

5. V. Yu. Ul'janitskij, A.L. Kirjakin, A.A. Shtertzer, S.B. Zlobin. Detonation spraying unit // Patent of the Russian Federation No. 2 399 430, published 20.09.2010, Bull. 26.
6. V. Yu. Ul'janitskij, A.L. Kirjakin, A.A. Shtertzer, S.B. Zlobin. Detonation spraying unit // Patent of the Russian Federation No. 2 399 431, published 20.09.2010, Bull. 26.
7. V. Yu. Ul'janitskij, A.L. Kirjakin, A.A. Shtertzer, S.B. Zlobin. Powder pulsed proportioner // Patent of the Russian Federation No. 2 400 310, published 27.09.2010, Bull. 27.
8. V. Yu. Ul'janitskij, A.A. Shtertzer, S.B. Zlobin, A.L. Kirjakin. Method of thrust generation // Patent of the Russian Federation No. 2330979, published 10.08.08, Bull. 22.
9. V.Yu. Ulianitsky, A.A. Shtertser, I.S. Batraev. Detonation of a gas fuel based on methylacetylene and allene // Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2015, v. 51, No. 2, p. 246-251.
10. I.S. Batraev. Detonation spraying with multi-component methylacetylene-propadienepropane (MAPP) gas fuel // Strengthening technologies and coatings, 2017, No. 1, p. 14-19 (in Russian).
11. S.B. Zlobin, V.Yu. Ulianitsky, A.A. Shtertser. Comparative analysis of nanostructured and microstructured cermet detonation coatings // Strengthening technologies and coatings, 2009, No. 3, p. 3-11 (in Russian).
12. V.Yu. Ulianitsky, I.S. Batraev, A.A. Shtertser. Oxide coatings made by detonation spraying // Strengthening technologies and coatings, 2015, No. 9, p. 37-44 (in Russian).
13. V. Ulianitsky, A. Shtertser, V. Sadykov, I. Smurov. Development of Catalytic Converters Using Detonation Spraying // Materials and Manufacturing Processes, 2016, v. 31, is. 11, p. 1433-1438.
14. S.B. Zlobin, I.S. Batraev, V.Yu. Ulianitsky, A.A. Shtertser. Restoration of electro-centrifugal pump items by detonation spraying // Strengthening technologies and coatings, 2012, No. 5, p. 20-24 (in Russian).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ОБРАЗУЮЩИХСЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ

*А.А. Аушев, А.Н. Баландина, Е.Н. Гришин,  
О.Б. Дреннов, А.М. Подурец, М.И. Ткаченко*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

### Введение

Для решения ряда научных и технологических задач требуется применение двухслойных цилиндрических конструкций (биметаллических труб). Известно, что прочное соединение двух металлов по всей площади контакта возможно при использовании технологии сварки взрывом [1]. Для отработки режимов сварки были проведены опыты, как в цилиндрической геометрии, так и в плоской. В качестве соединяемых материалов брались медь М1, титановый сплав ПТЗВ, технически чистый титан ВТ1-0 и алюминиевый сплав АМгб.

Существует два способа сварки взрывом труб: внешнее и внутреннее плакирование [2]. Первоначально трубы располагаются коаксиально вдоль общей оси и разделяются технологическим зазором.

- Внешнее плакирование. Заряд ВВ размещается на поверхности внешней цилиндрической заготовки. При детонации ВВ заготовка метается, соударяется с внутренней трубой и приваривается к ее поверхности. Для исключения необратимых деформаций деталей в полость внутренней трубы устанавливается твердый металлический стержень, который исключает сжатие и деформирование труб при ударно-волновом нагружении.

• Внутреннее плакирование. Заряд ВВ размещается на поверхности внутренней цилиндрической заготовки. При детонации ВВ заготовка метается, соударяется с внешней трубой и приваривается к ее поверхности. Для предотвращения необратимых деформаций деталей вся механическая сборка помещается в массивную металлическую обойму, которая исключает радиальное движение сваренных труб после динамического нагружения.

