



## ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МЕТАЕМЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ПЕРЕД ТОЧКОЙ КОНТАКТА ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Т. Ш. СИЛЬЧЕНКО, инж., С. В. КУЗЬМИН, В. И. ЛЫСАК, А. С. ГОРОБЦОВ, доктора техн. наук,  
Ю. Г. ДОЛГИЙ, инж. (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Рассмотрена новая методика экспериментального исследования перемещения сечений метаемой пластины перед точкой контакта в вертикальном направлении в процессе сварки взрывом. Представлены некоторые результаты оценки этого перемещения.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, плакирование крупногабаритных заготовок, прочностные свойства, точка контакта, фронт детонации, перемещения метаемой пластины, методика оценки перемещений

Одним из наиболее эффективных практических приложений сварки взрывом является плакирование крупногабаритных заготовок различного назначения, поскольку данный способ сварки теоретически не накладывает каких-либо ограничений на конечные размеры заготовок. Тем не менее при плакировании взрывом крупногабаритных пластин практически всегда наблюдается изменение свойств соединения по длине свариваемых заготовок, проявляющееся в увеличении размеров волн, и количества оплавленного металла, что в ряде случаев приводит к существенному снижению прочностных свойств биметалла вплоть до появления сплошных расслоений. В работах [1–8] высказаны суждения, объясняющие данные аномалии. Однако одним из наиболее вероятных факторов, обуславливающих проявление указанного выше эффекта в зоне соединения длинномерных пластин при сварке взрывом, является возможное вертикальное перемещение сечений метаемой пластины, расположенных впереди точки контакта под еще непродетонировавшим зарядом взрывчатого вещества (ВВ). Перемещение может происходить за счет давления ударно-сжатого воздуха, находящегося между свариваемыми пластинами [1], или действия инерционных сил ударно-волнового происхождения [8, 9], вследствие чего нарушается геометрия соударения свариваемых элементов. Оба предположения имеют право на существование, поскольку, безусловно, вносят свой вклад в нарушение геометрии соударения, однако до настоящего времени остается открытым вопрос о том, какое из указанных предположений является преобладающим, поскольку систематические экспериментальные исследова-

ния по данной проблеме до настоящего времени не проводились.

Целью настоящей работы явилось создание методики экспериментальной регистрации и оценки вертикальных перемещений участков пластин перед фронтом детонации в условиях сварки взрывом.

Разработанная методика основана на регистрации момента времени закорачивания специального датчика-иглы на поверхность металлической (метаемой или неподвижной) пластины, установленного от последней на некотором расстоянии  $\Delta$ , и была реализована следующим образом (рис. 1). В выбранном для исследования сечении свариваемого взрывом пакета (на некотором расстоянии  $L$  от начала метаемой пластины) над верхней 3 и под нижней 4 пластинами соосно друг с другом размещали контактные датчики перемещения 6 (заточенные на конус медные стержни диаметром 2 мм). Расстояния между датчиками и поверхностями пластин  $\Delta$  в опытах изменяли от 2 до 5 мм. Эти датчики коммутировали через блок формирования прямоугольных импульсов (одновибратор, сконструированный на логических элементах И – НЕ) на входы осциллографов, запуск которых осуществлялся первым контактным датчиком 5, расположенным в начале пластины, срабатывающим при прохождении над ним фронта детонации. Это позволяло синхронизировать развертки осциллографов с перемещением фронта детонации по поверхности метаемой пластины. Среднюю скорость детонации  $D$  заряда ВВ 2 определяли электроконтактным методом [10, 11] с помощью датчиков 5 и частотомеров. Таким образом, зная значение  $D$  и время срабатывания (закорачивания) датчиков 6, несложно для любого момента времени определить положение фронта детонации, а сопоставив по развертке осциллографа время замыкания датчиков 6, — расстояние перед фронтом детонации, на котором сечения свариваемых пластин пакета перемещаются вертикально (на величину  $\Delta$ ).

