



ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ПРОЦЕССА ПЛАКИРОВАНИЯ ВЗРЫВОМ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАГОТОВОК

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

На основе анализа выделены наиболее вероятные причины неустойчивости свойств зоны соединения плакированных взрывом крупногабаритных заготовок. Представлены результаты экспериментальных исследований изменения температуры свариваемых поверхностей по мере увеличения длины пластин, а также особенностей нарушения геометрии взаимного расположения свариваемых длинномерных листов перед фронтом детонации.

Ключевые слова: плакирование взрывом, крупногабаритные заготовки, скорость детонации, температура свариваемых поверхностей, метаемая пластина, вертикальное перемещение, фронт детонации, скорость и угол соударения

Сварка металлов взрывом является управляемым технологическим процессом образования соединения в твердой фазе, поскольку, варьируя определенным образом технологические (проектные) параметры, можно изменять тем самым распределенные (параметры кинематической и энергетической подгрупп), воздействуя на деформационный и температурно-временной циклы сварки, которые определяют свойства свариваемых соединений [1]. Обеспечение в пределах всей площади сварки константности величины зазора h между свариваемыми пластинами, а также высоты накладного заряда H теоретически (согласно как одно-, так и двумерной моделям метания [2–4]) должно приводить к постоянству скорости соударения V_c , скорости точки контакта V_k и угла соударения γ , а значит гарантировать стационарность процесса и, как следствие, стабильность свойств зоны соединения сваренного взрывом композита, что, однако, не наблюдается на практике плакирования крупногабаритных заготовок [5–14].

Целью настоящей работы является анализ причин и экспериментальное исследование особенностей нестационарности процесса при плакировании взрывом крупногабаритных заготовок.

Анализ литературных источников позволяет выделить, по крайней мере, три наиболее вероятные причины, приводящие к «раскачке» волнового профиля и возрастанию количества оплавленного металла по длине сваренного биметалла [5–12].

Увеличение параметров волн в концевой части свариваемых заготовок в принципе могло бы быть связано с форсированием параметров высокоскоростного соударения пластин, происходящим

вследствие повышения скорости детонации D взрывчатого вещества (ВВ) по длине заряда. Однако эта гипотеза, высказанная еще в 1974 г. в работе [8], не нашла экспериментального подтверждения.

В частности, в работе [15], где выполнены измерения скорости детонации D зарядов ВВ длиной 4 м методом Дотриша [2] через каждые 200 мм, показано, что абсолютные отклонения от среднего значения D не превышают $\pm 3\%$, что согласно [2] соответствует точности применяемого метода измерения и, следовательно, свидетельствует о высокой стабильности детонационных свойств длинномерных зарядов ВВ.

Более убедительным выглядит предположение, высказанное рядом исследователей [5–7, 13, 16, 17 и др.], согласно которому изменение свойств соединения по длине свариваемых крупногабаритных заготовок является следствием предварительного подогрева соударяющихся поверхностей за счет воздействия высокотемпературного потока частиц ударно-сжатого газа кумулятивного происхождения, движущегося перед точкой контакта.

Если согласно [5] 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 [18]

$$\begin{cases} p_B = \frac{2\rho_0 V_B^2}{k+1}, \\ u_B = \frac{2V_B}{k+1}, \\ T_B = \frac{T_0 p_B (k-1)}{p_0 (k+1)}, \end{cases} \quad (1)$$

где V_B — скорость фронта ударной волны; p_B , T_B — соответственно давление и температура воздуха за фронтом ударной волны; k — показатель



политропы; ρ_0 , T_0 , 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 $2300 \dots 6300$ °С [16] при давлении $5 \dots 20$ МПа, что согласуется с экспериментальными данными [17].

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 [16]

$$t = L \frac{V_B - V_K}{V_B V_K}, \quad (2)$$

где L — расстояние датчика от места начала сварки.

Согласно работе [16] 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 [17] 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 [17]; St , M — соответственно числа Стентона и Маха; T , c_p , ρ — соответственно температура, теплоемкость и плотность газа; u — массовая скорость; χ — 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 [16], 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 околошовной зоне и в итоге на образование соединения.

