

ВВЕДЕНИЕ

Более 130 предприятий химического машиностроения используют коррозионностойкие моно- и биметаллические сплавы в емкостных аппаратах, теплообменных устройствах, реакторах, регенераторах, аппаратах воздушного охлаждения, печах, центрифугах, криогенном оборудовании и др. Рабочие объемы оборудования насчитывают от одного до нескольких тысяч кубических метров, а их масса – от нескольких сотен килограмм до нескольких сотен тонн. Площадь поверхности теплообменных агрегатов может составлять до 10 тыс. м². Большинство указанных конструкций работают в сильноагрессивных средах, в условиях щелочных и кислых сред, а также с повышенным содержанием галогенидов, в широком диапазоне температур и давлений. Все указанные факторы сильно ограничивают ресурс их работы.

Согласно исследованию, проведенному в 2014 году в Китае, общая сумма прямых затрат на коррозию в химической промышленности составила 147,1 млрд юаней, что составляет 1,67 % от общего объема рынка [1]. По сравнению с прямыми затратами косвенные затраты в химической промышленности, такие как простой производства, остановка технологических процессов для ремонта/замены оборудования, опасные инциденты и загрязнение окружающей среды, могут быть в несколько раз выше.

Актуальным является совершенствование методов защиты, разработки новых коррозионностойких материалов и способов получения изделий из них. В настоящее время широко применяют коррозионностойкие моно- и биметаллические материалы. Разработки новых

монометаллических сталей и сплавов, основанные на увеличении содержания легирующих элементов, молибдена, никеля и хрома, практически исчерпаны ввиду высокой склонности этих сталей и сплавов к питтинговой коррозии, скорость развития которой может достигать 10 мм в год [2–4]. Срок службы оборудования из биметаллов определяется только толщиной плакирующего (защитного) слоя. В этих случаях высокую эффективность показывают слоистые металлические материалы (СММ) с внутренним протектором (ВП) [5; 6].

СММ представляют собой металлический композит, слои которого выбираются из условия определенного электрохимического потенциала (ЭХП) каждого из элементов. Образуя короткозамкнутые гальванические пары, они меняют направление коррозионных процессов при переходе от одного слоя к другому. Результатом данного технического решения является трансформация коррозионного поражения от питтинговой коррозии в верхнем слое к контактной с последующим анодным растворением второго (протекторного) слоя. Пример архитектуры четырехслойного материала с одним внутренним протектором представлен на рис. 1.

Такое построение структуры материала многократно замедляет процессы коррозии. Предварительные исследования, проведенные в ОАО НПО ЦНИИТМАШ, свидетельствуют о возможности повысить его коррозионную стойкость в сравнении с нержавеющей стали аустенитного класса в 10 и более раз [7]. Данный материал по ценовой категории находится в одном ряду с широко распространенными коррозионностойкими нержавеющей стали аустенитного класса, а по

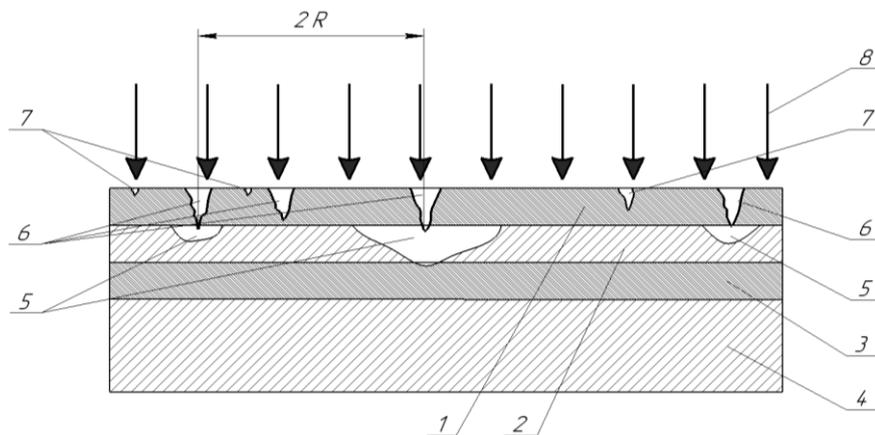


Рис. 1. Архитектура четырехслойного коррозионностойкого металлического материала с одним внутренним протектором:

1 – наружный слой; 2 – внутренний протектор; 3 – третий слой;

4 – основной слой, по которому рассчитывается прочность всей металлоконструкции;

5 – линзы в протекторе из продуктов коррозии;

6 – сквозные питтинги первого слоя; 7 – питтинги, у которых прекратился рост ввиду электрохимического воздействия внутреннего протектора;

8 – направление действия агрессивной среды; R – радиус действия внутреннего протектора

Fig. 1. The architecture of a four-layer corrosion-resistant metal material with one internal protector:

1 – the outer layer; 2 – the internal protector; 3 – the third layer;

4 – the basic layer, according to which the durability of the whole metal structure is calculated;

5 – the lens in the protector of corrosion products;

6 – through pitting of the first layer;

7 – pitting where the growth stopped due to the electrochemical effect of the internal protector;

8 – operative direction of aggressive medium; R – the internal protector working radius

коррозионной стойкости сопоставим с палладием, молибденом, никелем и хастеллоем [8]. Можно с большой уверенностью предположить, что он будет активно востребован в промышленности.

Анализ основных технологий получения данного материала, таких как пакетная прокатка, наплавка, газотермическое и газодинамическое напыление, послонный синтез и др., показал высокую эффективность сварки взрывом [9]. При условии минимальной себестоимости данный способ позволяет получать за один технологический цикл слоистые металлические материалы из разнородных металлов и сплавов с количеством слоев до 10 и более и площадью соединений до 20 м² [10]. Соединение слоев осуществляется в твердой фазе. Применение последующей горячей прокатки позволяет многократно увеличить площадь композиционного материала (от 2 до 10 раз). Основной металл и плакирующие слои при этом не изменяют своего химического состава. Переходная зона не превышает нескольких микрон [11].

