

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-11-282-23-31

*Л. Б. Первухин, д-р техн. наук, Д. В. Ноняк, начальник цеха,
О. Л. Первухина*, д-р техн. наук, И. В. Денисов*, канд. техн. наук*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕМОНТА ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛИТ СТАЛЬ-ТИТАН СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

ООО «Битруб Интернэшнл», г. Красноармейск, bitrub@mail.ru

** ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, opervukhina@mail.ru*

Экспериментально показана возможность ремонта путём повторного плакирования сваркой взрывом дефектов сплошности соединения слоёв, возникших в процессе изготовления плит биметаллических «сталь+титан» сваркой взрывом. Проведена комплексная оценка качества повторного плакирования по сплошности и прочности соединения в различных зонах плиты. Методом магнитной памяти металлов определен уровень напряженно-деформированного состояния в объеме биметалла. Показано, что термообработка по заданному режиму снимает напряжения в области повторного плакирования до исходных. Даны рекомендации по ремонту дефектов сплошности повторным плакированием сваркой взрывом и приведены результаты ремонта.

Ключевые слова: сварка взрывом, биметалл, дефекты, механические свойства, напряженно-деформированное состояние

L. B. Pervukhin, D. V. Nonyak, O. L. Pervukhina, I. V. Denisov**

STUDY OF THE POSSIBILITY OF REPAIRING CONTINUITY DEFECTS IN STEEL-TITANIUM BIMETALLIC PLATES USING EXPLOSION WELDING

Bitrub International, Krasnoarmeysk, bitrub@mail.ru

** Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, opervukhina@mail.ru*

The possibility of repair by re-cladding by explosion welding of continuity defects in the connection of layers that arose in the process of manufacturing bimetallic "steel + titanium" plates by explosion welding has been proven by experiments. The quality of re-cladding in terms of continuity and joint strength in different zones of the slab was comprehensively assessed. Using the magnetic memory method of metals, the level of stress-strain state in the volume of the bimetal was determined. It has been shown that heat treatment according to a given regime relieves stress in the area of re-cladding to the original value. Recommendations are given for repairing continuity defects by re-cladding and the results of the repair are shown.

Keywords: explosion welding, bimetal, defects, mechanical properties, stress-strain state

В настоящее время в России и за рубежом единственным промышленным методом производства биметалла «сталь+титан» является сварка взрывом. Этот биметалл используется при изготовлении ответственного оборудования в атомном и нефтехимическом машиностроении, судостроении, поэтому к нему предъявляются высокие требования по сплошности и прочности соединения слоёв. Необходимо отметить, что даже при хорошо отработанной технологии могут встречаться различные дефекты, появление которых связано с нестабильностью детонации заряда, отрицательной температурой

окружающей среды, свойствами исходных материалов, нарушением технологии. В работах [1, 2] проведена классификация дефектов и показано, что наиболее распространённый дефект – непровар (дефект сплошности), появление которого обычно связано с изменением скорости детонации крупногабаритного плоского заряда или её затуханием. Риск возникновения такого дефекта может быть связан с наличием сварных швов, выполняемых аргонодуговой сваркой для укрупнения плакирующего слоя, а также изменением поведения титана при отрицательных температурах [3].

При появлении дефектов сплошности в биметалле с плакирующим слоем из коррозионностойкой стали возможен ремонт путём удаления дефектного участка и последующей наплавки. В случае применения плакирующего слоя из титана подобный ремонт невозможен. Растворимость железа в α -Ti, крайне мала и при комнатной температуре составляет 0,05-0,10 %. При концентрации железа более 0,1% в сплаве образуются интерметаллические соединения TiFe и TiFe₂. Появление интерметаллидов в сплаве Ti-Fe значительно повышает прочность, но резко снижает пластичность биметалла. Например, твёрдость сплава с 0,14 % HV 199, а с 2,2 % Fe не менее HV 450. Удлинение при разрыве составляет соответственно 18,5 и 2,5 % [4]. При дуговой сварке титана с железом не удастся получить сварной шов с содержанием железа в пределах растворимо-

сти его в титане. Сварка титана с углеродистыми сталями сопровождается выделением в шве карбидов титана, которые также являются причиной образования хрупких трещин. Кроме того, при сварке плавлением возникают затруднения из-за насыщения титана кислородом, азотом и водородом при нагреве до температур, превышающих 400 °С. Это также понижает пластичность сварного соединения [5]. Отмеченные особенности не позволяют осуществлять качественный ремонт биметалла «сталь+титан» и плита биметаллическая площадью 10-25 квадратных метров бракуется из-за дефекта сплошности площадью свыше 0,2 квадратных метра.

