

## **О механизмах формирования контакта при сварке взрывом**

**М. И. Алымов, А. А. Дерibas, И. С. Гордополова**

---

Рассмотрены вопросы о возникновении плазмы в зазоре при сварке металлических пластин взрывом и о возможной роли плазмы в процессе сваривания.

**Ключевые слова:** сварка взрывом, свариваемая поверхность, оксиды и загрязнения, очистка, активация, плазменные потоки, термическая ионизация газа.

---

Discussed is the role of the plasma that can be formed in the weld gap on explosive welding of metallic sheets.

**Key words:** explosion welding, welded surface, oxides and pollution, cleaning, activating, plasma flows, thermal ionization of the gas.

---

В настоящее время существует много различных моделей, объясняющих механизм и физическую природу поведения материалов при сварке взрывом [1–3]. Но ни одна из них не объясняет и не описывает процесс полностью. Многие не согласуются друг с другом и часто противоречат практике.

Цель данной работы — обсуждение роли плазмы в процессе сварки взрывом и предложение другого объяснения механизма очистки и активации поверхности в процессе сваривания металлических пластин.

Основные представления о процессе при сварке взрывом в общих чертах сформированы. Прежде всего, для протекания реакций в твердой фазе, необходимо сближение свариваемых металлов на расстояние межатомного взаимодействия. Высокие давления и температуры, развиваемые при соударении металла взрывом плакирующей пластины с неподвижной, способствуют возникновению такого контакта. В то же время, наличие загрязнений и оксидных пленок (так как процесс сварки взрывом протекает, как правило, на воздухе) препятствует образованию прочного соединения. Поэтому перед сваркой взрывом стараются, по возможности, провести тщательную зачистку соединяемых поверхностей. Возникающие, во время зачистки микронеровности способствуют лучшему соединению

металлов лишь в случае, когда величина этих неровностей значительно меньше длины поверхностных волн, обычно возникающих при сварке взрывом. Однако этого не достаточно, чтобы образовалось прочное соединение без “непроваров”. Для того, чтобы уметь управлять процессом сварки взрывом очень важно знать причину возникновения различных дефектов и понимать, что происходит на каждой стадии процесса.

Какова последовательность процессов при сварке взрывом:

1. Иницирование детонатором слоя взрывчатого вещества (ВВ), как правило, насыпной плотности. Возникший фронт детонации на начальном участке, как правило, нестабилен, что является, по нашему мнению, основной причиной недостаточно качественного соединения пластин на начальном участке. Эта нестабильность проявляется и на границах свариваемых пластин, где также обычно наблюдаются области непроваров.

2. Газообразные продукты горения ВВ расширяются и разгоняют металл пластину. Угол разворота пластины до ее соударения с основой играет важную роль при образовании сварного шва и в значительной мере определяет прочность соединения. Так при малых углах соударения образуется волнообразный шов. При увеличении угла соударения появляется

кумулятивная струя, при этом уменьшается амплитуда и длина волны сварного шва и волны практически исчезают. Одна из моделей расчета разлета продуктов взрыва и разворота метаемой пластины, исходя из модели несвязных элементов предложена в работе [4].

3. Метаемая пластина сталкивается с основой. В этот момент происходит очистка и активация поверхности перед точкой контакта. Существует понятие энергии активации в химии и биологии, как минимальное количество энергии, которое нужно сообщить системе, чтобы произошла химическая реакция. То есть активация — это энергетический процесс. Существует такое понятие, как механоактивация — это активирование твердых веществ при их механической обработке. Измельчение в ударном, ударно-истирательном или истирательном режимах приводит к накоплению структурных дефектов, увеличению кривизны поверхности, фазовым превращениям и даже аморфизации кристаллов, что влияет на их химическую активность. Механоактивация — следствие создания в некоторой области твердого тела напряжений с последующей их релаксацией. Это также энергетический процесс. Просматривается аналогия между механоактивацией и активацией поверхности в результате соударения пластин, которое происходит при сварке взрывом. Поэтому, логично было бы предположить, что в момент соударения в точке контакта происходит накопление дефектов в кристаллических решетках металлов основы и метаемой пластины, обобществление электронов и переход в пластическое состояние, что позволяет образоваться сварному шву. Очистка поверхности также происходит за счет механоактивации. В момент соударения все загрязнения и оксиды, находящиеся на поверхности, и связанные с ней не такой прочной связью, как металлическая, в силу инерции продолжают движение в том же направлении, в каком двигалась пластина. Связи рвутся, они оказываются оторванными от поверхности, попадают в пространство между пластинами и выносятся оттуда ударной волной, которая продолжает свое распространение. Выделяющееся при столкновении и трении тепло также очищает соударяющиеся поверхности от оксидов за счет разных коэффициентов теплового расширения (КТР) для металлов и их оксидов, и прогревает газ в зазоре перед сжатием.