В работе [7] согласно расчетам мощность теплового потока из газа в металл при $V_K = 4 \dots 4,5$ км/с

достигает примерно $10^3 \dots 10^4$ МДж/(м²·с), что при времени его действия по формуле (2) $t \sim 100$ мкс дает прибавку по энерговыделению в зону соединения (в виде тепла) порядка $0,1 \dots 1$ МДж/м². Подобные энерговыделения становятся соизмеримыми с энергозатратами на пластическую деформацию металла в околошовной зоне, однако локализованы в еще более узкой зоне и способны 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 [3], 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 бароЭДС, вносящей существенную погрешность в эксперимент. Вместе с тем полагая, что значение бароЭДС конкретной термопары для идентичных экспериментальных сборок является постоянным, 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 значению, фиксируемому 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 [3, 19, 20]. Суть экспериментов заключалась в следующем (рис. 1). Длинномерная медная пластина 3, метаемая зарядом ВВ 2, последовательно соударялась с константановыми стержнями 5 и 6, расположенными 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 термоЭДС осуществлялась с помощью цифровых осциллографов С9-8 и GDS-820С. Скорость точки контакта при проведении экспериментов выдерживалась в диапазоне $2100 \dots 2200$ м/с.

В результате обнаружено существенное различие амплитуд электрических сигналов, отражающих максимальную мгновенную термоЭДС + бароЭДС в соединении медь–константан на расстоянии 100 и 550 мм от начала сварки. Типичная осциллограмма, зафиксированная в одном

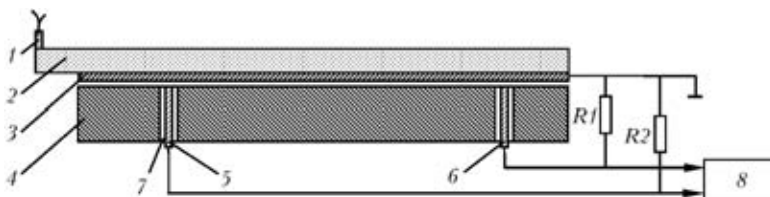


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по исследованию изменения температуры поверхностей свариваемых взрывом металлических пластин в начальном и конечном сечениях пакета: 1 — электродетонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — метаемая медная пластина; 4 — неподвижная пластина; 5, 6 — константановые стержни; 7 — изолятор; 8 — цифровой запоминающий осциллограф

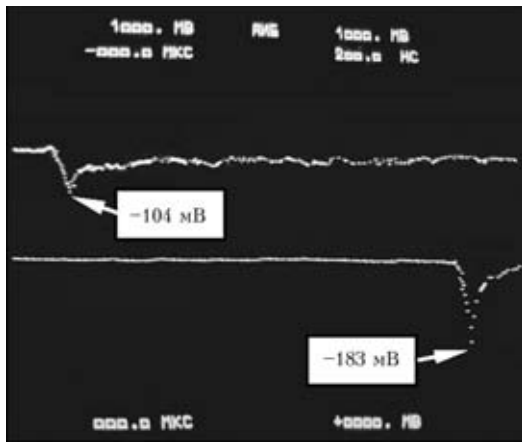


Рис. 2. Осциллограмма температурного режима, зафиксированная в одном из экспериментов: верхняя кривая — датчик, находящийся в начальном сечении свариваемых пластин (100 мм от начала сварки); нижняя кривая — датчик, находящийся в конечном сечении свариваемых пластин (550 мм от начала сварки)

из экспериментов, представлена на рис. 2.

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

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 исходное значение установочного зазора h , вызывая, в свою очередь, отклонения значений угла соударения γ и скорости соударения V_c от расчетных. Такое нарушение геометрии взаимного расположения длинномерных элементов, экспериментально доказанное в работах [7, 9, 21, 22], может происходить как за счет давления ударно-сжатого газа (воздуха), находящегося между свариваемыми пластинами [5], так и в результате действия инерционных сил ударно-волнового происхождения [12, 23]. 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 оплавов по длине крупногабаритных пластин, их неравномерную деформацию удлинения [14], а, во-вторых, наметить новые научно обоснованные пути стабилизации их свойств, что является актуальной задачей, поскольку известные к настоящему вре-

