

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-11-294-30-36

**Н. Н. Ниёзбеков, м.н.с, А. Ю. Малахов, канд. техн. наук,
И. В. Денисов, канд. техн. наук, И. В. Сайков, канд. техн. наук**

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРО- И ФАЗООБРАЗОВАНИЯ НА ГРАНИЦЕ СОЕДИНЕНИЯ
BT1-0 – AMg6 И 08X18H10T – AMg6**

ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, nemat199595@mail.ru

В данной работе представлены результаты металлографических исследований биметаллических материалов BT1-0 – AMg6 И 08X18H10T – AMg6, полученных методом сварки взрывом и диффузионной сварки. Были исследованы структуры и фазовый состав локальных участков оплавленного металла. В ходе исследования было обнаружено, что при диффузионной сварке AMg6 с BT1-0 и 08X18H10T на границе соединения формируются непрерывные прослойки из интерметаллидов с различным фазовым составом. Эти прослойки приводят к расслоению композиционного материала.

Ключевые слова: сварка взрывом, граница соединения, алюминиево-магниевый сплав AMg6, коррозионностойкая сталь 08X18H10T, титан BT1-0

N. N. Niyozbekov, A. Yu. Malakhov, I. V. Denisov I. V. Saikov

**FEATURES OF STRUCTURE AND PHASE FORMATION AT THE WELD INTERFACE
OF THE VT1-0 – AlMg6 AND 08Cr18Ni10Ti – AlMg6**

**Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, nemat199595@mail.ru**

This paper explores the results of metallographic analysis of bimetallic materials formed by explosive welding and diffusion welding. The materials are made of VT1-0 and AlMg6, as well as 08Cr18Ni10Ti and AlMg6. The study focuses on the structure and phase composition of specific areas of melted metal in these materials. It was found that during diffusion welding between AlMg6 and VT1-0 or 08Cr18Ni10Ti, continuous interlayers of intermetallics with different phase compositions form at the weld interface. These interlayers can cause delamination in the composite material.

Keywords: explosive welding, weld interface, AlMg6 aluminum alloy, 08Cr18Ni10Ti stainless steel

Алюминиево-магниевые сплавы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Они обладают высокой пластичностью, коррозионной стойкостью и низкой плотностью. Их применяют для изготовления конструкций в судостроении, криогенном машиностроении, военной промышленности, а также для изготовления корпусов антенно-фидерных устройств на орбитальных комплексах [1, 2, 3, 4]. В силу недостаточного уровня прочности и жёсткости конструкций из алюминиевых сплавов, ответственные и нагруженные элементы изготавливают из стали или титановых сплавов. Например, в судостроительной промышленности корпус судна изготавливают из коррозионностойкой стали, а надстройки, палубные мосты и кожухи дымовых труб из

алюминиевых сплавов. Для соединения деталей из стали и титана с деталями из алюминиевых сплавов используют биметаллические переходники.

При соединении алюминиевых сплавов со сталью возникают значительные трудности из-за различия в их физико-химических и механических свойствах. Также на границе соединения образуются интерметаллические фазы, которые снижают прочность соединения. Аналогичные трудности возникают при сварке алюминиевых сплавов с титаном [5, 6].

Кроме интерметаллических фаз на прочность соединения также влияет наличие магния в составе алюминиево-магниевых сплавов. Авторы работы [7] отметили, что при диффузионной сварке листов из сплава

АМг6 и титана ВТ6 на границе соединения скапливается магний, который, имея высокий коэффициент диффузии, ускоряет процесс образования интерметаллических соединений [8]. Кроме того, скопившийся магний вступает в реакцию с кислородом, образуя тем самым хрупкий оксид магния. Данные химические неоднородности на границе соединения являются источниками остаточных напряжений и могут привести к расслоению.

С точки зрения сочетания прочностных и коррозионных свойств наиболее оптимальным среди сплавов системы Al-Mg является сплав АМг6. Поэтому получение биметаллических переходников АМг6–сталь и АМг6–титан с прочностью соединения не ниже прочности АМг6 представляет большой практический интерес и является актуальной задачей современного материаловедения.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании микроструктуры границы соединения композиционных материалов, полученных диффузионной сваркой и сваркой взрывом и проведении сравнительного анализа полученных данных.

