

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВАТЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

В. В. СИЛЬВЕСТРОВ, А. В. ПЛАСТИНИН, кандидаты физ.-мат. наук, С. И. РАФЕЙЧИК, инж.  
(Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск, РФ)

Приведены характеристики низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ со скоростью детонации 2...3 км/с. Рассмотрено их применение для взрывного плакирования металлических пластин фольгами (от алюминия до молибдена) толщиной 100...300 мкм без амортизирующего слоя между ними и метаемой фольгой и для сварки взрывом трубки диаметром 11 мм из нержавеющей стали со стальной втулкой в параллельной схеме сварки.

*Ключевые слова:* эмульсионные взрывчатые вещества, сварка взрывом, тонкие фольги, трубные доски

Для решения задач по обработке материалов взрывом (сварка, штамповка, прессование и пр.) интерес представляют эмульсионные взрывчатые вещества (ЭмВВ) [1]. В составе этих композиций нет мощных индивидуальных ВВ, и единственный потенциально взрывчатый компонент — аммиачная селитра. ЭмВВ отличаются более низкой стоимостью по сравнению с тротилом, тэном или гексогеном, крайне низкой чувствительностью к механическим и тепловым воздействиям наряду с хорошей восприимчивостью к детонации, низкой газовой вредностью и высокой водостойкостью [2]. Изготовление ЭмВВ возможно на месте проведения взрывных работ, что значительно упрощает транспортировку их невзрывоопасных компонент.

О возможности детонации ЭмВВ в слоях толщиной до 0,5 мм (критический диаметр  $d_{cr} < 6$  мм) сообщалось в работе [3]. Позднее было показано, что промышленные ЭмВВ, содержащие включения алюминия, имеют критическую толщину  $\Delta_{cr} = 3,3$  мм и скорость детонации  $D_{cr} \approx 3$  км/с [4]. В работе [5] разработаны ЭмВВ, детонирующие в слое толщиной до  $\Delta_{cr} \approx 2$  мм ( $D_{cr} \approx 2,7$  км/с), но скорость детонации композиции быстро увеличивалась с толщиной слоя ВВ: уже при  $\Delta > 5$  мм она превышала 4 км/с.

В результате применения ультрадисперсной эмульсии с размером капель окислителя не более 1...2 мкм и введения в состав ЭмВВ большого количества сенсibiliзирующих включений низкой плотности (физический сенсibiliзатор — микробаллоны из стекла) предельная скорость детонации ЭмВВ уменьшается до 2...3 км/с при сохранении высокой детонационной способности [6]. При количестве сенсibiliзатора более 20 мас. % сверх массы эмульсии зависимость скорости детонации  $D$  от поперечного размера заряда ЭмВВ

практически отсутствует при толщине плоского заряда  $\Delta \geq 10$  мм.

Цель настоящей работы — рассмотреть возможности низкоскоростных ЭмВВ на примере двух классических задач сварки взрывом: плакирования металлов тонкими металлическими фольгами толщиной до 0,1 мм и соединения тонкостенной металлической трубки малого диаметра с трубной втулкой в режиме сварки взрывом.

**Параметры ЭмВВ.** Использованы ЭмВВ, приготовленные в лабораторных условиях. Эмульсии имели следующий состав (мас. %): 68 аммиачной селитры; 11 натриевой селитры; 15 воды; 2 твердого парафина; 2 эмульгатора сорбитана моноолеата; 2 масла индустриального (в составе эмульгатора). Кислородный баланс эмульсии близок к нулю, плотность  $\rho_e = 1,41$  г/см<sup>3</sup>. Размер капель окислителя — не более 1...2 мкм. Для получения ЭмВВ в эмульсию вводили полые стеклянные микросферы типа МС-В (производство ОАО «Терм», Московская область) в количестве  $\mu = m_{mb}/m_{em}$  (мас. %) микробаллонов  $m_{mb}$  сверх массы эмульсии  $m_{em}$ . Средний размер микробаллонов около 60 мкм, насыпная плотность  $\rho_{mb} = 0,14...0,15$  г/см<sup>3</sup>. При большом количестве включений ЭмВВ формируются вручную, но обладают удовлетворительной пластичностью.

