УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-39-43

**Ю. П. Бесшапошников, канд. техн. наук, М. С. Пушкин*, **, канд. ф-м. наук,
А. В. Иноземцев*, канд. техн. наук, А. М. Пацелов*, канд. ф-м. наук**

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ТОЛСТОЛИСТОВОГО АЛЮМИНИЯ СО СТАЛЬЮ

ООО «Протол», Екатеринбург, bm@protol.ru

***Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, avinz@imp.uran.ru**

****ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет» им. первого Президента
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, pushkin@imp.uran.ru**

Показана практическая возможность получения сваркой взрывом за один прием толстолистого алюминия со сталью с прочностью соединения более 100 МПа.

Ключевые слова: сварка, энергия, тепло, расплав, шов, прочность

Y. P. Besschaposchnikov, M. S. Pushkin*, **, A. V. Inozemtsev*, A. M. Patselov*

ABOUT SOME FEATURES OF EXPLOSIVE WELDING OF LARGE THICKNESS ALUMINUM WITH STEEL

«Protol» Ltd, Ekaterinburg, bm@protol.ru

***M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, avinz@imp.uran.ru**

****Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, pushkin@imp.uran.ru**

The practical possibility of obtaining by explosive welding at one time of large plate aluminum with steel with a joint strength of more than 100 MPa is shown.

Keywords: welding, energy, heat, melt, seam, strength

В настоящее время при производстве алюминия в электролизерах с обожженными анодами используют переходную биметаллическую плиту сталь – алюминий, изготовленную сваркой взрывом (СВ). Толщина алюминиевого слоя обычно составляет 8–20 мм, в зависимости от конструкции электролизера. При увеличении толщины алюминиевого слоя до 20 мм, как правило, СВ проводят в два этапа: вначале наносят тонкий слой алюминия (2–5 мм), затем – более толстый. Считается [1], что напрямую получить прочное соединение толстолистого алюминия со сталью проблематично.

В работе [2] показана принципиальная возможность СВ толстолистого алюминия со сталью с прочностью соединения на отрыв слоев ($\sigma_{отр.}$) больше 60 МПа.

В настоящей работе приводятся практические результаты по СВ толстолистого

алюминия марки А5 со сталью Ст3, в которых $\sigma_{отр.} > 100$ МПа.

Методическая часть

Эксперименты проводили на пластинах размером 400 мм × 400 мм. Толщина стального слоя составляла 30 мм, алюминиевого – 8 мм, 18 мм и 20 мм.

Испытания прочности сцепления биметаллических образцов на отрыв слоев [3] осуществляли на универсальной испытательной машине Instron 5982. Металлографический анализ проводили с использованием оптического микроскопа Epiquant, снабжённого вычислительным комплексом SIAMS. Исследование микроструктуры зоны сварных швов выполнено с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta FEI 200 3D.

Свариваемые пластины перед СВ располагались параллельно друг к другу на рас-

стоянии h_0 (сварочный зазор). На алюминевую (метаемую) пластину сверху накладывался слой взрывчатого вещества (ВВ) толщиной H . В качестве ВВ использовали мелкоизмельченную аммиачную селитру марки ЖВ (АСМ) или ее смесь с кварцевым песком (АСМ+П). Скорость детонации ВВ - D предварительно измерялась в зарядах, размещенных на стальных пластинах размером 3x250x500мм методом контактных датчиков, аналогично [4]. Угол поворота β метаемой пластины, в момент контакта с неподвижной стальной, равный, в данном случае, углу соударения γ , определяли из уравнения [5]:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\alpha(\alpha+4)}{(\alpha+2)^2} \operatorname{tg} \beta_0,$$

где $\alpha = \frac{r}{(k+1)\operatorname{tg}\beta_0} \frac{x}{H}$, r – коэффициент нагрузки; x – абсцисса точки соударения k – интегральный показатель политропы; β_0 – предельный угол метания.

