

ИЗВЕСТИЯ

Волгоградского
государственного
технического
университета

ISSN 1990-5297



Серия
Сварка взрывом и свойства
сварных соединений

16+

№ 11 (306)
2025

Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук,
советник при ректорате Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)
И. А. НОВАКОВ

Редакционная коллегия:

Байбурин В. Б., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ, Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Безъязычный В. Ф., д-р техн. наук, проф., Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)
Бодров В. Н., д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)
Бребельс А., PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)
Буренин А. А., чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)
Голованчиков А. Б., д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ
Гуревич Л. М., д-р техн. наук, доц. ВолгГТУ
Злотин С. Г., д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)
Иванов А. М., д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)
Иващенко Н. А., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Королев А. В., д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Кузьмин С. В., чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)
Лысак В. И., академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Марков В. А., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МГТУ) им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Мертен Клеменс, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik (г. Штутгарт, Германия)
Навроцкий А. В., чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ
Нижегородцев Р. М., д-р экон. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)
Пай В. В., д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)
Пустовойт В. Н., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)
Русинов В. Л., чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета (ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)
Трюэль Жан-Луи, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция, вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»
Тхай Куанг Винь, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)
Федянов Е. А., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Фролов В. А., д-р техн. наук, проф., МАИ – Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)
Шаховская Л. С., д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ
Щербаков М. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ

Серия «СВАРКА ВЗРЫВОМ
И СВОЙСТВА СВАРНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ»

ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

В. И. Лысак, академик РАН, д-р техн. наук,
засл. деятель науки РФ

М. И. Алымов, член-корр. РАН, д-р техн. наук
(Институт структурной макрокинетики и
проблем материаловедения РАН, г. Черного-
ловка)

С. В. Кузьмин, член-корр. РАН, д-р техн. наук

В. И. Калита, д-р техн. наук (Институт
металлургии и материаловедения
им. А. А. Байкова РАН, г. Москва)

А. В. Крохалев, д-р техн. наук

Е. А. Левашов, д-р техн. наук (НИТУ «МИСиС»,
г. Москва)

В. В. Пай, д-р физ.-мат. наук (Институт
гидродинамики им. М. А. Лаврентьева
СО РАН, г. Новосибирск)

Л. Б. Первухин, д-р техн. наук (ООО «Битруб
Интернэшнл», г. Красноармейск)

В. Г. Шморзун, д-р техн. наук

А. А. Штерцер, д-р физ.-мат. наук (Институт
гидродинамики им. М. А. Лаврентьева
СО РАН, г. Новосибирск)

Е. В. Кузьмин, канд. техн. наук
(ответственный секретарь)
тел. 89047717348

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по объединенному каталогу
«Пресса России» – 80811
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Тел. Издательства ВолгГТУ:
(8442) 24-84-05
(8442) 24-84-08
zavrio@vstu.ru

Научный журнал
Издается с января 2004 г.
Выходит двенадцать раз в год

№ 11 (306)
Ноябрь
2025

УЧРЕДИТЕЛЬ
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:
Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: janovakov@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

**Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,
на отдельные статьи – сохраняется за автором**

Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного
технического университета» категорически запрещена без оформления
договора в соответствии с действующим законодательством РФ

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского
государственного технического университета» обязательна

Head Editor of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, Advisor in the Rector's Office of VSTU

Editorial board:

Baiburin V. B., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Bezyazychny V. F., D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov (Rybinsk, Russia)

Bodrov V. N., D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)

Brebels A., PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)

Burenin A. A., Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)

Golovanchikov A. B., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Gurevich L. M., D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU

Zlotin S. G., D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Ivanov A. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)

Ivashchenko N. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Korolev A. V., D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Kuzmin S. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Kurayev A. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)

Lysak V. I., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Markov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

Merten K., D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)

Navrotsky A. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

Nizhegorodtsev R. M., D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Pai V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Pustovoyt V. N., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

Rusinov V. L., Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

Thai Quang Vinh, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)

Truel J.-L., D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club "Kondratiev Circle"

Fedyanov E. A., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

Frolov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., "MAI Russian State Technological University named after K. E. Tsiolkovsky" (Moscow, Russia)

Shakhovskaya L. S., D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU

Shcherbakov M. V., D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU

**SERIES «EXPLOSIVE WELDING AND
PROPERTIES OF WELDED JOINTS»**

IZVESTIA



**VOLGOGRAD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY**

The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees.

Editorial board:

Chairman

Lysak V. I., Academician of RAS, D. Sc. (Engineering),
Honored Scientist of the Russian Federation

Alymov M. I., Corresponding Member of RAS, D. Sc.
(Engineering) (Merzhanov Institute of Structural
Macrokinetics and Materials Science of the RAS,
Chernogolovka)

Kuz'min S. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc.
(Engineering)

Kalita V. I., D. Sc. (Engineering), Chief research
worker (A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Ma-
terials Science of the RAS)

Krokhalev A. V., D. Sc. (Engineering)

Levashov E. A., D. Sc. (Engineering) (National Univer-
sity of Science and Technology «MISIS», Moscow)

Pai V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences)
(Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the SB
RAS, Novosibirsk)

Pervukhin L. B., Dr. Sc. (Engineering) (Bitrub Inter-
national, Krasnoarmeysk)

Shmorgun V. G., D. Sc. (Engineering)

Shterzer A. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sci-
ences) (Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of
the SB RAS, Novosibirsk)

Kuz'min E. V., Cand. Sc. (Engineering),
(executive secretary)
tel. 89047717348

International index of the journal ISSN 1990-5297.

The journal is distributed by subscription.
Index of the magazine according to the united cata-
log «Press of Russia» – 80811.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e80811/)

Tel. of VSTU editorial office:

8 (8442) 24-84-05

8 (8442) 24-84-08

zavrio@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

Twelve times a year

№ 11 (306)

November 2025

FOUNDER

**FSBEI of Higher Education
«Volgograd State Technical University»**

Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – (+7 8442) 24-80-00

E-mail: ianovakov@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of
Communication, IT and Mass Communications (Roscomnadzor)
Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of
Volgograd State Technical University

***The copyright for the journal in general belongs to the Founder,
for separate articles – to authors.***

*Reprint from the journal «Izvestia VSTU» is strongly forbidden without conclu-
sion of an agreement in accordance with the legislation of the RF
When reprinting the materials, the citation to the journal «Izvestia VSTU»
is obligatory*

<i>Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай</i> О расчёте максимального импульса продуктов детонации при сварке взрывом в режиме сильного недоразгона ударника.....	5
<i>С. В. Хаустов, В. В. Пай, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Д. Кочкалов, В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко</i> Терморезистивный метод измерения тепловых потоков от ударно-сжатой среды в зазоре между пластинами при сварке взрывом.....	12
<i>О. Л. Первухина, И. В. Денисов, Л. Б. Первухин, Т. А. Шишкин</i> Исследование возможности применения гранулитов для сварки взрывом	20
<i>М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Д. В. Арбатский, Д. С. Жахов, В. А. Тараненко</i> Исследование влияния воздействия ультразвука на промежуточный слой при сварке трехслойного соединения ВТ1-0+А5+АМг6.....	29
<i>А. И. Епишин, А. Ю. Малахов, В. В. Ткаченко</i> Калибровка уравнения Джонсона-Кука для компонентов термобиметалла латунь/Инвар.....	36
<i>А. Н. Ву Ван, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко</i> Исследование химического и фазового состава зоны соединения биметалла алюминий-медь, полученного сваркой взрывом вблизи нижней границы свариваемости.....	44
<i>А. В. Крохалев, Д. Р. Черников, В. О. Харламов, С. А. Ганцев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак</i> Структура и химический состав порошковых материалов системы «титан-железо» после взрывного прессования.....	53
<i>Д. Р. Черников, А. В. Крохалев, В. О. Харламов, А. Д. Рулькова, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак</i> Влияние твердофазного спекания на структуру и фазовый состав порошковых материалов, полученных взрывным прессованием порошковых смесей титана и железа.....	62

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-5-11

Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай*

**О РАСЧЁТЕ МАКСИМАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ
В РЕЖИМЕ СИЛЬНОГО НЕДОРАЗГОНА УДАРНИКА**

ООО «Протол», Екатеринбург

***Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск**

Автор, ответственный за переписку: Юрий Петрович Бесшапошников (bm@protol.ru)

Аннотация: Предложен метод расчёта максимального импульса продуктов детонации в условиях сильного ускорения ударника при сварке взрывом.

Ключевые слова: Угол поворота, импульс, давление, продукты детонации, сварка взрывом, зазор, ударник

Для цитирования: Бесшапошников Ю. П., Пай В. В. О расчёте максимального импульса продуктов детонации при сварке взрывом в режиме сильного недоразгона ударника. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):5–11.

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-5-11>

Yu. P. Besshaposhnikov, V. V. Pai*

**ON THE DETONATION PRODUCT MAXIMUM IMPULSE CALCULATION AT EXPLOSION WELDING
IN THE IMPACTOR STRONG ACCELERATION MODE**

Protol Ltd, Yekaterinburg

***Lavrentyev Institute of hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk**

The author responsible for the correspondence: Yuri Petrovich Beshaposhnikov (bm@protol.ru)

Annotation: A method for calculating the maximum impulse of detonation products under impactor strong acceleration during explosion welding is proposed.

Keywords: Bending angle, impulse, pressure, detonation products, explosion welding, stand-off, impactor

To cite: Besshaposhnikov Yu. P., Pai V. V. On the detonation product maximum impulse calculation at explosion welding in the impactor strong acceleration mode. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):5–11.

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-5-11>

Введение

В [1], на основе двумерной модели [2], представлена модернизированная методика определения предельного угла поворота пакета – композиции из соударившихся частей пластин при их косом соударении. Однако, как в [1], так и [2] предполагалось, что первая (ударник) и вторая пластины достаточно удалены друг от друга. В настоящей работе предложен критерий выбора минимального (критического) значения зазора между ударником и второй пластиной, при котором расчётная методика еще остается справедливой. Также разработан способ рас-

чёта максимального импульса ПД при зазоре между этими пластинами меньше критического значения.

Методы расчёта

Выпишем из [1] некоторые обозначения, которыми будем пользоваться в настоящей работе: (x, y) – система декартовых координат, связанная с фронтом детонации, где ось x направлена вдоль первоначального положения ударника в противоположную от движения фронта сторону, ось y – в сторону смещения пластины; y_0 – расстояние от ударника до мишени (последняя пластина); x_0 – абсцисса начала движения пакета; H –

толщина слоя взрывчатого вещества (ВВ); r – отношение массы ВВ к массе пакета или пластины (коэффициент нагрузки); k – интегральный показатель политропы заряда ВВ. Введём дополнительные обозначения: i_y – проекция на ось y максимального импульса продуктов детонации; i_{yr_0} – значение i_y , соответствующее полному разгону ударника; i_{yr} – значение i_y , соответствующее полному разгону пластины массой, равной массе пакета; h – первоначальное расстояние (зазор) между соседними пластинами; $\beta_{\text{пред}}$ – предельный угол поворота пакета; p_D – давление детонации.

Пусть $x_0 \rightarrow 0$ ($h \rightarrow 0$), тогда $i_y \rightarrow i_{yr}$. Представленный в [1, 2] метод определения $\beta_{\text{пред}}$ (или i_y) здесь приводит к физическому противоречию: $i_y \rightarrow i_{yr_0}$. Отсюда следует, что существует некоторое критическое значение $x_{\text{кр}}$ (или $h_{\text{кр}}$), меньше которого этот (основной) метод формально теряет силу, а поэтому требуется разработать другой (дополнительный) метод расчёта, действительный при $x_0 \leq x_{\text{кр}}$.

Рассмотрим условие применимости основного метода расчёта:

$$x^* \geq x_0 \geq x_{\text{кр}},$$

где x^* – значение x , при котором импульс ПД, с практической точки зрения, достигает максимального значения, то есть считается, что пластины после соударения разошлись до предельной скорости.

Тогда можно пользоваться приближением:

$$p(x^*) \approx p_{r_0}(x^*),$$

где p – давление в ПД у поверхности пакета; p_{r_0} – давление в ПД у поверхности свободно метаемого ударника.

В [2] абсциссу x^* находили из выражения:

$$\frac{p_{r_0}(x^*)}{p_D} = \varepsilon,$$

где ε – наперёд заданная сколь угодно малая величина.

В [1] предложено использовать равенство:

$$\frac{p_r(x^*) - p_{r_0}(x^*)}{p_D} = \varepsilon,$$

где p_r – давление в ПД у поверхности свободно метаемой пластины, массой равной массе пакета с коэффициентом нагрузки r .

Последняя формула, в отличие от предыдущего выражения, обеспечивает более корректный выбор ε , что позволяет, на пример, строить графические зависимости $\beta_{\text{пред}}$ от h с плавным изменением предельного угла.

В настоящей работе x^* определяли из уравнения:

$$p_0(x^*) - p_{r_0}(x^*) = \Delta p_{\text{min}},$$

где p_0 – пиковое давление остаточных продуктов детонации (часть ПД, которая продолжает воздействовать на пластины с момента их соударения), равное давлению на фронте отраженной ударной волны в ПД при соударении ударника и мишени, у которой масса равна массе пакета; Δp_{min} – приращение давления на фронте отраженной ударной волны в ПД при $x_0 = x^*$.

Главным достоинством этого уравнения является его способность к унификации метода поиска x^* . Это достигается за счет задания одного достаточно малого значения $(\Delta p_{\text{min}} / p_D)$, единого для всех режимов соударения. Так, в настоящей работе использовалось значение $(\Delta p_{\text{min}} / p_D) = 10^{-6}$, при котором $\varepsilon \sim (10^{-13} - 10^{-17})$. Проверка показала, что дальнейшее уменьшение $(\Delta p_{\text{min}} / p_D)$ уже не оказывало существенного влияния на расчётные значения $\beta_{\text{пред}}$.

Применив основной метод определения предельного угла поворота пакета из двух пластин, с учётом приведенных выше поправок, было установлено, что с уменьшением h величина $\beta_{\text{пред}}$ растёт до определенного максимума, после которого снижается, но с

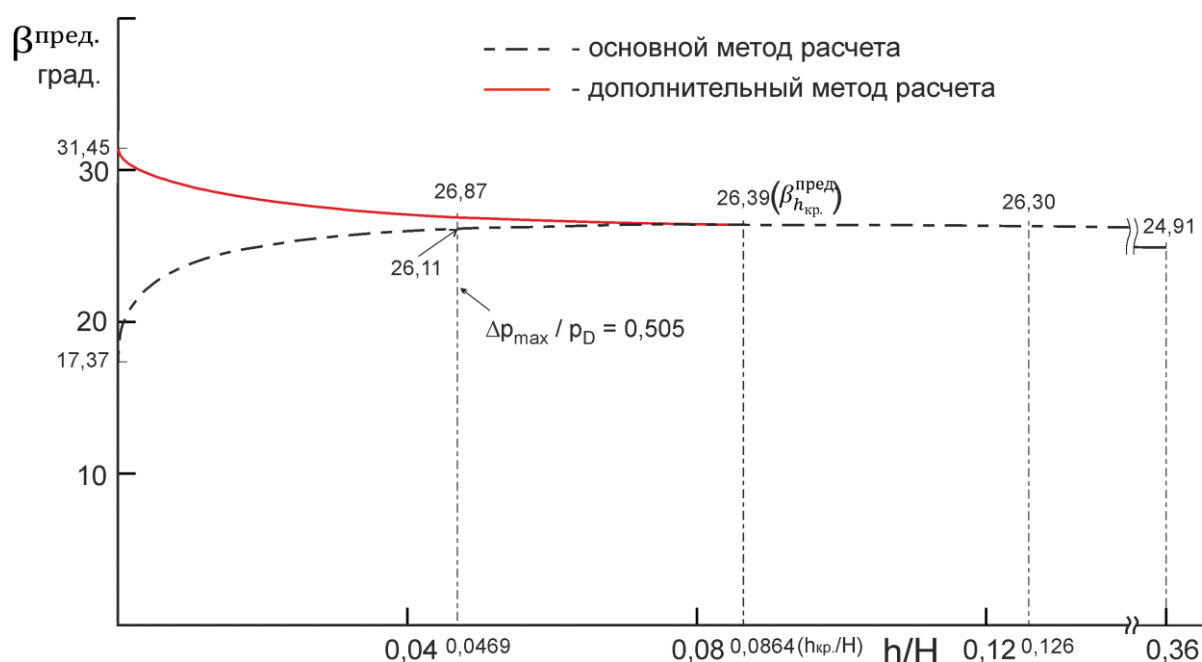


Рис. 1. Графические зависимости предельного угла от зазора между ударником и мишенью с одинаковыми коэффициентами нагрузки, равными 12

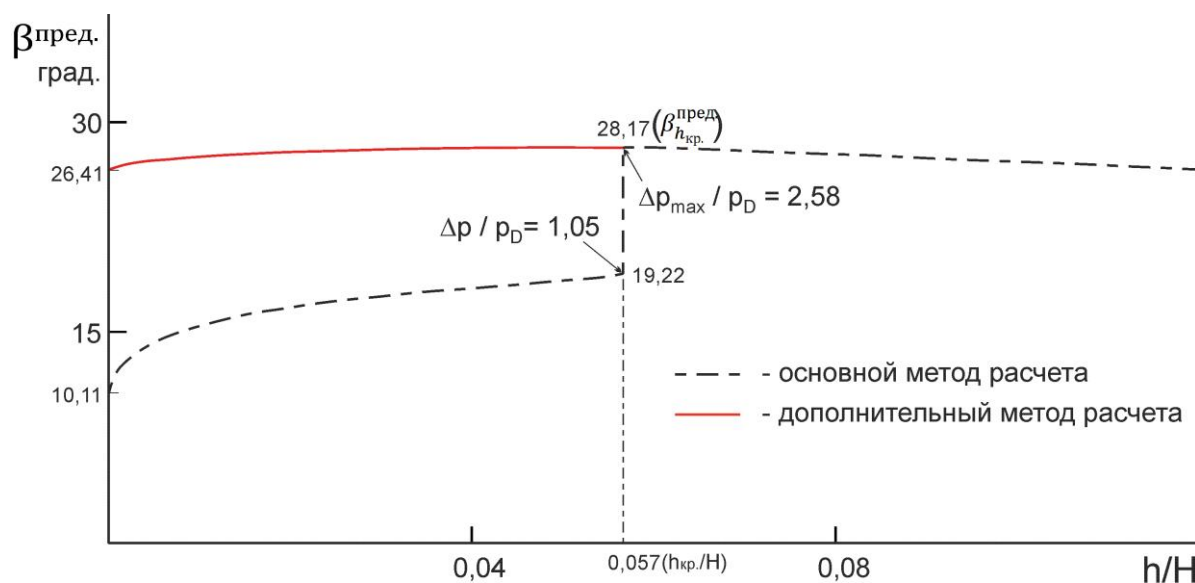


Рис. 2. Графические зависимости предельного угла от зазора между ударником и мишенью, у которых коэффициент нагрузки равен 12 и 5 соответственно

темпом, превосходящим предыдущий темп роста. В качестве примера, на рис. 1 показана зависимость $\beta_{пред.}$ от h/H при $k = 2,5$ для случая соударения двух пластин, равных по массе. Откуда видно, что в диапазоне h/H от 0,0864, где $\beta_{пред.}$ достиг своего максимума, до 0,0469, где зафиксировано максимальное приращение давления (Δp) на фронте отра-

женной ударной волны в ПД, образованной в результате соударения ударника и мишени, предельный угол уменьшился на $0,28^\circ$. А на таком же расстоянии с противоположной стороны от максимума в диапазоне h/H от 0,126 до 0,0864 этот угол изменился (увеличился) всего на $0,09^\circ$. На рис. 2 представлен предельный случай обнаруженной законо-

мерности. Здесь показана аналогичная зависимость при $k = 2,5$, где по достижении $\beta_{\text{пред.}}$ и Δr своих максимумов эти величины терпят разрыв. Перепад у Δr объясняется процессом перехода от прямой к косой отраженным ударным волнам в ПД [3]. Наличие же перепада у $\beta_{\text{пред.}}$, по-видимому, не имеет физического обоснования. Исходя из вышеизложенного, можно предположить, что максимум функции $i_y(x_0)$ является критерием выбора критического значения зазора между ударником и второй пластиной. На рис. 1 и 2 – это точка с координатами $(\beta_{h_{\text{кр.}}}^{\text{пред.}}, h_{\text{кр.}})$.

Теперь рассмотрим условие, в рамках которого требуется разработать дополнитель-

$$\Delta\alpha = \alpha_0 \frac{X_0}{X_{\text{кр.}}}$$

Подстановка этого выражения в предыдущее уравнение дает окончательный вид зависимости для α в указанном выше интервале:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{X_0}{X_{\text{кр.}}}\right). \quad (2)$$

После интегрирования (1), с учетом (2) и соответствующих преобразований, получим:

$$I_y = I_{\text{кр.}} + \frac{X_{\text{кр.}}}{\alpha_0} \ln \cos \alpha. \quad (3)$$

Угол α_0 определяется через подстановку в (3) известного $I_{\text{уг.}}$.

На рис. 1 и 2 представлены графики, построенные с применением вышеизложенно-

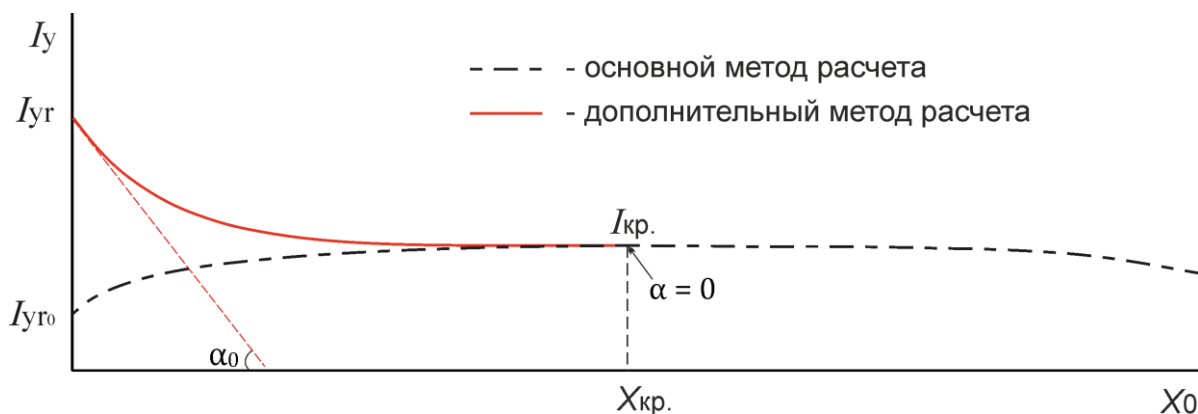


Рис. 3. Иллюстрация зависимостей I_y от X_0 для двухслойного метания пластин:

$I_y = \frac{i_y}{m_{\text{ВВ}} D}$, где $m_{\text{ВВ}}$, D – масса и скорость детонации ВВ, соответственно; $X_0 = x_0/H$;
 α – угол наклона к оси абсцисс касательной к функции $I_y(X_0)$ в текущей точке;
 α_0 – начальное значение α .

ный способ расчёта i_y :

$$x_{\text{кр.}} \geq x_0 \geq 0.$$

Согласно рис. 3:

$$\frac{dI_y}{dX_0} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Пусть:

$$\alpha = \alpha_0 - \Delta\alpha,$$

где $\Delta\alpha$ – некоторое приращение угла α .

Из соображения простоты считаем, что $\Delta\alpha$ изменяется по линейному закону:

го дополнительного метода расчёта. Угол $\beta_{\text{пред.}}$ находили согласно закону сохранения импульса, используя выражение:

$$(1) \quad I_y = \frac{\sin \beta^{\text{пред.}}}{r}$$

Отметим, что в случае многослойного метания дополнительный метод распространяется только на метание слоя, состоящего из первых двух пластин. Метание последующих слоёв рассчитывается с использованием основного метода.

Результаты расчетов и экспериментов

№ опыта	ВВ (плотность x10 ³ , кг/м ³)	H x 10 ³ , м	D, м/с	Материал пластины, начиная сверху от заряда	Толщина пластины x10 ³ , мм	τ	κ	h _{кр.} x 10 ³ , м (β _{пред.} h _{кр.} , град.)	h	(y - y ₀)	β _y , град.							
											Расчет		Эксперимент					
											осн.	доп.*						
1	Аммонит АТ-1 (1,0)	70	2970	Алюминий АД0	2	12,9	2,6	5,28 (25,16)	1,5	∞	24,27	26,63	-					
2					12,9	24,2				23,13	24,92	24,8						
2			2975		10	2,59		8,76 (12,95)		∞	12,54	13,45	-					
3					10	2,59		21,0		11,65	11,53	11,6						
3			2850		2	12,9		1,82 (14,50)		∞	14,48	14,55	-					
					10	2,59		30,5		14,35	14,41	15,0						
4	Смесь 6ЖВ /АСК =1/6 (0,87)	50	2270	Медь М1	4	1,22	6,45 (12,77)	4,0	∞	12,74	12,80	-						
Титан ВТ1-0				4	2,42	10,9			10,37	10,39	10,4							
5	Смесь 6ЖВ /АСК =1/5 (0,87)	40	2330	Медь М1	4	0,98	4,86 (10,93)	4,5	∞	10,93	10,93	-						
Титан ВТ1-0				4	1,93	13,1			9,58	9,58	9,8							
6	Смесь 6ЖВ /АСК =1/4 (0,87)	30	2210	Медь М1	4	0,73	3,28 (8,79)	4,0	∞	8,79	-	-						
Титан ВТ1-0				4	1,45	12,5			8,03	-	8,1							
7	Аммонит 6ЖВ (0,90)	20	3970	Ал. сплав АМг2	1,9	3,53	2,45	2,75 (18,93)	1,5	∞	18,80	19,11	-					
				Алюминий А6	1,5	4,44								-	1,0	∞	13,42	13,50
				Ал. сплав АМг2	1,9	3,53		-	1,0	12,3	12,97	13,04	13,4					
														3,34				
8	АСМ (0,85)	20	1510	Алюминий А6	1,5	4,20	2,0	3,89 (26,16)	1,5	∞	25,53	26,18	-					
				Ал. сплав АМг2	1,9	3,34								-	1,0	∞	18,88	19,03
				Ал. сплав АМг2	1,9	3,34		-	1,0	10,0	17,44	17,58	17,0					
														6,87				
9	Смесь АСМ/ДМ =3/1 (0,70)	50	3125	Алюминий А6	1,5	8,64	2,15	6,89 (31,51)	1,5	∞	29,54	31,99	-					
														Ал. сплав АМг2	1,9	6,87	-	1,0
				Ал. сплав АМг2	1,9	6,87		6,89 (31,51)	1,5	∞	29,54	31,99	-					
														Алюминий А6	1,5	8,64	-	1,0
10			3070	Ал. сплав АМг2	1,9	6,87		-	1,9	∞	18,26	18,66	-					
				Алюминий А6	1,5	8,64		-	1,0	∞	15,07	15,41	-					
				Ал. сплав АМг2	1,9	6,87		-	26,3	14,73	15,05	15,8						
				11	Смесь АСМ+ 5%ИМ.(0,72)	50		3200	Ал. сплав АМг2		7,07	2,35	5,90 (26,94)	1,5	∞	25,80	27,77	-
									Алюминий А6	1,5	8,89							
									Ал. сплав АМг2	1,9	7,07		-	24,7	18,16	18,53	19,0	

Примечания: АСК(М) – аммиачная селитра кристаллическая (мелкого помола), Гл. – глицерин технический, ИМ – индустриальное масло; ДМ – древесная мука (содержание сыпучих компонентов для смесевых взрывчатых веществ дано в объемном соотношении, содержание жидких компонентов – от объема аммиачной селитры); β_u – угол поворота пакета на расстоянии u от ударника. * – в опытах с многослойным метанием расчеты по дополнительному методу проводились только для метания слоя из первых двух пластин.

