

УДК 621.791

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-15-19

*В. Г. Шморгун, В. П. Кулевич, А. И. Богданов, В. Д. Гринцов, А. С. Махмутова***КИНЕТИКА РОСТА ДИФФУЗИОННЫХ ПРОСЛОЕК В СКМ 20880+АД1+ВТ1-0*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mv@vstu.ru

Показано, что диффузионная зона на межслойной границе сталь 20880 + алюминий АД1 состоит из двух прослоек: интерметаллида Fe_2Al_5 , расположенного со стороны стали и составляющего основную часть диффузионной зоны, и тонкой (до 10 мкм) прослойки интерметаллида FeAl_3 со стороны алюминия. Микротвердость диффузионной зоны ~ 12 ГПа. Установлено, что интенсивность роста диффузионной зоны на межслойной границе алюминий АД1+титан ВТ1-0 с фазовым составом TiAl_3 почти в полтора раза ниже, чем на межслойной границе сталь 20880 + алюминий АД1. Ее микротвердость ~5 ГПа.

Ключевые слова: сварка взрывом, микроструктура, фазовый состав, диффузионная зона, алюминиды железа, алюминиды титана

*V. G. Shmorgun, V. P. Kulevich, A. I. Bogdanov, V. D. Grintsov, A. S. Mahmutova***KINETICS OF GROWTH OF DIFFUSION LAYERS IN SCM 20880+AD1+VT1-0****Volgograd State Technical University**

It is shown that the diffusion zone at the interlayer boundary of steel 20880 + aluminum AD1 consists of two layers: the Fe_2Al_5 intermetallic compound located on the steel side and constituting the main part of the diffusion zone, and a thin (up to 10 μm) layer of the FeAl_3 intermetallic compound on the aluminum side. Microhardness of the diffusion zone ~ 12 GPa. It has been established that the intensity of growth of the diffusion zone at the interlayer boundary of aluminum AD1 + titanium VT1-0 with the phase composition TiAl_3 is almost one and a half times lower than at the interlayer boundary of steel 20880 + aluminum AD1. Its microhardness is ~5 GPa.

Keywords: explosion welding, microstructure, phase composition, diffusion zone, iron aluminides, titanium aluminides

Разработка новых технологических процессов получения покрытий с воспроизводимыми и стабильными свойствами в настоящее время является актуальной задачей. На кафедре «Материаловедение и КМ» предложена методика модифицирования поверхности титана путем диффузионной металлизации алюминидами титана, заключающаяся в сварке взрывом трехслойной сталь-алюминий-титан композиции с последующим диффузионным отжигом для формирования на границе сталь-алюминий интерметаллидных прослоек толщиной, достаточной для самопроизвольного отделения стального слоя. Для ее практической реализации необходимо было выполнить исследование структуры и свойств диффузионных зон на межслойных границах трехслойного композита сталь 20880+ алюминий АД1+ титан ВТ1-0, что и явилось целью настоящей работы.

Материалы и методика эксперимента

В качестве исходных материалов использовали листы стали марки 20880, алюминия АД1 и титана ВТ1-0 толщиной 1,6, 1 и 3 мм соответственно. Композиционную заготовку получали

сваркой взрывом по одновременной плоскопараллельной схеме на режимах, обеспечивающих прочность соединения на уровне алюминия АД1 (скорость соударения на границе сталь-алюминий 530 м/с, на границе алюминий – титан 590 м/с, скорость точки контакта 2000 м/с). Термическую обработку (ТО) проводили в печи SNOL 8.2/1100. Металлографические исследования осуществляли с применением оптической (модульный моторизованный микроскоп Olympus BX61 с фиксацией изображения цифровой камерой DP-12) и электронной (растровый электронный микроскоп Versa 3D) микроскопии. Химический состав оплавленного металла и диффузионной зоны определяли с помощью энергодисперсионного спектрометра EDAX Trident XM 4 (ЭДС). Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М с нагрузкой на индентор 50–100 г.

Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования структуры границы соединения сталь 20880 + алюминий АД1 после сварки показали наличие в начале пластины оплавленного металла в виде тон-

© Шморгун В. Г., Кулевич В. П., Богданов А. И., Гринцов В. Д., Махмутова А. С., 2024.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00231, <https://rscf.ru/project/24-29-00231/>.

