

УДК 621.791

## НОВЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ

А. С. Юношев, С. И. Рафейчик, А. В. Пластинин, В. В. Сильвестров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, asyn@ngs.ru

Рассматриваются применения эмульсионных взрывчатых композиций для соединения стержней строительной арматуры и восстановления изношенной резьбы на оси колесной пары железнодорожных вагонов. Композиции не содержат индивидуальных взрывчатых веществ и значительно повышают безопасность ведения прикладных взрывных работ по металлу.

Ключевые слова: эмульсионные ВВ, соединение стержней, взрывное плакирование.

### ВВЕДЕНИЕ

Устойчивый интерес к применению взрывных технологий для обработки различных материалов, в основном металлов, сохраняется и в настоящее время, что подтверждается материалами симпозиумов по получению новых материалов при помощи взрыва [1]. В этих приложениях используются главным образом смеси аммонитов с различными добавками, понижающими скорость детонации и/или повышающими их детонационную способность. В составе аммонитов кроме аммиачной селитры содержится, как правило, тротил, мощное вторичное взрывчатое вещество (ВВ), запрещенное во многих развитых странах для промышленного использования.

Значительную часть производимых сегодня промышленных ВВ составляют эмульсионные ВВ (ЭмВВ), в составе которых нет вторичных ВВ [2]. Достоинствами этих композиций являются: возможность их изготовления из невзрывоопасных компонентов прямо на месте выполнения взрывных работ (не требуется дорогостоящая перевозка взрывоопасных материалов); высокая стойкость к прострелу пуль, низкая ударная и термическая чувствительность и, соответственно, высокий уровень безопасности использования [3]; невысокая стоимость; слабое загрязнение окружающей среды (количество вредных оксидов азота и углерода

в 5–15 раз меньше, чем при взрыве промышленных ВВ, представляющих собой смеси аммиачной селитры с тротилом или углеводородным горючим) [2, 3]. Эмульсионные ВВ лабораторного изготовления характеризуются малыми значениями критического диаметра и толщины и возможностью варьирования параметров ЭмВВ для конкретной задачи [4, 5].

Ниже рассматривается применение ЭмВВ для решения таких прикладных задач, как соединение стержней строительной арматуры и восстановление изношенной резьбы на оси колесной пары железнодорожных вагонов. Обе задачи были поставлены и решены исследователями из Института электросварки им. Е. О. Патона (Киев, Украина) с применением стандартных взрывчатых материалов [6, 7]. Мы предлагаем решение этих же задач, но при использовании эмульсионных взрывчатых композиций, которые не содержат опасных взрывчатых веществ, что позволит упростить внедрение возможных технологий.

### ВЗРЫВНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СТЕРЖНЕЙ АРМАТУРЫ

При строительстве высотных железобетонных конструкций (плотины гидроэлектростанций, высотные здания, башни, опоры мостов и пр.) требуется соединение отдельных стержней строительной арматуры в единую плетку длиной в десятки метров. Обычно это достигается при помощи термической сварки, резьбовых соединений или обжимных гидравлических устройств, но во многих случаях эти методы дороги и недостаточно эффективны. В работе [6] для решения задачи предложено обжатие взрывом стальной цилиндрической муфты, внутрь которой введены концы стержней

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00164-а), интеграционного проекта СО РАН № 2.10 и частично гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (№ НШ-247.2012.1).

© Юношев А. С., Рафейчик С. И., Пластинин А. В., Сильвестров В. В., 2013.

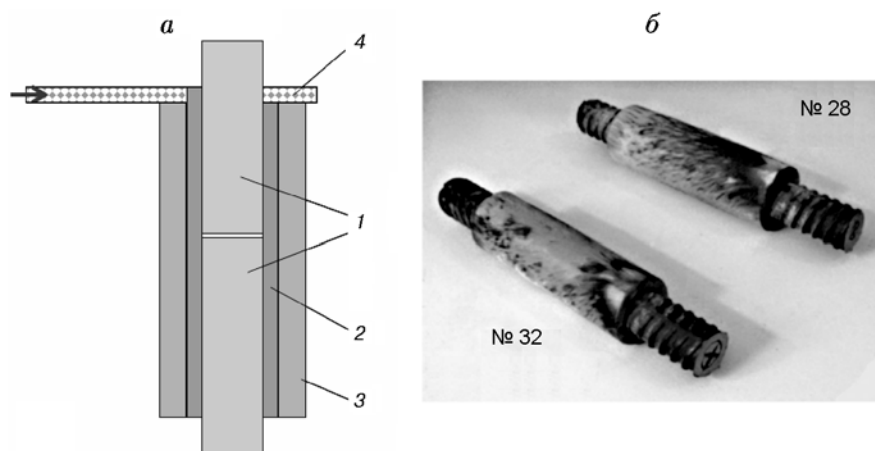


Рис. 1. Схема взрывного соединения стержней строительной арматуры (а) и фотографии образцов после взрыва (б):