Экспериментальная проверка

В таблице приведены результаты расчетов и экспериментов, полученные с использованием опытных данных [4]. Из этой таблицы видно, что во всех опытах, кроме оп. №6, $h < h_{кр}$. При этом $h_{кр}$ существенно уменьшается, если масса второй пластины значительно больше массы ударника (оп. №3).

Из той же таблицы следует, что значения $\beta_{пред}$, полученные с использованием как основного, так и дополнительного методов расчета, хорошо совпадают с соответствующими значениями этого угла, полученными из экспериментов. Расхождения расчета, по основному и дополнительному методам, и эксперимента колебались в диапазоне от 0,29% (оп. № 4) до 6,77% (оп. № 10), что в среднем составило 3,12%, и от 0,1% (оп. № 4) до 4,75% (оп. № 10), что в среднем составило 2,52%, соответственно. Это показывает, что даже незначительные в масштабе сварки взрывом зазоры между ударником и второй пластиной оказались недостаточно малыми, чтобы результаты по основному и дополнительному расчетным методам существенно различались между собой.

Выводы

1. Оптимизирован основной метод расчета максимального импульса продуктов детонации для косого соударения нескольких пластин в условиях сварки взрывом.

2. Разработан дополнительный метод расчета максимального импульса продуктов детонации для косого соударения двух пластин, когда зазор между ними меньше критического значения.

3. Критическое значение зазора определяется по основному методу расчета и соответствует экстремуму функции максимального импульса продуктов детонации от размера зазора.

4. В промышленных условиях сварку взрывом проводят на режимах, при которых зазор между пластинами, если и меньше критического значения, то не настолько, чтобы результаты, полученные с помощью основного и дополнительного методов расчета, существенно различались.

Библиографический список

1. Бесшапошников, Ю. П. Единственность решения задачи о многослойном метании пластин скользящей детонационной волной / Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2024. – № 11(294). – С. 5-11.
2. О многослойном метании пластин скользящей детонационной волной / Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай, А. А. Петунин, В. И. Чернухин // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2018. – № 11 (221). – С. 22-27.
3. Физика взрыва / Орленко Л. П. – Изд. 3-е, испр. — В 2 т. Т. 1. – М. : Физматлит, 2004. – 832 с.
4. Бесшапошников, Ю. П. Прямая ударная волна в продуктах детонации при сварке взрывом / Ю. П. Бесшапошников, В. В. Пай, В. И. Чернухин // Известия ВолгГТУ. Серия: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2019. – № 11 (234). – С. 11-18.

Информация об авторах

Юрий Петрович Бесшапошников – кандидат технических наук, научный консультант ООО «Протол»

<https://orcid.org/0000-0002-9455-5765>

e-mail: ybesshaposhnikov@yandex.ru

Владимир Васильевич Пай – доктор физико-математических наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией динамических воздействий Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

e-mail: pai@hydro.nsc.ru

Information about the authors

Yuri P. Besshaposhnikov, Candidate of Technical Sciences, Scientific advisor of Protol Ltd.

<https://orcid.org/0000-0002-9455-5765>

e-mail: ybesshaposhnikov@yandex.ru

Vladimir V. Pai - Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Acting Head of the Laboratory of Dynamic Effects of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

e-mail: pai@hydro.nsc.ru

Вклад авторов

Ю. П. Бесшапошников - разработка методик, проведение расчетов, анализ полученных результатов, написание текста статьи

В. В. Пай - постановка задачи, обсуждение результатов

Contribution of the authors

Y. P. Besshaposhnikov – development of methods, calculation, analysis of the obtained results, wrote the article

V. V. Pai – task setting, discussion of results

*Статья поступила в редакцию 11.09.2025, доработана 31.10.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 11.09.2025, revised 31.10.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-12-19

С. В. Хаустов, В. В. Пай*, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Д. Кочкалов, В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко

**ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ УДАРНО-СЖАТОЙ СРЕДЫ
В ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ПЛАСТИНАМИ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ**

Волгоградский государственный технический университет

** Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск*

Автор, ответственный за переписку: Святослав Викторович Хаустов (regent_k@mail.ru)

Аннотация: В настоящей работе разработан терморезистивный метод определения тепловых потоков для измерения величины теплового потока в ударно-сжатых средах. Суть метода заключается в изменении электрического сопротивления медного проводника при его нагреве высокоскоростным нагретым потоком газа. Предложена конструкция малоинерционного терморезистивного датчика с толщиной чувствительного медного слоя в 15 мкм и временным разрешением до 2,5 – 3 мкс. Впервые получены значения теплового потока по длине области ударно-сжатого газа при сварке взрывом стальных пластин. Показано, что на мощность теплового потока влияет характер протекания кумулятивных процессов перед точкой контакта, которые в свою очередь зависят от материала свариваемых пластин.

Ключевые слова: Сварка взрывом, ударно-сжатый газ, тепловой поток, терморезистивный метод, кумуляция

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20284, <https://rscf.ru/project/25-29-20284/>

Для цитирования: Хаустов С. В., Пай В. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Кочкалов А. Д., Агеев В. В., Емельяненко М. Ю. Терморезистивный метод измерения тепловых потоков от ударно-сжатой среды в зазоре между пластинами при сварке взрывом. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):12–19. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-12-19>

S. V. Khaustov, V. V. Pai, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, A. D. Kochkalov, V. V. Ageev, M. Yu. Emelyanenko

**THERMORESISTIVE METHOD FOR MEASURING HEAT FLUXES FROM A SHOCK-COMPRESSED
MEDIUM IN THE GAP BETWEEN PLATES DURING EXPLOSION WELDING**

Volgograd State Technical University

** Lavrentyev Institute of hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk*

The author responsible for the correspondence: Svyatoslav Viktorovich Khaustov (regent_k@mail.ru)

Annotation: In this paper, a thermoresistive method for measuring heat flux in shock-compressed media is developed. The method relies on changing the electrical resistance of a copper conductor when heated by a high-velocity, heated gas flow. A low-inertia, thermoresistive sensor with a sensitive copper layer thickness of 15 μm and a time resolution of up to 2.5-3 μs is proposed. For the first time, heat flux values were obtained along the length of the shock-compressed gas region during explosion welding of steel plates. It is shown that the heat flux is influenced by the nature of cumulative processes before the contact point, which in turn depend on the material of the plates being welded.

Keywords: Explosion welding, shock-compressed gas, heat flux, thermoresistive method, cumulation

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 25-29-20284, <https://rscf.ru/project/25-29-20284/>

To cite: Khaustov S. V., Pai V. V., Kuzmin S. V., Lysak V. I., Kochkalov A. D., Ageev V. V., Emelyanenko M. Yu. Thermoresistive method for measuring heat fluxes from a shock-compressed medium in the gap between plates during explosion welding. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):12–19. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-12-19>

При сварке взрывом металлических пластин по наиболее распространенной плоско-параллельной схеме в воздушном зазоре между пластинами при их соударении возникает область ударно-сжатого газа (УСГ), нагретого до нескольких тысяч градусов [1,

2]. Двигаясь перед точкой контакта область УСГ за счет конвективного теплообмена нагревает поверхности пластин еще до их соударения [3]. В работе [4] предложен экспериментальный термопарный метод, основанный на эффекте Зеебека, для определения теплового потока от ударно-сжатого воздуха и позволяющий определять температуры подогрева поверхностей пластин перед соударением. Заполнение зазора инертными газами, такими как аргон и гелий [5] показало, что мощность теплового потока от УСГ существенно зависит от кумулятивных процессов перед точкой контакта (количеством металлических частиц и их распределением по длине области УСГ) и плотности газа, заполняющего зазор. Однако используемый в работах [4, 5] термопарный метод исключительно чувствителен к электрическим помехам, возникающим при высокоскоростном соударении металлов. Это ограничивает использование термопарного метода при сварке взрывом немагнитными материалами.

В данной работе разработан терморезистивный метод, основанный на изменении электрического сопротивления медного проводника при его конвективном нагреве ударно-сжатой средой.

В качестве терморезистивного датчика использовалось покрытие из медной фольги 1 размещенной на подложке 2 (см. рис. 1). Медное покрытие подвергалось травлению таким образом, чтобы образовалась плоская бифилярная катушка, уменьшающая паразитную индуктивность и магнитные помехи за счёт взаимной компенсации магнитных полей встречно-направленных токов в соседних проводниках. Зависимость электрического сопротивления такого датчика от температуры описывается формулой:

$$R(T) = \frac{\rho L}{S} [1 + \alpha(T - 20)], \quad (1)$$

где $\alpha = 0,0043 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – температурный коэффициент электрического сопротивления меди, $\rho = 1,72 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди при 20°C .

Сопротивление терморезистивного датчика при толщине медного слоя $\sim 15 \text{ мкм}$ и

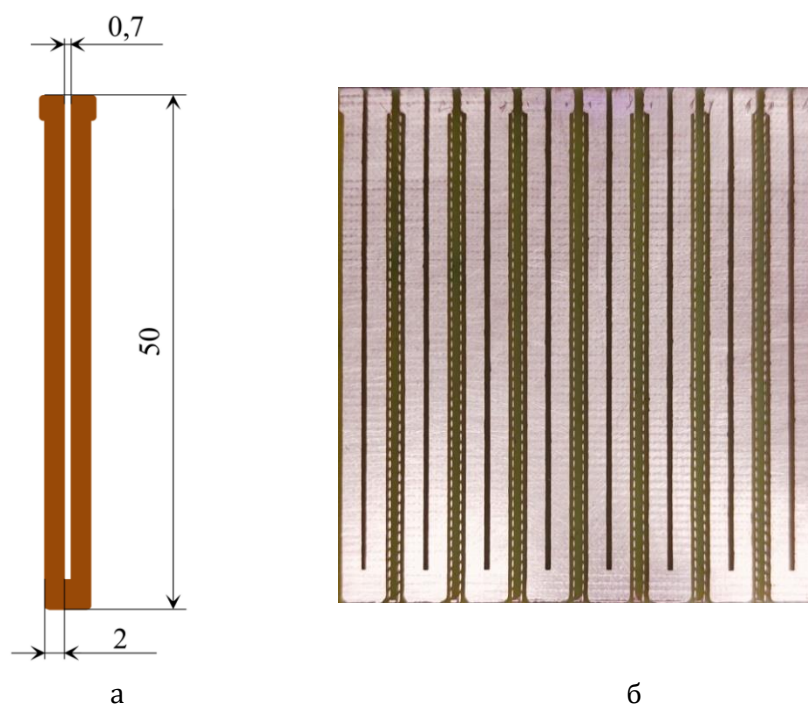


Рис. 1. Геометрические размеры (а) и внешний вид (б) планарных терморезистивных датчиков

геометрических размерах указанных на рис. 1 составляло $0,055 \pm 0,001$ Ом.

Схема эксперимента показана на рис. 2. Сваривались стальные пластины толщиной 3,5 мм и размерами 465 на 150 мм установленные по плоско-параллельной схеме с зазором 8 мм. Терморезистивный датчик размещался на изоляторе из дерева в колодце в неподвижной стальной пластине (рис. 2, б)

на расстоянии 360 мм от начала пластины. Для обеспечения одинаковых условий теплообмена с ударно-сжатым газом, плоскость датчика была параллельна плоскости пластин. Верхняя пластина металась зарядом взрывчатого вещества (смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком в соотношении 67/33 % об.) высотой $H=25$ мм. Скорость детонации контролировалась электроконтактным спо-

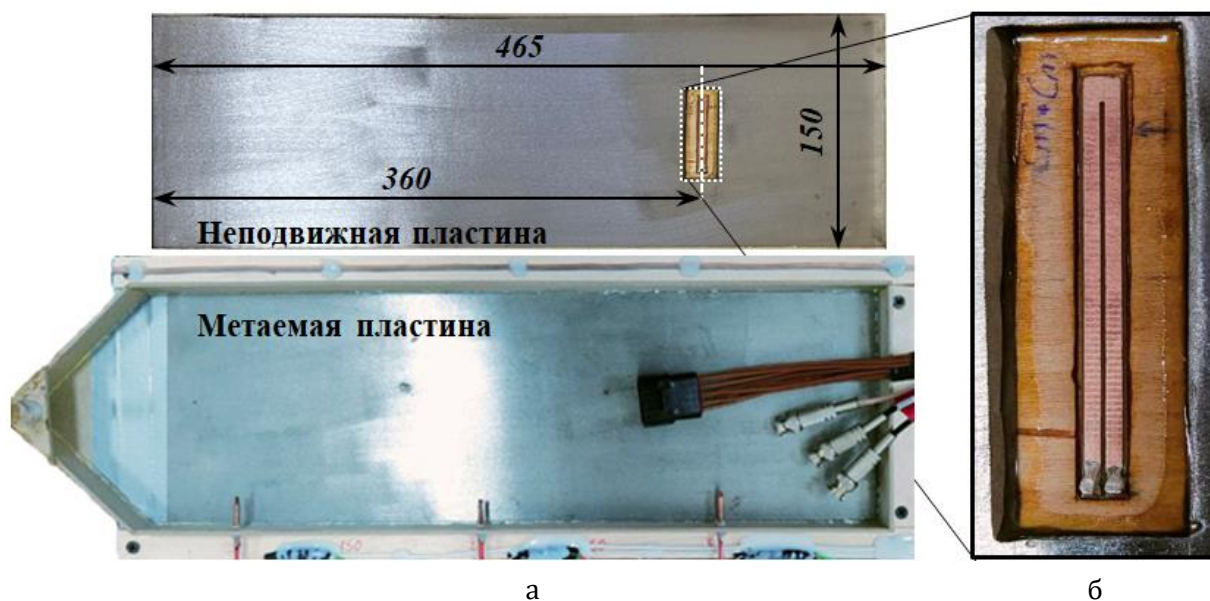


Рис. 2. Схема измерения теплового потока при сварке взрывом стальных пластин (а) толщиной 3,5+3,5 мм в среде воздуха и колодец в неподвижной пластине с размещенным на изоляторе терморезистивным датчиком (б)

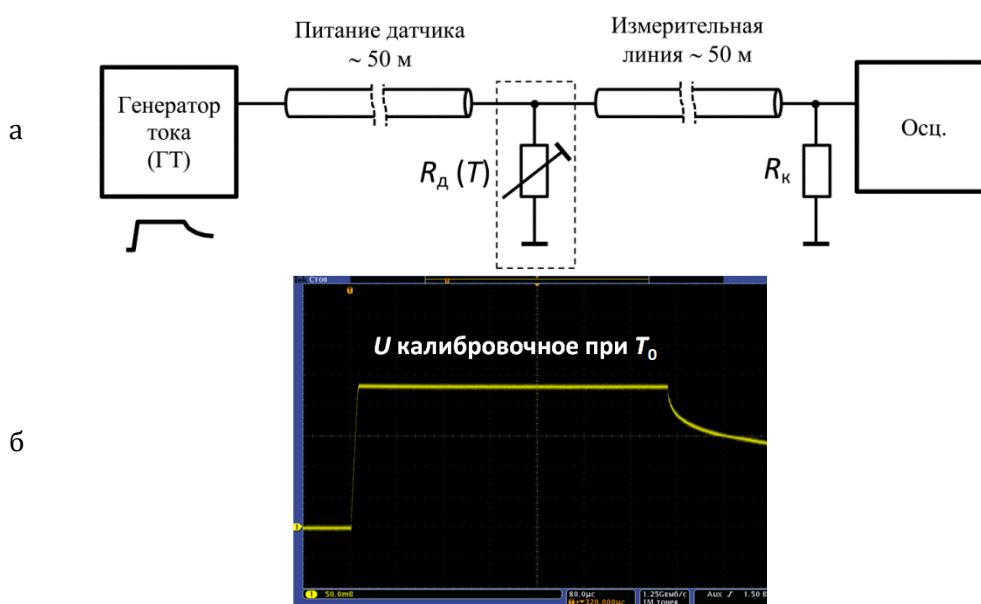


Рис. 3. Схема подключения терморезистивного датчика к питающей и измерительной аппаратуре (а) и калибровочное напряжение на датчике (б)

собою и составила 2660 ± 50 м/с.

После начала сварки взрывом (момент инициирования заряда ВВ) через датчик пропусклся импульс постоянного тока ($I_{ГТ} = 2,73 \pm 0,001$ А) длительностью 0,4...1,3 мс. Под воздействием области ударно-сжатого газа чувствительный медный слой толщиной 15 мкм прогревается за ~2,5...3 мкс и изменяет свое электрическое сопротивление, что фиксируется цифровым осциллографом (Tektronix MSO 4054). Датчик под-

ключался к питающей и измерительной аппаратуре по четырёхточечной схеме, так как показано на рис. 3, а. Калибровочное напряжение $U_{\text{кал}}$ при прохождении импульса постоянного тока через терморезистивный датчик при температуре равной температуре окружающей среды T_0 составляло ~152 мВ (см. рис. 3, б).

На рис. 4 показана осциллограмма процесса нагрева терморезистивного датчика. В какой-то момент времени фронт ударной

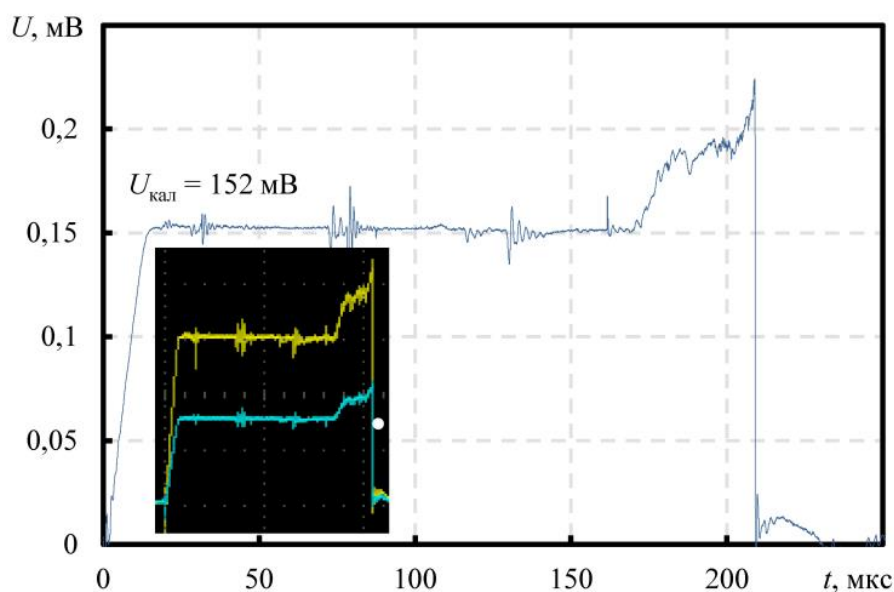


Рис. 4. Типичная осциллограмма напряжения на терморезистивном датчике при сварке взрывом стальных пластин в среде воздуха ($V_k = 2660$ м/с)

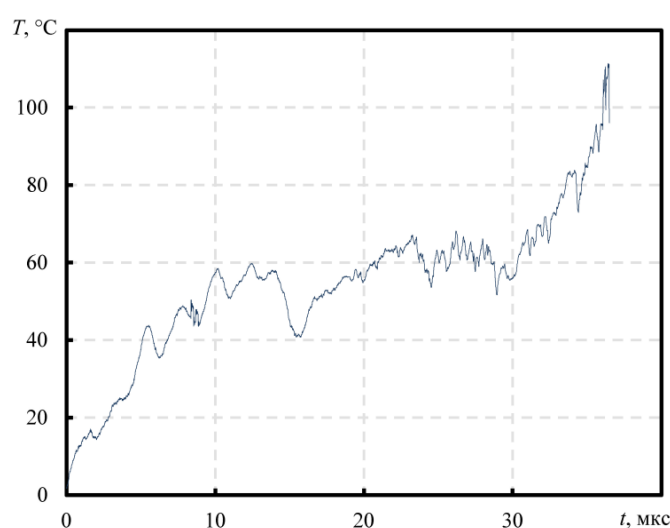


Рис. 5. Экспериментальная зависимость средней температуры медного слоя терморезистивного датчика

волны достигает датчика и нагревает его конвективным тепловым потоком. Это приводит к монотонному росту напряжения, обусловленного увеличением сопротивления датчика, вплоть до момента налета метаемой пластины на датчик, его разрушения и резкого обрыва сигнала. Время воздействия t_l области УСГ на датчик, расположенный на расстоянии $L=0,36$ м от начала сварки, составило ~ 36 мкс. При скорости точки контакта V_k равной скорости детонации D скорость фронта ударной волны в воздухе составила [5]:

$$V_{yB} = \frac{L}{L/V_k - t_l} = 3620 \text{ м/с},$$

а размеры высокотемпературной области, в момент достижения датчика фронтом ударной волны в газе, достигли:

$$L(1 - V_k/V_{yB}) = 95 \text{ мм}.$$

Таким образом, скорость фронта ударной волны в воздухе составила $\sim 1,36V_k$, что хорошо соотносится с данными работ [4, 5] где

терморезистивного датчика от времени по формуле:

$$\Delta T(t) = \frac{\left(\frac{U(t)_{\text{экс}}}{U_{\text{калиб}}} - 1\right)}{0,0043}. \quad (2)$$

Рассчитанное таким образом изменение температуры ΔT датчика показано на рис. 5. Начальный прогрев медного слоя при воздействии фронта ударной волны осуществлялся за время 2,5-3 мкс (при общем времени теплового воздействия около 36 мкс) и в дальнейшем разница температур между внешней и внутренней поверхностью медного слоя не превышала 5%, а сам датчик непрерывно измерял осреднённую по толщине медного слоя температуру датчика.

Используя экспериментальную зависимость изменения средней температуры медного слоя датчика решением обратной задачи (по методике, описанной в [6]) была определена мощность теплового потока от УСГ (см. рис. 6). Видно, что по сравнению с тепловым потоком при сварке взрывом медных пластин в воздушной среде, опреде-

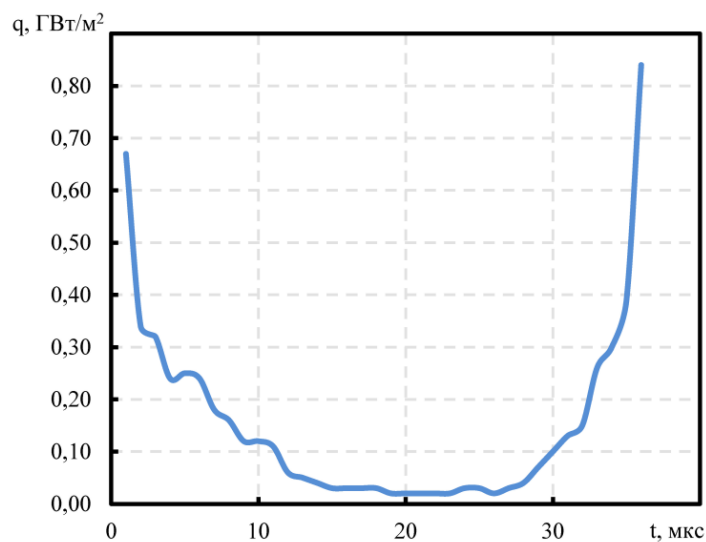


Рис. 6. Изменение мощности теплового потока от ударно-сжатого воздуха при сварке взрывом стальных пластин

были получены схожие значения при сварке взрывом медных пластин в среде воздуха, гелия и аргона.

Используя экспериментальную осциллограмму (рис. 4), можно определить приращение средней температуры медного слоя

ленным в работе [5] ($\sim 0,4$ ГВт/м²), тепловой поток при сварке стальных пластин резко отличается по длине области УСГ и характеризуется максимальными значениями на фронте ударной волны ($\sim 0,65$ ГВт/м²) и вблизи точки контакта ($\sim 0,85$ ГВт/м²). В ос-

новой (центральной) области УСГ значения теплового потока составляет $\sim 0,05$ ГВт/м². Разница в мощности теплового потока по длине области УСГ при сварке меди и стали может быть обусловлена разным характером протекания кумулятивных процессов при соударении и совместной пластической деформации стальных и медных пластин, а также разной плотностью «впрыскиваемых» в зазор стальных и медных частиц.

Выводы

1. Разработан терморезистивный метод определения теплового потока от ударно-сжатого воздуха в зазоре между пластинами при их сварке взрывом, менее чувствительный к электрическим помехам в сравнении с термопарным методом, а также предложена конструкция малоинерционного терморезистивного датчика.

2. Впервые получены значения теплового потока от УСГ при сварке взрывом стальных пластин. Установлено, что, в отличие от сварки взрывом медных пластин, мощность теплового потока существенно меняется по длине области ударно-сжатого газа и максимальна вблизи точки контакта и на фронте ударной волны.

3. Показано, что на мощность теплового потока влияет характер протекания кумуля-

тивных процессов перед точкой контакта, которые в свою очередь зависят от материала свариваемых пластин.

Библиографический список

1. Ishutkin, S. N. Thermal action of shock-compressed gas on the surface of colliding plates / S. N. Ishutkin, V. I. Kirko, and V. A. Simonov // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 1980. – Vol. 16. – Pp. 663-667. <https://doi.org/10.1007/BF00741515>
2. Kudinov, V. M. Explosion welding in metallurgy [in Russian] / V. M. Kudinov, A. Ya. Koroteev. – Moscow: Metallurgy. – 1978. – 166 p.
3. Zakharenko, I. D. Explosive Welding of Metals [in Russian] / I. D. Zakharenko. – Minsk: Nauka Tekhnika. – 1990. – 204 p.
4. Investigation of thermal processes in the gap during explosion welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 209. – P. 124166. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124166>
5. The influence of the shock-compressed gas composition in the gap between metal plates on the processes occurring before contact point during explosion welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min, A. D. Kochkalov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2025. – Vol. 244. – P. 126920. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2025.126920>
6. Thermal effect of explosive detonation products on a flyer plate in the explosive welding of metals / S. V. Khaustov, V. V. Pai, Y. L. Lukyanov, V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 163. – P. 120469. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120469>

Информация об авторах

Святослав Викторович Хаустов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
<https://orcid.org/0000-0002-7245-7195>
e-mail: regent_k@mail.ru

Владимир Васильевич Пай – доктор физико-математических наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией динамических воздействий Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
e-mail: pai@hydro.nsc.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>
e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Алексей Дмитриевич Кочкалов – аспирант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0009-0009-9725-4974>

e-mail: ko4kalov2011@gmail.com

Виктор Витальевич Агеев – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Максим Юрьевич Емельяненко – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Information about the authors

Svyatoslav V. Khaustov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Equipment and Technology of Welding Production, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-7245-7195>

e-mail: regent_k@mail.ru

Vladimir V. Pai - Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Acting Head of the Laboratory of Dynamic Effects of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

e-mail: pai@hydro.nsc.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Alexey D. Kochkalov is a postgraduate student at Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0009-0009-9725-4974>

e-mail: ko4kalov2011@gmail.com

Viktor V. Ageev is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Maxim Y. Emelianenko is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Вклад авторов

С. В. Хаустов – определение цели работы, анализ экспериментов, написание текста статьи

В. В. Пай – разработка методологии

С. В. Кузьмин – научное руководство, анализ и интерпретация полученных данных

В. И. Лысак – научное руководство

А. Д. Кочкалов – подготовка и проведение эксперимента

В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко – подготовка материалов для проведения исследований

Contribution of the authors

S. V. Khaustov – defining the purpose of the work, analyzing experiments, writing the text of the article

V. V. Pai – methodology development

S. V. Kuzmin – scientific guidance, analysis and interpretation of the data obtained

V. I. Lysak – scientific guidance

A. D. Kochkalov – preparation and conduct of the experiment

V. V. Ageev, M. Y. Emelianenko – preparation of materials for research

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 13.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 13.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-20-28

О. Л. Первухина, И. В. Денисов, Л. Б. Первухин, Т. А. Шишкин**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРАНУЛИТОВ ДЛЯ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка

**ООО «Битруб Интернэшнл», г. Красноармейск*

Автор, ответственный за переписку: Ольга Леонидовна Первухина (opervukhina@mail.ru)

Аннотация: В работе исследовано влияние состава взрывчатого вещества на скорость детонации при сварке взрывом, а также свойства полученных биметаллов для определения оптимальных режимов сварки взрывом. Показано, что использование для сварки взрывом гранулита РП-3 исключает бризантное воздействие на поверхность плакирующего слоя благодаря наличию порошкообразной составляющей между гранулами пористой аммиачной селитры. За счёт подбора соотношения гранулированной и молотой селитры обеспечивается стабильная детонация взрывчатого вещества с требуемой скоростью детонации независимо от температуры и влажности воздуха.