ких (~ 10 мкм) участков небольшой протяженности. Их твердость не превышает ~ 3 ГПа, а площадь составляет в среднем $\sim 0,003$ мм² (рис. 1, а). В конце пластины (рис. 1, б) наблюдаются оплавы значительно большей толщины и протяженности со средней площадью $0,013$ мм², при этом

состав оплава остается неизменным. Результаты ЭДС анализа показали, что оплав, как и в соединении АД1+Ст3 [1], состоит из механической смеси алюминия с интерметаллидом FeAl_3 , а у границы со сталью обнаружена тонкая прослойка чистого интерметаллида FeAl_3 .

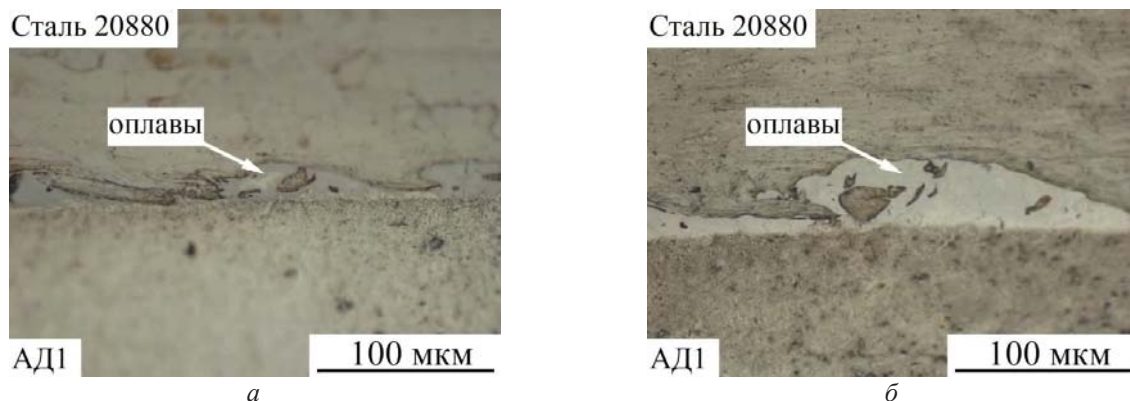


Рис. 1. Участки оплавленного металла на границе соединения сталь 20880-алюминий АД1 после сварки

Проведенный металлографический анализ границы соединения титан ВТ1-0 + алюминий АД1 в сваренном взрывом трехслойном композите позволил установить формирование

на межслойной границе сплошной прослойки оплавленного металла. В начале пластины ее толщина составляла 5–10 мкм (рис. 2, а), а в конце – 9–18 мкм (рис. 2, б).

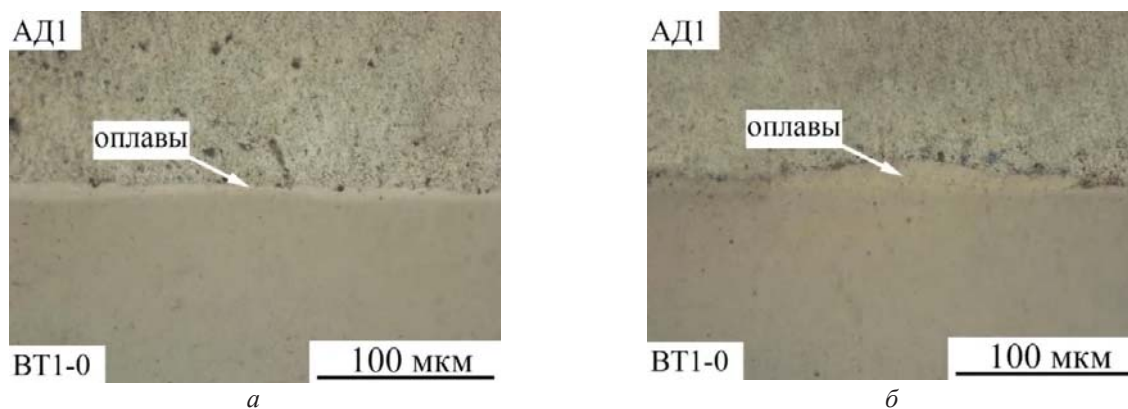


Рис. 2. Участки оплавленного металла на границе соединения алюминий АД1-титан ВТ1-0 после сварки