Абсцисса x связана с h_0 формулой:

$$\frac{h_0}{x} = \frac{\alpha}{\alpha+2} \operatorname{tg} \beta_0$$

Угол β_0 вычисляли с использованием формулы Гарни, преобразованной к виду [3]:

$$v_0 = Dr \sqrt{\frac{3}{(k^2-1)(r^2+5r+4)}},$$

где $v_0 = 2D \sin\left(\frac{\beta_0}{2}\right)$ – предельная скорость метаемой пластины.

Показатель k для АСМ рассчитывали по эмпирической формуле [6]:

$$k = 1,53 \cdot \operatorname{arctg} \left[\frac{D^3}{2,25} + \frac{D^2}{10} \right]^2,$$

где D в км/с.

Для смеси АСМ+П $k = 2,2$ (экспериментально определен по методике [7]).

Энергию, затраченную на пластическую деформацию W_2 , рассчитывали согласно [8]:

$$W_2 = \frac{1}{2} \left[2D \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right]^2 \frac{\rho_1 \delta_1 \rho_2 \delta_2}{\rho_1 \delta_1 + \rho_2 \delta_2} \left[1 - \left(\frac{V_K}{C_0} \right)^2 \right],$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности метаемой и неподвижной пластин; δ_1, δ_2 – толщины метаемой и неподвижной пластин; V_K – скорость контакта; C_0 – скорость звука.

Расчет «мгновенного» тепла

Хорошо известно, что с увеличением V_K и γ , при прочих равных условиях, в зоне соударения увеличивается тепловыделение и растет температура, а поэтому для такой па-

Таблица 1 – Некоторые режимы соударения для однородных пластин

Металл	Режим соударения		ρ_1	δ_1	δ_2	C_n [11]	C_s [11]	Расплав		
	$V_k \times 10^{-2}$, м/с	γ , град.						$Q_{\text{расч.}}$ [9]	$Q_{\text{эксп.}}$ [9]	$Q_{\text{расч.}}$ (1,3)
	$\times 10^{-3}$, кг/м ³	$\times 10^3$, м	м/с	МДж/м ²						
1(Ст3+Ст3)	3,80	15,5	7,85	3	10	5180	3220	0,320	0,240	0,286
2(Ст3+Ст3)	2,25	18,33	7,85	3	10	5180	3220	0,172	0,116	0,133
3(Cu+Cu)	2,20	16	8,9	2,5	6	3750	2270	0,108	0,056	0,097
4(Cu+Cu)	1,86	21,5	8,9	1,4	2,5	3750	2270	0,096	0,052	0,061
5(Cu+Cu)	1,86	21,5	8,9	2,5	2,5	3750	2270	0,142	0,096	0,086
6(Д16+Д16)	3,20	17	2,78	4	10	5150	3130	0,116	0,116	0,116
7(Д16+Д16)	3,40	14,33	2,78	6	10	5150	3130	0,120	0,096	0,122
8(Нерж+Нерж)	4,50	13	7,9	1	1	5000	3100	0,058	0,040	0,046
9(Ti+Ti)	4,00	28	4,5	1	1	5090	3125	0,128	0,140	0,122

ры, как алюминий-сталь, увеличивается риск появления и роста интерметаллидов, делающих соединение более хрупким и менее прочным. Поэтому, желательно осуществлять процесс СВ на малых V_k и γ , при которых в зоне сварки выделялось бы как можно меньше тепловой энергии, но достаточной для образования прочного соединения.

В работе [9] приведена эмпирическая формула для расчета энергии, выделившейся в сварном соединении («мгновенное» тепло):

$$Q = \kappa V_k^2 \rho_1 \delta_1 \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \sin^2 \frac{\gamma}{2}, \quad (1)$$

где κ – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент κ был найден из эксперимента по определению температуры в сварном шве и считался постоянным. Для проверки (1) там же были проанализированы некоторые режимы соударения для однородных пластин (табл.1). Путем измерения толщины расплавленного слоя h в зоне соединения металлов, было определено минимальное количество «мгновенного» тепла, необходимого для расплавления этого

слоя:

$$Q = m[s(T_{пл} - T_0) + \Delta H_{пл}], \quad (2)$$

где $m = h\rho$ – масса расплавленного металла на единицу площади (удельная масса расплава); h – средняя толщина расплава; ρ – плотность материала пластин; s – удельная теплоемкость при температуре плавления $T_{пл}$; T_0 – температура до соударения; $\Delta H_{пл}$ – удельная теплота плавления (энтальпия плавления).