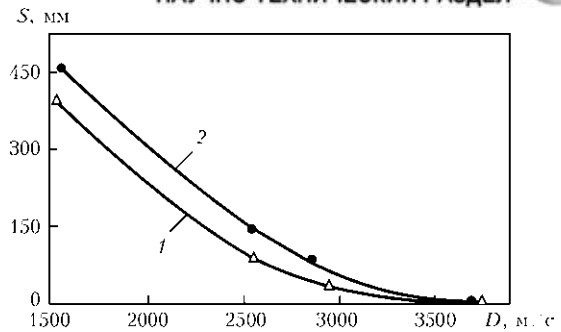


Рис. 3. Зависимость расстояния S между исследуемым сечением метаемой двухмиллиметровой пластины и фронтом детонации от скорости детонации заряда ВВ в условиях сварки взрывом (1) и при отсутствии неподвижного элемента (2); расстояние от начала сварки до исследуемого сечения $x_H = 750$ мм, минимальное значение вертикального перемещения исследуемого сечения $\Delta = 4$ мм

мени технологические приемы являются низко-технологичными и малоэффективными.

Для исследования характера вертикальных перемещений сечений метаемой металлической пластины согласно специально разработанной методике, подробно описанной в [22], проведено несколько серий опытов, условия которых представлены в таблице. В опытах при различных исходных условиях и параметрах взрывного нагружения определяли расстояние S между фронтом детонации в заряде ВВ и сечением метаемой пластины, расположенным перед фронтом и переместившимся вертикально на расстояние не менее Δ (зазор между датчиком-иглой и поверхностью метаемой пластины).

Опыты № 1...6 осуществляли по параллельной схеме сварки взрывом, в опытах № 7...15 с целью исключения влияния ударно-сжатого газа, находящегося между свариваемыми элементами, неподвижная пластина отсутствовала. В опытах № 1...4; 5, 6; 7...10 и 14, 15 скорость детонации варьировали в широком диапазоне (1500...3800 м/с), оставляя при этом постоянной толщину метаемой пластины, тогда как в опытах № 11...13 (а также № 7 и 14), напротив, при постоянных параметрах заряда ВВ ($H, \rho_{ВВ}$), обеспечивающих скорость детонации порядка 1500 м/с, толщина метаемого элемента изменялась от 2 до 9 мм. Кроме того, при проведении опытов № 1, 4...7, 10 и 14 изменяли значение установочного зазора Δ по вертикали между поверхностью метаемой пластины и контактными датчиками перемещения от 2 до 5 мм, а также устанавливали две линии датчиков — на удалениях 600 и 750 мм от начала метаемой пластины.

Из анализа результатов, полученных при проведении опытов № 1...4, следует, что по мере увеличения скорости детонации величина S нелинейно уменьшается (рис. 3, кривая 1) примерно от 420 мм при среднем значении $V_K = 1510$ м/с (опыт № 1), и при скорости детонации $D \sim$



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

№ опыта	Материал свариваемых пластин	Размеры пластин, мм	Скорость детонации D , м/с	Установочные параметры			Расстояние S между сечением и фронтом детонации в момент времени срабатывания датчика-иглы
				Сварочный зазор h , мм	Координата установки датчиков-игл $x_{иг}$, мм	Зазор между датчиком-иглой и поверхностью пластины Δ , мм	
1	Сталь Ст.3	2×200×800 9×200×760	1510	3	600/750	2	236/386
2			2560			4	236/386
3			2860			5	236/386
4			3750			2	7/0
						4	0/0
						5	0/0
5	Сталь Ст.3	2×200×800 9×200×760	1540	3	600/750	2	151/301
						4	151/301
						5	117/297
6			3740			2	0/0
						4	0/0
						5	0/0
7	Сталь Ст.3	2×200×800	1550	—	600/750	2	304/454
8			2550			4	304/454
9			2760			5	304/454
10		3700	2		0/0		
			4		0/0		
			5		0/0		
11		3×200×800	1530		750	4	336
12		5×200×800	1560		750	4	220
13		7×200×800	1520		750	4	209
14		9×200×800	1510		600/750	2	341/201
						4	329//201
15		3800	600/750		5	51/201	
					2	3/2	
					4	2/0	
					5	0/0	

Примечание. В числителе указаны значения для метаемой, а в знаменателе — для неподвижной части.

