

УДК 621.791.13

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕЧЕНИЙ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

Б. С. Злобин<sup>1</sup>, В. В. Киселёв<sup>1</sup>, А. А. Штерцер<sup>1,2</sup>, А. В. Пластинин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН 630090 Новосибирск, asterzer@mail.ru

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

С применением эмульсионного взрывчатого вещества получено сваркой взрывом соединение сталей различной твердости через пластичную прокладку. В зоне соединения обнаружены два типа волн — крупные и мелкие, ранее экспериментально не наблюдавшиеся. Предложены эмпирические зависимости для расчета размеров волн, учитывающие влияние на них прочности и плотности соударяющихся материалов. Трещинообразования в зоне соединения можно избежать путем снижения размеров волн.

Ключевые слова: эмульсионные взрывчатые вещества, сварка взрывом, малопластичные материалы, волнообразование.

DOI 10.15372/FGV20180212

### ВВЕДЕНИЕ

Низкоскоростные эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) обладают повышенной детонационной способностью благодаря наличию в их составе высокодисперсной матрицы (эмульсии из смеси аммиачной и натриевой селитры, плотность  $1.41 \pm 0.01$  г/см<sup>3</sup>, размер капель менее  $1 \div 2$  мкм). В качестве физического сенсibilизатора в них используются полые микросферы из стекла (микробаллоны МС-В отечественного производства с истинной плотностью  $0.22 \pm 0.02$  г/см<sup>3</sup>) или из полимера (микробаллоны Exrapcel плотностью  $0.025 \pm 0.003$  г/см<sup>3</sup>). Детонационные свойства ЭмВВ достаточно хорошо изучены [1–5]. При плотности  $0.6 \div 0.9$  г/см<sup>3</sup> они стабильно детонируют в тонких слоях толщиной  $3 \div 7$  мм со скоростью  $2.5 \div 4$  км/с. Эти параметры идеальны для нанесения сваркой взрывом тонких (толщиной менее 1 мм) покрытий на металлические поверхности. Такие низкоплотные ЭмВВ удобны в применении для металлообработки тем, что скорость их детонации почти не зависит от толщины [5]. Составы с большей плотностью —  $0.9 \div 1.2$  г/см<sup>3</sup> — обладают еще мень-

шей критической толщиной (до 1 мм), однако неудобны для сварки взрывом тем, что характеризуются существенной зависимостью скорости детонации от толщины, а при большой толщине слоя ( $5 \div 10$  мм) — еще и слишком большой скоростью детонации (до 5 км/с). Примеры расширения возможностей сварки взрывом с использованием ЭмВВ при решении некоторых практических задач приведены, например, в работах [6–9].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании особенностей зоны соединения металлов, полученной при использовании ЭмВВ. Способность ЭмВВ стабильно детонировать в тонких слоях позволила получить новые экспериментальные данные о волнообразовании при косом соударении металлических пластин в режимах сварки взрывом.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭмВВ

Стабильно детонирующий плоский заряд из широко используемых в сварке взрывом смесей аммонита бЖВ с аммиачной селитрой имеет минимальную толщину (критическая толщина)  $\approx 10$  мм при плотности  $\approx 0.9$  г/см<sup>3</sup>. При необходимости сварить таким зарядом, например, медную ленту толщиной 0.5 мм с какой-либо металлической пластиной отношение массы ВВ к массе метаемой пластины должно

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-03-00883).

© Злобин Б. С., Киселёв В. В., Штерцер А. А., Пластинин А. В., 2018.