При больших увеличениях (рис. 3) выявлялась гетерогенная структура оплава, которая согласно результатам ЭДС, представляет собой включения состава 75 ат.% Al и 25 ат.% Ti (интерметаллид TiAl_3) в алюминиевой матрице (таблица). Микротвердость оплавленного металла менялась от 1,6 ГПа до 2,1 ГПа.

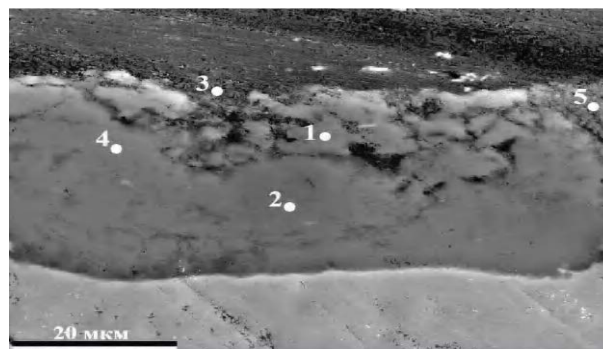


Рис. 3. СЭМ-изображение оплавленного металла на границе алюминий АД1-титан ВТ1-0 (точками указаны места ЭДС анализа химического состава)

Химический состав оплавленного металла

Зона	Содержание элементов, ат. %			Фаза
	Al	Ti	Fe	
1	77,1	22,4	0,5	TiAl ₃
2	74,7	24,8	0,5	TiAl ₃
3	95,0	4,8	0,2	Al
4	75,1	24,4	0,5	TiAl ₃
5	91,2	8,5	0,3	Al

Для формирования диффузионной зоны (ДЗ) на межслойной границе сваренного взрывом триметалла сталь 20880 + алюминий АД1+ титан ВТ1-0 его ТО проводили при температуре 600–640 °С в течение 0,5–20 ч. Выбор верхнего предела температурного диапазона обуславливался температурой эвтектического превращения, а нижний – значительным замедлением диффузионных процессов.

Обработка данных металлографического и энергодисперсионного анализа показала, что на малых временах выдержки со стороны стали

вдоль границы с оплавом начинает формироваться тонкая интерметаллидная прослойка Fe₂Al₅. После полного «поглощения» оплавов формируется сплошная ДЗ, состоящая из двух прослоек: интерметаллида Fe₂Al₅, расположенного со стороны стали и составляющего основную часть ДЗ, и тонкой (до 10 мкм) прослойки интерметаллида FeAl₃ со стороны алюминия (рис. 4). Увеличение времени ТО приводит к изменению средней толщины ДЗ (рис. 5), повышению разнотолщинности и количества дефектов. Микротвердость ДЗ составила ~ 12 ГПа.

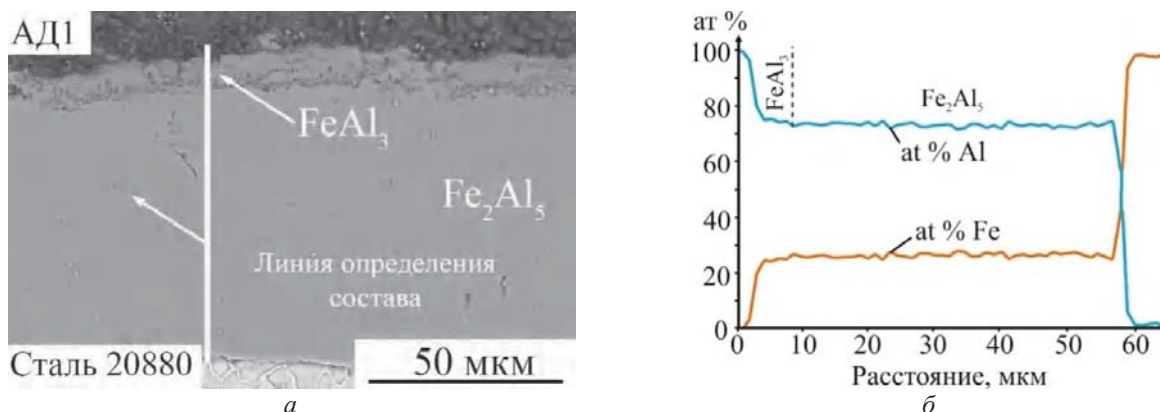


Рис. 4. СЭМ-изображение ДЗ границе алюминий АД1-сталь 20880 после ТО 640 °С, 5 ч (а) и распределение химических элементов по ее толщине (б)

