



ОЧИСТКА И АКТИВАЦИЯ СВАРИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ*

Л. Б. ПЕРВУХИН, д-р техн. наук, О. Л. ПЕРВУХИНА, канд. техн. наук

(Ин-т структур. макрокинетики и пробл. материаловедения РАН, г. Черноголовка, РФ),

С. Ю. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук (Алтайский гос. аграр. ун-т, РФ)

Экспериментально показано отсутствие кумулятивного эффекта при сварке взрывом крупногабаритных образцов и листов промышленных размеров на принятых в промышленном производстве режимах. На основе гипотезы об образовании в сварочном зазоре тонких слоев низкотемпературной плазмы на границе раздела между ударно-сжатым газом и свариваемыми поверхностями предложен механизм очистки и активации поверхностей впереди точки контакта. Формирование прочных связей между атомами соединяемых металлов при сварке взрывом предложено рассматривать как трехстадийный процесс.

Ключевые слова: сварка взрывом, свариваемая поверхность, оксиды и загрязнения, очистка, активация, кумулятивная струя, плазменные потоки, точка контакта, трехстадийный процесс

Для сварки взрывом, как для любого процесса сварки давлением в твердой фазе, наиболее важным является состояние свариваемых материалов, зависимое от механических и химических свойств основного и плакирующего слоев, качества подготовки и шероховатости свариваемых поверхностей.

В соответствии с принятой на сегодня теорией образования соединения при сварке взрывом считается, что в условиях косых соударений происходит самоочистление, как правило, в результате образования кумулятивной струи [1–3], которая снимает слой металла со свариваемых поверхностей вместе с оксидами и загрязнениями и удаляет их из сварочного зазора в виде облака дисперсных частиц. Затем ювенильные поверхности сдавливаются под действием продуктов детонации до образования металлической связи. Процесс соединения металлов при сварке взрывом сопровождается резким повышением температуры в зоне соединения, о чем свидетельствует наличие «литых структур» — зон, в которых происходит плавление материала в процессе сварки. Следует отметить, что непосредственно кумулятивную струю наблюдали только в ходе специальных экспериментов на режимах, заметно отличающихся от применяемых при сварке взрывом сталей. Экспериментально даже по симметричной схеме при малом угле соударения (20° для стали и 30° для алюминия) кумулятивную струю получить не удавалось, а на снимках перед точкой контакта фиксировали наличие облака дисперсных частиц [4].

* В порядке обсуждения.

При этом граница соединения сформировалась волнистой.

Сомнение в отношении определяющей роли кумуляции в образовании соединения при сварке взрывом отражено в работах [5, 6]. В работе [4] сделан вывод, что «...образование обратного массового потока (кумуляция) не является обязательным условием формирования соединения при сварке взрывом, и, как и волнообразование, имеет к ней косвенное отношение». При этом сварка взрывом рассматривается как сварка давлением в твердой фазе, а схватывание металлов — как частный случай топохимических реакций при сварке давлением, для которых характерна трехстадийность процесса образования прочных связей между атомами соединяемых металлов; установление физического контакта; активация контактных поверхностей; объемное развитие взаимодействия. Авторы работы [7] утверждают, что для сварки взрывом присуща двухстадийность процесса образования соединений — физический контакт и активация контактных поверхностей за счет пластической деформации. Однако несмотря на сомнения в существовании обратного потока в условиях сварки взрывом процесс образования и формирования соединений, а также энергетический баланс рассматриваются с учетом наличия кумулятивных эффектов.

В настоящей работе обсуждается вопрос о существовании процесса кумуляции, а при его отсутствии — о наличии механизмов, за счет которых может происходить очистка и активация свариваемых поверхностей.

Для исследования процессов, происходящих впереди точки контакта, применили метод ловушек: на крупногабаритных образцах и листах промышленных размеров (табл. 1) с торца, противоположного началу процесса, установили ловушку, которая состоит из двух предварительно зачищенных листов стали, собранных под углом с



первоначальным зазором, равным сварочному. Указанный метод позволяет на образцах и листах промышленных размеров зафиксировать наличие частиц, вылетающих из сварочного зазора с ударно-сжатом газом (УСГ), при этом условия сварки взрывом не изменяются. Этот метод успешно применен при исследовании процессов, происходящих в сварочном зазоре при сварке титана с титаном [8] и титана со сталью [9].

