УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-48-54

*А. Ю. Малахов, канд. техн. наук, Н. Н. Ниёзбеков, аспирант,
И. В. Сайков, канд. техн. наук, И. В. Денисов, канд. техн. наук*

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМг6 В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, malakhov@ism.ac.ru

В работе представлены результаты исследования особенностей деформации основной пластины из АМг6 в процессе сварки взрывом (с коррозионностойкой сталью 08Х18Н10Т). Установлено, что наибольшей деформации подвергаются концевые и краевые участки основной пластины, о чём свидетельствуют построенные карты распределения остаточных деформаций по площади пластины. С повышением скорости детонации происходит интенсификация процесса деформации, что приводит к появлению трещин и локальному отколу фрагментов пластины. Кроме того, результаты замеров удлинения основной пластины показали, что заметная продольная деформация пластины начинается примерно с расстояния равным $2/3$ от общей длины пластины. Замеренная величина начала удлинения (240 ± 10 мм) с точностью 95 % сходится с расчётным значением (229 мм).

Ключевые слова: сварка взрывом, остаточная деформация, алюминиевый сплав АМг6, скорость детонации, микроструктура, биметалл

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

THE ASPECTS OF AlMg6 ALUMINIUM ALLOY DEFORMATION UNDER EXPLOSIVE WELDING

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinecs and Materials Science RAS,
Chernogolovka, malakhov@ism.ac.ru*

The paper presents the results of a study of the features of the deformation of the main plate made of AlMg6 in the process of explosion welding (with corrosion-resistant steel 08Cr18Ni10Ti). It was found that the end and edge sections of the main plate undergo severe deformation, as evidenced by the constructed maps of the distribution of residual deformations over the plate area. With an increase in the detonation velocity, an intensification of the deformation process occurs, which leads to the appearance of cracks and local spalling of plate fragments. In addition, the results of measurements of the elongation of the main plate showed that a noticeable longitudinal deformation of the plate begins approximately at a distance equal to $2/3$ of the total length of the plate. The measured value of the beginning of elongation (240 ± 10 mm) with an accuracy of 95% converges with the calculated value (229 mm).

Keywords: explosive welding, residual deformation, AlMg6 aluminum alloy, detonation velocity, microstructure, bimetal

Сварка взрывом на сегодняшний день является одним из самых перспективных методов соединения разнородных металлов и сплавов [1-3]. В процессе сварки взрывом используется энергия взрывчатых веществ (ВВ) для создания металлической связи между свариваемыми материалами. При детонации ВВ, образовавшиеся в результате химической реакции сильно сжатые и нагретые газообразные продукты взрыва расширяются, сжимают окружающую среду (воздух, жидкость, твердые тела) и вызывают ударные волны (УВ). УВ, проходя по металлическому телу, создают в нем упругие возму-

щения, способные его деформировать. Распространение упругих возмущений в металлическом теле обычно рассматривают как систему продольных и поперечных волн, имеющих разную скорость. Прохождение продольных волн ведет к изменению объема металлического тела, а распространение поперечных волн вызывает перемещение отдельных объемов металла относительно друг друга, т.е. происходит изменение формы тела [4]. Металлическое тело, подвергнутое сжатию ударными волнами, после снятия нагрузки испытывает действие растягивающих напряжений, что представляет собой

наибольшую опасность разрушения при обработке металлов взрывом [5].

Вследствие высокой скорости процесса сварки взрывом и сопутствующих ей явлений (разлёт продуктов детонации, сильные возмущения окружающей среды и т.д.), на практике достаточно проблематично исследовать процесс соединения металлов. Для оценки влияния высокоскоростного нагружения на металл изготавливаются специальные металлографические образцы. Для оценки уровня остаточных деформаций металла после сварки взрывом используют различные экспериментальные и теоретические методы: использование слоистых моделей, координатных сеток, реперных меток, структурно-наследственных моделей [6-9] и компьютерного моделирования [10].

В работе [10] с помощью программы LS-DYNA были математически смоделированы изменения длины биметаллических листов после сварки взрывом. Авторами было показано, что характер деформационного процесса и изменение длины листов зависят от размера исходных листов и их взаимного расположения, механических свойств плакирующего листа, типа ВВ, а также размера зазора. В работе [11] были исследованы особенности продольной деформации трубы из титана BT1-0 в процессе её сварки взрывом с медным стержнем. Было показано, что относительное удлинение титановой трубы

уменьшается с увеличением скорости детонации ВВ.