4. Ударно-сжатый газ (УСГ) способствует удалению оставшихся загрязнений и оксидных пленок из сварочного зазора.

Схема установившегося процесса сварки взрывом представлена на рис. 1.

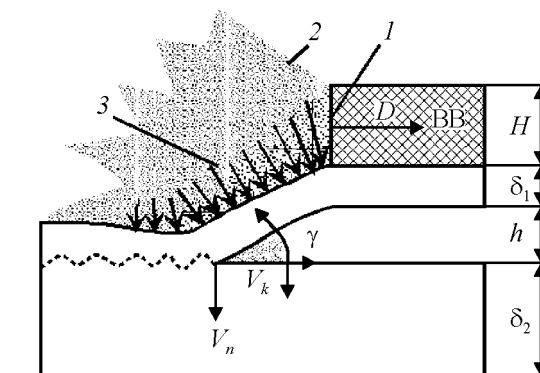


Рис. 1. Схема установившегося процесса сварки взрывом: 1 — фронт детонационной волны; 2 — фронт разлета продуктов взрыва BB; 3 — фронт волны разрежения;  $D$  — скорость детонации BB;  $V_n$  — нормальная составляющая скорости соударения контактирующих поверхностей;  $V_k$  — скорость движения вершины динамического угла встречи контактирующих поверхностей  $\gamma$  в направлении сварки ( $V_k = D$ ).

Образование “непроваров” при сварке взрывом можно объяснить исходя из представлений образования “газового пузыря”. Слой BB насыпной плотности не всегда однороден. Образующаяся детонационная волна оказывается не всегда очень стабильной. Небольшие флуктуации могут приводить к нарушению однородности давления, оказываемого на метаемую пластину в процессе сварки и появлению областей, откуда газ не был до конца выдавлен. Нельзя исключить и недостаточную очистку поверхности.

Такая стадийность процессов и их объяснение не совпадает с предложенной в работах [5, 6]. По мнению авторов этих работ, очистка и активация поверхности происходит за счет действия плазмы, образующейся в зазоре благодаря термической ионизации. Причем этот процесс, по мнению авторов работ [5, 6] предвзывает сближение пластин и их объемное взаимодействие.

Там же утверждается, что “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”.

А в работах [7, 8] считают, что активация поверхностей (образование активных центров) происходит после сближения атомов соединяемых металлов за счет пластической деформации на расстояние, при котором возможно физическое (ван-дер-ваальсовское) или слабое химическое взаимодействие. То есть, нет единого понимания и объяснения образования соединения при сварке взрывом.

Вопрос об ионизации воздуха имеет принципиальное значение. Действительно ли этот процесс имеет место и играет ли он столь значительную роль в процессе сварки взрывом?

Ионизацию газа, в частности, воздуха и получение плазмы можно проводить разными способами. Общепринятым способом получения плазмы в лабораторных условиях и технике является использование электрического газового разряда. Способ создания плазмы путем обычного нагрева вещества не самый распространенный. Но при сварке взрывом реализуется именно тепловой механизм. Поэтому важно знать какие температуры при этом реализуются. Известен способ определения температуры [9], находящегося между свариваемыми пластинами ударно-сжатого газа с помощью фоторегистратора СФР-ГМ по относительному почернению фотопленки. Разработан метод определения температуры высокотемпературных газовых потоков, который использовали при исследовании процессов, происходящих при сварке взрывом [10].