При увеличении доли микробаллонов от 5 до 50 % плотность ЭмВВ  $\rho_0$  уменьшается от 1,08 до 0,52 г/см<sup>3</sup>. Зависимость плотности композиции  $\rho_0$  от параметра  $\mu$  определяется соотношением  $\rho_0 = \rho_e(1 + \mu)/(1 + \mu\rho_e/\rho_{mb}^*)$ , где  $\rho_{mb}^* = 0,23 \pm 0,01$  г/см<sup>3</sup> — «истинная» плотность микробаллонов. Одна часть объема ЭмВВ, равная  $v_{mb}$ , заполнена инертным веществом, полыми микросферами, другая —  $v_{em} = 1 - v_{mb} = 1/(1 + \mu\rho_e/\rho_{mb}^*)$  — эмульсионной матрицей, которая собственно и способна взрываться. При  $\mu = 50...60$  % объемная часть эмульсии уменьшается до 30...25 %, скорость детонации понижается до 2 км/с и менее.

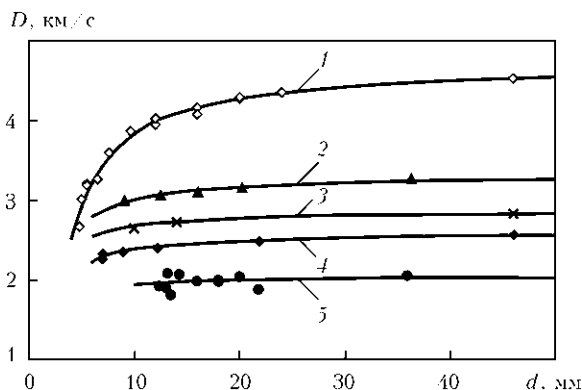


Рис. 1. Зависимость скорости детонации от поперечного размера заряда для ЭМВВ: 1 —  $\mu = 8$ ; 2 — 20; 3 — 25; 4 — 35; 5 — 50 %

В диапазоне плотностей  $0,5...1,1 \text{ г/см}^3$  скорость детонации цилиндрического заряда диаметром 20 мм уменьшается с плотностью линейно:  $D = 4,68\rho_0 - 0,46$ . При  $\mu > 20$  % скорость детонации менее  $3 \text{ км/с}$ , плотность подобных композиций от  $0,75$  до  $0,51 \text{ г/см}^3$ . Зависимость скорости детонации от массовой доли включений описывается степенной зависимостью  $D = D_e(1 + \mu\rho_e/\rho_{mb}^*)^{-\alpha}$  при  $\alpha = 0,76$ ,  $D_e = 5,74 \text{ км/с}$ .

На рис. 1 приведены результаты измерения скорости детонации (в «сварочной области» скоростей) для ЭМВВ при различных  $\mu$  в зависимости от поперечного размера, диаметра цилиндрического заряда или толщины плоского слоя. Заряды были заключены в тонкостенные трубки или плоские коробочки из пластика. При увеличении концентрации полых микросфер МС-В до 20...25 % и более наблюдается слабая зависимость скорости детонации ЭМВВ от поперечного размера заряда. Однако критические параметры детонации — диаметр цилиндрического  $d_{cr}$  и толщина плоского заряда  $\Delta_{cr}$  — увеличиваются при росте доли включений (табл. 1). По  $D(d)$  с помощью уравнения Эйринга [7] оценивали предельную скорость детонации  $D_{max}$  и разницу  $\Delta D = D_{max} - D_{cr}$ .

При  $\mu = 25...50$  % скорость детонации ЭМВВ ниже  $3 \text{ км/с}$  при допустимой толщине плоского слоя от 3 до 12 мм. Этот диапазон скоростей пригоден для сварки взрывом большинства металлов в параллельной схеме. При  $\mu = 8$  % ЭМВВ имеет наименьшую допустимую толщину до 2 мм для плоского заряда, и скорость детонации менее  $3 \text{ км/с}$  при  $\Delta \leq 3$  мм.

Детонационное давление для низкоплотных ЭМВВ при  $D \leq 3 \text{ км/с}$  невелико: оценка по формуле  $P_D \sim \rho_0 D^2 / (n + 1)$  и показателе политропы продуктов взрыва  $n \approx 2,4$  дает  $0,6...2 \text{ ГПа}$ , что достаточно для взрывного ускорения тонких металлических пластин и оболочек до скоростей более  $100 \text{ м/с}$ , необходимых в ряде приложений. Приведем результаты, иллюстрирующие приме-

Таблица 1. Параметры ЭМВВ

$\mu$ , %	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$d_{cr}$ , мм	$\Delta_{cr}$ , мм	$D_{cr}$ , км/с	$D_{max}$ , км/с	$\Delta D$ , км/с
8	1,0	5	1,8...2	2,7	4,7	2,0
20	0,75	6...7*	3*	2,6*	3,3	0,7
35	0,62	7...8	3,5	2,3	2,6	0,3
50	0,51	11...12	11...12	1,9	2,1	0,2

\* Оценка по зависимости критических параметров детонации от параметра  $\mu$ .

