



Компактирование порошковых материалов импульсным давлением, создаваемым плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника

© Л.М. Чеботнягин, В.В. Потапов, Н.А. Иванов, Н.Н. Иванчик

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – исследование возможности компактирования порошковых материалов импульсом давления электрического взрыва проводника, установление функциональной связи между параметрами импульса давления и параметрами электротехнологической установки для компактирования порошковых материалов, выбор параметров для регулирования амплитуды и длительности импульсного давления, а также выбор конструктивных параметров рабочего инструмента для компактирования порошковых материалов. На основе метода формализованного представления развития процесса формирования и распространения импульсной волны давления, создаваемой расширяющимся плазменным каналом электрической искры в передающей среде, которая инициирована электрическим взрывом проводника, проведены аналитические исследования. Моделирование скоростного деформирования стенки трубы под действием импульсного давления проводилось в программном комплексе MATLAB, исследование микроструктуры слома скомпактированного материала с наномодификаторами – на сканирующем электронном микроскопе. На основе проведенных экспериментальных исследований по компактированию порошковых материалов импульсным давлением, созданного расширяющимся плазменным каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника при подаче на него импульса тока от электротехнологической установки, установлено, что на величину и форму импульса давления максимально влияют параметры данной установки. Исходя из полученных модельных исследований, выбраны оптимальные режимы для компактирования порошков с наномодификаторами. Получена взаимосвязь между параметрами импульсного давления (амплитуды P_m и формы распространения волны давления) и параметрами электротехнологической установки (напряжение, индуктивность, емкость). Предложено использовать акусто-электроволновую модель для оценки давления, обеспечивающего скоростное деформирование металлических труб, и построения профиля деформирования металлических труб, используемых для компактирования. Анализ SEM изображений разлома, полученных в экспериментах компактов, показали высокую степень уплотнения частиц с образованием объемного композита.

Ключевые слова: электрическая искра, плазменный канал, электрический взрыв проводников, импульсное давление, компактирование, наномодификаторы

Для цитирования: Чеботнягин Л.М., Потапов В.В., Иванов Н.А., Иванчик Н.Н. Компактирование порошковых материалов импульсным давлением, создаваемым плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1297–1310. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1297-1310>

Compacting nanopowder materials by a pulse pressure generated by expanding plasma channel of a spark ignited by wire electrical explosion

Leonid M. Chebotnyagin, Vasiliy V. Potapov, Nikolay A. Ivanov, Nikolay N. Ivanchik

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the article is to explore the possibilities of powder material compaction by the pressure pulse of an electric explosion of a conductor, establish a functional relationship between the parameters of the pressure pulse and an electrical technological installation for powder material compaction, select the parameters for pulse pressure amplitude and duration adjustment, and specify the design options of the working tool for powder material compaction. Analytical studies have been carried out on the basis of the method of formalized representation of the development of the process of pulse pressure wave formation and propagation where the latter is created by an expanding plasma channel of an electric spark in a transmitting medium initiated by an electric explosion of a wire. The simulation of high-speed de-

formation of the pipe wall under the action of the pulse pressure is carried out in the MATLAB software package. A scanning electron microscope is used to study the microstructure of the breakage of the compacted material with nanomodifiers. Based on the experimental studies on powder material compaction by the pulse pressure created by the expanding plasma channel of a spark initiated by an electric explosion of a wire when the current pulse from an electrotechnological installation is supplied to it, it has been determined that the magnitude and shape of the pressure pulse are most influenced by the parameters of this installation. Based on the obtained model studies, the optimal modes for compaction of nanomodified powders have been selected. The relationship is obtained between the parameters of the pulse pressure (P_m amplitude and pressure wave propagation form) and the electrotechnological installation (voltage, inductance, capacitance). It is proposed to use an acoustic-electric wave model to estimate the pressure that provides high-speed deformation of metal pipes, and to plot a deformation profile of metal pipes used for compaction. Analysis of SEM images of the fractures obtained in compact experiments has showed a high degree of particle compaction with the formation of a solid composite.

Keywords: electric spark, plasma channel, electrical explosion of a wire, pulse pressure, compaction, nanomodifiers

For citation: Chebotnyagin LM, Potapov VV, Ivanov NA, Ivanchik NN. Compacting nanopowder materials by a pulse pressure generated by expanding plasma channel of a spark ignited by wire electrical explosion. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6): 1297–1310. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1297-1310>

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проявляется большой интерес к исследованиям в области материаловедения, связанных с компактированием гетерогенных сред. Область включает в себя решение задач, связанных с созданием композитов из металлических и неметаллических порошков. Интерес к решению этих задач связан с разработкой материалов с уникальными свойствами. При этом в [1] показано, что технологии, основанные на традиционном горячем прессовании, не обеспечивают необходимого давления для формирования однородного композита. Одним из эффективных методов в данной области является взрывное компактирование порошковых материалов ударной волной. Как показывают исследования [2–4], применение взрывного компактирования позволяет сохранять и совершенствовать исходную структуру и свойства компонентов нанопорошков при кратковременном воздействии на них высоких давлений. Например, позволяет получать заготовки с более высокой плотностью.

В основном в качестве источника импульсных давлений используют взрывчатые вещества (ВВ). Однако применение ВВ имеет ряд ограничений, например, требуется соблюдение определенных мер безопасности и условий хранения, с экологической точки зрения они представляют угрозу окружающей среде [5–7].

Свободен от указанных недостатков ди-

намический метод компактирования, основанный на применении импульсного давления, создаваемого плазменным расширяющимся каналом искры, электрического взрыва проводника (ЭВП) [8].

Целью работы является определение функциональной связи параметров импульсов давления с параметрами разрядного контура генератора импульсов тока электротехнологической установки для компактирования порошковых материалов, выбор параметров для регулирования амплитуды и длительности импульсного давления, а также выбор конструктивных параметров рабочего инструмента для компактирования порошковых материалов.

СХЕМА РАБОТЫ

Упрощенная схема установки для компактирования порошковых материалов с использованием импульсного давления, создаваемого плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой ЭВП, изображена на рис. 1.

После срабатывания искрового коммутатора (К) происходит разряд батареи высоковольтных конденсаторов (С) на тонкую проволочку, помещенную в полиэтиленовый пенал осесимметричной конструкции, заполненный передающей средой (водой). Заполненный водой пенал с проволочкой получил название электровзрывного картриджа. Электровзрывной картридж (1), в свою оче-

редь, помещен в тонкостенную металлическую трубу. При разряде формируется импульс тока с амплитудой до 100 кА и длительностью от единиц до десятков микросекунд. При таких параметрах тока происходит электрический взрыв проводника, инициирующий искру в воде. Плазменный расширяющийся канал искры формирует импульс давления в передающей среде. Импульс давления воздействует на внутреннюю поверхность трубы и вызывает ее высокоскоростное деформирование.

Величина деформации и скорость деформирования стенки трубы зависят от формы импульса, величины давления и свойств деформируемого материала. При компактировании стенка трубы выполняет функцию поршня, который осуществляет прессование порошкового материала.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ С ПАРАМЕТРАМИ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСОВ ТОКА

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Амплитуда и длительность волны импульсного давления определяются законом выделения энергии в искровом канале электровзрывного картриджа электротехнологической установки и связаны со скоростью нарастания мощности (N') [8–14]. Скорость

нарастания мощности зависит от параметров разрядного контура, определяющего режим разряда.

