

УДК 621.791.13

Бешапошников Юрий Петрович

кандидат технических наук,
директор производства
взрывной обработки ООО «Протол»,
620049 г. Екатеринбург,
переулок Автоматики 3/1
e-mail: bm@protol.ru

Берсенёв Геннадий Порфирьевич,

кандидат технических наук,
генеральный директор
Ассоциации «Взрывники Урала»,
директор ООО НПП «Взрывтехнология»,
Заслуженный строитель РФ,
Почетный строитель России,
старший научный сотрудник
Института горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: victoria508@mail.ru

СВАРКА МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ*Аннотация:*

Представлен опыт применения сварки металлов взрывом на Урале. Также рассказывается о создании лаборатории импульсной обработки металлов (ЛИОМ), сотрудниками которой на основе анализа обширных экспериментальных данных разработана методика определения оптимальных технологических параметров сварки взрывом различных пар металлов. Внедрение методики в производство позволило свести процент брака практически до нуля. Описаны современные теоретические и экспериментальные исследования, проводимые ЛИОМ на производственной площадке ООО «Протол», связанные с обработкой материалов энергией взрыва. Наиболее подробно рассмотрен вопрос по определению предельно допустимой массы накладного заряда при сварке взрывом. Результаты, полученные в данной работе, были использованы в 2021 г. при подготовке скорректированного проекта взрывных работ для сварки металлов на полигоне для предприятия ООО «Протол».

Ключевые слова: сварка металлов взрывом, предельно допустимая масса накладного заряда, лаборатория импульсной обработки металлов (ЛИОМ), ООО «Протол», перепад давления на фронте УВВ

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.055

Beshaposhnikov Yuriy P.

Candidate of Technical Sciences,
Director of Production
of explosive processing, LLC "Protol",
620049 Ekaterinburg, 3/1 Avtomatiki Lane,
e-mail: bm@protol.ru

Bersenyov Gennady P.

Candidate of Technical Sciences,
General Director
of the Association "Ural's Hologen",
Director of NPP "Explosion Technology" LLC,
Honored Builder of the Russian Federation,
Meritorious Builder of Russia,
Senior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: victoria508@mail.ru

WELDING OF METALS BY EXPLOSION*Abstract:*

The article presents the experience of using explosion welding of metals in the Ural region. It also tells about the creation of a laboratory for pulsed metal processing (LPMP), which, based on the analysis of extensive experimental data, developed a method for determining the optimal technological parameters for welding various pairs of metals. The introduction of the technique into production allowed to reduce the percentage of defects to almost zero. Modern theoretical and experimental studies conducted by LPMP at the production location of LLC "Protol" related to the processing of materials by explosion energy are described here. The issue of determining the maximum permissible mass of the pressure charge during explosion welding is that we consider in the most detail. The results obtained in this work were used in 2021 in the preparation of an adjusted project of blasting operations for welding metals at the testing area for the LLC "Protol".

Key words: welding of metals by explosion, maximum permissible mass of the pressure charge, laboratory of pulse metal processing (LPMP), LLC "Protol", pressure drop at the front of the shock air-wave.

Введение

Проблема создания композиционных материалов различного назначения, сочетающих в себе целый спектр служебных характеристик, таких как высокая коррозионная стойкость и прочность при достаточно низкой стоимости, решается различными прикладными способами. Одним из перспективных методов этого решения

является производство биметаллов и многослойных композиций с помощью сварки взрывом. Достоинством данного способа является простота технологических операций и высокое качество получаемых соединений. Прочность сцепления слоев в изготовленных взрывом биметаллах и многослойках, как правило, превышает прочность наиболее слабого материала, так как при испытании образцов на отрыв разрушение происходит по более слабому материалу. Сварка взрывом позволяет получать соединения практически всех коммерческих металлов и сплавов, в том числе таких, которые сваривать другими способами весьма проблематично (СТАЛЬ+АЛЮМИНИЙ, СТАЛЬ+ТИТАН, АЛЮМИНИЙ+МЕДЬ, СТАЛЬ+МЕДЬ и многие другие) [1, 2].

Сварка взрывом (СВ) впервые на среднем Урале была применена в производственных условиях завода «Уралхиммаш» при изготовлении заготовок для трубных решеток теплообменных аппаратов, в период первоначального освоения на Урале в 1971 г. нового направления взрывных работ по сварке металлов, проводимых в то время Алтайским научно-исследовательским институтом (руководитель работ – к.т.н. Цемахович Б.Д., исполнители – в будущем д.т.н. Конон Ю.А. и к.т.н. Апаликов Ю.А.), заводом «Уралхиммаш» (главный инженер – к.т.н. Глобин Н.К. и директор – д.т.н. Макаров В.М.) и Уралвзрывпромом (ответственный исполнитель – тоже в будущем – к.т.н. Берсенёв Г.П. и руководитель взрывных работ – Степанов Б.Е., начальник участка БВР).