нение низкоскоростных ЭМВВ для плакирования металлов фольгами без буферного слоя — ослабителя и сварки тонкостенных трубок малого диаметра с трубными досками в параллельной схеме сварки взрывом.

**Плакирование металлов тонкими фольгами.** В ряде приложений на поверхность металла необходимо наносить тонкие функциональные покрытия: теплозащитные, химически стойкие, антикоррозионные и пр. Если для решения подобных задач использовать способ сварки взрывом, то придется применять или буферный слой (ослабитель между фольгой и ВВ для уменьшения угла поворота и скорости метаемой фольги) или схему сварки взрывом под углом для уменьшения скорости точки контакта  $V_c$ . Это связано с большой минимально допустимой толщиной слоя ВВ (на основе аммонитов) или с высокой скоростью детонации индивидуальных ВВ. Для рассматриваемых низкоскоростных ЭМВВ необходимость в буферном слое практически отсутствует.

Ниже приведены некоторые результаты по сварке фольг толщиной  $\delta = 0,1...0,3$  мм со стальным (или медным) основанием в параллельной схеме сварки с использованием низкоскоростных ЭМВВ. Размеры основания из стали или меди следующие: толщина —  $4...10$  мм, длина —  $300$  мм, ширина —  $60$  мм. Материал металлических фольг — алюминий, титан, нержавеющая сталь, бронза, медь и молибден, плотностью от  $2,8$  до  $9,0 \text{ г/см}^3$  (табл. 2).

ВВ находилось между метаемой фольгой и  $0,5$ -миллиметровым слоем пластика ПЭТ, прикрывающим коробочку с ЭМВВ. Массовое отношение  $r = \tilde{m}_{ВВ} / \tilde{m}_{мет}$  изменялось почти на порядок: от  $0,67$  до  $6,3$ , где  $\tilde{m}_{ВВ}$  — масса ЭМВВ на единицу площади,  $\tilde{m}_{мет}$  — масса металла на единицу площади. Между фольгой и мишенью устанавливали воздушный зазор, равный примерно толщине метаемой фольги.

Ввиду относительно высокой скорости детонации  $2,7...3 \text{ км/с}$  при  $10$  % в плоской постановке наблюдались развитые волновые швы. При плакировании стали фольгой из титана толщиной  $100 \text{ мкм}$  между ЭМВВ и фольгой помещали плен-

Таблица 2. Параметры опытов по сварке взрывом с использованием ЭМВВ

Свариваемая пара	$\rho_{\text{ф}}, \text{ г/см}^3$	$\delta, \text{ мм}$	$\mu, \%$	$\Delta_{\text{ЭМВВ}}, \text{ мм}$	$r$	Результат
<i>Плоская схема</i>						
Алюминий/медь	2,8	0,2	10	2,5	4,2	Волновой шов
Алюминий/медь	2,8	0,2	35	5,5	6,2	» »
Титан/нержавеющая сталь	4,5	0,1	10	3	6,3	» »
Нержавеющая сталь/медь	7,8	0,2	10	2,4	1,5	» »
Бронза/сталь	8,4	0,3	10	3,4	1,3	» »
Медь/сталь	8,9	0,2	10	2,7	1,4	» »
Молибден/сталь	9,0	0,2	10	2,8	1,2	» »
Медь/сталь	8,9	1	50	12	0,67	» »
<i>Цилиндрическая схема</i>						
Нержавеющая сталь/сталь	7,8	750	50	$\varnothing 10 \dots 42$	0,21	Распрессовка
			35		0,27	» »
			20		0,32	Волновой шов

ку из фторопласта толщиной 160 мкм. Во всех случаях была реализована сварка взрывом без видимых нарушений целостности и отслоений фольги по всей поверхности плакируемой пластины. Микроструктуры металла в сечении некоторых соединений, полученные на электронном сканирующем микроскопе, приведены на рис. 2. Специальные измерения прочности соединений не выполняли, но при попытках оторвать фольгу от основания она рвалась по телу фольги, а не по сварному шву. При  $\delta \leq 300$  мкм масса ЭМВВ на единицу площади составляла 0,2...0,4 г/см<sup>2</sup>.