быть около двух. При таком значении соотношения масс угол соударения свариваемых пластин, рассчитанный по формулам из [10],  $\gamma \approx 24^\circ$ . В то же время опыт показывает, что для образования соединения на границе, например, пары медь — сталь при скорости точки контакта 2.6 км/с достаточно обеспечить минимальный угол соударения  $\gamma = 8^\circ$ . По этой причине пластины толщиной менее 1 мм, как правило,-metaются с использованием инертных (буферных) прокладок. В этом случае размер зоны сильных пластических деформаций и размер волн определяется не толщиной свариваемой пластины, а толщиной и свойствами всего метаемого пакета в целом. Амплитуда волн при таком способе сварки часто соизмерима с толщиной самой метаемой пластины, поэтому исследовать влияние параметров соударения на размеры волн в этой ситуации достаточно затруднительно. Использование же ЭмВВ дает возможность метать тонкие металлические пластины толщиной от 1 мм и менее (до 0.3 мм) без дополнительных прокладок. В этом случае размеры зоны, охваченной сильными пластическими деформациями, и величина волн, образующихся на границе соединения, зависят при прочих равных условиях только от толщины метаемой пластины.

При сварке малопластичных металлов и сплавов чрезмерное увеличение угла и, соответственно, скорости соударения пластин приводит к усилению деформационных процессов на границе соединения и к появлению трещин, которые, как правило, возникают на гребнях волн [11]. В этой ситуации весьма важно контролировать размеры волн, поскольку, уменьшая их, можно избежать трещинообразования. Кроме кинематических параметров соударе-

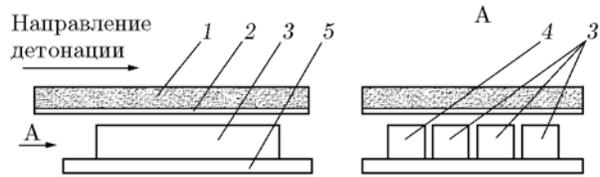


Рис. 1. Сварка медной пластины со стальными образцами различной твердости:

1 — заряд ВВ, 2 — медная пластина, 3 — стальные образцы, 4 — алюминиевый образец, 5 — основание

ния, очевидно, на волнообразование должна влиять и прочность материалов, однако в литературе отсутствуют экспериментальные данные о влиянии. Для изучения влияния прочности сталкивающихся пластин на размеры волн были проведены эксперименты, в которых три стальных образца различной твердости ( $HV = 145, 320, 460$ ) и алюминиевый образец твердостью  $HV = 30$  одновременно плакировались медной пластиной толщиной 1 мм с твердостью  $HV = 60$  по схеме, показанной на рис. 1 [12].

Измеренная скорость детонации составила 2.8 км/с, расчетный угол соударения  $\gamma = 12^\circ$ . После сварки из полученных биметаллических образцов изготавливались микрошлифы и проводились измерения размеров волн на трех участках: 1 — 20 мм от начала, 2 — в середине, 3 — в 10 мм от конца каждого образца. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Характерно, что зона соединения на границе медь — сталь имеет явно выраженный волновой характер, но при тех же параметрах соударения на границе медь — алюминий волны отсутствуют (рис. 2). С увеличением твердости стальных образцов размеры волн, в

Таблица 1

Длина и амплитуда волн в зоне соединения

Твердость стального образца HV	Участок 1		Участок 2		Участок 3		Среднее значение	
	$\lambda$	$2a$	$\lambda$	$2a$	$\lambda$	$2a$	$\lambda$	$2a$
	мм							
460	0.302	0.071	0.283	0.071	0.267	0.071	0.280	0.070
320	0.380	0.114	0.401	0.114	0.362	0.114	0.380	0.110
145	0.457	0.157	0.485	0.157	0.442	0.157	0.460	0.160

Примечание.  $2a$  — расстояние между верхним и нижним пиками волны, соответствующее двойной амплитуде синусоидальной волны  $a$ .

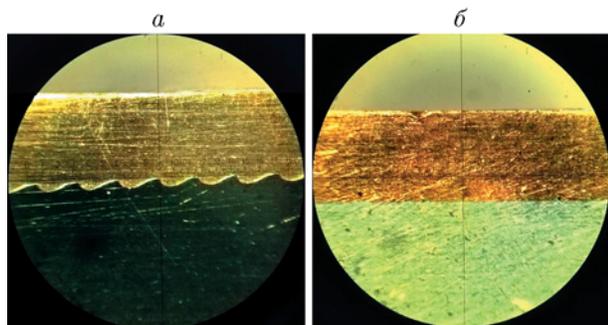


Рис. 2. Макрошлифы зоны соединения медь — сталь с твердостью  $HV = 460$  (а) и медь — алюминий (б)

первую очередь их амплитуда, уменьшаются.

