

О ПРИРОДЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВОЛН ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

О. Б. Дреннов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Дан обзор существующих критериев волнообразования при сварке взрывом. Все они основаны на гидродинамическом приближении косоугольного соударения.

На базе анализа экспериментальных данных по исследованию структуры кумулятивной струи, реализующейся в точке контакта, предложена новая модель волнообразования, основывающаяся на главенствующей роли пластических деформаций и сопутствующего термического разупрочнения. При сдвиговом течении разупрочненных слоев развивается неустойчивость Кельвина–Гельмгольца.

Ключевые слова: сварка взрывом, волнообразование, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, пластическая деформация, термическое разупрочнение.

Введение

Сварка взрывом – физический метод реализации прочного соединения металлических образцов по всей поверхности контакта. Это явление занимает главенствующее место среди взрывных технологий (упрочнение, штамповка, прессование, динамический синтез и т. п.).

Термином «сварка взрывом» принято называть явление прочного соединения двух или нескольких металлических тел, происходящее при их высокоскоростном соударении под углом. Для большинства металлов и сплавов диапазон оптимальных скоростей соударения находится в пределах от 0,3 до 1,5 км/с. Поскольку реализация данных скоростей стала широко доступна при использовании зарядов взрывчатого вещества (ВВ), отсюда и появилось название «сварка взрывом».

Впервые с прообразом сварки взрывом столкнулись в годы Первой мировой войны. Отмечались факты случайного «прилипания» пуль и шрапнелей к металлическим преградам.

Первые научные описания явления сварки взрывом можно отнести к 1940-м годам. В 1944 году

Л. Карл (США) опубликовал фотографию микрошлифа двух латунных дисков ($\varnothing 25,5 \times 0,9$ мм), сварившихся под действием детонационной волны. В кратком сообщении высказано разумное предположение о возможности относительного скольжения контактирующих поверхностей, которое, в итоге, способствует образованию прочного соединения [1].

С середины шестидесятых годов прошлого века были начаты целенаправленные исследования сварки взрывом, пик которых пришелся на 1970–1980 годы. Однако вплоть до наших дней интерес к явлению сварки взрывом не ослабевает.

Наиболее удивительным и интересным является тот факт, что при определенных условиях косоугольного соударения (в широком диапазоне изменения определяющих нагружение параметров) контактная граница сваренных металлов представляет собой регулярную синусоидальную волнообразную форму. Причем амплитуда и длина волн остаются практически постоянными на всей базе (длине) свариваемой поверхности.

К настоящему времени существует достаточное количество критериев волнообразования при

* E-mail: drennov@mail.ru

сварке взрывом. Однако все они однозначно не описывают процесс и в ряде случаев противоречивы. Иными словами, единая модель волнообразования еще не определена, а находится в стадии разработки.

1. Определяющие параметры сварки взрывом

Наиболее технологичной и оптимальной схемой сварки взрывом признана схема с параллельным расположением метаемой и неподвижной пластин (рис. 1) [2].

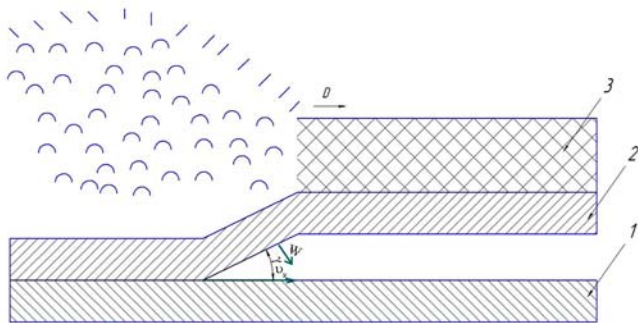


Рис. 1. Схема сварки взрывом: 1 – неподвижная пластина; 2 – метаемая пластина; 3 – заряд ВВ; γ – угол соударения; v_k – скорость точки контакта; W – скорость полета метаемой пластины; D – скорость детонации

Определяющими процесс параметрами являются: угол соударения γ и скорость перемещения точки контакта v_k . Из простых геометрических построений следует

$$\sin \gamma = \frac{W}{D}; \quad v_k = D, \quad (1)$$

где W – скорость полета метаемой пластины; D – скорость детонации заряда ВВ.