Благодаря этим работам специалисты завода «Уралхиммаш» (Макаров В.М., Глобин Н.К. и Кожевников В.Е., первый руководитель работ по взрывным технологиям на заводе) через несколько лет стали лауреатами премии Совета Министров СССР.

В середине 70-х там же был сформирован сектор импульсной обработки металлов, который в 1980 г. был реорганизован в лабораторию импульсной обработки металлов (ЛИОМ).

За годы работы в ЛИОМ накоплен богатый научно-практический опыт в области промышленного производства самых различных биметаллов и многослоев на основе применения сварки взрывом. Поскольку СВ имеет ряд особенностей, таких как нестабильность детонационных процессов в применяемых взрывчатых веществах и сильная зависимость скорости детонации от химического и гранулометрического состава [4], требуется систематический контроль параметров с помощью электроизмерительных приборов по специальным методикам. Дополнительно существует ряд вопросов, обусловленных свойствами свариваемых материалов. Именно поэтому СВ при кажущейся технологической простоте является достаточно наукоемкой областью производства, требующей высокой квалификации персонала и серьезной исследовательской базы.

Сотрудниками ЛИОМ на основе анализа обширных экспериментальных данных разработана методика определения оптимальных технологических параметров СВ различных пар металлов, оформленная в виде пакета прикладных программ, которая позволяет в очень короткие сроки разрабатывать промышленные технологии СВ, обеспечивающие высокое качество изготавливаемых биметаллов и многослойных композиций для широкого спектра габаритных размеров и толщин составляющих слоев. В данной методике воплощена уникальная концепция разработки промышленных технологий СВ, созданная в ЛИОМ [5]. Эта концепция базируется на

- оригинальном расчете нижней границы области СВ (рис. 1) [1, 6];
- определении оптимальной величины давления остаточных продуктов детонации, оказывающей положительное влияние на качество получаемых соединений [7, 8];
- определении оптимальных периферийных нависаний метаемой пластины, исключающих краевые эффекты, с учетом детонационно-баллистических характеристик взрывчатых веществ [9, 10];
- сопутствующем контроле параметров сварки взрывом (скорость детонации, угол соударения, стабильность процесса детонации) с использованием комплекса специализированной измерительной аппаратуры [11, 12].

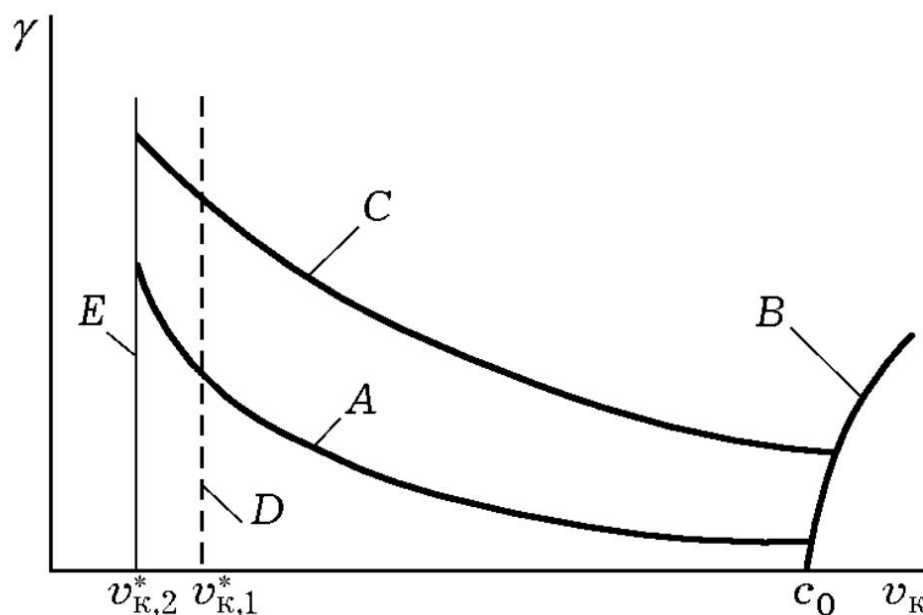


Рис. 1. Классификация течений на плоскости (γ, v_k) по А.А. Дерибасу [1]:

