



Для цитирования

For citation

Попов А. С. Автоматизация процесса определения электрофизических параметров красок и окисных загрязнений, удаляемых с металлических поверхностей методом диэлектрического нагрева / А. С. Попов, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, М. С. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 8–13. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).8–13

Popov A. S., Livshits A. V., Filippenko N. G., Popov S. I., Popov M. S. Avtomatizatsiya protsessa opredeleniya elektrofizicheskikh parametrov krasok i okisnykh zagryaznenii, udalyaemykh s metallicheskih poverkhnostei metodom dielektricheskogo nagreva [Automation of the process of determining the electrophysical parameters of the metal surface contaminants that are removed by the dielectric heating method]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 8–13. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).8–13

УДК 621.777.073

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).13–22

Л. М. Чеботнягин, В. В. Потапов*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация**Дата поступления: 15 февраля 2019 г***ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО КАРТРИДЖА НА ПРОФИЛЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ПРИ СКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНЫМ ДАВЛЕНИЕМ**

Аннотация. В статье представлены результаты расчетно-экспериментального исследования влияния толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа на профиль металлической трубы при деформировании импульсом давления, формируемым плазменным расширяющимся каналом электрической искры, инициированной электрическим взрывом проводника. В основу расчетно-экспериментальных исследований положены анализ профилей труб при скоростном деформировании импульсным давлением и численные исследования о кинетике распространения акустических волн в передающих средах. Используя акусто-электроволновую модель, предложенную авторами, основанную на аналогии распространения волн импульсного давления в передающих средах и импульсных волн напряжения в электрических цепях с распределенными параметрами, выполнены расчеты, позволившие выявить зависимость конечного профиля трубы при ее деформировании импульсным давлением от конструкции электровзрывного картриджа. Расчеты показывают наличие существенной зависимости профиля трубы от толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа. Установлено, что с увеличением толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа профиль трубы при скоростном деформировании выравнивается (становится более пологим). Таким образом, изменяя толщину торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа, можно регулировать параметры соударения поверхности деформируемой трубы с поверхностью отверстия заготовки (скорость точки контакта и угол соударения), что позволяет улучшить качество вальцовки и повысить вероятность получения сварного соединения между поверхностями при ремонте и изготовлении сложных узлов технологического оборудования, например, тако как узел «труба – трубная решетка» теплообменного аппарата.

Ключевые слова: электрический разряд, импульсное давление, скоростное деформирование, деформация, профиль трубы, электрический взрыв проводника.

L. M. Chebotnyagin, V. V. Potapov*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation**Received: February 15, 2019***THE EFFECT OF THE ELECTROEXPLOSIVE CARTRIDGE DESIGN ON THE PROFILE OF A METAL PIPE AT HIGH-SPEED DEFORMATION BY PULSE PRESSURE**

Abstract. The article presents the results of a computational-experimental study of the effect of the thickness of the end frontal parts of an electroexplosive cartridge on the profile of a metal pipe during deformation by a pulse pressure generated by a plasma expanding channel of an electric spark initiated by an electrical explosion of a wire. Calculation and experimental studies are based on the analysis of pipe profiles under high-speed deformation by pulse pressure and analytical studies on the mechanics of acoustic wave propagation in transmitting media. Using the acousto-electrowave model proposed by the authors and based on the analogy of the propagation of pulsed pressure waves in transmitting media and pulsed voltage waves in electric lines with distributed parameters, calculations were performed that made it possible to reveal the dependence of the final profile of the pipe when it was deformed by pulsed pressure from the design of an electroexplosive cartridge. The calculations show the presence of a significant dependence of the pipe profile on

the thickness of the end frontal parts of an electroexplosive cartridge. It is shown that with an increase in the thickness of the end frontal parts of an electroexplosive cartridge, the profile of the pipe becomes equal (becomes flatter) during high-speed deformation. Thus, by changing the thickness of the end frontal parts of an electroexplosive cartridge, you can adjust the parameters of the impact of the deformable pipe surface with the surface of the workpiece opening, which allows you to improve the quality of rolling and increase the likelihood of obtaining a welded joint between the surfaces during repair and manufacturing of the "pipe – tube sheet" heat exchanger assembly.

Keywords: electric discharge, pulse pressure, high-speed deformation, deformation, pipe profile, electrical explosion of a wire.

