

УДК621.791.76:621.7.044.2

*Т. Ш. Сильченко, инженер, С. В. Кузьмин, д-р техн. наук, В. И. Лысак, д-р техн. наук,
А. С. Горобцов, д-р техн. наук, Ю. Г. Долгий, инженер*
АНАЛИЗ ПРИЧИН ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ ПО ДЛИНЕ
СВАРЕННЫХ ВЗРЫВОМ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

Работа посвящена анализу и экспериментальному исследованию причин нестабильности структуры и свойств зоны соединения при сварке взрывом крупногабаритных биметаллических заготовок. Установлены основные причины изменения профиля и нарушения геометрии взаимного расположения свариваемых взрывом элементов перед фронтом детонации.

The paper is devoted to the analysis and the field research of the origins of structure instability and joint zone properties at explosion welding of large-sized bimetallic pieces. Determined were the basic origins of the profile change and geometric disarrangement of configuration of the welded elements in front of the detonation front.

Ключевые слова: сварка взрывом, фронт детонации, осциллограмма, датчик, волны

Keywords: explosive welding, detonation front, oscillogram, sensor, waves

Сварка взрывом теоретически не накладывает каких-либо ограничений на конечные размеры заготовок, поскольку поддержание на постоянном уровне в пределах всей площади свариваемых заготовок установочных параметров (сварочного зазора h , высоты заряда H , скорости детонации D) должно автоматически вести к постоянству кинематических и энергетических параметров и обеспечению стабильности свойств сваренного взрывом соединения. Тем не менее, многолетняя практика показывает [1 ... 10], что при плакировании взрывом крупногабаритных пластин наблюдается изменение свойств соединения по длине сваренных заготовок, проявляющееся в увеличении размеров волн и количества оплавленного металла, что в ряде случаев приводит к существенному снижению прочностных свойств биметалла.

Целью настоящей работы является анализ и экспериментальное исследование причин нестабильности структуры и свойств зоны соединения при сварке взрывом крупногабаритных заготовок.

Анализ литературных источников позволяет выделить, по крайней мере, три наиболее вероятные причины, приводящие к «раскачке» вол-

нового профиля и возрастанию количества оплавленного металла по длине сваренного биметалла [1 ... 8].

Увеличение параметров волн в концевой части сваренных заготовок в принципе могло бы быть связано с форсированием параметров высокоскоростного соударения пластин, происходящим вследствие увеличения скорости детонации D ВВ по длине заряда. Однако эта гипотеза, высказанная еще в 1974 году исследователями [4], не нашла экспериментального подтверждения.

В частности, авторы [11], выполнявшие измерения скорости детонации D зарядов ВВ длиной 4 м методом Дотриша [12] через каждые 200 мм, показали, что абсолютные отклонения от среднего значения D не превышают $\pm 3\%$, что, согласно [12], соответствует точности применяемого метода измерения и, следовательно, свидетельствует о высокой стабильности детонационных свойств длинномерных зарядов ВВ.

Более убедительным выглядит предположение, высказанное рядом исследователей [1 ... 3, 9, 13, 14 и др.], согласно которому изменение свойств соединения по длине сваренных круп-

ногабаритных заготовок является следствием предварительного подогрева соударяющихся поверхностей за счет воздействия высокотемпературного потока частиц ударно-сжатого газа кумулятивного происхождения, движущегося перед точкой контакта.

Если согласно [1] для упрощения полагать, что сжатие воздуха в зазоре между пластинами производится плоским поршнем, движущимся вдоль фронта детонации со скоростью контакта V_k , то состояние ударно-сжатого воздуха перед точкой контакта можно записать в виде системы [15]:

$$\left. \begin{aligned} p_b &= \frac{2\rho_0 V_b^2}{k+1} \\ u_b &= \frac{2V_b}{k+1} \\ T_b &= \frac{T_0 p_b (k-1)}{p_0 (k+1)} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где V_b – скорость фронта ударной волны; p_b и T_b – соответственно давление и температура воздуха за фронтом ударной волны; k – показатель политропы; ρ_0 , T_0 и p_0 – соответственно начальные плотность, температура и давление воздуха; $u_b = V_k$ – массовая скорость за фронтом ударной волны.