1 — стержни арматуры, 2 — обжимная втулка (материал — сталь 20, диаметр от 41/29 мм до 57/36 мм для арматуры № 25–32, длина 150 мм), 3 — слой ЭмВВ толщиной  $5 \div 20$  мм, 4 — инициирующий виток ДШ

арматуры. Заряд ВВ представлял собой 2–3 слоя детонирующего шнура (ДШ), намотанного на внешнюю поверхность муфты длиной  $200 \div 300$  мм. Подобное решение с использованием ДШ и обжимаемой втулки из алюминия было применено ранее в ИГиЛ СО РАН при разработке технологии соединения алюминиевых проводов для высоковольтных воздушных линий [8].

В данной работе эта задача решена при помощи эмульсионного ВВ. Использовалось ЭмВВ с массовым содержанием физического сенсibilизатора 8 % (отечественные микробаллоны МС-В, тип 1), состав эмульсионной матрицы приведен в [4]. Физическое состояние ЭмВВ — вязкая паста, чувствительная к инициированию детонатором или ДШ; плотность  $1.03 \div 1.05$  г/см<sup>3</sup>, допустимая толщина 2 мм. В слое толщиной более 5 мм скорость детонации  $4.3 \div 4.5$  км/с, давление около  $5 \div 6$  ГПа.

Слой ЭмВВ нужной толщины изготавливался раскатыванием ВВ на ровной поверхности между двумя пленками из полиэтилена. Затем плоский слой ЭмВВ необходимого размера накладывался на поверхность муфты и фиксировался скотчем. Конструкция из двух отрезков арматуры, введенных внутрь муфты из стали, подвергалась взрыву (рис. 1). ЭмВВ инициировалось при помощи витка из ДШ, охватывающего торец цилиндрического слоя ВВ. Для сравнения были поставлены опыты с детонирующим шнуром ДШ-В по техноло-

гии [6]. В обоих случаях происходит механическое обжатие стержней арматуры материалом муфты.

После взрыва соединение разрезалось в продольном направлении так, чтобы продольные гребни арматуры не лежали в плоскости распила. Поверхность разреза шлифовалась. Известно, что для соединений, полученных при помощи ДШ (рис. 2, а), все испытания удовлетворяют условию равной прочности арматуры и соединения при одноосном растяжении [5]. Поэтому качество соединения, полученного при помощи эмульсионного ВВ, оценивалось визуальным сравнением разрезов соединений, полученных при помощи эмульсионного ВВ и детонирующего шнура ДШ-В (рис. 2).

В таблице приведены условия постановки опытов. Жирным шрифтом выделены оптимальные значения толщин слоя ЭмВВ, необходимые для получения качественных соединений. В четвертом столбце таблицы приведены масса ВВ на 1 дм длины муфты и (через косую черту) удельная энергия ВВ на 1 дм длины из расчета  $5.46$  кДж/г для гексогена в ДШ с погонным весом  $12.5$  г/м и  $2$  кДж/г для ЭмВВ.

Визуальный осмотр разрезов показывает, что можно подобрать подходящий слой ЭмВВ для того, чтобы качество соединения арматуры было эквивалентно тому, что получается при использовании ДШ на основе гексогена. Требуется проводить подбор толщины слоя ЭмВВ: при малой толщине реализуется непол-

