УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-28-38

**М. П. Королев, аспирант, Е. В. Кузьмин, канд. техн. наук, С. В. Кузьмин, д-р техн. наук,
В. И. Лысак, академик РАН, Д. В. Донской, магистрант, М. С. Зарубин, магистрант,
П. А. Петрушкин, магистрант, Р. В. Автандилян, магистрант**

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ VT1-0+AMg5 ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

Работа посвящена изучению влияния введения акустических колебаний при сварке взрывом пары VT1-0+AMg5. Проведено сравнительное исследование соединений, полученных обычным способом сварки взрывом и сваркой взрывом с воздействием акустических колебаний при различных режимах сварки. Результаты исследования микроструктуры и механических свойств позволяют говорить о положительном влиянии введения акустических колебаний при сварке VT1-0+AMg5, которое заключается в расширении области свариваемости и снижении объема оплавленного металла в зоне соединения. В работе также показано, что значительное влияние на прочность соединения может оказывать характер подготовки поверхности перед сваркой.

Ключевые слова: сварка взрывом, композиционные материалы, акустические колебания, область свариваемости, режимы сварки, алюминий-магний-титан

**M. P. Korolev, E. V. Kuz'min, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, D. V. Donskoy, M. S. Zarubin,
P. A. Petrushkin, R. V. Avtandilyan**

FEATURES OF FORMING THE VT1-0+AMg5 JOINT DURING EXPLOSION WELDING WITH THE INFLUENCE OF ACOUSTIC VIBRATIONS

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

The work is devoted to the study of the influence of the introduction of acoustic vibrations during explosion welding of the VT1-0 + AMg5 pair. A comparative study of joints obtained by the conventional method of explosion welding and explosion welding with the effect of acoustic vibrations in various welding modes has been carried out. The results of the study of the microstructure and mechanical properties allow us to speak about the positive effect of the introduction of acoustic vibrations during welding VT1-0 + AMg5, which consists in expanding the weldability area and reducing the volume of the melted metal in the joint zone. It is also shown in the work that the nature of surface preparation before welding can have a significant effect on the strength of the joint.

Keywords: explosion welding, composite materials, acoustic vibrations, weldability area, welding modes, aluminum-magnesium alloy, titanium

Существует ряд сочетаний материалов, получение соединений которых любыми способами сварки считается невозможным или труднореализуемым с технологической точки зрения. Чаще всего сложность получения качественных соединений материалов связывают с различными физико-механическими свойствами свариваемых материалов и появлением в зоне соединения расплавленных участков, содержащих хрупкие интерметаллические фазы.

Критериями же качества композитов, полученных сваркой взрывом, принято считать прочность соединения между материалами и степень структурно-механической неоднородности вблизи зоны соединения.

Прочность и характер соединения при сварке взрывом по большей части определяются величиной удельной энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию (W_2). При этом равнопрочное соединение образуется на некотором интервале W_2 , характерном для каждой конкретной пары материалов. Положение нижней границы этого интервала определяется величиной деформации, необходимой для активации поверхности более твердого слоя до уровня, при котором прочность границы достигает свойств менее прочного материала. Положение верхней границы интервала сопряжено со снижением прочности соединения вследствие образования дефектов (оплавок, тре-

щин и т.д.) в зоне термомеханического влияния [1].

Таким образом, отклонение от оптимальных значений W_2 при сварке может привести к снижению прочности соединения из-за недостаточной активации свариваемых поверхностей, или образования в зоне соеди-

сваркой взрывом, представляется введение акустических колебаний в одну из пластин непосредственно в процессе сварки.

Как известно, введение акустических колебаний в металлы, сопровождается рядом эффектов, связанных с возникновением переменных напряжений в кристаллической

Условия проведения опытов

Зазор h , мм	2,5	3,5	5,0	6,5	10,5	14,0	15,0
Скорость соударения V_c , м/с	528	551	594	623	670	692	724
Угол соударения γ , °	12,46	13,0	14,0	14,7	15,8	16,4	17,1
Энергия W_2 , МДж/м ²	0,78	0,85	1,0	1,1	1,26	1,35	1,48

нения нежелательных элементов микроструктуры. При этом, для случая сварки материалов с сильно различающимися физикомеханическими свойствами, диапазон оптимальных параметров сварки может быть меньше в сравнении со сваркой схожих по свойствам материалов. Исходя из этого, актуальным представляется вопрос поиска технологических приемов, позволяющих расширить область оптимальных параметров сварки.