Амплитуда импульса давления P , с учетом закона энергоснабжения в плазменном канале искры, определяется формулой [8–10]:

$$P = AE(t) \left[\int_0^t E^{\frac{1}{2}}(t) dt \right]^{-1}, \quad (1)$$

где A – постоянная, зависящая от плотности и вязкости передающей среды;

$$E(t) = \int_0^t N(t) dt = \int_0^t i^2(t) R_{ch}(t) dt, \quad (2)$$

где $E(t)$ – энергия, выделившаяся в плазменном канале; N – мощность выделения энергии в канале; $i(t)$ – разрядный ток; R_{ch} – сопротивление плазменного канала.

Типичная осциллограмма тока $i(t)$ (рис. 2) представляет собой быстро затухающую синусоиду. График мощности $N(t)$ на каждом полупериоде может быть аппроксимирован треугольником (рис. 3). Энергия на интервале времени $t < \frac{T}{4}$, с учетом формулы (2), $E(t)$ может быть представлена в виде:

$$E(t) = \frac{N' \cdot t^2}{2}. \quad (3)$$

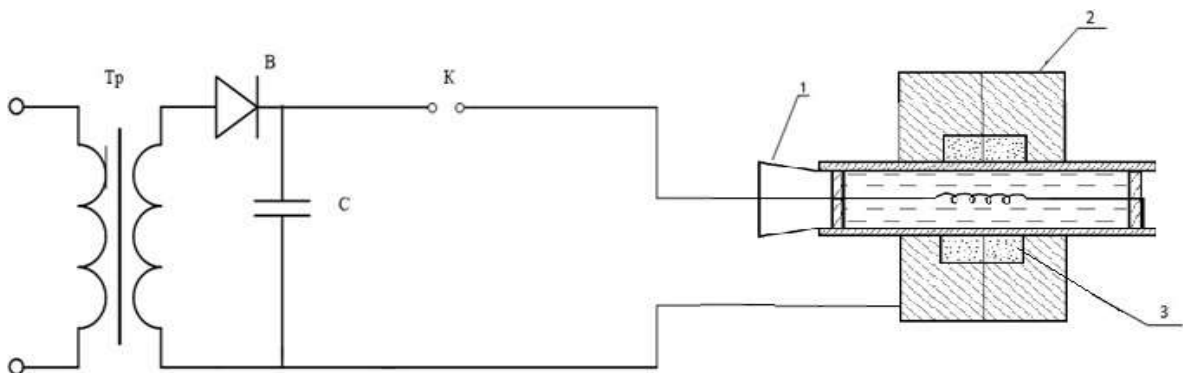


Рис. 1. Схема электротехнологической установки для компактирования порошковых материалов:

Тр – высоковольтный зарядный трансформатор, В – высоковольтный выпрямитель, С – ударная емкость, К – коммутатор (искровой разрядник); 1 – электровзрывной картридж, 2 – рабочий орган, 3 – компактируемый порошок

Fig. 1. Diagram of an electrical technological installation for powder material compaction: Tr – high-voltage charging transformer, B – high voltage rectifier, C – shock capacity, K – switch (spark gap switch); 1 – electro explosive cartridge, 2 – working body, 3 – compacted powder

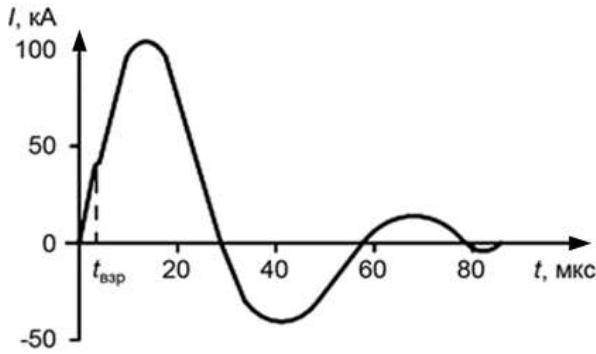


Рис. 2. Осциллограмма тока в плазменном канале.
 $t_{\text{взр}}$ – момент взрыва проводника
 Fig. 2. Current waveform in the plasma channel,
 $t_{\text{взр}}$ – the moment of wire explosion

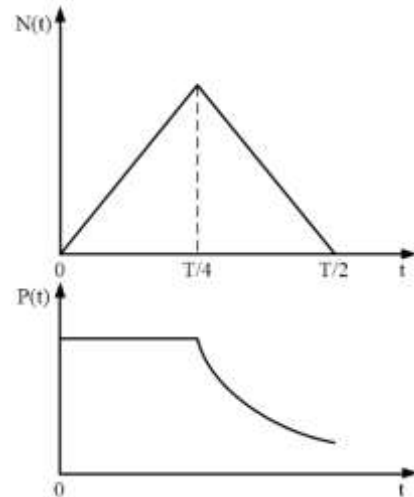


Рис. 3. Аппроксимация мощности и амплитуды импульсной волны давления
 Fig. 3. Approximation of power and amplitude of a pulse pressure wave

Тогда для амплитуды давления P_m , с учетом (1), можно записать:

$$P_m = A \cdot \frac{N' \cdot t^2}{2 \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{N'}{2}} \cdot t dt} = A \cdot \sqrt{2 \cdot N'} \quad (4)$$

При этом давление на интервале времени первой четверти периода колебания тока будет постоянным: $P_m = A \cdot \sqrt{2 \cdot N'} = const$.

Максимальная амплитуды давления будет иметь место при максимальной N' .

Согласно [9], наибольшее значение мощности при заданных E_0 , L , C имеет место при $\frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = 1,11$. Максимальное значение скорости

нарастания мощности наблюдается при $\frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = 2$, в интервале $1 \leq \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \leq 2$ значения N' близки к оптимальным значениям.

На основании предварительных экспериментов [15–18] установлено, что на величину деформации и скорость деформирования стенки трубы (т.е. движение поршня) максимально влияют параметры тока в первом полупериоде $T_{1/2}$. Принято, что давление при $t < T_{1/4}$ в режиме нарастания мощности, как установлено выше, постоянно и спадает по экспоненте на ниспадающем участке ($t > T_{1/4}$) (см. рис. 3). Для определения давления на участке уменьшения мощности, где $\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{2}$,

использована следующая формула для аппроксимации закона энерговыделения:

$$E(t) = E_0 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{T} \cdot t \right) \quad (4)$$

Используя (4) с учетом (1), установлены параметры волны давления на ниспадающей части тока в разряде в первом полупериоде (см. рис. 3), и получены выражения [15–18]:

$$P = P_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (5)$$

$$P_m = A \sqrt{2N'} = A \frac{U \cdot C^{1/4}}{L^{3/4}}; \quad (6)$$

$$\tau = 4,53 \cdot \sqrt{L \cdot C}, \quad (7)$$

где τ – постоянная времени уменьшения импульса давления; A – постоянная, полученная из опытов.