Как показывают расчеты по (1), температура ударно-сжатого воздуха при $V_k = 1800 \dots 4000$ м/с достигает $2300 \dots 6300^\circ\text{C}$ [13] при давлении $5 \dots 20$ МПа, что согласуется с экспериментальными данными [14].

По мере продвижения вдоль свариваемой заготовки точки контакта из-за отставания последней от фронта ударной волны время воздействия нагретого воздуха на свариваемые поверхности возрастает по зависимости [13]

$$t = L \frac{V_b - V_k}{V_b V_k}, \quad (2)$$

где L – расстояние от места начала сварки.

По оценке авторов [13] на расстоянии $L = 1 \dots 2$ м это время может превышать 100 мкс, увеличиваясь при снижении V_k .

Для расчета теплового потока q из ударно-сжатого воздуха вглубь поверхностей свариваемых пластин в [14] предлагается использовать зависимость

$$q = St \cdot \rho u c_p (T^* - T_c), \quad (3)$$

где $T^* = T \left(1 + \frac{k+1}{2} M^2 \right)$ – температура торможения [14]; St и M – соответственно числа Стентона и Маха; T , c_p и ρ – соответственно температура, теплоемкость и плотность газа; u – массовая скорость; k – показатель адиабаты.

Из оценки (в грубом приближении для модели мгновенного плоского источника тепла) процесса нагрева приконтактных объемов свариваемых пластин за время t (2), сделанной авторами [13], следует, что при $L = 1$ м толщина прогретого до нескольких сотен градусов металла составляет $10 \dots 20$ мкм, что, по их мнению, безусловно влияет на общую тепловую ситуацию в ОШЗ и, в конечном итоге, на образование соединения.

В работе [3], согласно расчетам, мощность теплового потока из газа в металл при $V_k = 4 \dots 4,5$ км/с достигает $\sim 10^3 \dots 10^4$ МДж/м²·с, что при времени его действия t (2) ~ 100 мкс дает прибавку по энергозложению в зону соединения (в виде тепла) порядка $0,1 \dots 1$ МДж/м². Подобные энергозложения становятся соизмеримыми с энергозатратами на пластическую деформацию металла в ОШЗ, однако локализо-

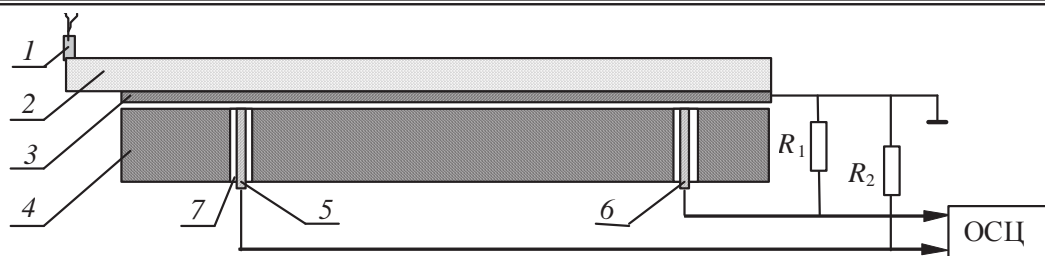


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по исследованию изменения температуры поверхностей свариваемых взрывом металлических пластин в начальном и конечном сечениях пакета:

1 – электродетонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – метаемая медная пластина; 4 – неподвижная пластина; 5, 6 – константановые стержни; 7 – изолятор; ОСЦ – цифровой запоминающий осциллограф С9-8

ваны в еще более узкой зоне и способны, по мнению [3], привести к оплавлению металла приконтактных слоев металла толщиной до 100 мкм.

