



## КАНАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Л. Д. ДОБРУШИН, д-р техн. наук, Ю. И. ФАДЕЕНКО, канд. физ.-мат. наук,  
С. Ю. ИЛЛАРИОНОВ, П. С. ШЛЕНСКИЙ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

При сварке взрывом длинномерных изделий проявляется существенное влияние «канальных процессов», распространяющихся со сверхдетонационной скоростью в сварочном зазоре (кумулятивных струй, ударных волн в газе, изгибных колебаний пластин и пр.). Представлены известные данные и результаты собственных экспериментов, позволившие выяснить механизм предсварочной эрозии соединяемых поверхностей длинномерных стальных деталей. Основное в этом механизме — разогрев и унос материала поверхностного слоя при рикошетирующих соударениях с частицами кумулятивной струи.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, канальный эффект, эрозия соединяемой поверхности

В практике применения сварки взрывом при производстве длинномерных биметаллических изделий (биметаллических листов, труб с защитными покрытиями каналов) существует такая проблема, как снижение качества сварного соединения по мере удаления от точки инициирования детонации сварки [1]. На расстояниях около 1 м и более от точки инициирования детонации происходит снижение механических свойств сварного соединения и даже разрушение плакирующего слоя. При этом имеет место увеличение размера вихревых зон («карманов») вплоть до образования сплошной прослойки оплавленного металла, что обусловлено комплексным воздействием нескольких факторов, основным из которых является так называемый канальный эффект.

Сварка крупногабаритных листов выполняется по параллельной схеме: соединяемые пластины (или цилиндрические оболочки) устанавливаются с небольшим зазором постоянной ширины по всей свариваемой поверхности. Канальный эффект — это возникновение в зазоре движущегося со сверхдетонационной скоростью потока кумулятивных выбросов металла и заполняющего зазор газа. В отличие от своего аналога, давно и детально изученного детонационного канального эффекта [2], сварочный канальный эффект изучен мало.

Расчет параметров ударной волны, возбуждаемой в газе захлопыванием сварочного зазора, сам по себе не является проблемой. Применение численного моделирования позволяет описать этот процесс и в том случае, когда необходимо учитывать смещение пластин впереди детонационного фронта, обнаруженное в работе [3] и способное существенно изменить ге-

ометрию зазора. Имеется также общее представление о скорости [4], массе и энергии [5] потока кумулятивных частиц в зазоре. Однако совместное рассмотрение ударной волны в газе и потока кумулятивных частиц представляет непреодолимые трудности. Они усугубляются в случае длинномерных изделий, поскольку по мере удаления процесса сварки взрывом от точки инициирования масса потока металлических частиц постепенно увеличивается за счет эрозии их поверхности частицами первичного потока. В связи с этим влияние канального эффекта приходится оценивать с помощью прямых экспериментов.

Для оценки уноса массы потока металлических частиц с соединяемых поверхностей и их состояния перед соединением был поставлен специальный эксперимент [6]. В эксперименте использовали сборку (рисунок) из стального стержня диаметром 25 мм и соосной ему стальной трубы с толщиной стенки 3,5 мм (материал — сталь 20). Ширина сварочного зазора составляла 1,5 мм. Полная длина сборки — 750 мм; при этом первые 600 мм приходились на рабочий участок, свариваемый внешним зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Образующийся при сварке кумулятивный поток проходил в зазор конечного отрезка сборки

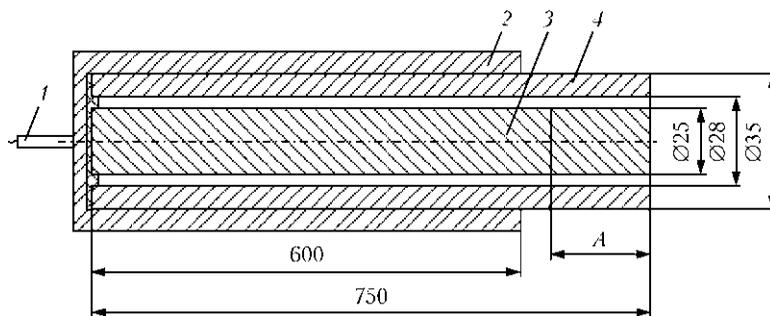


Схема эксперимента по исследованию канального эффекта: 1 — детонатор; 2 — заряд ВВ (аммонит 6ЖВ + аммиачная селитра); 3 — стальной цилиндр; 4 — плакирующая стальная оболочка; А — измерительный участок (отношение длины зазора к высоте составляет 400)



длиной 150 мм, не содержащего ВВ и выполняющего роль исследуемого образца.