### Постановка опытов

В нашем случае внешняя (силовая) оболочка была более толстой, чем внутренняя медная. Метание толстых металлических слоев требует использования больших масс ВВ, поэтому в экспериментальной проработке был выбран способ внутреннего плакирования.

Схема проведения опытов в цилиндрической геометрии приведена на рисунке 1. Постановка плоских опытов на рисунке не показана.

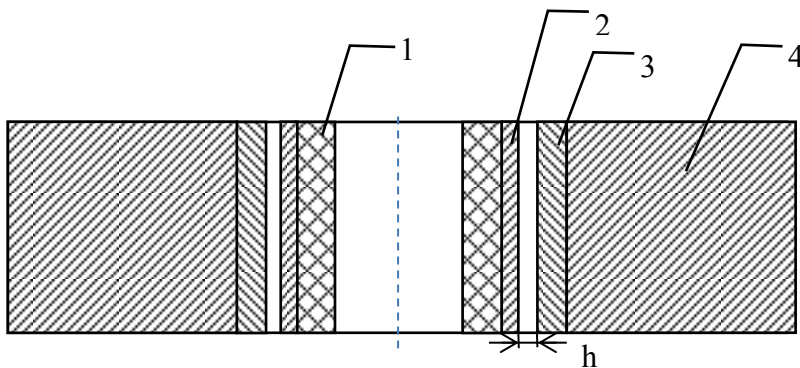


Рисунок 1. Схема проведения опытов

1. Цилиндрический слой порошкового ВВ
2. Оболочка из меди
3. Оболочка из титана/алюминия
4. Стальная обойма

В качестве силовой оболочки были выбраны трубы из титанового сплава ПТЗВ и алюминиевого сплава АМг6. Внутренний диаметр трубы  $d = 117$  мм, толщина стенки  $\Delta = 6$  мм. Внутренняя оболочка изготавливалась из меди (марка М1). Внутренний диаметр трубы  $d = 111$  мм, толщина стенки  $\Delta = 1,5$  мм. Зазор между силовой и внутренней оболочками составлял  $h = 1,5$  мм. В опытах использовалось взрывчатое вещество (ВВ) аммонит АТ-3 (скорость детонации  $D = 1,8$  км/с; насыпная плотность  $\rho = 0,9$  г/см<sup>3</sup>). Толщина слоя ВВ составляла  $H=10,5$  мм.

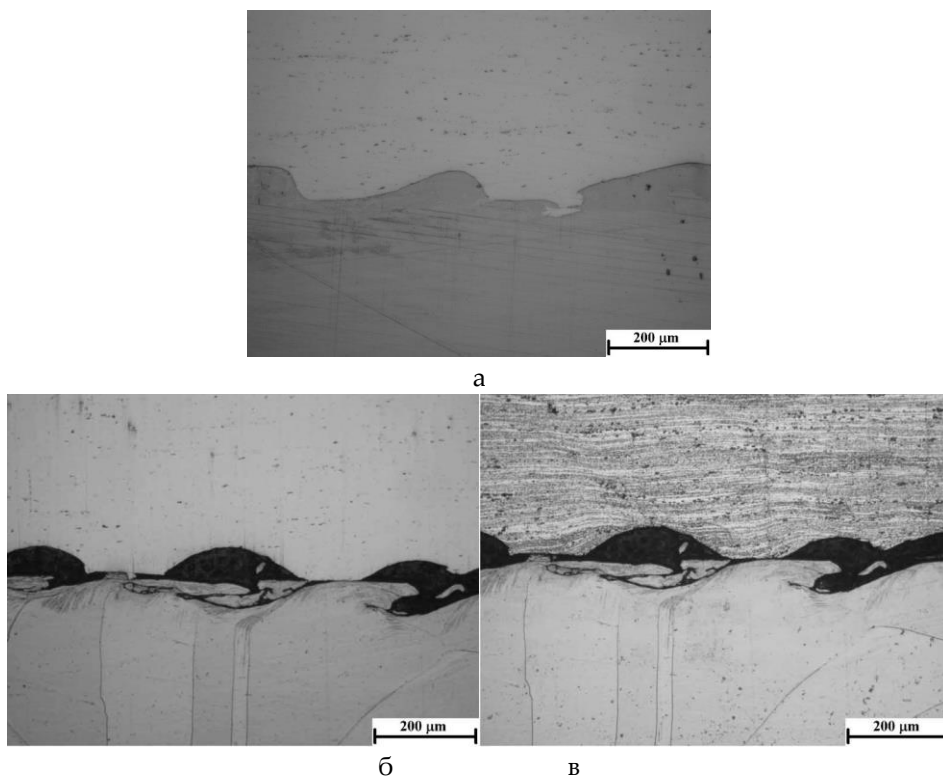
Предварительно для отработки режимов сварки была проведена серия плоских опытов для пар Cu-Ti (ВТ1-0) и Cu - АМг6.