Из табл. 1 видно, что с ростом твердости примерно в три раза длина волны  $\lambda$  изменилась в 1.64 раза, в то время как амплитуда волны  $a$  — в 2.29 раза. При дальнейшем увеличении твердости более прочного из свариваемых материалов форма зоны соединения стремится к безволновой, как это показано в [9] для пары нержавеющая сталь ( $HV = 150$ ) / твердый сплав ( $HV = 1445$ ).

Способность ЭМВВ детонировать в тонких слоях позволила также провести экспериментальное исследование сварки взрывом прочных малопластичных сталей с использованием тонких медных прослоек. Эксперименты проходили в два этапа. На первом этапе образец из стали 30ХГСА толщиной 25 мм с твердостью  $HV = 423 \div 435$  плакировался медной фольгой толщиной 0.3 мм с твердостью  $HV = 60$ . Затем на участке протяженностью 20 мм медь была удалена, после чего на данный биметаллический образец металась пластина из стали 30ХГСА толщиной 4 мм с твердостью  $HV = 311 \div 320$ . Из полученного композиционного образца, схематически изображенного на

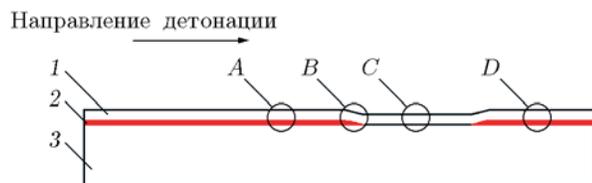


Рис. 3. Композиционный образец, полученный сваркой взрывом:

1, 3 — пластины из закаленной стали, 2 — медная прослойка, А, В, С, D — области исследования зоны соединения

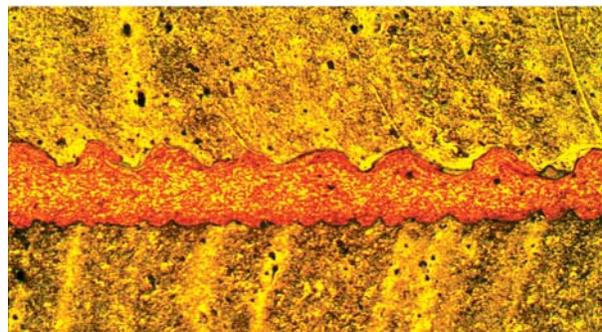


Рис. 4. Зона соединения, полученная при метании стали на биметалл сталь — медь (область А на рис. 3)

рис. 3, изготавливались микрошлифы для изучения особенностей волнообразования на разных участках зоны соединения.

На рис. 4 представлен микрошлиф зоны сварки на участке А (см. рис. 3). Видно, что при сварке медной фольги со стальной основой размер волн определялся толщиной медной фольги 0.3 мм (нижняя граница медь — сталь на рис. 4). При последующем метании стальной пластины на полученный биметалл на размер волн повлияла ее толщина (стальной пластины) 4 мм (верхняя граница сталь — медь на рис. 4). Волны на верхней границе меди в  $2.5 \div 3$  раза больше как по амплитуде  $a$ , так и по длине  $\lambda$ , причем видно, как на гребнях волн зарождаются сдвиговые трещины.