В связи с этим в данной работе поставлена цель экспериментально исследовать возможность ремонта дефектов сплошности соединения слоёв путём повторного плакирования сваркой взрывом и провести экспе-

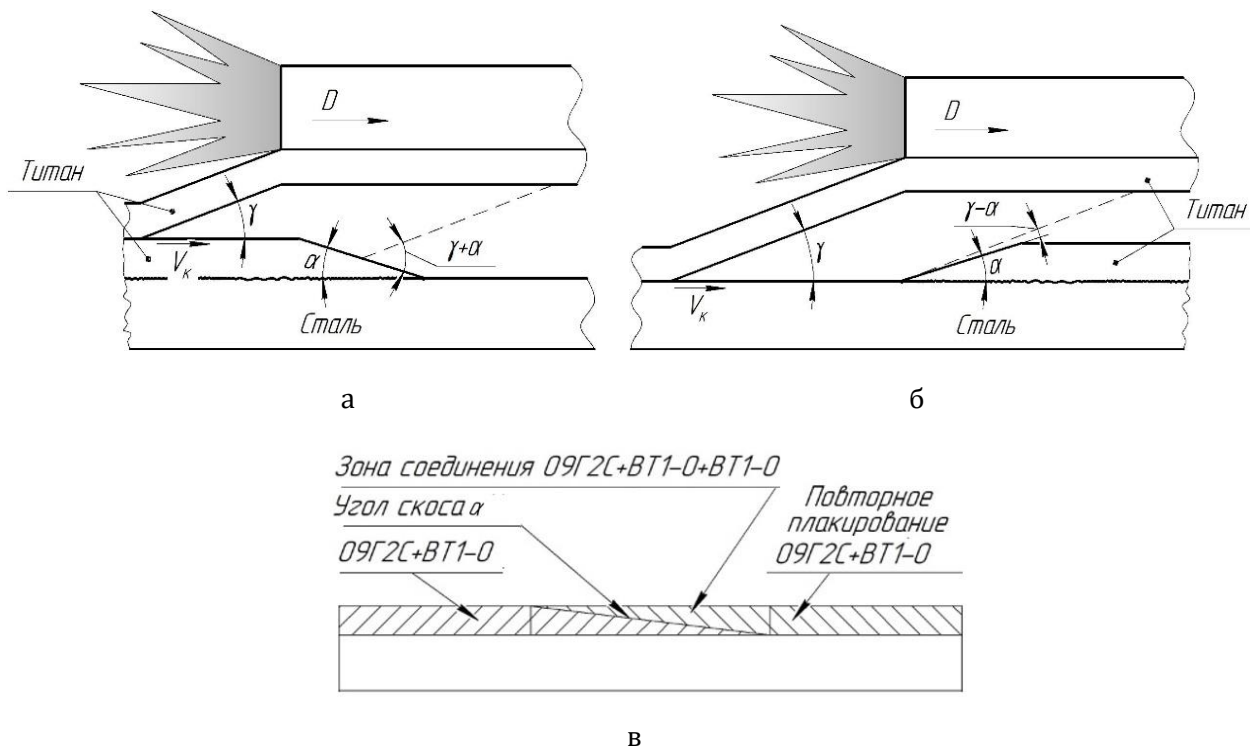


Рис. 1. Схема процесса соударения при ремонте дефекта сваркой взрывом, точка контакта набегает на скос: при спуске (а) и при подъёме (б), после повторного плакирования и удаления излишек восстановленного титанового слоя (в)

рименты на плитах натуральных размеров.