Скорость полета метаемой пластины рассчитывается по одномерной модели (формула Гарни) [3]

$$W = \sqrt{2E_G} \frac{R\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + 5R + 4}}, \quad (2)$$

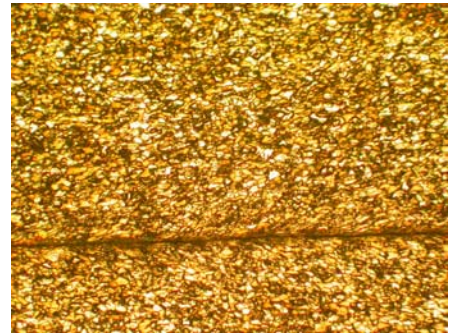
где $E_G = \frac{D^2}{2(K^2 - 1)}$ (K – показатель политропы продуктов взрыва)

$$R = \frac{m_{ВВ}}{m_{пл}}; \quad (3)$$

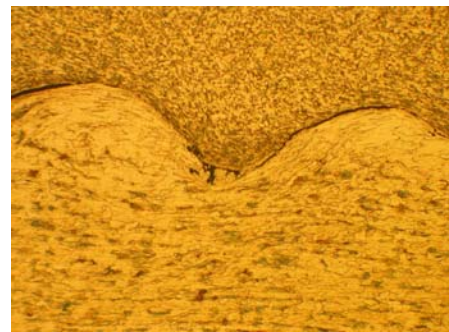
($m_{ВВ}$ – масса заряда ВВ; $m_{пл}$ – масса метаемой пластины).

Последовательное увеличение угла соударения γ при постоянной скорости перемещения точ-

ки контакта v_k (или увеличения v_k при постоянном γ) приводит к изменению геометрического вида контактной границы (рис. 2). При невысоких γ и v_k реализуется линейный сварной шов (см. рис. 2,а). Далее формируется симметричный синусоидальный волнообразный сварной шов (см. рис. 2,б). Впоследствии волны теряют симметрию, гребни завихряются (см. рис. 2,в). В финальной стадии образуется слой турбулентно перемешанных компонентов (см. рис. 2,г) [4].



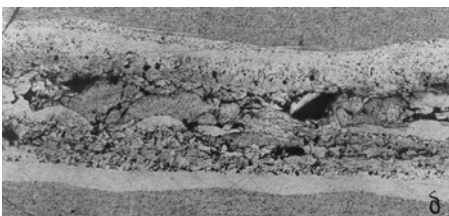
а



б



в



г

Рис. 2. Микрофотографии характерных геометрических видов сварных швов

2. Критерии волнообразования

Первая попытка объяснить явление волнообразования появилась в работе Абрахамсона [5]. В ней делается два определяющих заключения.

Волнообразование наблюдается только в режимах дозвукового течения в окрестности точки контакта;

Формирование обратной струи (при разделении потока в точке контакта) является решающим фактором для образования волн.

Согласно представлениям Абрахамсона струя, падающая на недеформированную поверхность, разделяется на две. Высокое давление в окрестности точки торможения приводит к возникновению бугра деформации. Бугор достигает предельных размеров и сдвигается струей вниз по потоку. Далее процесс повторяется.

Данная модель была взята за основу при описании механизма волнообразования в работе Бахрани, Блэка и Кроссланда [6]. В ней полагается, что в процессе роста бугор деформации касается поверхности падающей струи, захлопывает часть обратной струи. Точка торможения скачком перемещается на вершину бугра. Далее процесс повторяется.