При сварке таких же пластин, но в другой последовательности в картине волнообразования наблюдаются изменения, о чем свидетельствует следующий эксперимент. Вначале стальная пластина толщиной 3 мм с твердостью  $HV = 460$  плакировалась медной фольгой толщиной 0.3 мм. Затем на участке протяженностью 20 мм фольга удалялась и полученным биметаллом плакировалась стальная пластина толщиной 25 мм с твердостью  $HV = 423 \div 435$ . Скорость точки контакта составляла 3.0 км/с, расчетный угол соударения  $\gamma = 10^\circ$ . В результате был получен трехслойный образец сталь — медь — сталь, подобный изготовленному в предыдущем эксперименте (см. рис. 3). Обратим внимание на то, что в двух описанных опытах размеры волн, образовавшихся на втором этапе сварки, существенно различались. На рис. 5,а показана зона соединения в области А, полученная в опыте, когда метаемой является биметаллическая пластина. Видно, что волны здесь более мелкие, чем на

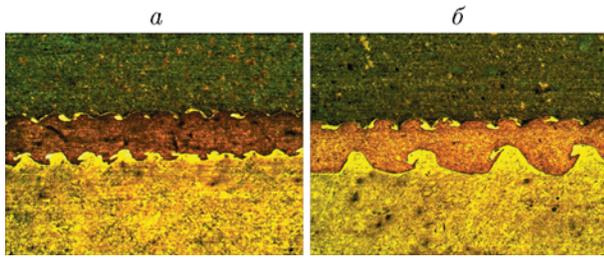


Рис. 5. Зона соединения, полученная при метании биметалла сталь — медь на стальную подложку:

*a* — область *A*, *b* — область *D* на рис. 3

рис. 4. Кроме того, в данном случае не зафиксировано следов образования сдвиговых трещин в стали. Поскольку ранее такой картины волнообразования (мелкие волны) при сварке многослойных композитов не наблюдалось, во избежание ошибок эксперименты были повторены, и результаты нескольких экспериментов совпали. Если в области *A* волны мелкие, то в области *D*, микрошлиф которой показан на рис. 5, *b*, в том же эксперименте образовались крупные волны.

Картина волнообразования в областях *B* и *C*, представленная на рис. 6, показывает, что в том месте, где медная прослойка прерывается с переходом на участок границы сталь — сталь (область *C*), в отличие от данных [13], сразу возникают крупные волны. В отличие от описанных выше мелких волн, их длина  $\lambda$  и амплитуда  $a$  попадают в диапазон значений или даже выше, рассчитанных по классическим формулам из [10]:

$$\lambda/\delta = (16 - 26) \sin^2(\gamma/2), \quad (1)$$

$$0.14 \leq a/\lambda \leq 0.3, \quad (2)$$

где  $\delta$  — толщина метаемой пластины.

Таким образом, проведенные эксперименты указывают на существование двух типов

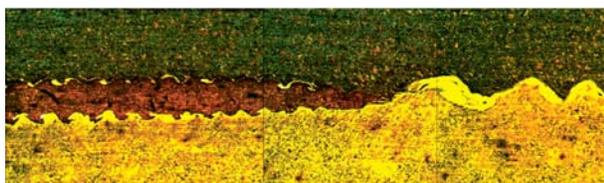


Рис. 6. Волнообразование на границе сварки стальных пластин через медную прослойку (области *B* и *C* на рис. 3; движение точки контакта слева направо)

волн (крупные и мелкие), которые могут возникать в зоне соединения при сварке взрывом. Дополнительный эксперимент по сварке двух стальных пластин был проведен с применением прослойки из алюминия. На первом этапе стальная пластина толщиной 4 мм с твердостью  $HV = 120$  плакировалась алюминием толщиной 1 мм с твердостью  $HV = 30$ . Затем на участке протяженностью 25 мм на расстоянии 70 мм от конца биметалла алюминий был удален шлифованием, и полученная пластина металась на стальную подложку толщиной 20 мм с твердостью  $HV = 120$ . Скорость точки контакта составляла 2.72 км/с, расчетный угол соударения  $\gamma = 11.5^\circ$ . Изучение зоны соединения показало, что на границе алюминий — сталь волны отсутствуют, в то время как на границе сталь — сталь образовались волны с  $\lambda = 0.64$  мм и  $2a = 0.27$  мм.