Методика исследований предусматривала:

- Разработку технологии ремонта дефектов сплошности соединения путём повторного плакирования дефектных участков.
- Проведение экспериментов по ремонту дефекта на опытной плите с исследованием свойств соединения в различных зонах.
- Разработку рекомендаций по ремонту дефектов сплошности в плитах биметаллических «сталь+титан» повторным плакированием сваркой взрывом и контролю качества, проведенного ремонта дефекта сплошности.

Разработка технологии ремонта

Дефекты сплошности соединения слоёв носят случайный характер и появляются по мнению авторов [1, 6] вследствие исчезновения сварочного зазора, наличия поверхностных загрязнений, нарушения гомогенности смесового заряда ВВ, искривления фронта детонации. При детонации крупногабаритных зарядов аммиачно-селитренных ВВ в толщинах близких к критическим воз-

можен переход процесса детонации в режим самораспространяющегося взрывного процесса, описанный в работах К.К. Шведова [7] Смена режима детонации может быть локальной, что приводит на этих участках к появлению непроваров, а также вырывов плакирующего слоя. Форма и размеры участков дефектов сплошности могут быть различными и появляются при сварке титана чаще всего в краевых зонах.

Основная задача при разработке технологии ремонта: получить при повторном плакировании гомогенный плакирующий слой титана по всей площади плиты, то есть обеспечить прочное соединение не только титана со сталью, но и титана с титаном за пределами дефекта, то есть в переходной зоне. Для этого слой титана в дефектной зоне выбирается до поверхности стали, производится капиллярная дефектоскопия по границам дефекта и выполняется переходная зона в плакирующем слое плиты с определённым углом α , величина которого назначается с учётом следующего.

В переходной зоне в зависимости от начала процесса сварки взрывом будет изменяться угол соударения (рис. 1), условия



а



б

Рис. 2. Вырыв плакирующего слоя в краевой зоне биметаллической плиты 09Г2С-13 + ВТ1-0 до подготовки к ремонту (а) и после подготовки (б)

формирования соединения, а следовательно, и качество сварки. Рассмотрим изменение угла соударения в процессе сварки взрывом в зоне соединения титана с титаном. Для получения соединения в титане плакирующего слоя выполнен скос с углом α . Возьмём два крайних положения: процесс сварки с углом соударения γ набегаёт на скос при спуске (рис. 1, а) и подъёме (рис. 1, б). В первом случае соударение будет происходить под углом $\gamma + \alpha$, для получения качественной сварки необходимо подобрать угол скоса α таким, чтобы угол $\gamma + \alpha$ был меньше максимального критического угла соударения. В втором случае $\gamma - \alpha$ должен быть больше минимального критического угла соударения, при равенстве угла соударения γ и угла скоса α соединение титана с титаном не будет образовываться. Учитывая изложенное, необходимо при выборке дефекта и подготовки поверхности к повторному плакированию обеспечить угол скоса α на 5° меньше расчётного угла соударения γ для заданного режима сварки. Следует отметить, что не только угол соударения, но и сварочный зазор в этом случае будет переменным. Следо-

вательно, будут переменными кинематические параметры (угол и скорость соударения), которые определяют качество соединения.

Переходная зона в биметалле после повторного плакирования и удаления излишка восстановленного титанового слоя будет иметь вид, представленный на схеме (рис. 1, в).

Результаты экспериментов и обсуждение

Эксперименты по повторному плакированию проведены при ремонте вырыва титана в краевой зоне биметаллической плиты 09Г2С-13 + ВТ1-0 размерами 40(35+5)х3670х6320 мм (рис. 2, а).

Поверхность стали и выполнение скоса в переходной зоне плакирующего слоя проводилось абразивными кругами, угол скоса был принят $7 - 9^\circ$, длина скоса примерно 50 мм. Размеры плакирующего листа были на 100 мм больше размеров дефекта. Дефект после подготовки показан на рис. 2, б.