Возможным способом преодоления существующих технологических барьеров и повышения качества композитов, получаемых

решетке и повышением плотности дислокаций в металле. Физическим следствием этого является снижение предела текучести и повышение пластических свойств материала [2].

Известны примеры положительного влияния введения акустических колебаний при сварке взрывом на качество сварных соединений [3-5], однако до сих пор не существует четкого понимания механизмов и закономерностей, объясняющих это явление.

Целью данной работы являлось изучение влияния введения акустических колебаний в неподвижную пластину при сварке взры-

Рис. 1. Схема проведения опытов:

- 1 – детонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества;
3 – метаемая пластина; 4 – неподвижная пластина; 5 – основание; 6 – зазор;
7 – пьезокерамический ультразвуковой преобразователь; 8 – ультразвуковой генератор;
D – направление детонации

вом.

Материалы и методы проведения исследований

В работе исследовали соединения титана BT1-0 (ГОСТ 19807-91) с алюминиево-магниевым сплавом АМг5 (ГОСТ 4784-2019),

полученные обычной сваркой взрывом и сваркой с воздействием акустических колебаний. Метаемой пластиной служил BT1-0, акустические колебания подводили к АМг5. Изначальные толщины BT1-0 и АМг5 составляли 5 и 4 мм; габариты полученного

Рис. 2. Микроструктуры зоны соединения BT1-0+AMg5 при различных величинах W_2 , полученных сваркой взрывом с одновременным введением акустических колебаний (а) и обычным способом сварки взрывом (б)

композита составляли 200 на 80 мм.

В качестве взрывчатого вещества использовали смесь аммонита 6ЖВ с песком в соотношении 60/40. Режимы сварки выбирались исходя из энергии W_2 , величину которой меняли за счет изменения сварочного зазора, скорость детонации взрывчатой смеси находилась в пределах 2350-2450 м/с. Режимы сварки приведены в таблице.

В экспериментах с применением акустических колебаний использовался ультразвуковой генератор УЗГИ-5 с набором пьезокерамических преобразователей, расчетная

резонансная частота которых составляла 16,5 КГц. Амплитуда колебаний на торце преобразователя, измеренная при помощи микрометрической головки, составляла 3-4 мкм. Акустические колебания подводились к неподвижной пластине посредством волновода с тыльной стороны неподвижной пластины. Схема эксперимента показана на рис. 1.

Образцы для металлографических исследований вырезали из центра пластин параллельно направлению детонации. Исследования микроструктуры проводили на элек-

Рис. 3. Зависимость длины волнового профиля l от энергии W_2

Рис. 4. Зависимость размаха волнового профиля a от энергии W_2

тронном микроскопе FEI Versa 3D. Исследования прочности на отрыв слоев проводили по методике ОСТ 5.9311 – 78, согласно которой прочность определяется как отношение нагрузки, при которой происходит разрушение композита к площади соединения.

Результаты и их обсуждение

Исследование микроструктуры

На рис. 2 приведены микроструктуры соединений ВТ1-0+АМг5, полученных при различных значениях энергии W_2 обычным способом сварки взрывом (б) и сваркой взрывом с одновременным введением акустических колебаний в неподвижную пластину (а). При $W_2 < 1,0$ МДж/м² при обоих способах сварки происходит формирование безволнового соединения с отдельными участками нестабильного волнообразования. Размах и длина волнового профиля существенно изменяются по длине соединения, что может свидетельствовать об общей нестабильности деформационных процессов при данных режимах сварки. При $W_2 = 1,1 \div 1,48$ МДж/м² для обоих способов сварки характерно наличие волнового профиля со схожими формой и расположением оплавленных участков.

Для численной оценки изменения струк-

туры соединения в зависимости от способа и режимов сварки, были проведены измерения параметров волнового профиля в зоне соединения металлов и удельной площади оплавленного металла для каждого образца не менее чем в 5 полях зрения. Результаты измерений показали, что на участке $W_2 = 1,26 - 1,48$ МДж/м² введение акустических колебаний при сварке сопровождается увеличением длины (рис. 3) и размаха (рис. 4) волнового профиля. Кроме того, при введении акустических колебаний на том же интервале наблюдается значительное снижение удельной площади оплавленных участков по длине соединения (рис. 5).

Предполагаемое объяснение этого эффекта заключается в следующем. Известно, и широко освещено в современной литературе влияние акустических колебаний на пластические свойства материалов. Например, в работе [6] показано, что воздействие акустических колебаний при сжатии титана и алюминия приводит к значительному повышению пластических свойств обоих материалов.