Материалы и методика исследования

Для проведения экспериментов по сварке взрывом и диффузионной сварке использо-

вались следующие материалы: коррозионно-стойкая сталь 08Х18Н10Т, алюминиево-магниевый сплав АМг6 и титан ВТ1-0. В таблице 1 представлены физико-механические свойства исходных материалов.

На рисунке 1 представлена микроструктура исходных материалов. Структура АМг6 состоит из α -фазы (твердый раствор магния в алюминии) с размером зерен ~ 50 мкм и интерметаллической β -фазы Mg_2Al_3 , располагающейся преимущественно по границам зерен. Также в структуре АМг6 присутствуют включения $(Fe,Mn)Al_6$ округлой и эллипсоидальной формы (рис. 1, а).

Структура 08Х18Н10Т состоит из аустенита (γ -фаза) с небольшим содержанием феррита (δ -фаза). Зерна аустенита содержат крупные частицы Ti_2N и мелкие карбиды TiC . Титан характеризуется мелкозернистой структурой с размером зерна около 10 мкм (рис. 1, в). Внутри зерна наблюдаются двойники деформационного происхождения.

Методика проведения экспериментов по сварке взрывом представлена в работе [9]. Поверхности пластин перед сборкой схемы зачищались механическим способом, очищались от загрязнений и обезжиривались ацетоном. В качестве ВВ применялась смесь микропористой аммиачной селитры с дизельным топливом в соотношении 96:4. Для

Таблица 1 – Физико-механические свойства исходных материалов

Материалы	Физико-механические свойства			
	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Плотность, кг/м ³
АМг6	353 – 356	193 – 221	16,6–19,3	2640
ВТ1-0	375	–	20–30	4050
08Х18Н10Т	490–520	196–210	40–43	7900

Таблица 2 – Химический состав исходных материалов

Материалы	Химический состав, %											
	Al	Mg	Mn	Zn	Fe	C	Si	Cu	Ni	Cr	Ti	Примеси
АМг6	92,73	5,87	0,86	0,18	0,16	–	–	–	–	–	–	0,2
ВТ1-0	–	–	–	–	до 0,25	до 0,07	до 0,1	–	–	–	99,24 – 99,72	0,3
08Х18Н10Т	–	–	до 2	–	~65	до 0,08	до 0,8	до 0,3	9–11	17–19	–	0,1