Хант [7] рассмотрел взаимодействие разделяющихся струй с плоской преградой. Причина волнообразования заключается в развитии неустойчивости тангенциального разрыва между обратной струей и преградой. Поскольку такой разрыв абсолютно неустойчив и на поверхности раздела возможно возникновение возмущений любой длины волны для выделения определенной гармоники, было выдвинуто предположение, что возникает лишь та гармоника, групповая скорость распространения которой совпадает со скоростью точки контакта.

Робинсон [8] также сделал заключение, что причина волнообразования – развитие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в свободных плоских струях. Однако профиль горизонтальной скорости в них должен иметь точку перегиба.

3. Модель волнообразования при пластическом деформировании

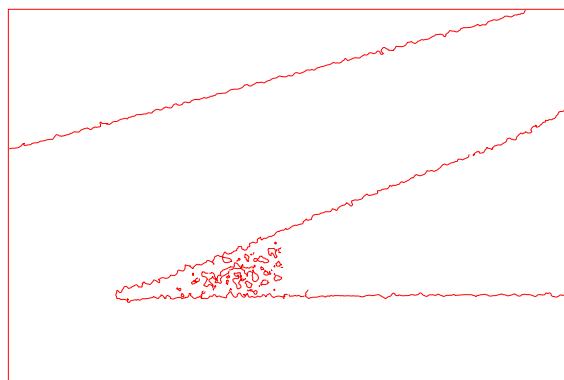
Рассмотренные в предыдущем разделе концепции волнообразования основаны на использовании гидродинамического приближения [9]. Давление, реализующееся в окрестности точки кон-

такта, многократно превышает прочность соударяющихся металлов, т. е. прочностью можно пренебречь. В то же время действующее давление не столь велико, чтобы большую роль играла сжимаемость материалов. Поэтому в качестве реологической модели материала соударяющихся пластин принимается модель идеальной несжимаемой жидкости. Соударение падающей пластины с неподвижной рассматривается как взаимодействие струи с прочной преградой и разделение струи на прямую и обратную.

Однако в реальности ситуация выглядит несколько иначе. В работе [10] выполнено импульсное рентгенографирование процесса косоугольного соударения металлических пластин в режиме сварки взрывом. Экспериментально зафиксировано, что вместо струи формируется облако диспергированных частиц. Целенаправленные исследования несимметричного косоугольного соударения плоских пластин показали, что во всех случаях (дозвуковой режим нагружения) реализуется облако мелких частиц равномерно заполняющих раствор угла соударения, рис. 3 [11].



а



б

Рис. 3. Рентгенограмма диспергированного облака частиц при косом соударении плоских пластин (а) и результат математической обработки по выделению характерных контуров (б)

Опираясь на экспериментальные факты [10, 11], можно предложить следующий механизм волнообразования при сварке взрывом.

Металлическая пластина соударяется под углом с неподвижной. В точке контакта металлы изгибаются, скользят относительно друг друга. В контактной зоне реализуются пластические деформации. Тепло, выделяемое при интенсивном пластическом деформировании, приводит к термическому разупрочнению, росту скорости пластических деформаций и автокаталитической кинетике увеличения температуры до значений, близких к температуре плавления. Узкие (десятки микрометров) приграничные слои полностью теряют прочность, переходят в некое «квазижидкое» состояние. Соседствующие слои (до сотен микрометров и даже нескольких миллиметров) сильнее разупрочняются. Причем разупрочнение последовательно и непрерывно меняется от слоя без прочности (вблизи контактной границы) до слоя с реальной прочностью (на глубокой периферии).