- A – нижняя граница области сварки взрывом;
- B – кривая, ограничивающая значения параметров соударения, при которых возможно образование (кумулятивной) струи;
- C – верхняя граница области сварки взрывом;
- D – прямая, вдоль которой происходит переход от волнообразной к безволновой конфигурации соединения;
- E – прямая, соответствующая режимам, при которых в точке соударения достигаются давления, достаточные для перевода металла в пластическое состояние;
- γ – угол соударения; v_k – скорость точки контакта

Внедрение методики в производство позволило свести процент брака практически до нуля, что особенно актуально при изготовлении крупнотоннажного мелкосерийного и штучного оборудования. На основе ее использования были разработаны промышленные технологии и изготовлены партии биметаллов и многослоек для производства химического оборудования самого различного назначения (автоклавы, крупногабаритные теплообменники, электролизеры, сосуды высокого давления, опреснительные установки, емкости для хранения агрессивных жидкостей, токоподводы, разнообразные переходники и т.п.).

В настоящее время ЛИОМ – научно-производственное предприятие (НПП), перебазированное в другое предприятие и расположенное на производственной площадке ООО «Протол», – продолжает активно заниматься исследовательской и производственной деятельностью, связанными с обработкой материалов энергией взрыва. В частности, разработана и успешно апробирована на практике новая расчетная модель послыного метания пластин скользящей детонационной волной [13 – 15]. Особо следует отметить, что в этой модели впервые в мире получены аналитические уравнения движения многослойного пакета, позволившие расчетно-экспериментальными методами доказать существование в продуктах взрыва так называемой прямой ударной волны [16], образующейся в процессе сварки взрывом при выполнении определенных условий [14, 15]. Научно-технический потенциал сотрудников ООО «НПП ЛИОМ» позволяет успешно решать поставленные задачи как в области промышленного производства, так и в плане научно-прикладных разработок [17]. Далее представлены некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований при сварке металлов взрывом.

*Определение предельно допустимой массы накладного заряда
при сварке взрывом*

Предельно допустимую массу заряда взрывчатых веществ (ВВ) при сварке взрывом, как правило, определяют по формуле [18, 19]:

$$\Delta P = 3 \times 10^5 K_S K_M \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1,5}, \quad (1)$$

где ΔP – перепад давления на фронте УВВ;

Q – суммарная масса зарядов, кг;

r – расстояние от места проведения взрывных работ (МПВР) до пункта регистрации (объекта), м;

K_S – коэффициент, учитывающий влияние плотности распределения наружного заряда по площади листа γ_S на интенсивность ударной воздушной волны (УВВ); величина коэффициента K_S приведена в табл. 1;

K_M – коэффициент, учитывающий возможное увеличение давления вследствие неблагоприятных метеорологических условий; величина коэффициента K_M приведена в табл. 2.

Таблица 1

Значения коэффициента K_S при сварке металлов взрывом

γ_S , кг/м ²	7,5	10	20	25	30	35	40	50	60 и больше
K_S	0,43	0,5	0,72	0,79	0,83	0,88	0,91	0,95	1,0

Таблица 2

Значения коэффициента K_M

Сезон	Расстояние		
	до 200 м	от 200 до 2000 м	Более 2000 м
Летний (апрель - октябрь)	1	$3 \left(\frac{r}{2000} \right)^{1/2}$	3
Зимний (ноябрь - март)	1	$5 \left(\frac{r}{2000} \right)^{1/2}$	5

В качестве примера в табл. 3 представлены результаты расчета по формуле (1) и замера перепада давления на фронте УВВ, выполненного в зимний сезон с целью определения предельно допустимой массы заряда в условиях полигона по сварке металлов взрывом, расположенного на борту южной стороны карьера «Новая Линза» Шабровского талькового комбината [20].

Таблица 3

**Результаты расчета по формуле (1) и замера перепада давления
на фронте УВВ в зимний сезон**

Дата [20]	Q , [20]	r , [20]	$K_S(\gamma_S)$ [18, 19]	K_M [18, 19]	$\Delta P_{\text{расч.}}$ (1)	$\Delta P_{\text{макс.с.}}$ [20]	$\frac{\Delta P_{\text{макс.}} - \Delta P_{\text{расч.}}}{\Delta P_{\text{макс}}} 100$,
	(кг)	(м)			(Па)	(Па)	
05.03	867	3200	1(60)	5	244	269	9