Для калибровки источника импульсного давления и определения эмпирической константы A , входящей в выражения (1, 6), проведены исследования по деформированию металлической трубы импульсным давлением, где в качестве источника использовали плазменный расширяющийся канал электрической искры ЭВП.

Схема экспериментальной установки представлена на (рис. 4). Параметры установки: емкость C варьировалась в интервале

9–24 мкФ, зарядное напряжение U в интервале 15–45 кВ, индуктивность разрядного контура составляла $L = 3,8$ мкГн. В качестве взрывающихся проводников использовались образцы из алюминиевой проволоки длиной 10–15 см с диаметром 0,6–0,8 мм. Образцы проволоки свертывались в спираль и размещались в полиэтиленовый тонкостенный картридж, заполненный передающей средой (водой). Картридж располагался в образцах деформируемой трубы. Использовались трубы из алюминиевого сплава марки АД 1, с

толщиной стенки 4 мм и диаметром 28 мм (28x4 мм) и латуни Л70 25x2,5 мм.

Фотосъемка осуществлялась скоростным фоторегистратором в режиме покадровой съемки, скорость съемки составляла $1,75 \times 10^6$ кадр/с.

Для иллюстраций представлены кадры скоростной фотосъемки и графики деформации металлических труб рис. 5 а, б. График движения торцевой части электровзрывного картриджа представлен на рис. 6.

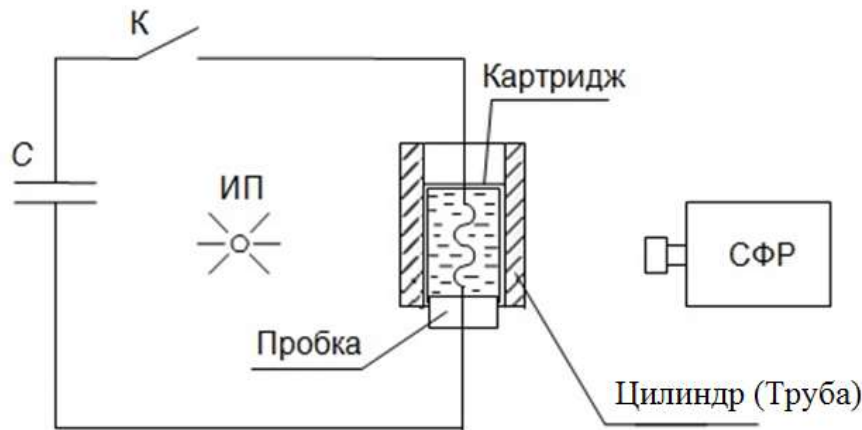


Рис. 4. Схема установки для калибровки источника импульсного давления: К – коммутатор; С – батарея конденсаторов; СФР – скоростной фоторегистратор; ИП – импульсная подсветка
Fig. 4. Installation diagram for pulse pressure source calibration: К – switch; С – capacitor bank; СФР – high-speed photographic recorder; ИП – pulse illumination

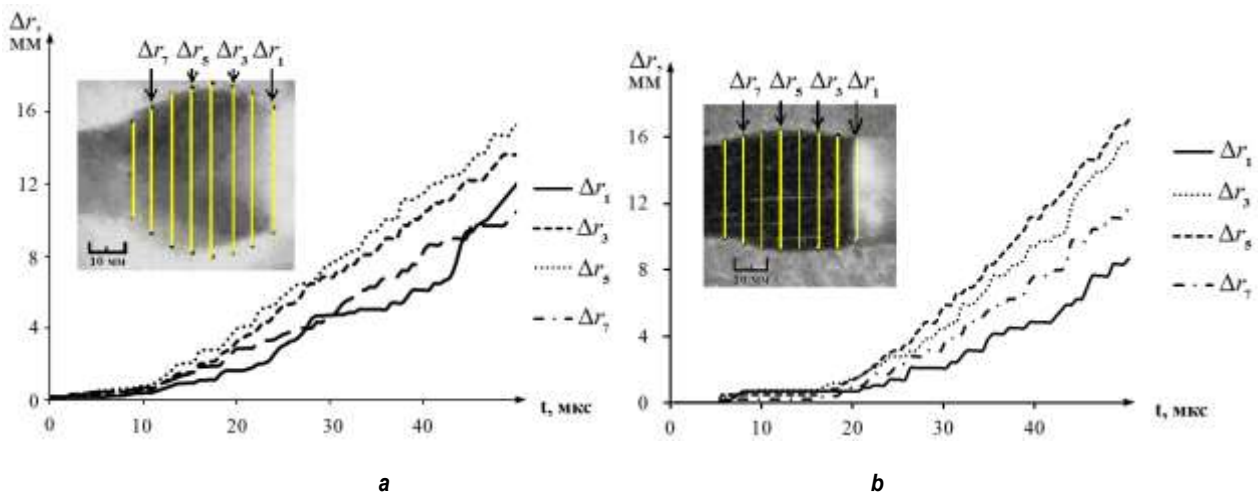


Рис. 5. Кинетика деформации труб: сверху – кадры скоростной съемки с сечениями по длине трубы $\Delta r_1, \Delta r_3, \Delta r_5, \Delta r_7$ от места контакта с металлической оснасткой; внизу – зависимость деформации от времени: а – труба из сплава АД1; б – из сплава Л70

Fig. 5. Kinetics of pipe deformation: at the top – frames of high-speed shooting with the sections along the pipe length $\Delta r_1, \Delta r_3, \Delta r_5, \Delta r_7$ from the contact point with the metal tool; below – deformation vs time dependence: а – AD1 alloy pipe; б – L70 alloy pipe

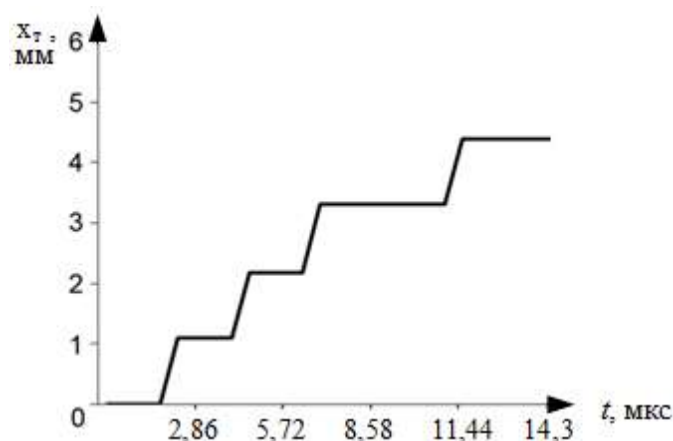


Рис. 6. Временная диаграмма движения торцевой части электровзрывного картриджа
 Fig. 6. Timing diagram of electro explosive cartridge end part movement

Скоростное деформирование металлической трубы импульсом давления плазменного расширяющегося канала искры описывается дифференциальным уравнением [7, 19]:

$$2 \cdot P(t) = m \frac{du}{dt} + u \left(\rho_0 \cdot c_0 + \frac{\eta \cdot 2h}{r^2 \sqrt{3}} \right), \quad (8)$$

где $P(t)$ – давление, воздействующее на внутреннюю стенку трубы; η – коэффициент динамической вязкости; m – плотность массы на единицу площади:

$$m = \frac{M}{S} = \rho \cdot h, \quad (9)$$

где M – масса деформируемого образца металлической трубы; S – площадь поверхности деформируемого участка; ρ – плотность материала; h и r – толщина стенки и внутренний радиус образца трубы; u – его скорость деформирования.