При проведении повторного плакирования сваркой взрывом были приняты меры, исключающие деформацию и образование трещин в биметаллической плите, преду-



а



б

Рис. 3. Вид дефектного участка после повторного плакирования сваркой взрывом (а) и после удаления излишка восстановленного титанового слоя (б)

смотренные по технологии сварки взрывом. Ультразвуковой контроль сплошности не выявил дефектов (рис. 3, мелом показаны контуры дефекта сплошности до повторного плакирования).

После удаления излишек восстановленного титанового слоя и зачистки поверхности была проведена капиллярная дефектоскопия, которая не выявила расслоений в переходной зоне.

Для исследования влияния повторного плакирования (ремонта) на свойства биметалла «сталь+титан» после ремонта, термообработки при $500 \pm 20^\circ\text{C}$ и правки биметаллической плиты был отобран темплет (рис. 4), включающий зону соединения 09Г2С + ВТ1-0 без ремонта, зону с повторным плаки-

рованием, и промежуточная зона соединения 09Г2С + ВТ1-0 + ВТ1-0. Для точного определения границ промежуточной зоны соединения 09Г2С + ВТ1-0 + ВТ1-0 торцы темплета были механически обработаны. От темплета были отобраны образцы (рис. 4) для механических испытаний на отрыв плакирующего слоя: №1, №2 с зон соединения 09Г2С + ВТ1-0 (2 шт.); №3, №4 09Г2С + ВТ1-0 с зоны повторного плакирования (2 шт.). Для оценки прочности соединения 09Г2С + ВТ1-0 + ВТ1-0 отобраны: образец №5 - для испытания на изгиб в сторону плакирующего слоя; образец №6 - для последующего изготовления плоских образцов на растяжение плакирующего слоя в зоне соединения «титан+титан»; образец №7 - для испытаний на

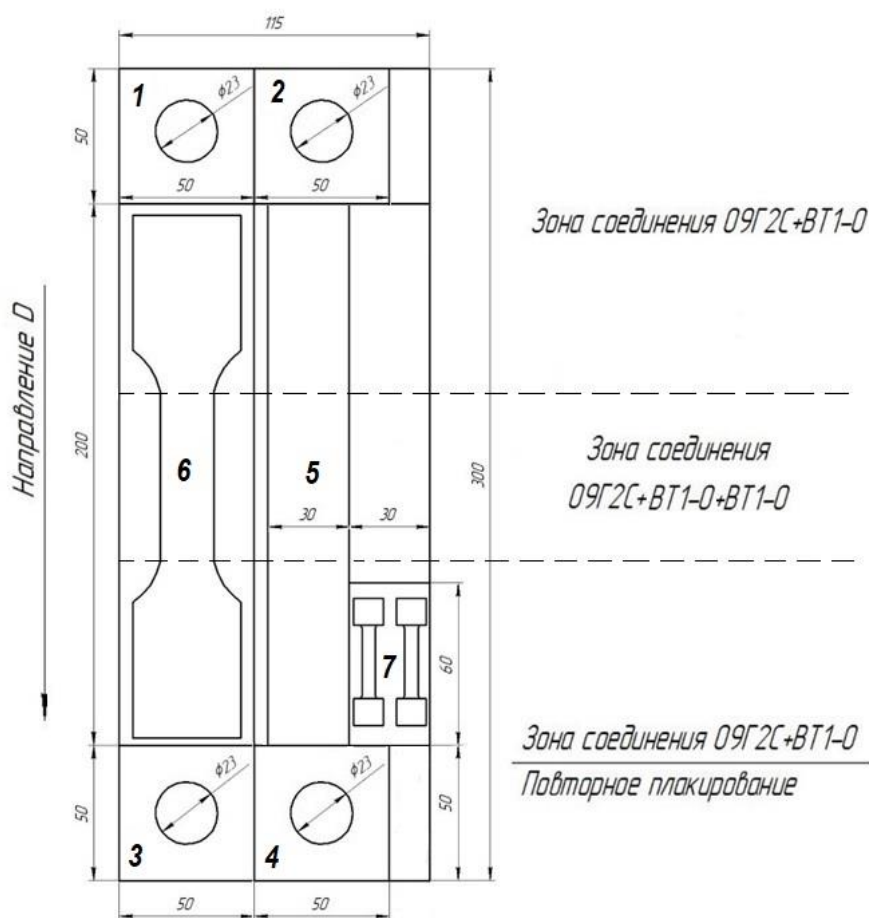


Рис. 4. Схема вырезки образцов из темплета

растяжение основного слоя цилиндрических образцов.