Перед началом экспериментов по опубликованному экспериментальным и теоретическим данным различных авторов определили ожидаемую толщину покрытия на одной из пластин ловушек при наличии процесса кумуляции (табл. 1). Расчеты произведены из условия, что материал, снимаемый кумулятивным процессом с поверхности свариваемых пластин, осаждается на поверхность ловушки, при этом боковой разлет не учитывается

$$h = \frac{h_{\text{сним}} S_{\text{лист}}}{S_{\text{лов}}}, \quad (1)$$

где $h_{\text{сним}}$ — толщина металла, снимаемого с поверхности свариваемого листа, мкм; $S_{\text{лист}}$ — площадь листа, мм²; $S_{\text{лов}}$ — площадь ловушки, мм².

При равенстве ширины свариваемого листа и ловушки отношение примет вид

$$h = \frac{h_{\text{сним}} l_{\text{лист}}}{l_{\text{лов}}}, \quad (2)$$

где $l_{\text{лист}}$ — длина листа, мм; $l_{\text{лов}}$ — длина ловушки, мм.

При расчете толщины слоя, который должен осаждаться на пластинах ловушек, за основу были взяты экспериментальные данные работ [4, 10] и одновременно проведена оценка по гидродинамической теории кумуляции [11].

Расчеты ожидаемой толщины покрытия показали, что при сварке взрывом крупногабаритных образцов и листов промышленных размеров толщина покрытия должна составить 48...2600 мкм (табл. 1).

Экспериментальные исследования методом ловушек показали, что при сварке стали с титаном на воздухе на поверхности пластин имеется напыленный слой толщиной 20...80 мкм, состоящий из смеси оплавленных оксидов титана. Од-

нако эксперименты не выявили на поверхности ловушек наличия частиц, вылетающих из сварочного зазора при сварке крупногабаритных листов и образцов из стали со сталью и стали с титаном в аргоне.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов показали, что при сварке взрывом стали со сталью и стали с титаном в аргоне на принятых в промышленном производстве биметалла режимах сварки наличие кумулятивного эффекта не зафиксировано.

В процессе сварки взрывом впереди точки контакта в сварочном зазоре образуется область УСГ. Рассмотрим его тепловое воздействие на свариваемые поверхности на расстоянии от начала соударения пластин по методике, изложенной в работе [12]. Тепловой поток из газа на поверхность пластин имеет вид

$$q = \text{St} \rho c_p (T_{\text{УСГ}} - T_0), \quad (3)$$

где St — число Стантона; ρ — плотность газа; u — массовая скорость газа за фронтом ударной волны; c_p — теплоемкость газа; $T_{\text{УСГ}}$ — температура УСГ; T_0 — начальная температура (293 К).

Число Стантона при турбулентном обтекании пластин газовым потоком составляет

$$\text{St}_t = \frac{1}{8(2 \lg \frac{a_p}{k} + 1,74)^2}, \quad (4)$$

где a_p — расстояние между пластинами (сварочный зазор), мм; k — средний размер шероховатости поверхности, мм.

При постоянном тепловом потоке из газа в металл поверхность пластин нагревается по закону

$$T_c = \frac{q}{2\lambda} \sqrt{6at} + T_0, \quad (5)$$

где λ , a — соответственно теплопроводность и температуропроводность материала свариваемых пластин; t — время.

Расчеты, выполненные для сварки стали (скорость точки контакта $v_k = 2500$ м/с; $a_p = 8$ мм; $k = 0,08$ мм), показали, что максимальная температура, до которой нагревается поверхность металла при условии бесконечной длины листа ши-

Таблица 1. Толщина слоя покрытия на поверхности одной из пластин ловушек

Свариваемый материал (атмосфера)	Размер образца, мм	Размер ловушки, мм	Расчетные данные, мкм			Экспериментальные данные, мкм
			[9]	[5]	[10]	
Сталь–сталь (воздух)	500×1200	250×500	48	528	192	Отсут.
Сталь–титан (воздух)	500×1200	250×500	48	528	192	20...80
Сталь–сталь (воздух)	1400×5900	250×1400	236	2600	944	Отсут.
Сталь–титан (аргон)	2700×2800	250×2700	112	1232	448	»



Таблица 2. Расчетные параметры плазменной очистки металлопроката

Способ очистки	$T \cdot 10^{-3}, \text{K}$	Плотность энергии, Вт/м^2	Время воздействия плазмы, с	Толщина удаляемого слоя, мкм
Плазменно-дуговой [14]	5...10	$1 \cdot 10^3$	5...10	200...300
Ударной плазмой [12]	5...8	$1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^{10}$ [12, 15]	$2,4 \cdot 10^{-5} \dots 1,12 \cdot 10^{-4}$ (при скорости детонации 2000...2500 м/с)	5...7 [10, 16]

риной в 1 м не превышает 600 °С. Следовательно, воздействие только УСГ на свариваемые поверхности является недостаточным для их очистки и активации.

