

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-11-294-25-29

*М. П. Королев, канд. техн. наук, Е. В. Кузьмин, канд. техн. наук,
С. В. Кузьмин, чл.-корр. РАН, В. И. Лысак, академик РАН*

СВАРКА ВЗРЫВОМ СТАЛИ С АМг6 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ ИЗ АМг6

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

Большой проблемой при сварке взрывом стали с алюминиево-магниевым сплавом является образование оплавленных участков на границе соединения, поскольку в них формируются интерметаллиды снижающие прочность соединений. Возможным решением этой проблемы может быть подбор таких условий сварки, которые обеспечивали бы формирование соединений без оплавленного слоя на границе. В данной работе рассмотрена возможность использования прослойки из алюминиевого сплава для снижения количества оплавленных участков на границе разнородных материалов и повышения прочности соединений Ст3+АМг6. В ходе эксперимента было получено соединение Ст3 с АМг6 через прослойку АМг6, которое отличалось небольшим количеством оплавов и имело прочность в диапазоне 70-135 МПа.

Ключевые слова: сварка взрывом, композиционные материалы, прослойка, оплавленные участки, интерметаллиды, прочность

M. P. Korolev, E. V. Kuz'min, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak

EXPLOSION WELDING OF STEEL WITH АМg6 USING AN INTERMEDIATE LAYER OF АМg6

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

A major issue when explosively welding steel with aluminum-magnesium alloy is the formation of molten areas at the joint interface, as intermetallic compounds form in these areas, reducing the strength of the joints. A possible solution to this problem could be to select welding conditions that ensure the formation of joints without a molten layer at the interface. This work examines the possibility of using an aluminum alloy interlayer to reduce the number of molten areas at the boundary of dissimilar materials and to increase the strength of the joints between St3 and АМg6. During the experiment, a joint was obtained between St3 and АМg6 through an АМg6 interlayer, which exhibited a minimal amount of molten areas and had a strength in the range of 70-135 МПа.

Keywords: explosion welding, composite materials, interlayer, melt area, intermetallics, strength

Пара материалов сталь + алюминиево-магниевого сплава АМг6 плохо сваривается взрывом, что связано с образованием на границе соединения оплавленных участков, содержащих хрупкие интерметаллиды с низкой прочностью [1...3]. Так, например, предел прочности при растяжении соединений FeAl₃ и Fe₂Al₅ составляет всего 15 и 17 МПа [4]. Исходя из этого важным требованием к технологии сварки данной пары, является минимизация количества оплавленного металла на границе.

Для улучшения свариваемости и повышения качества соединений применяют промежуточные прослойки, которые играют роль «буфера пластичности» или диффузионного барьера [5, 6], препятствующего образованию интерметаллидных соединений в

оплавленных участках. Чаще всего прослойки выполняют из чистого алюминия, обладающего высокой пластичностью, однако низкая прочность технически чистого алюминия может ограничивать прочность композита. По мнению ряда исследователей, применение промежуточных слоев позволяет снизить энерговыделение на границе при сварке взрывом и повысить качество соединений [7, 8].

В данной работе рассмотрена возможность получения соединений АМг6 + Ст3 через прослойку АМг6. Использование АМг6 в качестве материала прослойки позволит повысить прочность соединения по сравнению с прослойкой из чистого алюминия.

Цель работы заключалась в экспериментальной проверке принципиальной возмож-

ности сварки Ст3 + АМг6 через прослойку АМг6, и определении режимов, обеспечивающие получение трехслойного соединения Ст3 + АМг6 + АМг6.

Материалы и методы

В ходе эксперимента сваривали три образца на режимах, приведенных в таблице.

зультат сварки будут оказывать условия сварки на границе Ст3 с прослойкой АМг6, поскольку режимы на этой границе должны обеспечивать формирование соединения между разнородными материалами и одновременно с этим не допускать формирования оплавленной прослойки. Энергия, за-

Расчетные режимы сварки взрывом

№	Материалы	Толщины $\delta_1 + \delta_2$, мм	Смесь ВВ, (аммонит/песок), %	Высота заряда H , мм	Скорость точки контакта $V_{\text{к}}$, м/с	Сварочный зазор h , мм	Скорость соударения $V_{\text{с}}$, м/с	Угол соударения γ , °	Энергия пластической деформации W_2 , МДж/м ²
1	Ст3	3,0	67/33	30	2289	2,0	383	9,6	0,07
	+	+				2,0	401	10,0	0,63
2	АМг6	0,5		40	2324	3,0	467	11,5	0,11
	+	+				3,0	490	12,1	0,93
3	АМг6	6,0		50	2336	4,0	533	13,1	0,14
						4,0	562	13,8	1,22