Так как в общем случае коэффициент пропорциональности в (1) не является постоянной величиной и, скорее всего, должен зависеть от свойств материала и скорости контакта, то в настоящей работе была сконструирована зависимость для κ (рис. 1):

$$10\kappa = p \tan^{-1} \left(\frac{1-U}{1-U+pN} \sqrt{\frac{U}{1-U}} \right), \quad (3)$$

где $U = \frac{V_k}{C_n}$; $N = \frac{C_s}{C_n}$; $p = \frac{1-N}{2N^2-N}$; C_n , C_s – нормальная и сдвиговая скорости звука.

Выражение (3) получено на основе результатов, представленных в таблице 1, а также экспериментально полученных данных [10], из которых следует, что при $V_k > C_s$ происходит резкое сужение зоны максимальных сдвиговых деформаций.

Рис. 1. График зависимости κ от V_k для алюминия

В качестве примера на рис. 1 представлен су расплава в формуле (2) определяли по график зависимости k от V_k для алюминия. выражению:

Таблица 2 – Некоторые результаты по СВ алюминия со сталью

№ оп.	ВВ	Плотность ВВ $\times 10^3$	$H \times 10^3$	$h_0 \times 10^3$	$\delta_1 \times 10^3$	$\delta_2 \times 10^3$	$V_k \times 10^2$	γ	k	$Q_{\text{расч.}} (1), (2)$	$h_{\text{расч.}} \times 10^6 (3)$	$h_{\text{экс.}} \times 10^6$	$\sigma_{\text{отр.}}$	Характер разрушения	W_2
-	-	кг/м ³	м				м/с	град.	-	МДж/м ²	м		МПа	% по зоне соедин.	МДж/м ²
1	АСМ	0,9	20	4	8	30	1,6	10,9	2,05	0,0229	7,00	7,12	120; 125	50	0,82
2	АСМ/П	0,95	30	5	18	30	1,5	7,9	2,2	0,0174	5,61	6,37	130; 142	0	0,78
3	АСМ	0,9	20	5	18	30	1,6	6,8	2,05	0,0161	4,87	-	112; 115	0	0,64
4	АСМ/П	0,95	40	4	20	30	1,6	7,7	2,2	0,0206	6,64	-	119; 124	50	0,91
5	АСМ/П	0,95	40	10	20	30	1,6	9,7	2,2	0,0326	10,5	-	125; 130	100	1,45

Примечание. В расчетах использовали следующие значения теплофизических и физических величин для алюминия: $c = 1145 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ (при $T = 900 \text{ К}$) [12]; $\rho_1 = 2700 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 282 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ (при $T = 900 \text{ К}$) [12]; $T_{\text{пл}} = 933 \text{ К}$ [12]; $T_0 = 293 \text{ К}$; $\Delta H_{\text{пл}} = 393 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ [13]; $C_n = 5000 \text{ м/с}$ [11]; $C_s = 3040 \text{ м/с}$ [11]

Как видно из таблицы 1, расчет Q по (1) с использованием (3) дает в целом лучшую, чем в [9] сходимость с экспериментальными результатами.

Результаты

В табл. 2 представлены некоторые результаты по СВ алюминия со сталью. Полагая, что в данных опытах расплавленный металл состоит из алюминия, удельную мас-

$$m = h\rho_1$$

Для проверки этого допущения, были проведены замеры расплавов в зоне соединения, аналогично [9], в 2-х разных опытах (табл. 2), и определены для них средние значения толщин расплавов. Типичные СЭМ изображения зоны сварного шва представлены на рис. 2.