В связи с этим процессы очистки и активации рассмотрены нами по аналогии с очисткой металлопроката плазмой с использованием следующей гипотезы: в сварочном зазоре впереди точки контакта при сверхзвуковом (5–6 махов) обтекании УСГ свариваемых поверхностей на границе раздела происходит термическая ионизация газа с образованием тонких слоев низкотемпературной «холодной» плазмы [13].

Под воздействием плазменного потока все известные оксиды металлов и другие химические соединения диссоциируют, ионизируются и испаряются (сублимируют) со свариваемой поверхности. Положительные ионы металлов, образовавшиеся в результате диссоциации оксидов и их ионизации, возвращаются на очищенную поверхность, а атомы кислорода образуют простейшие газообразные соединения O_2 , CO_2 и H_2O , которые выносятся из сварочного зазора. Следует заметить, что окалина и ржавчина не являются отходами очистки, таковыми являются именно газифицированные углекислый газ и молекулы воды. Диссоциация оксидов приводит к резкому повышению активации свариваемых поверхностей впереди точки контакта.

Аналогичные процессы имеют место при плазменно-дуговой очистке металлопроката (табл. 2). При плотности энергии $1 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ тепловой поток будет составлять $1 \cdot 10^3 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{с)}$, а температура достигнет $(5 \dots 10) \cdot 10^3 \text{ K}$, при этом скорость очистки составит 4,5 м/мин [12]. По данным работы [13], тепловой поток из газа в металл при сварке взрывом составляет $1 \cdot 10^8 \dots 1 \cdot 10^9 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{с)}$ при яркостной температуре в сварочном зазоре $(5 \dots 8) \cdot 10^3 \text{ K}$ в зависимости от режима сварки, а по данным работы [15] — от $1,3 \dots 1 \cdot 10^9$ до $4,1 \dots 1 \cdot 10^{10} \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{с)}$. Очевидно, что скорость плазменно-дуговой очистки несоизмеримо меньше, чем при сварке взрывом, но тепловой поток в последнем случае больше в $1 \cdot 10^6$ раз, а толщина удаляемого слоя составляет всего 5...7 мкм.

В работах [10, 16] путем измерения потери массы установлено, что для режимов, обычно применяемых в промышленном производстве биметалла, с каждой из свариваемых поверхностей уда-

ляется слой толщиной 5...7 мкм. Если рассматривать площадь реальной поверхности по линии, огибающей микронеровности при абразивной зачистке HRz 40, то размер поверхности увеличится в несколько раз. Количественную оценку площади реальной поверхности по линии огибающей микронеровности производили исходя из среднего шага неровности S_m и высоты ее профиля R_z согласно ГОСТ 2789–73. Следовательно, при потере слоя толщиной 5...7 мкм с единицы реальной поверхности удаляется слой толщиной не более 0,3...0,5 мкм, что равно толщине пленок на поверхности металла, удаление которых за счет диссоциации обеспечивает очистку и активацию поверхности.

Проведенные исследования и расчеты позволяют предложить следующий механизм образования соединения при сварке взрывом. После достижения УСГ некоторых точек на поверхности, подлежащей сварке, начинается нагрев материала и образование при сверхзвуковом обтекании «холодной» плазмы, под воздействием которой происходит очистка от оксидов и загрязнений и активация поверхности. Исходя из размеров области УСГ время воздействия плазмы составляет примерно $1 \cdot 10^{-6}$ с. Чистые и активные поверхности вступают в контакт в точке соударения и образуют соединение, формирование которого продолжается за точкой контакта и сопровождается интенсивной пластической деформацией.

Таким образом, для сварки взрывом характерно протекание в указанной последовательности трехстадийного процесса образования прочных связей между атомами соединяемых металлов: очистка и активация контактных поверхностей впереди точки контакта в области УСГ под воздействием потока плазмы; образование физического контакта в точке соударения; объемное взаимодействие и формирование соединения за точкой контакта.