~ 3750 м/с (опыт № 4) вертикальные перемещения сечений метаемой пластины перед точкой контакта не наблюдаются (время, фиксируемое датчиками перемещения, строго соответствовало моменту прохождения фронта детонации через плоскость их размещения). Аналогичные изменения величины S отмечены при метании двухмиллиметровой пластины (опыты № 7...10) и отсутствии неподвижного элемента (рис. 3, кривая 2), а также при исследовании геометрии взаимного расположения достаточно толстых и массивных пластин в опытах № 5, 6, 14 и 15.

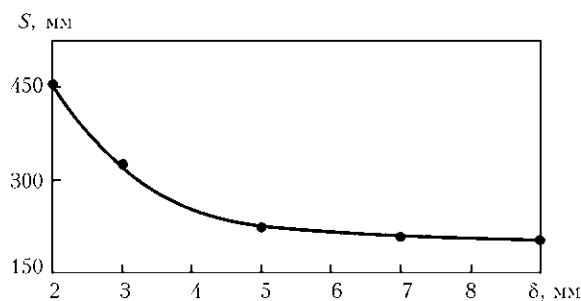


Рис. 4. Зависимость расстояния S между исследуемым сечением пластины от ее толщины δ при отсутствии нижней пластины ($x_{иг} = 750$ мм, $\Delta = 4$ мм, $D = 1500...1550$ м/с)



Увеличение толщины метаемого элемента в опытах № 7, 11...14 при довольно низкой скорости детонации D , составляющей 1510...1550 м/с, способствует уменьшению величины S (рис. 4) примерно с 450 мм в случае метания двухмиллиметровой пластины (опыт № 7) до примерно 200 мм при толщине пластины $\delta = 9$ мм (опыт № 14).

По результатам опытов № 5 и 14, в которых контактные датчики, имеющие различные значения Δ , устанавливались в две линии, также можно сделать однозначный вывод, что нарушение геометрии взаимного расположения длинномерных элементов перед фронтом детонации, при отсутствии нижней пластины и в условиях сварки взрывом происходит неодинаково. Данный вывод следует из анализа диаграмм (рис. 5), построенных на основании результатов опытов № 5 и 14, принципиальным и единственным отличием которых являлось наличие нижней пластины (см. таблицу).

Из диаграммы, построенной по результатам опыта № 14 (рис. 5, а), нетрудно заметить последовательное срабатывание контактных датчиков 1-й и 2-й линий, имеющих зазор 2 и 4 мм. Перемещения же обоих исследуемых сечений на 5 мм происходят синхронно. Таким образом, можно предположить (рис. 6, а), что перемещение первого сечения первоначально имеет локальный характер, а затем ситуация меняется вследствие интенсивного набора скорости правым краем пластины, приводящим к одновременному замыканию всех датчиков 2-й линии и свершению первым сечением перемещения, по крайней мере, 5 мм. Присутствие неподвижной пластины в опыте № 5 приводит к существенному изменению ситуации (рис. 5, б). Первоначально перемещение обоих сечений на 4 мм происходит синхронно и характеризуется интенсивным набором скорости, о чем свидетельствует одновременное срабатывание датчиков, имеющих зазор 2 и 4 мм. Для закорачивания датчика, имеющего зазор $\Delta = 5$ мм (т. е. для дальнейшего перемещения на 1 мм вверх), первому сечению пластины понадобилось дополнительно 22,5 мкс, а второму — всего лишь 2,5 мкс. Следовательно, начальный этап вертикальных перемещений (до 4 мм) характеризуется резким ускорением как первого, так и второго исследуемых сечений, после чего в изменении скоростей последних начинает просматриваться существенное различие (относительно первого сечения второе движется со значительно большей скоростью, о чем свидетельствует разница времени срабатывания контактных датчиков

