УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-28-33

*М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак***ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЯ VT1-0+AMГ5*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: weld@vstu.ru

В работе приведены результаты исследования соединений титана VT1-0 с алюминиево-магниевым сплавом АМГ5, полученные сваркой взрывом на различных режимах соударения. Анализ микроструктур показал, что в зависимости от условий соударения граница зоны соединения может иметь как волновой, так и безволновой профиль. Участки оплавленного металла образуются уже при минимальных энергетических вложениях, но до определенного момента они не оказывают существенного влияния на прочность соединения. При относительно небольших значениях энергии W_2 титан слабо растворяется в алюминии и присутствует в оплавленных участках в виде раздробленных частиц. Дальнейшее увеличение режимов сварки взрывом приводит к возрастанию степени растворения титана в расплавах, что сопровождается появлением трещин.

Результаты проведенных механических испытаний показали, что значения прочности на отрыв слоев заметно выше и достигают равнопрочного соединения по сравнению со способом сварки через промежуточную прослойку чистого алюминия. В исследованном диапазоне режимов сварки прочность соединения возрастает в диапазоне энергии $W_2 = 0,85 \dots 1,1$ МДж/м², а при $W_2 = 1,1$ МДж/м² достигает максимума. При дальнейшем увеличении режимов сварки взрывом происходит снижение прочности соединения, которое связано с изменением структуры оплавленных участков с образованием в них хрупких интерметаллидов.

Ключевые слова: сварка взрывом, композиционные материалы, область свариваемости, режимы сварки, алюминиево-магниевый сплав, титан.

*М. P. Korolev, E. V. Kuzmin, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak***INFLUENCE OF HIGH-VELOCITY IMPACT PARAMETERS
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE VT1-0 + AMG5 JOINT****Volgograd State Technical University**

The paper presents the results of studying the joints of VT1-0 titanium with the aluminum-magnesium alloy AMG5, obtained by explosion welding in different modes of impact. The analysis of microstructures showed that, depending on the conditions of collision, the boundary of the joint zone can have both a wave and a waveless profile. Areas of melted metal are formed even with minimal energy input, but until a certain point they do not significantly affect the strength of the joint. At relatively low values of the energy W_2 , titanium weakly dissolves in aluminum and is present in the melted areas in the form of crushed particles. A further increase in the modes of explosion welding leads to an increase in the degree of dissolution of titanium in melts, which is accompanied by the appearance of cracks.

The results of the performed mechanical tests showed that the values of the peel strength of the layers are noticeably higher and reach an equal-strength joint in comparison with the method of welding through an intermediate layer of pure aluminum. In the investigated range of welding modes, the strength of the joint increases in the energy range $W_2 = 0,85 \dots 1,1$ MJ/m², and at $W_2 = 1,1$ MJ/m² it reaches a maximum. With a further increase in the modes of explosion welding, the strength of the joint decreases, which is associated with a change in the structure of the melted regions with the formation of brittle intermetallics in them.

Keywords: explosion welding, composite materials, weldability window, welding modes, aluminum-magnesium alloy, titanium.

Введение

Благодаря высоким прочностным характеристикам, а также уникальной коррозионной стойкости, конструкции из титана и его сплавов нашли широкое применение в таких отраслях, как авиастроение, судостроение, нефтехимическое машиностроение и других.

Сплавы алюминия, легированные магнием, обладают высокой удельной прочностью, хорошей свариваемостью, а также высокой коррозионной стойкостью к морской воде, что делает их также востребованными в авиастроении и судостроении.

Получение соединений пары титан + алюми-

ниево-магниевого сплава возможно различными способами – будь то сварка трением с перемешиванием, горячая прокатка, диффузионная сварка, сварка взрывом и т. д., однако особенности данной пары могут накладывать существенные ограничения на параметры процесса. Так, например, ввиду большого различия в физико-механических свойствах материалов, таких, как коэффициент линейного расширения, теплопроводность и т. д., нагрев соединения при сварке неизбежно сопровождается формированием поля остаточных напряжений, что вкупе с образованием хрупких алюминидов титана может приводить к снижению прочностных свойств соединения, вплоть до полного его разрушения.