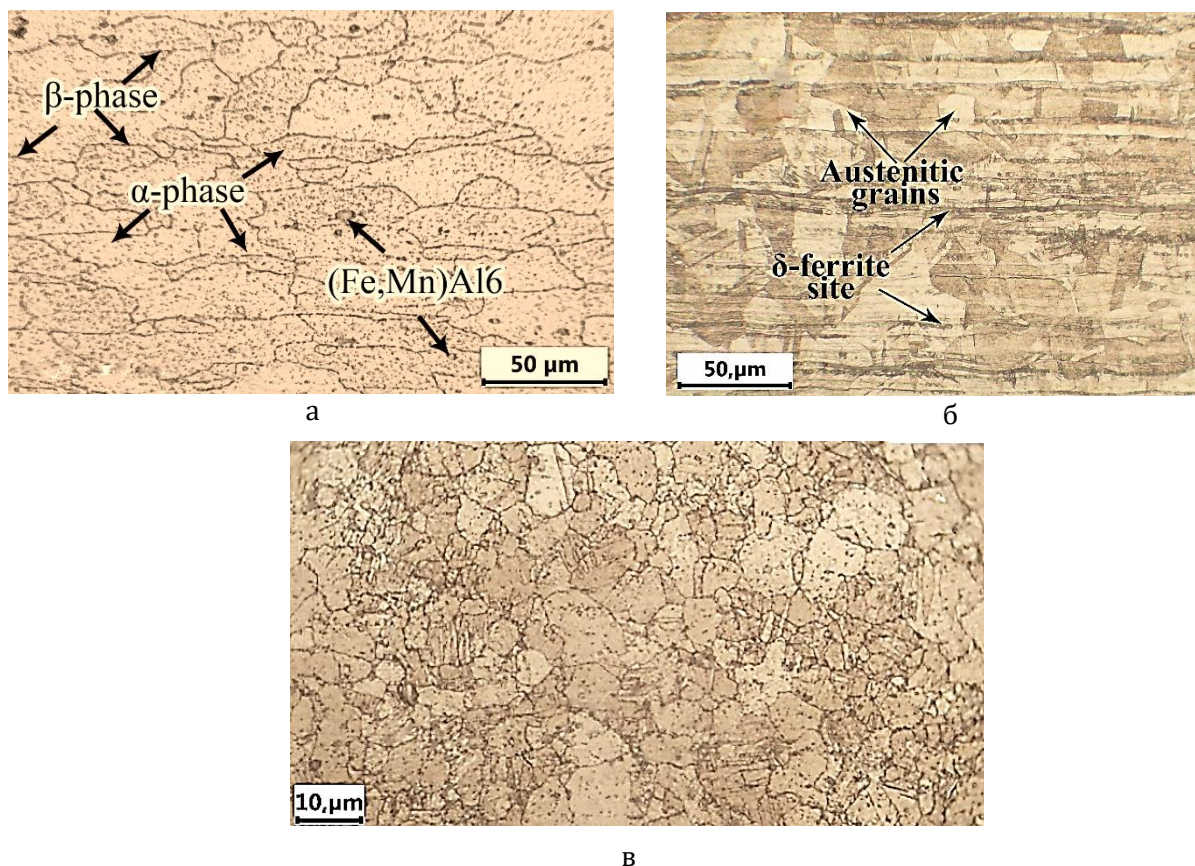


Рис. 1. Микроструктура исходных листов:
а – АМг6; б – 08Х18Н10Т; в – ВТ1-0

защиты наружной поверхности метаемой пластины от воздействия продуктов детонации использовалась полипропиленовая пленка толщиной 0,1 мм. Для уменьшения разброса и обеспечения полноты детонации ВВ использовалась забойка из песка. В таблице 3 представлены параметры режимов сварки взрывом.

Перед диффузионной сваркой поверхности пластин перед сваркой очищались от загрязнений механическим способом и обезжиривались этиловым спиртом. После очистки, свариваемые пластины (3 и 4) зажимались между двумя стальными пласти-

нами 1 и фиксировались крепежными элементами 2 (рис. 2). Готовые сборки помещались в вакуумную печь и подвергались термической обработке при температуре 590 ± 10 °C в течение 90 мин. Остаточное давление в печи составляло 30-50 Па.

Для выявления элементов микроструктуры образцов проводилось химическое травление поверхности образцов. Состав реактива подбирался индивидуально для каждого материала (таблица 4).

Для металлографических исследований использовался оптический микроскоп МЕТАМ ЛВ-34 с камерой ТС-500 и автоэмис-

Таблица 3 - Параметры режимов сварки взрывом

Основной слой	Метаемый слой	Скорость детонации, м/с	Параметр r	Угол соударения β , °
АМг6 (6×200×300 мм)	08Х18Н10Т (3×200×300 мм)	2500	0.96	11.1
АМг6 (6×200×300 мм)	ВТ1-0 (4×200×300 мм)	2500	1.8	12.1

сионный сканирующий электронный микроскоп сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55, Германия (Zeiss Ultra plus Field Emission Scanning Electron Microscope).