Известна зависимость [1], связывающая значение температуры в произвольном слое u с деформацией материала:

Рис. 5. Зависимость удельной площади оплавленных участков S , мкм²/мкм, по длине соединения от энергии W_2

$$T(y) = \frac{S_k \cdot \varepsilon(y)}{c \cdot \rho} + T_0, \quad (1)$$

где: $T(y)$ – температура произвольного слоя y в начальный момент времени; S_k – сопротивление металла деформированию, численно равно динамическому пределу текучести; $\varepsilon(y)$ – текущее значение деформации в слое y ; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; T_0 – начальная температура.

Из представленной зависимости следует, что тепловой эффект деформации прямо связан с динамическим пределом текучести материала. Иными словами, материалы с меньшим динамическим пределом текучести меньше нагреваются при схожем уровне пластических деформаций. Отсюда повышение пластических свойств под действием акустических колебаний должно приводить к снижению деформационного нагрева, а следовательно, и к уменьшению объема оплавленного металла.

Изменение структуры оплавленных участков в зависимости от способа и режимов сварки

Оплавленные участки в зоне соединения образуются уже при энергии $W_2=0,78-0,85$

МДж/м², однако количество их незначительно (рис. 5). В диапазоне W_2 0,85-1,48 МДж/м² наблюдается практически линейная зависимость удельной площади оплавленных участков от энергии W_2 .

Структура оплавленных участков сильно различается в зависимости от энергии W_2 и их расположения относительно зоны соединения. При $W_2=0,78 \div 1,0$ МДж/м², большинство оплавленных участков имеет схожую морфологию, которая характеризуется матрицей из твердого раствора на основе алюминия с включениями алюминидов титана и чистого титана (рис. 6, а). При наличии волнового профиля оплавленные участки имеют вытянутую вдоль направления детонации форму и располагаются возле каждой вершины волны; при отсутствии периодического волнового профиля расположение и форма оплавов хаотичны.

При $W_2=1,1 \div 1,35$ МДж/м² типичная структура оплавов характеризуется наличием двух зон с различным химическим составом (рис. 7, а, б). На рис. 7, а показана уже описанная ранее зона твердого раствора

Рис. 6. Структура и химический состав оплавленных участков в соединениях, полученных при различных значениях W_2 : а – 1,0; б – 1,48 МДж/м²

алюминия, прилегающая к границе соединения со стороны АМг5. Буквой «б» обозначена зона, располагающаяся со стороны. В химическом составе зоны «б» превалирует титан, а соотношение элементов указывает на преобладание интерметаллида Ti_3Al (рис. 8). Обе зоны условно можно называть не опасными для прочности соединения, поскольку область «а» из-за высокого содержания алюминия обладает малой склонностью к трещинообразованию, а из области «б» выход трещин в зону соединения сильно затруднен.

Увеличение энергии W_2 до 1,48 МДж/м² при сварке без воздействия акустических колебаний приводит к изменению структуры оплавленных участков (рис. 6, б), при этом форма оплавленных участков опреде-

ляется наличием вихревой зоны на границе материалов. В деформацию оказываются вовлечены примерно равные объемы металла относительно границы соединения, что определяет и химический состав оплава. Исчезает прослойка титана, отделявшая зону «б» от границы соединения, а распределение элементов по объему становится более равномерным. Химический состав оплава соответствует смеси интерметаллидов $TiAl$, $TiAl_2$, Ti_3Al , что вкупе с объемом и условиями кристаллизации оплава, по всей видимости, обуславливает появление трещин.

При сварке с воздействием акустических колебаний с энергией $W_2=1,48$ МДж/м² структура оплавов остается не меняется, а образования зон перемешивания не происходит.

Рис. 7. Типичная структура оплава, $W_2=1,26$ МДж/м²

Рис. 8. Химический состав оплавленного участка

Зависимость прочности соединения титана ВТ1-0 с алюминиево-магниевым сплавом АМг5 от параметров высокоскоростного соударения и воздействия акустических колебаний

Результаты механических испытаний приведены на рис. 8. Кривая показывает усредненное значение прочности для 5 образцов, планки погрешностей соответствуют минимальным и максимальным значениям. Можно заметить значительный разброс между максимальными и минимальными значениями, схожий разброс наблюдался и в работе [7], где аналогичным способом измеряли прочность соединения титана с АМг6. В качестве объяснения наблюдаемого разброса авторы предложили действие остаточных напряжений. Кроме того, возможными причинами могут являться погрешности в геометрии образца или погрешности при проведении испытаний.

