О. Л. Первухина, канд. техн. наук

К ВОПРОСУ ОБ ОЧИСТКЕ И АКТИВАЦИИ СВАРИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВ

ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка, opervukhina@mail.ru

Проведен анализ опубликованных теоретических и экспериментальных данных по очистке и активации свариваемых поверхностей в процессе сварки давлением в твердой фазе. Предложено новое теоретическое представление о процессах очистки и активации при сварке взрывом крупногабаритных листов, основанное на воздействии ударной плазмы, возникающей в сварочном зазоре при обтекании свариваемых поверхностей ударно-сжатым газом с гиперзвуковой скоростью.

Ключевые слова: сварка взрывом, крупногабаритные двухслойные листы, поверхностные пленки, процессы очистки и активации, ударно сжатый газ

O. L. Pervukhina

THE ISSUE OF CLEANING AND ACTIVATION OF WELDED SURFACES DURING EXPLOSION WELDING OF LARGE-SIZED SHEET

*Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS,
Chernogolovka, opervukhina@mail.ru*

The analysis of published data on cleaning and activation of welded surfaces during pressure welding in the solid phase has been carried out. A new understanding of cleaning and activation processes during explosion welding of large-sized sheets is proposed. It is based on the impact of the shock plasma, which arises during hypersonic shock-compressed gas flow around the welded surfaces.

Keywords: explosion welding, large-sized bimetal, surface films, cleaning and activation processes, shock-compressed gas

Сварка взрывом является одной из разновидностей сварки давлением в твердой фазе или с локальным расплавлением соединяемых металлов. При этом соединение происходит между техническими (реальными) поверхностями металлических тел, которые покрыты поверхностными пленками, состоящими из оксидного слоя, слоя адсорбированных газов, слоя молекул воды, плёнки жировых молекул и пыли (рис. 1). Жировые загрязнения и пыль, как правило, скапливаются во впадинах микронеровностей. Свойства оксидного слоя (твёрдость, температура плавления) существенно отличаются от свойств металла, из которого они образовались. Прочность соединения оксида с металлом зависит от его природы. Шероховатость поверхностей определяется методом их механической обработки, в частности, при обработке резцом высота неровностей составляет 20-80 мкм, при абразивной зачистке 40-80 мкм, при шлифовании 6-10

мкм. Механическая обработка существенно искажает структуру приповерхностного слоя. Степень и глубина распространения этих искажений зависит от вида обработки. Кроме того, механическая обработка сопровождается наклёпом и появлением остаточных напряжений в поверхностном слое.

Важнейшим вопросом получения прочного соединения при сварке давлением в твердой фазе является удаление поверхностных пленок и загрязнений со свариваемых поверхностей с одновременной их активацией до их вступления в контакт, т.е. до схватывания. В случае большой площади свариваемых листов (2 - 26 м²) практически невозможно предварительной обработкой удалить поверхностный слой со свариваемых поверхностей.

Целью работы является исследование процессов очистки и активации свариваемых поверхностей, содержащих микронеровности, поверхностные пленки и загряз-

нения, при сварке взрывом крупногабаритных листов.

Методика исследований предусматривала:

- анализ опубликованных теоретических и экспериментальных данных по очистке и активации свариваемых поверхностей в процессе сварки давлением в твёрдой фазе;

- анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований воздействия ударной плазмы, образующейся в пограничном слое при гиперзвуковом обтекании ударно-сжатым газом (УСГ) свариваемых поверхностей, на процесс образования соединения для крупногабаритных листов биметалла;

- разработка нового теоретического представления о процессах очистки и активации свариваемых поверхностей при сварке взрывом крупногабаритных листов.

Рассмотрим процесс образования соединения на основании классической теории сварки давлением в твёрдой фазе, предусматривающей необходимость создания активных центров на свариваемых поверхностях [1, 2]. Эта теория распространяется на сварку давлением в твёрдой фазе любых кристаллических тел. При наличии активных центров на металле время их непосредственного химического взаимодействия (образования связи) мало или практического значения не имеет. Если атомы уже сближены до расстояния равного периоду решётки, то образование связей между ними произойдёт мгновенно и с выделением

энергии. Образование активных центров обусловлено разрывом хотя бы части связей поверхностных атомов с их соседями, нарушающими стабильные электронные конфигурации этих атомов [3].