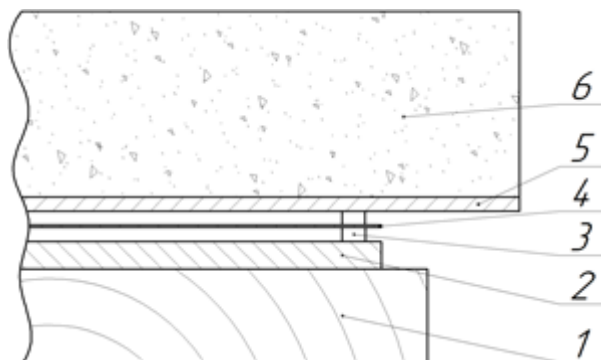


Рис. 1. Схема сборки пластин под сварку взрывом:

1 – основание; 2 – неподвижная пластина АМг6; 3 – сварочный зазор;
4 – прослойка АМг6; 5 – метаемая пластина Ст3; 6 – заряд ВВ

Здесь приведено два значения режима для каждого образца, первое из которых соответствует условиям сварки на границе Ст3+прослойка АМг6, второе соответствует границе прослойки с основным слоем АМг6. При этом режимы сварки АМг6 с АМг6 не представляют существенного интереса в данной работе, поскольку при сварке этой однородной пары обычно не возникает сложностей. Наибольшее влияние на ре-

трачиваемая на пластическую деформацию W_2 , на границе сталь-АМг6, очень низка и находится в диапазоне 0,07-0,14 МДж/м², что объясняется небольшой толщиной и низкой массой прослойки. При сварке двухслойного композита такой величины W_2 вероятно было бы недостаточно для образования соединения между Ст3 и АМг6, однако при сварке трехслойного соединения условия протекания деформаций могут позво-

лить получить прочное соединение и при низких значениях W_2 .

Схема сборки пластин под сварку приведена на рис. 1. В качестве метаемой пластины служила сталь Ст3, а неподвижной выступала пластина АМг6 с габаритным размером 200х80 мм. Прослойку АМг6 перед сваркой подвергали отжигу при 400°C для снятия остаточных напряжений.

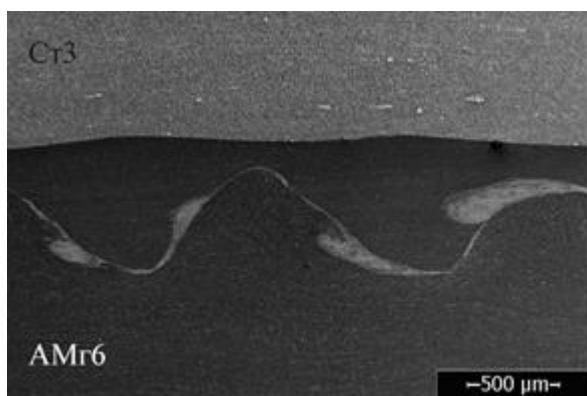
Образцы для проведения металлографических исследований вырезали из центра пластины. Исследования структуры и химического состава проводили при помощи электронного микроскопа FEI Versa 3D.

Результаты и обсуждение

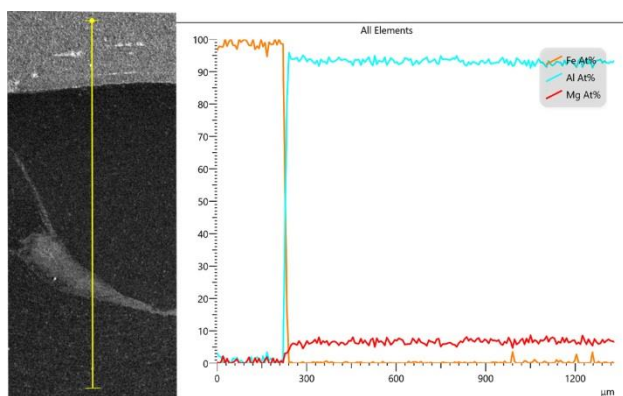
Соединение между Ст3 и АМг6 образовалось только в образце №3 при энергии W_2 на границе Ст3 с прослойкой АМг6

$W_2=0,14$ МДж/м². Прочность соединения на отрыв слоёв по трем измерениям составила 70, 89 и 135 МПа. На границе основного слоя АМг6 с прослойкой АМг6 сформировался волновой профиль, средние длина и размах которого составляли 1415 и 545 мкм. Присутствовали также участки оплавленного АМг6, которые в ряде случаев содержали микротрещины.