К настоящему времени известно достаточно много методов измерения температуры в объеме металла при импульсном нагружении [16], наиболее перспективным из которых является метод естественных термопар образующихся в процессе сварки взрывом при соударении двух разноименных элементов (например, меди и константана). В качестве основных недостатков метода следует выделить наличие баро-ЭДС, вносящей существенную погрешность в эксперимент. Вместе с тем полагая, что величина баро-ЭДС конкретной термопары для идентичных экспериментальных сборок является постоянной, исследование изменения тепловой ситуации в зоне соединения по мере удаления от начала свариваемого пакета может быть сведено к качественному сравнению температур в различных сечениях по амплитуде фиксируемого осциллографом (в момент касания элементов термопары) импульсного сигнала (в виде скачка напряжения), характеризующего практически мгновенный рост температуры.

Для качественной оценки изменения температуры свариваемых поверхностей по мере удаления от точки инициирования заряда ВВ была проведена серия экспериментов, основанная на

методе естественной локальной термопары [16 ...18]. Суть экспериментов заключалась в следующем (рис. 1). Длинномерная медная пластина 3, метаемая зарядом ВВ 2, последовательно соударялась с константановыми стержнями 5 и 6 которые располагались в неподвижной стальной пластине 4 на различном удалении от начала сварки. Для исключения электрического контакта константанового стержня со стальной пластиной между ними помещали изолятор 7. Регистрация сигнала термо-ЭДС осуществлялась с помощью цифровых осциллографов С9-8 и GDS-820С. Скорость точки контакта при проведении экспериментов выдерживалась в диапазоне 2100 ... 2200 м/с.

В результате было обнаружено существенное различие амплитуд электрических сигналов, отражающих максимальную мгновенную термо-ЭДС + баро-ЭДС в соединении медь-константан на расстоянии 100 и 550 мм от начала сварки. Типичная осциллограмма, зафиксированная в одном из экспериментов, представлена на рис. 2.

Следовательно, эффект предварительного подогрева поверхностей свариваемых взрывом пластин, проявляясь при плакировании крупногабаритных заготовок, однозначно будет способствовать «раскачке» волнового профиля и увеличению количества оплавленного металла по длине сваренного биметалла.

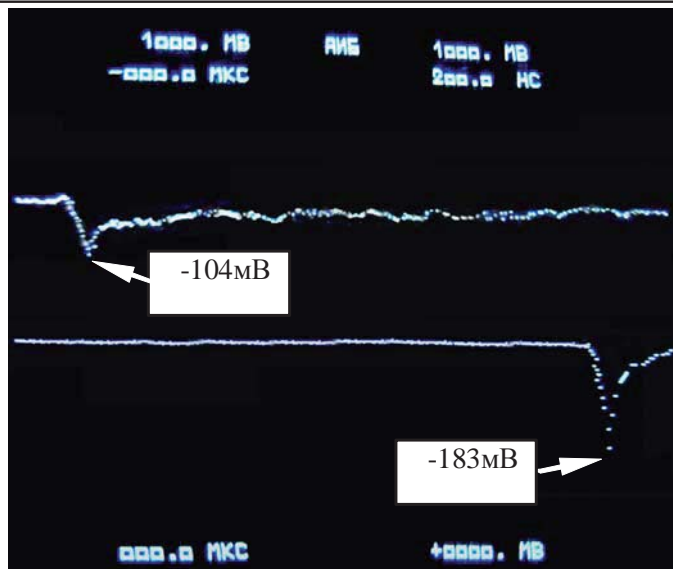


Рис. 2. Оциллограмма температурного режима, зафиксированная в одном из экспериментов: верхний луч – датчик, находящийся в начальном сечении свариваемых пластин (100 мм от начала сварки); нижний луч – датчик, находящийся в конечном сечении свариваемых пластин (550 мм от начала сварки)