### Результаты металлографического исследования образцов

В ходе металлографического исследования сварных швов было обнаружено, что после травления в области шва выявляются пустоты, которые были интерпретированы поначалу как некачественное соединение, «непровар». Для контроля качества сварки были проведены механические испытания сваренных деталей на разрыв, при этом разрушение образцов произошло не по шву, а в других местах. Т.е. соединение оказалось прочным.

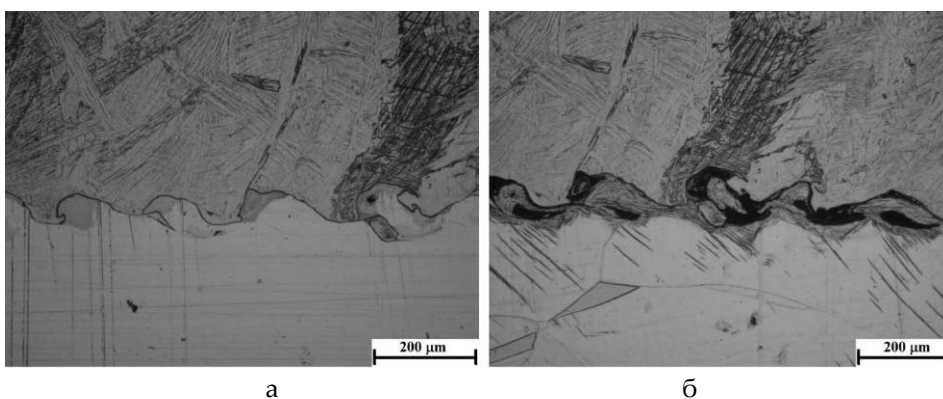
Поскольку шов состоит из двух различных металлов, для выявления их структуры требуется использование разных химических травителей. Поэтому при приготовлении металлографического шлифа сварного соединения нами обычно после полировки производится травление сначала одним реактивом (например, выявляющим структуру меди, но не выявляющим структуру второго металла - алюминия или титана), а потом другим.

Пустоты на шлифе были выявлены после такого двукратного травления (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Структура сварного шва соединения меди и АМг6 (цилиндрическая геометрия, медь - в нижней части снимка).  
 а – до травления; б – травление на медь,  
 в – двукратное травление на медь и алюминий

Было замечено, что при изменении порядка травления (например, сначала на титан, а потом на медь) после первого травления пустоты не появляются (рисунок 3).



**Рисунок 3.** Структура сварного шва соединения меди и ПТЗВ (цилиндрическая геометрия)  
 а - травление на титан; б - двукратное травление на титан и медь

На рисунке 3 приведены микрофотографии одного и того же участка сварного соединения после однократного и двукратного травления. На рисунке 3а видны участки на границе двух металлов с измененной окраской, что, видимо, соответствует другой структуре. После второго травления эти участки отсутствуют, вместо них появились пустоты (тёмные участки снимка), т.е.