Из всех способов сварки титана с алюминиево-магниевыми сплавами, сварка взрывом выгодно отличается тем, что позволяет получать соединения при минимальном тепловложении и практически полном отсутствии оплавленного металла и диффузионных зон.

Вместе с тем, немногочисленные исследования, посвященные сварке взрывом титана с алюминиево-магниевыми сплавами, демонстрируют невысокое качество получаемых соединений. Так, в работе [1] приведены результаты исследования соединения титана с алюминиево-магниевым сплавом, полученного сваркой взрывом. Соединение имело безволновой профиль с небольшим количеством оплавленного металла, а прочность находилась в диапазоне 20-190 МПа. Невысокую прочность соединения авторы объяснили низкими режимами сварки и влиянием остаточных напряжений, а в качестве возможного решения проблемы хрупких алюминидов титана предложили использовать прослойку из тугоплавкого металла, не образующего интерметаллидов со свариваемыми материалами.

Авторы работы [2] изучали влияние энергии W_2 , затрачиваемой на пластическую деформацию, на структуру соединения титана с алюминиево-магниевым сплавом АМг6. Результаты исследования показали, что соединение формируется в диапазоне W_2 0,5-0,9 МДж/м², а увели-

чение энергии W_2 выше 1,0 МДж/м² приводит к образованию расслоения вдоль всей границы соединения.

Известным способом получения сваркой взрывом соединений разнородных материалов является использование прослойки из чистого алюминия, обладающего хорошей свариваемостью с большинством материалов в широком диапазоне режимов. Так, в работах [3] и [4], сравниваются результаты сварки титана с алюминиево-магниевым сплавом 5083 напрямую, и с применением прослоек из чистого алюминия. Показано, что соединение с прослойкой из алюминия обладает лучшими механическими свойствами и более оптимальной структурой, чем соединение без прослойки, в котором присутствуют трещины и протяженные зоны оплавленного металла. Полученный результат авторы связали с тем, что применение прослоек позволяет снижать чрезмерную потерю кинетической энергии метаемой пластины в зоне соединения.

Недостатком данного способа является то, что в зависимости от толщины прослойки, низкая прочность алюминия может негативным образом сказываться на прочности композита. Кроме того, недостаточно изученным представляется вопрос о возможности получения сваркой взрывом качественного соединения титана с алюминиево-магниевым сплавом напрямую.

Целью данного исследования являлось изучение возможности получения качественных соединений титана с алюминиево-магниевым сплавом, определение оптимальных параметров сварки взрывом и установление основных закономерностей формирования структуры такого соединения.

Материалы и методы исследования

Для исследования были взяты алюминиевый сплав АМг5 и титан марки ВТ1-0. Химический состав материалов приведен в табл. 1, физические свойства – в табл. 2. Размер свариваемых пластин был выбран равным 200x80 мм. В качестве метаемой пластины выступал лист ВТ1-0 толщиной 5 мм, в качестве неподвижной – АМг5, толщиной 4 мм.

Таблица 1

Химический состав материалов

Материал	Содержание, %							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
АМг5 (ГОСТ 4784–2019)	0,5	0,5	0,1	0,3–0,8	4,8–5,8	0,2	0,02–0,10	Остальное
ВТ1-0 (ГОСТ 19807–91)	Si	Fe	O ₂	H ₂	N ₂	C	прочие	Ti
	0,10	0,25	0,20	0,010	0,04	0,07	0,3	Остальное

Таблица 2

Физические свойства материалов

Материал	E , МПа* 10^{-5}	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_s , %	λ , Вт/(м*град)	α , 1/град* 10^6	ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, °C	НВ, МПа 10^{-1}
AMg5	0,71	300	150	20	126	24,7	2650	640	65
BT1-0	1,12	400–450	300–420	30	18.85	8,2	4505	1668	131–163