Наиболее значимым фактором, способствующим возникновению нестабильности структуры и свойств зоны соединения длинномерных пластин при сварке взрывом, на наш взгляд, являются вертикальные перемещения сечений метаемой пластины, находящихся впереди точки контакта под еще непродетонировавшим зарядом ВВ, в результате чего в процессе сварки изменяется исходная величина установочного зазора h , вызывая, в свою очередь, отклонения величин угла соударения γ и скорости соударения V_c от расчетных значений. Такое нарушение геометрии взаимного расположения длинно-

мерных элементов, экспериментально доказанное в работе [19], может происходить как за счет давления ударно-сжатого воздуха, находящегося между свариваемыми пластинами [1], так и в результате действия инерционных сил ударно-волнового происхождения [8, 20]. По нашему мнению, исследование особенностей нарушения геометрии взаимного расположения свариваемых взрывом длинномерных элементов представляет наибольший научный и практический интерес, так как это явление, во-первых, позволяет объяснить помимо «раскачки» волн и увеличения количества оплавок по

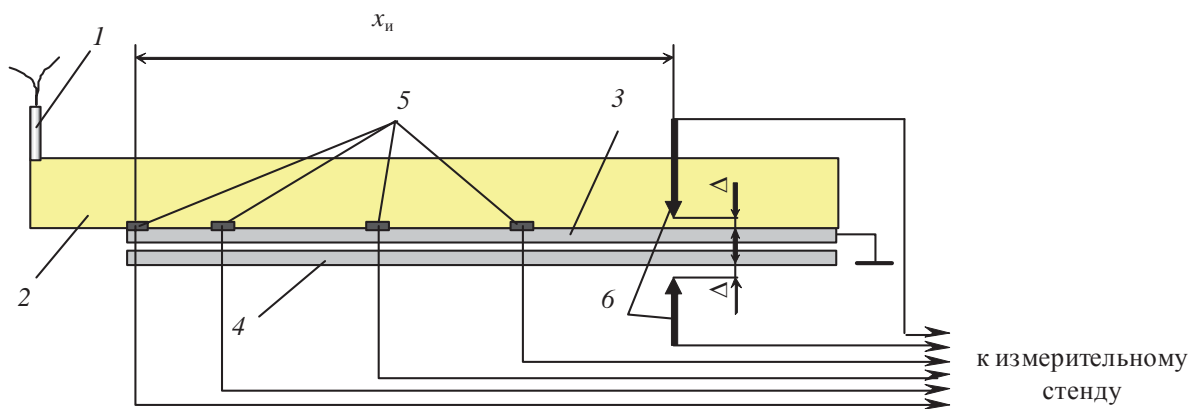


Рис. 3. Схема исследования вертикальных перемещений пластин при сварке взрывом:

1 – электродетонатор; 2 – заряд ВВ; 3 и 4 – соответственно метаемая и неподвижная пластины; 5 – электроконтактные датчики; 6 – контактные датчики перемещения

Таблица 1

Условия взрывного нагружения пластин при экспериментальном исследовании характера нарушения геометрии взаимного расположения длинномерных элементов перед точкой контакта

№ опыта	Материалы свариваемых пластин, <u>метаема</u> я неподвижная	Размеры пластин, <u>метаема</u> я неподвижная	Скорость детонации D	Установочные параметры			Результаты экспериментов		
				Сварочный зазор h	Координата установки датчиков-игл (координата исследуемого сечения) $x_{и}$	Зазор между датчиком-иглой и поверхностью пластины Δ	Расстояние S между сечением и фронтом детонации в момент срабатывания датчика-иглы	Период времени T между замыканием верхнего и нижнего датчиков-игл	
		мм	м/с	мм			мкс		
1	Сталь Ст. 3	$2 \times 800 \times 200$	1510	3	650/750		4	386	—
2			2560		750			91	—
3			2940		750			24	—
4			3730		650/750			0	—
5	Сталь Ст. 3	$2 \times 800 \times 200$	1550	—	650/750		4	454/304	—
6			2560		750			153	—
7			2850		750			97	—
8			3700		650/750			0/0	—
9		$3 \times 800 \times 200$	1530		750		4	348	—
10		$5 \times 800 \times 200$	1520				4	220	—
11		$9 \times 800 \times 200$	1510				4	201	—
12		$6 \times 900 \times 200$	2150		верхний	880	1	26	8
	—		нижний	880	1	8			
13	$9 \times 900 \times 200$	2160	верхний	880	1	21	6		
	—		нижний	880	1	9			
14	$5 \times 900 \times 200$	1490	верхний	450/600/750	2	0/0/0	—		
	—		нижний	450/600/750	2	0/0/0			