Условия постановки опытов по взрывному соединению арматуры

№ п/п	ВВ	Толщина слоя ВВ, мм	Масса/энергия ВВ, г/кДж на 1 дм длины	Качество соединения
Арматура 25 (муфта $\varnothing 41/29$ , толщина стенки 6 мм)				
1	ДШ-В	2 слоя [6]	78/426	Хорошее
2	ЭмВВ	5	75/150	Недопрессовка
3	—//—	8	<b>123/246</b>	Хорошее
4	—//—	13	221/442	Растрескивание арматуры
Арматура 28 (муфта $\varnothing 43/32$ , толщина стенки 5.5 мм)				
6	ДШ-В	2 слоя [6]	78/426	Хорошее
7	ЭмВВ	8	<b>128/256</b>	Хорошее
Арматура 32 (муфта $\varnothing 52/36$ , толщина стенки 8 мм)				
8	ДШ-В	3 слоя [6]	149/814	Хорошее
9	ЭмВВ	12	241/482	Недопрессовка
10	—//—	16	<b>341/682</b>	Хорошее
Арматура 32 (муфта $\varnothing 57/36$ , толщина стенки 10.5 мм)				
11	ДШ-В	3 слоя [6]	149/814	Хорошее
12	ЭмВВ	12	260/520	Недопрессовка
13	—//—	20	<b>483/966</b>	Хорошее

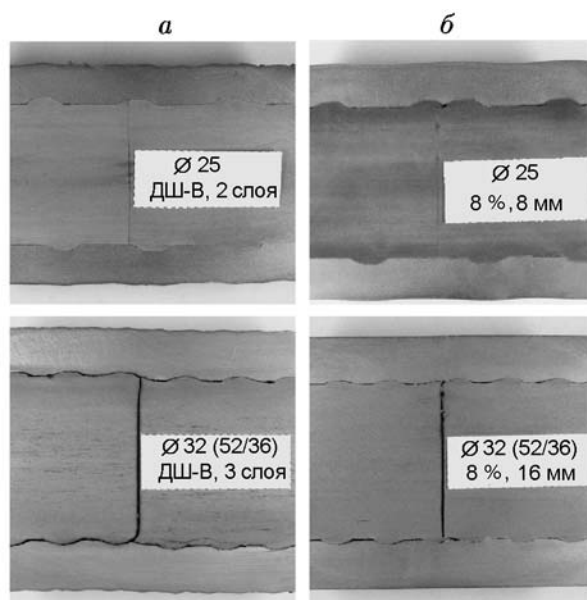


Рис. 2. Разрезы соединений, полученных при помощи детонирующего шнура (а) и слоя ЭмВВ (б):

верхний ряд — арматура № 25, условия постановки опытов соответствуют строкам 1 и 3 в таблице; нижний ряд — арматура № 32, строки 8 и 10

ное обжатие муфты, при излишней толщине наблюдается растрескивание стержней арматуры. При визуальной оценке качества соединения по разрезу необходимо учитывать, что при продольном разрезе всегда происходит частичное расширение муфты, с чем и связаны наблюдаемые «зазоры» между арматурными стержнями и муфтой.

Основное отличие, видимое на фотографиях: при использовании ЭмВВ внешняя поверхность муфты остается гладкой после обжатия и плавно огибает выступы на арматуре. Благодаря этому поперечное сечение муфты над этими выступами не уменьшается, что может положительно сказаться на прочности муфты при испытании на растяжение и, возможно, позволит уменьшить внешний диаметр муфты без ухудшения механических характеристик соединения.

Общая энергия взрыва при применении ЭмВВ в 1.2 ÷ 1.7 раза меньше, чем при использовании ДШ. Поэтому интенсивность ударной волны в воздухе, иначе акустическое действие взрыва, существенно ниже, что может быть важным при использовании метода непосредственно на строительных площадках.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕЗЬБЫ ВНУТРИ ГЛУХОГО ОТВЕРСТИЯ

Механическое повреждение резьбы болтового соединения М 20×2.5 мм крышки подшипника с осью типа РУ1Ш колесной пары железнодорожных вагонов, работающей в многоцикловом режиме сложного нагружения, приводит к необходимости ремонта или замены оси, которая могла бы прослужить 8–15 лет. Существующие методы восстановления резьбы: термическая наплавка слоя стали, сверление и нарезание новой резьбы или ввертывание двухсторонней резьбовой втулки — трудоемки, ненадежны или неэкономичны. Поэтому в [7] предложена оригинальная техника восстановления резьбы: высверливание старой изношенной резьбы, плакирование отверстий изнутри толстостенной стальной трубкой в режиме сварки взрывом и нарезание новой резьбы. В качестве ВВ использовался аммонит, сенсибилизированный гексогеном.