Движение торцевой части на основе данного уравнения (8) может быть представлено в следующем виде [6, 18]:

$$2 \cdot P(t) = u(\rho_0 \cdot c_0). \quad (10)$$

Из графика движения торцевой части выявили скорость распространения, и из уравнения (10) – амплитуду волны давления. И далее из формулы (4) определялась эмпирическая константа A , входящая в формулы (1, 6), устанавливающая связь параметров импульса давления с параметрами электротех-

нологической установки разрядного контура. В дальнейшем эти формулы использовались для регулирования и выбора режимов работы установки.

Индуктивность L разрядного контура определяется технологической петлей проводников присоединения к разрядному контуру установки. Для получения максимального давления во взрывном картридже и, следовательно, технологического эффекта, L должна быть минимальной. Таким образом, регулирование амплитуды давления может быть выполнено в основном путем изменения трех параметров, определяющих режим работы установки – это напряжение, емкость и индуктивность.

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ПОРШНЯ ДЛЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКА

Как показывают экспериментальные исследования по деформированию импульсным давлением металлических труб, их профиль принимает бочкообразную форму (см. рис. 5). Это свидетельствует о том, что давление, воздействующее на внутреннюю поверхность трубы, неравномерно. Причиной такой неравномерности является влияние свободных поверхностей торцевых частей электровзрывного картриджа.

Под свободной поверхностью понимается граница раздела двух сред: передающей

среды электровзрывного картриджа и воздуха в торцевых частях, деформируемой трубы. Влияние свободных поверхностей на форму профиля трубы подтверждается фотографиями скоростной съемки деформации трубы (см. рис. 5). Для ограничения влияния свободных поверхностей предложено оптимизировать конструкцию рабочей оснастки для компактирования порошковых материалов. Для оптимизации конструкции электровзрывного картриджа использована акустическая модель скоростного деформирования металлических труб импульсным давлением электрического взрыва проводника. Расчетная схема для анализа деформирования металлической трубы (или цилиндра), с учетом свободных поверхностей лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа, представлена на рис. 7. Анализ работ по исследованию подводных взрывов [7, 19] показывает, что влияние свободных поверхностей принято учитывать с помощью вторичных источников волн разряжения, которые зеркально расположены на оси картриджа относительно реального источника.

На внутреннюю поверхность деформируемой трубы в некоторую точку А, кроме падающей волны давления от реального источника, падают волны давления с обратным знаком, т.е. волны разгрузки, отраженные от границы раздела передающей среды с воздушной средой в торцевой части картриджа (см. рис. 7).

Результирующее давление в точке А определяется суперпозицией импульсов

давления от первичного и вторичного источников:

$$2 \cdot P_A(t) = 2 \cdot P(t) - 2 \cdot P_1(t) - 2 \cdot P_2(t) = 2 \cdot P(t) - [2 \cdot P(t - \tau_1) \cos \alpha_1] I(t - \tau_1) - [2 \cdot P(t - \tau_2) \cos \alpha_2] I(t - \tau_2), \quad (11)$$

где $P(t)$ – импульс давления от реального источника в радиальном направлении; $P_1(t)$ и $P_2(t)$ – импульсы давления от вторичных источников.

$$2 \cdot P_1(t) = [2 \cdot P(t - \tau_1) \cos \alpha_1] I(t - \tau_1); \quad (12)$$

$$2 \cdot P_2(t) = [2 \cdot P(t - \tau_2) \cos \alpha_2] I(t - \tau_2), \quad (13)$$

где $I(t - \tau_1) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau_1 \\ 1, & t \geq \tau_1 \end{cases}$ и

$I(t - \tau_2) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau_2 \\ 1, & t \geq \tau_2 \end{cases}$ – импульсные функции;

τ_1 и τ_2 – время запаздывания прихода $P_1(t)$ и $P_2(t)$ в точку А (см. рис. 7); 1 – единичная ступенчатая функция.

$$\tau_1 = \frac{r_1 - r_n}{c_0}; \quad (14)$$

$$\tau_2 = \frac{r_2 - r_n}{c_0}, \quad (15)$$

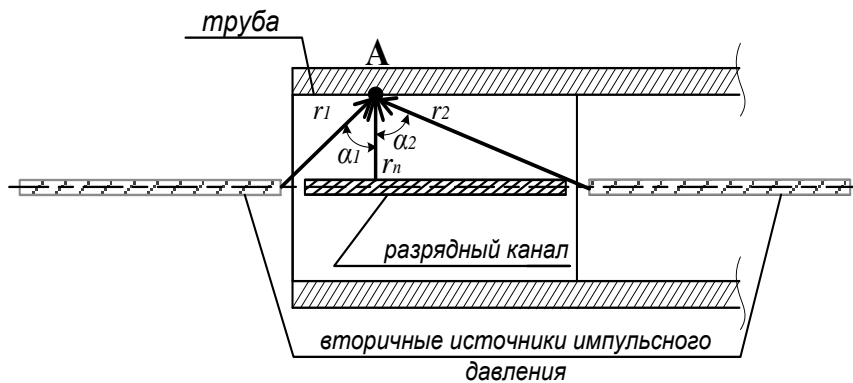


Рис. 7. Расчетная схема для оценки влияния свободных поверхностей торцевых частей электровзрывного картриджа

Fig. 7. Design scheme for assessing the effect of free surfaces of electro explosive cartridge end parts

где r_n , r_1 и r_2 – длины пробега волн давления, соответственно, от основного и вторичных источников; ρ_0 и c_0 плотность и скорость звука в воде.

АКУСТО-ЭЛЕКТРОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ

Для моделирования деформирования труб импульсным давлением электрического взрыва проводника использована акусто-волновая модель. В акусто-волновой модели для описания волн давления в электровзрывном картридже используется лучевое приближение и аналогия с распространением электромагнитных волн в длинных линиях. Данные допущения и аналогии позволили применить готовые программные продукты, используемые для анализа переходных процессов, в расчетах скоростного деформирования металлических труб импульсом давления электрического взрыва проводника.

Подробно акусто-волновая модель описана в [14–19].

Используя предложенные модельные представления, в программном комплексе MATLAB выполнены расчеты скоростного деформирования металлических труб импульсным давлением плазменного расширяющегося канала электрической искры для условий эксперимента, представленных в [15–20]. Результаты расчетов с использованием акусто-электроволновой модели представлены на рис. 8, где точками показаны расчетные значения для соответствующего времени t .

Сопоставление расчетных и экспериментальных профилей деформации трубы для различных моментов времени (см. рис. 8) показывает хорошее совпадение, что доказывает возможность использования предложенных модельных представлений для расчета деформирования металлических труб импульсным давлением, создаваемым расширяющим каналом электрической искры.