На рис. 9, б, показана зависимость прочности соединений ВТ1-0+АМг5, полученных обычным способом сварки взрывом, от энергии W_2 . На этом графике можно выделить два диапазона W_2 , которым соответ-

ствует изменение прочности.

В первом диапазоне $W_2=0,78-1,1$ МДж/м² прочность возрастает и достигает максимума в 318 МПа при значении $W_2=1,1$ МДж/м². Исходя из существующих представлений о сварке взрывом, увеличение прочности соединения на этом интервале можно объяснить тем, что с увеличением степени пластической деформации в зоне соединения повышается число активных центров, на которых реализуется объемное взаимодействие между свариваемыми материалами. С точки зрения микроструктур набор прочности сопровождается увеличением размаха отдельных фрагментов волнового профиля, а максимум прочности достигается при появлении устойчивого волнового профиля.

В диапазоне $W_2=1,26-1,48$ МДж/м² средняя прочность снижается от своего максимума в 324 МПа при $W_2=1,26$ МДж/м² до минимума в 213 МПа при $W_2=1,48$ МДж/м². Анализ микроструктур показывает, что снижение прочности коррелирует с повышением содержания титана в оплавленных зонах, образованием хрупких интерметаллидов и увеличением количества оплавов с

Рис. 9. Зависимость прочности соединения ВТ1-0+АМг5 от энергии W_2 и способа сварки:

а – сварка с воздействием акустических колебаний; б – обычная сварка взрывом

трещинами.

Отдельно стоит сказать о результате, полученном при минимальной энергии $W_2=0,78$ МДж/м², со средней прочностью в 307 МПа. Этот результат с одной стороны не укладывается в общую тенденцию возрастания прочности в диапазоне $W_2=0,78-1,1$ МДж/м², с другой стороны микроструктура соединения не имеет существенных отличий, способных объяснить разницу в прочности. В качестве возможного объяснения было выдвинуто предположение, что факторами, повлиявшими на прочность соединения титана с алюминиево-магниевым сплавом, могли оказаться шероховатость и качество очистки поверхности перед сваркой.

Для проверки этого предположения был проведен эксперимент, цель которого заключалась в проверке предположения о влиянии качества подготовки поверхности на прочность соединения ВТ1-0+АМг5. Для этого свариваемые поверхности обеих пластин были условно разделены на две части, каждую из которых обрабатывали абразивными материалами различной зернистости

(рис. 10). Размер частиц абразива 200 и 30 мкм был выбран исходя из того предположения, что глубина микрорельефа, оставляемого зернами закрепленного абразива, как правило, не превышает половины диаметра абразивной частицы. Таким образом, максимальная высота микрорельефа на смежных поверхностях не превышала 100 и 15 мкм. Режимы для сварки были выбраны аналогичными тем, при которых было получено значение прочности 307 МПа.

В результате прочность образца со стороны «грубого» микрорельефа поверхности составила в среднем 132 МПа при разбросе значений 5 измерений в диапазоне 41-248 МПа и разрушении по зоне соединения. Средняя прочность со стороны «тонкого» микрорельефа поверхности составила 314 МПа при разбросе в диапазоне 266-346 МПа и разрушении по наименее прочному материалу (АМг5).

Микроструктуры соединений изучались как в продольном (параллельном направлению детонации), так и в поперечном направлении (рис. 11). Несмотря на более чем двукратную разницу в прочности, суще-

Рис. 10. Схема подготовки поверхностей в эксперименте

ственной отличий в строении зоны соединения обнаружено не было. При любом направлении вырезки образца, граница соединения имела неровную форму с участками оплавленного алюминия с отделившимися частицами титана.

Предполагаемое объяснение полученному результату заключается в следующем. Как известно, одним из основных условий образования соединения при сварке взрывом является достижение некоторого необходимого уровня пластических деформаций в зоне соединения, при котором образуются активные центры между материалами, а атомные решетки сближаются на расстояние, на котором становится возможно их взаимодействие. При этом максимальные деформации могут достигать нескольких сотен процентов и концентрируются в очень узкой зоне вблизи линии соединения. Глубина этой зоны зависит от энергии W_2 и при относительно небольших W_2 может быть сопоставима с высотой микронеровностей поверхности. В таком случае условия деформирования вершин и впадин микронеровностей будут сильно различаться и даже при достижении плотного контакта, деформации у впадин микронеровностей могут оказаться недостаточными для образования прочного соединения. Следуя этой логике, можно ожидать, что влияние шероховатости

поверхности будет оказывать существенное влияние на прочность при относительно низких W_2 .