ница соединения имеет практически безволновой профиль с локальными участками оплавов. В оплавах на границе соединения АМг6-08Х18Н10Т (рис. 3, а) формировались поперечно-направленные трещины, что

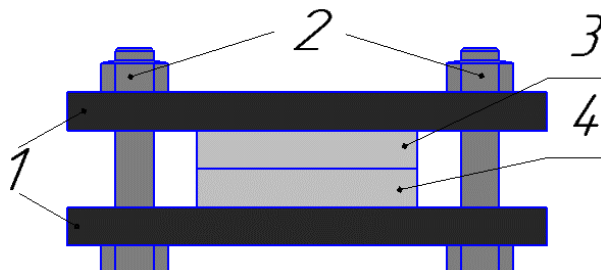
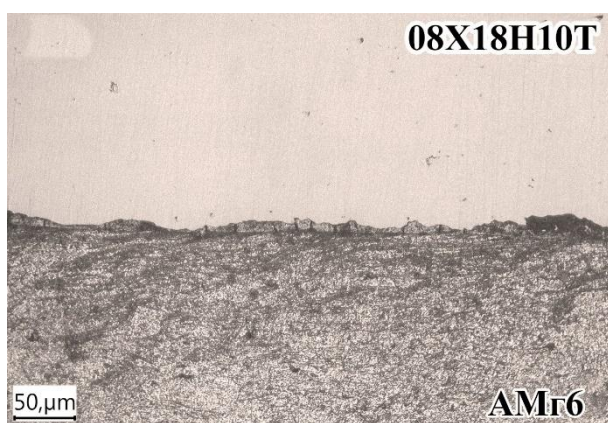


Рис. 2. Схематичное изображение пластины перед диффузионной сваркой:

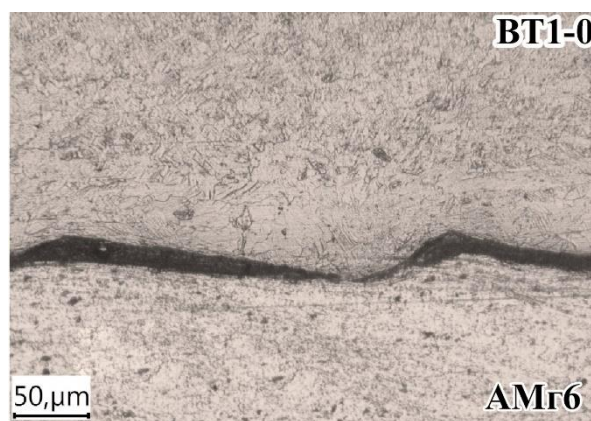
1 – стальные зажимы; 2 – крепежные элементы; 3 – АМг6 (4×20×30 мм);
4 – ВТ1-0 (3×20×30 мм) / 08Х18Н10Т (3×20×30 мм)

Таблица 4 – Растворы для выявления микроструктуры

№	Реактив	Материалы
1	1-5 мл HNO_3 , 2-3 мл HCl , 90-95 мл H_2O	Применяется для выявления микроструктуры алюминия и его сплавов
2	2.5 см ³ HF , 2.5 см ³ HNO_3	Применяется для выявления микроструктуры титана и его сплавов
3	3-5 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 20-25 мл HCl	Применяется для выявления микроструктуры аустенитных сталей



а



б

Рис. 3. Микроструктура границы соединения биметаллических образцов после сварки взрывом:

а – 08Х18Н10Т – АМг6; б – ВТ1-0-АМг6

Результаты и обсуждения

Сварка взрывом

На рисунке 3 представлены микроструктуры границы соединения сваренных взрывом образцов. Изучение микроструктур биметаллических образцов показало, что гра-

свидетельствует об образовании интерметаллических соединений Fe_xAl_y . Согласно работе [10] склонность оплавленных участков к образованию трещин определяется их объемом, химическим составом, структурой и формой.

На границе соединения АМг6–ВТ1-0 (рис. 3, б) трещины в оплавах обнаружены не были, так как известно, что оплавы с высоким содержанием алюминия, в которых частицы титана и интерметаллидов разделены алюминиевой матрицей, не склонны к растрескиванию. Это подтверждается результатами ЭДС анализа оплавленных зон (рис. 4).