Ключевой элемент данного подхода — плакирование взрывом изнутри 4 глухих отверстий диаметром 20.4 мм и глубиной около 70 мм, расположенных на  $\varnothing 90$  мм. Эти отверстия выполнены в шейке оси  $\varnothing 130$  мм из высокоуглеродистой стали марки ОС. Размеры необходимой резьбы определяют диаметры плакирующей трубки: внешний — 17 мм, внутренний — 12 мм, длина резьбы — не менее 50 мм. Материал трубки — пластичная сталь 20. Необходимо реализовать прочное соединение трубки с осью, так как во время эксплуатации соединение подвергается многократной циклической нагрузке.

Сложность решения связана с большой толщиной стенки плакирующей трубки (2.5 мм), ее малым внутренним диаметром, который ограничивает количество допустимого ВВ, и небольшим зазором (1.7 мм) между внешней поверхностью трубки и внутренней поверхностью отверстия в оси, т. е. следует ожидать небольшого угла поворота метаемой трубки. Из диаграммы свариваемости пары сталь/сталь [9] следует, что скорость точки контакта  $v_k$  должна быть не более  $3.4 \div 3.5$  км/с при минимальном угле соударения  $\gamma$ . Следовательно, при параллельной схеме сварки необходимо применять достаточно мощное, но низкоскоростное ВВ с высокой детонационной способностью.

Испытано пять взрывных эмульсионных композиций, которые включали в себя (сверх

массы эмульсии) высокодисперсные добавки: стеклянные микробаллоны МС-В, перлитовый песок № 100, алюминиевую пудру ПАП-2, мелкодисперсную поваренную соль и аммиачную селитру с размером зерен менее 300 мкм. Таким образом, использовались как «легкие» относительно плотности чистой эмульсии добавки (МС-В и перлит), так и «тяжелые» (алюминий, соль и селитра). Скорость детонации  $D$  композиций в стальной трубке  $\varnothing 17 \times 2.5$  мм изменялась от 3.8 до 2.7 км/с при плотности от 0.8 до 1.4 г/см<sup>3</sup>.

Для всех взрывных композиций, кроме композиций с аммиачной селитрой, реализовывалась распрессовка: на разрезах соединений (см. ниже описание модельных экспериментов) не было видимых признаков физического схватывания материалов, характерных для сварки взрывом, например расплавов или волнообразования. Однако при использовании аммиачной селитры, понижающей скорость детонации, но повышающей плотность эмульсионного ВВ, на шве наблюдались нерегулярные волновые дорожки и локальные расплавы.

На основании этих результатов мы остановились на композиции следующего состава: 5%-е эмульсионное ВВ [4] с добавлением  $\mu = 65$  % дробленой аммиачной селитры сверх массы эмульсии. Скорость детонации композиции в стальной трубке  $\varnothing 17 \times 2.5$  мм составляла  $3.3 \div 3.4$  км/с, плотность  $1.32 \div 1.34$  г/см<sup>3</sup>.

В качестве модели оси использовалась втулка с внешним диаметром 60 мм, длиной 150 мм, изготовленная из стали 45 с одним центральным отверстием глубиной 70 мм. Для предотвращения разрушения втулки при внутреннем взрыве она была заключена во внешнюю обойму из стали с внутренним диаметром 70 мм. Зазор между втулкой и обоймой заливался сплавом Вуда, для того чтобы свести к минимуму деформацию втулки по внешнему диаметру [7]. Заряд с плакирующей трубкой выполнен в виде патрона (рис. 3), который вставлялся в отверстие в модели перед подрывом. Патрон устанавливался в отверстие при помощи простых центрирующих элементов, не возмущающих процесса соударения. Эмульсионная композиция инициировалась боевиком из 5 % ЭмВВ. Внутренняя поверхность отверстия  $\varnothing 20.4$  мм и внешняя поверхность плакирующей трубки предварительно шлифовались, так как предполагаемый режим сварки лежит вблизи нижнего предела по углу соударения.