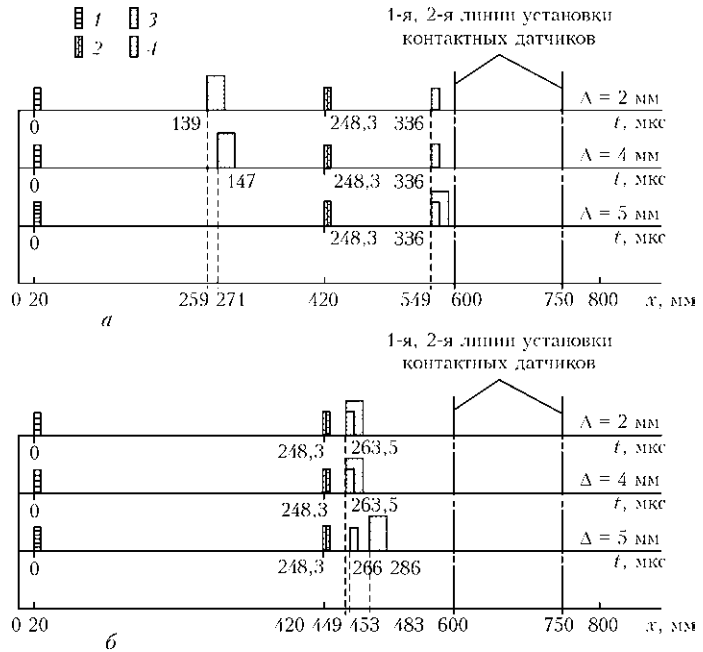


Рис. 5. Диаграммы положения x фронта детонации в моменты совершения исследуемыми сечениями пластины вертикальных перемещений D , построенные по результатам опытов № 14 (а) и 5 (б): 1 — импульсный сигнал, запускающий развертку осциллографов; 2 — импульсный сигнал, фиксирующий прохождение фронтом детонации расстояния 420 мм; 3, 4 — импульсный сигнал, фиксирующий перемещение Δ датчиков соответственно 1-й и 2-й линии

со значением установочного зазора, равным 5 мм). Поэтому можно предположить (рис. 6, б), что в условиях сварки взрывом параллельная схема сварки трансформируется в угловую с некоторым переменным углом α . В этом случае нарушение геометрии взаимного расположения свариваемых элементов имеет нелокальный характер, что

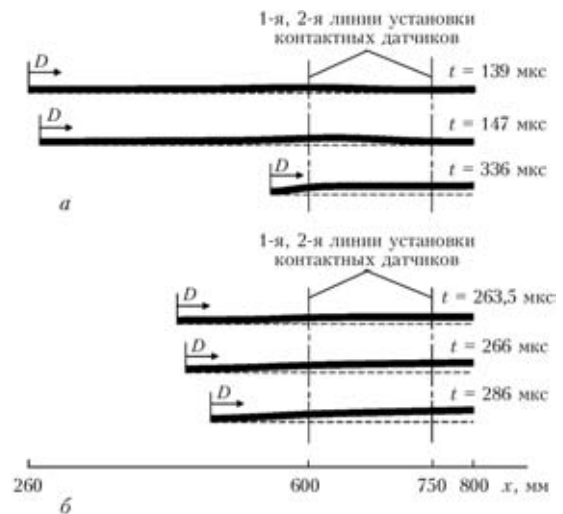


Рис. 6. Гипотетическое представление изменения формы метаемой длинномерной металлической пластины толщиной 9 мм перед фронтом детонации в моменты времени t , соответствующие срабатыванию контактных датчиков, согласно результатам опытов № 14 (а) и 5 (б): штриховая линия — исходное положение внутренней поверхности метаемой длинномерной пластины; заряд ВВ и нижняя пластина, присутствующая в опыте № 5, условно не показаны



объясняет «скученность» импульсов в узком временном интервале (см. рис. 5, б).

Выводы

1. Установлено, что нарушения геометрии взаимного расположения свариваемых взрывом элементов перед фронтом детонации и эффект предварительного подогрева соударяющихся поверхностей являются основными причинами, приводящими к изменению свойств соединения по длине свариваемых заготовок, которые проявляются в увеличении размеров волн и количестве оплавленного металла.