Результаты механических испытаний показали, что при повторном плакировании прочность соединения 09Г2С+ВТ1-0 соответствует прочности соединения слоёв в плите до ремонта и не изменилась в зоне, прилегающей к переходной зоне (таблица). Испытания на растяжения показали, что переходная зона (соединение «титан+титан» разрушается как монометалл, расслоений нет (рис. 5, а). Предел прочности на растяжение оказался выше, чем исходного титана ВТ1-0. При испытаниях на изгиб в переходной зоне не выявлено отслоений как между

плакирующим и основным слоем, так и в соединении титана с титаном (рис. 5, б). В результате повторного плакирования и термообработки прочность основного слоя также не изменилась.

В дополнении к механическим испытаниям в настоящей работе была проведена экспериментальная оценка изменения уровня напряженно-деформированного состояния методом магнитной памяти металла (ММП) до и после повторного плакирования, а также последующей термообработки и правки биметаллической плиты.

Регистрация магнитного поля рассеивания осуществлялась со стороны основного

Результаты механических испытаний

Номер образца	Прочность соединения на отрыв $\sigma_{отр}$, МПа	Изгиб в сторону титана, 120°	Прочность на растяжение, МПа	Примечание
1	160±5	–	–	До ремонта
2	150±5	–	–	До ремонта
3	200±5	–	–	После ремонта
4	205±5	–	–	После ремонта
5	–	расслоений не обнаружено	–	В зоне соединения 09Г2С+ ВТ1-0 + ВТ1-0
6	–	–	550	В соединении ВТ1-0 + ВТ1-0
7	–	–	580, 610	Сталь 09Г2С



а



б

Рис. 5. Образцы №5 и №6 после испытаний на растяжение (а) и изгиб (б)

слоя с помощью измерительной системы ИКН-4М-16 со сканирующим устройством Тип 1, вектор сканирования совпадал с направлением детонации при повторном плакировании титанового слоя (рис. 6, а). Для каждой линии сканирования была получена своя магнитограмма (рис. 6, б), при расшифровке которой определяли аномальные значения градиента поля (dH/dx), которые, в свою очередь, указывают на расположение зон концентрации напряжений в металле, а также на их протяженность. Подробная методика расшифровки магнитограмм изложена в работе [8].

Исследования полученных магнитограмм основного слоя до и после повторного плакирования титанового слоя сваркой взрывом выявили изменения значений градиента поля (dH/dx) (рис. 6, б). Уровень напряженно-деформированного состояния в области повторного плакирования в объеме биметалла увеличивается по сравнению с уровнем до восстановления плакирующего титанового слоя в 5 раз до 10 (А/м)/мм, что связано с деформациями изгиба слоев биметалла при нагружении в процессе сварки взрывом. Далее происходит изменение вида

деформации на сдвиговую (линейную), возникают механизмы растяжения в средней области повторного плакирования, которые приводят к приращению градиента поля (dH/dx) до 15 (А/м)/мм.

Нелинейное распределение градиента поля (dH/dx) по длине L области повторного плакирования (рис. 6, б) свидетельствует о возникновении высокого уровня остаточных напряжений.

Для снижения уровня остаточных напряжений в биметалле применяли последующую термическую обработку по режиму, указанному в [9], чтобы обеспечить достаточную пластичность слоев для механической холодной правки плит без образования трещин и разрушений. После термообработки остаточные напряжения в биметалле после ремонта снизились до исходных (рис. 6, б).