Из табл. 3 видно, что расчет по формуле (1) хорошо совпал с максимальным результатом замеров перепада давления на фронте ударно-воздушной волны (УВВ). Однако, как показала практика, в условиях, когда даже незначительный по интенсивности ветер направлен от объекта к месту производства взрывных работ (МПВР) или существенный по скорости (более 2 м/с) ветер направлен от МПВР к объекту, данная формула выдает значения перепада давления на фронте УВВ, сильно отличающиеся от результатов, полученных после инструментальных замеров [21, 22]. Из табл. 4 видно, что расчетные и экспериментальные значения перепада давления на фронте УВВ сильно разнятся между собой за исключением опыта от более позднего взрыва, что объясняется, главным образом, изменениями, связанными с направлением и скоростью ветра (значения перепада давления в опыте зимнего взрыва существенно меньше расчетных, по причине нахождения преграды (пятиэтажного дома) перед опытным объектом – детским садом).

Таблица 4

Результаты расчета по формуле (1) и замера перепада давления на фронте УВВ в летний и зимний сезоны

Даты взрыва (дни, месяцы) [21, 22]	Q [21, 22] (кг)	r [21, 22] (м)	Метеоданные [21, 22]			$K_{S(YS)}$ [18, 19]	K_M [18, 19]	$\Delta P_{расч.}$ (1) (Па)	$\Delta P_{эксп.}$ [21, 22] (Па)	$\frac{\Delta P_{эксп.} - \Delta P_{расч.}}{\Delta P_{эксп.}} 100$ (%)
			t (°C)	атм. давл. (мм рт.ст.)	ветер, напр. (м/с)					
31.07	1000	4000	+17	734	2, СЗ от объекта к МПВР	0,88 (35)	3 (0*)	99,0 (0*)	<10	>890 (0*)
02.08	778	3800	+28	736	1, С от объекта к МПВР	0,88 (35)	3 (0*)	94,3 (0*)	<10	>843 (0*)
29.08	315	3120	+19	741	2, ЮВ от МПВР к объекту	0,88 (35)	3	80,7	76,8	-5
	675	3400						103,8	91,5	-13
26.10	470	3800	0	734	4, Ю от МПВР к объекту	0,88 (35)	3 (5*)	73,2 (122,2*)	121,0	40 (-1*)
19.12	545	4000	-17	760	4, 3 между МПВР и объектом	0,88 (35)	5 (2**)	121,8 (48,7**)	41,0 51,0	-197 -139 (-19** 5**)

Примечание.

 * – поправки, сделанные с учетом влияния градиента на ветер, на значения ΔP .

 ** – поправки, сделанные с учетом влияния преграды на уменьшение ΔP .

В тех случаях, когда по технологическим причинам требуется применить массу заряда свыше предельно допустимой, необходимо применить засыпку (забойку) слоем сыпучего материала (отсев, песок и т.п.), руководствуясь [18] при определении эквивалентной массы ВВ ($Q_э$). Тогда перепад давления на фронте УВВ рассчитывается по формуле:

$$\Delta P = 3 \times 10^5 K_S K_M \left(\frac{\sqrt[3]{Q_э}}{r} \right)^{1,5}, \text{ Па} \quad (2)$$

где $Q_э = K_n \cdot Q$ – эквивалентная масса заряда для наружных зарядов высотой $h_{зар}$, с забойкой $h_{заб}$, взрывааемых одновременно, кг;

K_n – коэффициент, значение которого зависит от отношения $h_{заб}/h_{зар}$ (табл. 5).

Таблица 5

Значения коэффициента K_n для расчета эквивалентной массы заряда при взрывании плоских зарядов с забойкой из сыпучего материала [23]

$h_{заб}/h_{зар}$	0	0,5	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4	5
K_n	1	0,75	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,07	0,03	0,02