В работе [10] авторы провели измерение температуры ударно-сжатого воздуха при сварке взрывом алюминиевой и стальной пластин. Размеры пластин: стальной —  $10 \times 150 \times 400$  мм; алюминиевой —  $2 \times 150 \times 400$  мм. Сварку взрывом пластин осуществляли зарядом взрывчатого вещества со скоростью детонации 2500 м/с. Полученное значение температуры ударно-сжатого воздуха ( $T = 3502$  К) составляет погрешность 3% от теоретического ( $T = 3400$  К) [9]. Приводим отрывок из работы [5]: “В работах [11, 12] фотоэлектрическим методом проводили измерение яркостной температуры вблизи точки контакта. На основании экспериментальных данных следует, что температура при скорости детонации  $D = 4200$  м/с равна 7700 К, а при  $D = 5300$  м/с — 10500 К”.

По теоретическим оценкам [5,6] “температура в месте обтекания ударно-сжатым газом свариваемых поверхностей составляет около 6000 – 12000 К, то есть достигает температуры перехода газа в плазменное состояние (“холодная” плазма) [13].”

Последнее утверждение в работе [13] не содержится. В ней научно-популярно изложены основные представления о плазме, как о четвертом состоянии вещества и приводятся рассуждения о том, что температуры “холодной” плазмы порядка десятков и сотен тысяч градусов, в то время, как в горячей плазме температуры достигают десятков миллионов.

Выводы о переходе в плазменное состояние воздуха в зазоре принадлежит авторам статей [5, 6, 14]. По нашему мнению это утверждение не доказано.

Возникает три вопроса. Первый: “Действительно ли при сварке взрывом в зазоре возникают такие высокие температуры?” Второй: “Достаточно ли этих температур для образования, так называемой “холодной” плазмы? И третий: “Даже, если ионизация возникает, каков механизм и значимость ее действия на поверхности свариваемых пластин?”

Из результатов приведенных выше следует, что чем выше скорость детонации, тем выше температура газа в зазоре, а, следовательно, выше степень ионизации воздуха и лучше очистка и активация поверхности, а значит прочнее образующееся соединение. Однако увеличение скорости детонации приводит к увеличению угла соударения, и как следствие, может привести к полному отсутствию сваривания в случае критических углов. Экспериментальные результаты по зависимости угла соударения и скорости детонации приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что при прочих равных условиях, при увеличении скорости детонации пластины практически перестают свариваться, даже при малых углах соударения.

На практике, практически реализуются режимы сварки с помощью ВВ, скорость детонации которых не превышает 2500 м/с, что соответствует темпера-

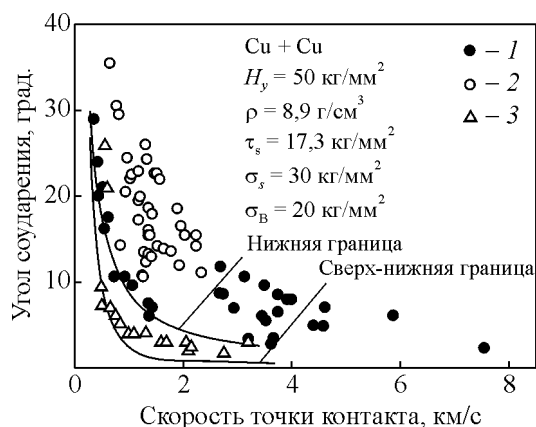


Рис. 2. Область сварки на плоскости ( $\gamma$ ,  $V_k$ ) (угол соударения — скорость точки контакта). 1 — нет сварки, 2 — сварка, 3 — сварка с предварительной очисткой поверхности (Дерибас А.А.)

туре ударно-сжатого газа в зазоре ~3500 К (авторы работ [5, 6, 14] используют аммиачную селитру в смеси с дизельным топливом в соотношении 96:4). И утверждение, относительно температур 6000 – 12000 К, явно преувеличено. Это ответ на первый вопрос.

По второму вопросу.