Ключевые слова: Аммиачная селитра, скорость детонации, бризантное воздействие, испытания, прочность

Благодарности: В. Х. Кантору за организацию и проведение экспериментов

Для цитирования: Первухина О. Л., Денисов И. В., Первухин Л. Б., Шишкин Т. А. Исследование возможности применения гранулитов для сварки взрывом. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):20–28. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-20-28>

O. L. Pervukhina, I. V. Denisov, L. B. Pervukhin, T. A. Shishkin

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF USING GRANULITES FOR EXPLOSION WELDING

Merzhanov Institute of Structural Macrokinecs and Materials Science RAS, Chernogolovka

**Bitrub International, Krasnoarmeysk*

The author responsible for the correspondence: Olga Leonidovna Pervukhina (opervukhina@mail.ru)

Annotation: This article examines the effect of explosive composition on the detonation velocity during explosion welding. The properties of the manufactured bimetals were considered to determine optimal explosion welding conditions. It is shown that the use of «granulit RP» for explosion welding eliminates blasting effects on the surface of the cladding layer. This is due to the presence of a powdered component between the porous ammonium nitrate granules. Stable detonation of the explosive at the required detonation velocity, regardless of air temperature and humidity, can be ensured by selecting the ratio of porous granular ammonium nitrate to ground ammonium nitrate.

Keywords: Ammonium nitrate, detonation velocity, blasting effect, testing, strength

Acknowledgements: V. H. Kantor for organizing and conducting experiments

To cite: Pervukhina O. L., Denisov I. V., Pervukhin L. B., Shishkin T. A. Investigation of the possibility of using granulites for explosion welding. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):20–28. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-20-28>

Высокое качество крупногабаритных биметаллов, а также круглогодичность их производства методом сварки взрывом обеспечиваются в первую очередь энергоносителем – взрывчатым веществом (ВВ) [1]. Энергия химического превращения ВВ переходит в механическую энергию метания с заданной скоростью плакирующего листа, затрачивается на нагрев окружающей среды и создание в ней ударных волн. Параметром ВВ,

определяющим его свойства является скорость детонации, величина которой используется при расчете режимов сварки взрывом. На скорость детонации влияют его состав, диаметр (толщина в плоском заряде), плотность, агрегатное состояние, размеры частиц, влажность, наличие оболочки. С увеличением диаметра (толщины) заряда скорость детонации повышается, достигая своего максимального значения при некотором

предельном диаметре d , различном для разных ВВ. Стационарное распространение детонации возможно лишь для зарядов, диаметр которых $d > d_{кр}$. Другим важным параметром, влияющим на скорость детонации ВВ, является его плотность.

На основе опыта промышленного производства биметаллов сформулированы основные требования к ВВ для сварки взрывом крупногабаритных изделий:

- Скорость детонации в плоских зарядах толщиной от 15 до 120 мм не более 3000 м/с.
- ВВ при укладке заряда не должно уплотняться и слёживаться.
- Стабильность детонации плоского заряда на больших площадях до 30 м².
- Невысокая стоимость ВВ и возможность приготовления его в день использования из компонентов, не являющихся взрывчатым материалом.

– Возможность механизированного изготовления и раскладки заряда на поверхности листа.

Этим требованиям в той или иной мере отвечают и используются для сварки взрывом следующие ВВ:

– Аммониты №6ЖВ и его смеси с аммиачной селитрой, солью, содой, песком, сварочные аммониты смесей аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой (АТ-1, АТ-2, АТ-3), а также трехкомпонентные смеси ТНТ – NH_4NO_3 – NaCl (А-40, А-50).

– Гранулиты (Игданиты) – смеси аммиачной селитры (гранулированной, молотой, пористой, микропористой) с дизельным топливом (АСДТ, за рубежом ANFO).

Информация о свойствах ВВ, применяемых при сварке взрывом, наиболее полно собрана в работе [2, 3], где, на основе анализа данных различных исследователей, опи-

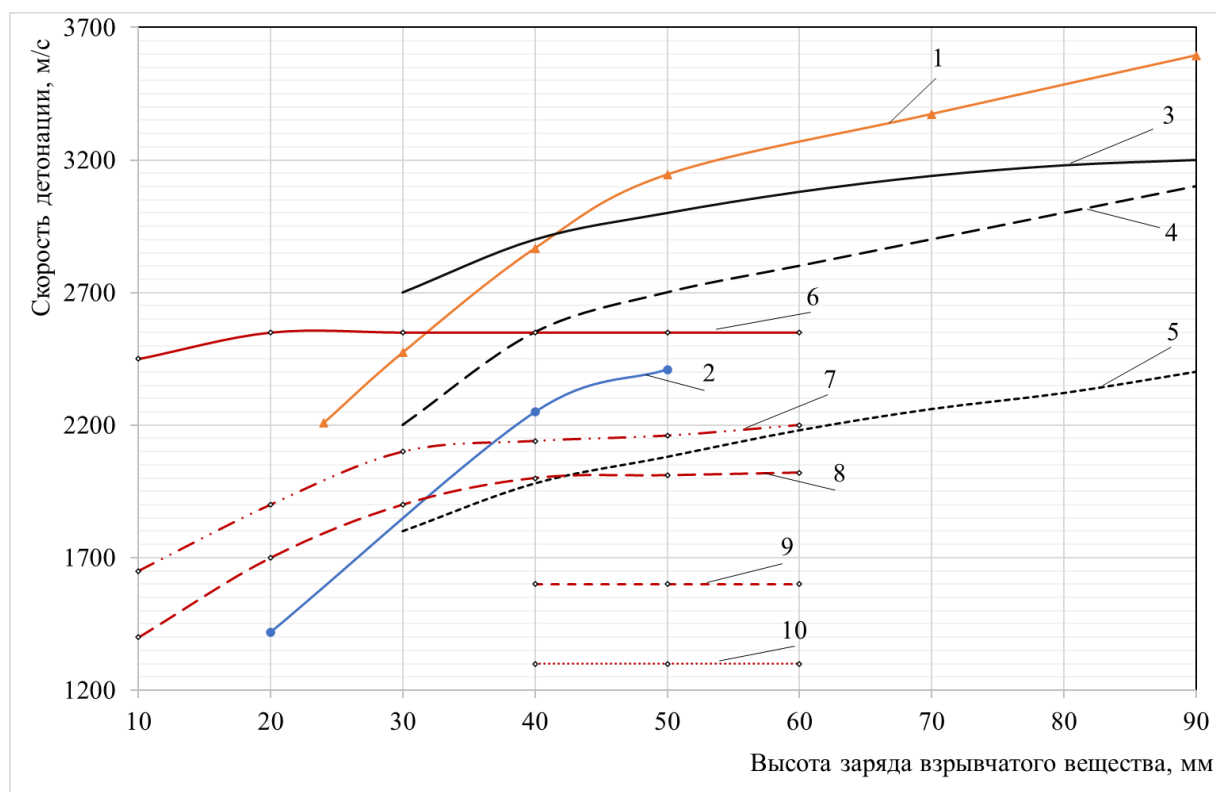


Рис. 1. Зависимость скорости детонации промышленных ВВ от высоты заряда:

- 1 – NH_4NO_3 +Д/т (96:4%) марка МП; 2 – NH_4NO_3 +Д/т (94,5:5,5%)+2% H_2O ; 3, 4, 5 – АТ-1, АТ-2, АТ-3 (Аммонит 6ЖВ+ NH_4NO_3 в соотношении 50:50%, 33:67%, 25:75% соответственно); 6, 7, 8, 9, 10 – смесь аммонит 6ЖВ+кварцевый песок в соотношении 75:25%, 60:40%, 50:50%, 40:60%, 25:75% соответственно (графики 1 и 2 – данные [1], 3 – 10 – данные [2])

саны свойства смесей аммонита БЖВ с аммиачной селитрой, песком, солью, сварочных аммонитов А-40, А-50, АТ-1, АТ-2, АТ-3. Показано, что скорость детонации этих ВВ зависит от плотности и толщины заряда, влажности, содержания компонентов и гранулометрического состава (рис. 1). Колебания скорости детонации достигают 1000-1200 м/с, а при повышении плотности свыше $1 \cdot 10^3$ кг/м³ наблюдаются отказы. В этих условиях, по-видимому, наблюдается переход детонации в режим самораспространяющегося взрывного процесса (СВП), который распространяется на значительные расстояния с существенно пониженным, по сравнению с детонацией, энерговыделением [4, 5], что приводит к нарушению процесса образования соединения и появлению дефектов сплошности соединения слоёв.

При раскладке крупногабаритных зарядов площадью до 20 м² практически невозможно обеспечить равномерную плотность порошкообразного заряда по всей поверхности заряда, а следовательно, его детонацию с определённой скоростью. Наличие участков с повышенной или пониженной скоростью детонации приводит к искривлению фронта детонации, нарушению заданного режима сварки взрывом и как следствие появлению дефектов (неприваров, участков пониженной прочности, свищей, разруше-

ний плакирующего слоя и т.п.).

Применение забоек в виде слоя песка на поверхности заряда позволяет снизить критический диаметр и обеспечить стабильную детонацию крупногабаритного заряда. Скорость и стабильность детонации порошкообразных зарядов не зависит от температуры окружающего воздуха, но зависит от влажности аммиачной селитры [3].

Недостатки аммонитов при их использовании для сварки взрывом:

- требуются специальные разрешения на приобретение, перевозку и хранение;

- порошкообразные аммониты и их смеси слеживаются при хранении, не обеспечивается равномерная плотность в объёме заряда;

- изготовление смесей аммонита с гранулированной селитрой, песком, солью, как правило, производится вручную на месте ведения взрывных работ, что трудоёмко и качество смешивания зависит от влажности компонентов и человеческого фактора.

Гранулиты (Игданиты). Наиболее технологичными при промышленном производстве биметалла сваркой взрывом являются смеси пористой аммиачной селитры с дизельным топливом по следующим причинам:

- исходные компоненты аммиачная селитра и дизельное топливо не являются

Состав, время прохождения детонационной волны между базами и скорость детонации при взрыве опытного заряда

Гранулит	Номер базы	Время прохождения, мск.	Скорость, м/с
РП-1. Состав 50% ПАС, 50% молотой ПАС и 3% дизтоплива, толщина 35 мм	1	118	2542
	2	114	2632
	3	110	2727
РП-3. Состав 75% ПАС, 25% молотой ПАС и 3% дизтоплива, толщина 35 мм	1	159	1887
	2	158	1899
	3	158	1899
РП-3. Состав 75% ПАС, 25% молотой ПАС и 3% дизтоплива, толщина 35 мм, под слоем песка высотой (в гребне до 170мм)	1	131	2290
	2	131	2290
	3	118	2542

взрывчатыми материалами и не требуется получение специальных разрешений на их приобретение, перевозку и хранение;

- изготовление гранулитов возможно в стационарных условиях с использованием специальных установок или на месте взрывных работ с использованием гравитационных смесителей;

- гранулы аммиачной селитры имеют сферическую форму, поэтому при раскладке крупногабаритного заряда не происходит его локального уплотнения.

Результаты исследования свойств смесей пористой селитры различных марок с дизельным топливом и их применение на практике приведены в работе [1]. При этом установлено:

- для обеспечения стабильной детонации зарядов АСДТ необходимо использовать при температуре воздуха ниже 10°C зимние марки ДТ;

- прирост скорости детонации в АСДТ из пористой аммиачной селитры на 1 мм заряда составляет в среднем 47-50 м/с в диапазоне толщин от 20 до 45 мм и 10-11 м/с в диапазоне толщин от 45 до 90 мм;

- параметры детонации скорость и стабильность зависят от пропитывающей и удерживающей способности пористой ам-

миачной селитры, влажности и температуры окружающего воздуха.

Опыт работы по сварке взрывом с смеси аммонита с аммиачной селитрой в соотношении от 1:1 до 1:4 показал, что их скорость и стабильность детонации не зависит от температуры и влажности окружающего воздуха [3]. Это связано с тем, что пространство между сферическими гранулами селитры в смеси аммонита с селитрой заполнено аммонитом, а в игданите занято воздухом, температура и влажность которого определяется окружающей средой.

Для подтверждения влияния воздуха на свойства ВВ исследовали гранулит марки РП-3 (ТУ 7276-028-11692478-2002) производства ООО НПФ «Взрывтехнология», который представляет собой смесь в различных соотношениях гранулированной и молотой аммиачной селитры, пропитанной 3% дизельного топлива. Однако непосредственно для сварки взрывом этот состав не применялся, в связи с чем, необходимо провести комплекс исследований, включающих определение взаимосвязи состава гранулита РП-3 со структурой и свойствами полученных биметаллов. Цель данной работы: исследование влияния состава энергоносителя на скорость детонации, а также свойства полу-

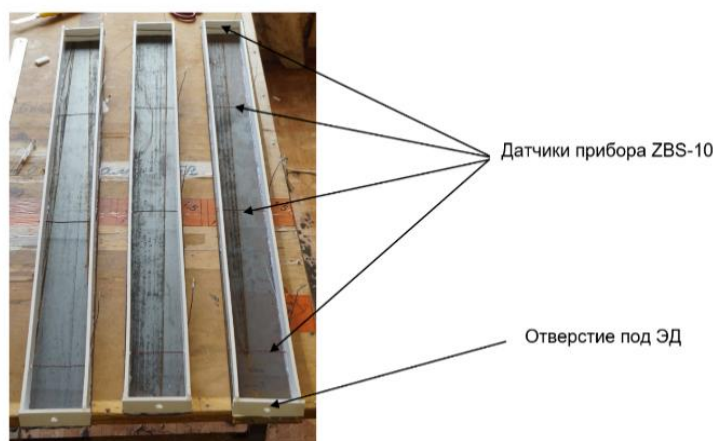


Рис. 2. Форма, изготовленная для опытных зарядов

ченных биметаллов для определения оптимальных режимов сварки взрывом.

Методика исследований предусматривала исследование влияния соотношения гранулированной и порошковой фракций пористой аммиачной селитры в гранулите РП-3 на скорость детонации крупногабаритного заряда, а также определение структуры соединения, сплошности и прочности соединения, воздействие гранулита РП-3 на поверхность меди и титана.

Эксперименты

Изготовление опытных зарядов гранулита РП-1 и РП-3 и эксперименты по измерению скорости детонации производилось в производственных условиях стационарного пункта производства ПВВ Ржевского филиала ООО НТФ «Взрывтехнология». На металлической пластине размерами 100х1000 мм располагался заряд состава согласно таблице. Толщина заряда 35 мм, ширина 80 мм, длина 1000 мм. Скорость детонации измерялась на трёх участках, база расстояние между точками 300 мм. Заряды были открытыми и с засыпкой песком толщиной 70 мм.

Опытные заряды формировались засыпкой взрывчатых составов в специально изготовленные формы с донной частью, выполненной из металла сталь Ст.3 толщиной 5мм. Борта форм изготавливались из полос пенокартона, толщиной 5мм и высотой 35мм, приклеиванием на металлическое основание термоклеем. Внутренние размеры

изготовленных форм 970х80ммх35мм.

В бортах форм на высоте 15 мм от дна, через проколы с помощью термоклея закреплялись 4 ионизационных датчика (длина измерительной базы 300 мм) многоканального измерителя скорости детонации ZBS-10 (ионизационный метод измерения). В торцевой части формы, со стороны ПД делалось отверстие для установки ЭД (рис. 2).

Изготовление гранулита РП производилось порциями перемешиванием компонентов в заданном соотношении в последовательности: сначала смешивалась измельчённая и гранулированная селитра в заданном соотношении (таблица). В полученную смесь добавляли 3% дизельного топлива, окрашенного красителем Судан II и перемешивали.

Поверхность засыпанного материала выравнивалась шпателем до уровня высоты борта (рис. 3, а). Изготовленные заряды переносились к месту подрыва, датчики подсоединялись к магистральному кабелю измерителя скорости детонации ZBS-10, затем вводился ЭД, монтировалась взрывная цепь и производился подрыв.

Во всех экспериментах заряды детонировали полностью, о чем свидетельствует отсутствие остатков ВВ, значительная воронка во влажном грунте и степень деформации металлической пластины. Для оценки влияния «забойки» на развитие детонационного процесса над опытным зарядом с составом

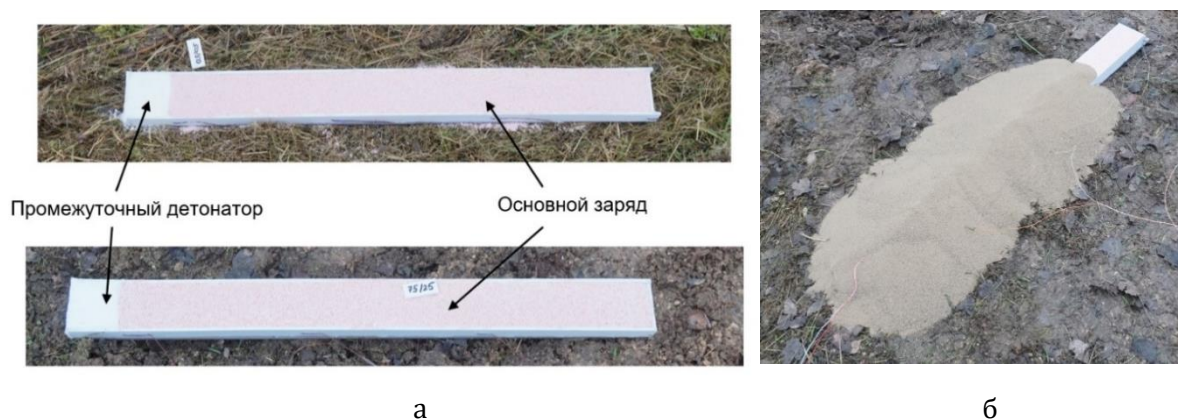


Рис. 3. Опытные заряды, изготовленные из составов РП-1 и РП-3 (а), заряд РП-3 с забойкой из песка (б)

РП-3 был насыпан песок (мелкий, сухой, штукатурный) общей массой 50 кг, без опалубки, с высотой в гребне до 170 мм (рис. 3, б). Опытный заряд с составом РП-3 с забойкой из песка также детонировал полностью, при этом величина воронки взрыва была существенно больше, чем при взрывах зарядов без забойки.

Для исследования влияния гранулита РП-3 на качество соединения были проведены эксперименты по сварке взрывом титана со сталью (ВТ1-0 + 09Г2С и меди со сталью (М1+09Г2С) зарядами РП-3 состава 75/25 плюс 3% дизельного топлива. Толщина заряда выбиралась исходя из обеспечения для сварки титана скорости детонации 2400 м/с, для меди – 2500 м/с мм и 2700 м/с.

После сварки взрывом проводили визуально-измерительный контроль (ВИК) размеров и внешнего вида поверхности полученных биметаллов. Для определения качества соединения осуществляли ультразвуковой контроль (УЗК) сплошности соединения слоёв биметалла прибором УСД-46 (чувствительность контроля Д5Э). Зона контроля составляла 4-6 мм, скорость сканирования 100 мм/с, шаг сканирования 6 мм.

Испытание прочности соединения на отрыв плакирующего слоя проводили на шляпных образцах [6], согласно схеме испытаний, представленной на рис. 4, а. Для двух-

слойных листов толщиной свыше 25 мм производили механическую обработку образца со стороны основного слоя с доведением его толщины до 25 мм. При изготовлении образцов обеспечивали соосность по диаметру 16 мм и 19 мм.

Результаты испытаний

В результате сварки взрывом образцы получили незначительную деформацию. Не выявлено следов бризантного действия взрывчатого материала на поверхность плакирующего слоя из титана и меди. Сохранение после взрывного нагружения исходного вида поверхности упрощает технологию за счет исключения операции по нанесению защитных покрытий в виде краски и плёнок на поверхность плакирующего листа.

Для испытаний прочности соединения титана со сталью отобрано 6 образцов: три из зоны начала процесса сварки взрывом и три из зоны окончания сварки. Для испытаний прочности соединения меди со сталью отобрано от листа, сваренного при скорости детонации РП-3 равной 2500 м/с три образца из конечной зоны процесса сварки взрывом. Образцы, отобранные из начальной зоны, расслоились при изготовлении образцов. От листа, сваренного при скорости детонации РП-3 равной 2700 м/с отобрано три образца зоны начала процесса сварки взрывом и три образца из конечной зоны.

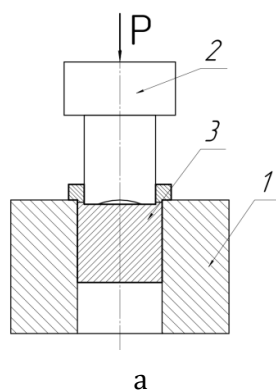


Рис. 4. Схема испытаний прочности соединения слоёв на отрыв плакирующего слоя (а) и образец сталь-медь после испытаний на отрыв плакирующего слоя (б):

1 – матрица, 2 – пуансон, 3 – испытуемый образец

Отрыв лакирующего слоя произошёл по линии соединения, которая имеет волнообразную форму (рис. 4, б). На диаграмме нагружения наблюдали площадку текучести вначале нагружения, далее резкое возрастание до значений 300-450 МПа и отрывом лакирующего слоя.

Анализ результатов испытаний прочности соединения показал:

1. Соединение стали с титаном в начале процесса сварки с мелкой волной без включений расплавленных участков на волнах, в конечной зоне величина волн увеличилась, наблюдаются на волнах локальные участки расплавов. Прочность соединения на всех образцах высокая более 450 МПа, что связано с наклёпом зоны соединения в процессе сварки взрывом и отсутствием в зоне соединения литых включений (интерметаллидов).

2. Высокие показатели прочности соединения слоёв на отрыв более 300 МПа получены при сварке меди со сталью при скорости детонации РП-3 равной 2500 м/с и 2700 м/с.

По результатам исследований в ООО «Битруб Интернэшнл» изготовлены с использованием гранулит РП-3 состава 75% ПАС, 25% молотой ПАС и 3% дизтоплива партии биметаллов: латунь Л63+инвар 36Н, марки AISI 430+AI+AISI 304, марки 08сп+ХВГ, марки 08сп+06ХВГ, марки 08сп+ 45ХН2МФА.

Заключение

Использование для сварки взрывом взрывчатого вещества Гранулит РП-3 (ТУ7276-028-11692478-2002):

- исключает брызгантное воздействие на поверхность лакирующего слоя из-за наличия порошкообразной ПАС между гранулами селитры, что позволяет не наносить на поверхность защитных покрытий в виде краски и плёнок;

- обеспечивает за счёт подбора соотношения гранулированной и молотой ПАС стабильную детонацию взрывчатого вещества с требуемой скоростью детонации;
- не требуется применение промышленных ВВ, кроме средств инициирования заряда;
- изменение соотношения гранулированной и молотой ПАС позволит обеспечить требуемый режим сварки взрывом, что в свою очередь повысит качество биметалла и стабильность свойств по поверхности крупногабаритных листов, а также исключит влияние на процесс сварки взрывом изменение температуры окружающего воздуха.
- гранулит РП-3 рекомендуется применять при промышленном производстве сваркой взрывом биметаллов.

Библиографический список

1. Экспериментальное исследование структуры и свойств смесей аммиачной селитры с дизельным топливом применительно к условиям сварки взрывом / О. Л. Первухина, И. В. Денисов, Л. Б. Первухин, В. А. Клышнатый // Известия ВолгГТУ. Серия Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2023. – №11 (270). – С. 44-53.
2. Лысак, В. И. Сварка взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин. – М.: Машиностроение - 1, 2005. – 544 с.
3. Конон, Ю. А. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский; ред. Кудинов В. М. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с. - Библиогр.: с. 210-215.
4. Шведов, К. К. Процессы детонации и взрыва гетерогенных конденсированных взрывчатых веществ. Физические проблемы разрушения горных пород / К. К. Шведов // Сб. трудов третьей международной конференции. – Новосибирск: Наука. – 2003. – С. 19.
5. Первухин, Л. Б. Особенности взрывчатых веществ для промышленного производства биметаллов сваркой взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // Взрывное дело. – 2009. – № 102/59. – С. 47-57.
6. К вопросу испытания предела прочности соединения слоев в биметалле, полученном сваркой взрывом / Л. Б. Первухин, Д. В. Ноняк, Т. А. Шишкин, О. Л. Первухина // Известия ВолгГТУ. Серия Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – 2023. – №11 (282). – С. 42-46.

Информация об авторах

Ольга Леонидовна Первухина – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН)

<https://orcid.org/0000-0003-0065-1367>

e-mail: opervukhina@mail.ru

Игорь Владимирович Денисов – кандидат технических наук, научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН)

<https://orcid.org/0000-0002-1065-3318>

e-mail: ingener.denisov@yandex.ru

Первухин Леонид Борисович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель ООО «Битруб Интернэшнл»

e-mail: bitrub@mail.ru

Тимофей Андреевич Шишкин – инженер, генеральный директор ООО «Битруб Интернэшнл»

e-mail: bitrub@inbox.ru

Information about the authors

Olga L. Pervukhina – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science, Russian Academy of Sciences (ISMAN)

<https://orcid.org/0000-0003-0065-1367>

e-mail: opervukhina@mail.ru

Igor V. Denisov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science, Russian Academy of Sciences (ISMAN)

<https://orcid.org/0000-0002-1065-3318>

e-mail: ingener.denisov@yandex.ru

Leonid B. Pervukhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of Bitrub International LLC

e-mail: bitrub@mail.ru

Timofey A. Shishkin – Engineer, General Director of Bitrub International LLC

e-mail: bitrub@inbox.ru

Вклад авторов

О. Л. Первухина – определение цели работы, проведение механических испытаний и анализ результатов, написание текста статьи

И. В. Денисов – проведение экспериментов, обработка результатов измерений скорости детонации, участие в обсуждении результатов

Л. Б. Первухин – определение методики работы, анализ экспериментов, участие в обсуждении результатов

Т. А. Шишкин – подготовка и проведение экспериментов, УЗК-контроль, участие в обсуждении результатов

Contribution of the authors

O. L. Pervukhina – determined the purpose of the work and analyzing the results, mechanical testing, wrote the article

I. V. Denisov – experiments, processing of detonation velocity measurement results, participation in the discussion of the results

L. B. Pervukhin – definition of work methodology, analyzing experiments, participating in the discussion of the results

T. A. Shishkin – preparation and execution of experiments, ultrasonic testing, participation in the discussion of the results

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 06.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 06.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-29-35

М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, Д. В. Арбатский, Д. С. Жахов, В. А. Тараненко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ СЛОЙ
ПРИ СВАРКЕ ТРЕХСЛОЙНОГО СОЕДИНЕНИЯ VT1-0+A5+AMg6**

Волгоградский государственный технический университет

Автор, ответственный за переписку: Евгений Владимирович Кузьмин (e.v.kuzmin@yandex.ru)

Аннотация: В работе изучалось влияние воздействия ультразвуковых акустических колебаний на промежуточный слой при сварке соединения VT1-0 + A5 + AMg6. Исследована микроструктура соединений и зеренная структура алюминиевой прослойки на границе с титаном. Показано, что воздействие ультразвука способствует протеканию рекристаллизации в алюминии на границе с титаном и образованию рекристаллизованного слоя с размером зерна 0,5-3,5 мкм на глубину более 100 мкм.

