

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-11-294-51-56

*А. Н. Ву Ван, аспирант, В. О. Харламов, канд. техн. наук, М. Р. Прошин, магистрант,
С. В. Кузьмин, чл.-корр. РАН, В. И. Лысак, академик РАН*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАЗРУШЕНИЯ ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ МЕЖДУ МЕДЬЮ И АЛЮМИНИЕМ В ОБРАЗЦАХ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ВБЛИЗИ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СВАРИВАЕМОСТИ

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

В работе представлено сопоставление результатов исследования микроструктуры и фрактографии методами растровой электронной микроскопии зоны соединения биметалла медь-алюминий, полученного при помощи сварки взрывом вблизи нижней границы свариваемости. Выявлено, что с увеличением энергии пластических деформаций W_2 с 0,12 до 0,24 МДж/м² линейное содержание оплавов увеличивается с 15 до 57 %, а по видимой площади в изломе, сначала увеличивается с нуля до 55%, а затем снижается вдвое до 27 %. Зона разрушения смещается от границы «медь-алюминий» к «оплав-алюминий» и далее вглубь алюминиевого слоя, а характер разрушения меняется с хрупкого на вязкий. Механическая прочность на отрыв слоев биметалла при этом достигает равнопрочного значения 89 МПа.

Ключевые слова: сварка взрывом, зона соединения, оплав, прочность, химический анализ, фазовый состав, излом, характер разрушения

A. N. Vu Van, V. O. Kharlamov, M. R. Proshin, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak

INVESTIGATION OF THE NATURE OF THE FRACTURE OF THE JUNCTION ZONE BETWEEN COPPER AND ALUMINUM IN SAMPLES OBTAINED BY EXPLOSION WELDING NEAR THE LOWER LIMIT OF WELDABILITY

Volgograd State Technical University, weld@vstu.ru

The paper presents a comparison of the results of a study of microstructure and fractography by scanning electron microscopy of the junction zone of a copper-aluminum bimetal obtained by explosion welding near the lower limit of weldability. It was found that with an increase in the energy of plastic deformations W_2 from 0.12 to 0.24 MJ/m², the linear content of melts increases from 15 to 57 %, and in terms of the visible area in the fracture, it first increases from zero to 55 %, and then halves to 27 %. The fracture zone shifts from the "copper-aluminum" boundary to the "melt-aluminum" and further into the aluminum layer, and the nature of the fracture changes from brittle to viscous. The mechanical tear strength of the bimetal layers at the same time reaches an equal strength value of 89 MPa.

Keywords: explosion welding, joint zone, melting zone, strength, chemical analysis, phase composition, fracture, the nature of destruction

Сварка взрывом представляет собой перспективный метод, который обеспечивает формирование прочного соединения между двумя (или более) металлами путем их соударения под действием энергии, высвобождающейся при взрыве заряда взрывчатого вещества. Этот метод используется для создания биметаллических (многослойных) листов, цилиндрических изделий, а также слоистых композиционных материалов из различных металлов, которые невозможно сварить другими известными способами.

Несмотря на обширное исследование биметаллов, полученных с применением метода сварки взрывом, остаются не рассмот-

ренными многие вопросы, касающиеся конкретных изделий с различными функциональными назначениями. Сложность структурных процессов и физико-механических свойств, происходящих в зоне сварного шва и околосшовной зоны, требует дальнейших исследований.

Биметалл медь-алюминий предназначен для изготовления из него контактных переходников и токоведущих элементов электротехнического назначения с улучшенным комплексом физико-механических характеристик. Применение данного материала делает возможным обеспечение идеального электрического контакта [1...5]. Однако,

между медью и алюминием возможно образование хрупких интерметаллидов при локальном оплавлении в результате соударения, препятствующих формированию качественного биметалла. Интерметаллиды так же оказывают негативное влияние на свойства узла токоподвода, которое проявляется в локальном нагреве шва при прохождении тока. В результате нагрева количество интерметаллидов растёт [4], что в свою очередь приводит к последующему увеличению температуры в соединении. Возникающая «цепная реакция» приводит в конечном итоге к выходу узла из строя.