Высокие скорости и контактные давления при сварке взрывом приводят к появлению волновых поверхностей на межслойных границах. Амплитуда и длина волны могут достигать от нескольких десятков до нескольких сотен микрон. Механизм коррозионного поражения при этом не меняется [12].

Наиболее перспективным для применения можно считать СММ с ВП следующей архитектуры [13]:

- первый слой, контактирующий с агрессивной средой, и слои, расположенные под протектором выполняются из материалов с высоким ЭХП (от +0,4 В и выше) (слои 1 и 3, рис. 1); к их числу могут быть отнесены высоколегированные нержавеющие стали аустенитного класса, например 12Х18Н10Т или ее аналоги – 321 (США), Х6СrNiTi18-10 (Германия), 0Cr18Ni10Ti (Китай);

- протекторный слой выполняют из материала с низким ЭХП (от –0,4 В и ниже) (слой 2, рис. 1); к их числу могут быть отнесены низкоуглеродистые, низколегированные стали, например сталь обыкновенного качества Ст3сп, качественная сталь 10, 20, 09Г2С и их аналоги – 1023 (США), 13Mn6 (Германия), 12Mn (Китай);

- основной слой, обеспечивающий прочностные свойства всей металлоконструкции (слой 4, рис. 1); в качестве основного слоя выбираются низко- и среднелегированные или низко- и среднеуглеродистые стали, работающие при повышенных и пониженных температурах.

Для создания емкостных конструкций, резервуаров, транспортирующих систем важным является получение неразъемных сварных соединений при условии, что сварной шов не уступает композиционному материалу по механическим, технологическим и эксплуатационным свойствам, в частности по коррозионной стойкости. Стойкость к коррозионному поражению сварного шва может быть обеспечена двумя технологическими приемами.

Первый технологический прием является стандартным при сварке биметаллов, когда заполнение сварочной ванны производится металлом, аналогичным по химическому составу прилегающему слою [14]. В этом случае ЭХП плакируемого и основного металла идентичны друг другу либо близки слоям сварного шва. Межслойная граница заполняется переходным метал-

лом, снижающим вероятность образования горячих и холодных трещин в данной зоне [15; 16].

Второй технологический прием состоит в том, что сварочная ванна со стороны действия агрессивной среды (со стороны плакирующих слоев) заполняется металлом, ЭХП которого превышает наибольший аналогичный показатель СММ с ВП [17].

В качестве объекта исследования был выбран четырехслойный СММ с одним ВП следующей архитектуры: 12Х18Н10Т (2) + 09Г2С (2) + 12Х18Н10Т (2) + 09Г2С (10).

В скобках в миллиметрах указаны толщины соответствующих слоев. Испытания проводили на 7 образцах каждой серии (по первому и второму вариантам).

Предметом исследования явилось установление связи между составом, структурой, механическими свойствами и коррозионным разрушением сварного шва и околошовной зоны СММ с ВП, полученного по двум технологическим схемам.

Цель исследования – отработка промышленного способа дуговой сварки слоистого металлического материала с внутренним протектором при обеспечении высокой коррозионной стойкости сварного соединения, не уступающей свариваемому металлу.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Апробированы две технологические схемы получения поворотного стыкового соединения четырехслойного металлического материала с внутренним протектором. Применена X-образная разделка кромок (рис. 2) при условии, что толщина основного слоя стали 09Г2С соответствовала глубине залегания односторонней фаски. Вторая фаска соответствовала сумме толщин плакирующих слоев. Использовалась механизированная сварка плавящимся электродом в среде аргона.

Сварку осуществляли на инверторном импульсном сварочном полуавтомате S8 SpeedPulseXT фирмы «ШТОРМ-ЛОРХ». Заполнение сварочной ванны для первого и второго технологических приемов начинали со стороны основного металла. Корень шва варили присадочной проволокой 10Х23Н60М9. Остальное заполнение производили проволокой Св-08Г2С. Химический состав проволок с указанием электрохимического потенциала (ЭХП) приведен в таблице 1.

Диаметр электродной проволоки в обоих случаях составлял 1,2 мм, сила сварочного тока 190±10 А, напряжение дуги 24±2 В, скорость подачи сварочной проволоки 260±20 м/ч, скорость сварки 35±10 м/ч, расход газа 9±1 л/мин. В качестве защитного газа использовали аргон высшего сорта.

Для осуществления первой технологической схемы с применением сварного шва, состоящего из слоев, аналогичных СММ с ВП, использовали электродные проволоки Св-08Г2С и Св-06Х19Н9Т, а для переходного слоя – Св-10Х23Н60М9.

Сварка СММ с ВП по первому варианту состоит из следующих этапов. Сначала производилась сварка корневого (переходного слоя), затем заполняющих проходов со стороны основного слоя. Далее выполняли заполняющие и переходные проходы со стороны плакирующих слоев (рис. 3 а). После каждого прохода зачищали шов от окалина, шлака, брызг. Производили

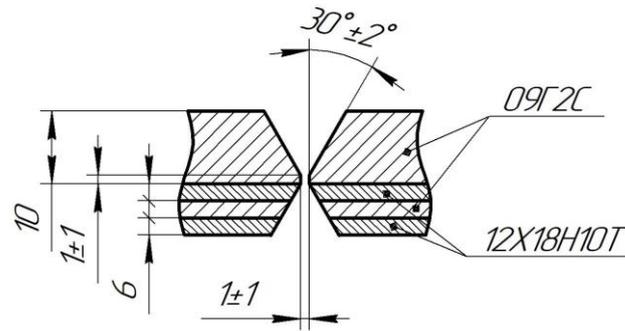


Рис. 2. Схема разделки кромок четырехслойного СММ с ВП
 Fig. 2. Diagram of edge preparation of the four-layer LMM with IP

Таблица 1. Химический состав сварочной проволоки
 Table 1. Chemical composition of an electrode wire