Качество сварки взрывом определяется в первую очередь процессами, происходящими впереди точки контакта, — очисткой и активацией соединяемых поверхностей.

На основании выдвинутой гипотезы сделан важный вывод, а именно, для достижения прочного соединения в начале процесса сварки взрывом, исключения образования начальных непроваров и участков с пониженной прочностью необходимо обеспечить требуемые параметры УСГ

и образование слоя плазмы для очистки и активации свариваемых поверхностей.

Выводы

1. Показано, что при сварке взрывом вследствие воздействия потока плазмы очистка и активация свариваемых поверхностей впереди точки контакта от оксидов и органических загрязнений происходит за счет их диссоциации, сублимации загрязнений и ионизации. При этом положительные ионы металлов, образовавшиеся в результате диссоциации оксидов, частично возвращаются на очищенную поверхность, а атомы кислорода, азота, углерода образуют простейшие газообразные соединения типа CO_2 и H_2O , которые выносятся из сварочного зазора УСГ.

2. Предложена следующая последовательность трехстадийного процесса образования прочных связей между атомами соединяемых металлов при сварке взрывом: очистка и активация контактных поверхностей УСГ и тонкими плазменными потоками; образование физического контакта в точке соударения; объемное взаимодействие с формированием соединения и пластической деформацией за точкой контакта.

1. *Плакирование* стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина. — М.: Машиностроение, 1978. — 190 с.
2. *Дерибас А. А., Захаренко И. Д.* О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин // Физ. горения и взрыва. — 1975. — 11, № 1. — С. 151–153.
3. *Wittman R. H.* The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welding aluminium alloy // Use of explosive energy in manufacturing metallic materials of new properties: Proc. of 2nd Intern. conf.,

- Marianske Lazne, CSSR, 1973. — Marianske Lazne, 1973. — S. 153–158.
4. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 222 с.
 5. *Otto G.* Aspect relating to the central institute for industrial research // Proc. NATO, Oslo, Norway, 1964. — P. 1435–1441.
 6. *Babul W.* Niektore problemy laczenia wybuchoweg. — Warszawa: IMP, 1968. — 156 S.
 7. *Лысак В. И., Кузьмин С. В.* Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
 8. *Влияние* состава атмосферы на образование соединения титана со сталью при сварке взрывом / О. Л. Первухина, А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин, Д. В. Олейников // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгГТУ, 2006. — С. 59–64.
 9. *Особенности* сварки взрывом стали с титаном в защитной атмосфере / О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин, А. А. Бердыченко и др. // Автомат. сварка. — 2009. — № 11. — С. 22–26.
 10. *Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.* Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
 11. *Физика* взрыва / А. Ф. Баум, П. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
 12. *Ишуткин С. Н., Кирко В. И., Симонов В. А.* Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин // Физ. горения и взрыва. — 1980. — № 6. — С. 69–73.
 13. *Определение* параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при сварке взрывом / С. Ю. Бондаренко, О. Л. Первухина, Д. В. Рихтер, Л. Б. Первухин // Автомат. сварка. — 2009. — № 11. — С. 46–48.
 14. *Сенокосов Е. С., Сенокосов А. Е.* Плазменная электродуговая очистка поверхности металлических изделий // Металлург. — 2005. — № 4. — С. 44–47.
 15. *Использование* методов сварки взрывом и взрывной термической обработки металлов для создания многослойных броневых композиций, имеющих повышенную пулестойкость и живучесть / В. К. Ашаев, Г. С. Доронин, Е. И. Ермолович и др. // Вооружение, автоматизация, управление: Сб. науч. тр. — Ковров, 2006. — С. 317–319.
 16. *Гельман А. С., Первухин Л. Б., Цемахович Б. Д.* Изучение некоторых вопросов очистки поверхностей в процессе сварки взрывом // Физ. горения и взрыва. — 1974. — № 2. — С. 284–288.

The absence of the cumulative effect in explosion welding of large-size samples and commercial-size plates under the conditions used in commercial production is experimentally proved. The mechanism of cleaning and activation of the mating surfaces ahead of the contact point is proposed, based on the hypothesis of formation of thin layers of low-temperature plasma in the welding gap at the interface between the shock-compressed gas and the surfaces. It is suggested that formation of strong bonds between atoms of the joined metals in explosion welding should be regarded as a three-stage process.

Поступила в редакцию 09.12.2009