Материалы и методы исследования

В опытах использовались листы меди толщиной 2,5 мм и алюминия толщиной 4 мм марок М1 и АД1 соответственно (табл. 1). Для сварки взрывом меди с алюминием применялась классическая плоскопараллельная схема соударения двух пластин (рис. 1) на низкоэнергетических режимах, обеспечивающих пересечение нижней границы свариваемости [7] (рис. 2).

Для варьирования энергией пластических деформаций W_2 в диапазоне значений от 0,12 до 0,24 МДж/м² изменялся угол соударения γ от 8,95° до 12,5° при постоянной

Таблица 1 – Характеристики используемых материалов

Марка	Химический состав, мас.%										$\sigma_{\text{в}}$, МПа
	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	Cu	Al	Mn	Ti	
М1	до 0,005	до 0,002	до 0,004	до 0,002	до 0,005	до 0,004	≥ 99,9	–	–	–	220
АД1	–	–	–	–	–	до 0,1	до 0,05	≥ 99	до 0,05	до 0,05	90

Поэтому целью работы было изучение закономерностей образования соединения при сварке взрывом между медью и алюминием вблизи нижней границы свариваемости.

скорости точки контакта $V_k = D = 1750$ м/с. Скорость детонации D контролировалась электроконтактным методом [9] с помощью прибора для измерения микросекундных интервалов времени КТБ «Интервал». В ка-

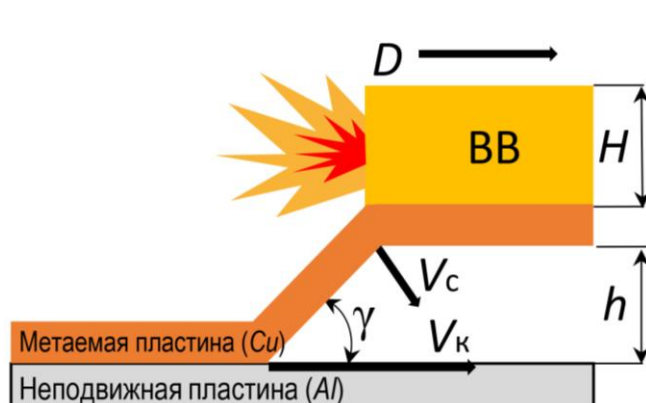


Рис. 1. Схема соударения пластин при сварке взрывом:

ВВ – взрывчатое вещество (аммонит 6 ЖВ+песок); D – скорость детонации; V_k – скорость точки контакта; V_c – скорость соударения; γ – угол соударения; H – высота заряда; h – высота зазора

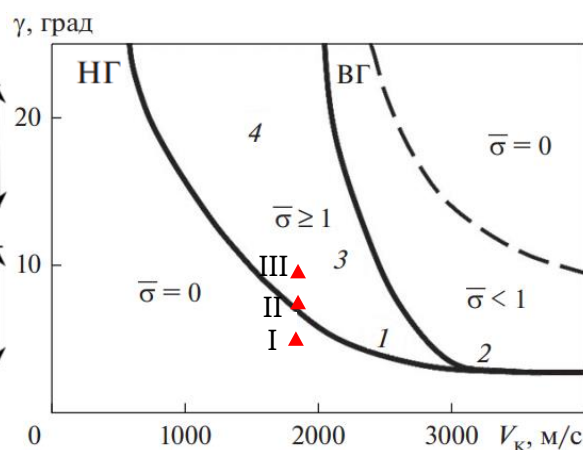


Рис. 2. Область свариваемости меди с алюминием при сварке взрывом [7]
НГ – нижняя граница, ВГ – верхняя граница. Римскими цифрами указаны режимы сварки, использованные в опытах

честве взрывчатого вещества использовалась смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком в соотношении 50/50.

Установочные параметры (высота заряда H и высота зазора h) подбирались с помощью специального программного обеспечения [6] таким образом, чтобы обеспечить изменение заданных кинематических параметров режимов сварки взрывом (рис. 3).