Введение

Теплообменные аппараты широко используются в энергетике, химической, нефтяной и атомной промышленности. Качество соединения «труба – трубная решетка» во многом определяет надежность работы теплообменных аппаратов. [1–8] Одним из способов соединения является крепление труб в трубных отверстиях импульсом давления плазменного канала электрической искры, инициированной электрическим взрывом проводника (ЭВП), или «крепление труб энергией электрического взрыва проводника» [4–10].

Электрическая искра в определенных условиях может выступать источником импульсного давления, при этом ее амплитуда способна достигать 1–2 ГПа. Если в передающей среде на пути ее распространения расположить преграду, например, стенку трубы толщиной до 5 мм, то обеспечивается деформирование этой стенки со скоростями более 100 м/с, при этом величина деформации составит более 5 мм [11, 12]. Кроме вальцовки такие скорости позволяют получить сварное соединение деталей как при «сварке взрывом» [10–14].

Далее представлена упрощенная схема установки (импульсного генератора) для соединения трубчатых деталей с использованием импульсного давления от расширяющегося плазменного канала электрической искры, инициированного ЭВП в жидкости (т. е. импульсным давлением) (рис. 1).

Картина вальцовки труб в трубных решетках с помощью такой установки выглядит следующим образом: при разряде конденсатора C на проводник электровзрывного картриджа (эскиз электровзрывного картриджа представлен на рис. 2), формируется импульс тока с амплитудой до 100 кА и длительностью в десятки мкс. В результате образуется плазменный расширяющийся канал электрической искры, формирующий в передающей среде импульс давления.

Параметры импульса давления определяются свойствами передающей среды, конструктивными особенностями электровзрывного картриджа и законом энерговыделения на проводнике, который, в свою очередь, определяется характером переходного процесса в разрядном контуре установки.

Импульс давления, создаваемый плазменным расширяющимся каналом искры, инициированной ЭВП, вызывает деформирование стенки трубы. Скорость деформирования и величина деформации зависят от параметров импульса и свойств деформируемого материала. Используя терминологию [14], в виду сходства «сварки взрывом» с процессом крепления труб в трубных отверстиях импульсом давления, скорость деформирования трубы в радиальном направлении может рассматриваться как скорость метания – V_m . Вследствие влияния краевых эффектов она неодинакова по длине деформируемого участка трубы,

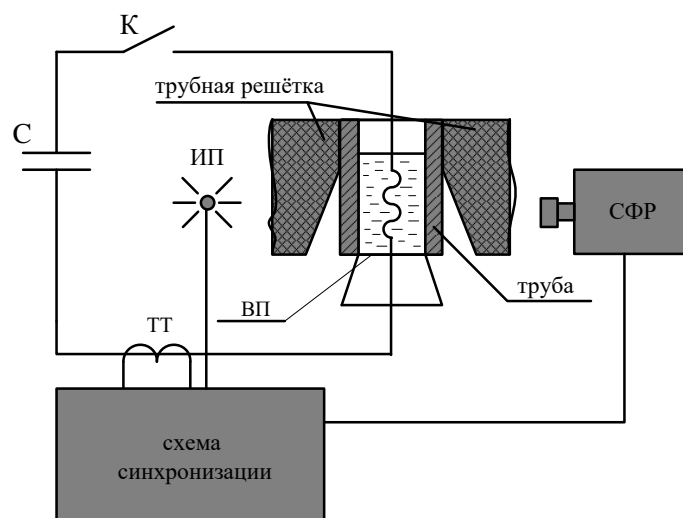


Рис. 1. Схема установки для скоростной фоторегистрации деформирования металлической трубы ЭВП:

K – коммутатор; C – емкость батареи; $ВП$ – взрывной патрон с тонкостенной полиэтиленовой нижней пробкой; $СФР$ – скоростной фоторегистратор; $ИП$ – импульсная подсветка; $ТТ$ – трансформатор тока