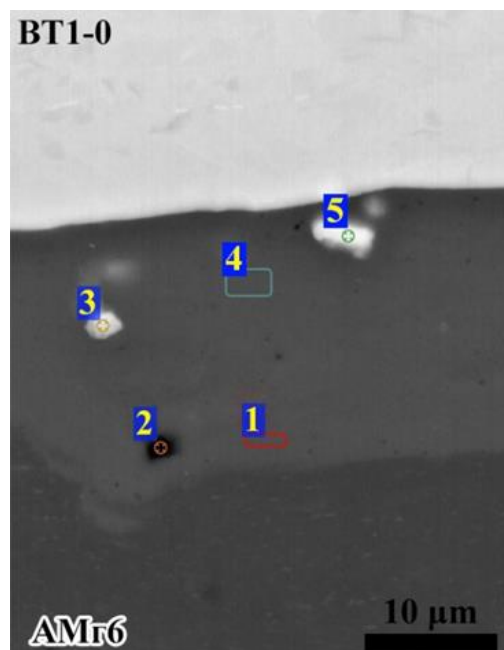


Рис. 4. СЭМ изображение границы соединения АМг6-ВТ1-0 после сварки взрывом и результаты ЭДС анализа

На рисунке 4 видно, что оплавленный слой сформировался со стороны алюминиевого сплава АМг6. Это произошло из-за большой разницы в температурах плавления между АМг6 и ВТ1-0, в результате чего в процессе сварки взрывом происходит расплавление поверхности алюминиевого сплава. Химический состав оплавов фактически представляет собой матрицу из алюминиевого сплава АМг6 с включениями из алюминидов титана. Кроме того, в оплавленном слое видны беспорядочно расположенные локальные частицы вторичных фаз. В частности, оксидов алюминия (рис. 4, точка 2) и частицы Al-Ti (рис. 4, точки 5 и 3.).

Диффузионная сварка

На рисунке 5 представлены результаты исследования микроструктуры 08Х18Н10Т–

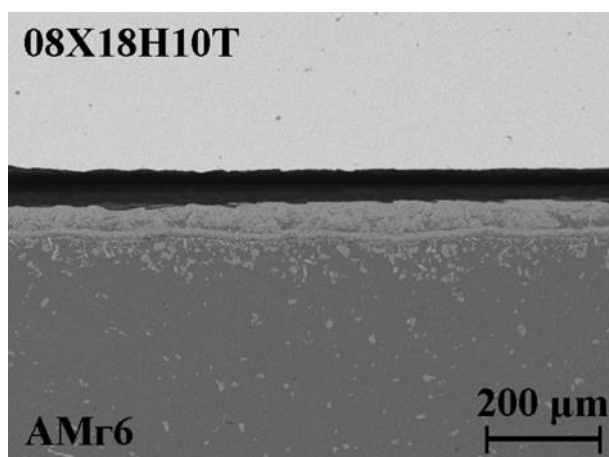
АМг6 после диффузионной сварки. На границе соединения образовалась сплошная прослойка переходного слоя. Толщина переходного слоя составляет 50-70 мкм. Образец 08Х18Н10Т – АМг6 в процессе механической обработки расслоился по границе соединения слоев (рис. 5, а).

В переходном слое образовались не-

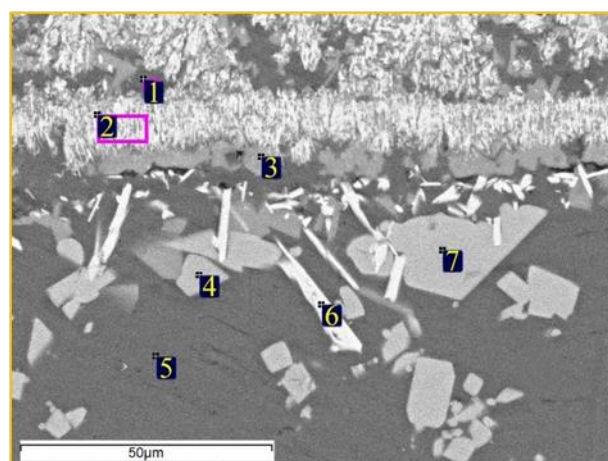
№	Al	Mg	Si	Ti	Mn	O
1	89.04	7.58	–	3.02	0.36	–
2	49.2	8.38	11.01	1.36	0.19	29.84
3	70.96	6.87	3.03	18.20	0.95	–
4	88.09	7.28	–	4.22	0.41	–
5	57.34	5.88	2.04	33.70	1.03	–

