

**Рисунок 2.** Зависимость скорости пробития от толщины оболочки ВУ для различных диаметров ПЭ: (1 –  $d = 8$  мм; 2 –  $d = 10$  мм; 3 –  $d = 12$  мм; 4 –  $d = 15$  мм)

Выполненные оценки показывают реалистичность предлагаемого принципа устройства и действия инженерных боеприпасов разминирования.

#### Список литературы

1. Средства поражения и боеприпасы: Учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 984 с.: ил.
2. Мельников В.Э. Современная пиротехника. – М.: 2014. – 480 с.
3. Шидловский А.А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1964.
4. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьевой, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Физика взрыва: В 2 т. / И.Ф. Кобылкин [и др.]; Под ред. Л.П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2002. Т.2. 656 с.

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛА НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ – БРОНЗА МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

*О.Б. Дреннов, А.Л. Михайлов*

РФЯЦ – ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

#### Введение

В рамках реализации международного проекта термоядернофизических систем ИТЭР ОАО «НИКИЭТ» предложил ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» проработать технологию изготовления матриц для последующего исполнения адаптера электросоединителя АЭ1.000.СБ разработки ОАО «НИКИЭТ».

Адаптер электросоединитель предполагается выполнить в виде биметаллического слоя из материалов со специальными свойствами: нержавеющая сталь 03X17H14M3 – бронза БрХ1Цр. Необходимо обеспечить контакт по плоскости соединения двух металлов. Для выполнения последнего требования была выбрана технология сварки взрывом. Необходимо было разработать

технологии сварки по всей поверхности контакта исходных заготовок и изготовить из них матрицы адаптера для последующих исследований в условиях, определяемых заказчиком.

### Свойства материалов адаптера

Сталь 316L (российский аналог 03X17H14M3 или 10X17H13M2T).

**Таблица 1.** Химический состав коррозионно-стойких сталей (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Другое	Fe
316L	0,03	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18	2-3	10-14		основа
03X17H14M3	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18	2-3	10-13		основа
10X17H13M2T	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18	2-3	10-13	Ti 0,7	основа

Сталь высокого качества с добавлением Mo, что делает ее особенно устойчивой к воздействию коррозии. Низкое содержание углерода позволяет успешно применять ее для изготовления сварных конструкций. Обладает высокой прочностью.

Бронза БрХ1Цр имеет состав: Zr – 0,1%; Cr – 1,05%; Cu – остальное.

Микротвердость бронзы БрХ1Цр по Бринелю  $H_v = 146 \cdot 10^7$  н/м<sup>2</sup>, что соответствует твердости нержавеющей стали среднего класса.

### Сварка взрывом

Сварка взрывом – достаточно новый, но уже нашедший применение в технологических разработках, метод реализации прочного соединения металлических образцов [1].

Термином «сварка взрывом» принято называть явление прочного соединения двух или нескольких металлических тел, происходящее при их высокоскоростном соударении под углом. Для большинства металлов и сплавов диапазон оптимальных скоростей соударения находится в пределах от 0,3 до 1,5 км/с. Поскольку реализация данных скоростей стала широко доступна при использовании зарядов взрывчатых веществ (ВВ), отсюда и появился термин «сварка взрывом».

В процессе косоугольного соударения двух металлических образцов в точке соударения (точке контакта) образуется струя расплава (кумулятивная струя), в которой осуществляется перемешивание образцов обоих металлов. После застывания (единицы микросекунд) реализуется сварное соединение с прочностью, как правило, не меньше прочности свариваемых материалов. Глубина шва составляет от нескольких единиц мкм до нескольких единиц мм, в зависимости от условий соударения.

Следует отметить, что сварка взрывом – единственный способ получения прочного соединения металлических образцов по всей площади поверхности контакта.

Многочисленные эксперименты по косоугольному соударению и сварке взрывом различных пар металлов позволили определить области устойчивого и прочного сварного соединения в координатах  $v_k$  (скорость точки контакта) –  $\gamma$  (угол соударения [1, 2]).

Так, в работе [1] определены области прочной сварки взрывом:  $1 \text{ км/с} \leq v_k \leq 3,5 \text{ км/с}$  при  $80 \leq \gamma \leq 120$  (для пары медь-медь);  $1,5 \text{ км/с} \leq v_k \leq 3,5 \text{ км/с}$  при  $90 \leq \gamma \leq 110$  (для пары нержавеющая сталь – медь). Прогнозирование условий сварки взрывом для бронзы по экспериментальным данным для меди оправдано, так как медь является основой бронзы (~99%) [3].