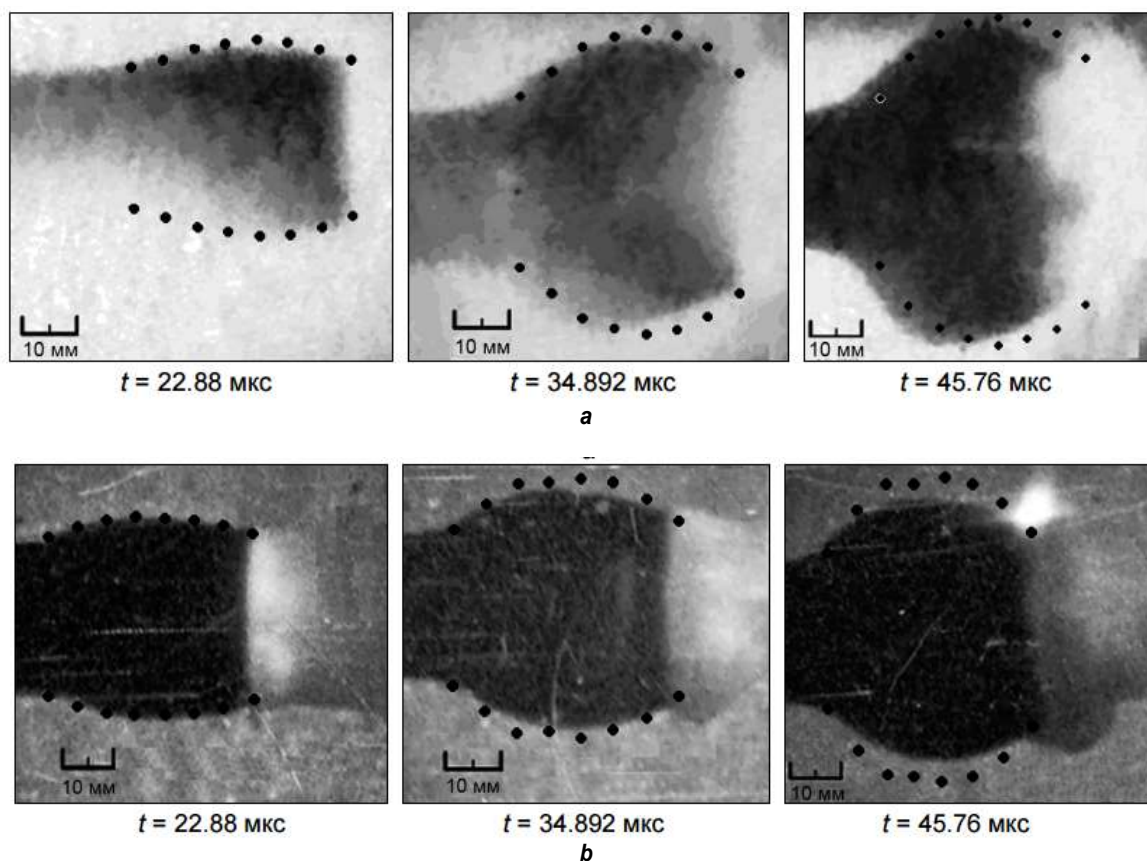


Рис. 8. Расчетные (точки) и экспериментальные скоростные снимки труб при деформировании:
а – из алюминиевого сплава АД1 (28×4 мм); б – латуни Л70 (25×2,5 мм)

Fig. 8. Calculated (points) and experimental high-speed images of pipes under deformation:
a – AD1 aluminum alloy pipe (28×4 mm); b – L70 brass pipe (25×2.5 mm)

КОНСТРУКЦИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ КОМПАКТИРОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для компактирования разработана оснастка (рис. 9, 10), способная выдержать многократные воздействия импульсов давления, достигающих в амплитуде более 1 ГПа. Оснастка представляет собой два стальных диска, которые образуют кольцевую камеру, в которой размещается компактируемый порошок.

Диаметр стальных дисков выбран по условию исключения дезинтегрирующего воздействия ударной волны, отраженной от границы раздела цилиндрической поверхности дисков и окружающей среды (воздуха). Размеры кольцевой камеры подбирались экспериментально из условия обеспечения необходимой степени компактирования, при котором возможно внедрение наномодифи-

каторов. Для определения длины и места размещения кольцевой камеры относительно поршня выполнен расчетный эксперимент по исследованию влияния геометрических размеров торцевых частей электровзрывного картриджа на профиль деформирования, с использованием предложенной акусто-электроволновой модели. Расчет выполнен для поршня в виде алюминиевой трубы с параметрами: внешний диаметр 22 мм; внутренний диаметр 16 мм, плотность алюминия в расчетах принималась равной 2700 кг/м^3 .

Эскиз электровзрывного картриджа для исследования представлен на рис. 11. Длина деформируемого участка трубы (x) принята 40 мм и соответствует длине взрывающегося проводника. Толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа в расчетах принимались равными 20 мм, 15 мм, 10 мм, 5 мм и 1 мм.

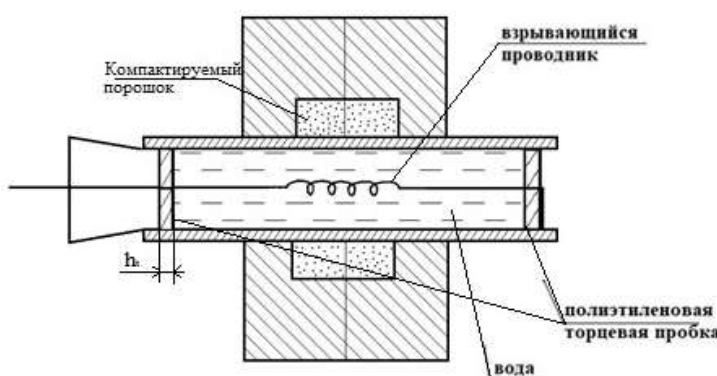


Рис. 9. Эскиз оснастки для компактирования
Fig. 9. Compaction tool sketch



Рис. 10. Фото оснастки для компактирования нанопорошков
Fig. 10. Photo of nanopowder compaction tools

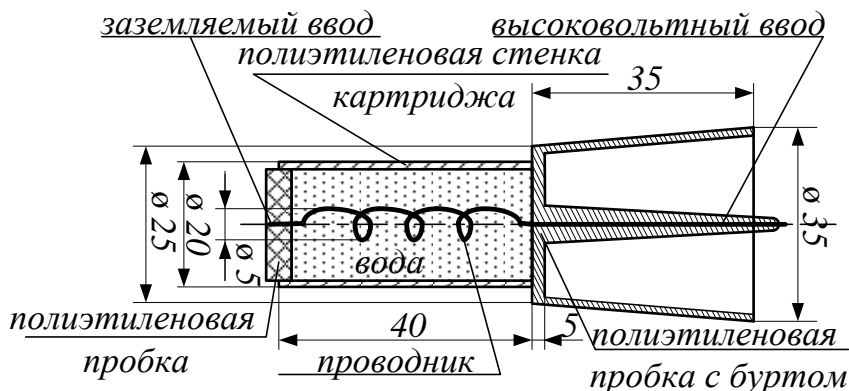


Рис. 11. Эскиз электровзрывного картриджа
Fig. 11. Sketch of the electro-explosive cartridge

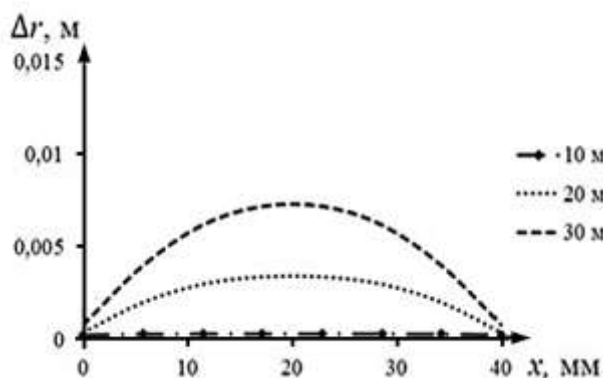
Результаты расчетов профилей труб деформирования для различных моментов времени и разных толщин h_T (2 мм и 10 мм) лобовых торцевых частей представлены на рис. 12. На этом же рисунке представлены зависимости импульсов давления, воздействующие на внутреннюю сторону металлической трубы для точек, соответствующих началу и концу кольцевой камеры оснастки.