Метательные свойства ЭМВВ пока не исследовались, поэтому оценим параметры соударения метаемой пластинки с основанием по геометрическим характеристикам образующихся волн. При плакировании стали медной фольгой толщиной 200 мкм амплитуда волн составляла  $a \approx 25 \dots 30$  мкм, длина волны  $\lambda \approx 145$  мкм, скорость точки контакта  $V_c = D \approx 2,7 \dots 3$  км/с. При плакировании стали пластинкой из меди толщиной 1 мм —  $a \approx 25 \dots 30$  мкм,  $\lambda \approx 170$  мкм,  $V_c = D \approx 2$  км/с. Из формулы  $\lambda/\delta = 26 \sin^2 \frac{\gamma}{2}$ , связывающей относительную длину волны и угол соударения  $\gamma$  при несимметричном соударении [8], оценим угол соударения метаемой пластинки с основанием. В первом случае  $\gamma \approx 19^\circ$  при  $r \approx 1,4$ , во втором — существенно меньше  $\gamma \approx 9^\circ$  при  $r \approx 0,67$ . С учетом малости угла поворота скорость метания пластинки  $v_p \approx 2D \sin(\gamma/2) \approx 990$  м/с для 200-миллиметровой фольги и  $v_p \approx 314$  м/с для 1-миллиметровой медной пластинки. В обоих случаях для пары медь/сталь параметры соударения попадают в «окно сварки» на плоскости ( $V_c, \gamma$ ), вблизи верхней и нижней границ области сварки взрывом [8, 9].

Таким образом, низкоскоростные ЭМВВ можно использовать при взрывном плакировании металла тонкими фольгами/пластинками из различных металлов. Интерес к подобным работам наблюдается особенно в тех случаях, когда необходимо минимизировать количество используемого ВВ [10, 11].

**Сварка трубки с моделью трубной доски.** В цилиндрической геометрии реализована сварка металлической трубки со втулкой из углеродистой стали по параллельной схеме сварки взрывом труб с трубной доской, предложенной в [12]. Внутренний диаметр трубки из нержавеющей стали составлял 11 мм, толщина стенки — 0,75 мм. Искусственный зазор между трубкой и втулкой был равен толщине стенки трубки. Использовали цилиндрический патрон из ЭМВВ, заглубленный в трубку на длину  $l = 15 \dots 20$  мм. Патрон инициировали с помощью стандартного детонирующего шнура ДШВ диаметром 5 мм, введенного в ЭМВВ на глубину примерно 10 мм. В двух первых опытах использовали ЭМВВ при  $\mu = 35\%$  ( $r = 0,21$ ) и  $25\%$  ( $r = 0,27$ ). Получена качественная распрессовка трубки, но сварки взрывом не было (рис. 3, а).

При использовании более мощной композиции при  $\mu = 20\%$  (плотность ЭМВВ — 0,75 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации 3 км/с; коэффициент нагрузки  $r = 0,32$ ) режим сварки взрывом был реализован (рис. 3, б). На начальном участке длиной около 3 мм наблюдается развитие волнообразования. Далее на длине  $l$  реализуется волновой шов ( $\lambda \approx 50 \dots 100$  мкм,  $a/\lambda \approx 0,2 \dots 0,3$ ), обеспечивающий прочное герметичное соединение трубки с втулкой (рис. 3, в). В конце заряда ЭМВВ волнообразование прекращается. Масса ЭМВВ в одном патроне — не более 1,5 г (определяется необходимой длиной сварного шва).