сколько фаз, отличающихся контрастностью (белые и серые), как показано на рисунке 5, б. В областях, примыкающих к 08Х18Н10Т белые фазы имеют дендритную форму (рис. 5, б, точка 2). С удалением от границы соединения форма белых фаз меняется от дендритной к игольчатой (рис. 5, б, точка 6). Белые фазы содержат все элементы коррозионностойкой стали и АМг6. Исходя из ЭДС анализа, диаграммы состояния и результатов термодинамического расчета в программе Thermo [11] можно предположить, что белые фазы как игольчатого, так и дендритного вида соответствуют фазе Al_3Ni , а серые – Al_3Fe .

Серые фазы вблизи границы соединения характеризуются высоким содержанием Mg (точка 2). Содержание Mg в этих фазах пре-



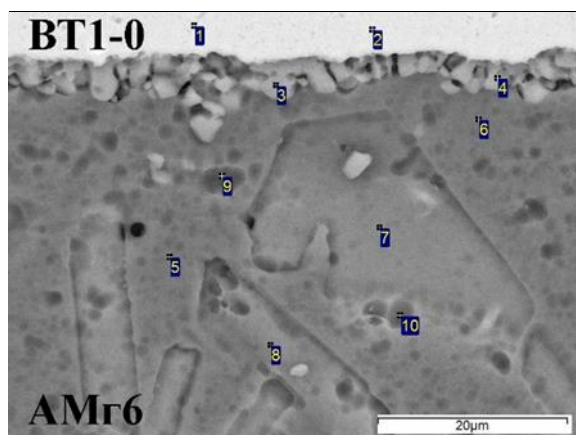
а



б

№	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
1	11,14	87,65	0,12	0,12	0,12	0,12	0,61	0,12
2	5,98	75,91	0,72	0,06	1,65	1,39	12,83	1,46
3	13,45	76,44	0,07	0,51	6,55	0,81	1,96	0,22
4	0,63	85,25	–	0,05	0,80	4,11	9,16	–
5	7,99	91,56	0,00	0,10	0,22	0,13	0,00	–
6	0,68	76,96	0,32	–	0,31	3,99	13,13	4,60
7	0,29	84,90	0,22	0,05	0,09	6,98	7,43	0,04

Рис. 5. Микроструктура границы соединения 08X18H10Т–АМг6 (а) и переходного слоя (б) с результатами ЭДС анализа



№	Mg	Al	Ti	Mn
1	0,2	2,2	97,6	–
2	–	2,2	97,7	0,1
3	0,3	72,5	26,9	0,3
4	0,4	68,3	30,7	0,6
5	3,1	96,2	0,5	0,2
6	3,0	95,9	0,9	0,2
7	11,1	81,3	7,0	0,6
8	8,5	86,5	4,5	0,5
9	2,7	96,1	0,9	0,4
10	13,2	76,2	9,9	0,8

Рис. 6. Микроструктура границы соединения VT1-0–АМг6 после диффузионной сварки и результаты ЭДС анализа

вышает количества магния в исходном АМг6. С удалением от границы соединения, содержание Mg снижается. Это говорит о том, что в процессе сварки Mg мигрирует из объема АМг6 к границе соединения. Кроме того, высокая температура процесса сварки

способствует формированию вторичных фаз Mg_2Al_3 и $(Fe,Mn)Al_6$ по границам зерен.

На рисунке 6 показана микроструктура границы VT1-0–АМг6. На границе соединения VT1-0 – АМг6 образовался сплошной переходный слой толщиной около 6 мкм, име-

ющий зернистую структуру. Согласно ЭДС анализу и диаграмме состояния Al-Ti можно предположить, что переходный слой соответствует фазе $TiAl_3$ (точки 3 и 4), Зернистая структура переходного слоя говорит о том, что зарождение центров интерметаллической фазы происходит вокруг точек локальных контактов пластин вдоль границы соединения. Затем происходит соединение растущих областей, что приводит к образованию сплошной прослойки из интерметаллических фаз.

На удаленных участках от границы соединения формировались области с повышенным содержанием Ti окруженные алюминиевым сплавом (рис. 6, точки 7, 8 и 10.).