Известно, что потенциалы ионизации практически всех веществ лежат в диапазоне 3,89 В (Cs) до 24,6 В (He). Для компонентов воздуха они приведены в таблице.

Таблица

Потенциалы ионизации различных газовых компонент атмосферного воздуха

Газ	Потенциал ионизации, В	Газ	Потенциал ионизации, В
Ar	15,8	SO <sub>2</sub>	13,1
N <sub>2</sub>	15,6	H <sub>2</sub> O	12,6
H <sub>2</sub>	15,4	O <sub>2</sub>	12,5
CO <sub>2</sub>	14,4	NO <sub>2</sub>	11,0
CO	14,1	NO	9,5

Таким образом, потенциалы ионизации компонентов воздуха находятся в диапазоне 9 – 16 В. При этом энергии ионизации в эВ численно совпадают со значениями потенциалов ионизации, выраженными в вольтах. Но реальные энергии  $W$ , требуемые для ионизации в два раза выше, так как половина энергии уходит на перевод атомов и молекул в возбужденное состояние. Приравняв энергию ионизации к кинетической энергии частиц, в приближении одноатомного идеального газа имеем:  $eU = 3/2kT$ . Считая температуру воздуха в зазоре равной 6000 – 12000 К можно посчитать, что энергия, полученная частицами газа в расчете на одну частицу равна 0,52 – 1,03 эВ, что значительно меньше приведенных в таблице величин потенциалов ионизации. А температуре 3500 К соответствует энергия 0,3 эВ. Поэтому ясно, что если газ и ионизируется, то в достаточном малых количествах. Поэтому все рассуждения работы [5] относительно определяющей роли плазмы в очистке и активации соединяемых металлических поверхностей не подтверждаются. Тем более за время, пока проходит ударная волна, не успевают пройти никакие реакции диссоциации и ассоциативной ионизации [14] и никакие положительные ионы не успеют вернуться на очищенную поверхность. Время прохождения ударной волной пластины длиной 1 м при скорости детонации 2500 м/с равно  $4 \cdot 10^{-4}$  с, а расстояние порядка длины свободного пробега молекул (для воздуха  $\sim 10^{-7}$  м) при котором могут произойти соударения и химическое взаимодействие  $\sim 4 \cdot 10^{-11}$  с. К тому же процесс ионизации — эндотермический. Энергия (тепло) необходимое для

этого процесса берется из ударно-сжатого газа. Это должно приводить к понижению температуры УСГ, а значит к ухудшению условий очистки поверхности.

Соавтором этой работы, одним из первооткрывателей сварки взрывом, А.А. Дерибасом проведены работы по сварке взрывом в вакууме [1]. Результаты показали, что отсутствие воздуха в зазоре никак не повлияло на прочность и характеристики образовавшегося сварного соединения, что также опровергает определяющую роль плазмы при сварке взрывом.

Сравнение с результатами действия плазмотрона теми же авторами в работе [15] вообще не уместно, так как в плазмотроне плазма образуется в дуговом разряде. При этом электроны получают сильное ускорение и имеют температуру гораздо выше, чем температура ионов. Действие плазмотрона при резке металла или при пайке, а также очистке поверхности исключительно тепловое. То есть “горячие” электроны при столкновении с металлической поверхностью отдают тепло и расплавляют металл. Действие плазмотрона направленное. В ударно-сжатом газе, даже если в нем и присутствуют некоторые количества электронов и ионов, находясь в потоке, не могут действовать направлено на поверхность, тем более, что время контакта очень мало. К тому же при тепловом способе образования плазмы, температуры всех частиц газа одинаковы (и ионов, и электронов, и нейтральных частиц — атомов и молекул). Поскольку плазма отличается от газа только наличием заряженных частиц и ее особенности проявляются только при действии электрического или магнитного полей, то не имеет смысла говорить о тепловом действии плазмы при сварке взрывом, так как ионизированный газ в этих условиях не проявляет своих уникальных свойств. Следовательно, вывод об активации поверхности тонкими плазменными потоками очень неубедителен.