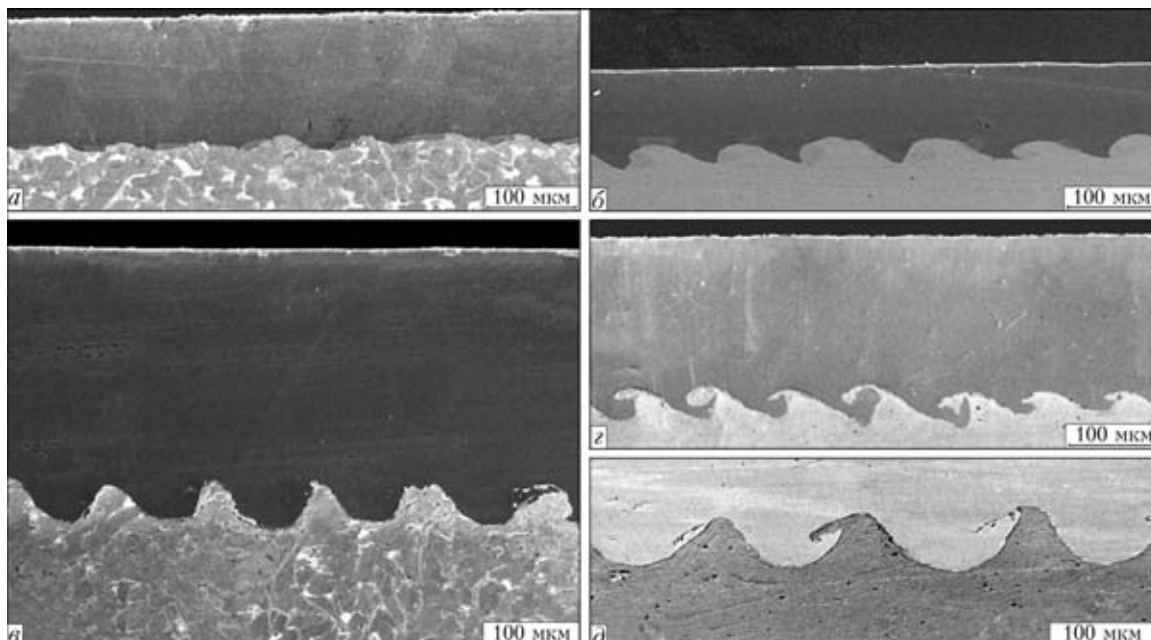


Рис. 2. Микроструктуры металла, полученные при плакировании металлическими фольгами с помощью ЭМВВ: а — алюминий 200 мкм/медь; б — титан 100 мкм/нержавеющая сталь; в — бронза 300 мкм/сталь; г — молибден 0,2 мм/сталь; д — медь 1 мм/сталь

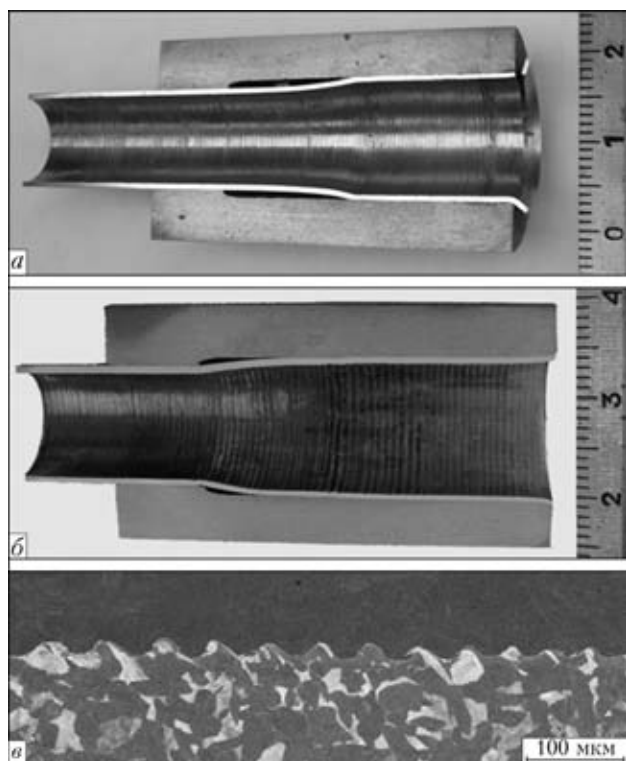


Рис. 3. Соединение взрывом трубки со стальной втулкой: а — распрессовка; б — сварка, разрез втулки после взрыва; в — микроструктура металла зоны соединения в режиме сварки

Этот пример показывает, что низкоскоростные ЭМВВ могут быть полезными и во взрывной технологии сварки тонкостенных трубок малого диаметра с трубными досками [11]. В данном случае не требуется дополнительная термическая проварка по торцу трубки для обеспечения герметичности соединения труба/втулка.

**Заключение.** Разработаны оригинальные составы ЭМВВ со скоростью детонации 2...3 км/с. Композиции отличаются слабой зависимостью скорости детонации от диаметра цилиндрического или толщины плоского заряда ВВ. Особенности этих ВВ являются использование ультрадисперсной эмульсии и большое количество в их составе полых микросфер из стекла.