Ключевые слова: Сварка взрывом, титан, алюминий, AMg6, ультразвук

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00609, <https://rscf.ru/project/25-29-00609/>

Для цитирования: Королев М. П., Кузьмин Е. В., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Арбатский Д. В., Жахов Д. С., Тараненко В. А. Исследование влияния воздействия ультразвука на промежуточный слой при сварке трехслойного соединения VT1-0+A5+AMg6. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):29-35. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-29-35>

M. P. Korolev, E. V. Kuzmin, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, D. V. Arbatsky, D. S. Zhakhov, V. A. Taranenko

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ULTRASOUND ON THE INTERMEDIATE LAYER
DURING WELDING OF A THREE-LAYER JOINT VT1-0+A5+AMg6**

Volgograd State Technical University

The author responsible for the correspondence: Evgeny Vladimirovich Kuzmin (e.v.kuzmin@yandex.ru)

Annotation: The work studied the effect of ultrasonic acoustic vibrations on the intermediate layer during welding of the VT1-0 + A5 + AMg6 joint. The microstructure of the compounds and the grain structure of the aluminum interlayer at the titanium boundary are investigated. It has been shown that the effect of ultrasound promotes the recrystallization in aluminum at the boundary with titanium and the formation of a recrystallized layer with a grain size of 0.5-3.5 microns to a depth of more than 100 microns.

Keywords: Explosion welding, titanium, aluminum, AMg6, ultrasound

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 25-29-00609, <https://rscf.ru/project/25-29-00609/>

To cite: Korolev M. P., Kuzmin E. V., Kuzmin S. V., Lysak V. I., Arbatsky D. V., Zhakhov D. S., Taranenko V. A. Investigation of the effect of ultrasound on the intermediate layer during welding of a three-layer joint VT1-0+A5+AMg6. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):29-35. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-29-35>

Введение

Благодаря высокой удельной прочности, титан и алюминиевые сплавы находят свое применение в высокотехнологичных отраслях промышленности, таких как авиастроение, ракетно-космическая отрасль, судостроение и др.

Сваренные взрывом соединения титана с алюминиево-магниевым сплавом AMg6 применяются в ракетно-космической промышленности для изготовления корпусов антенно-фидерных устройств.

Технология сварки предполагает использование промежуточного слоя из чистого алюминия для соединения между собой сло-

ев титана и алюминиевого сплава. Алюминевый слой выполняет функцию «буфера пластичности» при сварке, обеспечивая достаточный уровень пластической деформации для образования соединения на обеих границах. Этот способ сварки способен обеспечить требуемую прочность и низкую дефектность соединений для большинства применений.

Качество соединений может снижаться вследствие образования дефектов, таких как непровары и оплавленные участки. Наиболее существенные дефекты могут возникать на границе титана с алюминиевым слоем. Если энергия, W_2 затрачиваемая на пластическую деформацию на этой границе окажется слишком большой, то это может привести к формированию оплавленных участков, содержащих интерметаллиды системы Al-Ti. Слишком низкая энергия W_2 может привести к недостаточному уровню пластической деформации, результатом чего могут быть непровары, расслоения и трещины.

Воздействие ультразвуковых колебаний на материал прослойки при сварке взрывом

может способствовать снижению количества дефектов и повышению качества соединений. Ранее было показано, что сварка взрывом с одновременным воздействием ультразвука позволяет повысить качество получаемых соединений и расширить область свариваемости металлов [1].

Целью данной работы являлось исследование влияния воздействия ультразвуковых колебаний при сварке взрывом на алюминиевый слой при сварке трехслойного соединения ВТ1-0 + А5 + АМг6.

Материалы и методы

В качестве основных материалов для сварки использовали титан ВТ1-0, чистый алюминий марки А5 и алюминиевый сплав АМг6.

Схема сборки под сварку показана на рис. 1. В качестве неподвижной пластины выступала пластина АМг6 с габаритными размерами 200x80 мм. Габариты промежуточного алюминиевого слоя и метаемой пластины составляли 240x120 мм и 260x150 мм. Разница в габаритах пластин позволила вынести сварочные зазоры из зоны сварки и

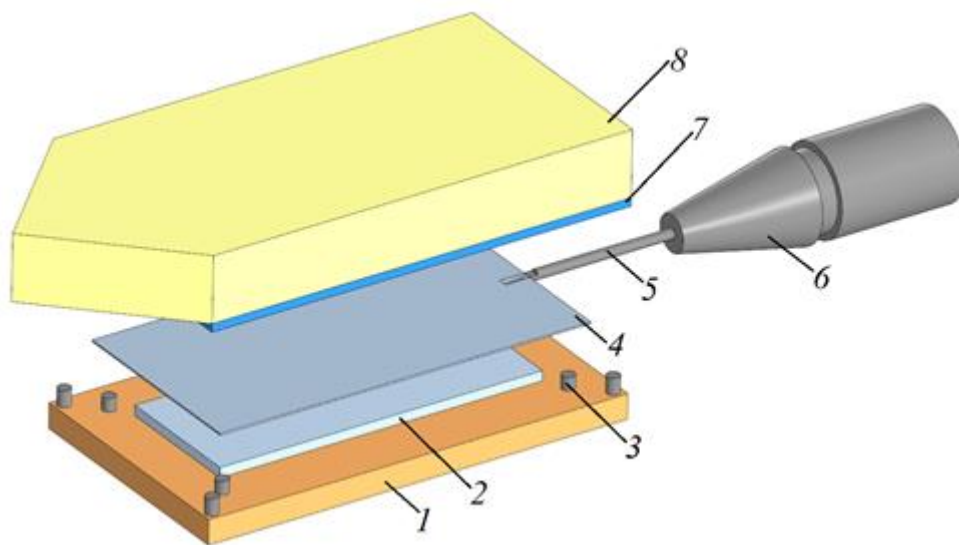


Рис. 1. Схема сборки под сварку с воздействием ультразвука: 1 – основание; 2 – неподвижная пластина АМг6; 3 – сварочный зазор; 4 – прослойка; 5 – волновод; 6 – ультразвуковой преобразователь; 7 – метаемая пластина ВТ1-0; 8 – заряд взрывчатого вещества

установить их на основании, исключив, тем самым, влияние материала зазоров на процесс и результат сварки. Кроме того, такая схема сборки применялась для обеспечения целостности и точности расположения деталей при воздействии ультразвуковых колебаний.

дятся вблизи нижней границы области свариваемости и обеспечивают близкий к минимально необходимому уровню пластической деформации на границе титана с алюминием. Было сварено два образца, один из которых сваривали с применением ультразвуковых колебаний, второй образец служил

Расчетные режимы сварки взрывом

Материалы	Толщины $\delta_1 + \delta_2$, мм	Смесь ВВ, (аммонит/песок), %	Высота заряда H , мм	Скорость точки контакта V_k , м/с	Сварочный зазор h , мм	Скорость соударения V_c , м/с	Угол соударения γ , °	Энергия пластической деформации W_2 , МДж/м ²
BT1-0+ A5+ AMr6	4+1+5,8	60/40	40	2105	2	439	11,98	0,19
					1	392	10,68	0,57

Ультразвуковые колебания подвели к промежуточному слою из чистого алюминия с противоположной стороны начала процесса детонации. Частота колебаний составляла около 18 кГц, амплитуда перемещения на торце ультразвукового преобразователя ≈ 4 мкм, время воздействия ультразвука перед сваркой составляло около 5 секунд.

Расчетные режимы сварки приведены в таблице. Выбранные режимы сварки нахо-

дятся вблизи нижней границы области свариваемости и обеспечивают близкий к минимально необходимому уровню пластической деформации на границе титана с алюминием.

Результаты и их обсуждение

По результатам механических испытаний прочность соединений лежала в диапазоне 85-90 МПа, а разрушение происходило по прослойке алюминия. Исследование микроструктуры показало, что в обоих соединениях сформировался волновой профиль на границе между алюминиевой прослойкой и слоем АМг6. При сварке с ультразвуком дли-

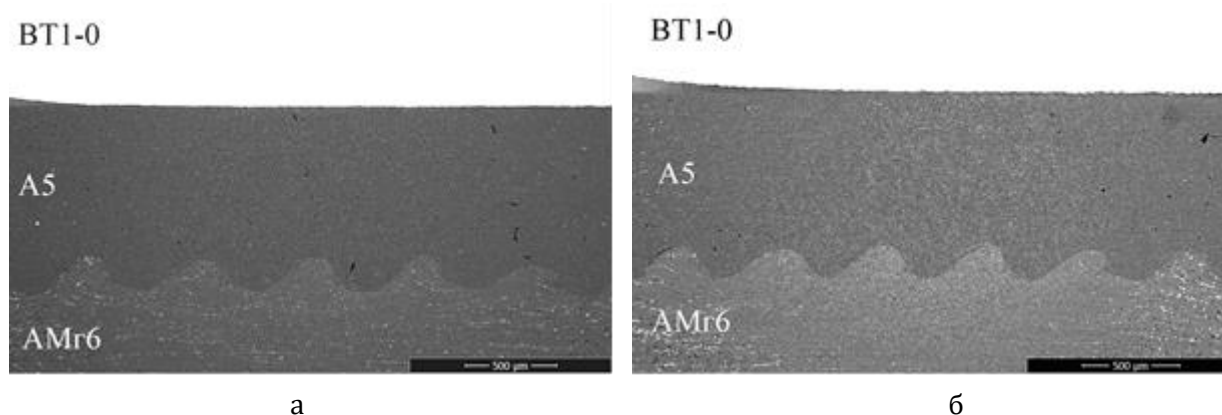


Рис. 2. Общий вид трехслойных соединений BT1-0+A5+AMr6:

а – сварка без ультразвука; б – сварка с ультразвуком

на и размах волнового профиля оказались несколько меньше, чем в контрольном образце. В образце, сваренном с ультразвуком, длина и размах составили 532 и 161 мкм, против 600 и 178 мкм в образце, сваренном без ультразвука. Граница алюминиевого слоя с титаном имела плоскую форму, оплавы или иные дефекты при стандартных увеличениях не обнаруживались.

При помощи метода дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) было исследовано строение алюминиевой прослойки на границе с титаном. На рис. 3 приведены IPF-карты ориентации зерен алюминия, на которой черными линиями показаны границы зерен с углом разориентации $>10^\circ$ (большеугловые границы). Результаты исследова-

ния показали значительную разницу в структуре алюминия между образцами, сваренными разными способами.

При сварке без ультразвука в структуре алюминия вблизи границы можно выделить области с различным зеренным строением. На расстоянии > 40 мкм от границы с титаном (рис. 3, а), в алюминии сохранились исходные границы зерен, однако накопленные пластические деформации привели к появлению внутри зерен малоугловых границ и увеличению разориентации между субзернами. На расстоянии от 15 до 40 мкм от границы, алюминий имеет волокнистую структуру, образованную удлиненными зернами толщиной до 9 мкм с включениями мелких зерен с размерами около 2 мкм. На границе с

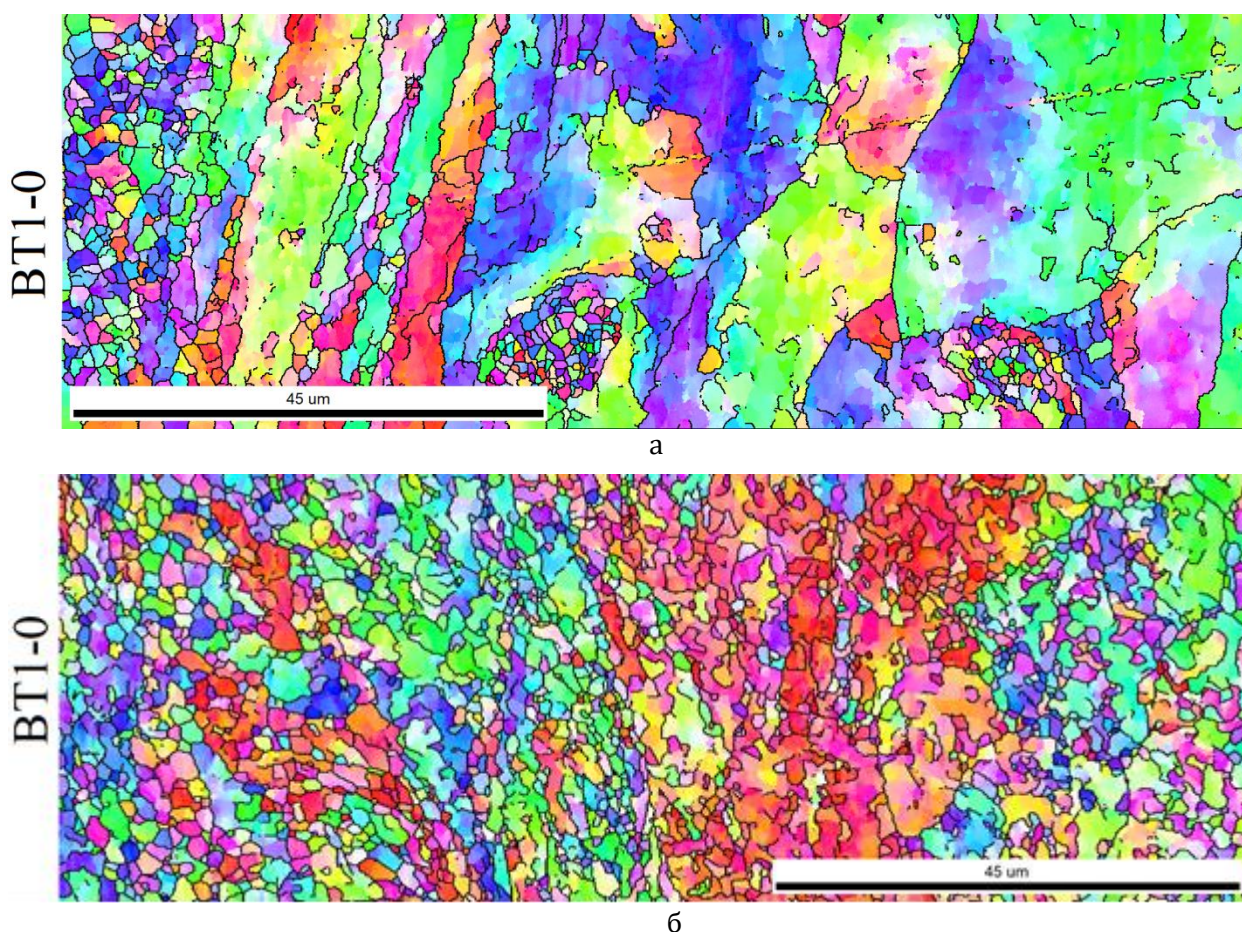


Рис. 3. IPF карты алюминиевого слоя в области на границе с титаном, черной линией показаны границы зерен с углом разориентации $>10^\circ$:

а – сварка без ультразвука; б – сварка с ультразвуком

титаном располагается слой мелкозернистого алюминия толщиной около 10-15 мкм, с размером зёрен 1,5-2,5 мкм. Наиболее вероятно, что образование мелкозернистой структуры стало результатом протекания в этой области динамической рекристаллизации, локальный характер которой был связан с одной стороны – локализованностью пластических деформаций, с другой – той особенностью, что начало протекания динамической рекристаллизации требует достижения критической деформации [2].

При сварке с ультразвуком в структуре алюминия практически не прослеживались очертания исходных зерен или выраженные границы между областями с различным размером или формой зерна (рис. 3, б); вместо этого во всей исследованной области наблюдалась практически однородная структура, состоящая из рекристаллизованных зерен и субзерен с размерами около 0,5-3,5 мкм. По результатам картирования методом ДОЭ, суммарная протяженность границ с углом разориентировки $>10^\circ$ на исследуемом участке при сварке с ультразвуком была в 2 раза больше, чем при сварке без ультразвука и составила 7,43 мм против 3,64 мм в контрольном образце.

Объяснить наблюдаемое измельчение структуры можно эффектами, которые оказывают акустические колебания на дислокационную структуру материала. Ранее многие исследователи уже отмечали, что воздействие ультразвука на металл в процессе деформации способствует измельчению зерна [3 ... 6]. Причина этого эффекта заключается в том, что воздействие ультразвука в процессе пластической деформации приводит к значительному повышению плотности и подвижности дислокаций, что способствует ускоренному протеканию динамической рекристаллизации [3, 4].

При сварке взрывом рекристаллизованные слои могут в некоторых случаях приводить к снижению прочности соединений. Например, в работе [7] было показано, что граница рекристаллизованного слоя АМг6 с металлом, имеющего деформированную структуру, может быть слабым местом всего сваренного взрывом композита. В этой ситуации увеличение толщины рекристаллизованного слоя и исчезновение деформированной структуры под действием ультразвука, которое было получено в чистом алюминии, можно считать положительным эффектом, поскольку рекристаллизация происходит в большем объеме и стирается четкая граница между рекристаллизованным и деформированным слоем.

Библиографический список

1. Особенности формирования медно-алюминиевых соединений при сварке взрывом с воздействием ультразвука / Е. В. Кузьмин, А. П. Пеев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, А. Н. Дородников, А. Е. Сорокин, Е. А. Никулин // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. - Волгоград, 2015. - № 10 (170). - С. 70-78.
2. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик, С. В. Добаткин, Л. М. Капуткина; под науч. ред. С. С. Горелика. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва : МИСИС, 2005. - (Металлургия и материаловедение XXI века). - 430 с.
3. Wang, Y. Gradient layer of ultrafine equiaxed grains produced by ultrasonic energy accelerated dynamic recrystallization / Y. Wang, Y. Zhu, Z. Kai // Materials Science & Engineering A. - 2020. - Vol. 795(20). - Pp. 139958. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139958>
4. Mechanism of ultrasonic vibration assisted upsetting of 6061 aluminum alloy / M. Y. Cao, H. Hu, X. D. Jia, S. J. Tian, C. C. Zhao, X. B. Han // Journal of Manufacturing Processes. - 2020. - Vol. 59. - P. 690-697. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.070>
5. A comparative study of mechanical and microstructural characteristics of aluminium and titanium undergoing ultrasonic assisted compression testing / H. Zhou, H. Cui, Q. H. Qin, H. Wang, Y. Shen // Materials Science and Engineering: A. - 2017. - Vol. 682. - P. 376-388. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.11.021>
6. Ultrasonic dynamic impact effect on deformation of aluminum during micro-compression tests / J. Hu, T. Shimizu, T. Yoshino, T. Shiratori, M. Yang // Journal of Materials Processing Technology. - 2018. - Vol. 258. - P. 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.03.021>
7. Структура и свойства соединений титана с алюминиево-магниевыми сплавами, полученных

сваркой взрывом / М. П. Королев, Е. В. Кузьмин, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин, В. О. Харламов // Деформация и разрушение материалов. – 2024. – № 4. – С. 2-9.

Информация об авторах

Михаил Петрович Королев – кандидат технических наук, инженер, старший научный сотрудник кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-2430-6384>

e-mail: mihakorolew@mail.ru

Евгений Владимирович Кузьмин – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-1037-5186>

e-mail: e.v.kuzmin@yandex.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Дмитрий Вячеславович Арбатский – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: darbatskiy02@yandex.ru

Данил Сергеевич Жахов – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: danilzahov2002@gmail.com

Владимир Александрович Тараненко – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: vov.taranenko2016@yandex.ru

Information about the authors

Mikhail P. Korolev – Candidate of Technical Sciences, Engineer, Senior Researcher at the Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-2430-6384>

e-mail: mihakorolew@mail.ru

Evgeny V. Kuzmin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-1037-5186>

e-mail: e.v.kuzmin@yandex.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Dmitry V. Arbatsky is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: darbatskiy02@yandex.ru

Danil S. Zhakhov is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: danilzahov2002@gmail.com

Vladimir A. Taranenko is a Master's student at the Volgograd State Technical University

e-mail: vov.taranenko2016@yandex.ru

Вклад авторов

М. П. Королев – проведение экспериментов, анализ экспериментов, написание текста статьи

Е. В. Кузьмин – определение цели работы, анализ экспериментов

С. В. Кузьмин – анализ и интерпретация полученных данных

В. И. Лысак – участие в обсуждении результатов

Д. В. Арбатский, Д. С. Жахов, В. А. Тараненко – подготовка материалов для проведения исследований

Contribution of the authors

M. P. Korolev – conducting experiments, analyzing experiments, writing articles

E. V. Kuzmin – defining the purpose of the work, analyzing experiments

S. V. Kuzmin – analyzing and interpreting the data

V. I. Lysak – participating in the discussion of the results

D. V. Arbatsky, D. S. Zhakhov, V. A. Taranenko – preparing materials for conducting research the followings

*Статья поступила в редакцию 29.09.2025, доработана 20.10.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 29.09.2025, revised 20.10.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-36-43

А. И. Епишин, А. Ю. Малахов, В. В. Ткаченко

КАЛИБРОВКА УРАВНЕНИЯ ДЖОНСОНА-КУКА ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ ТЕРМОБИМЕТАЛЛА ЛАТУНЬ/ИНВАР

ИСМАН им. А. Г. Мержанова РАН, г. Черноголовка

Автор, ответственный за переписку: Андрей Юрьевич Малахов (malakhov@ism.ac.ru)

Аннотация: В работе исследуются механические свойства компонентов термобиметалла латунь/Инвар, получаемого сваркой взрывом. На основании результатов механических испытаний на растяжение при комнатной температуре и комплексного анализа литературных данных о поведении материалов при высоких скоростях деформации и повышенных температурах получены полные наборы параметров уравнения Джонсона-Кука. Установлено, что стандартная форма модели Джонсона-Кука удовлетворительно описывает поведение латуни, в то время как для Инвара потребовалось введение температурной зависимости параметра коэффициента чувствительности к скорости деформации для адекватного учета его поведения в широком температурном диапазоне. Полученные уравнения планируется использовать для анализа пластического деформирования и расчета деформационного тепловыделения при сварке взрывом биметалла латунь/Инвар.

Ключевые слова: Сварка взрывом, биметаллы, латунь, Инвар, механические свойства

Благодарности: Научному сотруднику ИСМАН Денисову Игорю Владимировичу за помощь в подготовке статьи и обсуждение результатов

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания ИСМАН (номер госрегистрации FFSZ-2025-0003)

Для цитирования: Епишин А. И., Малахов А. Ю., Ткаченко В. В. Калибровка уравнения Джонсона-Кука для компонентов термобиметалла латунь/Инвар. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):36–43. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-36-43>

A. I. Epishin, A. Yu. Malakhov, V. V. Tkachenko

CALIBRATION OF THE JOHNSON-COOK EQUATION FOR THE COMPONENTS OF THERMOBIMETAL BRASS/INVAR

Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, Chernogolovka

The author responsible for the correspondence: Andrey Yuryevich Malakhov (malakhov@ism.ac.ru)

Annotation: This study investigates the mechanical properties of the components of a brass/Invar thermobimetal produced by explosive welding. Based on the results of tensile tests at room temperature and a comprehensive analysis of literature data on material behavior under high strain rates and elevated temperatures, complete parameter sets for the Johnson-Cook constitutive equation were obtained. It was established that the standard form of the Johnson-Cook model satisfactorily describes the behavior of brass. However, for Invar, introducing a temperature dependence for a parameter strain rate sensitivity coefficient was necessary to adequately account for its behavior across a wide temperature range. The obtained constitutive equations are planned for use in analyzing plastic deformation and calculating deformation-induced heat generation during the explosive welding of the brass/Invar bimetal.

Keywords: Explosive welding, bimetals, brass, Invar, mechanical properties

Acknowledgements: To ISMAN researcher Igor Vladimirovich Denisov for his assistance in preparing the article and discussing the results

Funding: The study was carried out with the financial support of the ISMAN State Assignment (state registration number FFSZ-2025-0003)

To cite: Epishin A. I., Malakhov A. Yu., Tkachenko V. V. Calibration of the Johnson-Cook equation for the components of thermobimetal brass/Invar. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):36–43. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-36-43>

Сварка взрывом является эффективным многослойных материалов, в том числе, со технологическим методом для получения специальными служебными свойствами [1].

Высокая прочность соединений, образованных сваркой взрывом, достигается за счет высокоскоростного соударения компонентов, которому предшествует глубокое очищение свариваемых поверхностей за счет их сверхзвукового обтекания потоком горячего ударно-сжатого газа, что резко улучшает адгезию компонентов. Важным фактором, влияющим на качество сварного соединения, является тепловыделение, которое происходит по двум причинам – сильное сжатие газа в зазоре между свариваемыми пластинами [2] и ударная пластическая деформация металла в зоне контакта. Характер пластической деформации при сварке взрывом рассмотрен в работе [3].

Тепловыделение имеет положительный эффект, поскольку оно повышает термическую активацию процесса, но также оно может приводить и к образованию дефектов структуры сварного соединения, например, зон локального оплавления. Поэтому для планирования условий сварки взрывом требуется теоретическая оценка тепловыделения и температуры разогрева свариваемого металла.

Авторы настоящей работы теоретически изучают процесс деформационного тепловыделения при сварке взрывом термобиметалла латунь/инвар, который широко используется для термокомпенсаторов, чувствительных элементов термометров, терморегуляторов, автоматов защиты электросети, термоприводов и других подобных устройств. Поскольку пластическая деформация при сварке взрывом происходит при сильно изменяющихся температуре и скорости деформации, то для проведения численного анализа процесса пластического деформирования и расчета деформационного тепловыделения необходимы уравнения, описывающие сопротивление пластической деформации компонентов рассматриваемого биметалла в широком диапазоне условий нагружения. Для этой цели планируется ис-

пользовать феноменологическое уравнение, предложенное Джонсоном и Куком [4, 5] для описания сопротивления материалов большим пластическим деформациям в условиях высоких скоростей деформации и температур. Уравнение Джонсона-Кука часто применяется в исследованиях для аппроксимации результатов механических испытаний вследствие своей простоты [6].