Данные по параметрам волн, полученные в вышеописанных экспериментах, представлены в табл. 2: толщина метаемой пластины  $\delta$ , скорость точки контакта  $v_k$ , угол соударения  $\gamma$ , плотности метаемой  $\rho_1$  и неподвижной  $\rho_2$  пластин, твердость по Виккерсу метаемой  $HV_1$  и неподвижной  $HV_2$  пластин, длина волны  $\lambda$ , амплитуда волны  $a$ . Сплав твердостью  $HV = 1445$  ( $HRA = 89$ ) — это твердый сплав на основе карбидов вольфрама, титана и тантала МС 221 (ТТ10К8-Б) с содержанием кобальта 8 %. Длина волны, отмеченная звездочкой, означает, что волна мелкая. Знак вопроса указывает на то, что длину волны измерить нельзя, так как на шлифах граница контакта плоская, т. е. амплитуда равна нулю или, во всяком случае, меньше хаотических микронеровностей.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные с применением ЭмВВ новые экспериментальные данные по волнообразованию требуют определенной интерпретации. Феномену волнообразования при сварке взрывом посвящено много работ, и существует более десятка концепций, его объясняющих. Подробный обзор публикаций по данному вопросу представлен в [14]. Однако до настоящего времени нет удовлетворительной теории, позволяющей рассчитать размеры волн с учетом механических и физических характеристик соударяющихся тел. Вместе с тем волны появляются даже в численных расчетах с применением методов молекулярной динамики, хотя толщина соударяющихся пластин не более

Таблица 2

Параметры соударения и размеры волн

Свариваемые материалы	$\delta$ , мм	$v_k$ , км/с	$\gamma$ , град	$\rho_1$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_2$ , г/см <sup>3</sup>	HV <sub>1</sub>	HV <sub>2</sub>	$\lambda$ , мм	$a$ , мм
Cu/Al	1	2.8	12	8.9	2.7	60	30	?	0
Cu/сталь (145)	1	2.8	12	8.9	7.8	60	145	0.46	0.08
Cu/сталь (320)	1	2.8	12	8.9	7.8	60	320	0.38	0.055
Cu/сталь (460)	1	2.8	12	8.9	7.8	60	460	0.28	0.035
Сталь (150) / твердый сплав (1445)	1	2.8	12	7.8	13.7	150	1445	?	0
Сталь (460) / сталь (429)	3	3.0	10	7.8	7.8	460	429	0.56	0.1
Сталь (120) / сталь (120)	4	2.72	11.5	7.8	7.8	120	120	0.644*	0.135
Cu/сталь (429)	3.3	3.0	10	8.9	7.8	60	429	0.24*	0.05
Al/сталь (120)	5	2.72	11.5	2.7	7.8	30	120	?	0

Примечание. В скобках приведена твердость по Виккерсу.

1 000 Å [15]. В настоящей работе не предлагается какой-либо новой теории волнообразования, но делается попытка на основе общих гидродинамических соображений и полученных экспериментальных данных построить эмпирические соотношения для расчета размеров волн.

При описании течений в зоне соударения пластин будем исходить из соображений, аналогичных изложенным в [16], где для объяснения неустойчивости стационарного течения вязкой жидкости привлекается модель Ландау [17]. Считается, что металл при высоких давлениях в окрестности точки контакта и при высоких скоростях деформации ведет себя подобно вязкой несжимаемой жидкости. Появление волн свидетельствует о нестационарности течения в зоне соединения двух материалов, которое характеризуется двумя безразмерными параметрами — числом Рейнольдса  $R = \rho ul/\eta$  и числом Струхала  $Sr = u\tau/l$ , здесь  $\rho$  и  $\eta$  — соответственно плотность и вязкость среды,  $l$  — характерный линейный размер,  $u$  — характерная скорость,  $\tau$  — характерное время рассматриваемой задачи. Согласно [17], если возмущения в виде волн в жидкости возникают самопроизвольно, а не под влиянием внешней периодической силы, то  $Sr$  будет некоей функцией  $R$ , т. е.  $Sr = f(R)$ . Если в качестве  $\tau$  взять период колебаний  $T$ , в качестве  $u$  — скорость точки контакта  $v_k$ , а в качестве характерного линейного размера — толщину  $\delta_j$  кумулятивной струи, возникающей при соударении металлической пластины с толстой подложкой ( $\delta_j =$

