

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 – $\text{NH}_4\text{NO}_3\text{--NaCl}$ (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-

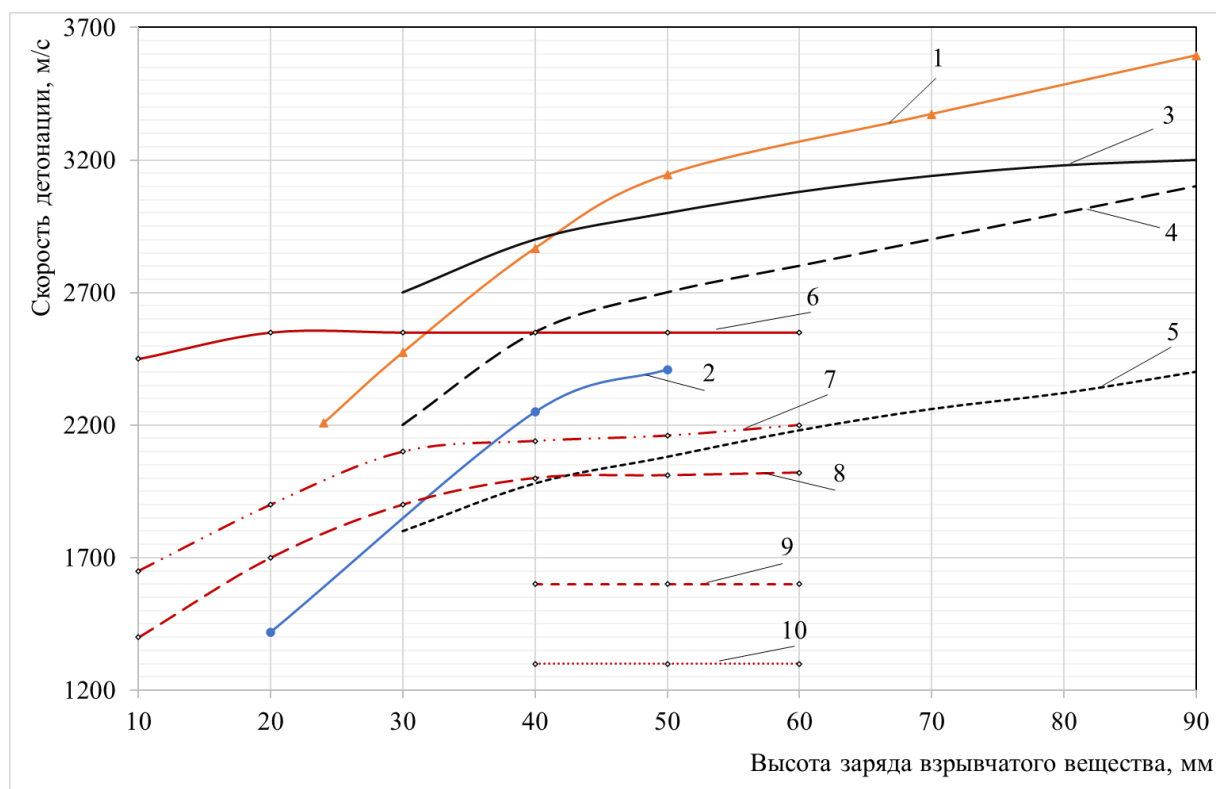


Рис. 1. Зависимость скорости детонации промышленных ВВ от высоты заряда:

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

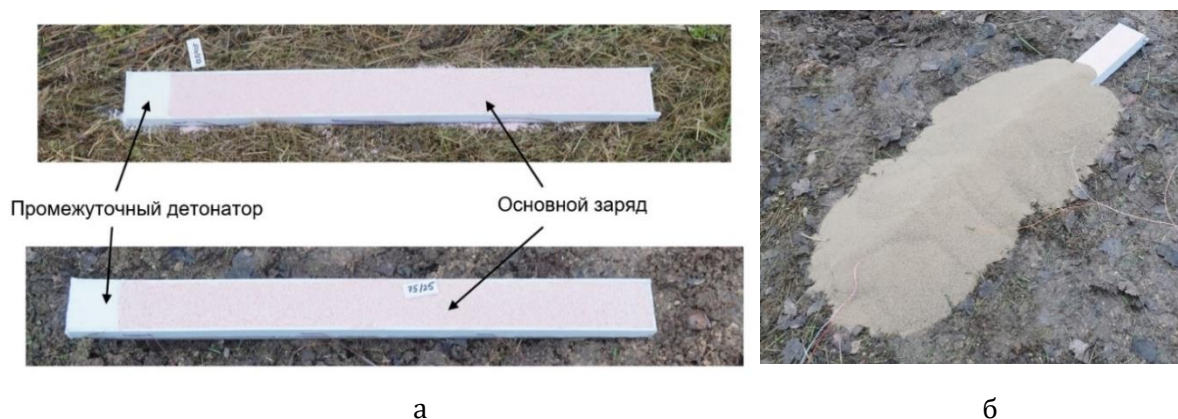


Рис. 3. Опытные заряды, изготовленные из составов РП-1 и РП-3 (а), заряд РП-3 с забойкой из песка (б)

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 гранулит 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.

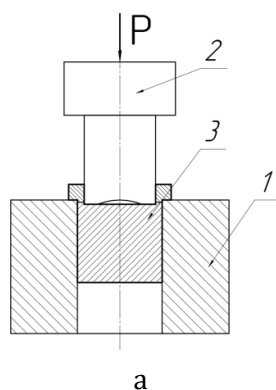


Рис. 4. Схема испытаний прочности соединения слоёв на отрыв плакирующего слоя (а) и образец сталь-медь после испытаний на отрыв плакирующего слоя (б):

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 ВолГТУ. 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*