Уравнение Джонсона-Кука определяет напряжение σ в материале в зависимости от накопленной пластической деформации ε_p , скорости пластической деформации $\dot{\varepsilon}_p$ и температуры T . В общем виде данное уравнение может быть записано в виде произведения трех сомножителей:

$$\sigma = f_1(\varepsilon_p) f_2(\dot{\varepsilon}_p) f_3(T), \quad (1)$$

где $f_1(\varepsilon_p)$ – диаграмма деформирования материала, полученная при базовых значениях T_0 и $\dot{\varepsilon}_{p,0}$, и записанная в координатах $\sigma - \varepsilon_p$; $f_2(\dot{\varepsilon}_p)$ – зависимость от скорости деформации, равная 1 при $\dot{\varepsilon}_p = \dot{\varepsilon}_{p,0}$; и $f_3(T)$ – зависимость от температуры, равная 1 при $T = T_0$.

Обычно, для функции $f_1(\varepsilon_p)$ используют степенной закон пластического упрочнения и записывают ее в виде:

$$f_1(\varepsilon_p) = A + B\sigma^n \quad (2)$$

для функции $f_2(\dot{\varepsilon}_p)$ обычно используют логарифмическую зависимость:

$$f_2(\dot{\varepsilon}_p) = 1 + C \frac{\ln \dot{\varepsilon}_p}{\ln \dot{\varepsilon}_{p,0}} \quad (3)$$

а функцию $f_3(T)$ записывают как:

$$f_3(T) = 1 - T_h^m \quad \text{где} \quad T_h = (T - T_0)/(T_m - T_0) \quad (4)$$

Здесь A, B, n, C, m и T_m – константы материала: A – предел текучести, B и n – константы деформационного упрочнения при базовых условиях $(T_0, \dot{\varepsilon}_{p,0})$; C и m – соответственно коэффициенты чувствительности материала к скорости деформации и изменению температуры; T_m – температура, при которой сопротивление материала пластическому деформированию равно нулю,

обычно принимаемая равной температуре плавления материала, и T_h – «гомологическая» температура. В качестве же базовой температуры, как правило, принимается комнатная $T_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, после суммирования (1-4) уравнение Джонсона-Кука принимает вид:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p,0}}\right) (1 - T_h^m) \quad (5)$$

В настоящей работе на основании проведенных механических испытаний и литературных данных оценены параметры уравнения Джонсона-Кука для компонент термометалла латунь/инвар, изготовленного авторами методом сварки взрыва ранее, см., например, [7]. Следует отметить, что поскольку свойства листовых латуни и инвара могут значительно отличаться в зависимости от истории их изготовления [8, 9] калибровку уравнения Джонсона-Кука следует проводить именно для тех материалов, которые использовались при сварки взрывом конкретного биметалла, для которого планируется проводить численные расчеты.

Сопротивление пластической деформации при комнатной температуре и стандартной скорости деформации

Объектами исследования в настоящей работе являлись пластины латуни Л63 и железоникелевого сплава 36Н (Инвар), соответственно толщиной 4,8 и 1,7 мм. Из пластин были изготовлены плоские образцы для механических испытаний. Образцы испытывали на растяжение в испытательной машине марки МИМ.2-100. Испытания проводили при комнатной температуре $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ со стандартной скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}\text{ с}^{-1}$ до разрушения. Для каждого материала были испытаны три образца и по результатам испытаний получены усредненные диаграммы $\sigma - \varepsilon$, где ε – полная деформация, см. синие графики с синими точками на рис. 1а, б. Для получения графиков $\sigma - \varepsilon_p$ из полной деформации была вычтена упругая составляющая, равная σ/K , где K – тангенс наклона графика в упругой области. Графики $\sigma - \varepsilon_p$ показаны на рис. 1 серым цветом.

Для калибровки уравнения Джонсона-Кука следует использовать только точки графика, соответствующие деформации образца до ее локализации (образования шейки). Полагалось, что локализация наступает тогда, когда при дальнейшей деформации

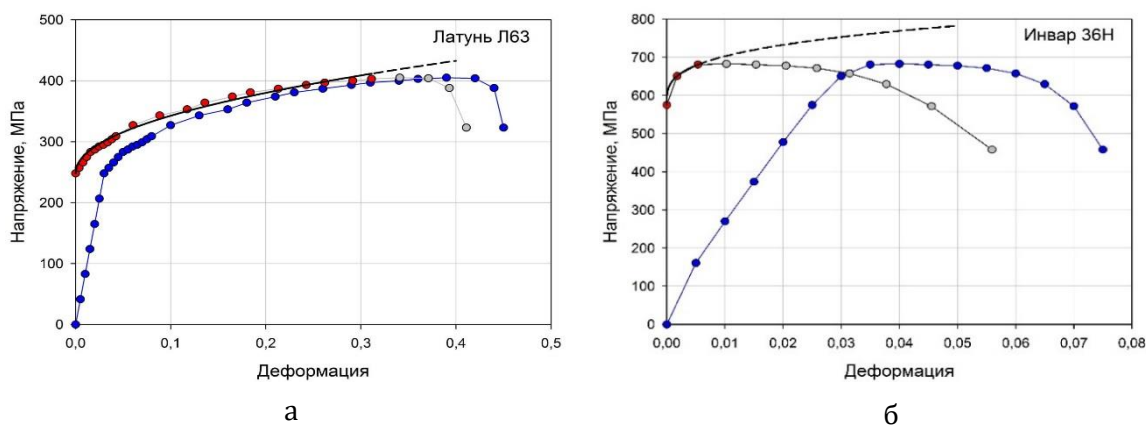


Рис. 1. Диаграммы растяжения латуни Л63 (а) и Инвара 36Н (б).

Комнатная температура $T_0 \approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость деформации $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}\text{ с}^{-1}$. Синим цветом показаны исходные кривые $\sigma - \varepsilon$, серым – пересчитанные кривые $\sigma - \varepsilon_p$, красным – точки до предполагаемой локализации пластической деформации (образования шейки), сплошными черными жирными линиями – аппроксимация красных точек степенной зависимостью (2), штриховыми черными жирными линиями – экстраполяция до предельной пластической деформации

образца напряжение σ либо перестает увеличиваться (плато) либо начинает падать (достигается явный максимум). Первый случай реализуется для латуни, см. красные зачетные точки на рис. 1а, второй – для инвара, см. рис. 1б. Деформационное упрочнение сплавов (красные точки) было аппроксимировано степенной зависимостью (2) и получены следующие значения: для латуни – $A=248$ МПа, $B=287,5$ МПа и $n=0,483$; для инвара – $A=575$ МПа, $B=513,3$ МПа и $n=0,3016$. Следует отметить, что полученные значения степени в законе упрочнения блики к таковым, полученным для латуни и Инвара в работах [10, 11] – $n=0,54$ для латуни в [10] и $n=0,3025$ для Инвара в [11].

Зависимость сопротивления пластической деформации от скорости деформации

Поскольку в настоящей работе механические испытания проводили только при одной скорости деформации $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, то для описания зависимости пластического упрочнения от скорости деформации использовали литературные данные.

Клозак с соавторами исследовали механические свойства «обычной латуни» при ударном нагружении в широком диапазоне

температур [9]. В качестве исследуемых объектов использовались листовые образцы обычной латуни, толщиной 1 мм. Перфорационные испытания проводили на стандартной испытательной машине Zwick с начальными скоростями удара от 40 до 120 м/с в диапазоне температур 20-260 °С. Зависимость $f_2(\dot{\epsilon}_p)$ аппроксимировали логарифмической функцией (3) со следующими параметрами $C = 0,0021$ и $\dot{\epsilon}_{p,0} = 1 \text{ с}^{-1}$. Данные параметры были приняты в уравнении Джонсона-Кука для латуни Л63 в настоящей работе.

Ли с соавторами исследовали механические свойства сплава Invar Fe-36Ni [10]. Цилиндрические образцы, размером $\varnothing 2 \times 2$ мм и $\varnothing 5 \times 5$ мм, испытывали на сжатие в испытательной машине Split Hopkinson Pressure Bar со скоростями деформации от 10^{-3} до 10^4 с^{-1} в диапазоне температур 20-800 °С. Зависимость напряжения от скорости деформации аппроксимировали линейной функцией $f_2(\dot{\epsilon}) = 1 + C\dot{\epsilon}$, что, однако не согласуется с другими известными экспериментальными данными.

Кавулок с соавторами исследовали пластичность сплава Invar 36 при высоких температурах [12]. Испытание образцов, диа-

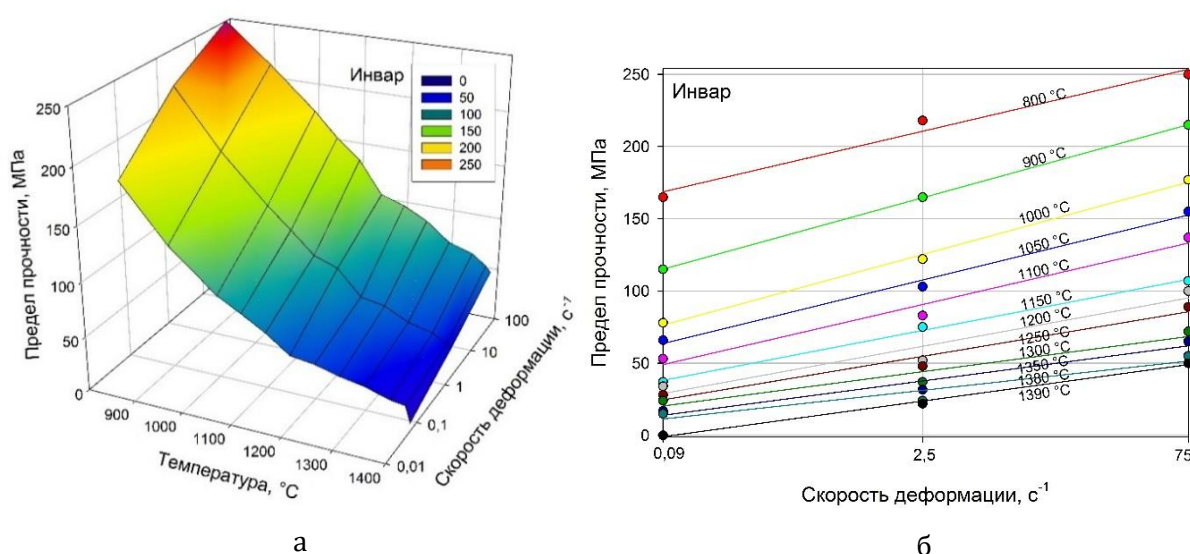


Рис. 2. Зависимость предела прочности σ_B Инвара 36Н от скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуры T (а). Зависимости $\sigma_B = f(\dot{\epsilon})$ для фиксированных значений T (б).

Оцифровано с рис. 3 в [12] и обработано в настоящей работе

метром 10 мм и длиной 116,5 мм, проводили на растяжение в испытательной машине HDS-20 со скоростями деформации 0,09; 2,5 и 75 с^{-1} в диапазоне температур 800-1390 °С. Результаты испытаний представлены в виде трехмерного графика предел прочности – скорость деформации – температура, см. рис. 2а. Отметим, что далее мы будем использовать такой параметр материала как предел прочности (предел временного сопротивления), характеризующий способность материала сопротивляться большим пластическим деформациям, которые происходят в материале при сварке взрывом.

На рис. 2, б представлены зависимости предела прочности от скорости деформации при фиксированных температурах в интервале 800-1390 °С, построенные по оцифрованным данным графика на рис. 2, а. Видно, что при каждой конкретной температуре напряжение сопротивления большим пластическим деформациям хорошо описывается логарифмической зависимостью (3). При повышении температуры вследствие термического разупрочнения графики $\sigma = a + b \cdot \ln \dot{\epsilon}$ смещаются вниз, а также несколько изменяют свой наклон. Из сравнения последнего уравнения с (3) следует, что коэффициенты чувствительности Инвара к скорости деформации следует рассчиты-

вать, как $C = b/a$.

Значение коэффициента C при комнатной температуре было получено оцифровкой данных с графика, представленного на рис. 3 в работе [11], и последующего регрессионного анализа, аналогично как показано на рис. 2б. Суммируя результаты обработки данных из работ [11] и [12] была построена температурная зависимость $C(T)$ для Инвара в диапазоне температур 20-1390 °С, см. рис. 3. Из рис. 3 видно, что коэффициент чувствительности к скорости деформации повышается с температурой. Данный результат представляется логичным, так как с повышением температуры в сплаве ускоряется диффузия и его полная пластическая деформация включает деформацию ползучести, величина которой зависит от времени деформирования. Зависимость $C(T)$ была аппроксимирована экспоненциальной функцией $C = C_0 \exp(T/T_0)$ с константами $C_0 = 0,0174$ и $T_0 = 523,8$ °С.

Зависимость сопротивления пластической деформации от температуры

Для анализа деформирования материала в процессе сварки важно знать его сопротивление большим пластическим деформациям, которое характеризуется пределом прочности материала σ_B .

На рис. 4, а красной линией показана тем-

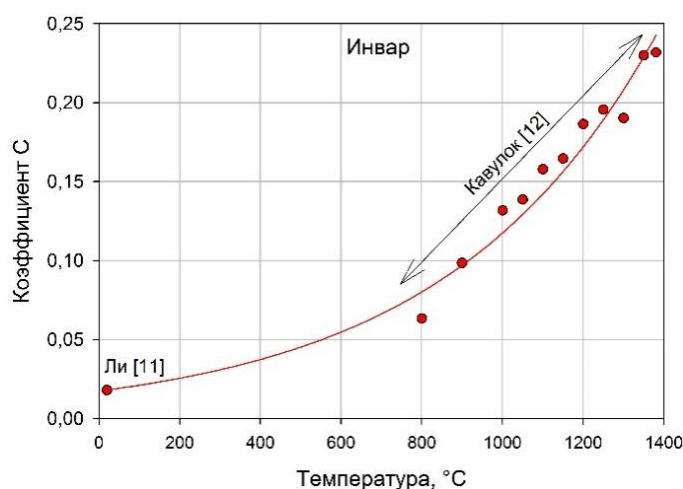


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента C чувствительности к скорости деформации для Инвара, построенная по результатам работ [11] и [12]

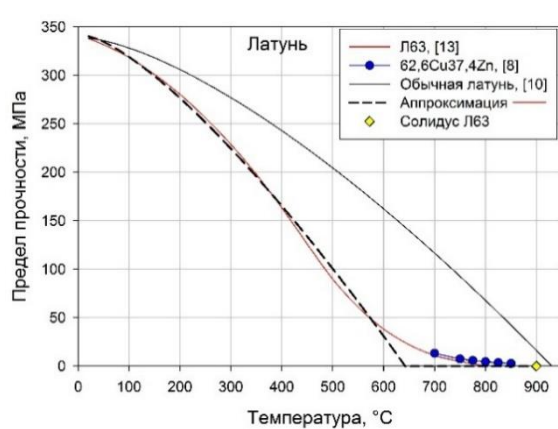
температурная зависимость предела прочности латуни Л63 из [13] в диапазоне температур 20-800 °С и синими точками латуни 62,6Cu37,4Zn из [8] в диапазоне температур 700-850 °С. Желтая ромбоэдрическая точка указывает температуру солидуса латуни Л63, равную ≈ 900 °С. Из рис. 4, а видно хорошее соответствие между данными [13, 8], и из них следует, что с повышением температуры прочность латуни монотонно понижается и при 650 °С опускается до ≈ 20 МПа, то есть материал становится очень пластически податливым. Сплошной черной линией показано температурное изменение σ_B , предсказанное с использованием уравнения (4) и параметров $T_0 = 20,15$ °С, $T_m = 930,15$ и $m = 1,45$ из [10]. Видно, что предсказанная таким образом кривая $\sigma_B = f(T)$ сильно превышает прочность латуни, особенно при высоких температурах. Поэтому экспериментальная зависимость $\sigma_B = f(T)$ была кусочно аппроксимирована: на участке 20-642,55 °С уравнением (4) с параметрами с $T_0 = 20$ °С, $T_m = 642,55$ °С и $m = 1,35$, и прямой $\sigma_B = 0$ на участке 642,55-900 °С, см. черную штриховую линию на рис. 4а. Следует отметить, что полученное значение параметра $m = 1,35$ близко к значениям $m = 1,45$ и $m = 1,132$, соответственно полученных для латуни в [10] и [14].

На рис. 4, б показаны экспериментальные

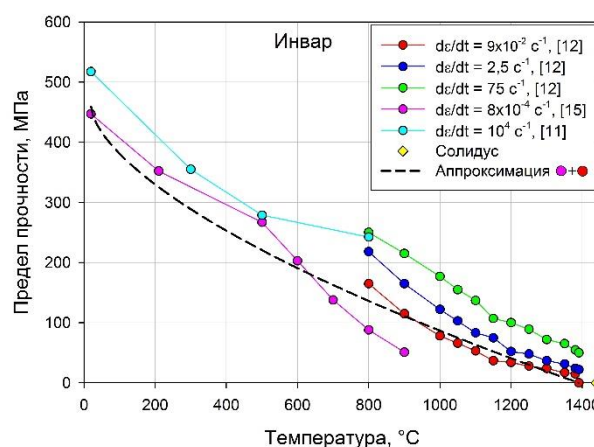
температурные зависимости сопротивления Инвара пластическому деформированию из работы [11] для температурного интервала 20-800 °С, из [15] для интервала 20-900 °С и из [12] для интервала 800-1390 °С. Данные температурной зависимости были получены при разных скоростях деформации, указанных на рис. 4а. Видно, что все кривые показывают подобную тенденцию – монотонное понижение σ_B вплоть до температур, близких к температуре солидуса Инвара, равную 1439 °С согласно [12]. Совместная аппроксимация уравнением (4) данных, полученных в [12] и [15] соответственно для скоростей деформации $\dot{\epsilon} = 9 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $\dot{\epsilon} = 8 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, дала следующее значение коэффициента чувствительности к температуре $m = 0,624$, с $T_0 = 20$ °С и $T_m = 1390$ °С. Следует отметить, что это значение m близко к значению $m = 0,55$, полученному Джонсоном и Куком для АРМКО-железа [5]. Полученная аналитическая зависимость показана на рис. 4, б штриховой линией.

Заключение

В результате комплексного подхода, сочетающего собственные эксперименты по растяжению и анализ литературных данных, впервые получены полные наборы параметров уравнения Джонсона-Кука для компонент биметаллической системы латунь Л63/Инвар 36Н, предназначенной для полу-



а



б

Рис. 4. Температурные зависимости предела прочности латуни (а) и Инвара (б)

чения сваркой взрывом.

Выявлено, что для сплава Инвар 36Н стандартная модель является недостаточной вследствие сильной температурной зависимости его чувствительности к скорости деформации. Предложена модифицированная версия уравнения, в которой параметр C представлен как экспоненциальная функция температуры: $C(T) = 0,0174 \times \exp(T/523,8)$. Остальные параметры составили: $A=575$ МПа, $B=513,3$ МПа, $n=0.3016$, $m=0,624$.

Полученные уравнения имеют следующий вид.

Для латуни Л63:

$$\sigma = (248 + 287,5\varepsilon_p^{0,483}) \left(1 + 0,0021 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p, \text{ c}^{-1}}{1, \text{ c}^{-1}} \right) \left[1 - \left(\frac{T-20^\circ\text{C}}{622,55^\circ\text{C}} \right)^{1,35} \right] \quad (6)$$

Для Инвара 36Н:

$$\sigma = (575 + 513,3\varepsilon_p^{0,3016}) \left(1 + 0,0174 \exp \frac{T}{523,8^\circ\text{C}} \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p, \text{ c}^{-1}}{1, \text{ c}^{-1}} \right) \left[1 - \left(\frac{T-20^\circ\text{C}}{1370^\circ\text{C}} \right)^{0,624} \right] \quad (7)$$

Данные уравнения будут использованы для аналитического исследования деформирования компонент и деформационного тепловыделения при сварке взрывом термобиметалла латунь/Инвар.

Библиографический список

1. Sherpa, B. B. Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: A review / B. B. Sherpa, R. Rani // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. – 2024. – Vol. 6. – Pp. 100078. <https://doi.org/10.1016/j.jalms.2024.100078>.
2. Preheating of Colliding Plates by a Shock-Compressed Gas during Explosive Welding / S. V. Khaustov, V. V. Pai, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak, A. D. Kochkalo // *Russian Metallurgy*. – 2024. – Vol. 2024. – Pp. 1166-1174. <https://doi.org/10.1134/S0036029524702173>.
3. Gul'Bin, V. N. Plastic deformation of metals in explosion welding / V. N. Gul'Bin, A. G. Kobelev // *Welding*

International. – 1999. – Vol. 13(4). – Pp. 306-309. <https://doi.org/10.1080/09507119909447385>

4. Johnson, G. R. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G. R. Johnson, W. H. Cook // *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. – Proceedings 7th International Symposium on Ballistics. – Arlington: ADPA. – 1983. – Vol. 21. – Pp. 541-547.

5. Johnson G.R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G. R. Johnson, W. H. Cook // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1985. – Vol. 21(1). – Pp. 31-48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)

6. Laakso, S. Modified Johnson-Cook flow stress model with thermal softening damping for finite element modeling of cutting / S. Laakso, E. Niemi // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*. – 2016. – Vol. 230. – Pp. 8587. <https://doi.org/10.1177/0954405415619873>

7. Morphology and Structure of Brass-Invar Weld Interface after Explosive Welding / A. Malakhov, A. Epishin, I. Denisov, I. Saikov, G. Nolze // *Materials*. – 2022. – Vol. 15(23). – Pp. 8587. <https://doi.org/10.3390/ma15238587>

8. Ефремов, Б. Н. Латуни: от фазового строения к структуре и свойствам / Б. Н. Ефремов // М.: ИНФРА-М. – 313 с.

9. Nan, J. Yielding behavior of low expansion invar alloy at elevated temperature / J. Nan, G. Li, K. Xu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 114. – Pp. 35-40. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00732-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00732-4)

10. Mechanical Properties of Brass under Impact and Perforation Tests for a Wide Range of Temperatures: Experimental and Numerical Approach / M. Klosak, T. Jankowiak, A. Rusinek, A. Bendarma, P. W. Sielicki, T. Lodygowski // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(24). – Pg. 5821. <https://doi.org/10.3390/ma13245821>

11. Li, G. Study on constitutive relationship of Fe-36Ni invar alloy / G. Li, Y. Cai, H. Qi // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vols. 291-294. – Pp. 1131-1135. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.1131>

12. Formability of Invar 36 alloy at high temperatures / P. Kawulok, D. Jurek, I. Schindler, R. Kawulok, K. Opěla, J. Němec, M. Kawuloková, S. Rusz, M. Sauer // *Journal of Metallic Materials*. – 2022. – Vol. 74 (1). – Pp. 15-20.

13. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 2-3. Цветные металлы и сплавы / Под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – М.: Машиностроение, 2001. – 880 с.

14. Taylor's Test Technique for Dynamic Characterization of Materials: Application to Brass / R. Julien, T. Jankowiak, A. Rusinek, P. Wood // *Experimental Techniques*. – 2016. – Vol. 40. – Pg. 347-355. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0038-4>

15. Effect of Temperature and Strain Rate on Deformation Behavior of Invar 36 Alloy / L. Xifeng, N. Chen, J. Li, X. He, H. Liu, X. Zheng, J. Chen // *Acta Metallurgica Sinica*. – 2017. – Vol. 53(8). – Pp. 965-975. <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2017.00043>

Информация об авторах

Епишин Александр Игоревич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения

им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН РАН). НИЛ «Ударно-волновых процессов»

E-mail: a.epishin2021@gmail.com

Малахов Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН РАН), НИЛ «Ударно-волновых процессов».

E-mail: malakhov@ism.ac.ru

Ткаченко Валерий Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН РАН), НИЛ «Ударно-волновых процессов». ИСМАН РАН.

E-mail: tkachenkoism@mail.ru

Information about the authors

Aleksander I. Epishin – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences Problems of the Russian Academy of Sciences (ISMAN RAS), Research Laboratory of Shock-Wave Processes

E-mail: a.epishin2021@gmail.com

Andrey Yu. Malakhov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences Problems of the Russian Academy of Sciences (ISMAN RAS), Research Laboratory of Shock-Wave Processes

E-mail: malakhov@ism.ac.ru

Valery V. Tkachenko – Postgraduate Student, Junior Research A.G. Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Sciences Problems of the Russian Academy of Sciences (ISMAN RAS), Research Laboratory of Shock-Wave Processes

E-mail: tkachenkoism@mail.ru

Вклад авторов

А. И. Епишин – определение цели работы, анализ экспериментов, написание текста статьи

А. Ю. Малахов – определение цели работы, написание текста статьи, участие в обсуждении результатов

В. В. Ткаченко – подготовка образцов, проведение механических испытаний, участие в обсуждении результатов

Contribution of the authors

A. I. Epishin – defining the purpose of the work, analyzing the experiments, and writing the article

A. Yu. Malakhov – defining the purpose of the work, writing the article, and participating in the discussion of the results

V. V. Tkachenko – preparing the samples, conducting mechanical tests, and participating in the discussion of the results

*Статья поступила в редакцию 14.10.2025, доработана 05.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 14.10.2025, revised 05.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

Научная статья
Original article

УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-44-52

А. Н. Ву Ван, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак, В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА ЗОНЫ СОЕДИНЕНИЯ БИМЕТАЛЛА АЛЮМИНИЙ-МЕДЬ, ПОЛУЧЕННОГО СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ВБЛИЗИ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ СВАРИВАЕМОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

Автор, ответственный за переписку: Валентин Олегович Харламов (harlamov_vo@mail.ru)

Аннотация: В работе представлены результаты исследования микроструктуры, фактографии, элементного и фазового состава зоны соединения биметалла алюминий-медь, полученного сваркой взрывом вблизи нижней границы свариваемости (при энергии пластической деформации 0,17 – 0,24 МДж/м²). Показано, что в исследованном диапазоне энергий содержание меди в составе оплавов меняется с 20 до 50 Ат.%, что соответствует твердому раствору на основе соединения CuAl₂ плюс алюминий. Выявлено, что при образовании равнопрочного сварного соединения между медью и алюминием содержание оплавов в изломе снижается от 55 – 63% до 27 – 21% при неизменном линейном содержании оплавов равном 56 – 67%. При этом количество областей алюминия увеличивается с 34 – 36% до 57 – 73%, что говорит о смещении зоны разрушения от оплавов вглубь алюминия с изменением преимущественного характера разрушения с хрупкого на вязкий.

Ключевые слова: Сварка взрывом, зона соединения, оплав, равнопрочность, химический анализ, фактография, излом, характер разрушения

Благодарности: Центру коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ВолгГТУ за проведение исследований на электронном микроскопе FEI Versa 3D

Для цитирования: Ву Ван А. Н., Харламов В. О., Кузьмин С. В., Лысак В. И., Агеев В. В., Емельяненко М. Ю. Исследование химического и фазового состава зоны соединения биметалла алюминий-медь, полученного сваркой взрывом вблизи нижней границы свариваемости. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):44–52.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-44-52>

A. N. Vu Van, V. O. Kharlamov, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak, V. V. Ageev, M. Yu. Emelyanenko

INVESTIGATION OF THE CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION OF THE ALUMINUM-COPPER BIMETAL JUNCTION ZONE OBTAINED BY EXPLOSION WELDING NEAR THE LOWER WELDABILITY LIMIT

Volgograd State Technical University

The author responsible for the correspondence: Valentin Olegovich Kharlamov (harlamov_vo@mail.ru)

Annotation: The paper presents the results of a study of the microstructure, factography, elemental and phase composition of the aluminum-copper bimetal junction zone obtained by explosion welding near the lower limit of weldability (at a plastic deformation energy of 0.17 – 0.24 MJ/m²). It is shown that in the studied energy range, the copper content in the composition of the alloys varies from 20 to 50 Atm.%, which corresponds to a solid solution based on the compound CuAl₂ plus aluminum. It was found that when an equal-strength welded joint is formed between copper and aluminum, the melt content in the fracture decreases from 55 – 63% to 27 – 21% with a constant linear melt content of 56 – 67%. At the same time, the number of aluminum regions increases from 34 – 36% to 57 – 73%, which indicates a shift in the fracture zone from the melts deeper into the aluminum with a change in the predominant fracture pattern from brittle to viscous.