Было получено 6 соединений при различных режимах сварки. Режимы выбирались исходя из энергии W_2 , затрачиваемой на пластическую деформацию [5]. Скорость и угол соударения

изменяли за счет изменения сварочного зазора, скорость детонации взрывчатой смеси находилась в пределах 2400–2450 м/с. Основные параметры сварки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные параметры сварки взрывом

Номер образца	1	2	3	4	5	6
Зазор h , мм	3,5	5,0	6,5	10,5	14,0	15,0
Скорость соударения V_c , м/с	551	594	623	670	692	724
Угол соударения γ , °	13,0	14,0	14,7	15,8	16,4	17,1
Энергия W_2 , МДж/м ²	0,85	1,0	1,1	1,26	1,35	1,48

Изучение микроструктуры и химического состава проводилось при помощи электронного микроскопа FEI Versa 3D. Измерение прочности на отрыв слоев проводилось в соответствии с ТУ 27.32.09.010-2005.

Результаты исследований

Типичные микроструктуры образцов приведены на рис. 1. Как видно, для образцов 1 и 2, сваренных при значениях энергии W_2 0,85 и 1,0 МДж/м², характерен безволновой профиль соединения, однако на отдельных участках можно наблюдать появление и угасание волно-

вого профиля. Несмотря на незначительную величину пластических деформаций, на что указывает и отсутствие периодичного волнового профиля, этого оказывается достаточно для образования в зоне соединения неоднородностей в виде оплавленных участков с вкраплениями раздробленных частиц титана. При энергиях W_2 менее 1,0 МДж/м², в химическом составе оплавленных участков преобладает алюминий, а титан присутствует в виде раздробленных частиц (рис. 2, а). Содержание титана в участках плавления не превышает 10 атомных процентов.

Рис. 1. Структуры зон соединений, полученных при различных W_2 :
а – 0,85; б – 1,0; в – 1,1; г – 1,26; д – 1,35; е – 1,48 МДж/м²

Рис. 2. Химический состав оплавленных участков в соединениях, полученных при различных значениях W_2 :
а – 1,0; б – 1,48 МДж/м²

Микроструктуры образцов 3–6 ($W_2=1,1–1,48$ МДж/м²) характеризуются наличием волнового профиля размахом от 41 до 121 мкм. Оплавленные участки располагаются при вершине каждой волны.

Помимо оплавов, в составе которых преобладает алюминий, с увеличением W_2 возрастает количество оплавов, имеющих структуру вихревой зоны (рис. 2, б). В них наблюдается прак-

тически полное растворение титана, а измерение химического состава показывает, что в зависимости от размера и расположения оплава, возможно образование всех типичных для пары Ti-Al интерметаллидов. Негативным свойством оплавов с такой структурой является наличие трещин, ориентированных преимущественно в поперечном направлении.

Рис. 3. Зависимость параметров профиля соединения от энергии W_2 :
а – длины волнового профиля (λ) и размаха ($2a$); б – удельной площади оплавленных участков к длине соединения

Численные значения параметров соединения, таких, как размах и длина волнового профиля, а также удельной площади оплавленных участков, отнесенной к длине соединения, демонстрируют практически линейную зависимость от энергии W_2 (рис. 3). Исключением являются образцы под номерами 1 и 2, соответ-

ствующие энергиям W_2 0,85 и 1,0 МДж/м², профиль соединения которых имеет незначительную амплитуду без периодичной волновой картины.

Результаты механических испытаний приведены на рис. 4. Кривая показывает усредненное значение прочности для пяти образцов,

планки погрешностей соответствуют минимальным и максимальным величинам. Как можно видеть, наблюдается значительная разница между максимальными и минимальными значениями, в некоторых случаях, достигающая 115 % от средней величины. Схожий разброс наблюдался и в работе [29], где аналогичным способом измеряли прочность соединения Ti+AlMg6. В качестве объяснения наблюдаемого разброса авторы предложили действие остаточных напряжений.