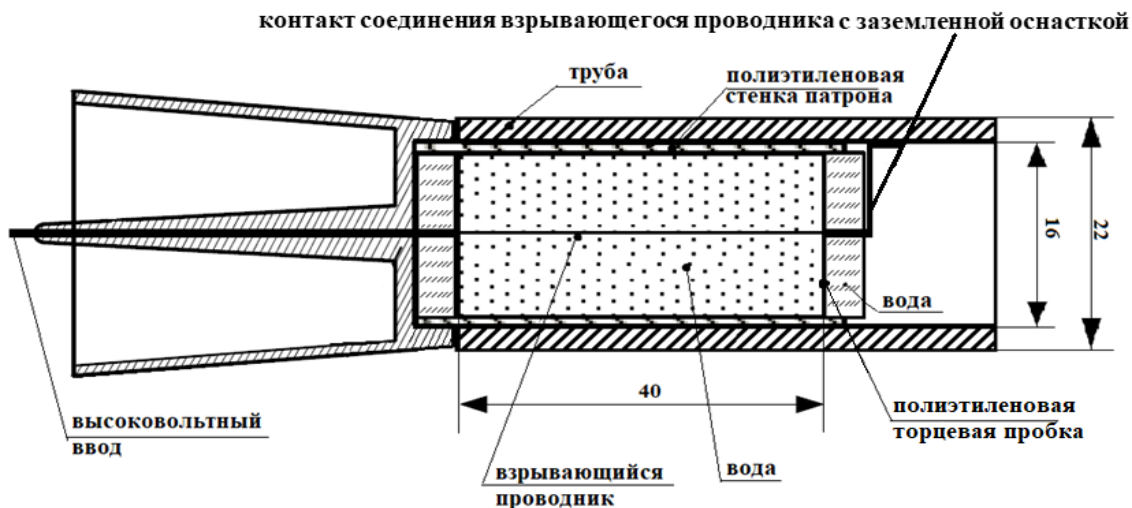


Рис. 2. Эскиз для учета влияния толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа

поэтому различны по длине и скорость точки контакта – V_k и угол соударения (угол встречи) – γ . Скорость метания, скорость точки контакта и угол соударения контролируют процесс образования сварного соединения при скоростном соударении материалов [14]. Механизм образования соединения, кинетика деформирования металлов и сплавов подробно описаны [10, 11, 13–16].

Основным инструментом для соединения трубчатых деталей импульсным давлением является электровзрывной картридж [7, 9].

Численные исследования влияния толщины торцевых частей электровзрывного картриджа на профиль трубы при деформировании ее стенки, представленные далее, показывают, что выравнивание профиля деформирования трубы посредством регулирования толщины торцевых частей картриджа стабилизирует угол соударения и скорость точки контакта по длине соударения, что позволяет более оптимально соединять поверхности.

Гидродинамика плазменного канала, инициированного ЭВП

Рассмотрим аналитическую связь параметров плазменного канала электрической искры, инициированной ЭВП, и параметров волны импульсного давления. Амплитуда импульсной волны давления, формируемого плазменным каналом при ЭВП, зависит от закона энерговыведения [17] на взрывающемся проводнике и для ее оценки используем следующее выражение:

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

где A – постоянная, определяемая свойствами среды, в которой происходит появление плазменного

канала (плотностью, вязкостью и т. п.); $E(t)$ – энергия, выделившаяся на взрывающемся проводнике [10, 11, 17]. Для определения параметров импульса давления плазменного канала искры, инициированного ЭВП [8–11, 17] с учетом (1) могут быть описаны формулами

$$P = P_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

$$P_m = \frac{A}{\cos^2\left(\frac{\pi}{8}\right)} \cdot \frac{U \cdot C^{1/4}}{L^{3/4}} \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2T} \cdot t\right), \quad (3)$$

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

где P_m – амплитуда импульса волны давления (при $0 \leq t \leq \frac{T}{4}$ – P_m практически постоянна, при $\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{2}$

P_m снижается практически до $\frac{P_m}{2}$); T – период колебания тока искры, при ее инициировании ЭВП, τ – время спада импульсной волны давления, значение которой определяется свойствами плазменного канала искры; U , C , L – соответственно напряжение, емкость и индуктивность электроразрядного контура установки для соединения трубчатых деталей (см. рис. 1).

Уравнение движения некоторой точки поверхности деформируемого участка трубы в радиальном направлении можно описать дифференциальным уравнением

$$2P(t) = m \cdot \frac{du}{dt} + \left(\rho_0 \cdot c_0 + \frac{\eta \cdot 2 \cdot h}{r^2 \cdot \sqrt{3}} \right) \cdot u, \quad (5)$$

где η – коэффициент динамической вязкости металла деформируемых труб; $m = M/S$ – масса (M) на единицу площади (S) поверхности трубы; ρ_2 –



плотность материала трубы; h – толщина стенки трубы; r_0 – внутренний радиус трубы; $u(t)$ – скорость деформирования; ρ_0 и c_0 – плотность и скорость звука в воде [10, 11].