Эпюры импульсов давления, воздействующие на внутреннюю сторону металлической трубы в концевой части кольцевой камеры, для разных толщин лобовых торцевых частей hm (2 мм и 10 мм) представлены на рис. 12 (b) и (d), соответственно.

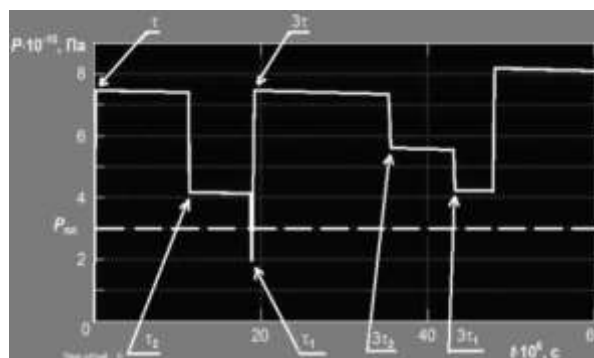
Анализ расчетных профилей показывает, что с увеличением толщины лобовых торцевых участков электровзрывного картриджа происходит выравнивание профиля. При этом зависимость давления, воздействующего на внутреннюю стенку трубы от времени, на участке расположения кольцевой камеры

с порошковым материалом становится практически постоянным. Эффект выравнивания профиля трубы с увеличением торцевых частей электровзрывного картриджа использован для конструкторского технологического регулирования давления и выбора места расположения и осевого размера кольцевой камеры с порошковым материалом.

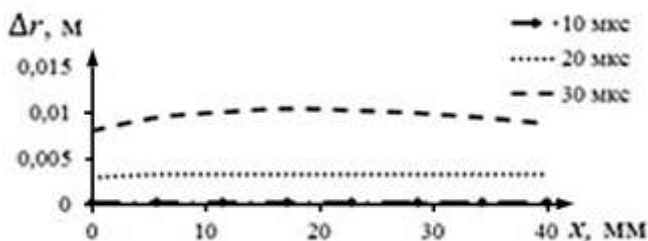
Диск с кольцевой камерой размещался в центре деформируемого профиля прессующего поршня, длина кольцевой камеры выбрана по условию постоянства давления по длине поверхности компактирующего поршня. Глубина кольцевой камеры подбиралась экспериментально, по условию степени компактирования, при котором возможно внедрение наномодификаторов. Контроль осуществлялся по SEM-изображениям, полученным на электронном микроскопе JEOL JIB 4500 (SEM от англ. Scanning Electron Microscope).



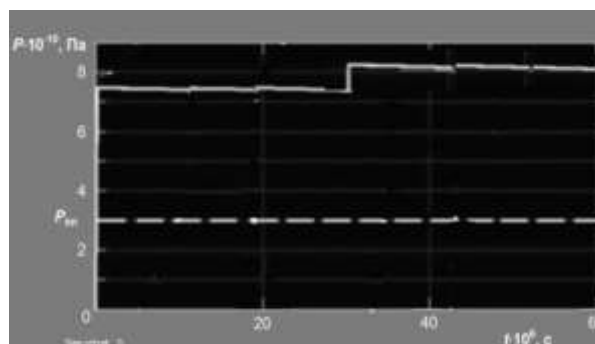
a



b



c



d

Рис. 12. Зависимости профилей деформации от толщины лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа $hm = 2$ мм (a, b) и $hm = 10$ мм (c, d)

Fig. 12. Dependencies of deformation profiles on the thickness of the frontal end parts of the electro explosive cartridge $hT = 2$ mm (a, b) $hT = 10$ mm and (c, d)



КОМПАКТИРОВАНИЕ ПОРОШКОВОГО АЛЮМИНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Для компактирования порошкового алюминия использовались образцы, полученные путем совместного помола наномодификатора, представляющие собой многостенные углеродные нанотрубки (УНТ) марки «Таунит» и порошкового алюминия марки АСП-5 и чистоты 99,5%, в планетарной мельнице PULVERISETTE 7 в течение 8 ч при 200 об/мин. Помол производился в суспензии на основе метанола. Алюминиевый порошок и модификатор помещали в сосуды из твердосплавного карбида вольфрама, содержащие шары из того же материала в весовом соотношении (масса шаров к массе порошка) 10:1. Данные параметры выбраны для того, чтобы равномерно распределить УНТ в объеме материала и внедрить их в матрицу алюминия.

Для получения компакта таким методом использовались образцы с содержанием 1%, 1,5%, 2% наномодификатора. Получившиеся компакты раскалывались на куски для исследования места слома на сканирующем электронном микроскопе.

На рис. 13 и 14 представлены SEM-изображения структуры в месте слома компакта с 1%-м содержанием наномодификатора.

К сожалению, разрешение микроскопа не позволило на данных снимках идентифицировать включения нанометровых объектов. Однако влияние наномодификатора обнаруживалось на изменениях кристаллической

микроструктуры композита.

На рис. 15 и 16 изображены SEM-фотографии структуры полученных компактов с содержанием 1,5% и 2% наномодификатора. Как видно из рисунков, при увеличении содержания наномодификатора до 2% происходит изменение микроструктуры алюминия, в месте слома наблюдается слоистая структура, указывающая на формирование отдельных фаз микрокристаллитов металла. Формирование объемного композита происходит при оптимальной концентрации наномодификатора 1,5%, как видно из рис. 15. На изображении не проявляются частицы порошка алюминия, что подтверждает высокий эффект компактирования при импульсном давлении.