Как видно из графика, распределение прочности в зависимости от энергии W_2 имеет два характерных интервала: до $W_2 = 1,1$ средняя прочность увеличивается, что объясняется увеличением степени пластической деформации в зоне соединения и повышением числа активных центров, на которых реализуется объемное взаимодействие между свариваемыми материалами. Можно заметить, что на этом интервале

вместе с прочностью (рис. 4), растет и количество оплавленных участков в зоне соединения (рис. 3, б). Это подтверждает уже не раз высказанное предположение, что оплавы, состоящие преимущественно из алюминия не оказывают негативного влияния на прочность соединения. При $W_2 = 1,1$ средняя прочность достигает своего максимума, соответствующего изначальной прочности АМг5, после чего, на интервале $W_2 = 1,1-1,48$ прочность снижается, что с точки зрения микроструктур коррелирует с повышением содержания титана в оплавленных зонах, образованием хрупких интерметаллидов и увеличением количества трещин в оплавах.

Стоит также отметить, что в ряде случаев прочность соединения на отрыв слоев превысила исходную прочность АМг5 на растяжение, которая составляла 325 МПа. Это можно объяснить высокой степенью деформации, которую претерпевают металлы в процессе сварки.

Рис. 4. Зависимость прочности на отрыв слоев от энергии W_2

Выводы

1. С помощью сварки взрывом были получены соединения титана ВТ1-0 с алюминиево-магниево-магний сплавом АМг5, прочность на отрыв слоев которых оказалась на уровне исходной прочности АМг5, что позволяет судить о возможности получения равнопрочного соединения данных материалов без применения промежуточных прослоек.

2. Изучение структур зоны соединения показало, что низким значениям W_2 соответствует

безволновой профиль соединения, а формирование волнового профиля происходит начиная с энергии W_2 1,1 МДж/м². Выявлено два типа структур оплавленных участков в зоне соединения. В химическом составе оплавов первого типа, характерного для низких значений W_2 , преобладает алюминий, а титан в незначительных количествах присутствует в твердом растворе, а также в виде вкраплений раздробленных частиц. Увеличение количества оплавов первого типа не оказывает заметного влияния

на прочность соединения. Оплавы второго типа имеют структуру зоны перемешивания, и содержание титана более 30 %. Оплавы второго типа склонны к трещинообразованию, а повышение их количества ведет к снижению прочности соединения.

3. Установлено, что максимальная прочность соединения достигается при $W_2=1,1$ МДж/м², при которой, в зоне соединения не происходит формирования значительного количества интерметаллидов, склонных к трещинообразованию.

4. Установлено, что увеличение энергии W_2 при сварке титана с АМг5 способствует увеличению содержания и лучшему растворению титана в оплавленных участках, что сопровождается появлением трещин в оплавах и снижением прочности соединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Malakhov, A. Y.* 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. – № 1500.
2. *Гуревич, Л. М.* Структура и микромеханические свойства полученного сваркой взрывом биметалла ВТ1-0+АМг6 / Л. М. Гуревич, А. И. Богданов, В. О. Харламов, А. Г. Серов, С. Ю. Оноколов // *Известия ВолгГТУ : научный журнал* № 11(221) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – С. 34–38.
3. *Wu, X.* Comparative study on welding energy and Interface characteristics of titanium-aluminum explosive composites with and without interlayer / X. Wu, Ch. Shi, Zh. Fang, S. Lin, Z. Sun // *Materials & Design*. – 2021. – Vol. 197.
4. *Fang, Zh.* Influence of interlayer technique on microstructure and mechanical properties of Ti/Al cladding plate manufactured via explosive welding / Ch. Shi, Z. Sun, K. Feng, L. Gao, H. Shi // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6. – № 10.
5. *Lysak, V. I.* Energy balance during explosive welding / V.I. Lysak, S.V. Kuzmin // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 222. – Pp. 356-364.