Механические испытания сваренных взрывом биметаллов проводили на отрыв слоев образцов - выдавок [8] согласно ОСТ

5.9311-78 на разрывной машине Р-20 (рис. 4). Заготовки под образцы вырезались из центра полученных пластин, количество вырезанных элементов на одну пластину композита составляет 4 штуки, из которых один используется для подготовки микрошлифа, а оставшиеся три для подготовки образцов для механических испытаний на отрыв слоев (рис. 4).

Микроструктура и характер разрушения зоны соединения образцов после механических испытаний исследованы на растровом

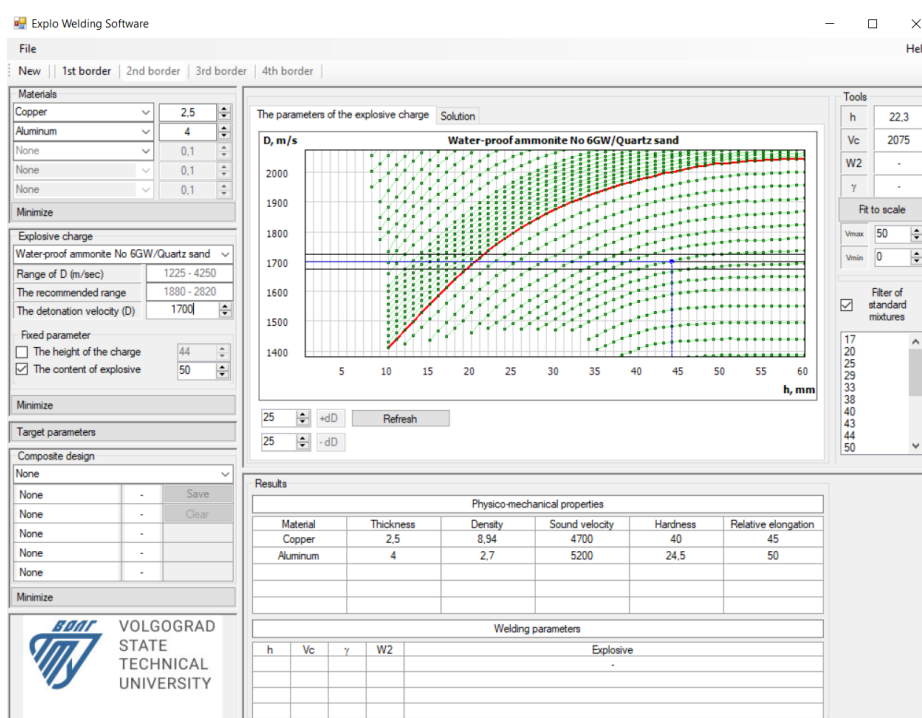


Рис. 3. Расчет установочных параметров сварки взрывом меди с алюминием при помощи специализированного программного обеспечения *Explo Welding Software* [6]

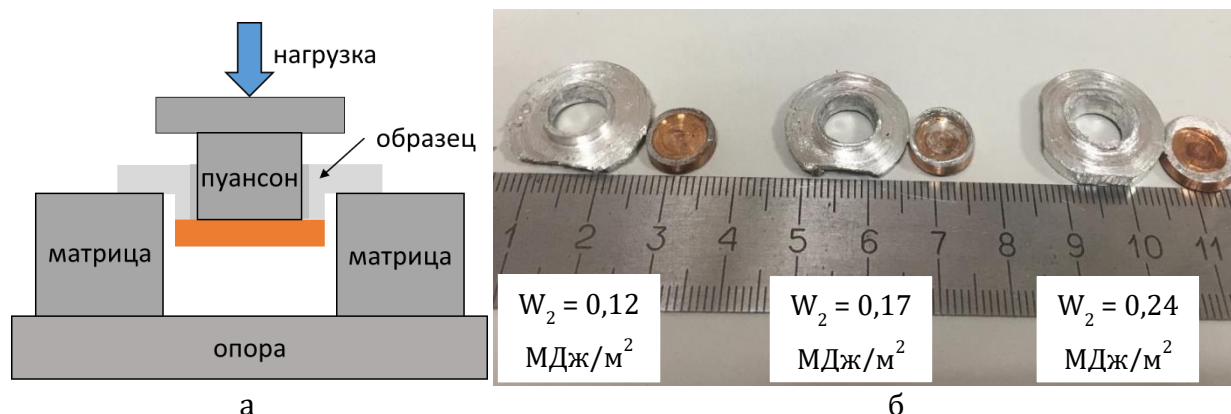


Рис. 4. Схема проведения механических испытаний на отрыв слоёв биметалла (а) и внешний вид образцов-выдавок после разрушения (б)