Keywords: Explosion welding, joint zone, melting zone, strength, chemical analysis, fractography, fracture, the nature of destruction

Acknowledgements: Center for Collective use "Physico-chemical Research Methods" of VolgSTU for conducting research on the FEI Versa 3D electron microscope

To cite: Vu Van A. N., Kharlamov V. O., Kuzmin S. V., Lysak V. I., Ageev V. V., Emelyanenko M. Yu. Investigation of the chemical and phase composition of the aluminum-copper bimetal junction zone obtained by explosion welding near the lower weldability limit. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):44–52.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-44-52>

Введение

Биметалл медь-алюминий предназначен для изготовления из него контактных переходников и токоведущих элементов электротехнического назначения с улучшенным комплексом физико-механических характеристик. Однако, между медью и алюминием возможно образование хрупких интерметаллидов при локальном оплавлении, препятствующих формированию качественного биметалла. Авторами ряда работ [1-5] показано, что качественное сварное соединение при сварке металлов взрывом можно получить, если в зоне соединения реализуется определённый уровень сдвиговых деформаций. Несмотря на многочисленные исследования по выявлению влияния параметров соударения на свариваемость взрывом меди с алюминием, с позиции типа взаимодействия металлов данная проблема практиче-

ски не освещена, что требует проведения исследования химического и фазового состава в зоне соединения биметалла алюминий-медь, полученного сваркой взрывом вблизи нижней границы свариваемости.

Материалы и методы исследования

В опытах использовались листы меди толщиной 2,5 мм и алюминия толщиной 4 мм марок М1 и АД1 соответственно (таблица). Для сварки взрывом меди с алюминием применялась классическая плоскопараллельная схема соударения двух пластин (рис. 1). Режимы сварки в опытах обеспечивали пересечение нижней границы свариваемости за счет изменения угла соударения γ от $8,95^\circ$ до $12,5^\circ$ при постоянной скорости точки контакта $V_k = D = 1750$ м/с (рис. 2) [7] при этом энергия пластических деформаций W_2 изменялась в диапазоне значений от 0,12 до 0,24 МДж/м².

Характеристики используемых материалов

Марка	Химический состав, мас. %										σ_b , 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

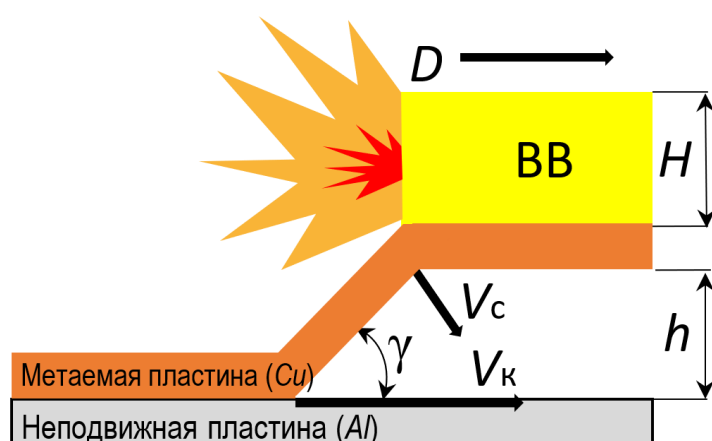


Рис. 1. Схема соударения пластин при сварке взрывом:

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

Скорость детонации взрывчатого вещества D контролировалась электроконтактным методом [9] с помощью прибора для измерения микросекундных интервалов времени КТБ «Интервал». В качестве взрывчатого вещества использовалась смесь аммонита 6ЖВ с кварцевым песком в соотношении 50/50.

Механические испытания сваренных взрывом биметаллов проводили на отрыв слоев образцов - выдавок [8] согласно ОСТ 5.9311-78 на разрывной машине Р-20 (рис. 3, а). 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 слоёв (рис. 3, б).

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

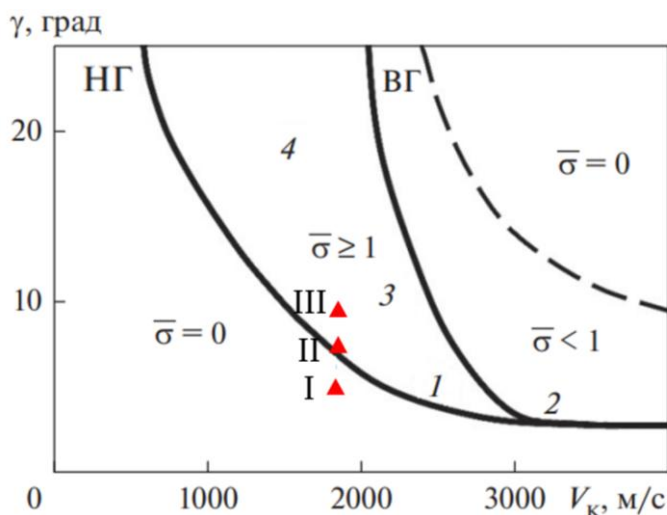


Рис. 2. Область свариваемости меди с алюминием при сварке взрывом [7]:
НГ – нижняя граница, ВГ – верхняя граница. Римскими цифрами обозначены режимы сварки, использованные в опытах

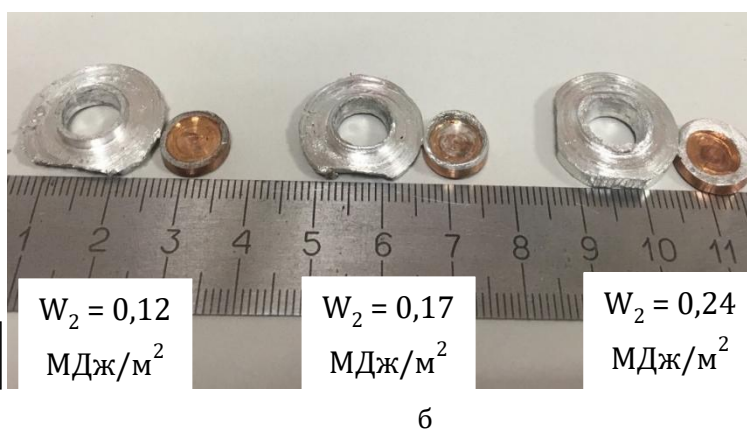
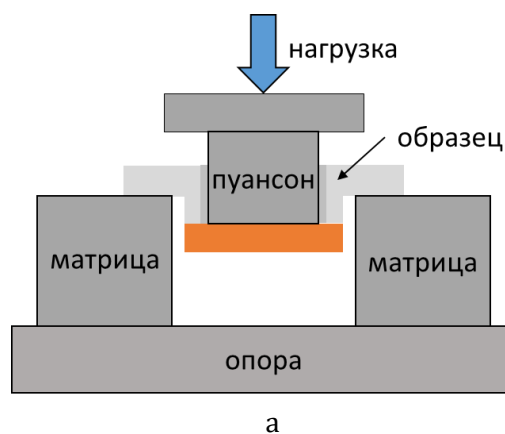


Рис. 3. Схема проведения механических испытаний на отрыв слоёв биметалла (а) и внешний вид образцов-выдавок после разрушения (б)

минию – темного, а оплавом - серого цвета. Содержание элементов и их распределение поперек границы соединения получены с помощью системы энерго-дисперсионного анализа Oxford AZtecLive Expert с детектором Ultim Max 65. Стехиометрию интерме-

таллидных соединений уточняли с помощью рентгеноструктурного фазового анализа на дифрактометре D8 Advance (Bruker, Германия). Идентификацию фаз осуществляли в программном обеспечении к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием

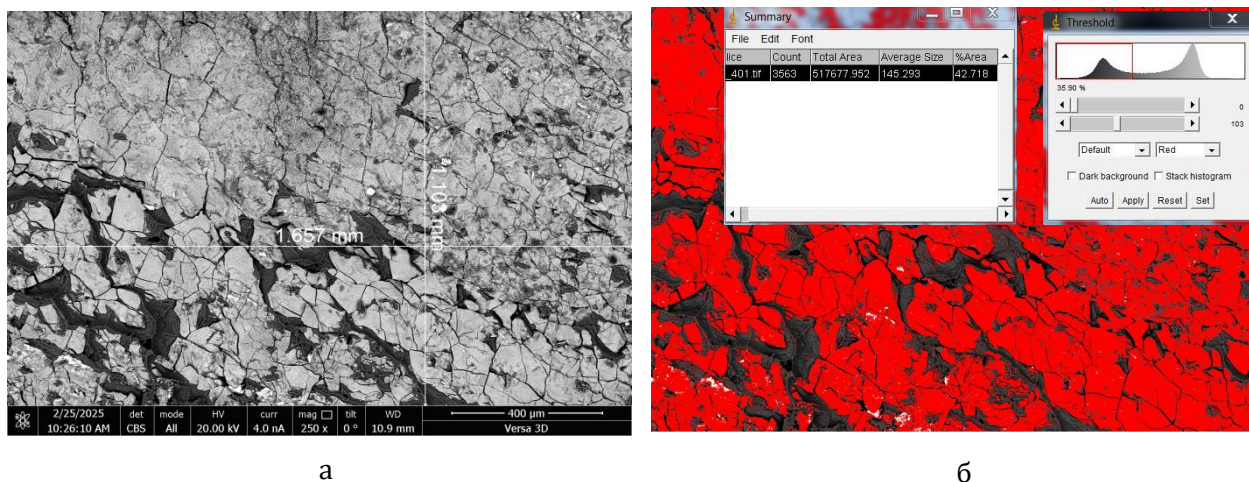


Рис. 4. Методика определения содержания компонентов в зоне разрушения:

а – фрактография зоны соединения после механических испытаний;
б – результат обработки электронного изображения с помощью инструмента *Threshold* в программе *ImageJ* v1.52

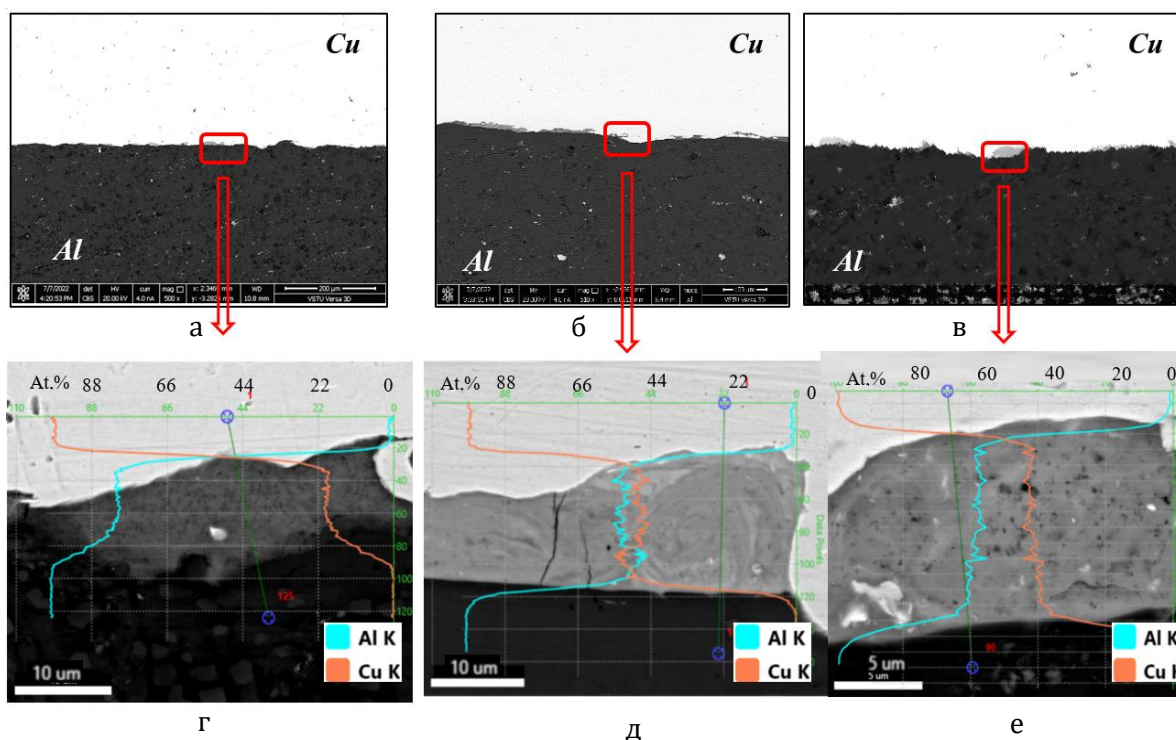


Рис. 5. Микроструктура и распределение элементов внутри оплавов в зоне соединения биметалла Cu-Al, полученного вблизи нижней границы свариваемости взрывом при энергиях W_2 (МДж/м²) 0,12 (а, г); 0,17 (б, д); 0,24 (в, е)

лицензионной базы данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data). Процентное содержание компонентов (алюминий, медь, оплав) в зоне соединения разрушенных при механических испытаниях образцов определяли на медной и алюминиевых сторонах выдавок по разнице контраста как отношение площади включений (рис. 4, а) к общей площади электронного изображения с помощью инструмента *Threshold* программы *ImageJ* v1.52 (рис. 4, б).

Количественное содержание оплавов вдоль линии соединения определяли линейным методом при обработке в той же программе электронных фотографий, полученных на микрошлифах.

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,

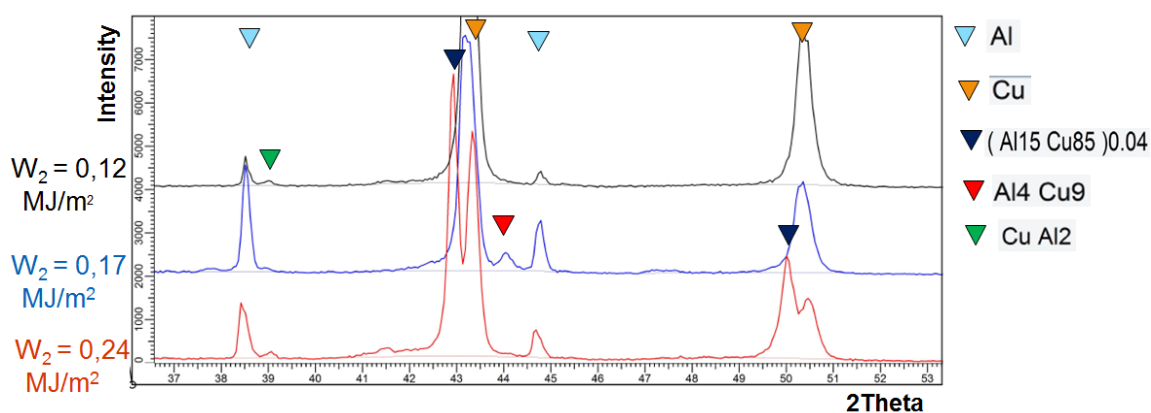


Рис. 6. Влияние энергии пластических деформаций на фазовый состав в зоне соединения сваренных взрывом образцов биметалла медь-алюминий вблизи нижней границы свариваемости

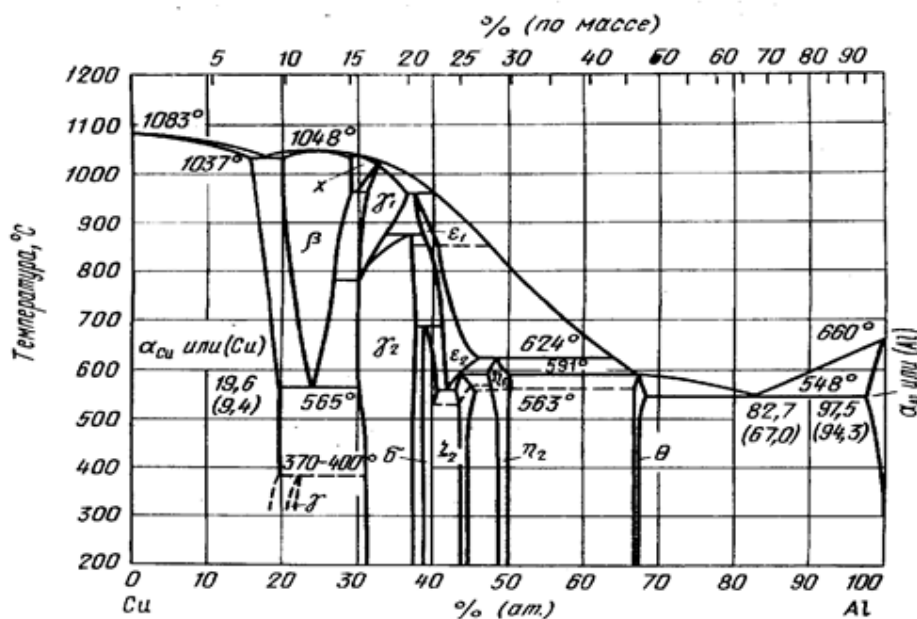


Рис. 7. Диаграмма состояния алюминий-медь [10]

в образце, полученном на режиме ниже нижней границы свариваемости ($0,12 \text{ МДж/м}^2$) обнаружены оплавы в количестве 15 %, имеющие мелкодисперсное двухфазное строение (рис. 5, г).

При повышении энергии W_2 с $0,12$ до $0,17$ и $0,24 \text{ МДж/м}^2$ содержание оплавов скачкообразно увеличивается до 56 и 57 % соответственно (рис. 8), а соотношения элементов в оплавах Al/Cu изменяется от 80/20 до 50/50 At.% (рис. 5, г – е).

Сопоставление результатов элементного

участки прихватившегося алюминия, что указывает на то, что отрыв в основном произошел 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.

Повышение энергии W_2 до $0,17 \text{ МДж/м}^2$ приводит к росту содержания оплавов вдоль линии соединения до 56% и увеличению со-

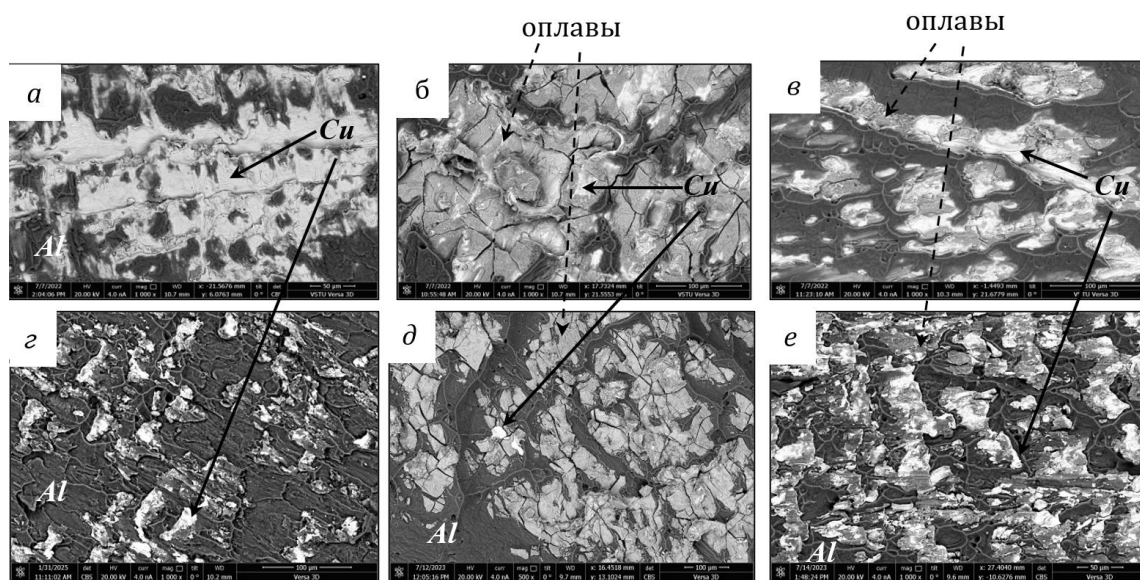


Рис. 8. Микроструктура образцов биметалла $Cu-Al$ при энергиях W_2 [МДж/м²] $0,12$ (а); $0,17$ (б); $0,24$ (в) и соответствующая им фрактография зоны соединения со стороны меди (а, б, в) и со стороны алюминия (г, д, е)

(рис. 5, г.) и рентгеноструктурного анализов (рис. 6) с известной диаграммой состояния алюминий-медь (рис. 7) позволяет предположить, что при сварке взрывом на режиме ниже нижней границы свариваемости образуются участки локального оплавления, имеющие фазы $(Al)+\theta$ (твёрдый раствор на основе соединения $CuAl_2$) и состав близкий к эвтектическому с температурой плавления 548°C .

Однако механические испытания на отрыв слоев показали, что энергии пластической деформации равной $0,12 \text{ МДж/м}^2$ недостаточно для образования прочного соединения. В изломе (рис. 8, г, ж) наблюдаются гладкая поверхность меди и отдельные

удержания меди в некоторых из них (рис. 5, д) до значений, соответствующих η -фазе (на основе соединения $AlCu$). Однако механические свойства на отрыв слоев соединения достигают значений равноправности. На поверхности разрушенного образца –выдавки (рис. 8, б, 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 свариваемости, теперь имеют характерный вид вязкого разрушения при близком процентном содержании по площади излома (рис. 9). Это свидетельствует о том, что основная область раз-

рушение теперь проходит по оплавам и имеет хрупкий характер.

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%). Содержание элементов Al/Cu равно 60/40 At.% (рис. 5, е) соответствует двухфазной области диаграммы $\eta+\theta$. При механических испытаниях соединение также оказалось равнопрочным (рис. 9). В изломе (рис. 8, в, е) теперь преобладают участки вязкого разрушения по алюминию (до 73%). Внутри видимых участков оплавленного металла отсутствуют трещины, а их количество снизилось с 55-63% до 21-27%.

Выводы

При сварке взрывом меди с алюминием в диапазоне энергии пластической деформации 0,17 - 0,24 МДж/м² концентрация меди в

составе оплавов меняется с 20 до 50 At.% при фазовом составе соответствующему твердому раствору на основе соединения $CuAl_2$ плюс алюминий. При достижении равнопрочности вблизи нижней границы свариваемости разрушение в основном проходит по оплавам (55-63 %) и имеет хрупкий характер с сеткой трещин, доля вязкого разрушения по алюминию составляет 34-36 %. Повышение энергии пластических деформаций W_2 от 0,17 до 0,24 МДж/м² приводит к снижению содержания оплавов в изломе до 21-27%, а доля вязкого разрушения по алюминию возрастает до 57-73%. Отсутствие изменения линейного содержания оплавов в микроструктуре при двукратном снижении содержания оплавов в изломе свидетельствует о смещении зоны разрушения образцов биметалла вглубь алюминия и изменении преимущественного характера излома с хрупкого на вязкий.

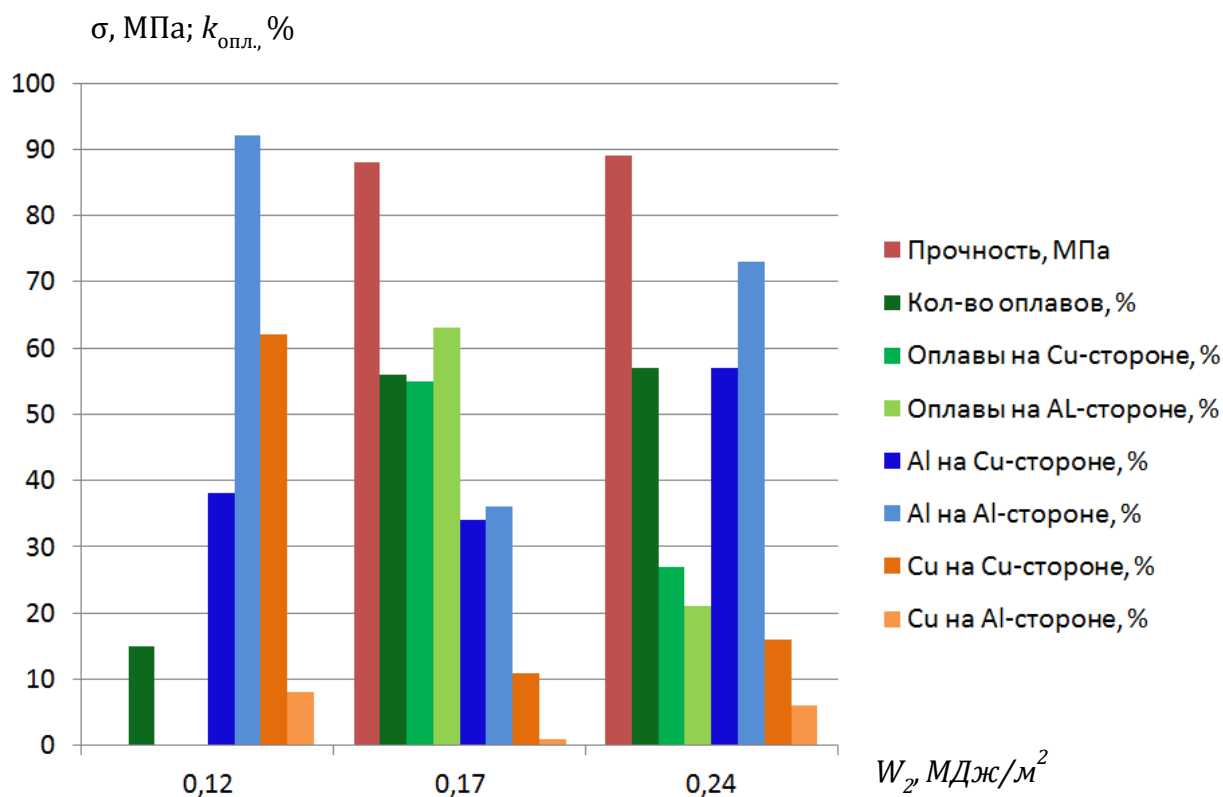


Рис. 9. Влияние энергии пластических деформаций на прочность и содержание оплавов вдоль линии соединения и по площади излома сваренных взрывом образцов биметалла медь-алюминий вблизи нижней границы свариваемости

Библиографический список

1. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е. А. Чугунов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // 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. 7-10.
3. Новые конструкции токоподводящего узла катодной секции электролизера алюминия / А. П. Пеев, Ю. Г. Долгий, Лысак В. И., 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. – Москва : Издательство "Машиностроение-1", 2005. – 544 с.
8. Кузьмин, В. И. Методики испытаний сваренных взрывом композиционных материалов : учебное пособие / В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев ; В. И. Кузьмин, С. В. Кузьмин, А. П. Пеев ; М-во образования и науки Российской Федерации, Волгоградский гос. технический ун-т. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – 65 с.
9. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б.И. Шехтер. – 2-е издание, переработанное. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы Издательства «Наука», 1975. – 704 с.
10. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. Т. 1. – Москва : Машиностроение, 1996. – 991 с.