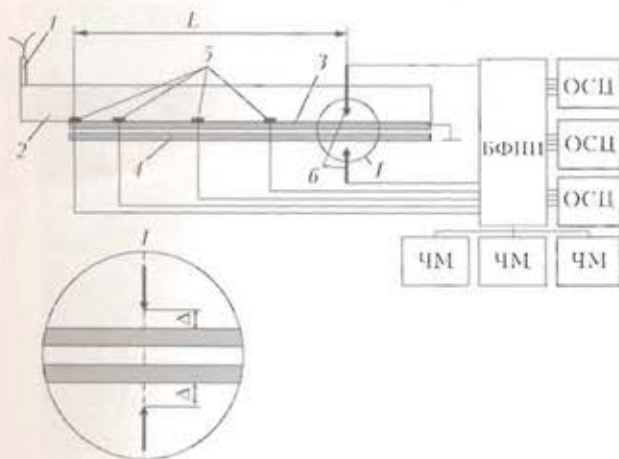


Рис. 1. Принципиальная схема измерения вертикальных перемещений пластин при сварке взрывом: 1 — электродетонатор; 2 — заряд ВВ; 3, 4 — соответственно перемещаемая и неподвижная пластины; 5 — электроконтактные датчики; 6 — контактные датчики перемещения; БФПИИ — блок формирования прямоугольных импульсов; ОСЦ — цифровой запоминающий осциллограф (С9-8, GFD-820С); ЧМ — электронный частотомер ЧЗ-63

Для наглядности регистрирующую аппаратуру настраивали таким образом, что замыкание контактных датчиков перемещения отображалось на экране осциллографа в виде соответствующих импульсов: при срабатывании верхнего датчика на экране появлялся импульсный П-образный, нижнего — импульсный U-образный сигнал (рис. 2).

Положение фронта детонации в момент времени срабатывания (закорачивания) датчиков вертикального перемещения определяли по осциллограмме, исходя из следующих соображений (рис. 3). При прохождении фронта детонации по заряду ВВ вдоль перемещаемой пластины последовательно срабатывают контактные датчики 1 и 1', прямоугольный импульс первого из которых (рис. 3, 2) запускает развертку осциллографа и одновременно — частотомер, а импульс второго (рис. 3, 2') останавливает последний, отображая на нем период следования импульсов или, что то же самое, время прохождения фронтом дето-

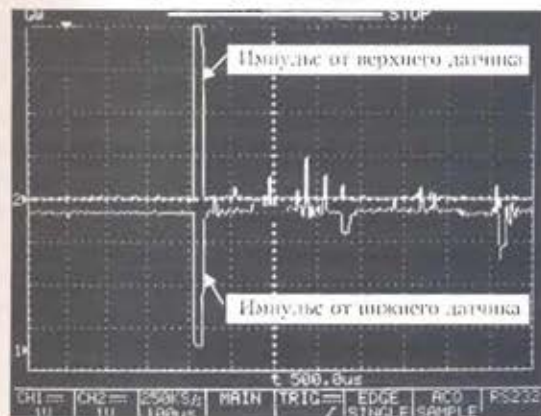


Рис. 2. Типичная осциллограмма, полученная при одновременном замыкании верхнего и нижнего датчиков перемещения

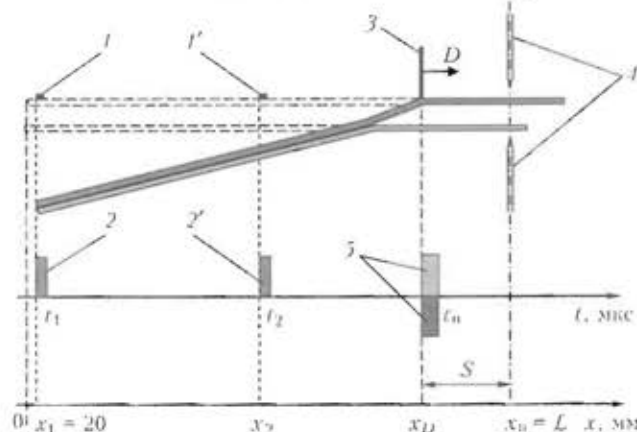


Рис. 3. Схема к определению положения фронта детонации в момент срабатывания датчиков перемещения (заряд ВВ условно не показан): 1, 1' — контактные датчики; 2, 2' — импульсы, соответствующие времени срабатывания контактных датчиков; 3 — фронт детонации; 4 — датчики перемещения; 5 — импульсы на осциллограмме, соответствующие времени «закорачивания» датчиков перемещения (штриховая линия — исходное положение свариваемых пластин)

нации расстояния по заряду  $(x_2 - x_1)$ , необходимое для определения скорости детонации ВВ  $D^*$ :

$$D = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

Затем по формуле

$$x_D = x_2 + (t_n - t_2)D = x_2 + \frac{t_n - t_2}{t_2 - t_1}(x_2 - x_1) \quad (2)$$

находили положение фронта детонации относительно начала перемещаемой пластины. Если координата  $x_D$  оказывалась меньше  $x_n$  (положение установки датчика-иглы), то это свидетельствовало о том, что сечение пластины (перемещаемой или неподвижной), расположенное на расстоянии  $S$  впереди фронта детонации, переместилось в вертикальном направлении, по крайней мере, на фиксированное значение  $\Delta$  (см. рис. 1). В противном случае ( $x_D = x_n$ ) считали, что вертикального перемещения выбранных сечений не происходило, а верхний датчик-игла срабатывал при ионизации зазора между датчиком и поверхностью перемещаемой пластины в зоне реакции детонационной волны.