электронном микроскопе *Versa 3D, FEI*, Чехия, с применением детектора обратно-отраженных электронов (CBS), позволяющем получать изображение с высоким контрастом по атомному номеру элемента Z (Cu – 29, Al – 13) при низкой чувствительности к рельефу образца. Таким образом области электронной фотографии, соответствующие чистой меди, будут ярко белого цвета, алюминию – темного, а оплавы – серого цвета. Содержание элементов и их распределение поперек границы соединения получены с помощью интегрированного в камеру микроскопа энергодисперсионного детектора (EDS) *Apollo-X, EDAX*, США. Содержание оплавов определяли линейным методом на микрошлифах. Процентное содержание компонентов (алюминий, медь, оплав) в зоне соединения разрушенных при механических испытаниях образцов определяли на медной стороне выдавок (рис. 4, б) с применением программного продукта ImageJ v1.52.

Полученные результаты и их обсуждение

Исследование микроструктуры показало, что зона соединения меди с алюминием в исследованном диапазоне низких энергий является безволновой (рис 5, а-в). Однако несмотря на крайне малые энергозатраты,

в образце, полученном на режиме ниже нижней границы свариваемости (0,12 МДж/м²) обнаружены оплавы в количестве 15 %, имеющие мелкодисперсное двухфазное строение, содержащие отдельные частицы меди (рис. 6, а).

При повышении энергии W_2 с 0,12 до 0,17 и 0,24 МДж/м² содержание оплавов скачкообразно увеличивается до 56 и 57 % соответственно (рис. 5, б, в), а соотношения элементов в оплавах Al/Cu изменяется от 80/20 до 50/50 At.% (рис. 6, а-в).

Сопоставление данных EDS анализа с известной диаграммой состояния алюминий-медь [10] позволяет предположить, что при сварке взрывом на режиме ниже нижней границы свариваемости образуются участки локального оплавления, имеющие фазы (Al)+ θ (твердый раствор на основе соединения CuAl₂) и состав близкий к эвтектическому (рис. 6, а) с температурой плавления 548 °С. Однако механические испытания на отрыв слоев показали, что энергии пластической деформации равной 0,12 МДж/м² недостаточно для образования прочного соединения. В изломе (рис. 3, г) наблюдаются гладкая поверхность меди и отдельные участки прихвачившегося алюминия, что указывает на то, что отрыв в основном про-