длине крупногабаритных пластин их неравномерную деформацию удлинения [10], а, во-вторых, предоставляет возможность наметить новые научно обоснованные пути стабилизации их свойств, что является актуальной задачей, поскольку известные к настоящему времени технологические приемы являются низкотехнологичными и малоэффективными.

Для исследования характера вертикальных перемещений сечений метаемой металлической пластины согласно специально разработанной методике [19, 21] было проведено несколько серий экспериментов, схема и условия которых

представлены соответственно на рис. 3 и в табл. 1.

В качестве взрывчатого вещества использовали смесь аммонита БЖВ с кварцевым песком. Эксперименты проводили как по параллельной схеме сварки взрывом (опыты 1 ... 4), так и при отсутствии неподвижного элемента (опыты 5 ... 11). Целью каждого эксперимента являлось определение расстояния S между фронтом детонации и сечением метаемой пластины, переместившимся вертикально как минимум на расстояние установочного зазора Δ между поверхностью пластины и датчиком пе-

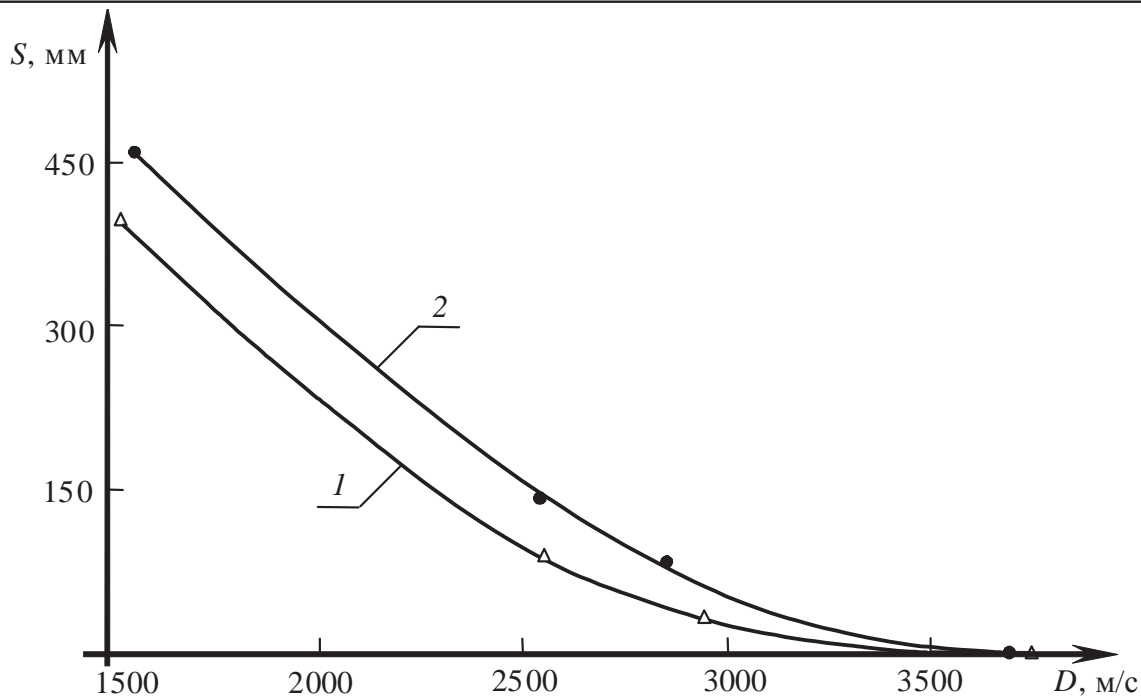


Рис. 4. Зависимость расстояния S между исследуемым сечением μεταемой двухмиллиметровой пластины и фронтом детонации от скорости детонации заряда ВВ в условиях сварки взрывом (1) и при отсутствии неподвижного элемента (2):