При сварке давлением в твёрдой фазе разрушение связей (активации) возможно [3]:

а) механически при удалении с поверхности части самого металла (обнажение так называемых чистых ювенильных поверхностей) или химически связанного с ним инородного вещества, (например, окислов); при движении дислокаций, сопровождающих пластическую деформацию;

б) термически при нагреве, сопровождаемом заметной диффузией и самодиффузией, движением вакансий и другими процессами, изменяющими положение атомов в кристаллической решётке;

в) бомбардировкой поверхности ионами или быстро движущимися частицами с достаточно высокой энергией.

Следует отметить, что если перестают действовать условия, необходимые для поддержания активного центра в возбуждённом состоянии, то в результате обменного взаимодействия с соседними атомами возбуждённые атомы возвратятся в нормальное, неактивное состояние - система релаксирует. Продолжительность процесса релаксации различна в зависимости от природы вещества, состояния его поверхности, температуры и других факторов.

Длительность и последовательность ста-

Рис. 1. Техническая (реальная) поверхность металлических тел

дий очистки и активации при разных методах сварки давлением также может быть различна. Например, при сварке трением поверхности вводятся в физический контакт, они разогреваются до расплавления, поверхностная часть металла выдавливается из зоны соединения обнажая и активируя поверхности. При вакуумно-диффузионной сварке вначале, при нагреве в глубоком вакууме, происходит очистка и активация поверхностей, а затем поверхности вводятся в контакт и выдерживаются длительное время для прохождения процессов диффузии.

Рассмотрим возможные варианты очистки свариваемых поверхностей от поверхностных пленок в процессе сварки взрывом до соударения в точке контакта:

1. Кумулятивная струя или облако дисперсных частиц, которые снимают поверхностный слой, обнажая ювенильные поверхности [4]. В работе [5] методом "ловушек" на режимах сварки крупногабаритных листов устойчивого кумулятивного процесса не выявлено.

2. Интенсивная пластическая деформация всегда сопровождает образование соединения при сварке взрывом и проходит в окрестности точки контакта [6]. В ряде работ [4, 7] показана возможность образования бугра деформации перед точкой контакта. Перед вступлением в контакт свариваемых поверхностей происходит активация за счёт пластической деформации при образовании бугра деформации в локализованной зоне ограниченной изобарой высоких

давлений. Однако пластическая деформация не может удалить органические загрязнения, влагу и т.п.

3. Ударно-сжатый газ (УСГ) образуется в сварочном зазоре при метании плакирующего листа с образованием ударной волны, которая распространяется по газу впереди точки контакта. В случае сварки взрывом крупногабаритных металлических листов, площадью нескольких квадратных метров, удаление газа из сварочного зазора величиной 6-8 мм затруднено. Газ нагревается до температуры порядка 3000 К [8, 9] и вытесняется из сварочного зазора, обтекая свариваемые поверхности со скоростью точки контакта (2400-3000 м/с), что является гиперзвуковой скоростью свыше 5М [10]. В связи с наличием сил трения при торможении газа о свариваемые поверхности и возникновении из-за наличия микронеровностей (шероховатости поверхности) турбулентности в приповерхностном слое между УСГ и поверхностью металла образуется газовый пограничный слой, параметры которого отличаются от свойств основного потока газа [11]. В этих условиях в газовом пограничном слое происходит термическая ионизация газа и образование неравновесной ударной плазмы [12].

В аэродинамических исследованиях [13] определение взаимодействия между газовой средой и движущимся в ней телом основывается на принципе обращенного движения, в соответствии с которым взаимодействующая система «неподвижная газовая среда

Рис. 2. Результат плазменной очистки деталей

Рис. 3. Дефект биметалла: прожиг (свищ) поверхности плакирующего слоя

(воздух) – движущийся объект» заменяется системой «движущаяся газовая среда – неподвижный объект». В случае замены одной системы на другую должно быть соблюдено условие, при котором скорость набегающего на неподвижное тело газового потока была бы равна скорости движения этого тела в неподвижной среде. В нашем случае задача прямая: движущийся с гиперзвуковой скоростью газ и неподвижное твёрдое тело (свариваемые поверхности, которые образуют своеобразный канал).