С учетом существенного влияния силы и направления ветра на перепад давления на фронте УВВ в дальнейшем все опыты проводились при минимальных скоростях ветра в направлении от МПВР к месту регистрации (табл. 6). В этих опытах применялся специальный прибор – индикатор, представлявший собой продолговатый предмет, изготовленный из монолитной древесины. С одной из сторон индикатора были высверлены два несквозных отверстия под размер специально изготовленных штырей, которые прикреплялись на внутреннюю сторону стенки рабочего вагончика. Затем индикатор надевался на указанные штыри с обеспечением плотного прилегания к стенке вагончика. Стенка вагончика, на которой располагался индикатор, была обращена в сторону МПВР. Данный индикатор в опытах выполнял роль прибора по фиксации порогового значения интенсивности УВВ. Если перепад давления на фронте УВВ превышал пороговое значение, то происходило срабатывание индикатора – он отскакивал от стенки вагончика, полностью освобождаясь от удерживающих его штырей. Если перепад давления не достигал порогового значения, то индикатор не срабатывал – он продолжал находится на штырях, прикрепленных к стенке рабочего вагончика. Опыты с забойкой, как правило, неоднократно повторялись с целью проверки воспроизводимости одних и тех же результатов в рассматриваемом эксперименте. Из табл. 6 видно, что для периода времени с положительными температурами воздуха (летний сезон) срабатывание индикатора на расстоянии 500 м от МПВР соответствует расчетному перепаду давления на фронте УВВ примерно от 345 Па и более. Однако в условиях погоды с отрицательными температурами (зимний сезон) срабатывание индикатора произошло в опыте №7 при меньшем расчетном давлении (294 Па). По-видимому, такое несоответствие в перепадах давлений произошло из-за того, что коэффициент K_M для зимнего сезона оказался несколько заниженным. С увеличением его на 20 % поднятием значения K_M до уровня двукратного превышения над его значением для летнего сезона расчетный перепад давления на фронте УВВ в опыте №7 составил около 350 Па, что хорошо коррелирует с данными, полученными в летний сезон (опыт №4).

Таблица 6

Результаты определения предельно допустимой массы накладного заряда при сварке взрывом и расчета перепада давления на фронте УВВ по формуле (2) в летний и зимний сезоны с использованием индикатора фиксации порогового значения интенсивности УВВ

№ оп. (кол-во повтор.)	Q (кг)	K _н , (I _{заб} /I _{зар}) [23]	Q _з (кг)	Метеоданные				K _с (%) [18, 19]	K _м [18, 19]	ΔP _{расч.} (2) (Па)	Индикатор			
				t (°C)	p (мм рт.ст.)	V м/с	Облачность					r = 500 м		
1 (1)	142	1 (0)	142	+20	741	2	Обл.	0,83 (30)	1,5	398	+			
2 (1)	359 (75+284×K _н)	0,07 (3,5)	95	+20	741	2	Обл.	0,83 (30)	1,5	326	-			
3 (4)	568×K _н	0,07 (3,5)	40	+23	747	0	Ясно	0,83 (30)	1,5	211	-			
4 (1)	108	1 (0)	108	+6	758	0	Ясно	0,83 (30)	1,5	347	+			
5 (2)	635×K _н	0,07 (3,5)	44	+6	758	0	Ясно	0,83 (30)	1,5	222	-			
6 (4)	490×K _н	0,2 (2,5)	98	+15	746	2	Пасм.	1 (150)	1,5	398	+			
7 (1)	26	1 (0)	26	-8	762	1	Ясно	0,86 (33)	2,5 (3*)	294 (353*)	+			
8 (1)	13	1 (0)	13	-6	756	1	Обл.	0,90 (38)	2,5 (3*)	218 (261*)	-			

Примечания:

- 1) V – проекция скорости ветра на направление от МПВР к месту регистрации;
- 2) (+, -) – обозначения, показывающие на факт срабатывания или не срабатывания индикатора, соответственно;
- 3) * – поправки, учитывающие увеличение ΔP из-за влияния отрицательных температур.

Выводы

1. Формула для определения предельно допустимой массы взрывчатого вещества при сварке металлов взрывом в целом хорошо себя зарекомендовала для погодных условий с низкой скоростью ветра в направлении пункта регистрации как при использовании открытого накладного заряда, так и при применении забойки из сыпучего материала.

2. Необходимо проводить дальнейшие исследования с целью определения коэффициентов, учитывающих разную интенсивность ветровой нагрузки, позволяющих более точно учесть значения перепада давления на фронте УВВ в различные периоды года, и, таким образом, точнее принимать предельно допустимые массы зарядов ВВ.

3. Результаты, полученные в данной работе, были использованы в 2021 г. при подготовке скорректированного проекта взрывных работ для сварки металлов на полигоне для предприятия ООО «Протол».