На основании проведенных исследований были разработаны рекомендации по ремонту дефектов сплошности в плитах биметаллических «сталь+титан» повторным плакированием сваркой взрывом и контролю качества. Рекомендуется следующий порядок ремонта плиты биметаллическая

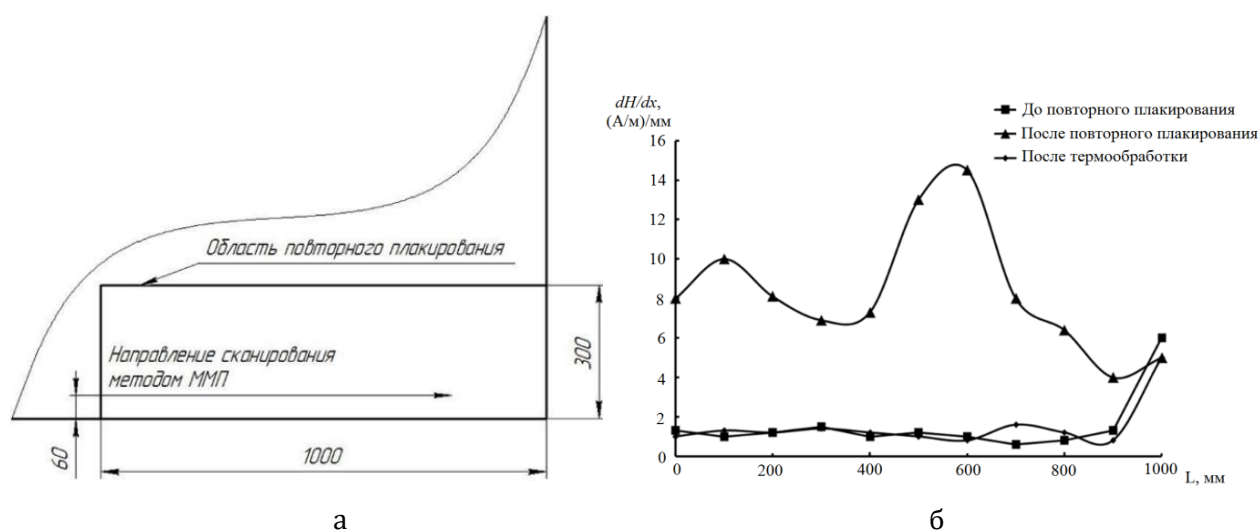


Рис. 6. Схема сканирования ММП (а) и график зависимости градиента поля (dH/dx) от длины L области повторного плакирования (б)

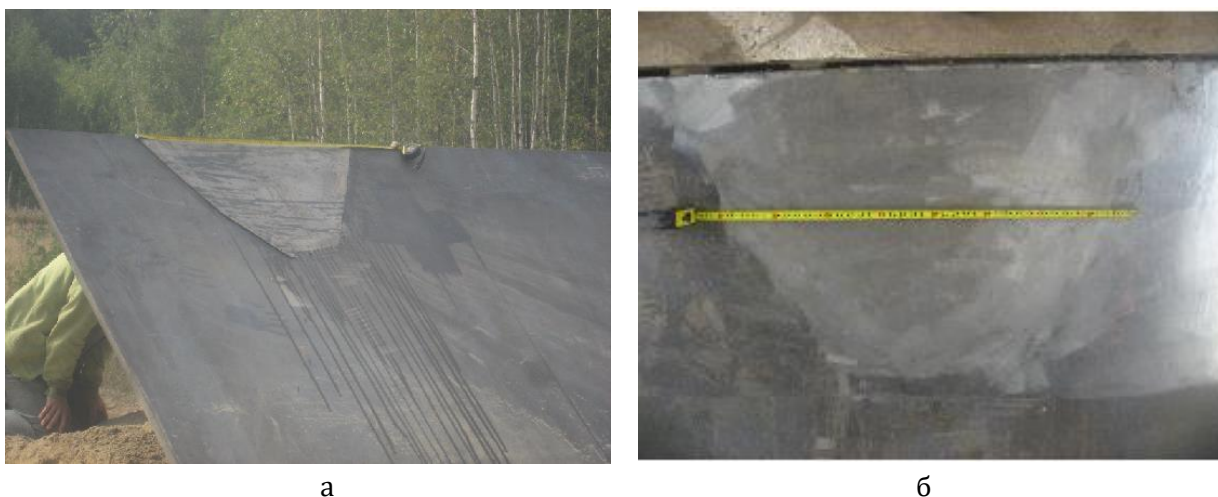


Рис. 7. Ремонт повторным плакированием биметаллической плиты марки 09Г2С-13+ВТ1-0 после сварки взрывом (а), после обработки шлифованием (б)