Марка сварочной проволоки	С, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	Ti, %	ЭХП, В
Св-08Г2С	от 0,05 до 0,11	от 0,7 до 0,95	от 1,8 до 2,1	<0,2	<0,25	<0,15	<0,04	-0,34
Св-06Х19Н9Т	до 0,08	от 0,4 до 1,0	от 1,0 до 2,0	от 18 до 20	от 8 до 10	-	от 0,5 до 1,0	+0,16
Св-10Х23Н60М9	до 0,1	до 0,5	до 0,5	от 20 до 23	>60,0	от 8 до 10	-	+0,20

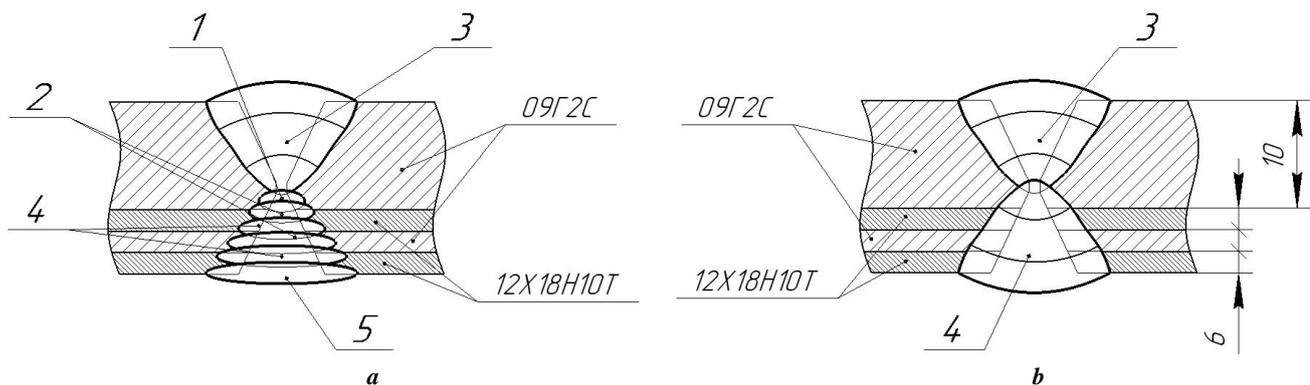


Рис. 3. Схема сварки четырехслойного слоистого металлического материала с внутренним протектором:
 а – первый технологический вариант; б – второй технологический вариант;

1 – корневой проход; 2 – переходный проход; 3 – заполняющие проходы со стороны основного слоя;
 4 – заполняющие проходы со стороны плакирующих слоев; 5 – облицовочный проход

Fig. 3. Diagram of welding of four-layer laminated metal material with internal protector:

а – the first technology option; б – the second technology option;
 1 – root run; 2 – intermediate run; 3 – filling runs from the side of a basic layer;
 4 – filling runs from the side of cladding layers; 5 – capping run

остывание шва до температуры 100 °С. Температуру контролировали при помощи тепловизора. Всего выполняли 9 проходов.

Сварку по второму варианту выполняли двумя этапами: первый заполняющий проход – со стороны основного слоя, второй – со стороны плакирующих слоев (рис. 3 б), с промежуточной зачисткой и остыванием сварного шва до температуры 100 °С между проходами. Всего 6 проходов. Для снижения остаточных деформаций и напряжений каждый последующий проход выполнялся в направлении, противоположном предыдущему.

Для защиты от брызг поверхности металла околошовной зоны применяли защитный спрей Binzel ANTI-SPATTER SPRAY.

Сварку коррозионностойких слоев по обеим технологическим схемам выполняли в импульсном режиме. Это позволило уменьшить количество вносимой в сварочную ванну погонной энергии, снизить вероятность перемешивания слоев с внутренним протектором (рис. 1, поз. 2), уменьшить процент разбрызгивания электродного металла во время сварки, повысить качество сварного шва и снизить риски образования дефектов. Выпуклость сварного шва со стороны действия агрессивной среды (плакирующих слоев) была снята. Это соответствует требованиям большинства нормативных документов в химическом машиностроении.

Методом растровой микроскопии в режиме MAPS на двухлучевом растровом электронно-ионном микроскопе FEI HELIOS NanoLab 660, оборудованном приставкой для энергодисперсионного микроанализа EDAX, производили анализ элементного и фазового составов с получением карт их распределения. Осуществляли картирование микроструктуры области интереса на поверхности шлифа. Для этих целей:

- выбирали область на поверхности образца вблизи сварного шва, содержащую все слои многослойного материала;

- проводили съемку карты с постоянной проверкой качества и единообразия полученного изображения (сохранение фокуса, астigmatизма, яркости и контраста).

Получали карты распределения характерных химических элементов в микроструктуре на поверхности образца. В качестве области выбирался участок образца, содержащий зоны соединения, полученные при производстве многослойного материала, а также сварного шва, полученного дуговой сваркой по первому и второму вариантам.

На выбранной области осуществляли съемку первичного спектра для определения химических элементов, присутствующих в области анализа. Для съемки спектра выбирали параметры тока и ускоряющего напряжения пучка, обеспечивающие максимальное количество счетов детектора с сохранением достаточной детализации выбранной рабочей зоны. В параметры съемки карты элементного состава вносили информацию о присутствующих элементах, далее производилось элементное картирование. Оценивались толщина слоев с однородной структурой, их химический и фазовый состав для первого и второго технологических приемов сварки.

Пример полученного изображения по технологии MAPS и области, выбранной для проведения элемент-

ного картирования, результаты элементного и фазового состава с картой распределения фазового состава, химических элементов с цветовой схемой и концентрацией соответствия элементов, концентрацией элементов по фазам в весовых и атомных процентах представлен на рис. 4.

При рентгеновском томографическом исследовании образец для сканирования помещали в специальном зажиме между источником рентгеновского излучения и сцинтилляторным детектором со сменными объективами на столик, имеющий степени свободы X , Y , Z , вращение с точностью позиционирования до 0,05 мкм (град.). Область интереса (*ROI*) для сканирования выбирали таким образом, чтобы визуализировать все характерные участки области сварного шва, а именно естественные и искусственные коррозионные язвы (питтинги), после чего производили съемку необходимого числа двумерных рентгеновских проекций образца при его повороте на дискретный угол от -180 до $+180$ ° с заданным шагом.