Информация об авторах

Алексей Нгианович Ву Ван – аспирант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0009-0000-2343-8281>

e-mail: avuvan@mail.ru

Валентин Олегович Харламов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ведущий инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Виктор Витальевич Агеев – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Максим Юрьевич Емельяненко – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Information about the authors

Alexey N. Wu Wang is a postgraduate student at the Department of Welding Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0009-0000-2343-8281>

e-mail: avuvan@mail.ru

Valentin O. Kharlamov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding Equipment and Technology, Senior Engineer at the Center for Collective Use of Physico-Chemical Research Methods, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Viktor V. Ageev is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: frosttboll_1337@bk.ru

Maxim Y. Emelianenko is a Master's student at Volgograd State Technical University

e-mail: maksemelyanenko123@gmail.com

Вклад авторов

А. Н. Ву Ван – подготовка экспериментов по сварке взрывом, проведение механических испытаний, написание текста статьи

В. О. Харламов – проведение исследований методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

С. В. Кузьмин – расчеты параметров сварки взрывом, анализ полученных результатов

В. И. Лысак – определение цели работы, участие в обсуждении результатов

В. В. Агеев, М. Ю. Емельяненко – подготовка материалов для проведения исследований

Contribution of the authors

A. N. Vu Van – preparation of explosion welding experiments, conducting mechanical tests, wrote the article.

V. O. Kharlamov – conducting studies using electron microscopy and X-ray structural analysis.

S. V. Kuzmin – calculations of explosive welding parameters, analyses of results.

V. I. Lysak – defining the purpose of the work, participation in discussion of results

V. V. Ageev, M. Y. Emelianenko – preparation of materials for research

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 30.10.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 30.10.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

Научная статья
Original article

УДК 669.018.25.017

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-53-61

А. В. Крохалев, Д. Р. Черников, В. О. Харламов, С. А. Ганцев, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

СТРУКТУРА И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ «ТИТАН-ЖЕЛЕЗО» ПОСЛЕ ВЗРЫВНОГО ПРЕССОВАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

Автор, ответственный за переписку: Александр Васильевич Крохалев (kroch58@yandex.ru)

Аннотация: Изучены основные особенности морфологии и состава фаз материалов системы Fe-Ti, полученных в процессе уплотнения порошков титана и железа взрывом. Выявлено влияние механизма пластической деформации частиц порошка на процесс образования метастабильной интерметаллидной фазы Ti_2Fe , обладающей повышенной водородной емкостью.

Ключевые слова: Прессование порошков взрывом, метастабильный интерметаллид Ti_2Fe , водородная емкость

Для цитирования: Крохалев А. В., Черников Д. Р., Харламов В. О., Ганцев С. А., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Структура и химический состав порошковых материалов системы «титан-железо» после взрывного прессования. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):53–61.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-53-61>

A. V. Krokhaliev, D. R. Chernikov, V. O. Kharlamov, S. A. Gantsev, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

STRUCTURE AND CHEMICAL COMPOSITION OF POWDERS IN THE "TITANIUM-IRON" SYSTEM AFTER EXPLOSIVE PRESSING

Volgograd State Technical University

The author responsible for the correspondence: Alexander Vasilyevich Krokhaliev (kroch58@yandex.ru)

Annotation: The main features of the morphology and phase composition of materials of the Fe-Ti system obtained during the compaction of titanium and iron powders by explosion have been studied. The effect of the mechanism of plastic deformation of powder particles on the formation of the metastable intermetallic phase Ti_2Fe , which has an increased hydrogen capacity, has been revealed.

Keywords: Explosive pressing of powders, metastable intermetallide Ti_2Fe , hydrogen capacity

To cite: Krokhaliev A. V., Chernikov D. R., Gantsev S. A., Kharlamov V. O., Kuzmin S. V., Lysak V. I. Structure and chemical composition of powders in the "titanium-iron" system after explosive pressing. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):53–61.
<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-53-61>

Введение

В настоящее время наиболее перспективными для хранения водорода считаются сплавы, состоящие из интерметаллидов, которые могут удерживать его с высокой объемной плотностью при относительно низком давлении [1]. Среди них особое место занимают материалы на основе TiFe – соединения типа АВ, которое является одной из наиболее многообещающих для коммерческого применения интерметаллических фаз благодаря доступной цене и высокой водородной емкости [2].

У интерметаллида TiFe на поверхности имеются естественные оксидные пленки, препятствующие поглощению водорода. Для инициации процесса требуется предварительная термическая активация [3], включающая отжиг в вакууме или в водородной атмосфере, способствующий удалению оксидных слоёв и подготовке поверхности к поглощению водорода.

За последние несколько лет появились новые методы повышения водородной ёмкости TiFe, такие как легирование циркони-

ем или увеличение содержания титана сверх стехиометрического уровня [4-7].

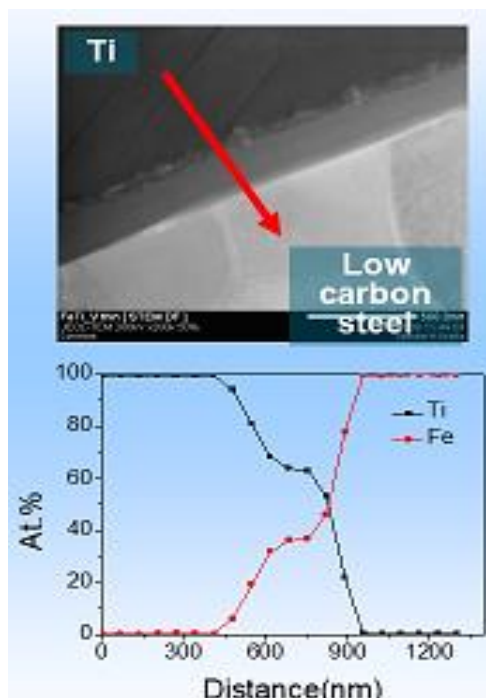
Двухфазные сплавы, состоящие из соединения TiFe и твердого раствора железа в β -титане, полученные путём плавки шихты с 66,6 ат.% титана и 33,4 ат.% железа и длительного отжига при 800 °С, способны поглощать до 2,5 мас.% водорода при температуре 150–350 °С [4], что является более высоким показателем в сравнении с гидридом интерметаллического соединения TiFe, имеющего весовую водородную емкость в ~1,9% [8].

Также известна модификация технологии, при которой для получения материала используют дуговое плавление с последующим отжигом при 1200 °С, что даёт трёхфазную структуру – TiFe, β -Ti и Ti_2Fe . Такой сплав способен поглощать водород без предварительной термической активации. Анализ поверхностного оксидного слоя по-

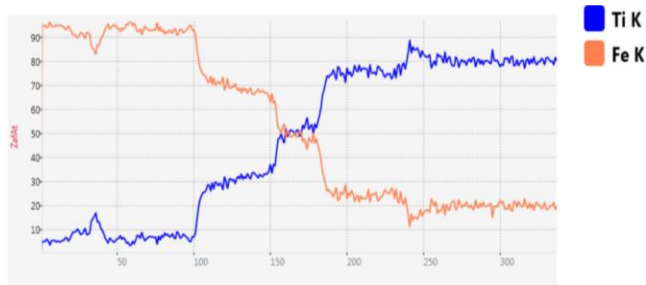
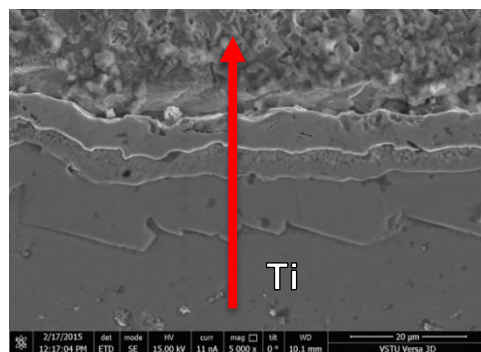
казывает, что концентрация титана в оксидах на поверхности β -Ti и Ti_2Fe выше, чем на TiFe, что ускоряет поглощение водорода [7]. Исследования подтверждают, что сплав с содержанием около 12 % Ti_2Fe и 30 % β -Ti способен при комнатной температуре поглотить 2,6 мас.% водорода [9].

Увеличение водородной емкости и повышение эффективности гидрирования обусловлены позитивным влиянием интерметаллидной фазы Ti_2Fe , которая, согласно «правилу обратной стабильности», должна иметь меньшую энтальпию образования гидридов по сравнению с TiFe и обеспечивать увеличение содержания водорода в гидридах до 2,08–3,09 мас. % [11].

Интерметаллидная фаза Ti_2Fe в системе Ti-Fe является метастабильной. Наибольший объем сведений о её формировании встречается в исследованиях сварки титана со сталью с помощью сварки взрывом (рис. 1, а)



а



б

Рис. 1. Образование слоя Ti_2Fe при сварке взрывом титана с низкоуглеродистой сталью (а) [6], и в процессе термической обработки сварных биметаллов титан-сталь, выполненных этим способом (б) [8]

[9], а также в работах, посвящённых термической обработке таких сварных соединений (рис. 1, б) [10].

Ударно-волновое нагружение порошочной смеси, расположенной на стальной подложке, осуществлялось при помощи фрон-

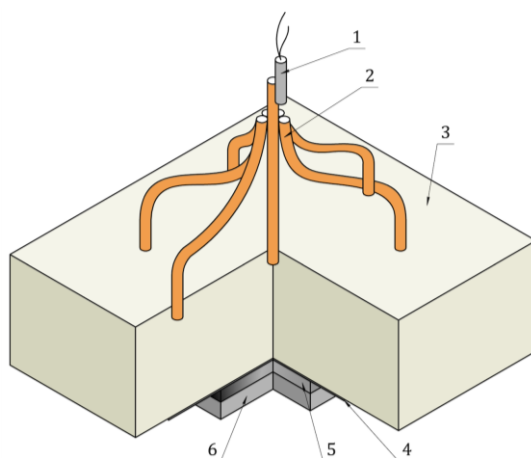


Рис. 2. Схема ударно-волнового нагружения порошковых смесей

Для исследования процессов формирования данного интерметаллида в условиях ударно-волновой обработки нами использовался метод взрывного прессования смесей порошков титана и железа. Этот подход имитирует условия сварки взрывом в области контакта частиц Ti и Fe и одновременно значительно увеличивает площадь контактной поверхности, что способствует снижению путей диффузии элементов при межфазных реакциях.

тально падающей детонационной волны, проходящей через стальную промежуточную прокладку (см. рис. 2). Режим прессования обеспечивал предельно высокое уплотнение исходного порошка вплоть до практически монолитного состояния [8].

Анализ структуры и состава фаз проводился с помощью растровой электронной микроскопии с использованием системы FEI Versa 3D LoVac, оснащенной встроенной системой микрорентгеноспектрального энергодисперсионного анализа EDAX ApolloX.

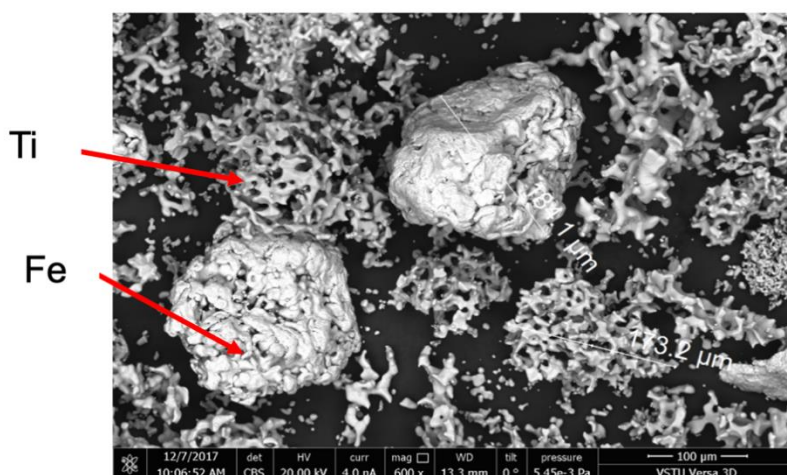


Рис. 3. Вид частиц Fe и Ti в исходной порошковой смеси

В работе использовались порошки коммерческого производства. Частицы порошка Ti имели губчатую форму, а Fe – округлую с ярко выраженным поликристаллическим строением (рис. 3). Состав компонентов в порошковой смеси был принят равным: 36 мас.% Fe и 64 мас.% Ti, что практически соответствует составу Ti_2Fe и обеспечивает одинаковое объемное содержание Fe и Ti в смеси и, соответственно, максимальную

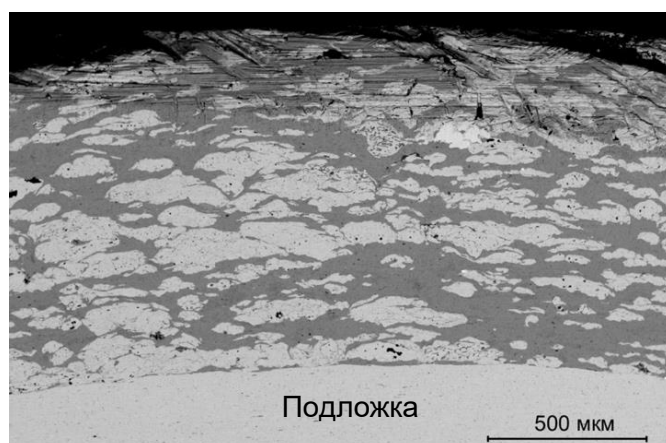
площадь межфазной поверхности Ti/Fe.

Для проведения исследования были выбраны параметры взрывного нагружения, приведенные в таблице.

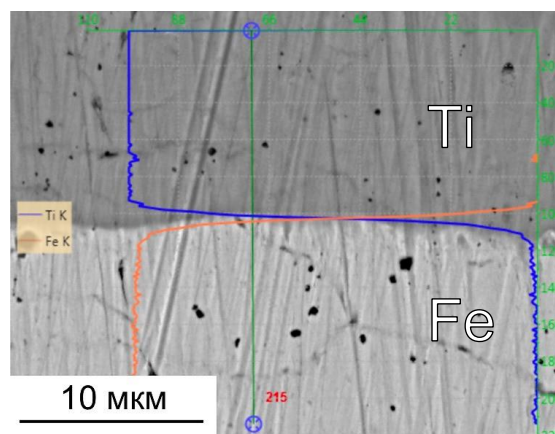
При использовании режима нагружения, обеспечивающего давление сжатия $P = 11,5$ ГПа, течение материала частиц при уплотнении порошка, по-видимому, носило ламинарный характер (рис. 4, а) и энергетического воздействия на границе фаз оказалось

Технологические параметры взрывного нагружения и расчетные значения условий ударно-волнового сжатия порошковой смеси

H, мм	h, мм	δ , мм	ВВ 100%	D, км/с	T, °C	P, ГПа
70	7,0	1,5	6ЖВ	4,2	777	11,5
85					831	12,5

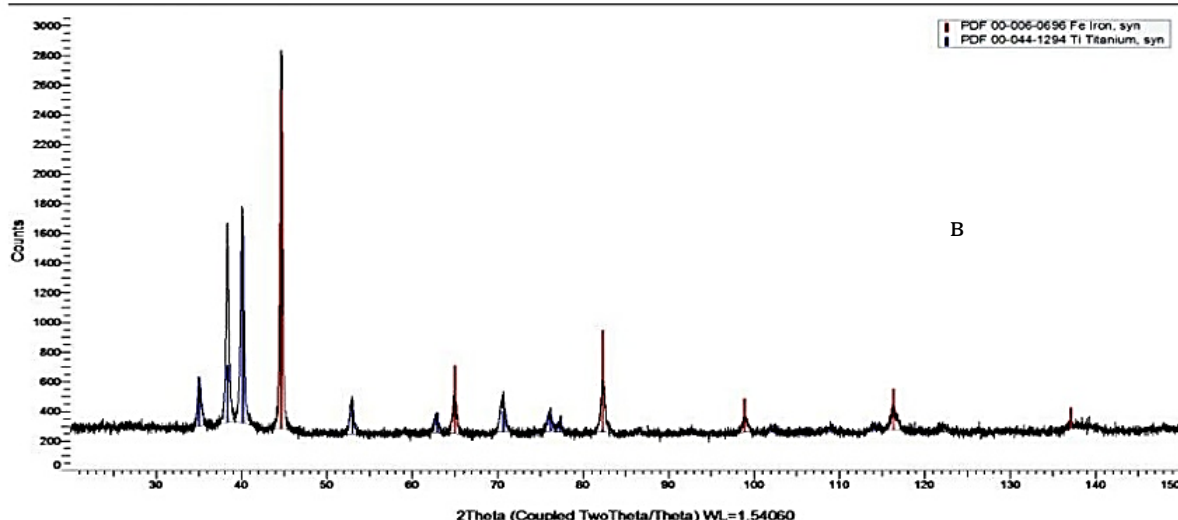


а



б

(Coupled TwoTheta/Theta)



в

Рис. 4. Структура (а), химический (б) и фазовый состав (в) прессовок, полученных на режиме нагружения:
 $t = 777$ °C, $P = 11,5$ ГПа

недостаточно для химического взаимодействия.

Рентгеноструктурный фазовый анализ полученного спрессованного материала, проведенный на дифрактометре Bruker D8 Advance, показал, что его фазовый состав после взрывного нагружения соответствует первоначальному составу используемой порошковой смеси (рис. 4, в). Даже в непосредственной близости от межфазных границ химический состав фаз практически не изменяется (рис. 4, б).

При более жестком режиме нагружения ($P = 12,5$ ГПа), была обеспечена локализация пластической деформации частиц в их по-

верхностных слоях, приведшая к ярко выраженному струйному (турбулентному) характеру течения частиц с образованием специфических «завихрений» (рис. 5, а) и, как следствие, интенсивному трению по их поверхностям. В результате, на границах образовались слои интерметаллического соединения толщиной до 20 мкм (рис. 5, б), которое по химическому составу и кристаллическому строению (рис. 5, в) может быть идентифицировано как метастабильная фаза Ti_2Fe .

Детальное исследование микроструктуры зоны взаимодействия показало ее неоднородность с равномерными периодическими

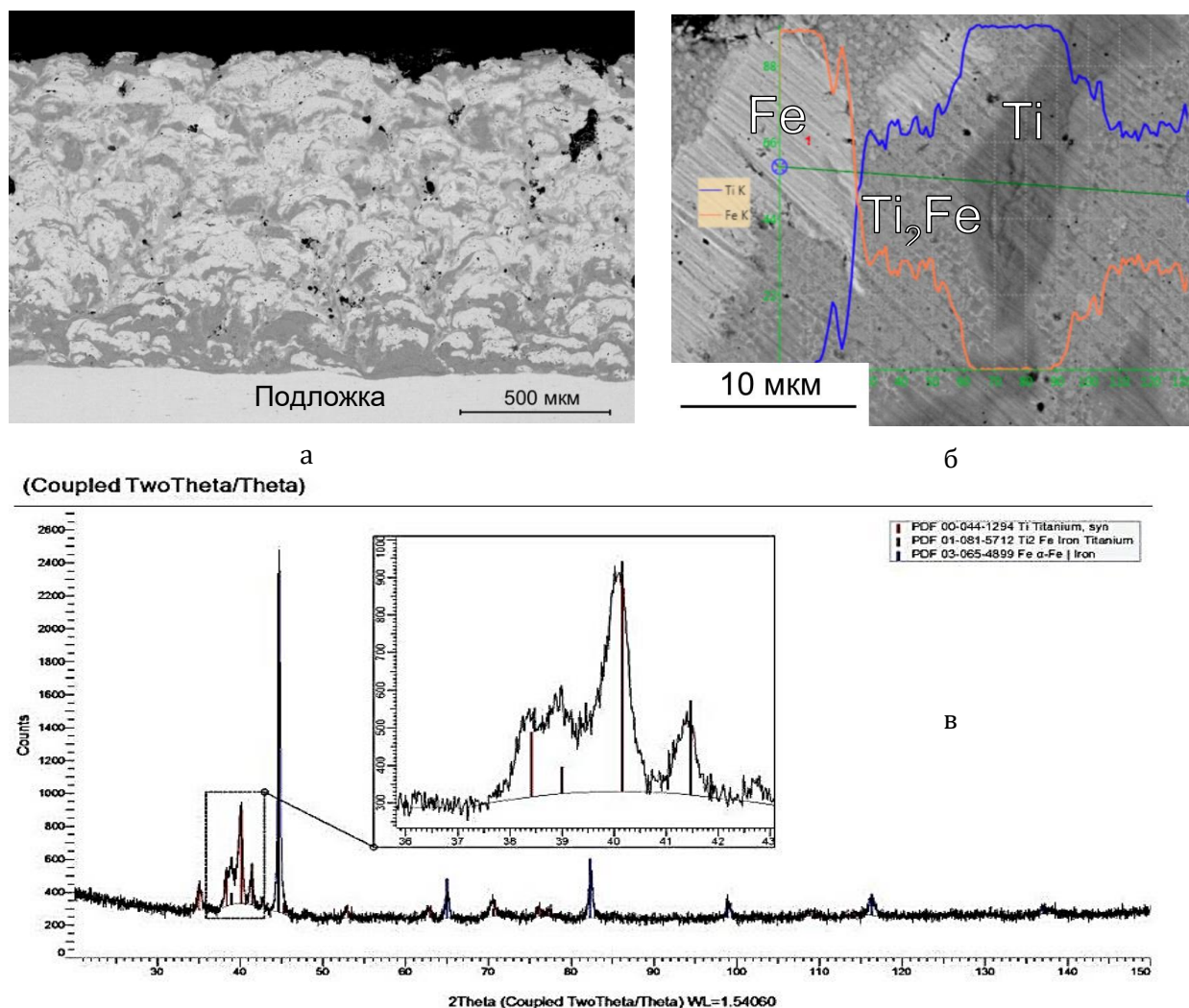


Рис. 5. Структура (а), химический (б) и фазовый состав (в) прессовок, полученных на режиме нагружения:
 $t = 830$ °C, $P = 12,5$ ГПа

колебаниями состава (рис. 6). При этом отклонения составили до 7 %.

Полученные в результате проведенных исследований данные указывают, что механизм пластического деформирования частиц титана и железа при взрывном прессовании существенно влияет на процесс образования метастабильной фазы Ti_2Fe . Можно высказать несколько предположений о природе этого влияния. Наиболее правдоподобной выглядит гипотеза о том, что интерметаллид образуется в том случае, когда при ударно-волновой обработке в материале образуется жидкая фаза. Данное суждение, прежде всего, не противоречит опыту сварки взрывом титановых сплавов и сталей.

Поскольку температура контактного плавления в системе Ti-Fe невысока и составляет в соответствии с диаграммой состояния системы 1085 °С, то ее достижение на границах частиц в случае взрывного прессования в режимах, обеспечивающих среднюю расчетную температуру разогрева 831 °С, при наличии струйных течений металла и крайней неоднородности температурного поля, является вполне вероятным. Неоднородность слоя образовавшегося интерметаллида в этом случае может быть ре-

зультатом одновременного роста его зерен из достаточно большого числа центров кристаллизации в объеме жидкой фазы в условиях быстрого охлаждения за счет теплоотвода в «холодные» участки структуры и металлическую подложку.

Заключение

На режимах взрывного прессования, обеспечивающих равномерную деформацию частиц порошка без струйных течений, смеси порошков Fe и Ti сохраняют фазовый состав, соответствующего составу исходной порошковой смеси.

При прессовании металлических порошков Fe и Ti на режимах с локализованной пластической деформацией и струйными течениями материала частиц, наблюдается образование термодинамически неравновесного и химически неоднородного интерметаллида Ti_2Fe . При этом его содержание в структуре явно недостаточно для обеспечения возможности использования спрессованного материала в качестве аккумулятора водорода, тем более что в структуре остается достаточно большое количество непрореагировавших фаз – титана и железа.

Использование последующей термиче-

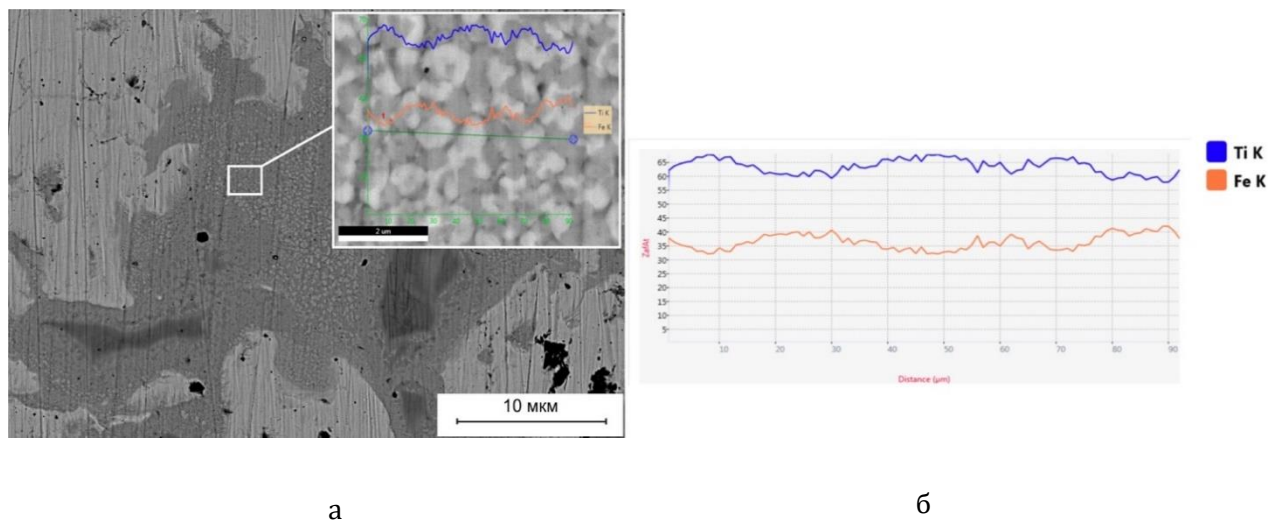


Рис. 6. Микроструктура (а) и химический состав (б) зоны взаимодействия Ti и Fe

ской обработки прессовок с практически нулевой пористостью, развитой сеткой межфазных поверхностей и прочной связью между зернами структурных компонентов, создающих благоприятные условия для развития диффузионных процессов, выглядит весьма перспективным возможным путем решение этой проблемы.