Исходя из того, что в последнее время существует повышенный интерес к сварке взрывом алюминиево-магниевого сплава со сталями [12-14], целью настоящей работы было исследование особенностей деформации основной пластины из алюминиево-магниевого сплава АМг6 и установление зависимости уровня остаточных деформаций от скорости детонации.

Материалы и методики исследований

Для проведения экспериментов по сварки взрывом применялись следующие материалы: коррозионностойкая сталь 08Х18Н10Т (3×200×300 мм) и алюминиево-магний сплав АМг6 (4×200×300 мм).

Эксперименты по сварки взрывом проводились по параллельной схеме (рис. 1). 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 защиты наружной поверхности метаемой пластины от воздействия продуктов детонации использовалась полипропиленовая пленка толщиной 0,1 мм. Для уменьшения разброса и обеспечения полноты детонации использовалась забойка из песка.

Сварка взрывом осуществлялась на трёх режимах, при которых скорости детонации

Рис. 1. Схема эксперимента:

- 1 – песчаная опора; 2 – подкладная стальная пластина; 3 – основная пластина;
4 – метаемая пластина; 5 – взрывчатое вещество; 6 – детонатор; 7 – забойка (песок);
8 – опорные элементы; h – установочный зазор

Рис. 2. Основная пластина из АМг6 с координатной сеткой до сварки взрывом

ВВ составляли 2350 м/с, 2500 м/с и 3200 м/с, соответственно.

После сварки для определения сплошности сцепления слоев биметаллических пластин осуществлялся ультразвуковой контроль (УЗК). Он проводился дефектоскопом УД2В-П.

Образцы для металлографических исследований отбирались из начальных и конечных участков биметалла. Образцы вырезались на отрезном станке SQ-60A с охлаждением области резания. Для удаления грубой шероховатости поверхности проводилось шлифование с использованием абразивной бумаги зернистостью от 40 до 2500. Полирование до металлического блеска осуществлялось с применением эмульсий, содержащих алмазные частицы с размерами от 5 до 2 мкм. Шлифование и полирование образцов выполнялось на установке для приготовления металлографических шлифов Шлиф-1М/V.

Для выявления элементов микроструктуры проводилось химическое травление поверхности образцов реактивом, состоящим из ортофосфорной, серной и азотной кислоты в соотношении 5:1:0.5. Травление осуществлялось путем погружения полированной поверхности образца в нагретый до 100 °С реактив и выдержки в течение 10 сек.

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

Для изучения пластической деформации основной пластины свариваемых взрывом образцов использовали метод координатных сеток (рис. 2). На тыльные поверхности пластин из сплава АМг6 наносились продольные и поперечные линии с шагом 10 мм. Измерение расстояния между линиями осуществлялось с помощью штангенциркуля до и после сварки взрывом.

Деформация каждой клетки после сварки взрывом оценивалась по формуле 1.

$$\varepsilon' = \frac{(S - S_0)}{S_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где S_0 – площадь клетки до сварки взрывом, мм²; S – площадь клетки после сварки взрывом, мм².

Относительное продольное удлинение пластины рассчитывалось по формуле 2.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} 100\%, \quad (2)$$

где l_0 – длина клетки до сварки взрывом, мм; l – длина клетки после сварки взрывом, мм.

Расчет приблизительного расстояния начала удлинения основной пластины проводился по следующей формуле:

$$L_{\text{н.уд.}} = L_1 + L_2, \quad (3)$$

где L_1 – расстояние, которое пройдет точка контакта до момента начала возвращения волны разгрузки, м; L_2 – расстояние, которое пройдет точка контакта за время её встречи с волной разгрузки, м.

Расстояния L_1 рассчитывается по следующей формуле:

$$L_1 = \frac{L_n}{C_{cp}} V_k, \quad (4)$$

где L_n – длина основной пластины, м; C_{cp} – средняя скорость звука в АМг6 (4740 м/с) [15]; V_k – скорость точки контакта, м/с. При параллельном расположении пластин скорость точки контакта равна скорости детонации ВВ ($V_k = D$).

$$L_2 = \frac{(L_n - L_1)}{C_{cp}} V_k \quad (5)$$

Относительная погрешность измерения определялась по формуле 6.

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{\bar{a}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где Δa , абсолютная погрешность измерения, мм; $\bar{a}$ среднеарифметическое значение, мм.