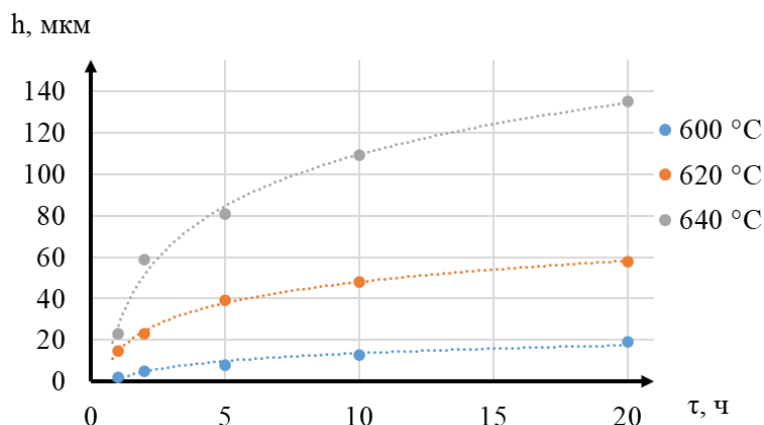


Рис. 5. Кинетика роста ДЗ на межслойной границе алюминий АД1-сталь 20880

Рост ДЗ на границе ВТ1-0 + АД1 начитается при более высоких температурах и временах выдержки. Из рис. 6, а видно, что после ТО 600 °С, 2 ч ДЗ практически неразличима. С увеличением температуры и времени вы-

держки образовавшаяся ДЗ росла по толщине и протяженности (рис. 6, б). Кинетика роста толщины ДЗ на границе ВТ1-0+ АД1 при нагреве образцов с выдержками до 20 ч представлена на рис. 7.

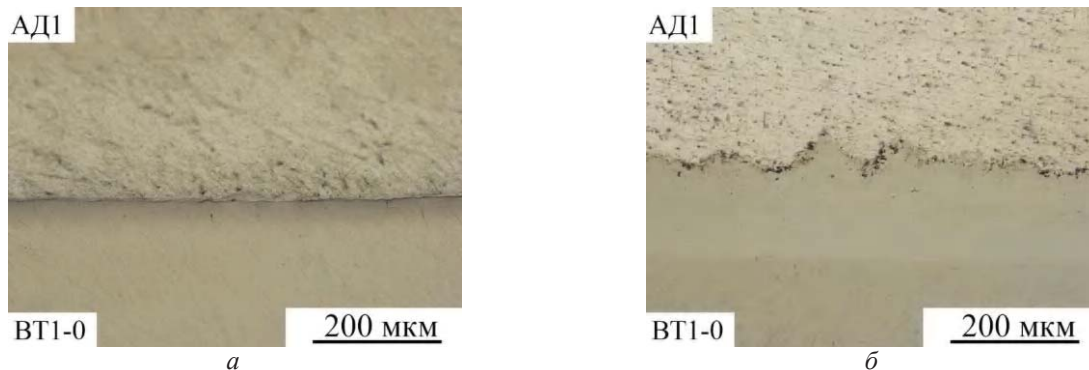


Рис. 6. Микроструктура ДЗ на границе алюминий АД1-титан ВТ1-0 после ТО при 600 °С, 2 ч (а) и 640 °С, 20 ч (б)