Для экспериментальной отработки предложенной методики были поставлены несколько опытов, условия которых представлены в таблице.

Опыты № 2–6 проводили по параллельной схеме сварки взрывом, определяя по их результатам расстояния от фронта детонации, на которых происходило вертикальное перемещение сечений перемещаемой и неподвижной пластин, по формуле

\* В опытах для определения среднего значения скорости детонации использовали, по крайней мере, четыре контактных датчика.



Условия взрывного нагружения длинномерных пластин при экспериментальном определении вертикального перемещения их сечений перед точкой контакта

№ опыта	Свариваемый материал	Размеры пластин, мм	$D, \text{м/с}$	Установочные параметры			$S, \text{мм}$
				$h, \text{мм}$	$L, \text{мм}$	$\Delta, \text{мм}$	
1	Сталь Ст.3 12X18H10T	$2 \times 910 \times 250$ $3 \times 850 \times 200$	2940	3	780	2	36
2		$3 \times 1110 \times 150$ $3 \times 1000 \times 115$	2860	4	1010	2	83
3	Сталь Ст.3 Сталь Ст.3	$2 \times 800 \times 200$ $9 \times 760 \times 200$	1510	3	600/750	2	236/386
4			3730			4	236/386
						5	236/386
5		$9 \times 800 \times 200$ $9 \times 760 \times 200$	1540	3	600/750	2	11/0
6			3740			4	8/0
						5	0/0
7	Сталь Ст.3	$6 \times 900 \times 120$	2150	—	880	1	26
8	Сталь Ст.3	$12 \times 900 \times 200$	2180	—	880	1	12
9	Сталь Ст.3	$9 \times 800 \times 200$	1470	—	600/750	2	341/201
10	Сталь Ст.3	$9 \times 800 \times 200$	3800	—		4	329/201
						5	51/201
						2	3/0
						4	2/0
						5	0/0

Примечания. 1. В числителе приведены значения для метаемой пластины, в знаменателе — для неподвижной. 2. Величина  $S$  — расстояние между сечением и фронтом детонации в момент срабатывания верхнего датчика-иглы. 3. Величина  $h$  — сварочный зазор.

$$S = x_{\text{и}} - x_{\text{Д}} \quad (3)$$

В опытах № 7–10 неподвижная пластина отсутствовала, а датчики вертикальных перемещений устанавливали как над метаемой пластиной, так и под ней, что позволяло фиксировать время возможного перемещения ее фиксированного сечения не только вертикально вверх, но и вниз. Кроме того, в опытах № 3–6 и 9, 10 варьировали расстояние по вертикали между поверхностью метаемой пластины и датчиками перемещения от 2 до 5 мм, а в опытах № 3–6 и 10 устанавливали две линии датчиков — на удалениях 600 и 750 мм от начала метаемой пластины.

Из анализа результатов, полученных в опытах № 1, 2, следует, что по мере возрастания дистанции от точки инициирования заряда ВВ (соответственно 780 и 1010 мм) наблюдается соответствующее увеличение расстояния  $S$  перед фронтом детонации, на котором фиксируется вертикальное перемещение сечений соударяющихся пластин. Так, в опыте № 1 расстояние  $S$  составило около 36, в опыте № 2 — 83 мм.

Аналогичные изменения величины  $S$  отмечены в опытах № 3, 5 (таблица). Так, в опыте № 5

при использовании достаточно толстых и массивных пластин, свариваемых при довольно низкой скорости контакта ( $v_{\text{к}} = D = 1540 \text{ м/с}$ ), датчик первой линии ( $L = 600 \text{ мм}$ ), установленный на расстоянии от поверхности метаемой пластины  $\Delta = 2 \text{ мм}$ , зафиксировал касание спустя 263,5 мкс от запуска развертки осциллографа (момента прохождения фронтом детонации датчика 1 (см. рис. 4)), что после пересчета по формулам (1)–(3) соответствует  $S \approx 150 \text{ мм}$ . Датчиком второй линии ( $L = 750 \text{ мм}$ ), наиболее близко расположенным к поверхности метаемой пластины ( $\Delta = 2 \text{ мм}$ ), было зафиксировано то же время (в пересчете  $S \approx 300 \text{ мм}$ ), что свидетельствует о практически одновременном начале движения в вертикальном направлении сечений пластин, удаленных друг от друга на 150 мм.

В опыте № 3 (таблица) при метании двухмиллиметровой пластины время, зафиксированное датчиками перемещения обеих линий, сократилось до 202 мкс. Соответственно величина  $S$  составила около 250 и 400 мм.