Список литературы

1. Дерibas А.А., 1980. *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск: Наука, 221 с.
2. Куудинов В.М., Коротеев А.Я., 1978. *Сварка взрывом в металлургии*. Москва: Металлургия, 168 с.
3. Берсенёв Г.П., 2019. Активные участники Ассоциации «Взрывники Урала». *Технология и безопасность взрывных работ*, 177 с.
4. Захаренко И.Д., 1990. *Сварка металлов взрывом*. Минск: Наука и техника, 205 с.
5. Yu. Besshaposhnikov, V. Chernukhin, V. Kozhevnikov, and V. Pai, 1994. Definition of lower boundary in region of strength joints at rate of strain metals. *EURO DIMAT 94 Oxford: Intern. Confer. on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. September 26-30, 1994*. Oxford, U. K. / *JOURNAL DE PHYSIQUE IV Colloque C8, supplement au Journal de Physique III*, Volume 4, september. P. C8-539 – C8-545.
6. Кожеvников В.Е., 1990. Определение практических областей сварки взрывом биметаллов медь+титан, медь+алюминий и титан+алюминий. *Обработка материалов импульсными нагрузками. Тематический сборник научных трудов*. Новосибирск: СО АН СССР, СКБ ГИТ, ИТиПМ, С. 236 – 244.
7. Бесшапошников Ю.П., 1990. О роли остаточного давления продуктов детонации при сварке взрывом титана со сталью. *Обработка материалов импульсными нагрузками. Тематический сборник научных трудов*. Новосибирск: СО АН СССР, СКБ ГИТ, ИТиПМ, С. 275 – 281.
8. Бесшапошников Ю.П., 2002. Об особенностях определения остаточного давления продуктов взрыва при косом соударении пластин. *Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Межвузовский сборник научных трудов*. Волгоград: Изд-во ВолгПИ, С. 65– 75.
9. Чернухин В.И., 1990. Краевые эффекты при сварке взрывом. *Обработка материалов импульсными нагрузками. Тематический сборник научных трудов*. Новосибирск: СО АН СССР, СКБ ГИТ, ИТиПМ, С. 282 – 290.
10. Чернухин В.И., 1991. О некоторых особенностях краевых эффектов и нестационарных явлений при сварке взрывом. *Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Межвузовский сборник научных трудов*. Волгоград: Изд-во ВолгПИ, С. 53 – 62.
11. Бесшапошников Ю.П., Кожеvников В.Е., Пай В.В., Чернухин В.И., 1988. Метание пластин слоями смесевых ВВ. *Физика горения и взрыва*, Т. 24, № 4, С. 129 – 132.
12. Кожеvников В.Е., Бесшапошников Ю.П., Глобин Н.К., Чернухин В.И. и др., 1990. Детонация плоских зарядов смесевых ВВ применительно к сварке взрывом. *Физика горения и взрыва*, Т. 26, N 3, С. 115 – 118.
13. Бесшапошников Ю.П., Пай В.В., Петунин А.А., Чернухин В.И., 2018. О многослойном метании пластин скользящей детонационной волной. *Известия Волг ГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений*, № 11(221), С. 22 – 27.
14. Бесшапошников Ю.П., Пай В.В., Чернухин В.И., 2020. Послойное метание пластин продуктами детонации. *Технология и безопасность взрывных работ: Материалы научно-производственных семинара и конференции по взрывным работам-2019. ИГД УрО РАН, Ассоциация «Взрывники Урала»*. Екатеринбург: ООО Универсальная Типография «Альфа Принт», С. 162 – 170.
15. Besscharoschnikov Y.P., Pai V.V., Chernukhin V.I., Petunin A.A., 2021. A mathematical model of the layered plate throwing by detonation products. *AIP Conference Proceedings* 2333, 090023. <https://doi.org/10.1063/5.0041899>.
16. *Физика взрыва*, 2004. Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е испр., в 2 т. Т1. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 832 с.
17. Берсенёв Г.П., Кутуев В.А., Флягин А.С., 2022. О научно-производственном семинаре взрывников Урала. *Горная промышленность*, № 4, С. 64 – 67.

18. Смолий Н.И., Ганопольский М.И., Цейтлин Я.И., Гринев И.А., 1977. О давлении в ударных воздушных волнах при сварке металлов взрывом. *Безопасность труда в промышленности*, № 4, С. 56 – 57.

19. Ганопольский М.И., 2011. Обеспечение промышленной безопасности ведения взрывных работ по действию ударных воздушных волн на земной поверхности. Дис. ... докт. техн. наук. Москва: МГГУ, 284 с.

20. *Экспертное заключение промышленной безопасности технического проекта №47/11-99 ведения взрывных работ по сварке металлов в части сейсмического воздействия и воздушной ударной волны на котельную станции Седельниково, 2005.* УФ ЗАО «Взрывиспытания», Рег. № УВИ 3/05 СВО. Управление по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора по Свердловской области, Рег. № 54-ПД-03942-2005. ЗАО «Взрывиспытания», 15 с.

21. Чернухин В.И., Бешапошников Ю.П., Меньшиков П.В., Шеменёв В.Г., Синицин В.А., 2013. Инструментальные замеры при ведении взрывных работ по сварке металлов. *Технология и безопасность взрывных работ: Материалы научно-технических семинаров, 2012, ИГД УрО РАН, отв. ред. Г.П. Берсенёв.* Екатеринбург: ИГД УрО РАН, С. 170 – 174.