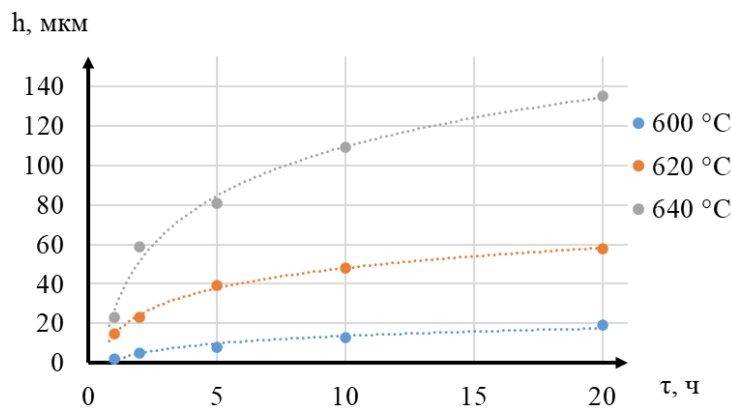


Рис. 7. Кинетика роста ДЗ на межслойной границе алюминий АД1-титан ВТ1-0

Исследования диффузионного взаимодействия между титаном и алюминием в процессе отжига при 600–640 °С показали, что интенсивность роста ДЗ почти в полтора раза ниже, чем на межслойной границе сталь 20880 + алюминий АД1.

Согласно результатам ЭДС анализа (сканирование по линии), в ДЗ в среднем содержится

~75 ат. % Al, ~25 ат. % Ti, т.е. состав соответствует интерметаллиду $TiAl_3$ (рис. 8). Аналогичный вывод о фазовом составе ДЗ был сделан и в работе [2]. Микротвердость ДЗ составляла 5,3–5,5 ГПа и не зависела от времени выдержки, что косвенно подтверждает стабильность ее фазового и химического состава.

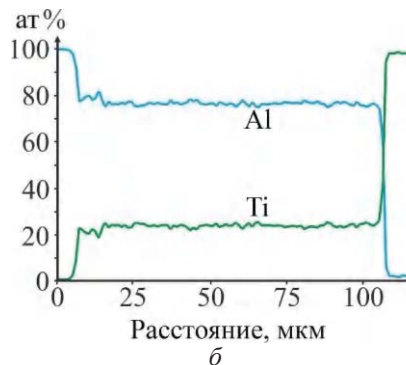
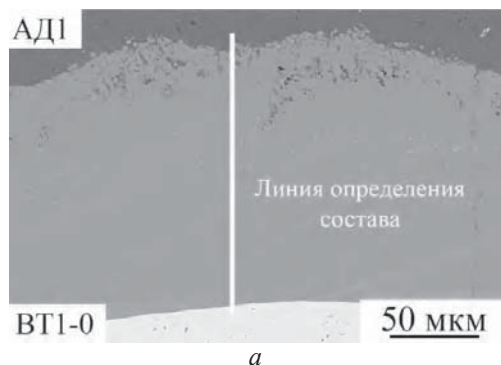


Рис. 8. СЭМ-изображение ДЗ на межслойной границе алюминий АД1-титан ВТ1-0 после ТО 640 °С, 20 ч и распределение химических элементов по ее толщине

Выводы

1. Диффузионная зона на межслойной границе сталь 20880 + алюминий АД1 состоит из двух прослоек: интерметаллида Fe_2Al_5 , расположенного со стороны стали и составляющего основную часть диффузионной зоны, и тонкой (до 10 мкм) прослойки интерметаллида FeAl_3 со стороны алюминия. Микротвердость диффузионной зоны ~ 12 ГПа.

2. Интенсивность роста диффузионной зоны на межслойной границе алюминий АД1+титан ВТ1-0 с фазовым составом TiAl_3 почти в полтора раза ниже, чем на межслойной границе сталь 20880 + алюминий АД1. Ее микротвердость ~ 5 ГПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шморгун, В. Г. Структура и фазовый состав локальных участков оплавленного металла в сваренном взрывом биметалле Ст3–АД1 / В. Г. Шморгун, Д. В. Пронычев, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, А. Д. Кинина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (205) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 54–57.

2. Трыков, Ю. П. Диффузия в слоистом титано-алюминиевом композите ВТ1-АД1 при повышенных температурах / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, А. Н. Жоров, В. Н. Арисова, Д. Н. Гурулев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении» ; вып. 1). – С. 5–8.