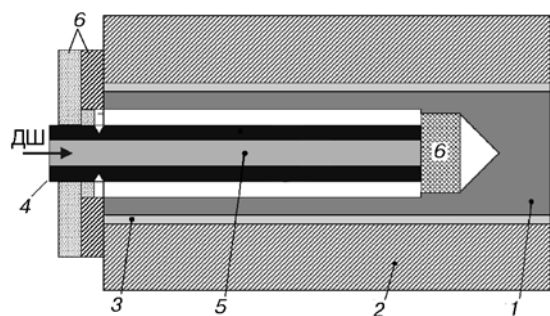


Рис. 3. Постановка опытов по взрывному плакированию глухого отверстия:

1 — модель оси, 2 — защитная обойма, 3 — слой сплава Вуда, 4 — плакирующая трубка, 5 — ЭмВВ, 6 — центрирующие элементы

После опыта внешний диаметр модельной втулки в пределах  $\pm 0.05$  мм не изменялся, втулка разрезалась в продольном сечении и исследовался характер шва. Для выбранной композиции реализована качественная сварка плакируемой трубки с моделью оси в параллельной осесимметричной схеме (рис. 4). Удельная масса композиционного ЭмВВ примерно 1.4 г на 1 см длины трубки, общая масса заряда 14 ÷ 15 г. Диаметр внутреннего канала после взрыва составлял 17.2 ÷ 17.3 мм, что позволяет выполнить необходимую метрическую резьбу М20 полного профиля с шагом 2.5 мм на длине около 58 мм, т. е. практически на полную длину патрона (рис. 4, а). Расстояние от шва до основания зуба резьбы 0.5 ÷ 0.6 мм (рис. 4, б).

Оптические микрофотографии (рис. 4, в)

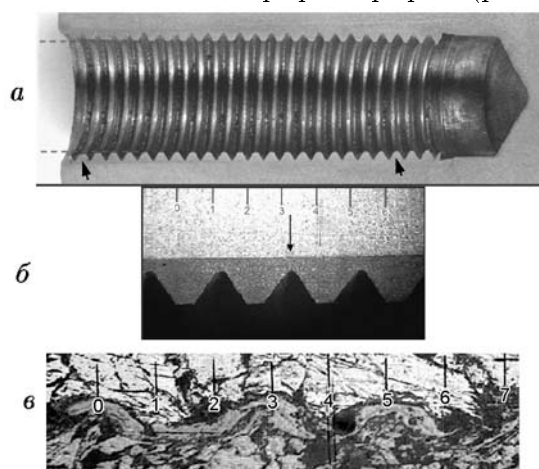


Рис. 4. «Взрывное» восстановление резьбы:

а — вид отверстия с восстановленной резьбой, б — фрагмент резьбы, стрелка указывает на шов, в — сварной шов (расстояние между метками 62 мкм)

показывают, что реализуются как участки с гладким швом, так и участки с волнообразной границей раздела с длиной волны  $\lambda = 70 \div 150$  мкм и амплитудой 15 ÷ 20 мкм. Отсюда по известной формуле  $\lambda/\delta = 26 \sin^2 \gamma/2$  [10], где  $\delta$  — толщина метаемой пластины (в данном случае толщина стенки плакирующей трубки), можно оценить угол соударения:  $\gamma \approx 4 \div 5^\circ$ . Для шлифованных поверхностей В. А. Симонов получал качественную сварку взрывом при углах соударения до  $3^\circ$  для пары сталь/сталь [9], так что эта оценка представляется достоверной. Несомненно, оценка условна, так как сплошного волнообразования по длине шва не наблюдается, реализуется в основном безволновой режим сварки.

Скорость метания оболочки составляет  $v_p \approx 2D \sin \gamma/2 \approx 300$  м/с. Оценим массовое отношение, определяемое в плоском случае как  $r_{пл} = \text{масса ВВ} / \text{масса метаемой трубки}$ . При метании трубы внутренним зарядом цилиндрическая геометрия вносит коррективы и эквивалентом массового отношения является величина  $r_{цил} = \sqrt{2r_{пл}}$  [10]. Для рассматриваемой постановки  $r_{цил} \approx 0.56$ . Что касается параметров сварки взрывом, реализованные угол соударения и массовое отношение находятся вблизи нижней границы рекомендуемого диапазона  $\gamma \approx 4 \div 6^\circ$  (рис. 5). Наши данные: точки 4 — сварка взрывом (верхняя звездочка —  $\mu = 65\%$  аммиачной селитры, нижняя —  $\mu = 70\%$ ), точки 5 — распрессовка. Для скорости точки контакта  $v_k = D \approx 3.4$  км/с условия соударения лежат вблизи правой границы об-