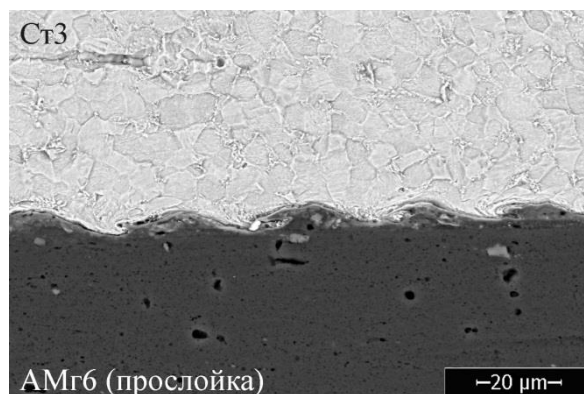
На границе Ст3 с прослойкой АМг6 образование волнового профиля происходило одновременно на двух масштабах. При малых увеличениях прослеживался волновой профиль, длина которого совпадала с длиной волны на границе АМг6-АМг6, а вершины волн располагались над впадинами волн на границе АМг6-АМг6 (рис. 2, а). При длине около 1415 мкм, размах волны составлял



а



б



в

Рис. 2. Структура трехслойного соединения Ст3+АМг6:
общий вид границы (а); химический состав прослойки АМг6 и оплавленного участка (б);
микроструктура границы Ст3-прослойка АМг6 (в)

всего 40-50 мкм. Формирование этого волнового профиля по всей видимости, было связано с волнообразованием на границе прослойки с основным слоем АМг6, что отражает сложный характер деформационных процессов протекающих на границе Ст3-АМг6 при данном способе сварки. При больших увеличениях на ряде участков границы Ст3-АМг6 наблюдался волновой профиль с длиной около 30 мкм и размахом в 4-5 мкм (рис. 2, в). Также, несмотря на низкие значения энергии W_2 , на некоторых участках границы присутствовала прослойка оплава толщиной 5-10 мкм.

Разрушение образцов, которые сваривали по режимам 1 и 2 происходило по границе Ст3 с прослойкой АМг6. Проведенное исследование поверхностей разрушения показало, что значительная часть поверхности

прослойки АМг6 обоих образцов была покрыта слоем оплава. В образце 1, в котором энергия W_2 на границе Ст3 с прослойкой была наименьшей, оплавом было покрыто около 65-70% поверхности, в то время как в образце 2, оплавы занимали всего 20-25% поверхности. Очевидно, что величины энергии W_2 были слишком низкими, чтобы вызвать столь значительное плавление на первой границе, поэтому можно выдвинуть предположение, что источником теплоты служило трение между поверхностями, которое стало возможным при отсутствии схватывания и совместной деформации слоев стали и прослойки АМг6.

Заключение

Сварка через прослойку позволяет получать соединения между материалами при низких значениях энергии W_2 на границе