Результаты и обсуждения

При скорости детонации взрывчатого вещества $D = 2350$ м/с и 3200 м/с соединение получить не удалось. Расслоение биметалла происходило спустя несколько часов после сварки взрывом. При $D = 2500$ м/с было получено устойчивое соединение. Результаты УЗК биметаллического листа, полученного при $D = 2500$ м/с показал, что площадь бездефектного соединения составляет 80 % от общей площади биметаллического листа.

Исследование микроструктуры границы соединения биметалла, полученного при $D = 2500$ м/с показало, что в результате высокоскоростной деформации на границе соединения 08X18H10T–АМг6 в сплаве АМг6 образовались полосы локализованного сдвига (рис. 3). Также были выявлены участки оплавов на границе соединения толщиной от 2 до 15 мкм.

Количество полос локализованного сдвига возрастает по мере удаления от начала сварки взрывом. По общепринятым представлениям причиной образования полос локализованного сдвига является потеря устойчивости пластического течения, возникающая при переходе работы деформации в тепло, что приводит к разупрочнению материала и в некоторых случаях его откольному повреждению [5].

Известно, что ударная волна в твердом теле мало отличается от акустической и распространяется в металле примерно со скоростью звука [16]. На основании этого вывода в работе [11] предложили формулу для расчета приблизительного расстояния, с которого начинается удлинение титановой

Таблица 1 – Результаты теоретической оценки расстояния начала удлинения основной пластины из АМг6

Скорость детонации ВВ D , м/с	L_1 , мм	L_2 , мм	$L_{н.уд.}$ мм
2500	155	74,9	229

Рис. 3. Микроструктура границы соединения 08X18H10T – АМг6:

а – начальный участок; б – конечный участок

Рис. 4. Карты распределения остаточной деформации после сварки взрывом:
а – $D = 2350$ м/с; б – $D = 2500$ м/с; в – $D = 3200$ м/с

трубы в процессе сварки взрывом. В таблице 1 представлены результаты расчета начала удлинения основной пластины.

Теоретическую оценку начала удлинения основной пластины проводили только для биметаллического листа, полученного при D

$= 2500$ м/с, поскольку при других режимах соединения получено не было. По результатам расчета было определено, что удлинение пластины должно начинаться с расстояния 229 мм от начала точки инициирования.

Рис. 5. График относительного продольного удлинения пластины

На рис. 4 представлены карты деформации основных листов из АМгб после сварки взрывом.

Продольное относительное удлинение пластины составило 1,3 %. Расчетное значение начала удлинения сходится с экспери-

Таблица 2 – Расчетное и экспериментальное значение начала удлинения

Скорость детонации, D, м/с	Расчетное значение начала удлинения, мм	Экспериментальное значение начала удлинения, мм
2500	229	240±10

Анализ карт распределения остаточных деформаций показал, что деформация неравномерно распределяется по длине всех основных пластин. В пластине при $D = 2350$ м/с это выражено наличием трех зон. В первой зоне (от 0 до 30 мм) остаточная деформация составляет менее 4 %. Во второй зоне (от 30 до 210 мм) остаточная деформация составляет не больше 1%. Максимальная деформация наблюдается в третьей зоне и составляет более 10 %. При $D = 2500$ м/с и 3200 м/с в начальных участках деформация практически отсутствует и составляет менее 4 %. Максимальное значение деформации при $D = 2500$ м/с и 3200 м/с наблюдалось на расстоянии 240 мм и 250 мм от начала точки инициирования. При $D = 3200$ м/с произошло откольное разрушение боковых участков пластины.

Измерение толщины пластины после сварки взрывом показало, что при $D = 2350$ м/с, 2500 м/с и 3200 м/с ее толщина уменьшилась примерно на 6 %, 3,5 % и 4,25% соответственно. Минимальная толщина зафиксирована на конечных участках, где наблюдается максимальная деформация.

На рис. 5 представлена график изменения остаточной деформации по длине основной пластины полученного при $D = 2500$ м/с. На графике видно, что удлинение основной пластины начинается с расстояния 240 мм от начала точки инициирования и лавинообразно возрастает до максимального значения деформации 3,2 %.

ментальными с точностью 95 %. В таблице 2 представлены расчетное и экспериментальное значение начала удлинения.