В работе [10] показано, что при полете летательного аппарата с гиперзвуковой скоростью и взаимодействии его с воздухом за ударной волной возникают различные плазмохимические неравновесные процессы. Эти процессы настолько интенсивны, что сопровождаются химическим и механическим взаимодействием, а также эрозией и уносом материала конструкции. Интенсивность и спектр излучения плазмы за ударной волной определяют электронно-возбуждённые атомы и молекулы. Для ионизации возбуждённой частицы требуется меньше энергии, то есть присутствие электронно-возбуждённых атомов и молекул может ускорить ионизацию.

Облучение поверхности твердых тел ионными или плазменными потоками обычно вызывает те или иные изменения. Основным же процессом при взаимодействии плазмы с поверхностью твёрдого тела является разрушение приповерхностного слоя, который состоит из оксидных плёнок и органических загрязнений. Под воздействием плазменного потока все известные оксиды металлов и другие химические соедине-

ния диссоциируют, ионизируются и испаряются (сублимируют) с 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 подчеркнуть, что ни окалина и ржавчина, являются отходами очистки, а отходами являются именно газифицированные углекислый газ и молекулы воды. Диссоциация оксидов приводит к резкому повышению активации свариваемых поверхностей перед точкой контакта.

Аналогичные процессы наблюдаются при плазменно-дуговой очистке металлопроката (рис. 2). При плотности энергии 1011 Вт/м^2 тепловой поток будет составлять $1011 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}$, а температура достигнет $(5-10) \cdot 10^3 \text{ К}$, при этом скорость очистки составляет $4,5 \text{ м/мин}$ (таблица 1) [14]. Конечно же, скорость очистки при плазменно-дуговой очистке несоизмеримо меньше, чем при сварке взрывом. Время воздействия ударной плазмы, в зависимости от размеров области ударно-сжатого газа, составляет, порядка 10^5 сек , но тепловой поток при сварке взрывом больше в 10^6 раз.

В работе [15] измерением потери веса свариваемых элементов было установлено, что на режимах сварки крупногабаритного биметалла (сталь+сталь) с каждой из свариваемых поверхностей удаляется слой толщиной $5-7 \text{ мкм}$. Если рассмотреть площадь реальной поверхности по линии огибающей микронеровности (при абразивной зачистке $HRz = 40 \text{ мкм}$), то при потере $5-7 \text{ мкм}$ с еди-

Таблица 1 – Расчетные параметры плазменной очистки металлопроката

Метод	Температура, К	Плотность энергии, Вт/м^2	Время воздействия плазмы, сек	Толщина удаляемого слоя, мкм
Плазменно-дуговая очистка	$(5-10) \cdot 10^3$	10^3	5-10	200-300
Ударная плазма	$(3,5-6) \cdot 10^3$	10^{10}	$2,4 \cdot 10^{-5}$ - $1,12 \cdot 10^{-4}$ при $D=2000-2500 \text{ м/с}$	0,1-0,3

ницы поверхности с учётом микронеровностей удаляется слой не более 0,1-0,3 мкм. Эта толщина равна толщине окисных плёнок присутствующих на поверхности металла, удаление которых за счет диссоциации обеспечивает очистку и активацию поверхностей. Чистые и активные поверхности вступают в контакт в точке соударения и

ная деформация и активация при образовании бугра деформации.

Качество сварки взрывом крупногабаритных листов определяется в первую очередь процессами, идущими впереди точки контакта, то есть очисткой и активацией соединяемых поверхностей. Следовательно, обеспечение требуемых параметров ударно-

Таблица 2 – Состав поверхности расплава в зоне локальной несплошности биметалла со стороны плакирующего слоя 12X18H10T

Спектр	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
вес. %	1.30	1.81	1.11	0.84	1.73	92.97	0.24

а)

б)

в)

г)

Рис. 4. Расплавы на поверхности основного слоя (а) и плакирующего (б) слоев в зоне локальной несплошности биметалла 09Г2С+12Х18Н10Т; микроструктура поверхности расплава (в); кристаллы железа на поверхности расплава (г)

образуют соединение, формирование которого продолжается за точкой контакта и сопровождается интенсивной пластической деформацией.

Таким образом, при образовании соединения при сварке взрывом одновременно действуют два механизма активации свариваемых поверхностей перед вступлением их в контакт: разрушение оксидных плёнок, загрязнений и активация свариваемых поверхностей под воздействием плазменных потоков ударно-сжатого газа и поверхност-

сжатого газа в процессе сварки взрывом положительно скажется на свойствах соединения, например, позволит исключить начальные непровары и участки пониженной прочности. Эти рекомендации были подтверждены экспериментально при промышленном производстве крупногабаритного биметалла сваркой взрывом.