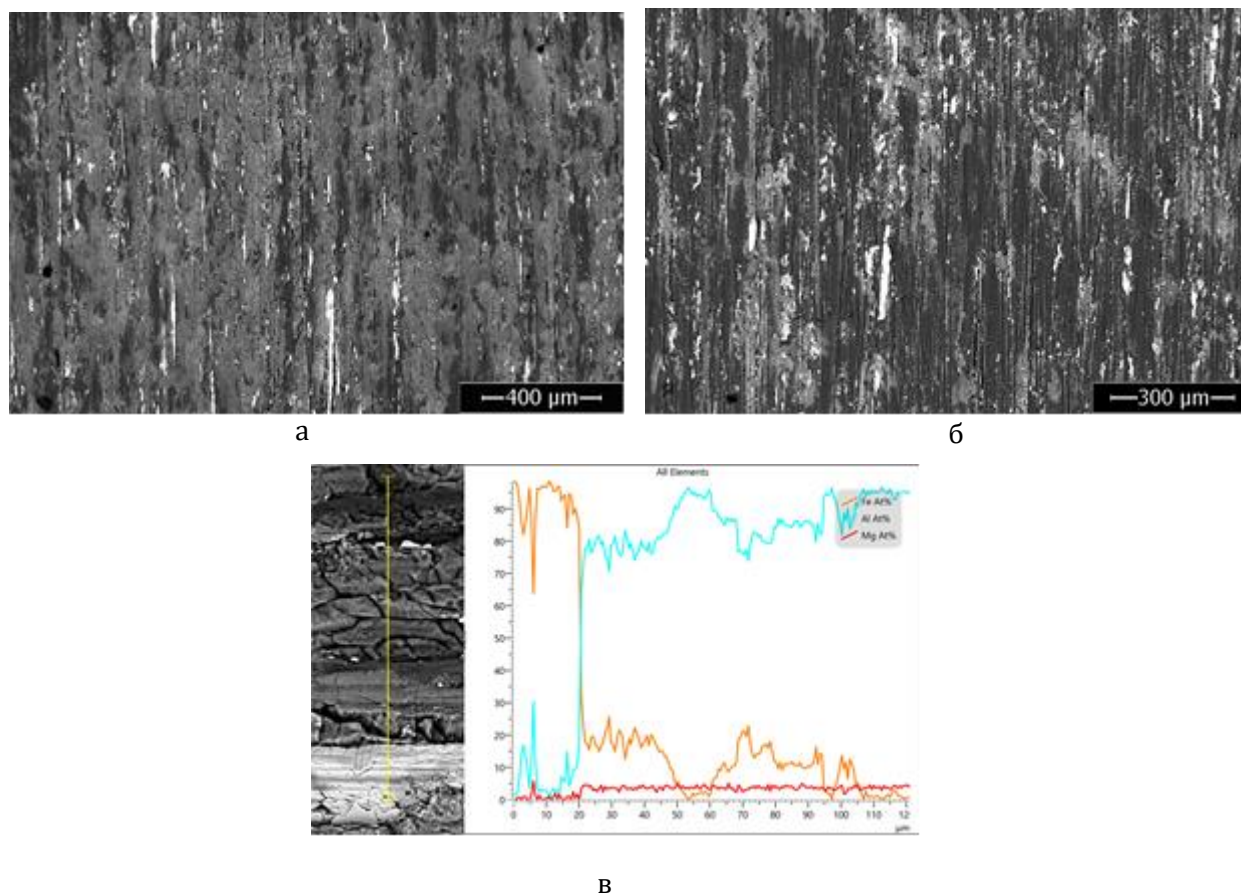


Рис. 3. Поверхности разрушения прослойки АМг6 после неудачной сварки образца №1 (а) и №2 (б), а также химический состав участка поверхности прослойки АМг6 образца №1 (в)

разнородных материалов, однако эта технология требует тщательного подбора режимов сварки. В данной работе была показана принципиальная возможность сварки Ст3 со сплавом АМг6 с использованием прослойки АМг6. Полученное соединение имело незначительное количество дефектов на границе Ст3-АМг6, однако его прочность была невысокой и находилась на уровне прочности технически чистого алюминия.

Библиографический список

1. Исследование влияния режимов сварки взрывом и термической обработки на структуру и свойства биметалла АД1 – сталь Ст3 / Л. М. Гуревич, Д. В. Проничев, А. Ф. Трудов, Ю. П. Трыков, М. Д. Трунов // Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении». Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – № 9 (136). – С. 17-21.
2. Кузьмин, В. И. Исследование закономерностей образования соединения при сварке взрывом толстолистовых сталеалюминиевых композитов / В. И. Кузьмин, В. И. Лысак, М. А. Тупицин // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 3. – С. 64-69.
3. Определение границ области сварки взрывом и исследование микроструктуры границы соединения композиционного материала 08Х18Н10Т-АМГ6 / Н. Н. Ниезбеков, А. Ю. Малахов, И. В. Денисов, И. В. Сайков // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2022. – № 11(270). – С. 70-75.
4. Рябов, В. Р. Алитирование стали / В. Р. Рябов. – Москва : Металлургия, 1973. – 239 с.
5. Трудов, А. Ф. Изменения в тонкой структуре композита АМГ6-АД1 - сталь 12Х18Н10Т, вызванные деформацией / А. Ф. Трудов, В. Н. Арисова, А. В. Дудкина // Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – 2019. – № 10 (233). – С. 24-28.
6. К вопросу о влиянии кинематических параметров сварки взрывом на структуру и свойства композитов с диффузионным барьером / В. И. Кузьмин, В. И. Лысак, О. В. Строков, М. А. Тупицин, М. О. Беляков // Изв. ВолгГТУ. Серия "Сварка взрывом и свойства сварных соединений". Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 14 (101). – С. 83-90.
7. Explosive welding of Al alloys and high strength duplex stainless steel by controlling energetic conditions / X. Chen, D. Inao, S. Tanaka, A. Mori, X. Li, K. Hokamoto // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 58. – Pp. 1318-1333. [10.1016/j.jmapro.2020.09.037](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.037)
8. Influence of interlayer technique on microstructure and mechanical properties of Ti/Al cladding plate manufactured via explosive welding / Z. Fang, C. Shi, Z. Sun, K. Feng, L. Gao, H. Shi // Materials Research Express. – 2019. – Vol. 6(10). – P. 1065F9. [10.1088/2053-1591/ab42ac](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab42ac)