$\delta \sin^2(\gamma/2)$  [18]), то получим выражение  $Sr = v_k T / [\delta \sin^2(\gamma/2)]$ . Можно показать, что для возмущений, возникающих в стационарном потоке, движущемся со скоростью  $v_k$ , имеет место соотношение  $v_k T = \lambda$ , означающее, что возмущения переносятся потоком. Тогда для длины волны получаем формулу

$$\lambda/\delta = f(R) \sin^2(\gamma/2). \quad (3)$$

Поскольку в качестве характерного размера взята толщина кумулятивной струи, эта формула подобна известному соотношению (1), но вместо числового коэффициента перед синусом стоит функция числа Рейнольдса. В качестве аналога числа Рейнольдса будем использовать принятое в сварке взрывом выражение [10, 19]

$$R = \frac{(\rho_1 + \rho_2)v_k^2}{2(HV_1 + HV_2)}. \quad (4)$$

Вообще говоря, называть отношение динамического напора к прочности материала числом Рейнольдса неверно, правильнее называть его числом Эйлера, как это сделано в [20]. Когда первые исследователи сварки взрывом, такие как В. Crossland, G. Cowan, A. Holtzman [19, 21], назвали параметр (4) числом Рейнольдса, их логика была основана на том, что в гидродинамике статическая прочность среды равна нулю и число Рейнольдса ( $Re$ ) совпадает с числом Эйлера ( $Eu$ ). Это легко показать следующим образом. Пусть  $\rho$  — плотность среды,  $\eta$  — вязкость,  $\dot{\epsilon}$  — скорость деформации,  $v$  —

характерная скорость,  $l$  — характерный размер задачи. Тогда  $Re = \rho lv / \eta = \rho lv \dot{\epsilon} / (\eta \dot{\epsilon})$ . Далее, так как  $\dot{\epsilon} = v/l$ , получаем  $Re = \rho v^2 / \sigma = Eu$ , где  $\sigma = \eta \dot{\epsilon}$  — сдвиговые напряжения, обусловленные вязкостью. Учитывая это, можно считать, что для самопроизвольных возмущений в жидкости число Струхала является некоторой функцией числа Эйлера. В данной статье мы сохранили исторически сложившееся обозначение (буквой  $R$ ) параметра, вычисляемого по формуле (4) и являющегося по сути числом Эйлера.

Обработка данных табл. 2 позволила получить линейные зависимости  $f(R)$  для крупных и мелких волн (рис. 7). Получены формулы для расчета длины волны:

$$\lambda/\delta = (0.76R + 18.5) \sin^2(\gamma/2) \quad (5)$$

для крупных волн,

$$\lambda/\delta = (0.73R - 1.70) \sin^2(\gamma/2) \quad (6)$$

для мелких волн.

Что касается амплитуды волн, то, помимо числа Эйлера, эксперименты указывают на сильное влияние на нее соотношения плотностей свариваемых металлов. Причем при сильном различии плотностей независимо от прочности материалов наблюдается сварка без волн, т. е. амплитуда стремится к нулю. Этот факт можно качественно объяснить следующим образом. Поскольку волнообразование связано с взаимопроникновением материалов, то со снижением плотности одного из них

уменьшается его динамический напор, связанный с возмущением скорости в перпендикулярном границе соединения направлении. Соответственно снижается и его возможность внедрения в более плотный материал.