Заключение

Показано, что на характер распределения остаточной деформации основной пластины из АМгб в условиях высокоскоростного соударения влияет скорость детонации. При заметном увеличении данного параметра происходит значительный рост уровня остаточных деформаций по площади пластины, а также возникновение трещин и отколов на концевых и боковых участках. Результаты замеров удлинения основной пластины показали, что заметная продольная деформация пластины начинается примерно с расстояния равным 2/3 от общей длины пластины. Замеренная величина начала удлинения (240 ± 10 мм) с точностью 95 % сходится с расчётным значением (229 мм).

Библиографический список

1. Sherpa, B. B. Effect of explosive welding parameters on Al/LCS interface clad by low velocity of detonation explosive welding (LVEW) process / B. B. Sherpa, P. D. Kumar, A. Upadhyay, S. Kumar, A. Agarwal, S. Tyagi // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 113. – № 11-12. – Pp. 3303-3317.
2. Kuz'min, V. I. Investigation of the influence of kinematic and energy parameters on the structure and strength of explosion-welded steel-aluminum composite / V. I. Kuz'min, V. I. Lysak, E. V. Kuz'min // Solid State Phenomena. – 2021. – Vol. 316. – Pp. 62-67.
3. Kuz'min, V. I. Investigation of the Influence of Dynamic Parameters on the Formation, Structure and Properties of Bimetallic Compounds during Explosion Welding with Simultaneous Stamping / V. I. Kuz'min, V. I. Lysak, E. V. Kuz'min // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. – Vol. 969. – 7p.

4. Крупин, А. В. Деформация металлов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Н. И. Шефтель, А. Г. Кобелев. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.
5. Беликова, А. Ф. Локализация деформации и связь ее с деформированным состоянием материала / А. Ф. Беликова, С. Н. Буравова, Ю. А. Гордополов // Журнал технической физики. – 2013. – Том. 83. – Вып. – 2. С. 153-155.
6. Строков, О. В. Особенности пластического деформирования металла при сварке взрывом композита сталь-алюминий с прослойкой хрома / О. В. Строков, В. И. Кузьмин, В. И. Лысак, В. В. Литвинов // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – №4. – С. 46-50.
7. Haikova, T. V. Experimental studies on the stress-strain state under drawing Aluminum-Copper bimetal parts rectangular in plan / T. V. Haikova, R. H. Puzyr, R. V. Levchenko // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2020. – Vol. 61. – № 4. – Pp. 404-412.
8. Кузьмин, С. В. Новая методика исследования пластической деформации металла в околошовной зоне свариваемых взрывом соединений / С. В. Кузьмин, Е. А. Чугунов, В. И. Лысак, А. П. Пеев // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – №2. – С. 54-60.
9. 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.
10. Денисов, И. В. Компьютерное моделирование деформации составляющих слоев биметалла в процессе сварки взрывом с использованием программы LS-DYNA / И. В. Денисов, А. Ю. Муйземнек, А. Е. Розен, О. Л. Первухина, Ю. А. Гордополов // Известия ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». Вып. 4 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 5. – С. 66-74.
11. Малахов, А. Ю. Исследование влияния режимов сварки взрывом на линейную деформацию титановой трубы в биметаллическом стержне Cu+Ti / А. Ю. Малахов, И. В. Сайков, П. А. Николаенко // Вестник Тамбовского Университета. – 2018. – Т. 23. – № 123. – С. 445-448.
12. Kuz'min, V. I. A Study of the Influence of Thickness of Anti-Diffusion Layer on the Structure and Thermal Resistance of Composite A5-Cr-St3 / V. I. Kuz'min, V. I. Lysak, E. V. Kuz'min // Materials Engineering and Technologies for Production and Processing V. – 2020. – Vol. 299. – Pp. 137-142.
13. Carvalho, G.H.S.F.L. Explosive welding of aluminium to stainless steel using carbon steel and niobium interlayers / G.H.S.F.L. Carvalho, I. Galvão, R. Mendes, R. M. Leal, A. Loureiro // Journal of Materials Processing Technology. – 2020. – Vol. 283. – № 116707.
14. Chen, X. Study of explosive welding of A6061/SUS821L1 using interlayers with different thicknesses and the air shockwave between plates / X. Chen, X. Li, D. Inao, S. Tanaka, K. Hokamoto // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 116. – № 11-12. – Pp. 3779-3794.
15. Волков, А. Д. Коэффициенты упругости второго и третьего порядков в поликристаллическом сплаве алюминия марки АМг6 / А. Д. Волков, А. И. Кокшайский, А. И. Коробов, В. М. Прохоров // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61. – № 6. – С. 685-691.
16. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М.: Физматлит, 2008. – 656 с.