Прочность соединений при сварке с воздействием акустических колебаний оказалась в ряде случаев выше, чем прочность соединений, полученных обычным способом (рис. 9, а, б). Вблизи нижней границы области свариваемости (при $W_2=0,85$ и $1,0$ МДж/м²) прочность соединения при сварке с ультразвуком составила 305 и 300 МПа, в то время как при обычной сварке 158 и 227 МПа. Этот результат согласуется с результатами предыдущих исследований в том, что введение акустических колебаний при сварке приводит к расширению области свариваемости, т.е. увеличению диапазона сварочных параметров, при которых образуется прочное соединение материалов. Предполагается, что причиной повышения прочности при низких значениях W_2 является достижение более высокого уровня пластических деформаций вблизи зоны соединения, обусловленное повышением пластичности металла под действием акустических колебаний, а также повышением количества и подвижности дислокаций, способствующих образованию активных центров взаимодействия между материалами.

При $W_2=1,1-1,35$ МДж/м² средняя прочность соединения при обычном способе

Рис. 11. Структуры зоны соединения в зависимости от качества подготовки поверхности и направления шлифа:

а – «грубый» рельеф, продольное направление; б – «грубый» рельеф, поперечное направление; в – «тонкий» рельеф, продольное направление; г – «тонкий» рельеф, поперечное направление

сварки превышает 300 МПа, а разрушение образцов происходит по наименее прочному из свариваемых материалов – АМг5, что указывает на то, что прочность соединения превышает прочность АМг5. Таким образом, исходя из условия равнопрочности, оптимальным диапазоном при обычном способе сварки ВТ1-0+АМг5 является диапазон $W_2=1,1-1,35$ МДж/м². При сварке с воздействием акустических колебаний равнопрочность соединения с основным металлом достигается в более широком интервале W_2 , и оптимальным диапазоном режимов сварки можно назвать диапазон $W_2=0,85-1,35$ МДж/м².

Выводы:

1. Установлено, что введение акустических колебаний при сварке взрывом титана ВТ1-0 с алюминиево-магниевого сплавом АМг5, сопровождается расширением диапазона энергий W_2 , при которых формируется равнопрочное соединение, с 1,1-1,35 МДж/м² при обычной сварке взрывом, до 0,85-1,35 МДж/м² при сварке взрывом с воздействием акустических колебаний на неподвижную пластину АМг5.

2. Показано, что вблизи нижней границы области свариваемости пары ВТ1-0+АМг5 влияние на прочность соединения оказывает качество подготовки свариваемых поверхностей.

3. Установлено, что воздействие акустических колебаний на неподвижную пластину АМг5 при сварке ВТ1-0+АМг5 сопровождается увеличением параметров волнового профиля и уменьшением количества расплавленного металла в зоне соединения.

Библиографический список

1. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение - 1, 2005. – 544 с.
2. Абрамов, О. В. Ультразвуковая обработка материалов / О. В. Абрамов, И. Г. Хорбенко, Ш. Швигла Москва – Братислава : "Машиностроение" – "Альфа", 1984. – 275 с.
3. Влияние параметров высокочастотной акустической волны на структуру, свойства и пластическое течение металла зоны соединения свариваемых взрывом материалов с одновременным воздействием ультразвука / А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Е. В. Кузьмин, А. Н. Дородников // Физика металлов и металловедение. – 2017. – Т. 118, № 5. – С. 513-521.
4. Особенности формирования соединения композита титан–сталь при сварке взрывом с воздействием ультразвука / Е. В. Кузьмин, М. П. Королев, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, М. С. Зарубин, П. А. Петрушкин, В. А. Львов // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград, 2020. – № 11 (246). – С. 19-23
5. Influence of structure formation and properties of bimetal produced by ultrasound-assisted explosive welding / E. V. Kuz'min, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, M. P. Korolev // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 71. – Pp. 734-742.
6. A comparative study of mechanical and microstructural characteristics of aluminium and titanium undergoing ultrasonic assisted compression testing / H. Zhou, H. Cui, Q. Qin, H. Wang, Y. Shen // Materials Science & Engineering. – 2017. – Vol. 682. – Pp. 376-388.
7. 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.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00545