В результате перебора различных зависимостей  $a/\lambda$  от параметров  $\rho_1, \rho_2, R$  с целью максимального соответствия экспериментальным данным было выбрано соотношение вида  $a/\lambda = (\rho_{\min}/\rho_{\max})^n g(R)$ . Минимальное и максимальное значения плотности выбираются из двух плотностей  $\rho_1, \rho_2$ . Требуется определить функцию  $g(R)$  и число  $n$ . Обработка данных по амплитудам волн позволила выбрать  $n = 2.6$  и функцию  $g(R)$  в линейном виде  $g(R) = 0.0029R + 0.1495$  (рис. 8).

Таким образом, получена формула для вычисления амплитуды волны

$$a/\lambda = (\rho_{\min}/\rho_{\max})^{2.6} (0.0029R + 0.1495). \quad (7)$$

Достоверность аппроксимации для подобранных функций  $f(R)$  и  $g(R)$  составляет соответственно 92 и 93 %. На рис. 8 квадратом отмечена точка, соответствующая волнам в зоне соединения меди со сталью, полученным в эксперименте с метанием стальной пластины, плакированной слоем меди толщиной 0.3 мм, на сталь (вторая строка снизу в табл. 2). Причина выпадения данной точки из общей зависимости для  $a/\lambda$  пока непонятна, но она может быть связана с вероятной тенденцией к переходу мелкой волны в крупную.

Надо сказать, что возможное существование двух типов волн отмечалось еще в [10], но в экспериментах они ранее не наблюдались.

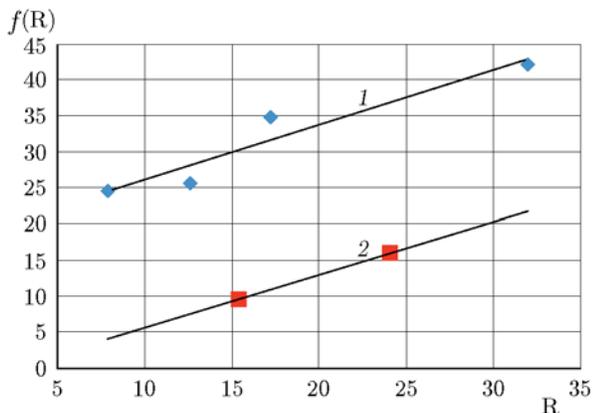


Рис. 7. Линейные функции  $f(R)$  для крупных (1) и мелких (2) волн: ромбы и квадраты — экспериментальные данные

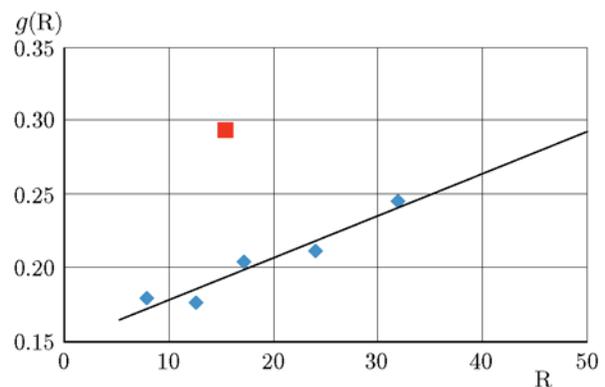


Рис. 8. Линейная функция  $g(R)$ , построенная по экспериментальным данным (ромбы и квадрат)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Эмульсионные взрывчатые вещества с полыми микросферами дают возможность получения новой экспериментальной информации о течениях, возникающих при косом соударении металлических пластин.

2. Обнаружено существование двух типов волн — мелких и крупных, образующихся в сварных соединениях с промежуточными слоями.

3. Построены эмпирические формулы для расчета размеров волн, учитывающие влияние на них прочности и плотности соударяющихся материалов.