Присутствующие всегда начальные возмущения (шероховатость поверхности, чистота обработки) при относительном скольжении «квазижидких» слоев начинают расти за счет развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. В движение вовлекаются контактирующие разупрочненные слои. Рост начального возмущения по амплитуде продолжается до тех пор, пока прочность следующего контактирующего слоя будет достаточной для подавления процесса развития неустойчивости (металлы с такой прочностью уже не вовлекаются в развитие возмущений). Иными словами, существует «тоннель» вдоль контактной границы, внутри которого материалы разупрочнены и участвуют в процессе волнообразования. По ординате вверх и вниз от границы раздела прочность материалов возрастает, а по границе «тоннеля» достигает критического значения $Y_{кр}$ ($Y_{кр} \leq Y_{реал}$) при котором волнообразование невозможно. Количество кинетической энергии, сообщенное веществу, может быть достаточным, чтобы поддерживать движение (рост) возмущений (волн), но недостаточно, чтобы вовлечь в движение слои металлов с прочностью больше или равной $Y_{кр}$. Тогда волна упирается в «потолок тоннеля», деформируется. Образуются волны с завихренными гребнями (см. рис. 2,в), или слои турбулентно перемешанных компонентов (см. рис. 2,г).

Известно, что тангенциальный разрыв абсолютно неустойчив и расти могут возмущения любой длины волны [12]. Однако на практике посто-

янно наблюдается развитие возмущения с определенной длиной волны.

В нашем случае начальные возмущения задаются (см. схему сварки взрывом на рис. 1) чистой обработкой контактирующих поверхностей. Здесь присутствуют возмущения с широким спектром длин волн.

В работе [13] описаны эксперименты по косому соударению алюминиевых и медных пластин в режиме сварки взрыва. Отмечается, что изменение чистоты обработки контактирующих поверхностей от зеркально полированной ($R_z 0,05$) до максимально возможного зазора ~ 40 мкм ($R_z 20$) не влияет на амплитуду и длину волны реализующихся возмущений.

Следовательно, определяющим для процесса развития возмущений при сварке взрывом является тангенциальное течение разупрочненных слоев по контактной границе.

Главенствующее влияние на характер реализующихся возмущений (количественная величина амплитуды и длины волны) оказывают динамические параметры нагружения (угол соударения, скорость точки контакта, скорость полета металлической пластины, давление в окрестности точки контакта) и физико-механические свойства материалов (прочность, плотность, твердость, температура плавления, скорость звука).

Заключение

Рассмотрены существующие концепции волнообразования при сварке взрывом. Все изложенные механизмы построены в рамках гидродинамического приближения (в точке контакта образуется кумулятивная струя).

Базируясь на результатах экспериментов (в точке контакта формируется не струя, а облако мелких диспергированных частиц), предложена альтернативная модель волнообразования, а именно в точке контакта реализуются интенсивные пластические деформации, приводящие к термическому разупрочнению тонких приграничных слоев. Более глубокие слои теряют прочность и участвуют в процессе формирования волн. Возмущения (волны) возникают и растут по механизму развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Рост возмущений ограничивается по достижению слоя вещества, не потерявшего прочность.

Список литературы

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Наука: Новосибирск, СО, 1980.
2. Крупин А. В., Соловьев В. Я., Шефтель Н. И., Кобелев А. Г. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975.
3. Дерибас А. А. // ПМТФ, 2000. Т. 41, № 5. С. 68–74.
4. Дреннов О. Б. // ФГВ, 1991. Т. 27, № 2. С. 118–124.
5. Абрахамсон Г. Р. // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия Е. Прикладная механика. 1961. Т. 28, № 4. С. 45–55.
6. Bahrani A. S., Black T. J., Crossland B. // Proceeding of royal society. Series A, 1966. Vol. 296, N 1445. P. 123–136.
7. Hunt J. Wave formation in explosive welding. The philosophical magazine, Series 8, 1968. Vol. 17, N 148. P. 669–680.
8. Robinson J. The mechanics of wave formation in impact welding. The philosophical magazine, 1975. Vol. 31, N 3. P. 587–597.
9. Физика взрыва // Под ред. Орленко Л. П. В двух томах. М.: Физматлит. 2002. Т. 2.
10. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978.
11. Дреннов О. Б. // ФГВ, 2001. Т. 37, № 3. С. 1–8.
12. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы, факты, подобие. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
13. Дреннов О. Б. // ПМТФ, 1989. Т. 3, № 3. С. 41–44.

Статья поступила в редакцию 06.06.2018