Из полученных двумерных рентгеновских проекций проводили реконструкцию трехмерной структуры образца по алгоритму Filtered Backprojection с коррекцией дрейфа образца и увеличения жесткости пучка. После получения данных рентгеновской томографии проводилась визуализация внутренней структуры образцов. За структурный элемент образца на трехмерных цифровых изображениях и их виртуальных сечениях принималась область, имевшая однородный контраст либо однородную текстуру (морфологию).

Характерные размеры структурных элементов на двумерных сечениях определялись путем измерения среднего расстояния между двумя противоположными границами области, отвечающей структурному элементу.

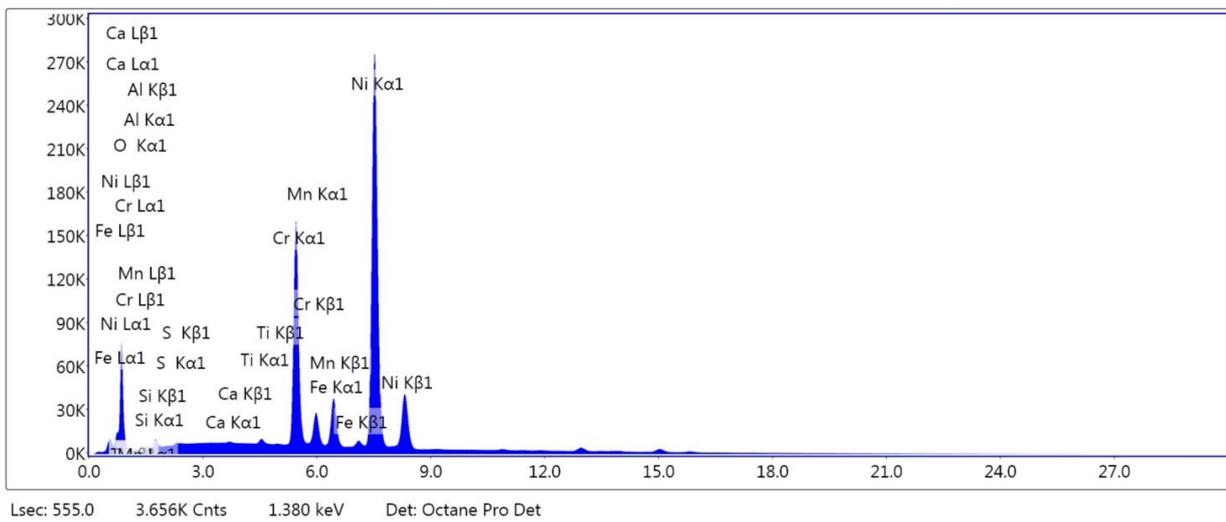
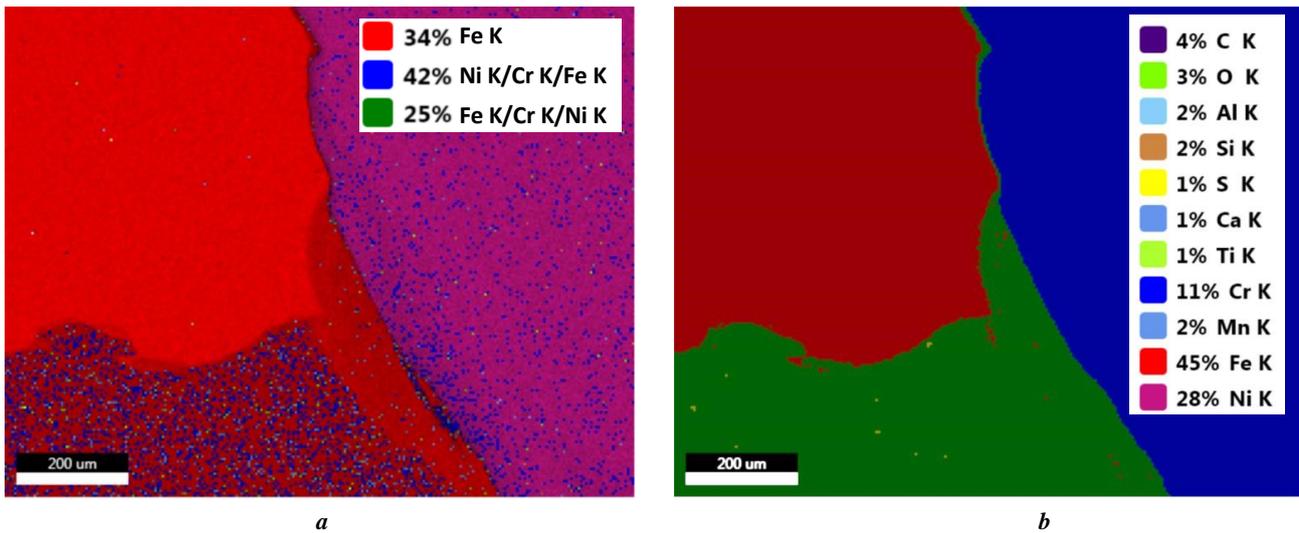
Определение истинного размера проводилось путем умножения полученного числа пикселей на изображении на размер пикселя на получаемом изображении, выраженный в микронах.

Оценка распределения коррозионных язв по размерам и форме проведена с помощью инструмента Label Analysis (Volume3D, ShapeVA3D) после разделения пор и коррозионных язв на индивидуальные единицы инструментом Labeling.