При увеличении скорости детонации накладного заряда ВВ до 3730...3740 м/с (таблица, опыты № 4 и 6) вертикальное перемещение выбран-

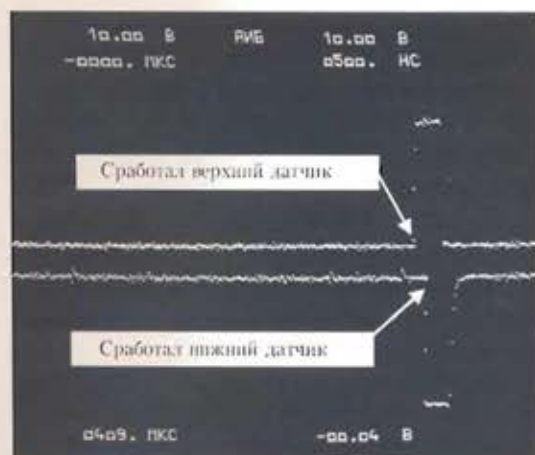


Рис. 4. Осциллограммы, зафиксированные в опыте № 7

ных сечений пластин перед фронтом детонации обнаружено не было. При этом время, фиксируемое датчиками перемещения, строго соответствовало моменту прохождения фронта детонации через плоскость их размещения. Аналогичная ситуация наблюдалась и при отсутствии в опытах неподвижной (нижней) пластины (см. таблицу, опыт № 10).

Размещение датчиков перемещения на различных расстояниях от поверхности метаемой пластины  $\Delta$  (см. таблицу, опыты № 3–6, 9, 10) позволило оценить скорость перемещения в вертикальном направлении выбранных сечений метаемой пластины. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что средняя скорость перемещения в зависимости от условий проведения опытов изменяется от десятков и сотен метров в секунду в случае метания пластин толщиной 9 мм (опыт № 5) до тысяч при уменьшении толщины пластины до 2 мм (опыт № 3).

Следует отметить интересный факт синхронного перемещения сечений метаемой и неподвижной пластин в противоположных направлениях, что фиксировалось на двухлучевых осциллографах в виде соответствующих импульсов (см. рис. 2).

Отсутствие в опытах № 7–10 неподвижного элемента позволило также в первом приближении оценить период колебания сечений нагружаемой детонационной волной пластины, регистрируемый с помощью расположенных по обе ее стороны соосно друг другу датчиков. Разница во времени срабатывания датчиков, отчетливо видимая на рис. 4, составила 8...10 мкс.

A new procedure of experimental investigation of displacement of the flyer plate sections ahead of the contact point in the vertical direction during explosion welding is considered. Some results of evaluation of this displacement are given.

## Выводы

1. Разработанная экспериментальная методика позволила установить вертикальное перемещение сечений металлических пластин, находящихся перед точкой контакта, при их нагружении детонационной волной в условиях сварки взрывом, а также оценить среднюю скорость этого перемещения и «запаздывание» фронта детонации.

2. Нарушение геометрии взаимного расположения длиномерных элементов перед фронтом детонации является одним из главных факторов, ограничивающих конечные размеры плакируемых взрывом заготовок.

*Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках государственного контракта № 02.513.11.3289.*

1. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 165 с.
2. Конон Ю. А., Певухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.
3. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука і техника, 1990. — 205 с.
4. Ватник Л. Е., Кривенцов А. Н., Седых В. С. Некоторые особенности образования соединения при сварке взрывом листового биметалла // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. трудов. — Волгоград: ВолгПИ. — 1974. — Вып. 1. — С. 35–45.
5. Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина. — М.: Машиностроение, 1978. — 191 с.
6. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
7. Кузьмин С. В., Лысак В. И., Долгий Ю. Г. Формирование соединений при сварке взрывом крупногабаритных металлических слоистых композитов // Свароч. пр-во. — 2002. — № 5. — С. 48–53.
8. Тарабрин Г. Т., Трыков Ю. П. Влияние упругих волн на характер движения пластины под действием продуктов взрыва // Металловедение и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. трудов. — Волгоград: ВолгПУ. — 1997. — С. 5–13.
9. Математическая модель взаимодействия метаемой пластины с импульсной нагрузкой в условиях сварки металлов взрывом / А. С. Горобцов, Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин и др. // Изв. Волгоград. техн. ун-та. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — 2006. — № 9(24), вып. 2. — С. 93–101.
10. Кузьмин Г. Е., Пай В. В., Яковлев И. В. Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. — Новосибирск: СО РАН, 2002. — 312 с.
11. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. — Изд. 2-е. — М.: Наука, 1975. — 704 с.

Поступила в редакцию 05.09.2007