22. Бешапошников Ю.П., Чернухин В.И., Меньшиков П.В., 2017. Определение безопасного расстояния при сварке взрывом наружного заряда ВВ. *Технология и безопасность взрывных работ: Материалы научно-производственного семинара по взрывным работам, 2016 г. Отв. ред. Г.П. Берсенёв.* Екатеринбург: Изд-во АМБ, С.51 - 56

23. Богацкий В.Ф., Фридман А.Г., 1982. *Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов.* Москва: Недра, 162 с. (Безопасность взрывных работ).

References

1. Deribas A.A., 1980. *Fizika uprochneniya i svarki vzryvom* [Physics of hardening and welding by explosion]. Novosibirsk: Nauka, 221 p.

2. Kudinov V.M., Koroteev A.Ya., 1978. *Svarka vzryvom v metallurgii* [Explosion welding in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 168 p.

3. Bersenev G.P., 2019. Aktivnye uchastniki Assotsiatsii "Vzryvniki Urala" [Active members of the Association "Ural's Holemen "]. *Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot*, 177 p.

4. Zakharenko I.D., 1990. *Svarka metallov vzryvom* [Welding of metals by explosion]. Minsk: Nauka i tekhnika, 205 p.

5. Yu. Besshaposhnikov, V. Chernukhin, V. Kozhevnikov, and V. Pai, 1994. Definition of lower boundary in region of strength joints at rate of strain metals. *EURO DIMAT 94 Oxford: Intern. Confer. on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading. September 26-30, 1994.* Oxford, U. K. / *JOURNAL DE PHYSIQUE IV Colloque C8, supplement au Journal de Physique III*, Volume 4, september. P. C8-539 – C8-545.

6. Kozhevnikov V.E., 1990. Opredelenie prakticheskikh oblastei svarki vzryvom bi-metallov med' titan, med' alyuminii i titan alyuminii [Determination of practical areas of explosion welding for such bimetallics as copper+titanium, copper+aluminum and titanium+aluminum]. *Obrabotka materialov impul'snymi nagruzkami. Tematicheskii sbornik nauchnykh trudov.* Novosibirsk: SO AN SSSR, SKB GIT, ITiPM, P. 236 – 244.

7. Besshaposhnikov Yu.P., 1990. O roli ostatochnogo davleniya produktov detonatsii pri svarke vzryvom titana so stal'yu [On the role of residual pressure of detonation products during explosion welding of titanium with steel]. *Obrabotka materialov impul'snymi nagruzkami. Tematicheskii sbornik nauchnykh trudov.* Novosibirsk: SO AN SSSR, SKB GIT, ITiPM, P. 275 – 281.