Библиографический список

1. Проблемы аккумуляции и хранения водорода / В. Н. Фатеев, О. К. Алексеева, С. В. Коробцев, Е. А. Серегина, Т. В. Фатеева, А. С. Григорьев, А. Ш. Алиев // *Kimya Problemleri*. – 2018. – №4. – С. 453-483.
2. EBSD microstructural analysis of AB-type TiFe hydrogen storage alloys / S. I. Lee, T. Ha, Y. S. Lee, D.-I. Kim, J.-Y. Suh, Y. W. Cho, B. H., J. L., J.-H. Shim // *Materials Characterization*. – 2021. – Vol. 178. – Pp. 111276. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111276>
3. Водородсорбционные свойства интерметаллического соединения TiFe с нанесенным защитным полимерным покрытием / М. Ю. Задорожный, Д. В. Стругова, К. В. Геодакян, Л. К. Олифинов, Г. С. Миловзоров, В. Ю. Задорожный // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 5.
4. Manna, J. First hydrogenation kinetics of Zr and Mn doped TiFe alloy after air exposure and reactivation by mechanical treatment / J. Manna, B. Tougas, J. Huot // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol. 45. – Iss. 20. – P. 11625-11631. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.043>
5. Lv, P. Effect of high zirconium content on hydrogenation properties and anti-poisoning ability of air-exposed TiFe alloy / P. Lv, Z. Liu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8. – Iss. 6. – P. 5972-5983. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.072>
6. Manna, J. Mechanical activation of air exposed TiFe + 4 wt% Zr alloy for hydrogenation by cold rolling and ball milling / J. Manna, B. Tougas, J. Huot // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – Vol. 43. – Iss. 45. – P. 20795-20800. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.096>
7. Ulate-Kolitsky, E. First Hydrogenation of TiFe with Addition of 20 wt.% Ti / E. Ulate-Kolitsky, B. Tougas, J. Huot // *Hydrogen*. – 2022. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 379-388. <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040023>
8. Enhanced initial hydrogenation of TiFe-based hydrogen storage alloys containing C / K. Hwang, T. Ha, S. Lee, S.-W. Jin, Y.-K. Lee, Y.-S. Lee, Y. Kim, J.-H. Shim // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2025. – Vol. 1040. – Pp. 183716. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183716>
9. Hierarchical microstructure of explosive joints: Example of titanium to steel cladding / J. Song, A. Kostka, M. Veehmayer, D. Raabe // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528. – Iss. 6. – Pp. 2641-2647. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.092>
10. Шморгун, В. Г. Химический состав диффузионной зоны в титаностальном композите / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, Р. Е. Новиков // *Известия ВолгГТУ. Сер. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. – Волгоград, 2015. – № 5 (160). – С. 32-35.
11. Fundamental hydrogen storage properties of TiFe-alloy with partial substitution of Fe by Ti and Mn. / E. M. Dematteis, D. M. Dreistadt, G. Capurso, J. Jepsen, F. Cuevas, M. Latroch // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 874. – P. 159925. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159925>

Информация об авторах

Александр Васильевич Крохалев – доктор технических наук, декан факультета технологии конструкционных материалов, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0001-7677-0288>

e-mail: kroch58@yandex.ru

Дмитрий Романович Черников – учебный мастер кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2388-020X>

e-mail: chernikovdr@yandex.ru

Валентин Олегович Харламов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ведущий инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Сергей Алексеевич Ганцев – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0009-0001-9774-1934>

e-mail: sergej.gantsev@yandex.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Information about the authors

Alexander V. Krokhalev – Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Structural Materials Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0001-7677-0288>

e-mail: kroch58@yandex.ru

Dmitry Romanovich Chernikov – Educational Master of the Department of Welding Production Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2388-020X>

e-mail: chernikovdr@yandex.ru

Valentin O. Kharlamov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding Equipment and Technology, Senior Engineer at the Center for Collective Use of Physico-Chemical Research Methods, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Sergey A. Gantsev is a Master's student at the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0009-0001-9774-1934>

e-mail: sergej.gantsev@yandex.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Вклад авторов

А. В. Крохалев – анализ экспериментальных данных, написание текста статьи

Д. Р. Черников – анализ экспериментальных данных, получение исследуемых материалов

В. О. Харламов – проведение исследований методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

С. А. Ганцев – подготовка образцов к микроструктурному исследованию

С. В. Кузьмин – расчеты параметров взрывного прессования, участие в обсуждении результатов

В. И. Лысак – определение цели работы, участие в обсуждении результатов

Contribution of the authors

A. V. Krokhalev – analysis of experimental data, writing the article

D. R. Chernikov – conducting experiments on heat treatment of compacts

V. O. Kharlamov – conducting studies using electron microscopy and X-ray structural analysis

S. A. Gantsev – preparation of samples for microstructural examination

S. V. Kuzmin – calculations of explosive pressing parameters, participation in discussion of results

V. I. Lysak – defining the purpose of the work, participation in discussion of results

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 10.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 10.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

Научная статья
Original article

УДК 669.018.25.017

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-11-306-62-68

Д. Р. Черников, А. В. Крохалев, В. О. Харламов, А. Д. Рулькова, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

**ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ НА СТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЗРЫВНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ ПОРОШКОВЫХ
СМЕСЕЙ ТИТАНА И ЖЕЛЕЗА**

Волгоградский государственный технический университет

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Романович Черников (chernikovdr@yandex.ru)

Аннотация: Описаны фазовый состав и структуры, формирующиеся при твердофазном спекании материала, спрессованного методом взрывного нагружения порошковых смесей титана и железа. Показано влияние твердофазного спекания при температурах 500, 700 и 900 °С на образование интерметаллических соединений системы Ti-Fe.

Ключевые слова: Прессование порошков взрывом, интерметаллид, термическая обработка

Для цитирования: Черников Д. Р., Крохалев А. В., Харламов В. О., Рулькова А. Д., Кузьмин С. В., Лысак В. И. Влияние твердофазного спекания на структуру и фазовый состав порошковых материалов, полученных взрывным прессованием порошковых смесей титана и железа. Известия ВолгГТУ; 2025; 306(11):62–68.

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-62-68>

D. R. Chernikov, A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, A. D. Rulkova, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

**EFFECT OF SOLID-PHASE SINTERING ON THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF POWDER
MATERIALS OBTAINED BY EXPLOSIVE PRESSING OF TITANIUM AND IRON POWDER MIXTURES**

Volgograd State Technical University

The author responsible for the correspondence: Dmitry Romanovich Chernikov (chernikovdr@yandex.ru)

Annotation: The phase composition and structures formed during solid-phase sintering of a material compressed by explosive loading of powder mixtures of titanium and iron are described. The effect of solid-phase sintering at temperatures of 500, 700 and 900 °C on the formation of intermetallic compounds of the Ti-Fe system is shown.

Keywords: Powder pressing by explosion, intermetallic, heat treatment

To cite: Chernikov D. R., Krokhalev A. V., Kharlamov V. O., Rulkova A. D., Kuzmin S. V., Lysak V. I. Effect of solid-phase sintering on the structure and phase composition of powder materials obtained by explosive pressing of titanium and iron powder mixtures. Izvestia VSTU; 2025; 306(11):62–68.

<https://doi.org/10.35211/1990-5297-2025-11-306-62-68>

Введение

Гидриды металлов являются отличными кандидатами для твердотельного хранения водорода из-за их высокой объемной плотности водорода и работы в условиях умеренного давления и температуры [1]. Особое место в изучении возможности использования интерметаллических соединений занимает система Ti - Fe, в которой стехиометрический TiFe обладает высокой водородной емкостью (~1,9 мас.% H) [2] и отличается дешевизной используемого при его изготовлении сырья. Проблемы, связанные с

необходимостью активации поверхности данного интерметаллида [3, 4] могут быть решены путем легирования и/или изменения стехиометрии состава в сторону увеличения содержания титана, что устраняет необходимость активации, а также улучшает водород-сорбционные свойства [5, 6]. Подобные изменения состава приводят к образованию интерметаллических соединений Ti₂Fe и Ti₄Fe, что обеспечивает получение на поверхности материала оксидных слоев, имеющих высокую реакционную способность по отношению к водороду [7].

Проведенные ранее исследования водород-аккумулирующих сплавов системы Ti – Fe в основном были сосредоточены на изучении влияния легирующих элементов на кинетику поглощения водорода, при этом вопросы фазообразования оказались практически не затронутыми. В этой связи в данной работе было проведено исследование влияния твердофазного спекания на образование интерметаллических соединений в материалах на основе титана и железа.

Для получения сплавов использовалась технология взрывного нагружения порошковых смесей с последующей термической обработкой прессовок, которая проводилась в заваренной стальной ампуле с засыпкой порошка титана с целью минимизации хи-

мического взаимодействия образцов с атмосферой внутри ампулы за счет использования более высокой активности и развитой поверхности порошкового титана (рис. 1).

Изучение процесса формирования фазового и структурного состава проводилась на образцах с 36 мас.% Fe и 64 мас.% Ti, полученных взрывным прессованием на режимах, обеспечивающих давления сжатия $P = 11,5$ ГПа, без химического взаимодействия компонентов и $P = 12,5$ ГПа приводящей к образованию интерметаллической прослойки Ti_2Fe на границе титана и железа.

Нагрев до температур 500, 700 и 900 °C осуществлялся в течении двух часов и сопровождался выдержкой при данной температуре в течение 1 часа и последующим

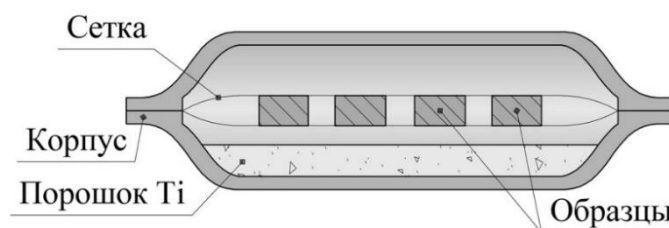


Рис. 1. Схема ампулы для термической обработки материалов

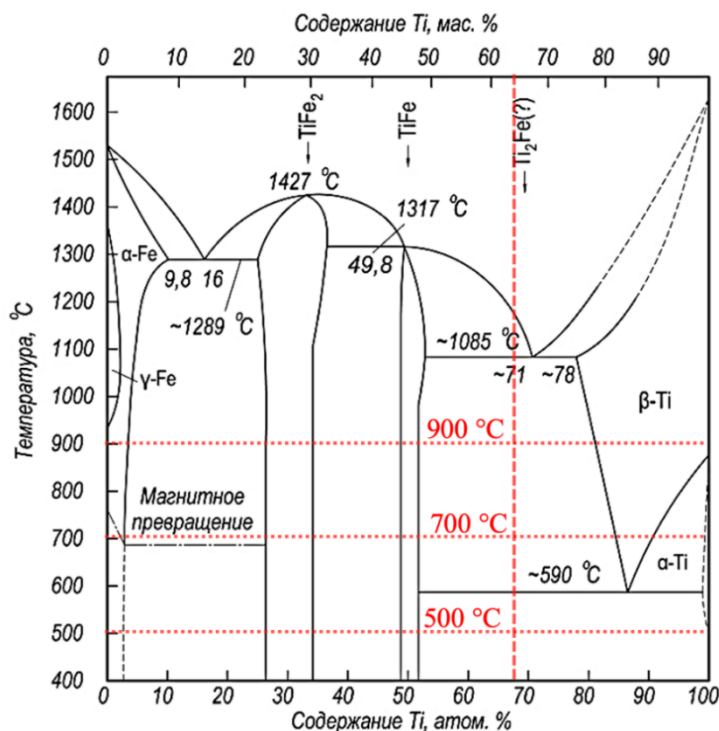


Рис. 2. Диаграмма состояния железо-титан [8]

охлаждением ампулы на воздухе.

В соответствии с фазовой диаграммой системы Ti – Fe (рис. 2) выбранные температуры нагрева для материала с 36 мас.% Fe и 64 мас.% Ti соответствуют термодинамическому равновесию интерметаллидов TiFe и/или Ti₂Fe с α -Ti (500°C) или β -Ti (700°C и 900°C). При этом появление жидкой фазы теоретически невозможно.

Исследования структуры образцов показало, что нагрев до 500 °C не приводит к изменению структуры и химического состава фаз, полученных взрывным нагружением.

(рис. 3.) как для случая использования режима нагружения, обеспечивающего $t = 777^\circ\text{C}$ и $P = 11,5$ ГПа (рис. 3, а), так и для более жесткого режима с $t = 830^\circ\text{C}$ и $P = 12,5$ ГПа. В последнем случае роста или уменьшения прослойки Ti₂Fe (рис. 3, б) не наблюдается.

Повышение температуры термической обработки спрессованного материала до 700 °C приводит к изменениям его фазового состава. Для прессовки, полученной на режиме с давлением прессования 11,5 ГПа начинается процесс диффузии – вокруг зерен железа за счет его растворения в титане образуется

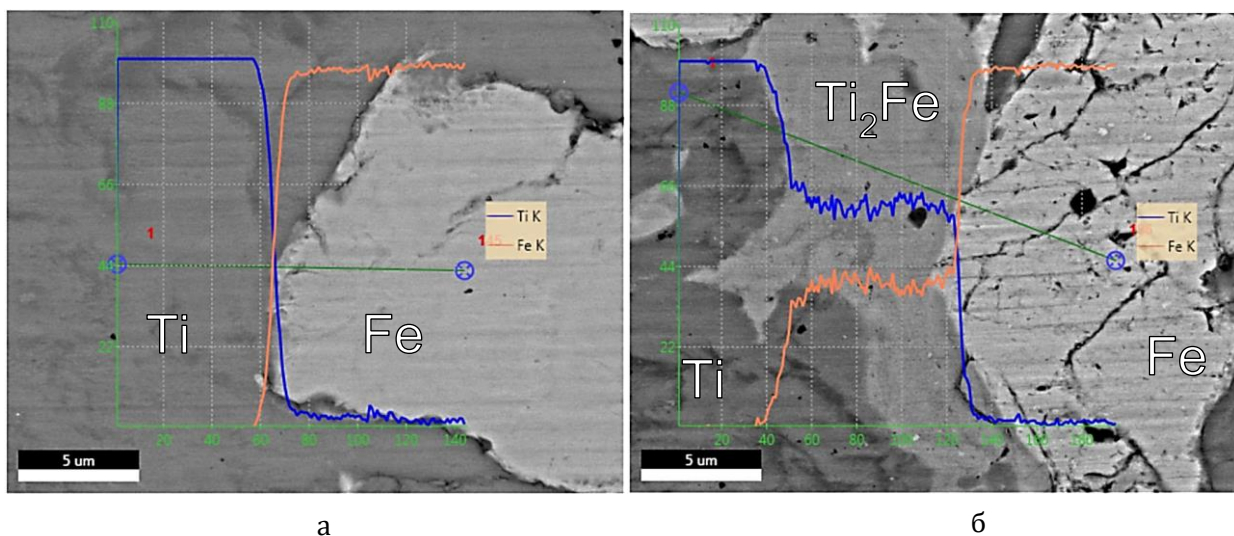


Рис. 3. Структура и химический состав фаз после отжига при 500 °C материала прессовок, полученных на различных режимах нагружения:
а – $t = 777^\circ\text{C}$, $P = 11,5$ ГПа; б – $t = 830^\circ\text{C}$, $P = 12,5$ ГПа

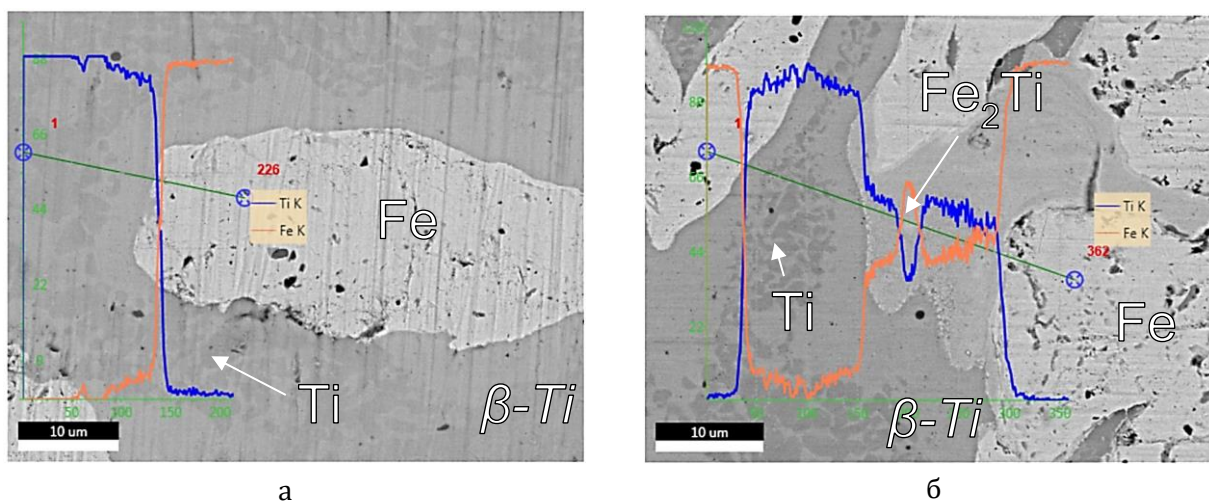


Рис. 4. Структура и химический состав фаз после отжига при 700 °C материала прессовок, полученных на различных режимах нагружения:
а – $t = 777^\circ\text{C}$, $P = 11,5$ ГПа; б – $t = 830^\circ\text{C}$, $P = 12,5$ ГПа

слой β -твердого раствора (ИМС Ti_4Fe) толщиной до 10 мкм (рис. 4, а). Интересно отметить, что при охлаждении на воздухе образовавшийся β -Ti не испытывает предсказываемого диаграммой состояния (рис. 2) эвтектоидного распада на TiFe и α -Ti и, следовательно, при комнатной температуре является термодинамически нестабильной фазой.

В случае термической обработки при температуре 700 °С в структуре прессовки, полученной на давлениях прессования в 12,5 ГПа, кроме образования β -Ti наблюдается частичное растворение сформировавшейся в процессе взрывного прессования интерметаллидной фазы Ti_2Fe . При этом внутри нее возможно образование незначи-

тельного количества участков TiFe_2 (рис. 4, б). Однако, большая часть материала, подвергнутого термической обработке, представляет собой остатки непрореагировавшего титана и железа.

При температуре 900 °С за счет ускорения диффузии растворение сформировавшейся в процессе взрывного прессования интерметаллидной фазы Ti_2Fe протекает полностью (рис. 5, б) и структура материалов, полученных на двух использованных режимах нагружения, становятся практически одинаковой: в ней хорошо различимы остатки нерастворившихся частиц железа, зона β -твердого раствора железа в титане (ИМС Ti_4Fe), а также участки Ti, практически не содержащие Fe (рис. 5, а, б).

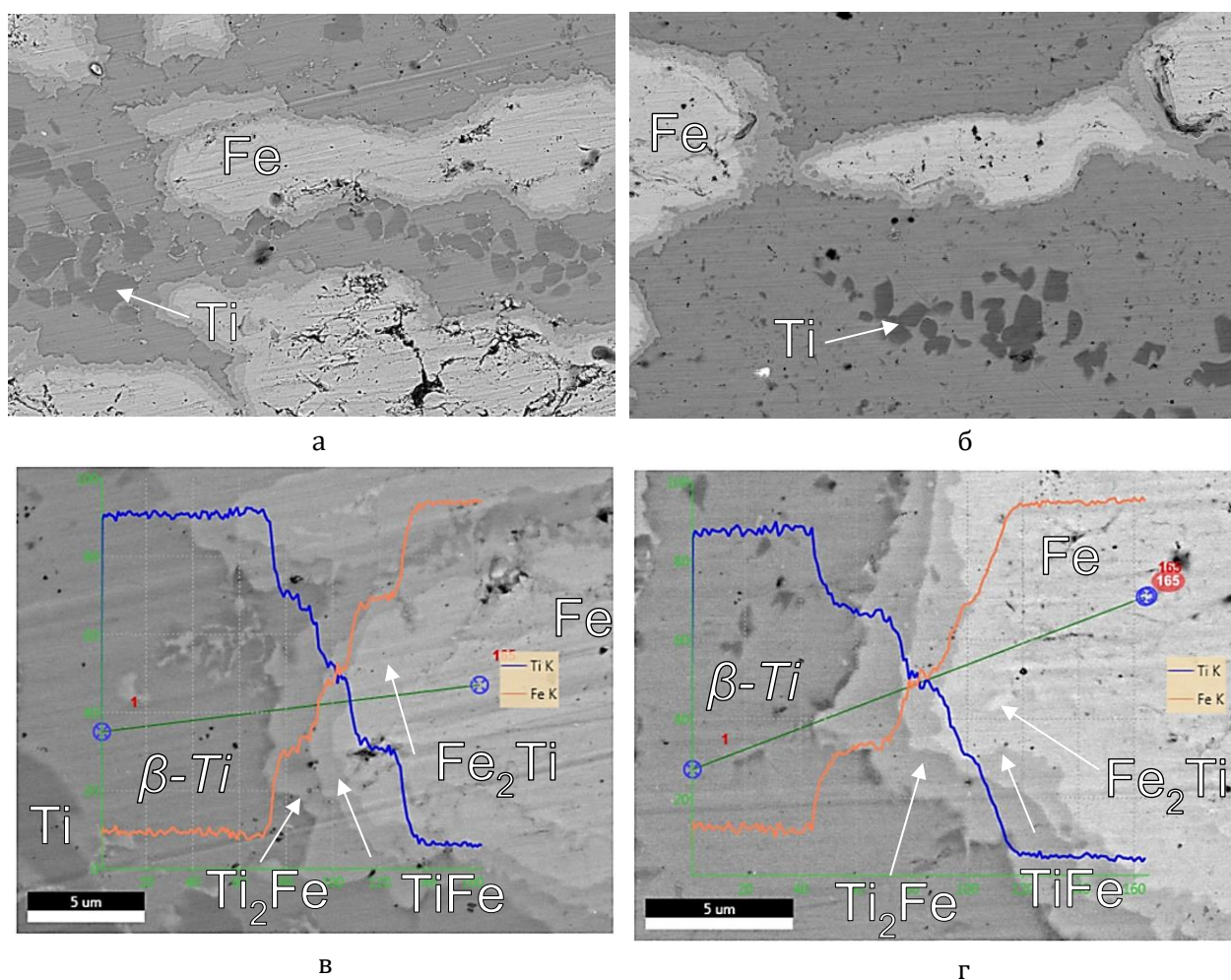


Рис. 5. Структура (а, б) и химический (в, г) состав фаз после отжига при 900 °С материала прессовок, полученных на различных режимах нагружения:
а – $t = 777$ °С, $P = 11,5$ ГПа; б – $t = 830$ °С, $P = 12,5$ ГПа

При этом вдоль поверхности частиц железа (рис. 5, в, г) формируются многослойные диффузионные слои, содержащие (начиная от железа к титану) Fe_2Ti , TiFe и Ti_2Fe , что вполне соответствует существующим классическим представлениям о реакционной диффузии.

Заключение

Проведенные исследования позволяют заключить, что при кратковременном твердофазном спекании прессонок, полученных взрывным прессованием, как в случае использования режимов, не ведущих к протеканию процессов химического взаимодействия компонентов порошковой смеси, так и при использовании режимов с локализацией пластической деформации частиц в их поверхностных слоях и формированием слоев интерметаллида Ti_2Fe , образования достаточного количества фаз Ti_2Fe или TiFe не происходит, что делает эти режимы не перспективными для получения водород аккумулирующих сплавов.

Использование спекания при температурах, обеспечивающих появление жидкой фазы в результате контактного плавления, в условиях практически нулевой пористости, развитой сетки межфазных поверхностей и прочной связи между зернами структурных компонентов, создающих благоприятные условия для развития диффузионных процессов, выглядит весьма перспективным возможным путем решения этой проблемы.

Информация об авторах

Дмитрий Романович Черников – учебный мастер кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2388-020X>

e-mail: chernikovdr@yandex.ru

Александр Васильевич Крохалев – доктор технических наук, декан факультета технологии конструкционных материалов, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0001-7677-0288>

e-mail: kroch58@yandex.ru

Библиографический список

1. Sakintuna, B. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review / B. Sakintuna, F. Lamari-Darkrim, M. Hirscher // *International journal of hydrogen energy*. – 2007. – Vol. 32. – Iss. 9. – Pp. 1121-1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
2. Фокин, В. Н. Исследование взаимодействия титана и его сплавов с железом с водородом и аммиаком / В. Н. Фокин, Э. Э. Фокина, Б. П. Тарасов // *Журнал прикладной химии*. – 2019. – Т. 92, № 1. – С. 39-48.
3. Тарасов, Б. П. Металлогидридный способ хранения водорода: проблемы и перспективы / Б. П. Тарасов, М. В. Лотоцкий // 11-я Всероссийская конференция «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени ЮА Осипяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), 2024. – №. 11. – С. 32-34.
4. Influence of near-surface oxide layers on TiFe hydrogenation: Mechanistic insights and implications for hydrogen storage applications / A. Santhosh, S. Kang, N. Keilbart, B. C. Wood, T. Klassen, P. Jerabek, M. Dornheim // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2023. – Vol. 11. – Iss. 35. – Pp. 18776-18789.
5. Microstructure and first hydrogenation properties of TiFe alloy with Zr and Mn as additives / A. K. Patel, A. Duguay, B. Tougas, C. Schade, P. Sharma, J. Huot // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol. 45. – Iss. 1. – Pp. 787-797. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.239>
6. First hydrogenation of mechanically processed TiFe-based alloy synthesized by gas atomization / E. Ulate-Kolitsky, B. Tougas, B. Neumann, C. Schade, J. Huot // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Vol. 46, Iss. 10. – Pp. 7381-7389. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.237>
7. Ulate-Kolitsky, E. First Hydrogenation of TiFe with Addition of 20 wt.% Ti / E. Ulate-Kolitsky, B. Tougas, J. Huot // *Hydrogen*. – 2022. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 379-388. <https://doi.org/10.3390/hydrogen3040023>
8. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. Т. 1. – Москва : Машиностроение, 1996. – 991 с.

Валентин Олегович Харламов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», ведущий инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Анастасия Дмитриевна Рулькова – магистрант ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0009-0004-1584-326X>

e-mail: rulkova.anastasiya@mail.ru

Сергей Викторович Кузьмин – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, первый проректор ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Владимир Ильич Лысак – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Information about the authors

Dmitry Romanovich Chernikov – Educational Master of the Department of Welding Production Equipment and Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2388-020X>

e-mail: chernikovdr@yandex.ru

Alexander V. Krokhaev – Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Structural Materials Technology, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0001-7677-0288>

e-mail: kroch58@yandex.ru

Valentin O. Kharlamov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding Equipment and Technology, Senior Engineer at the Center for Collective Use of Physico-Chemical Research Methods, Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-5039-4592>

e-mail: harlamov_vo@mail.ru

Anastasia Dmitrievna Rulkova is a Master's student at the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0009-0004-1584-326X>

e-mail: rulkova.anastasiya@mail.ru

Sergey V. Kuzmin – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-2802-8497>

e-mail: weld@vstu.ru

Vladimir I. Lysak – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the Volgograd State Technical University

<https://orcid.org/0000-0003-3066-058X>

e-mail: lysak@vstu.ru

Вклад авторов

Д. Р. Черников – анализ экспериментальных данных, получение исследуемых материалов

А. В. Крохалев – анализ экспериментальных данных, написание текста статьи

В. О. Харламов – проведение исследований методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа

А. Д. Рулькова – подготовка образцов к микроструктурному исследованию

С. В. Кузьмин – расчеты параметров взрывного прессования, участие в обсуждении результатов

В. И. Лысак – определение цели работы, участие в обсуждении результатов

Contribution of the authors

D. R. Chernikov – conducting experiments on heat treatment of compacts

A. V. Krokhaliev – analysis of experimental data, writing the article

V. O. Kharlamov – conducting studies using electron microscopy and X-ray structural analysis

A. D. Rulkova – preparation of samples for microstructural examination

S. V. Kuzmin – calculations of explosive pressing parameters, participation in discussion of results

V. I. Lysak – defining the purpose of the work, participation in discussion of results

*Статья поступила в редакцию 15.10.2025, доработана 10.11.2025,
подписана в печать 21.11.2025*

*The article was submitted 15.10.2025, revised 10.11.2025,
accepted for publication 21.11.2025*

Ответственный за выпуск Евгений Владимирович **КУЗЬМИН**

Обработка выходных данных РИО: **Н. Н. Кваша**

Компьютерная верстка: **Е. В. Кузьмин**

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: ianovakov@vstu.ru

Темплан 2025 г. Поз. № 12ж. Дата выхода в свет 27.11.2025 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Cambria. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,91.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 438.

Отпечатано в типографии Издательства ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.