расстояние от начала сварки до исследуемого сечения $x_n=750$ мм, минимальная величина вертикального перемещения исследуемого сечения $\Delta=4$ мм

ремещения по формуле

$$S = x_n - x_D, \quad (4)$$

где x_n – координата исследуемого сечения (см. рис. 3), мм; x_D – координата, определяющая положение фронта детонации относительно нача-

ла μεταемой пластины в момент срабатывания контактного датчика перемещения в исследуемом сечении, мм.

В опытах 12 ... 14 неподвижная пластина также отсутствовала, но датчики вертикальных

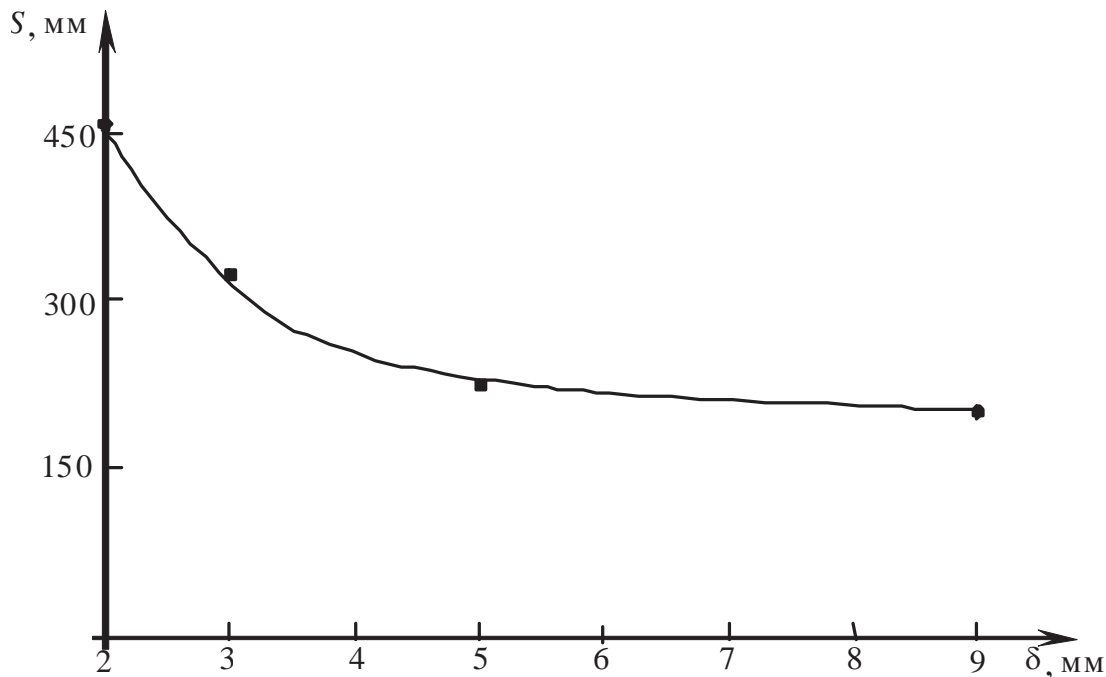


Рис. 5. Графическая зависимость величины S от толщины пластины δ при отсутствии нижней пластины: расстояние от начала сварки до исследуемого сечения $x_n=750$ мм, минимальная величина вертикального перемещения исследуемого сечения $\Delta=4$ мм, скорость детонации заряда ВВ $D=1500 \dots 1550$ м/с