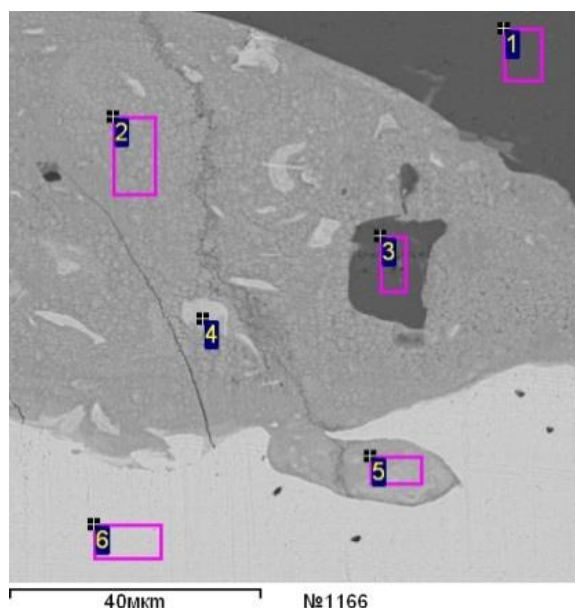
вещество в этих участках подверглось вытравливанию. Причем, как следует из сравнения рисунков 2 и 3, вытравливание идёт «медным» травителем.

Было высказано предположение, что в этих местах образовались некие интерметаллические соединения с отличной от начальной матрицы кристаллической структурой. Для проверки этого предположения было проведено исследование на электронном микроскопе MIRA//LMU с микрозондом. В результате этого исследования в области швов были обнаружены участки, по химическому составу соответствующие интерметаллидам (таблица 1).

**Таблица 1.**

свариваемые металлы	геометрия сварки	обнаруженные интерметаллиды	T солидуса области существования соединения, °C [3]
M1 + АМг6	плоская	Al <sub>2</sub> Cu	548
M1 + АМг6	цилиндр.	Al <sub>2</sub> Cu	548
		AlCu	591
		Al <sub>4</sub> Cu <sub>9</sub>	873
M1 + ВТ1-0	плоская	-	
M1 + ПТЗВ	цилиндр.	TiCu <sub>2</sub>	880

Пример микрозондового анализа приведен на рисунке 4 и в таблице 2.



**Рисунок 4.** Изображение участков микроанализа образца M1-АМг6, цилиндрическая геометрия. См. таблицу 2

Из результатов, приведённых в таблице 2, делается вывод, что на участке анализа 2 мы видим соединение Al<sub>2</sub>Cu, на участке 4 - Al<sub>4</sub>Cu<sub>9</sub>, на участке 5 - AlCu. На участках 1 и 3 состав соответствует АМг6, на участке 6 - меди.

**Таблица 2.** Элементный состав образца М1-АМг6 (цилиндрическая геометрия) в участках микроанализа (рисунок 4)

Участок анализа	Массовое содержание, %			
	Mg	Al	Mn	Cu
1	6,2	93,3	0,5	0
2	2,5	39,8	0	57,7
3	5,9	91,2	0,5	2,4
4	1,0	16,7	0	82,3
5	1,9	30,4	0	67,7
6	0	0	0	100

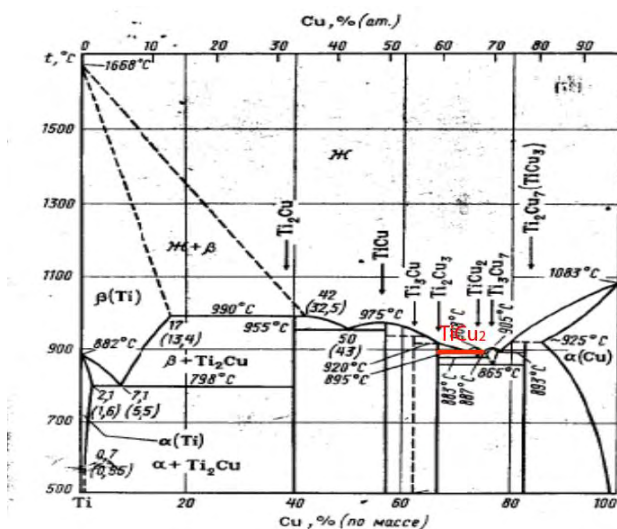
### Заключение

Считается, что во время сварки металл находится в частично жидком состоянии выше линии солидуса диаграммы состояния системы. Таким образом, обнаруженные интерметаллиды могут служить индикатором температуры, которая достигалась в процессе сварки (таблица 1). (Интерметаллид  $TiCu_2$  существует в узком интервале температур  $865 - 880^\circ C$ . При нормальных условиях при этой концентрации в равновесии должна существовать смесь  $TiCu_4$  и  $Ti_3Cu_4$ ). На рисунках 5 и 6 приведены диаграммы состояния систем медь-титан и медь алюминий по [3].