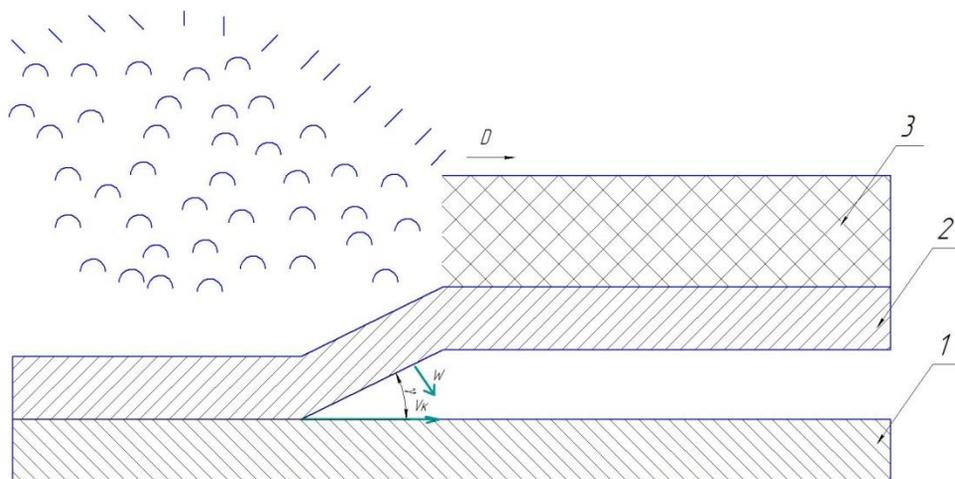
В работе [4] предложен иной критерий для реализации надежных условий сварки взрывом:

$$R = \frac{m_{ВВ}}{m_{пл}} < 1, \quad 0,5 <$$

Здесь:  $m_{ВВ}$  – масса заряда ВВ;

мпл – масса метаемой пластины.

Наиболее технологической и оптимальной схемой сварки взрывом определена схема (рисунок 1) с параллельным расположением метаемой и неподвижной пластин [1, 2]. В этом случае скорость точки контакта совпадает со скоростью детонации заряда ВВ,  $u_k = D$ .



**Рисунок 1.** Схема сварки взрывом

1 – неподвижная пластина; 2 – метаемая пластина; 3 – заряд ВВ;

$\gamma$  – угол соударения;  $u_k$  – скорость точки контакта;

$W$  – скорость полета метаемой пластины;  $D$  – скорость детонации

Из рисунка 1 следует  $\sin \gamma = \frac{W}{D}$ . Скорость  $W$  легко рассчитывается по одномерной модели

(формула Гарни) [5].

$$W = \sqrt{E_G} \cdot \frac{R}{R+2}$$

$$E_G = \frac{D^2}{K^2 - 1}$$

$$\sin \gamma = \frac{1}{\sqrt{2(k^2 - 1)}} \cdot \frac{R}{R+2}$$

Для порошковых ВВ показатель политроны ПВ  $k = 2 \div 2,2$ . Для  $R \approx 0,9$  получаем  $\gamma \approx 90^\circ$ .

В опытах использовался аммонит АТ2. Скорость детонации состава составляет:

$D = 1,65$  км/с при толщине слоя  $\Delta = 30$  мм;

$D = 3,4$  км/с при толщине слоя  $\Delta = 160$  мм.

Насыпная плотность АТ2 есть  $\rho_0 = 1$  г/см<sup>3</sup>.

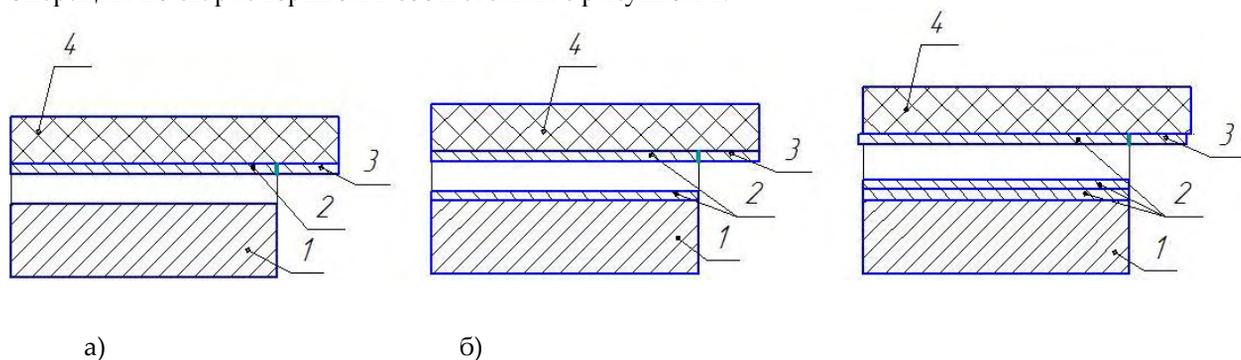
#### Схема постановки опытов

По исходным данным биметаллическая заготовка для адаптера выбрана размером 120 x 50 x 70 мм, причем толщина слоя стали составляет 45 мм, бронзы – 25 мм. Бронза является контактным слоем, сталь будет впоследствии дорабатываться заказчиком под соединение с проводящими элементами.