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 5, 9 и 14 устанавливали соответственно две и три линии датчиков на удалениях 450, 600 и 750 мм от начала метаемой пластины. Величину установочного зазора Δ для каждого опыта задавали исходя из результатов предыдущих экспериментов, проведенных на начальном этапе при экспериментальной отработке методики [19, 21]. Аналогичные изменения величины S отмечаются и в серии опытов 5 ... 7 при метании пластины скользящей детонационной волной (рис. 4, кривая 2). При этом следует отметить факт практически одновременного перемещения в вертикальном направлении на величину установочного зазора $\Delta = 4$ мм сечений пластин, удаленных друг от друга на 150 мм (контактные датчики перемещения обеих линий сработали одновременно в опытах 1 и 5 соответственно спустя ~ 202 и ~ 168 мкс от запуска развертки осциллографа, синхронизированной с процессом перемещения по метаемой пластине фронта детонации).

При увеличении толщины метаемой пластины δ (опыты 5, 9 ... 11) при постоянных параметрах (H , $\rho_{ВВ}$) заряда ВВ с относительно низкой скоростью детонации ($D=1500 \dots 1550$ м/с) величина S также снижается (рис. 5) с ~ 450 мм в случае двухмиллиметровой пластины (опыт 5) до ~ 200 мм при толщине пластины $\delta=9$ мм (опыт 11).

Серия опытов 12 ... 14 ставила перед собой задачу оценить в первом приближении период колебания сечений нагружаемой детонацион-

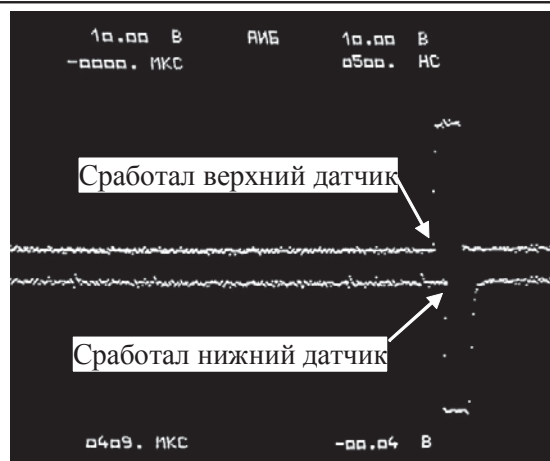


Рис. 6. Осциллограмма, зафиксированная в опыте 12

ной волной пластины при помощи расположенных по обе ее стороны соосно друг другу датчиков. В опытах 12 и 13 разница во времени срабатывания датчиков (период колебания пластины) составила 6 ... 8 мкс (рис. 6).

Увеличение установочного зазора Δ до 2 мм в опыте 14 позволило зарегистрировать только «верхние» вертикальные перемещения сечений пластины перед фронтом детонации. Контактные датчики, находящиеся под метаемой пластиной, срабатывали спустя ~ 15 мкс после прохождения плоскости их размещения фронтом детонации (закорачивание нижнего датчика происходило уже за фронтом детонации в результате изгиба пластины под воздействием продуктов детонации).

Выводы

1. На основе анализа литературных источников и результатов опытов установлено, что нарушение геометрии взаимного расположения свариваемых взрывом элементов перед фронтом детонации и эффект предварительного подгрева соударяющихся поверхностей являются основными причинами, приводящими к изменению свойств соединения по длине свариваемых заготовок, проявляющемуся в увеличении размеров волн и количества оплавленного

металла.

2. Экспериментально определено, что при сварке взрывом сечения нагружаемых пластин совершают «опережающие» фронт детонации вертикальные перемещения на расстояние, сопоставимое со сварочным зазором h ; величина «опережения» S снижается (вплоть до полного отсутствия вертикальных перемещений сечений метаемого листа) при увеличении скорости детонации накладного заряда ВВ и толщины метаемого элемента, а при метании скользящей детонационной волной металлической длинномерной пластины в последней возбуждаются упругие вертикальные колебания с амплитудой порядка 1 ... 1,5 мм.