Анализ состава интерметаллидов, наблюдающихся в образцах, указывает на то, что после сварки в цилиндрической геометрии мы наблюдаем соединения, образующиеся при более высоких температурах по сравнению с плоской геометрией.

Появление в сварном шве интерметаллидов, характеризующихся высокой температурой образования ( $Al_3Cu$ ,  $TiCu_2$ ), объясняется более высоким уровнем деформирования в двухосной цилиндрической геометрии. БОльший уровень пластических деформаций вызывает более высокий разогрев контактной зоны.

Таким образом, по составу интерметаллидов можно определить температуру, реализующуюся в контактной зоне при пластическом деформировании.


**Рисунок 5.** Диаграмма состояния медь-титан

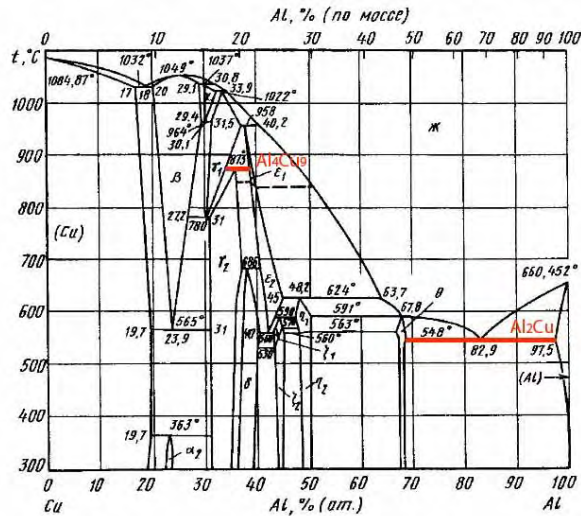


Рисунок 6. Диаграмма состояния медь-алюминий

### Список литературы

1. А.А.Дерибас «Физика упрочнения и сварки взрывом» Новосибирск, Наука, СО, 1980, с.221.
2. А.В.Крупин, В.Я.Соловьев, Н.И.Шефтель и др. «Деформация металлов взрывом» Москва, Металлургия, 1975, с.415.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник в 3-х томах. Москва: Машиностроение, 1996.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СХОДЯЩЕЙСЯ УДАРНОЙ ВОЛНЕ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ

В.Ф. Куропатенко <sup>1,2</sup>, Е.С. Шестаковская <sup>2</sup>

<sup>1</sup> ВНИИТФ, Снежинск, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Рассматривается газовый шар с массой  $M_0$  и начальными при  $t=t_0$  параметрами газа  $\rho = \text{const}$ ,  $U_0=0$ ,  $P_0=0$ ,  $E_0=0$ , где  $\rho$  – плотность,  $U$  – скорость,  $P$  – давление,  $E$  – удельная внутренняя энергия. Задача имеет сферическую симметрию. Лагранжевой координатой является сферическая масса  $M$ . Второй независимой переменной является время  $t$ . В точке  $t_0$ ,  $M_0$  задана скорость  $U_1 < 0$ . Т. о. в этой точке задан сильный разрыв, который при  $t > t_0$  распространяется к центру симметрии и в момент  $t_f$  фокусируется в точку  $M = 0$ . Граница шара при  $t > t_0$  движется в переменных  $r, t$ , но в переменных  $M, t$  её траектория является вертикальной линией. Вообще говоря, все траектории частиц являются вертикальными линиями, вдоль которых сохраняется то значение энтропии, которое возникло на ударной волне. Параметры газа между ударной волной и границей определяются системой законов сохранения Эйлера-Гельмгольца. Уравнение состояния используются в двух формах

$$P = (\gamma - 1)\rho E, \quad P = F(s)\rho^\gamma, \quad (1)$$