8. Besshaposhnikov Yu.P., 2002. Ob osobennostyakh opredeleniya ostatochnogo davleniya produktov vzryva pri kosom soudarenii plastin [On features of determining the residual pressure of explosion products during oblique collision of plates]. Svarka vzryvom i svoistva svarynykh soedinenii. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov. Volgograd: Izd-vo VolgPI, P. 65– 75.
9. Chernukhin V.I., 1990. Kraevye efekty pri svarke vzryvom [Edge effects during explosion welding]. Obrabotka materialov impul'snymi nagruzkami. Tematicheskii sbornik nauchnykh trudov. Novosibirsk: SO AN SSSR, SKB GIT, ITiPM, P. 282 – 290.
10. Chernukhin V.I., 1991. O nekotorykh osobennostyakh kraevykh effektov i nestatsionarnykh yavlenii pri svarke vzryvom [On some features of edge effects and non-stationary phenomena during explosion welding]. Svarka vzryvom i svoistva svarynykh soedinenii. Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov. Volgograd: Izd-vo VolgPI, P. 53 – 62.
11. Besshaposhnikov Yu.P., Kozhevnikov V.E., Pai V.V., Chernukhin V.I., 1988. Metanie plastin sloyami smesevykh VV [Throwing plates with layers of mixed explosives]. Fizika gorenii i vzryva, T. 24, № 4, P. 129 – 132.
12. Kozhevnikov V.E., Besshaposhnikov Yu.P., Globin N.K., Chernukhin V.I. i dr., 1990. Detonatsiya ploskikh zaryadov smesevykh VV primenitel'no k svarke vzryvom [Detonation of flat charges of mixed explosives in relation to explosion welding]. Fizika gorenii i vzryva, T. 26, N 3, P. 115 – 118.
13. Besshaposhnikov Yu.P., Pai V.V., Petunin A.A., Chernukhin V.I., 2018. O mnog-osloinom metanii plastin skol'zyashchei detonatsionnoi volnoi [On the multilayer throwing of plates by a sliding detonation wave]. Izvestiya Volg GTU. Ser. Svarka vzryvom i svoistva svarynykh soedinenii, № 11(221), P. 22 – 27.
14. Besshaposhnikov Yu.P., Pai V.V., Chernukhin V.I., 2020. Posloinoe metanie plastin produktami detonatsii [Layered throwing of plates by detonation products]. Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot: Materialy nauchno-proizvodstvennykh seminarov i konferentsii po vzryvnym rabotam-2019. IGD UrO RAN, Assotsiatsiya "Vzryvniki Urala". Ekaterinburg: OOO Universal'naya Tipografiya "Al'fa Print", P. 162 – 170.
15. Besshaposhnikov Yu.P., Pai V.V., Chernukhin V.I., Petunin A.A., 2021. A mathematical model of the layered plate throwing by detonation products. AIP Conference Proceedings 2333, 090023. <https://doi.org/10.1063/5.0041899>.
16. Fizika vzryva [Physics of explosion], 2004. Pod red. L. P. Orlenko. Izd. 3-e ispr., v 2 t. V1. Moscow: FIZMATLIT, 832 p.
17. Bersenev G.P., Kutuev V.A., Flyagin A.S., 2022. O nauchno-proizvodstvennom seminare vzryvnikov Urala [About the scientific and production seminar of the Ural's hole men]. Gornaya promyshlennost', № 4, P. 64 – 67.
18. Smolii N.I., Ganopol'skii M.I., Tseitlin Ya.I., Grinev I.A., 1977. O davlenii v udarnykh vozdushnykh volnakh pri svarke metallov vzryvom [On the pressure in shock airwaves during explosion welding of metals]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti, № 4, P. 56 – 57.
19. Ganopol'skii M.I., 2011. Obespechenie promyshlennoi bezopasnosti vedeniya vzryvnykh rabot po deistviyu udarnykh vozdushnykh voln na zemnoi poverkhnosti [Ensuring industrial safety of blasting operations by the action of shock airwaves on the Earth's surface. Dis. ... doct. technical sciences]. Dis. ... dokt. tekhn. nauk. Moscow: MGGU, 284 p.
20. Ekspertnoe zaklyuchenie promyshlennoi bezopasnosti tekhnicheskogo proekta №47/11-99 vedeniya vzryvnykh rabot po svarke metallov v chasti seismicheskogo vozdeistviya i vozdushnoi udarnoi volny na kotel'nyuyu stantsii Sedel'nikovo, 2005 [Expert opinion on industrial safety of technical project No. 47/11-99 for conducting explosive work on metal welding in terms of seismic impact and air shock wave on the boiler station Sedelnikovo, 2005]. UF ZAO "Vzryvispytaniya", Reg. № UVI 3/05 SVO. Upravlenie po tekhnologicheskomu i ekologicheskomu nadzoru Rostekhnadzora po Sverdlovskoi oblasti, Reg. № 54-PD-03942-2005. ZAO "Vzryvispytaniya", 15 p.

21. Chernukhin V.I., Besshaposhnikov Yu.P., Men'shikov P.V., Shemenev V.G., Sinitsin V.A., 2013. Instrumental'nye zamery pri vedenii vzryvnykh работ по сварке металлов [Instrumental measurements during blasting operations for welding metals]. Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh работ: Materialy nauchno-tekhnicheskikh seminarov, 2012, IGD UrO RAN, otv. red. G.P. Bersenev. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, P. 170 – 174.

22. Besshaposhnikov Yu.P., Chernukhin V.I., Men'shikov P.V., 2017. Opredelenie bezopasnogo rasstoyaniya pri svarke vzryvom naruzhnogo zaryada VV [Determination of the safe distance during welding by explosion of an external explosive charge]. Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh работ: Materialy nauchno-proizvodstvennogo seminaru po vzryvnym работam, 2016 g. Otv. red. G.P. Bersenev. Ekaterinburg: Izd-vo AMB, P. 51 – 56

23. Bogatskii V.F., Fridman A.G., 1982. Okhrana inzhenernykh sooruzhenii i okruzhayushchei sredy ot vrednogo deistviya promyshlennykh vzryvov [Protection of engineering structures and the environment from the harmful effects of industrial explosions]. Moscow: Nedra, 162 p. (Bezopasnost' vzryvnykh работ).