2. Экспериментально определено, что при реализации «опережающих» фронт детонации вертикальных перемещений (в ряде случаев, сопоставимых с величиной сварочного зазора h) величина «опережения» S снижается при увеличении скорости детонации накладного заряда ВВ (вплоть до полного прекращения вертикальных перемещений сечений метаемого листа), а также толщины метаемого элемента.

3. Достоверно установлено, что в металлической пластине, метаемой скользящей детонационной волной (без присутствия нижней пластины), реализуются возмущения, являющиеся результатом действия инерционных сил ударно-волнового происхождения, а в условиях сварки взрывом с расположением длинномерных элементов по параллельной схеме, последняя способна трансформироваться в угловой вариант за счет преобладающего влияния ударно-сжатого воздуха, движущегося в зазоре между листами.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 02.523.12.3012.

1. *Об основных принципах проектирования режимов сварки взрывом металлических слоистых композитов / С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Хаустов, Т. Ш. Сильченко // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. ст. — 2006. — Вып. 2, № 9. — С. 4–17.*
2. *Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. — 2-е изд. — М.: Наука, 1975. — 704 с.*
3. *Кузьмин Г. Е. Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. — 312 с.*
4. *Дерибас А. А., Кузьмин Г. Е. Двумерная задача о метании пластин скользящей детонационной волной // Приклад. механика и техн. физика. — 1970. — № 1. — С. 1977–1981.*
5. *Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. — М.: Металлургия, 1978. — 168 с.*
6. *Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.*

The most probable causes of instability of properties of the joining zone in explosion clad large-size billets have been revealed on the basis of analysis. Results of experimental studies of variations in temperature of the mating surfaces with increase in length of the plates, as well as peculiarities of violation of geometry of the positional relationship of long plates ahead of the detonation front are presented.

7. *Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом. — Минск: Наука і тэхніка, 1990. — 205 с.*
8. *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. тр. ВолгПИ, 1974. — Вып. 1. — С. 35–45.*
9. *Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина. — М.: Машиностроение, 1978. — 191 с.*
10. *Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.*
11. *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.*
12. *Тарабрин Г. Т., Трыков Ю. П. Влияние упругих волн на характер движения пластины под действием продуктов взрыва // Металловед. и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгГТУ. — С. 5–13.*
13. *Бердыченко А. А., Первухин Л. Б. Закономерности изменения структуры сварного соединения, полученного сваркой взрывом, с увеличением его габаритов на примере титана // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. тр. — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. — С. 102–114.*
14. *Закономерности деформирования пластин при сварке взрывом / П. В. Берсенева, Ю. П. Трыков, С. В. Кузьмин и др. // Там же. — 1985. — С. 84–93.*
15. *Лысак В. И., Шморгул В. Г. Детонационные характеристики смесевых ВВ для сварки на основе аммонит №6ЖВ+наполнитель // Там же. — 1987. — С. 105–114.*
16. *Бердыченко А. А., Первухин Л. Б. Теоретические основы сварки взрывом в среде защитных газов // Там же. — 2002. — С. 134–151.*
17. *Ишуткин С. Н., Кирко В. И., Симонов В. А. Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин // Физ. горения и взрыва. — 1980. — № 6. — С. 69–73.*
18. *Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Наука, 1966. — 686 с.*
19. *Бесишапоишников Ю. П. О роли остаточного давления, продуктов детонации при сварке взрывом титана со сталью // Обработка материалов импульсными нагрузками: Темат. сб. науч. тр. СО АН СССР. — Новосибирск, 1990. — С. 275–281.*
20. *Об измерении поля температуры при плоском установившемся течении металла / С. Н. Ишуткин, Г. Е. Кузьмин, В. В. Пай, Л. Л. Фрумин // Приклад. механика и техн. физика. — 1992. — № 2. — С. 157–165.*
21. *Infringement of collision geometry during explosive cladding of long-sized plates / T. Sh. Sil'chenko, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, Yu. G. Dolgii // Shok-assisted synthesis and modification of materials / Ed. A. A. Deribas, Yu. B. Schefek. — Moscow, 2006. — P. 116–117.*
22. *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.*
23. *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. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. ст. — 2006. — Вып. 2, № 9. — С. 93–101.*

Поступила в редакцию 05.08.2009