Механические свойства сварного шва СММ с ВП оценивали испытаниями на статический изгиб до определенного угла. При испытании производили запись диаграммы нагружения. Критерием оценки служило отсутствие излома, расслоений и трещин как в самом сварном шве, так и в околошовной зоне, а также излом на кривой диаграммы нагружения. Испытания проводили на разрывной машине ИР 5145-500-11. Для статического изгиба применяли приспособление ПР-500-И.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты проведения сварочных работ по получению стыкового соединения СММ с ВП свидетельствуют о качественном исполнении сварного шва как по первому, так и по второму технологическому режиму. Каких-либо наружных или внутренних дефектов сварных соединений ни визуальный, ни ультразвуковой, ни радиографический контроль не выявили. Картирование сварных швов позволило установить, что в случае заполнения сварочной ванны по первому варианту, когда



Весовые %	C	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
FeK	1,22	0	0,09	0,2	0,01	0,03	0,06	0,18	0,35	97,46	0,4
NiK/CrK/FeK	1,74	0,83	0,22	0,94	0,19	0,04	0,35	20,62	0,37	5,34	69,36
FeK/CrK/NiK	0,9	1,31	0,05	0,29	0,03	0,02	0,2	15,49	1,04	71,8	8,86
Атомные %	C	O	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
FeK	5,39	0	0,18	0,37	0,02	0,04	0,07	0,18	0,34	93,03	0,37
NiK/CrK/FeK	7,49	2,69	0,42	1,74	0,3	0,05	0,38	20,51	0,35	4,94	61,12
FeK/CrK/NiK	3,91	4,23	0,1	0,53	0,05	0,03	0,21	15,45	0,98	66,67	7,83

c

Рис. 4. Результаты картирования элементного и фазового состава участка поверхности образца, показанного на рис. 3 б:

a – карта распределения фазового состава;

b – карта распределения химических элементов с цветовой схемой соответствия элементов;

c – концентрации элементов по фазам в весовых и атомных процентах

Fig. 4. The results of mapping of elemental and phase composition of the sample surface area showed in fig. 3b:

a – phase composition distribution map;

b – distribution map of chemical elements with color diagram of elements compatibility;

c – concentrations of elements by phases in weight and atomic percentage

сварной шов имел многослойную структуру с переходными зонами, получить однородные по фазовому и химическому составу области со стороны плакирующих слоев с существенным для практического применения значением не удалось (таблица 2).

В частности, у образцов, полученных по первому технологическому режиму, протекторный слой 7 на некоторых участках отсутствует полностью. Там, где он есть, играть роль внутреннего протектора он не может. Содержание в нем хрома составило от 7,5 до 12,3 %, никеля – от 2,1 до 3,2 %. Материал данного слоя соответствует средне- и высоколегированным сталям.

Металл сварного шва, заполненный по второму технологическому варианту, не будет корродировать. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты коррозионных испытаний образца с искусственным питтингом на глубину 4,5 мм в центре сварного шва (рис. 5 а). 3D-визуализация томографических данных области искусственного питтинга свидетельствует о полном сохранении объема питтинга (рис. 5 б) после коррози-

онных испытаний в среде хлорида железа III (плотность $1,049 \pm 0,002 \text{ г/см}^3$) в течение 216 ч. Изменение объема не превышает 0,7 %, находясь на уровне погрешности томографа. Это подтверждается и данными гравиметрического анализа (таблица 3). Отклонения в гравиметрических показаниях до и после коррозионных испытаний в большинстве случаев не превышают погрешности измерений.

Такое негативное развитие событий, тем не менее, не является критическим, так как при достижении каким-либо питтингом протекторного слоя рост соседних питтингов останавливается, и дальнейшее коррозионное поражение развивается по ранее рассмотренной схеме для СММ с ВП (рис. 6). Основным слоем, обеспечивающий прочность всей металлоконструкции, данному коррозионному поражению не подвержен и поэтому не является опасным. Вместе с тем исключить подобное развитие событий с образованием большого числа питтингов в околошовной зоне возможно, если при проведении сварочных работ заполнение верхнего слоя

Таблица 2. Результаты картирования сварных швов
Table 2. The results of welding seams mapping

Способ заполнения сварочной ванны		Состав электродной проволоки	Мак и Мин толщина слоя с однородной структурой		Примечание
№ способа	№ слоя (прохода)		Мак	Min	
Первый	1	Св-08Г2С	9,90±0,15	9,35±0,15	Соответствует составу электродной проволоки
	2	Св-08Г2С			
	3	Св-08Г2С			
	4	Св-10Х23Н60М9	0,91±0,23	0,10±0,15	
	5	Св-06Х19Н9Т	1,10±0,12	0,27±0,13	
	6	Св-10Х23Н60М9	0,96±0,27	0,74±0,27	
	7	Св-08Г2С	0,87±0,18	0,09±0,14	Содержание Cr от 7,5 до 12,3 %, Ni от 2,1 до 3,2 %
	8	Св-10Х23Н60М9	0,94±0,16	0,13±0,11	
	9	Св-06Х19Н9Т	1,13±0,14	0,94±0,11	
Второй	1	Св-08Г2С	9,87±0,15	9,10±0,15	Соответствует составу электродной проволоки
	2	Св-08Г2С			
	3	Св-08Г2С			
	4	Св-10Х23Н60М9	6,08±0,13	5,70±0,12	Соответствует составу электродной проволоки
	5	Св-10Х23Н60М9			
	6	Св-10Х23Н60М9			

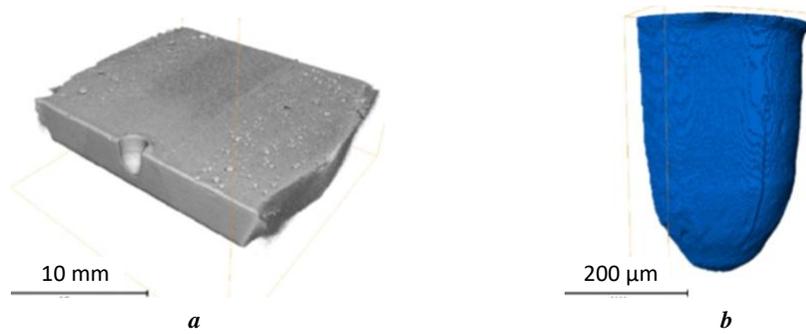


Рис. 5. 3D-визуализация томографических данных области сварного шва (а) и искусственного питтинга (b) после коррозионных испытаний в среде хлорида железа III в течение 216 ч
Fig. 5. 3D-visualization of the tomography data of the welding seam area (a) and artificial pitting (b) after corrosion tests in ferrous III chloride during 216 h