Бронза Бр1ХЦр поступила в виде заготовок размером 300 x 90 x 30 мм.

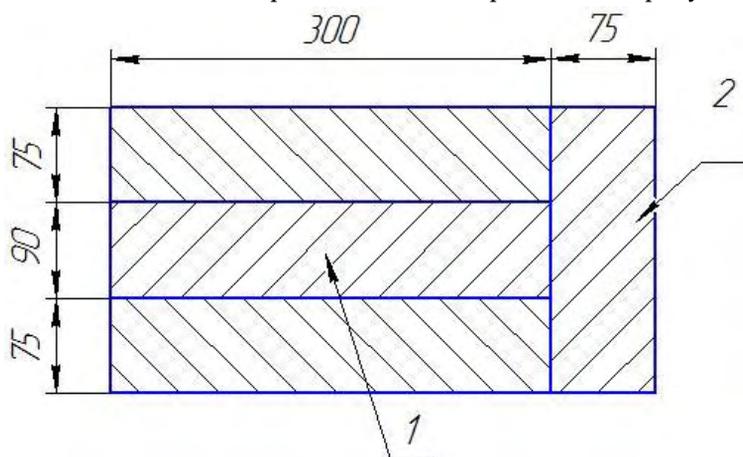
Для выбранного значения  $R$  ( $0,9 \leq R \leq 1$ ) требуемая толщина слоя ВВ (для заготовки из бронзы толщиной 30 мм) составляет  $\sim 260$  мм. При метании пластины шириной 90 мм слоем ВВ такой высоты боковые волны разрежения будут снижать реализующееся давление нагружения метаемой пластины [6]. Последняя будет разгоняться до меньших скоростей, что приведет к снижению параметров  $v_k$  и  $\gamma$  и, как следствие, к отсутствию сварки взрывом. Для исключения воздействия волны разрежения необходимо помещать метаемую пластину в обойму, той же удельной массы ( $\sim 80$  г/см<sup>2</sup>). Для слоя ВВ толщиной 260 мм размер обоймы и образца составляет 560 x 610 мм. Соответственно, масса ВВ есть  $M \approx 90$  кг. Столь значительная масса ВВ при детонации приводит к существенному бризантному воздействию на заготовки и с высокой вероятностью возможно их откольное разрушение.

Для сохранения нагружаемых образцов и уменьшения массы ВВ было принято решение разделить бронзовую заготовку на три слоя толщиной  $\sim 9$  мм и провести последовательно три операции по сварке взрывом в соответствии с рисунком 2.



**Рисунок 2.** Последовательность операций при сварке взрывом бронзы с нержавеющей сталью  
 1 – нержавеющая сталь; 2 – бронза; 3 – обойма из стали; 4 – заряд порошкового ВВ

Схема размещения пластины из бронзы в обойме приведена на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Схема размещения пластины из бронзы 1 в обойме 2

Толщина бронзовой пластины  $\sim 9$  мм, толщина стальной обоймы 10 мм; толщина слоя ВВ 75 мм.

### Результаты экспериментальной отработки

На рисунке 4 приведена фотография заготовки из биметалла нержавеющая сталь – бронза (SS–Br) после выполнения тройного процесса сварки взрывом [SS–Br; (SS–Br)–Br; (SS–Br–Br)–Br]. Заготовка вырезалась из центральной зоны сваренных образцов размером 300 x 90 мм.



**Рисунок 4.** Фотография заготовки из биметалла нержавеющая сталь – бронза

На рисунке 5 приведена фотография контактной границы SS–Br и двух контактных границ Br–Br.



**Рисунок 5.** Фотография макрошлифа контактных границ SS–Br, Br–Br, Br–Br

Все три границы раздела имеют волнообразный вид, характерный для надежного сварного соединения. Разная цветовая гамма трех слоев бронзы, вырезанных из одного и того же исходного образца, может быть объяснена исходной структурированностью материала (мелкое зерно, крупное зерно), неравномерностью распределения примесей из хрома и циркония (взаимодействие циркония с водородом в минимальных количествах дает в структуре сплава характерные белые полосы), различным временем теплоотвода из зоны повышенного разогрева для каждого из слоев бронзы.