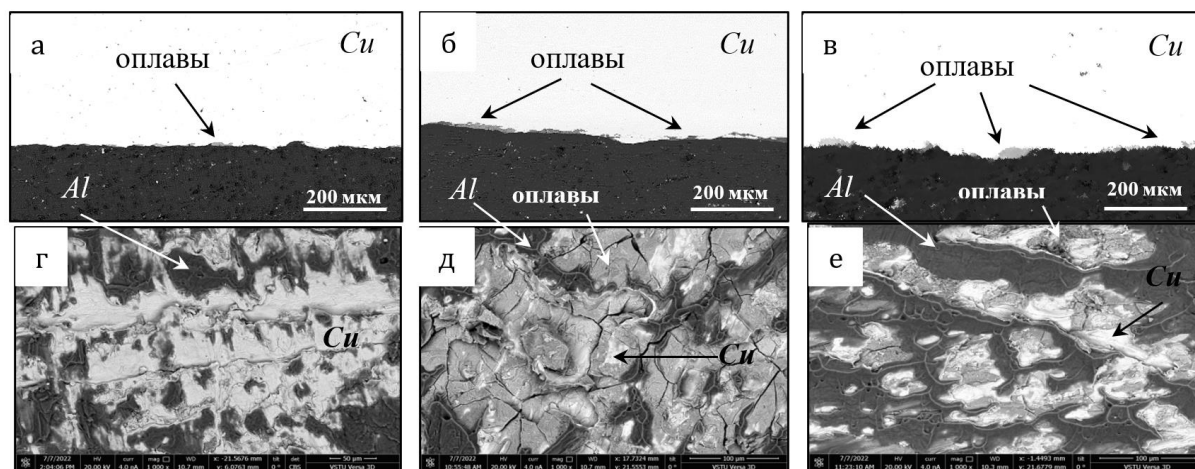


Рис. 5. Микроструктура и фрактография зоны соединения образцов биметаллов Cu-Al, полученных при помощи сварки взрывом вблизи нижней границы свариваемости на различных энергиях W_2 (МДж/м²) 0,12 (а, г); 0,17 (б, д); 0,24 (в, е)

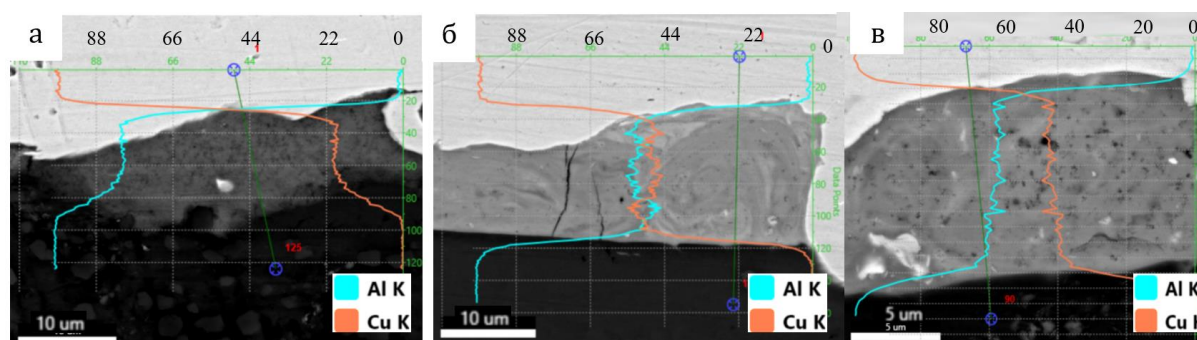


Рис. 6. Микроструктура и распределение элементов внутри оплавов в зоне соединения биметалла Cu-Al, полученного вблизи нижней границы свариваемости взрывом при энергиях W_2 (МДж/м²) 0,12 (а); 0,17 (б); 0,24 (в)

изошел по межфазной границе, на которой не возникло условий для создания прочного соединения между свариваемыми металлами. Отсутствие оплавов в изломе говорит о том, что они находятся внутри участков прихватившегося алюминия на границе с медью.

свариваемости, теперь имеют характерный вид вязкого разрушения при близком процентном содержании по площади излома (табл. 2). Это свидетельствует о том, что основная область разрушения теперь проходит по границе оплав-алюминий и имеет хрупкий характер.

Таблица 2 – Параметры режимов сварки взрывом, содержание оплавов и механические свойства биметалла медь-алюминий

№	Энергия W_2 , МДж/м ²	Скорость детонации $D=V_{кд}$, м/с	Скорость соударения V_c , м/с	Угол соударения, γ	Прочность на отрыв слоёв, МПа	Кол-во оплав., %	Кол-во компонентов в изломе, %		
							Al	Cu	Оплав
I	0,12	1700± 50	202	8,95	0	15	38	62	-
II	0,17	1700± 50	245	10,9	88	56	34	11	55
III	0,24	1700± 50	285	12,5	89	57	57	16	27

Повышение энергии W_2 до 0,17 МДж/м² приводит к росту содержания оплавов вдоль линии соединения до 56% и увеличению содержания меди в некоторых из них (рис. 6, б) до значений, соответствующих η -фазе (на основе соединения AlCu). Однако механические свойства на отрыв слоев соединения достигают значений равнопрочности. На поверхности разрушенного образца - выдавки (рис. 5, д) обнаружены обширные области оплавленного металла, покрытые сеткой трещин и малые островки чистой гладкой меди. Участки приварившегося алюминия, в отличие от образца № I полученного на режиме ниже нижней границы