Заключение

В работе был проведен сравнительный анализ микроструктур границы соединения 08X18H10T-AMг6 и BT1-0-AMг6, полученных сваркой взрывом и диффузионной сваркой. Было обнаружено, что структура и фазы в зоне соединения зависят от метода сварки материалов. При диффузионной сварке AMг6 с BT1-0 и 08X18H10T на границе соединения формировалась сильно неоднородная структура с несколькими интерметаллическими фазами (Al_3Ni и Al_3Fe). В то же время при сварке взрывом структура границы соединения была более однородной, с локальными участками оплавления.

Исходя из анализа микроструктур границы соединения можно сделать вывод, что наиболее эффективным методом соединения является сварка взрывом, так как образуется меньшее количество вторичных фаз на границе соединения.

Библиографический список

1. Wahid, M. A. Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint / M. A. Wahid, A. N. Siddiquee, Z. A.

Khan // Marine Systems & Ocean Technology. – 2020. – Vol. 15. – Pp. 70-80. <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00069-w>

2. Senkov, O. N. High Strength Aluminum Alloys for Cryogenic Applications / O. N. Senkov, R. B. Bhat, S. V. Senkova // NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. – 2004. – Vol. 146. – Pp 151. https://doi.org/10.1007/1-4020-2112-7_15

3. Kryukov, D. B. Structural features and technology of light armor composite materials with mechanism of brittle cracks localization / D. B. Kryukov // Metal Working and Material Science. – 2022. – Vol 24. – Pp. 103–111. \

4. Welding between Aluminum Alloy and Steel Sheets by Using Transition Joints / P. Matteis, A. Gullino, F. D'Aiuto, C. Puro, M. G. Scavino // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29. – Pp 4840–4853. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04595-2>

5. Особенности формирования соединения BT1-0+AMг5 при сварке взрывом с воздействием акустических колебаний / М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Д. В. Донской, М. С. Зарубин, П. А. Петрушкин, Р. В. Автандилян // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. - Волгоград, 2021. – № 11 (258). – С. 28-38.

6. Исследование структуры и фазового состава локальных участков оплавленного металла в биметалле BT1-0 + AMг6, полученном сваркой взрывом по угловой схеме / Л. М. Гуревич, А. И. Богданов, В. О. Харламов, А. Г. Серов, С. П. Писарев, Н. В. Кривченко // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2018. – № 11 (221). – С. 57-61.

7. Diffusion and recrystallization processes at diffusion vacuum welding of aluminum and titanium based alloys / Y. Polovetskyi, O. Novomlynets, A. Labartkava, V. Martynenko, M. Matviienko // Collection of Scientific Publications NUS. – 2016. – Vol. 459 (3). – Pp. 34-40. [10.15589/jnn20150305](https://doi.org/10.15589/jnn20150305)

8. Friction Welding of Aluminium and Aluminium Alloys with Steel / A. Ambroziak, M. Korzeniowski, P. Kustron, M. Winnicki, P. Sokołowski, E. Harapinska // Advances in Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 2014. – 15 p. [10.1155/2014/981653](https://doi.org/10.1155/2014/981653)

9. Сварка взрывом алюминиево-магниевого сплава с титаном вблизи нижней границы области свариваемости / М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. - Волгоград, 2022. – № 11 (270). – С. 21-28.

10. AlMg6 to Titanium and AlMg6 to Stainless Steel Weld Interface Properties after Explosive Welding / A. Y. Malakhov, I. V. Saikov, I. V. Denisov, N. N. Niyezbekov // Metals. – 2020. – Vol. 10 (11). – P. 1500. [10.3390/met10111500](https://doi.org/10.3390/met10111500)

11. Energetic Materials Based on W/PTFE/Al: Thermal and Shock-Wave Initiation of Exothermic Reactions / I. Saikov, S. Seropyan, A. Malakhov, G. Saikova, I. Denisov, E. Petrov // Metals. – 2021. – Vol. 11 (9). – P. 1355. [10.3390/met11091355](https://doi.org/10.3390/met11091355)