На рисунке 6 представлена микрофотография сварного шва биметалла SS–Br. Участки переходного цвета есть так называемые литые включения. Это –слои закристаллизовавшегося расплава с дендритной структурой. В литых включениях наблюдается интенсивное перемешивание металлов, что приводит к образованию в них химических соединений твердых растворов, эвтектик и др. Вследствие этого литые включения, как правило, имеют повышенную твердость. Химический

состав литых включений, расположенных на вершинах и впадинах волн, может сильно различаться, однако каких-либо закономерностей в их составе не выявлено. Величина и количество литых включений определяются режимом сварки взрывом. При сварке в жестких режимах (высокие давления в точке соударения металлов) наблюдается сплошная полоса литых включений по всей линии соединения [7].



**Рисунок 6.** Фотография микрошлифа контактной границы SS–Br, ув.х200

Впоследствии для биметаллических образцов был выполнен контроль качества сварного соединения SS–Br.

*\*Неразрушаемый контроль ультразвуковым методом на основании общих принципов EN 583-1.*

Все образцы показали 100% уровень сплошности сварного соединения SS–Br.

Факультативные исследования показали, что сварное соединение Br–Br приобретает характерный волнообразный вид.

*\*Разрушаемый контроль*

Испытания прочности на разрыв проводились на образцах по ГОСТ1497 тип IV № 9 (Ø=3 мм). Испытания проводились на установке INSTRON модели 1185 с начальной скоростью деформации  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

Прочность на разрыв составила  $\sigma = 490 \text{ МПа}$ , при требуемой по заданию минимальной прочности на разрыв  $\sigma_{\text{min}} = 220 \text{ МПа}$ . Разрушение образца произошло по бронзе в слое между двумя сварными швами (см. фото на рисунке 7), то есть замеренная величина  $\sigma$  - есть прочность на разрыв бронзы марки БрХ1Цр. Прочность же сварного шва выше.



**Рисунок 7.** Фотография образцов после испытания на разрыв

## Заключение

Разработан технологический процесс изготовления биметалла нержавеющая сталь – бронза методом сварки взрывом.

Изготовлена пробная партия заготовок адаптера в количестве 4 шт.

Качество соединения бронза БрХ1Цр – сталь 03Х17Н14М3 удовлетворяет требованиям задания.

## Список литературы

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980. 421с.
2. Крупин А.В., Соловьев В.Я., Шефтель Н.И. и др. Деформация металлов взрывом. М.: Металлургия, 1975. 183с.
3. «Таблица физических величин» Справочник под редакцией И.К.Кикоина, г.Москва, Атомиздат, 1976, 1006с.
4. Кудинов В.Н., Коротеев В.Ф. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978. 168с.
5. Дерибас А.А. «Метание металлических пластин тангенциальной детонационной волной» ПМТФ, 2000, т.41, № 5, стр.68-75.
6. Физика взрыва, т.1, 2 под редакцией Л.П.Орленко, Москва, Физматлит, 2002, т.1, 824 с., т.2, 664 с.
7. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. М., Машиностроение, 1987, 216с.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ МЕТОДОМ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

*О.Б.Дреннов, О.А.Бурцева, В.А.Логунов, Ю.М.Самороков*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Одной из отличительных особенностей сварки взрывом является прочное соединение нагружаемых деталей по всей площади поверхности контакта [1].

Технология сварки взрывом применяется также для плакирования (приваривания) уже готовых труб снаружи или изнутри. В этом случае основная проблема – как избежать деформирования и изменения диаметра: при плакировании изнутри – увеличения диаметра, при плакировании снаружи – его уменьшения. Решение этой проблемы найдено в виде окружения свариваемых труб легко удаляемым инертным заполнителем (при сварке «изнутри») или помещения инертного заполнителя по безззорной схеме внутрь трубы (см.схемы на рисунке 1) [2].

Однако для решения ряда физических задач требуется изготовление биметаллических труб при сохранении исходного диаметра (допуска не превышают одного – двух десятков микрон). В данном случае используется так называемая прецизионная схема сварки взрывом. В качестве инертного заполнителя используются детали из прочного металла, обладающего малой сжимаемостью  $\rho/\rho_0$  в области нагружения, характерной для сварки взрывом при использовании промышленных ВВ,  $P \leq 15$  ГПа.

На практике используют сплошной стержень (вариант внешнего плакирования) или кольцевую обойму (вариант внутреннего плакирования), выполненные из прочных конструкционных сталей [3]. Размеры обоймы предварительно рассчитываются с учетом упруго-пластических свойств материалов.

В частности перед авторами была поставлена задача: получить по методу сварки взрывом биметаллическую трубу. Внешний силовой слой выполнен из алюминия или титана. Внутренний проводящий – есть медь. Основное требование: наружный диаметр силовой трубы ( $\varnothing$  128 мм) может увеличиться в пределах допуска (15-20 мкм); внутренний диаметр биметаллической трубы дорабатывается до требуемого размера (часть медного образца стачивается).