Таблица 3. Результаты гравиметрического анализа образцов сварного шва с искусственным питтингом, полученных по второй технологической схеме, до и после коррозионных испытаний
Table 3. The results of gravimetric analysis of samples of welding seam with artificial pitting produced according to the second technological scheme, before and after corrosion tests

№ образца	Результаты измерений, г		
	До коррозионных испытаний	После коррозионных испытаний	Предельные отклонения
1	470,015	470,008	0,007
2	395,162	395,160	0,002
3	425,317	425,298	0,019
4	483,512	483,495	0,017
5	503,151	503,140	0,011
6	465,917	465,903	0,014
7	497,816	497,805	0,011



Рис. 6. Поверхность стыковых сварных швов СММ с ВП после коррозионных испытаний в растворе хлорида железа (III) в течение 216 ч (×30):
a – без облицовочного слоя; **b** – с облицовочным слоем; 1 – сварной шов; 2 – околошовная зона
Fig. 6. The surface of butt weld joints of LMM with IP after corrosion tests in the ferrous III chloride solution during 216 h (×30):
a – without capping pass; **b** – with capping pass; 1 – welding seam; 2 – weld-adjacent zone

осуществлять электродной проволокой Св-06Х19Н9Т. Облицовочный слой в этом случае имеет ЭХП, аналогичный материалу верхнего слоя [18]. Питтинги, образующиеся в облицовочном слое, по количеству, размерам и характеру расположения идентичны питтингам верхнего слоя СММ с ВП (рис. 6 б). Характер коррозионного поражения в околошовной зоне аналогичен ранее рассматриваемому с анодным растворением протекторного слоя [19]. Плотность зарождения и развития питтингов в околошовной зоне многократно снижается и не превышает общестатистических значений для СММ с ВП [20].

В ходе проведения испытаний на статический изгиб контрольные сварные соединения, выполненные по второму технологическому варианту сварки, выдержали испытание на статический изгиб с углом загиба до 143° со стороны как основного слоя, так и плакирующих слоев. Большинство нормативных документов в машиностроении регламентируют данный угол загиба сварных швов в диапазоне от 20 до 60° ¹.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При картировании сварного соединения, выполненного по первому технологическому варианту, было установлено, что химический состав сварного соединения способствует образованию и развитию сквозной питтинговой коррозии на глубину, соответствующую толщине плакирующих листов. Таким образом, при выбранных толщинах плакирующих слоев по 2 мм реализация задачи формирования структуры шва, аналогичной СММ с ВП, оказалась невыполнимой. В этом случае шов не может гарантированно иметь ресурс работы на уровне СММ с ВП. Увеличение толщины слоев яв-

ляется контрпродуктивным приемом, так как приводит к значительному повышению металлоемкости всей конструкции.

Картирование сварного шва, выполненного по второму варианту, показало высокую однородность сварочной ванны со стороны плакирующих слоев. Ее заполнение электродным материалом с повышенным ЭХП (Св-10Х23Н60М9) оказалось технически реализуемым. Причиной столь высокой коррозионной стойкости сварного шва, по всей видимости, является его повышенный ЭХП относительно верхнего слоя СММ с ВП. В этом случае в данной гальванической паре верхний плакирующий слой выступает в роли протектора. В пользу этой версии свидетельствует активное развитие питтинговой коррозии основного металла в околошовной зоне (рис. 7). Такое негативное развитие событий, тем не менее, не является критическим, так как при достижении каким-либо питтингом протекторного слоя рост соседних питтингов останавливается, и дальнейшее коррозионное поражение развивается по рассмотренной схеме для СММ с ВП. Выполнение облицовочного прохода проволокой с аналогичным значением ЭХП верхнего слоя позволяет снизить вероятность возникновения питтингов в зоне сплавления сварного шва и основного металла. Об этом свидетельствуют ранее проведенные коррозионные испытания образцов.

Результаты гравиметрического анализа образцов свидетельствуют, что предлагаемая технология дуговой сварки СММ с ВП снижает вероятность образования питтингов на металле околошовной зоны. Данный технологический прием позволит эффективно внедрять данную технологию при изготовлении различных аппаратов и конструктивных элементов, работающих в высокоагрессивных средах.

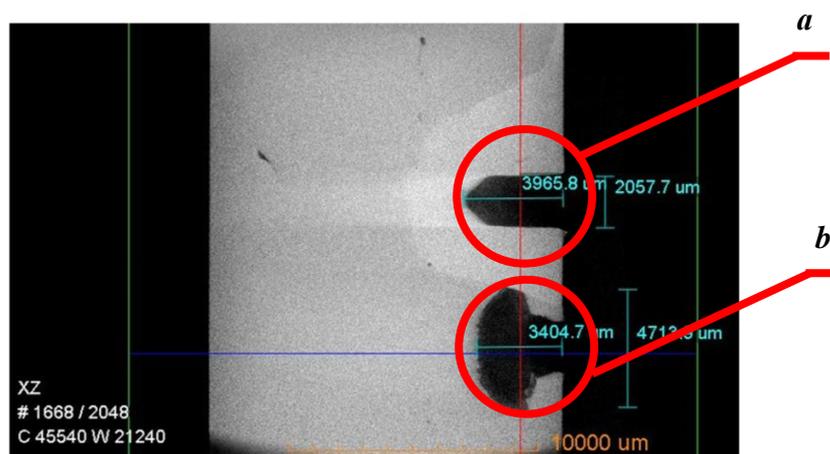


Рис. 7. Особенности коррозионного поражения искусственных питтингов в сварном шве (а) и околошовной зоне со стороны плакирующих слоев (б) СММ с ВП

Fig. 7. Peculiarities of corrosion damage of artificial pittings in a welding seam (a) and weld-adjacent zone from the side of cladding layers (b) of LMM with IP

¹ГОСТ 14019-2003 (ИСО 7438:1985). Материалы металлические. Метод испытания на изгиб. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.; ГОСТ 10885-85. Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1985. 14 с.; ГОСТ 6996-66 (ИСО 4136-89, ИСО 5173-81, ИСО 5177-81). Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2005. 44 с.