Перед точкой контакта два пограничных слоя, насыщенных ионизированными и расплавленными частицами, сходятся и при определенных условиях нарушения стационарного процесса сварки взрывом, напри-

мер, искривления и замыкания фронта деформации взрывчатого вещества, могут образовать единую плазменную струю. Воздействие этой струи в условиях образования замкнутого объема в сварочном зазоре приводит к прожигу металла плакирующего слоя толщиной 4-5 мм плазменным потоком и образованию свища характерной формы (рис. 3). На интенсивность воздействия ударной плазмы указывает наличие сплошных расплавов на поверхности основного и плакирующего слоев в локальных участках неприваров, которые обнаруживаются при их вскрытии. При этом пластической деформации в этой зоне не наблюдается. Расплавы имеют вид легко отделяющейся светлой пленки с металлическим блеском толщиной до 20 мкм. На поверхности расплавов выявлены микровкрапления и кристаллы чистого железа (рис. 4, таблица 2), что может указывать на прохождение процессов диссоциации оксидов железа под воздействием ударной плазмы.

Вывод

Предложено новое теоретическое представление о процессах очистки и активации свариваемых поверхностей при сварке взрывом крупногабаритных листов. Процесс сварки взрывом, идущий при ударном сжатии, сопровождаемом истечением газа из сварочного зазора с гиперзвуковой скоростью, рассматривается с позиций аэродинамики. В сварочном зазоре впереди точки контакта в условиях гиперзвукового обтекания свариваемых поверхностей высокотемпературным ударно-сжатым газом на границе их раздела происходит термическая ионизация газа с образованием неравновесной ударной плазмы. Роль газа в сварочном зазоре заключается в модификации свариваемых поверхностей впереди точки контакта перед сваркой взрывом: их очистке и

активации плазменными потоками, возникающими в газовом пограничном слое.

Библиографический список

1. Каракозов, Э. С. Соединение металлов в твердой фазе / Э. С. Каракозов. – М.: "Металлургия", 1976. – 264 с.
2. Красулин, Ю. Л. О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии / Ю. Л. Красулин, М. Х. Шоршоров // Физика и химия обработки материалов. – 1967. – №1. – С. 89-97.
3. Гельман, А. С. Основы сварки давлением / А. С. Гельман. – М.: "Машиностроение", 1970. – 312 с.
4. Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас – 2-е изд. доп. перераб. – Новосибирск: Наука, 1980. – 222 с.
5. Первухин, Л. Б. Очистка свариваемых поверхностей от окислов и загрязнений и их активация в процессе сварки взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, С. Ю. Бондаренко // Автоматическая сварка. – 2010. – №7. – С. 46-49.
6. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин – М.: "Машиностроение", 2005. – 544 с.
7. Волнообразование при косых соударениях / Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева; [Пер. и редактирование И. В. Яковлев и др.]. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 2000. – 221 с.
8. Ишуткин, С. Н. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С. Н. Ишуткин, В. И. Кирко, В. А. Симонов // Физика горения и взрыва. – 1980. – №6. – С. 69-73.
9. Кузнецов, Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах / Н. М. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1965. – 464 с.
10. Старик, А. М. Неравновесные физикохимические процессы в газовых потоках и новые принципы организации горения / Под ред. А. М. Старика. – М.: ТОРУСС ПРЕСС, 2001. – 864 с.
11. Лойцянский, Л. Г. Ламинарный пограничный слой / Л. Г. Лойцянский. – Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. – 478 с.
12. Бондаренко, С. Ю. Определение параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при сварке взрывом / С. Ю. Бондаренко, Д. В. Рихтер, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин // Автоматическая сварка. – 2009. – №11. – С.46-48.
13. Егер, С. М. Основы авиационной техники: Учебник / С. М. Егер, А. М. Матвеев, И. А. Шаталов – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 576 с.
14. Сенокосов, Е. С. Плазменная электродуговая очистка поверхности металлических изделий / Е. С. Сенокосов, А. Е. Сенокосов // Металлург. – 2005. – №4. – С. 44.
15. Гельман, А. С. Изучение некоторых вопросов очистки поверхностей в процессе сварки взрывом / А. С. Гельман, Л. Б. Первухин, Б. Д. Цемахович // Физика горения и взрыва. – 1974. – №2. – С. 284-288.