Из таблицы 2 видно, что расчет хорошо

а

б

Рис. 2. Зона сварного шва для образца, сваренного в опыте 1 (а) и 2 (б) табл.2

согласуется с экспериментальными данными.

Там же показано, что и при $W_2 > 0,6$ МДж/м² (максимальный предел для получения оптимальных значений по скорости соударения [8]), можно получить соединение с высокой прочностью ($\sigma_{отр.} > 100$ МПа). С ростом расплавленного слоя разрушение сварного соединения частично, а при толщине расплава свыше 10 мкм, полностью происходит по зоне шва, что свидетельствует о потере его пластичности.

Полученные в настоящей работе результаты, легли в основу разработки технологии получения крупногабаритных биметаллических плит толстолистовой алюминий-сталь, для изготовления переходников применительно к алюминиевому производству в линейных электролизерах с обожженными анодами, работающих в условиях токовой нагрузки от 300 до 550 кА.

Выводы

1. Предложен модернизированный метод расчета «мгновенной» энергии, что позволило адекватно оценивать среднюю толщину расплавленного слоя в зоне сварки.

2. Показано, что при $W_2 > 0,6$ МДж/м², возможно получать прочное соединение ($\sigma_{отр.} > 100$ МПа) между толстолистовым алюминием и сталью, если проводить сварку взрывом на пониженных скоростях контакта и углах соударения.

3. При приближении средней толщины расплава к 10 мкм сварной шов, сохраняя высокую прочность, становится непластичным и отрыв слоев происходит по зоне соединения.

Библиографический список

1. Кузьмин, В. И. К вопросу сварки взрывом толстолистовых композитов из разнородных металлов / В. И. Кузьмин, В. И. Лысак, С. А. Легкодимов, Н. В. Маликов, А. Н. Джафаров // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2017. – № 13. – С. 23-27.
2. Бешапошников, Ю. П. Получение биметалла алюминий+сталь сваркой взрывом с использованием остаточного давления продуктов детонации / Ю. П. Бешапошников, В. Е. Кожевников, В. И. Чернухин // Обработка материалов импульсными нагрузками (тематич. сб. науч. трудов). – Новосибирск, СО АН СССР. – 1990. – СКБ ГИТ, ИТиПМ. – С. 266-269.
3. Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск: Наука, 1980. – 221 с.
4. Детонация плоских зарядов смесевых ВВ применительно к сварке взрывом / В. Е. Кожевников, Ю. П. Бешапошников, Н. К. Глобин, В. В. Геймур, В. В. Раскатов, В. И. Чернухин // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26. – № 3. – С. 115-118.
5. Бешапошников, Ю. П. О многослойном металле пластин скользящей детонационной волной / Ю. П. Бешапошников, В. В. Пай, А. А. Петунин, В. И. Чернухин // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2018. – № 11. – С. 22-27.
6. Бешапошников, Ю. П. Метательная способность некоторых смесевых ВВ / Ю. П. Бешапошников, В. Е. Кожевников, В. И. Чернухин // Междун. конф. Слоистые композиционные материалы - 2001 (тезисы докладов). – Волгоград. – 2001. – С. 322-324.
7. Бешапошников, Ю. П. Метание пластин слоями смесевых ВВ / Ю. П. Бешапошников, В. Е. Кожевников, В. В. Пай, В. И. Чернухин // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24. – № 4. – С. 129-132.
8. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение - 1, 2005. – 544 с.
9. Захаренко, И. Д. Сварка металлов взрывом / И. Д. Захаренко. – Минск: Навука і тэхніка, 1990. – 205 с.
10. Симонов, В. А. Дополнительные ограничения области сварки взрывом / В. А. Симонов // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28. – № 1. – С. 110-114.
11. Engineering ToolBox, (2004). Speed of Sound in Solids and Metals. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-solids-d_713.html [Accessed Day Mo. Year].