1. Предложены архитектура и состав слоев слоисто-металлического материала (СММ) с внутренним протектором (ВП), обеспечивающие устойчивую работу в высокоагрессивных средах при условии повышения коррозионной стойкости в сравнении с высоколегированными нержавеющими сталями аустенитного класса в 10 и более раз.

2. Разработана методика дуговой сварки слоистых материалов с внутренним протектором путем заполнения сварочной ванны со стороны плакирующих листов электродным материалом с электрохимическим потенциалом (ЭХП), превышающим аналогичный показатель верхнего слоя. Коррозионного поражения сварного шва в этом случае наблюдаться не будет. Обязательным является применение облицовочного слоя сварного шва с ЭХП, равным ЭХП верхнего слоя.

3. Результаты испытаний на статический изгиб сварных соединений (до 143°) свидетельствуют о возможности широко использовать разработанную промышленную технологию дуговой сварки СММ с ВП в химическом машиностроении для создания аппаратов и конструкций, работающих в высокоагрессивных средах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hou B., Li X., Ma X., Du C., Zhang D., Zheng M., Xu W., Lu D., Ma F. The cost of corrosion in China // *Materials Degradation*. 2017. Vol. 1. № 1. Article number 4. DOI: [10.1038/s41529-017-0005-2](https://doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2).
- Hong M.-S., Park Y., Kim J.G., Kim K. Effect of incorporating MoS₂ in organic coatings on the corrosion resistance of 316L stainless steel in a 3,5 % NaCl solution // *Coatings*. 2019. Vol. 9. № 1. Article number 45. DOI: [10.3390/coatings9010045](https://doi.org/10.3390/coatings9010045).
- 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: [10.1149/2.1381704jes](https://doi.org/10.1149/2.1381704jes).
- 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).
- Лось И.С., Первухин Л.Б., Перелыгин Ю.П., Гордолов 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, 2012. 18 с.
- Дидык Р.П., Козечко В.А. Формирование многослойных конструкций сваркой взрывом // *Черные металлы*. 2016. № 7. С. 66–70.
- Ma F.-Y. Corrosive Effects of Chlorides on Metals // *Pitting Corrosion*. 2012. P. 139–178. DOI: [10.5772/32333](https://doi.org/10.5772/32333).
- 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).

- Первухина О.Л., Денисов И.В. Двухслойные стали для ответственных металлоконструкций // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 11. С. 46–52.
- Сварка взрывом: процессы и структуры / под ред. Б.А. Гринберг, М.А. Иванова, С.В. Кузьмина, В.И. Лысака. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 236 с.
- 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.
- Гладковский С.В., Трунина Т.А., Коковихин Е.А., Вичужанин Д.И., Голубкова И.А. Формирование структуры и свойств слоистых соединений металлов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. № 4. С. 41–45.
- Лось И.С. Оценка коррозионной стойкости многослойных металлических материалов // *Вопросы материаловедения*. 2016. № 3. С. 138–144.
- Трыков Ю.П., Степанищев И.Б., Трудов А.Ф., Арисова В.Н. Структура и свойства сваренных взрывом композитов из разнородных сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 4. С. 31–33.
- Судник Л.В., Петров И.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Моисеев В.А. Перспективные направления применения биметаллов в машиностроении // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2015. № 2. С. 80–88.
- Зайцев А.И., Родионова И.Г., Амежнов А.В., Павлов А.А. Современные направления развития производства и применения двухслойных сталей // *Технология колесных и гусеничных машин*. 2013. № 3. С. 17–22.
- Кайдриков Р.А., Виноградова С.С., Журавлев Б.Л. Электрохимические методы оценки коррозионной стойкости многослойных гальванических покрытий. Казань: Казанский государственный технологический университет, 2010. 136 с.
- Зорин И.В., Соколов Г.Н., Дубцов Ю.Н., Лысак В.И., Фастов С.А. Композиционная проволока для дуговой наплавки: патент РФ № 2711286, 2020. 13 с.
- 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).
- Zhang S., Tan Y., Liang K. Electrochemistry study on the environmental factors of pitting corrosion of type 304 stainless steel // 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. 2011. P. 40047–4006. DOI: [10.1109/RSETE.2011.5965197](https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5965197).

REFERENCES

- Hou B., Li X., Ma X., Du C., Zhang D., Zheng M., Xu W., Lu D., Ma F. The cost of corrosion in China. *Materials Degradation*, 2017, vol. 1, no. 1, article number 4. DOI: [10.1038/s41529-017-0005-2](https://doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2).