Образец с содержанием 1,5% модификаторов имел степень компактирования порошкового материала не ниже, чем степень компактирования ударно-волновым методом [2–4] с использованием взрывчатых веществ. Степень компактирования полученных образцов по плотности близка к 100% от металлического алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы выполнены исследования источника импульсного давления, создаваемого плазменным расширяющимся каналом искры, инициируемой электрическим взрывом проводника, с регулируемыми параметрами импульса. Такой метод

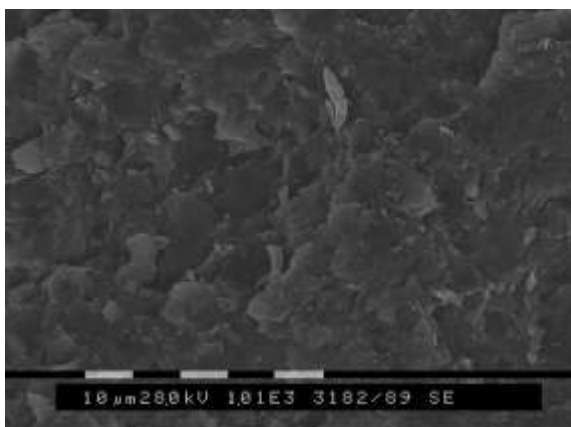


Рис. 13. SEM-изображение структуры алюминия с содержанием 1% наномодификатора
Fig. 13. SEM image of the aluminum structure with 1% nanomodifier content

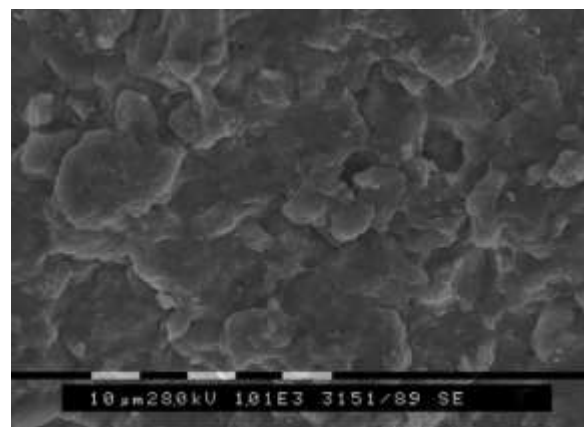


Рис. 14. SEM-изображение структуры алюминия с включением 1% наномодификатора
Fig. 14. SEM image of the aluminum structure with the inclusion of 1% of nanomodifier

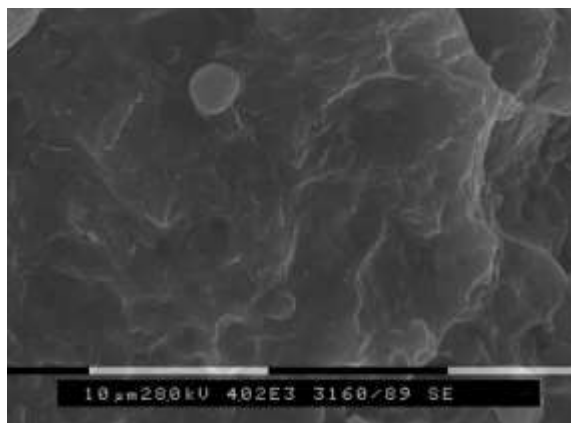


Рис. 15. SEM-изображение алюминия с включением 1,5% наномодификатора
Fig. 15. SEM image of aluminum with the inclusion of 1.5% of nanomodifier

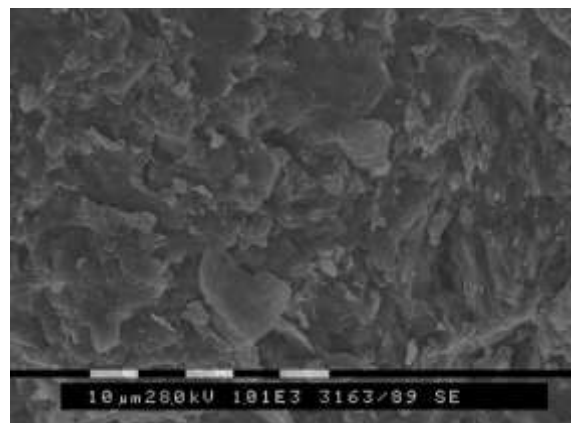


Рис. 16. SEM-изображение алюминия с включением 2% наномодификатора
Fig. 16. SEM image of aluminum with the inclusion of 2% of nanomodifier

импульсного давления обеспечивает компактирование порошковых электротехнических материалов, включающих в себя наномодификаторы, улучшающие электрофизические и механические характеристики материалов.

Проведенные эксперименты по компактированию порошкового алюминия и анализ SEM-изображений разлома компактов, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (JEOL JIB 4500), показали

высокую степень уплотнения частиц с образованием объемного композита. Однако используемый микроскоп не позволил идентифицировать включения нанометровых объектов. Для дальнейших исследований по компактированию порошкового алюминия с использованием импульсного источника давления предполагается разработать методику определения наличия в разломах компактов нанометровых объектов.

Список литературы

1. Kuz'min M.P., Ivanov N.A., Kondrat'ev V.V., Kuz'mina M.Yu., Begunov A.I., Kuz'mina A.S., Ivanchik N.N. Preparation of aluminum-carbon nanotubes composite material by hot pressing // *Metallurgist*. 2018. Vol. 61 P. 815–821. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0569-2>
2. Злобин С.Б., Пай В.В., Яковлев И.В., Кузьмин Г.Е. Взрывное компактирование алюминиевого порошка и исследование структуры компактов // *Физика горения и взрывов*. 2000. Т. 36. № 2. С. 105–109.
3. Прюммер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом / пер. с нем. М.: Мир, 1990. 126 с.
4. Петров Е.В., Сайков И.В., Щукин А.С. Ударно-волновое компактирование порошка алюминия // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 1235–1237. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-3-1235-1237>
5. Степанов В.Г., Шавров И.А. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1975. 280 с.
6. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом: монография. 2-е изд., доп. и перераб. Новосибирск: Наука, 1980. 222 с.
7. Райнхарт Д.С., Пирсон Д. Взрывная обработка металлов: монография. М.: Изд-во иностранной литературы, 1966. 391 с.
8. Драбкина С.И. К теории развития канала искрового разряда // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1951. Т. 21. Вып. 4. С. 473–483.
9. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде: монография. М.: Наука, 1971. 155 с.
10. Каляцкий И.И., Сёмкин Б.Ф., Халилов Д.Д. К анализу энергетических характеристик искры в контуре RLC // *Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция: сб. докл. Межвузовской науч.-техн. конф. по вопросам создания и методам испытания высоковольтной электрофизической аппаратуры / под ред. А.А. Воробьева (г. Томск, 1967 г.)*. М.: Энергия, 1970. С. 242–247.
11. Гегечкори Н.М. Экспериментальное исследование канала искрового разряда // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. 1951. Т. 21. Вып. 4. С. 493–506.
12. Essmann S., Markus D., Maas U. Investigation of the spark channel of electrical discharges near the minimum ignition energy // *Plasma Physics and Technology*. 2016. Vol. 3. No. 3. P. 116–121. [Электронный ресурс]. URL: https://scholar.google.com/citations?user=k1CGoJcAAAAJ&hl=de#d=gs_md_cita-d&u=%2Fcitations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dde%26user%3Dk1CGoJcAAAAJ%26citation_for_view



%3Dk1CGoJcAAAAJ%3AZph67rFs4hoC%26tzom%3D-480 (15.07.2020).