При параметрах сварки взрывом, соответствующих энергии W_2 равной 0,24 МДж/м² происходит вовлечение в процессы совместной пластической деформации более глубоких слоев соударяемых металлов [7] при неизменном линейном содержании оплавов (57%), но происходит их заметное укрупнение в поперечнике (рис. 5, в). Содержание элементов Al/Cu равное 60/40 At.% (рис. 6, б) соответствует двухфазной области диаграммы $\eta+\theta$. При механических испытаниях соединение также оказалось равнопрочным (табл. 2). В изломе (рис. 5, е) теперь преобладают участки вязкого разрушения по алюминию. Внутри

видимых участков оплавленного металла отсутствуют трещины, а их количество снизилось практически вдвое с 55 до 27% при небольшом процентном увеличении площади занимаемой чистой медью с 11 до 16 %. Что говорит о том, что значительная часть прослойки оплавов (немногим более половины) осталась под участками вязко разрушенного алюминия, а основная зона разрушения (57%) сместилась в более глубокие слои алюминия и теперь имеет вязкий характер.

Выводы

При сварке взрывом меди с алюминием вблизи нижней границы свариваемости увеличение энергии пластических деформаций W_2 с 0,12 до 0,24 МДж/м² приводит к повышению линейного содержания оплавов с 15% до 57%. При этом концентрация меди в них увеличивается с 20 до 50 ат.%, что говорит о присутствии в оплавах соединений $CuAl_2$ и $AlCu$. Механические испытания показали, что энергии пластических деформаций $W_2 = 0,12$ МДж/м² недостаточно для получения прочного биметалла, разрушение образца происходит в основном по границе соединения медь-алюминий. При достижении нижней границы свариваемости ($W_2 = 0,17$ МДж/м²) прочность биметалла на отрыв слоев скачкообразно увеличивается с нуля до равнопрочного значения 89 МПа. Дальнейшее увеличение энергии W_2 до 0,24 МДж/м² так же приводит к равнопрочному соединению со смещением области разрушения образцов при испытаниях в алюминий.

Исследование изломов образцов показало, что на режиме ниже нижней границы свариваемости участки оплавленного металла оказываются внутри островков схва-

тывания алюминия. При достижении нижней границы излом проходит по границе оплав-алюминий и имеет хрупкий характер. Пересечение нижней границы свариваемости смещает основную зону разрушения в более глубокие слои алюминия, а характер разрушения изменяется на вязкий.

Библиографический список

1. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Ю. Г. Долгий, А. П. Пеев, И. А. Саломатин, В. А. Чувичилов, А. Е. Годенко, Н. П. Хромов // Энергетик. – 2001. – № 9. – С. 13-14.
2. Новые биметаллические переходные элементы для силовых электрических цепей / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, Ю. Г. Долгий, П. В. Берсенев, С. Я. Ихелис, Е. А. Чугунов, Б. А. Лемякин // Энергетик. – 1995. – № 4. – С. 23-24.
3. Новые конструкции токоподводящего узла катодной секции электролизёра алюминия / А. П. Пеев, Ю. Г. Долгий, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, Е. А. Чугунов, М. П. Кононов // Цветные металлы. – 2002. – № 8. – С. 51-54.
4. Техничко-экономическая эффективность применения новых конструкций композиционных токоподводов электролизера алюминия / А. П. Пеев, Ю. Г. Долгий, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. И. Кузьмин, А. Н. Кривенцов, А. А. Каравайный // Вестник машиностроения. – 2004. – № 6. – С. 77-80.
5. Физические основы и области практического применения сварки металлов взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, А. Н. Кривенцов, В. И. Кузьмин // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 17-21.
6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2009616788 от 7 дек. 2009 г. РФ Программное обеспечение расчёта параметров взаимодействия разнородных металлов при импульсном нагружении (сварка взрывом) / С. В. Хаустов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин; ВолгГТУ. – 2009.
7. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение - 1, 2005. – 544 с.
8. Кузьмин, В. И. Методики испытаний сваренных взрывом композиционных материалов: учеб. пособие / В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 66 с.
9. Физика взрыва / Орленко Л. П. – Изд. 3-е, испр. — В 2 т. Т. 1. – М.: Физматлит, 2004. – 832 с.
10. Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – Москва : Машиностроение, 1996. – 991 с.