Для оценки состояния соединяемых поверхностей зазора непосредственно перед прохождением фронта детонационной волны измеряли толщину унесенного с поверхности слоя металла и оценивали изменение высоты неровностей шероховатой поверхности. Толщина слоя металла, унесенного с поверхности стержня, составила 30 мкм, а высота неровностей рельефа увеличилась от 3 до 6...12 мкм, что намного меньше высоты сварочной волны.

Полученные результаты дают возможность сопоставить вклады первичных и вторичных частиц в общий поток кумулятивных выбросов. Воспользовавшись формулой из работы [7]  $d_{к.с}/d_{об} = \text{tg}^2(\alpha/2)$  (здесь  $d_{к.с}$  — полутолщина кумулятивной струи;  $d_{об}$  — толщина метаемой оболочки;  $\alpha$  — динамический угол соударения), находим, что при идеальной кумуляции толщина струи должна составлять 40...50 мкм. Однако, по данным [5], при малой скорости точки контакта (в нашем случае 2300 м/с) значение  $d_{к.с}$  может быть в 3...5 раз меньше идеального. Таким образом, толщина слоя металла, уносимого в кумулятивную струю с каждой из соединяемых поверхностей, могла составлять 4...8 мкм, что в 4...7 раз меньше уноса, наблюдаемого на измерительном участке. Увеличение полной массы кумулятивной струи в 5...8 раз по сравнению с первичным потоком приводит к значительному снижению ее скорости, которая становится меньше скорости линии контакта и детонации. В результате точка контакта обгоняет замедлившийся канальный поток и захватывает его в карманы. Даже если предположить, что канальный поток имеет радиальную структуру (высокоскоростной первичный поток в приосевой зоне и медленный вторичный поток в приповерхностном слое), основная часть содержимого зазора должна подвергаться захвату.

В случае детонационного канального эффекта накопление массы в преддетонационной зоне приводит к периодичности процесса детонации или его обрыву. По-видимому, то же самое происходит и при сварке взрывом.

Вопрос о конкретном механизме эрозии поверхностей требует отдельного обсуждения. Согласно работе [4] скорость первичного потока кумулятивных частиц в наших условиях можно оценить как 3,0...3,5 км/с. Из исследований высокоскоростных соударений известно, что в этом диапазоне скорости косые соударения частиц с поверхностью твердых тел сопровождаются значительными деформациями (появлением вмятин) и преобразованием кинетической энергии частиц в тепловую энергию соударяющихся тел. Однако выбросы массы потока металлических частиц в поток вторичных частиц при этой скорости со-

ударения несут существенные. Поэтому наблюдаемую эрозию соединяемых поверхностей можно объяснить только нагревом их до температуры, при которой прочность поверхностного слоя незначительна. Согласно [8] при быстром деформировании низкоуглеродистых сталей снижение значения предела текучести на порядок наблюдается при температуре 800 °С и более. При типичном режиме сварки взрывом кинетическая энергия первичного кумулятивного потока приблизительно равна энергии, необходимой для нагрева эродированного слоя до 800 °С или даже выше. Энергия, сообщаемая воздушной ударной волне в сварочном зазоре, в 10 раз меньше этого значения. Таким образом, основной причиной эрозии является нагрев и унос материала приповерхностного слоя металла в результате соударений с частицами кумулятивного потока. Поскольку преобразование кинетической энергии кумулятивных частиц в тепловую энергию поверхностных слоев металла осуществляется в последовательности рикошетирующих соударений, для развития процесса эрозии требуется значительное время. В связи с этим значительная эрозия имеет место только при сварке длинномерных изделий.