13. Kharlov A.V. Spark channel dynamics in railgun switches in unipolar and oscillatory discharges // *Laser and Particle Beams*. 2019. Vol. 37. Issue 2. P. 223–230. <https://doi.org/10.1017/S0263034619000429>

14. Kumar L. S., Chakravarthi S.R., Sarathi R., Jayaganthan R. Thermodynamic modeling and characterizations of Al nanoparticles produced by electrical wire explosion process // *Journal of Materials Research*. 2017. Vol. 32. Issue 4. P. 897–909. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.507>

15. Kolmakov V.P., Grechneva M.V., Potapov V.V., Chebotnyagin L.M. Improving the quality of the tube–tube plate welded joint in welding with the energy of electrical explosion of a conductor // *Welding International*. 2015. Vol. 29. Issue 8. P. 633–638. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.960699>

16. Potapov V.V., Kolmakov V.P., Chebotnyagin L.M. The algorithm of constructor and technological // *Energy Systems Research 2019: International E3S Web Conference of Young Scientists*. 2019. Vol. 114. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911403007>

17. Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Lopatin V.V. Kinetics of deformation of alloys by pulsed pressure of an electric discharge // *Russian Physics Journal*. 2015. Vol. 58. No. 1. P. 56–62. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0462-4>

18. Chebotnyagin L.M., Potapov V.V., Lopatin V.V. Patterns of alloy deformation by pulsed pressure // *Russian Physics Journal*. 2015. Vol. 58. No. 2. P. 212–220. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0484-y>

19. Cole R.H. *Underwater explosions*. New Jersey: Princeton University Press, 1948. 495 p.

20. Круг К.А. *Основы электротехники*. Ч. 2. М.: Госэнергоиздат, 1946. 637 с.

References

1. Kuz'min MP, Ivanov NA, Kondratiev VV, Grigoriev VG, Kuz'mina MYu, Begunov AI, Kuz'mina AS, Ivanchik NN. Preparation of aluminum-carbon nanotubes composite material by hot pressing. *Metallurgist*. 2018;61:815–821 <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0569-2>

2. Zlobin SB, Pai VV, Yakovlev IV, Kuz'min GE. Explosive compaction of aluminum powder and the structure of compacts. *Fizika goreniya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2000;36(2):105–109. (In Russ.)

3. Pryummer R. Processing of powder materials by explosion, 1990, 126 p. (Russ. ed.: *Obrabotka poroshkoobraznykh materialov vzryvom*. Moscow, Mir, 1990, 126 p.)

4. Petrov EV, Saykov IV, Shchukin AS. Shock-wave compaction of aluminum powder. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016;21(3):1235–1237. <https://doi.org/10.20310/1810-0198-2016-21-3-1235-1237>

5. Stepanov VG, Shavrov IA. *High-energy pulse methods of metal processing*. Leningrad: Mashinostroenie; 1975, 280 p. (In Russ.)

6. Deribas AA. *Physics of hardening and welding by explosion: monograph*. Novosibirsk: Nauka; 1980, 222 p. (In Russ.)

7. Rinehart JS, Pearson J. *Explosive working of metals*, 1966, 391 p. (Russ. ed.: *Vzryvnaya obrabotka metallov*. Moscow, Izdatel'stvo Inostrannykh literatury, 1966, 391 p.)

8. Drabkina SI. To the theory of spark discharge channel development. *Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1951;21(4):473–483. (In Russ.)

9. Naugol'nyh KA, Roj NA. *Electric discharges in water: monograph*. Moscow: Nauka; 1971, 155 p. (In Russ.)

10. Kalyackij II, Syomkin BF, Halilov DD. To the analysis of energy characteristics of a spark in the RLC circuit. *Elektrofizicheskaya apparatura i elektricheskaya izolyatsiya: sbornik докладов Mezhdvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii po voprosam sozdaniya i metodam ispytaniya vysokovol'tnoj elektrofizicheskoy aparatury / pod red. A.A. Vorob'eva = Electrophysical equipment and electrical insulation: collected reports of the Interuniversity scientific and technical conference on creation and testing methods of high-voltage electrophysical equipment*. 1967, Tomsk. Moscow: Energiya; 1970, p. 242–247. (In Russ.)

11. Gegechkori NM. Experimental study of the spark discharge channel. *Zhurnal Eksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1951;21(4):493–506. (In Russ.)

12. Essmann S, Markus D, Maas U. Investigation of the spark channel of electrical discharges near the minimum ignition energy. *Plasma Physics and Technology*. 2016;3(3):116–121. Available from: https://scholar.google.com/citations?user=k1CGoJcAAAAJ&hl=de#d=gs_md_cita-d&u=%2F citations%3Fview_op%3Dview_citation%26hl%3Dde%26user%3Dk1CGoJcAAAAJ%26citation_for_view%3Dk1CGoJcAAAAJ%3AZph67rFs4hoC%26tzom%3D-480 [Accessed 15th July 2020].

13. Kharlov AV. Spark channel dynamics in railgun switches in unipolar and oscillatory discharges. *Laser and Particle Beams*. 2019;37(2):223–230. <https://doi.org/10.1017/S0263034619000429>

14. Kumar LS, Chakravarthi SR, Sarathi R, Jayaganthan R. Thermodynamic modeling and characterizations of Al nanoparticles produced by electrical wire explosion process. *Journal of Materials Research*. 2017;32(4):897–909. <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.507>

15. Kolmakov VP, Grechneva MV, Potapov VV, Chebotnyagin LM. Improving the quality of the tube–tube plate welded joint in welding with the energy of electrical explosion of a conductor. *Welding International*. 2015;29(8):633–638. <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.960699>

16. Potapov VV, Kolmakov VP, Chebotnyagin LM. The algorithm of constructor and technological. In: *Energy Systems Research 2019: International E3S Web Conference of Young Scientists*. 2019;114.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911403007>
17. Chebotnyagin LM, Potapov VV, Lopatin VV. Kinetics of deformation of alloys by pulsed pressure of an electric discharge. *Russian Physics Journal*. 2015;58(1):56–62. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0462-4>
18. Chebotnyagin LM, Potapov VV, Lopatin VV. Patterns of alloy deformation by pulsed pressure. *Russian Physics*

Journal. 2015;58(2):212–220. <https://doi.org/10.1007/s11182-015-0484-y>
19. Cole RH. *Underwater explosions*. New Jersey: Princeton University Press; 1948. 495 p.
20. Krug KA. *Fundamentals of electrical engineering*. Part 2. Moscow: Gosenergoizdat; 1946, 637 p. (In Russ.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Чеботнягин Леонид Михайлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры электроснабжения и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: leonid@istu.edu

Leonid M. Chebotnyagin,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: leonid@istu.edu

Потапов Василий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры электроснабжения
и электротехники,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: otep2@istu.edu

Vasily V. Potapov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Professor of the Department of Power Supply
and Electrical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: otep2@istu.edu

Иванов Николай Аркадьевич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры радиоэлектроники
и телекоммуникационных систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: ivnik@istu.edu

Nikolay A. Ivanov,
Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate
Professor,
Associate Professor of the Department of Radio
Electronics and Telecommunication systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: ivnik@istu.edu

Иванчик Николай Николаевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: nkolayivanchik@gmail.com

Nikolay N. Ivanchik,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: nkolayivanchik@gmail.com

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.07.20; одобрена после рецензирования 17.09.2020; принята к публикации 15.12.2020.

Information about the article

The article was submitted 18.07.20; approved after reviewing 17.09.2020; accepted for publication 15.12.2020.