2. Hong M.-S., Park Y., Kim J.G., Kim K. Effect of incorporating MoS₂ in organic coatings on the corrosion resistance of 316L stainless steel in a 3,5 % NaCl solution. *Coatings*, 2019, vol. 9, no. 1, article number 45. DOI: [10.3390/coatings9010045](https://doi.org/10.3390/coatings9010045).
3. 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, p. C180–C181. DOI: [10.1149/2.1381704jes](https://doi.org/10.1149/2.1381704jes).
4. 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).
5. Los I.S., Pervukhin L.B., Perelygin Yu.P., Gordoplov Yu.A., Pervukhina O.L., Kiriy G.V., Abramov P.I., Usatyy S.G., Kryukov D.B., Denisov I.V., Rozen A.A., Rozen A.E. *Mnogosloynny material povyshennoy korroziionnoy stoykosti (varianty) i sposoby ego polucheniya* [A multi-layer material with the advanced corrosion resistance (options) and the ways of its production], Evraziyskiy patent no. 016878, 2012. 18 p.
6. Didyk R.P., Kozechko V.A. The formation of multi-layer structures by explosion welding. *Chernye metally*, 2016, no. 7, pp. 66–70.
7. Ma F-Y. Corrosive Effects of Chlorides on Metals. *Pitting Corrosion*, 2012, pp. 139–178. DOI: [10.5772/32333](https://doi.org/10.5772/32333).
8. 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).
9. Pervukhina O.L., Denisov I.V. Two-layer steel for critical metal structures. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 11, pp. 46–52.
10. Grinberg B.A., Ivanova M.A., Kuzmina S.V., Lysaka V.I. *Svarka vzryvom: protsessy i struktury* [Explosion welding: processes and structures]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2017. 236 p.
11. 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.
12. Gladkovskiy S.V., Trunina T.A., Kokovikhin E.A., Vichuzhanin D.I., Golubkova I.A. Formation of structure and properties of lamellar composite metals. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*, 2010, no. 4, pp. 41–45.
13. Los I.S. Corrosion-resistance evaluation of multi-layered metal materials. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 3, pp. 138–144.
14. Trykov Yu.P., Stepanishchev I.B., Trudov A.F., Arisova V.N. Structure and properties of explosion-welded composites from various steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 4, pp. 31–33.
15. Sudnik L.V., Petrov I.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., Moiseev V.A. Advanced applications of bi-metal in mechanical engineering. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2015, no. 2, pp. 80–88.
16. Zaytsev A.I., Rodionova I.G., Amezhnov A.V., Pavlov A.A. Modern trends in development of production and use of double-layer steels. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin*, 2013, no. 3, pp. 17–22.
17. Kaydrikov R.A., Vinogradova S.S., Zhuravlev B.L. *Elektrokhimicheskie metody otsenki korroziionnoy stoykosti mnogosloynnykh galvanicheskikh pokrytiy* [Electrochemical methods of assessment of corrosion resistance of multi-layer galvanic coatings]. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet Publ., 2010. 136 p.
18. Zorin I.V., Sokolov G.N., Dubtsov Yu.N., Lysak V.I., Fastov S.A. *Kompozitsionnaya provoloka dlya dugovoy naplavki* [Composite wire for arc surfacing], patent RF no. 2711286, 2020. 13 p.
19. 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).
20. Zhang S., Tan Y., Liang K. Electrochemistry study on the environmental factors of pitting corrosion of type 304 stainless steel. *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, 2011, pp. 40047–4006. DOI: [10.1109/RSETE.2011.5965197](https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5965197).

Special aspects of arc welding of a laminated corrosion-resistant material

© 2021

Andrey E. Rozen^{1,3}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Head of Chair “Welding, Foundry Engineering, and Materials Science”
Sergey Yu. Kireev^{1,4}, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,

Dean of Faculty of Mechanical Engineering and Transport

Aleksey V. Dub^{2,5}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,

Head of Chair of Steel Metallurgy, Advanced Production Technologies, and Metal Protection

Ivan A. Safonov^{2,6}, PhD (Engineering), Associate Professor

Ekaterina A. Makarova^{2,7}, postgraduate student

Andrey A. Rozen^{1,8}, postgraduate student

Evgeny G. Isakov^{1,9}, graduate student

Andrey O. Korolkov^{*1,10}, graduate student

¹Penza State University, Penza (Russia)

²National University of Science and Technology MISIS, Moscow (Russia)

*E-mail: andreykorolkovracer@yandex.ru

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

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1295-7814>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9660-7370>

⁶ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8828-4532>

⁷ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9477-8806>

⁸ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3970-1707>

⁹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0679-6647>

¹⁰ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1367-623X>

Abstract: The paper shows the demand of the chemical industry for corrosion-resistant materials, as well as the prospects of the creation of laminated metal materials with internal protectors (LMM with IP). The authors offer the architecture and composition of layers of LMM with IP ensuring stable operation within the highly aggressive environment. The study identified the possibility of improving corrosion resistance ten and more times compared to high-alloy austenitic stainless steels. The authors show the efficiency of the application of explosion welding to produce LMM with IP. The paper considers the example of the production of a four-layer material with one internal protector made of low-alloyed, low-carbon steel of the following architecture: 2-mm layers of 12H18N10T + 09G2S + 12H18N10T plates of steel and the base 10-mm layer of 09G2S. The authors developed the process diagrams for performing butt-welded joints of such material, identified special aspects of the formation of its microstructure and properties. To obtain the maps of specific chemical elements distribution in the layers and interlayer boundaries, the authors used the energy-dispersive microanalysis method. Peculiarities of corrosion damage of a welded seam and weld-adjacent area are studied. The study showed the necessity of using a facing layer in a welded seam. Microstructural, X-ray tomographic, and gravity-measuring studies proved the obtained results. To evaluate the quality of welded joint, the authors performed the corrosion tests of a welded seam and weld-adjacent area, carried out visual inspection control and X-ray tomography. The corrosion tests were carried out using 10-% III ferrous chloride water solution. The paper presents the results of the static bending tests of a welded joint. The absence of fracture, lamination, and cracks served as an estimation criterion. The study identified the possibility of obtaining a defect-free welded joint of LMM with IP with high corrosion resistance and advanced mechanical properties.

Keywords: pitting corrosion; laminated metal material; internal protector; electrochemical potential; arc welding of laminated materials; arc welding of laminated metal materials; welded seam mapping; 10H23N60M9; Sv-08G2S; Sv-06H19N9T; 12H18N10T; 09G2S.

Acknowledgements: The work was carried out within the project No. 0748-2020-0013 “Scientific principles of formation of heterogeneous structures using the physical-chemical dispersion methods” (government assignment to the higher education institution in the sphere of scientific research. The customer is the RF Ministry of Science and Higher Education) and the competitive tender “Rector’s Grants” of Penza State University, the agreement No. XII-71/21 dtd. 19.04.2021.

For citation: Rozen A.E., Kireev S.Yu., Dub A.V., Safonov I.A., Makarova E.A., Rosen 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.