Библиографический список

1. Кудинов, В. М. Сварка взрывом в металлургии / В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1978. – 165 с.
2. Конон, Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Певухин, А. Д. Чудновский; под ред. Кудинова В.М. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
3. Захаренко, И. Д. Сварка металлов взрывом / Захаренко И. Д. – Минск: Наука і тэхніка, 1990. – 205 с.
4. Ватник, Л. Е. Некоторые особенности образования соединения при сварке взрывом листового биметалла / Л. Е. Ватник, А. Н. Кривенцов, В. С. Седых // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгПИ. – Волгоград, 1974. – Вып. 1. – С. 35-45.
5. Гельман, А. С. Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина. – М.: Машиностроение, 1978. – 191 с.
6. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 544 с.
7. Кузьмин, С. В. Формирование соединений при сварке взрывом крупногабаритных металлических слоистых композитов / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий // Сварочное производство. – 2002. – №5. – С. 48-53.
8. Тарабрин, Г. Т. Влияние упругих волн на характер движения пластины под действием продуктов взрыва / Г. Т. Тарабрин, Ю. П. Трыков // Металловедение и прочность материалов: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград. – 1997. – С. 5-13.
9. Бердыченко, А.А. Закономерности изменения структуры сварного соединения, полученного сваркой взрывом, с увеличением его габаритов на примере титана / А.А. Бердыченко, Л.Б. Первухин // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2000. – С. 102-114.
10. Берсенев, П. В. Закономерности деформирования пластин при сварке взрывом / П. В. Берсенев, Ю. П. Трыков, С. В. Кузьмин и др. // Сварка взрывом и свойства сварных соединений / межвуз. сб. науч. трудов / ВолгПИ. – Волгоград. – 1985. – С. 84-93.
11. Лысак, В. И. Детонационные характеристики смесевых ВВ для сварки на основе аммонит №6ЖВ+наполнитель / В. И. Лысак, В. Г. Шморгун // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. тр. / ВолгПИ. – Волгоград, 1987. – С. 105-114.
12. Физика взрыва / под ред. К. П. Станюковича. Изд. 2-е. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
13. Бердыченко, А. А. Теоретические основы сварки взрывом в среде защитных газов / А. А. Бердыченко, Л. Б. Первухин // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: межвуз. сб. науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград. – 2002. – С. 134-151.
14. 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.
15. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
16. Кузьмин, Г. Е. Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов / Г. Е. Кузьмин, В. В. Пай, И. В. Яковлев. – Новосибирск: изд. СО РАН, 2002. – 312 с.
17. Бешапошников, Ю. П. О роли остаточного давления продуктов детонации при сварке взрывом титана со сталью / Ю. П. Бешапошников // Обработка материалов импульсными нагрузками: тематич. сб. науч. трудов / СО АН СССР. – Новосибирск. – 1990. – С. 275-281.
18. Об измерении поля температуры при плоском установившемся течении металла / С.Н. Ишуткин, Г.Е. Кузьмин, В.В. Пай, Л.Л. Фрумин // Прикладная механика и техническая физика. – 1992. – №2. – С. 157-165.
19. Sil'chenko T.Sh. Infringement of collision geometry during explosive cladding of long-sized plates / T.Sh. Sil'chenko, S.V. Kuz'min, V.I. Lysak, and Yu.G. Dolgii // Shok-Assisted Synthesis and Modification of Materials / Edited by A.A. Deribas and Yu.B. Scheck – Moscow. – 2006. – P. 116-117.
20. Горобцов, А. С. Математическая модель взаимодействия метаемой пластины с импульсной нагрузкой в условиях сварки металлов взрывом / А. С. Горобцов, Т. Ш. Сильченко, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Хаустов // Известия Волгоградского технического университета. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». – 2006. – №9(24). – вып. 2.
21. Методика экспериментального исследования вертикального перемещения длинномерных металлических пластин перед точкой контакта в процессе сварки взрывом / Т.Ш. Сильченко, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак и др. // НПМ-2007: сб. науч. тр. междунар. конф. – Волгоград. – 2007. – С. 204-207.