«сталь+титан»: проводится термическая обработка и механическая правка, затем ультразвуковой дефектоскопией определяются границы дефекта сплошности и механической обработкой удаляется дефектный участок. По периметру дефекта в плакирующем слое создаётся переходная зона с углом скоса α на 5° меньше расчётного угла соударения γ для заданного режима сварки. Плакирующий лист из титана изготавливается размером, превышающим по длине и ширине дефектный участок на 150 -200 мм. Собирается пакет и производится сварка взрывом, последующий контроль сплошности соединения, механическая обработка поверхности, термическая обработка и механическая правка.

На рис. 7 представлена плита биметаллическая 09Г2С-13 + ВТ1-0, размерами 60(55+5)×2600×3406 мм, после повторного плакирования сваркой взрывом. Контроль УЗК выявил 100% сплошность соединения слоёв по всей поверхности ремонтного участка. Капиллярная дефектоскопия не выявила трещин и несплошностей в переходной зоне.

Выводы

1. Разработана и применена технология восстановления плакирующего слоя методом повторного плакирования крупногабаритного биметалла марки 09Г2С-13 + ВТ1-0, произведенного сваркой взрывом.

2. Экспериментально показано, что технология повторного плакирования обеспечивает 100% сплошность соединения, заданную прочность соединения в зоне ремонта, включая переходную зону.

3. Термообработка биметаллической плиты «сталь+титан» после восстановления плакирующего слоя снижает уровень остаточных напряжений в биметалле до значений, наблюдаемых до восстановления.

4. Разработаны рекомендации по ремонту дефектов сплошности в плитах биметаллических «сталь+титан» повторным плакированием сваркой взрывом и контролю качества.

5. Проведен ремонт штатной плиты 09Г2С-13 + ВТ1-0, размером 60(55+5)×2600×3406 мм, с обеспечением 100% сплошности соединения слоёв.

Библиографический список

1. Конон Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
2. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение. 2005. – 544 с.
3. Первухина, О. Л. Влияние температуры на деформацию и разрушение титана в процессе сварки взрывом в краевых зонах / О. Л. Первухина, И. В. Денисов, Т. А. Шишкин // Материаловедение. – 2016. – № 1. – С. 40-44.
4. Еременко, В. Н. Титан и его сплавы / В. Н. Еременко. – Акад. наук УССР. Ин-т металлокерамики и спец. сплавов. – 2-е изд., испр. и доп. – Киев : Изд-во Акад. наук УССР, 1960. – 500 с.
5. Бердыченко, А. А. Способы получения биметалла сталь-титан. Исторический обзор / А. А. Бердыченко // Ползуновский вестник. – 2017. – № 4. – С. 129-137.
6. Коррозионностойкий биметалл для сельхоз-машиностроения / Ю. А. Конон, В. Н. Фёдоров, Л. Б. Первухин, А. А. Быков. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
7. Шведов, К. К. Процессы детонации и взрыва гетерогенных конденсированных взрывчатых веществ / К. К. Шведов // Физические проблемы разрушения горных пород : Сборник трудов Третьей международной научной конференции, Абаза (Хакасия), 09–14 сентября 2002 года / Под редакцией академика К.Н. Трубецкого, д.т.н., профессора С.Д. Викторова. – Абаза (Хакасия): Новосибирское отделение издательства "Наука", 2003. – С. 19-24.
8. Ноняк, Д. В. Определение зон концентрации напряжений биметалла методом магнитной памяти металла / Д. В. Ноняк, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2018. – № 11(221). – С. 28-33.
9. Ноняк, Д. В. Изменения напряженно-деформированного состояния крупногабаритного биметалла ВТ1-0+09Г2С, полученного сваркой взрывом в процессе производства / Д. В. Ноняк, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 11(234). – С. 47-54.