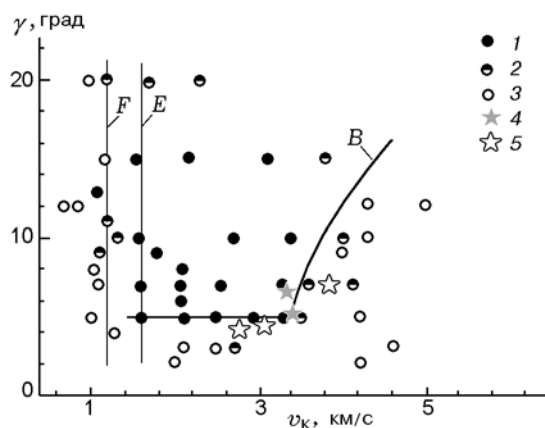


Рис. 5. Область сварки взрывом сталь/сталь [9]:

1, 4 — сварка, 2 — частичная сварка, 3, 5 — нет сварки; 4, 5 — наши оценки условий соударения

ласти сварки сталь/сталь (рис. 5). Просмотр шва на электронном сканирующем микроскопе показывает, что никаких расслоений по длине шва не наблюдается. Встречающиеся расплавы указывают на высокую скорость точки контакта.

Полученное соединение плакируемой трубки с втулкой было испытано на прочность при однократном одноосном растяжении конструкции болт М20 / втулка. При нагрузке до 100 кН соединение полностью осталось целым, болт легко выкручивался после испытания (по оценке нагрузка 96 кН соответствует условию равной прочности конструкции: болт/резьба/соединение по шву, при прочности материала на растяжение 40 кг/мм<sup>2</sup>). Признаков неупругой деформации по сварному шву не отмечено.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эмульсионные ВВ являются удобным средством решения ряда практических задач по обработке металлов взрывом. Ранее было показано, что низкоскоростные ЭмВВ с высокой детонационной способностью можно использовать для взрывного плакирования металлов тонкими фольгами и сварки взрывом тонкостенных трубок малого диаметра с трубной втулкой [11]. В настоящей работе установлено, что эмульсионные взрывные композиции можно применять для разработки простых мобильных технологий соединения стержней строительной арматуры в единую плетть при строительстве высотных железобетонных конструкций и для восстановления изношенной резьбы на осях колесных пар товарных железнодорожных вагонов на технологических площадках.

Авторы признательны украинским коллегам Л. Д. Добрушину, А. Г. Брызгалину и С. Ю. Илларионову за обсуждение постановки проблемы и полезную информацию по технике решения рассмотренных задач.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Proceedings** of the International Symposium on Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovation (EPNM). — Moscow, Russia, 2008; Lisse, the Netherlands, 2009; Bechechii, Montenegro, 2010; Kaliningrad, Russia, 2011; Strasbourg, France, 2012.
2. **Колганов Е. В., Соснин В. А.** Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. — Дзержинск: ГосНИИ «Кристалл», 2009.
3. **Wang Xuguang.** Emulsion Explosives. — Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.
4. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В.** Исследование низкоскоростных эмульсионных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 124–133.
5. **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.
6. **Dobrushin L. D., Bryzgalin A. G. et al.** Explosive joining of building bars // Explosive Production of New Materials: Science, Technology, Business, and Innovation / A. A. Deribas, Yu. V. Scheck (Eds). — Moscow: Torus Press, 2010. — P. 19.
7. **Illarionov S. Yu., Dobrushin L. D.** Explosion welding process for repairing worn threaded holes in the spindles of railway wheels // Ibid. — P. 29.
8. **Аксенов В. А., Киселев А. Н., Яковлев И. В.** Опрессовка соединительной, натяжной и контактной арматуры воздушных линий с помощью импульсных источников энергии // Энергетик. — 1995. — № 8. — С. 8–12.
9. **Симонов В. А.** Области сварки взрывом. Основные параметры и критерии. — Новосибирск, 1995. — (Препринт/РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева).
10. **Дерибас А. А.** Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980. — Гл. 3, § 2.
11. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Рафейчик С. И.** Применение эмульсионных ВВ для сварки взрывом // Автоматическая сварка. — 2009. — Т. 45, № 11. — С. 69–73.

Поступила в редакцию 7/XII 2011 г.