Детонационные характеристики низкоскоростных ЭМВВ позволяют использовать их в приложениях, где целесообразно использовать взрыв, но необходимо минимизировать взрывную нагрузку на обрабатываемые материалы. Приведены примеры применения низкоскоростных ЭМВВ при сварке взрывом для плакирования металлов фольгами толщиной до 0,1 мм (без амортизирующего слоя — ослабителя ударной волны) и для сварки труб диаметром 10 мм с трубной втулкой в волновом режиме.

Консистенция ЭМВВ изменяется от мягкого пастообразного состояния при  $\mu \leq 20\%$  до состояния, напоминающего слегка подсохшую оконную замазку, при большем количестве микросфер. Формирование зарядов необходимого профиля пока возможно только вручную, что ограничивает применение этих ВВ для обработки материалов взрывом мелкомасштабными изделиями.

*Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 12.10, гранта РФФИ № 09-08-00164-а и частичной поддержке гранта Президента РФ № НШ-1886.2008.1.*

1. Pat. 4844321 US. Method for explosive cladding / T. Matsuzawa, T. Murakado, H. Aimoto et al. — Publ. 04.07.1989.



2. *Wang Xuguang*. Emulsion explosives. — Beijing: Metallurgical Industry press, 1994. — 396 p.
3. *Yoshida M., Iida M. et al.* Detonation behavior of emulsion explosives containing glass microballoons // Proc. 8th Symp. Intern. on detonation. — 1985. — P. 171–177.
4. *Minimum* propagation diameter and thickness of high explosives / O. E. Petel, D. Mack, A. J. Higgins et al. // J. Loss Prevention in the Proc. Industries. — 2007. — **20**, № 4. — P. 578–583.
5. *Критические диаметр и толщина эмульсионного взрывчатого вещества* / В. В. Сильвестров, А. В. Пластинин, С. М. Караханов, В. В. Зыков // Физ. горения и взрыва. — 2008. — **44**, № 3. — С. 121–127.
6. *Сильвестров В. В., Пластинин А. В.* Исследование низкоскоростных ЭМВВ // Там же. — 2009. — **45**, № 5. — В печати.
7. *The stability of detonation* / H. Eyring, R. E. Powell, G. H. Duffey, R. B. Parlin // Chem. Rev. — 1949. — **45**, № 1. — P. 69–181.
8. *Дерибас А. А.* Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — 222 с.
9. *Симонов В. А.* Области сварки взрывом. Основные параметры и критерии / СО РАН. Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева. — Препр. — Новосибирск, 1995. — 61 с.
10. *Masusi A., Kubota S. et al.* Impact welding for urgent steel pipe repairs by emulsion explosives // Proc. 22nd Intern. Symp. on shock waves. — London, 2000. — Vol. 1. — P. 565–570.
11. *Meuken D., Carton E. P.* Explosive welding and cladding // Shock compression of condensed Matter-2003 // Proc. of the conf. of the American Physical Society, July 20–25, 2003. Portland, USA. — AIP Proc. 706, New York, 2004. — P. 1110–1113.
12. *Explosive welding of tubes to tubeplates* / B. Crossland, A. S. Bahrani, J. D. Williams, V. Shribman // Welding and Metal Fabric. — 1967. — **35**, № 3. — P. 88–94.

Characteristics of low-velocity emulsion explosives with the detonation rate of 2...3 km/s are given. Their application is considered for explosion cladding of metal plates by foils (from aluminium to molybdenum) 100...300  $\mu\text{m}$  thick without a damping layer between them and the flyer foil and for explosion welding of 11 mm diameter stainless steel tube to a steel bushing in a parallel welding schematic.

Поступила в редакцию 23.06.2009

### **Кайдалов А. А. Современные технологии очистки поверхностей конструкционных материалов.** — Киев: Университет «Украина», 2009. — 540 с.

Изложены современные данные об основах физики и технологий очистки поверхностей конструкционных материалов с применением различных методов химической, механической и термической очистки. Описаны технические требования, принципы построения и характеристики современного отечественного и зарубежного оборудования для всех методов очистки. Даны сведения по охране труда и окружающей среды при наиболее распространенных методах очистки. Освещен опыт промышленного применения всех технологий очистки.

Рассмотрены требования к очистке поверхности материалов перед выполнением сварки и родственных процессов обработки, а также технологии очистки поверхностей основных конструкционных металлов и сварочной проволоки. Приведены сведения по стандартам в области очистки поверхностей конструкционных материалов.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в машиностроении, металлургии и других отраслях, связанных с изготовлением изделий, требующих очистки в процессе их производства и эксплуатации. Может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