Масса первичных частиц превышает массу воздуха в зазоре в десятки раз, а полная масса потока металлических частиц на измерительном участке — в сотни раз. Размножение вторичных частиц увеличивает площадь контакта их поверхности с газом, но снижает среднюю контактную температуру, что, по-видимому, замедляет протекание реакций металл-газ, которые завершаются уже в карманах при гребнях и впадинах сварочной волны.

Содержимое карманов — это обычно застывшие расплавы, образовавшиеся при интенсивном пластическом деформировании. Однако последнее само по себе способно обеспечивать разогрев металла лишь до предплавильной температуры, при которой сопротивление деформированию пренебрежимо малое. Дальнейший разогрев с достижением температуры плавления и сообщением металлу скрытой теплоты плавления возможен, но должен обеспечиваться другими механизмами. Таковым может являться динамическое опрессовывание пористого содержимого карманов в зоне формирования соединения. В этом процессе веществу может быть дополнительно сообщена объемная плотность энергии  $pt$  (здесь  $p$  — среднее давление за время обжатия;  $t$  — начальная пористость). Вопрос о механизмах формирования карманов и состоянии их содержимого изучен недостаточно. Измерения объема карманов, исследования состава и структуры их содержимого являются источниками информации о канальных процессах и их влиянии на качество получаемых соединений.



Таким образом, представления об очистке соединяемых поверхностей и уносе материала только в окрестностях точки контакта можно считать применимыми к угловой схеме сварки взрывом и начальному ее этапу по параллельной схеме. После завершения начального этапа в зазоре накапливается достаточно плотный поток металлических частиц, который и осуществляет очистку поверхности и унос поверхностного слоя далеко впереди линии контакта.

1. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Машиностроение, 1978. — 168 с.
2. Дубнов А. В., Хотина Л. Д. О механизме канального эффекта при детонации конденсированного ВВ // Физ. горения и взрыва. — 1966. — № 4. — С. 97–104.

3. Оценка вертикального перемещения метаемых металлических пластин перед точкой контакта при сварке взрывом / Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак и др. // Автомат. сварка. — 2008. — № 4. — С. 26–29.
4. Дерибас А. А., Захаренко И. Д. О поверхностных эффектах при косых соударениях металлических пластин // Физ. горения и взрыва. — 1974. — 10, № 3. — С. 409–423.
5. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
6. Channel effect in parallel-scheme explosive welding of long-length parts / Yu. I. Fadeenko, S. Yu. Illarionov, L. D. Dobrushin, P. S. Shlensky // Shock-assisted synthesis and modification of materials / Ed. A. A. Deribas, Yu. B. Scheck. — Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2006. — P. 45.
7. Тришин Ю. А. Физика кумулятивных процессов. — Новосибирск: Изд. Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2005. — 324 с.
8. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1978. — 647 с.

A significant influence of Uchannel processes  $\Phi$ , propagating at a superdetonation velocity in the welding gap (cumulative jets, shock waves in gas, bending vibrations of plates, etc.), is manifested in explosion welding of extended items. The paper presents known data and results of the authors' experiments, which allowed clarifying the mechanism of pre-welding erosion of the surfaces of extended steel parts being joined. The main element of this mechanism is heating and loss of the surface layer material at ricocheting collisions with the cumulative jet particles.

Поступила в редакцию 07.09.2009

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ FLAMN-10 «ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ В МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ»**

Санкт-Петербург, Пушкин, 5–8 июля 2010 г.

### **Тематика конференции:**

- компьютерное моделирование лазерных технологий;
- фотофизика и наноразмерные системы;
- лазерная очистка в области сохранения культурного наследства;
- промышленное применение волоконных лазеров.

Более 30 приглашенных докладов.  
Более 250 презентаций.

**Конференция FLAMN-10 будет проведена сразу после  
конференции «Лазерная оптика 2010», Санкт-Петербург, 28.06–02.07.2010**

### **Контакты:**

тел./факс: +7(812) 233 34 06  
E-mail: flamn10@gmail.com  
www.lastech.ifmo.ru/FLAMN10