Использование уравнения Саха – Лэнгмюра и рассуждения об ассоциативной ионизации в работе [14] для сварки взрывом тоже неуместны, так как не имеют к ней никакого отношения. Ионизация нагретой поверхностью металла просто не успевает пройти при таких скоростях перемещения ударно-сжатого воздуха.

Отсюда считаем недоказанным и второй вывод работы [5], а именно: “последовательность трёх-стадийного 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”.

Отсюда следуют следующие выводы:

1. На прочность и качество сварного шва при сварке взрывом влияют параметры выбранного ВВ (скорость детонации, масса и толщина взрывчатого слоя, равномерность и постоянство его состава). Этими параметрами определяется угол соударения пластин и качество выдавливания газа из зазора. Игруют роль толщина, плотность метаемой пластины и величина зазора между пластинами.

2. Активация и дополнительная очистка соединяемых металлов происходит в момент соударения, за счет механоактивации и деформации поверхностей.

3. Ударно-сжатый газ с одной стороны помогает удалить загрязнения из сварочного зазора, но плохо удаленный газ может стать причиной неспаров.

## Литература

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980, 220 с.
2. Сахатский Г.П. Технология сварки металлов в холодном состоянии. Киев: Наукова думка, 1979, 298 с.
3. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 2005, 544 с.
4. Гордополов Ю.А., Гордополова И.С. Расчет метания пластин скользящей детонационной волной. Взрывное дело, 2009, №102/59, с. 3 – 16.
5. Бондаренко С.Ю., Первухина О.Л., Рихтер Д.В., Первухин Л.Б. Определение параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта

при сварке взрывом. Автоматическая сварка, 2009, № 11, с. 46 – 48.

6. Первухин Л.Б., Рихтер Д.В., Первухина О.Л., Бондаренко С.Ю. Образование дефектов сплошности при производстве двухслойных крупногабаритных листов сваркой взрывом и связь их с процессами, идущими в сварочном зазоре впереди точки контакта. Сварочное производство, 2009, № 7, с. 32 – 37.
7. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986, 378 с.
8. Рябов В.Р., Рабкин Д.М., Курочкин Р.С., Стрижевская Л.Г. Сварка разнородных металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1984, 239 с.
9. Ишуткин С.Н., Кирко В.И., Симонов В.А. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин. Физика горения и взрыва, 1980, № 6, с. 69 – 73.
10. Сенченко Г.М.; Федосенко И.Н. Способ определения температуры ударно-сжатого газа при сварке взрывом. Патент Российской Федерации № 2009454. 15.03.1994.
11. Алексеев Ю.Л., Смирнова Г.М. Формирование соединения при сварке взрывом. Физика и химия обработки металлов, 1994, № 4/5, с. 126 – 130.
12. Алексеев Ю.Л., Смирнова Г.М. Об условиях образования сварного соединения взрывом. Физика и химия обработки металлов, 1994, № 2, с. 112 – 116.
13. Франк-Каменецкий Д. А. Плазма — четвертое состояние вещества. М.: Атомиздат, 1975, 159 с.
14. Первухин Л.Б., Первухина О.Л., Бондаренко С.Ю. Теоретические и технологические основы промышленного производства биметаллов. Известия Волгоградского государственного технического университета Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений, 2010, вып. 4, № 5, с. 75 – 82.
15. Первухин Л.Б., Первухина О.Л. Бондаренко С.Ю. Очистка свариваемых поверхностей от оксидов и загрязнений и их активация в процессе сварки взрывом. Автоматическая сварка, 2010, № 7, с. 46 – 49.

Статья поступила в редакцию 18.10.2013 г.

*Алымов Михаил Иванович* — Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка, МО), член-корреспондент РАН, директор. Специалист в области проблем материаловедения. E-mail: [alytov@ism.ac.ru](mailto:alytov@ism.ac.ru)

*Дерибас Андрей Андреевич* — Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка, МО), доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, специалист в области сварки взрывом. E-mail: [aaderibas@mail.ru](mailto:aaderibas@mail.ru).

*Гордополова Ирина Сергеевна* — Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (г. Черноголовка, МО), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области быстропотекающих процессов горения и взрыва. E-mail: [gis@ism.ac.ru](mailto:gis@ism.ac.ru).