4. Применение эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами дает возможность получать сваркой взрывом соединения малопластичных материалов через тонкую прослойку из пластичного металла. При этом можно избежать трещинообразования за счет контролируемого уменьшения размеров волн в зоне соединения. Для этого следует тонкой прослойкой предварительно плакировать металлическую пластину, которая затем сваривается с неподвижной пластиной из малопластичного металла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Юношев А. С. Нагружение эмульсии ударом высокоскоростной пластины // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 114–118.
2. Сатонкина Н. П., Прууэл Э. Р., Ершов А. П., Сильвестров В. В., Карпов Д. И., Пластинин А. В. Эволюция электропроводности эмульсионных взрывчатых веществ при их детонационном превращении // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 3. — С. 91–97.
3. Юношев А. С., Пластинин А. В., Сильвестров В. В. Исследование влияния плотности эмульсионного взрывчатого вещества на ширину зоны реакции // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 3. — С. 79–88.
4. Сильвестров В. В., Бордзиловский С. А., Караханов С. М., Пластинин А. В. Температура детонационного фронта эмульсионного взрывчатого вещества // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 135–142.
5. Сильвестров В. В., Пластинин А. В. Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 49, № 5. — С. 124–133.
6. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Рафайчик С. И. Применение эмульсионных ВВ для сварки взрывом // Автоматическая сварка. — 2009. — № 11. — С. 69–73.
7. Злобин Б. С., Сильвестров В. В., Штерцер А. А., Пластинин А. В. Особенности образования соединения при сварке взрывом сплава АО20-1 со сталью // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — 2012. — Вып. 5, № 14. — С. 51–56.
8. Злобин Б. С., Сильвестров В. В., Штерцер А. А., Пластинин А. В. Совершенствование технологии изготовления сталеалюминиевых вкладышей подшипников // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. — 2012. — Вып. 5, № 14. — С. 57–63.
9. Zlobin B., Sil'vestrov V., Shtertser A., Plastinin A., Kiselev V. Enhancement of explosive welding possibilities by the use of emulsion explosive // Arch. Metallurgy Mater. — 2014. — V. 59, iss. 4. — P. 1587–1592.
10. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — 2-е изд., доп. и перераб. — Новосибирск: Наука, 1980.
11. Захаренко И. Д., Злобин Б. С. Влияние твердости свариваемых материалов на положение нижней границы сварки взрывом // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 5. — С. 170–174.
12. Zlobin B., Shtertser A., Kiselev V., Plastinin A. Bonding and formation at the explosive welding of low-plastic materials // 13 Intern. Symp. on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovations. Coimbra, Portugal, 2016. — P. 219–221.
13. Михайлов А. Н., Дремин А. Н. Времена развития волнообразования при сварке взрывом // Тр. II совещания по обработке материалов взрывом. — Новосибирск: ИГиЛ СО АН, 1982. — С. 67–69.
14. Яковлев И. В., Пай В. В. Сварка металлов взрывом. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.
15. Киселев С. П., Мали В. И. Численное и экспериментальное моделирование образования струи при высокоскоростном косом соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 100–112.
16. Пай В. В., Лукъянов Я. Л., Кузьмин Г. Е., Яковлев И. В. Волнообразование при высокоскоростном симметричном соударении металлических пластин // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 5. — С. 132–137.
17. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие. В 10 т. Т. VI: Гидродинамика. — 4-е изд., стер. — М.: Наука, 1988.
18. Бердыченко А. А., Злобин Б. С., Первухин Л. Б., Штерцер А. А. О возможном возгорании выбрасываемых в зазор частиц при сварке титана взрывом // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39, № 2. — С. 128–136.

19. **Crossland В.** Explosive Welding of Metals and its Application. — Oxford: Clarendon Press, 1982.
20. **Киселев С. П.** Численное моделирование методом молекулярной динамики образования волн при косом соударении пластин // ПМТФ. — 2013. — Т. 53, № 6. — С. 121–133.
21. **Cowan G. R., Holtzman A. H.** Flow configuration in colliding plates // J. Appl. Phys. — 1963. — V. 34. — P. 928–939.

*Поступила в редакцию 3/V 2017 г.,  
в окончательном варианте — 27/VI 2017 г.*

---