Решением (5) являются выражения для оценки скорости деформирования (6) и радиуса трубы r_i (7) в радиальном направлении

$$u(t) = \frac{2 \cdot P_m \cdot r_{np}}{m \cdot r_0} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\tau}} \cdot [e^{-e/t} - e^{-e/\theta}], \quad (6)$$

$$r_i = \int_0^t u(t) dt, \quad (7)$$

где

$$\theta = \frac{m}{\rho_0 c_0 + \frac{2h \cdot \eta}{r_0^2 \sqrt{3}}}, \quad (8)$$

θ – постоянная времени спада импульса давления; r_{np}/r_0 учитывает снижение амплитуды давления P_m за счет расширения плазменного канала; r_{np} – радиус канала искры (разряда).

Анализ процессов (кинетики) деформирования металлической трубы импульсным давлением с учетом влияния свободных поверхностей лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа

Экспериментальные исследования и моделирование кинетики скоростного деформирования металлических трубчатых деталей с использованием электровзрывных картриджей показали, что на профиль деформации и скорость деформирования большое влияние оказывают свободные поверхности торцевых частей электровзрывного картриджа [10–12]. Под свободной поверхностью понимается граница раздела двух сред передающей среды и воздуха в торцевых частях электровзрывного картриджа. Влияние свободных поверхностей на профиль трубы при деформировании импульсным давлением подтверждается фотографиями скоростной съемки развальцовки трубы (рис. 3). Представлена расчетная схема для анализа деформирования металлической трубы (цилиндра) с учетом свободных поверхностей лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа (рис. 4). Анализ работ по теории и практике подводных взрывов [15–16] показывает, что влияние границы раздела двух сред (в данном случае воды и воздуха) принято учитывать с помощью вторичных источников волн импульсного давления отрицательной амплитуды, зеркально расположенных относительно границы раздела сред.

Таким образом, давление на внутреннюю поверхность деформируемого участка трубы в некоторой точке A определяется как суперпозиция падающей волны давления и волн давления вторичных источников (см. рис. 4)

$$\begin{aligned} 2 \cdot P_A(t) &= 2 \cdot P(t) - 2 \cdot P_1(t) - 2 \cdot P_2(t) = \\ &= 2 \cdot P(t) - [2 \cdot P(t - \tau_1) \cos \alpha_1] I(t - \tau_1) - \\ &- [2 \cdot P(t - \tau_2) \cos \alpha_2] I(t - \tau_2), \end{aligned} \quad (9)$$

где $P(t)$ – импульс давления, приходящий от реального источника в радиальном направлении; $P_1(t)$ и $P_2(t)$ – импульсы давления, создаваемые вторичными источниками

$$2 \cdot P_1(t) = [2 \cdot P(t - \tau_1) \cos \alpha_1] I(t - \tau_1); \quad (10)$$

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

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 A (см. рис. 4), I – единичная ступенчатая функция;

$$\tau_1 = \frac{r_1 - r_n}{c_0} \quad (12)$$

$$\tau_2 = \frac{r_2 - r_n}{c_0}, \quad (13)$$

r_1 и r_2 – расстояния до рассматриваемой точки от вторичных источников; α_1 и α_2 – углы падения волн давления от вторичных источников на стенку трубы в точке A ; r_n – расстояние от основного источника; c_0 и ρ_0 – скорость звука в воде и ее плотность.

Акусто-электроволновая модель

Для моделирования и исследования кинетики скоростного деформирования стенки трубы импульсным давлением в некоторых источниках используется акусто-электроволновую модель [10, 12]. Кратко рассмотрим принципы ее построения и применения.

Расчетная схема (см. рис. 4) для моделирования волновых процессов в электровзрывном картридже после инициирования искры ЭВП включает в себя плазменный канал искры, передающую импульс давления область (воду) и участок стенки трубы, подвергающийся деформированию. Дифференциальное уравнение (14), составленное на основе правила эквивалентной волны для расчета тока в нагрузке в конце линии при набегании волны [18], для (рис. 4) является аналогом уравнения (5)

$$2U(t) = Z_w \cdot I + L_n \cdot \frac{dI}{dt} + R_n \cdot I, \quad (14)$$

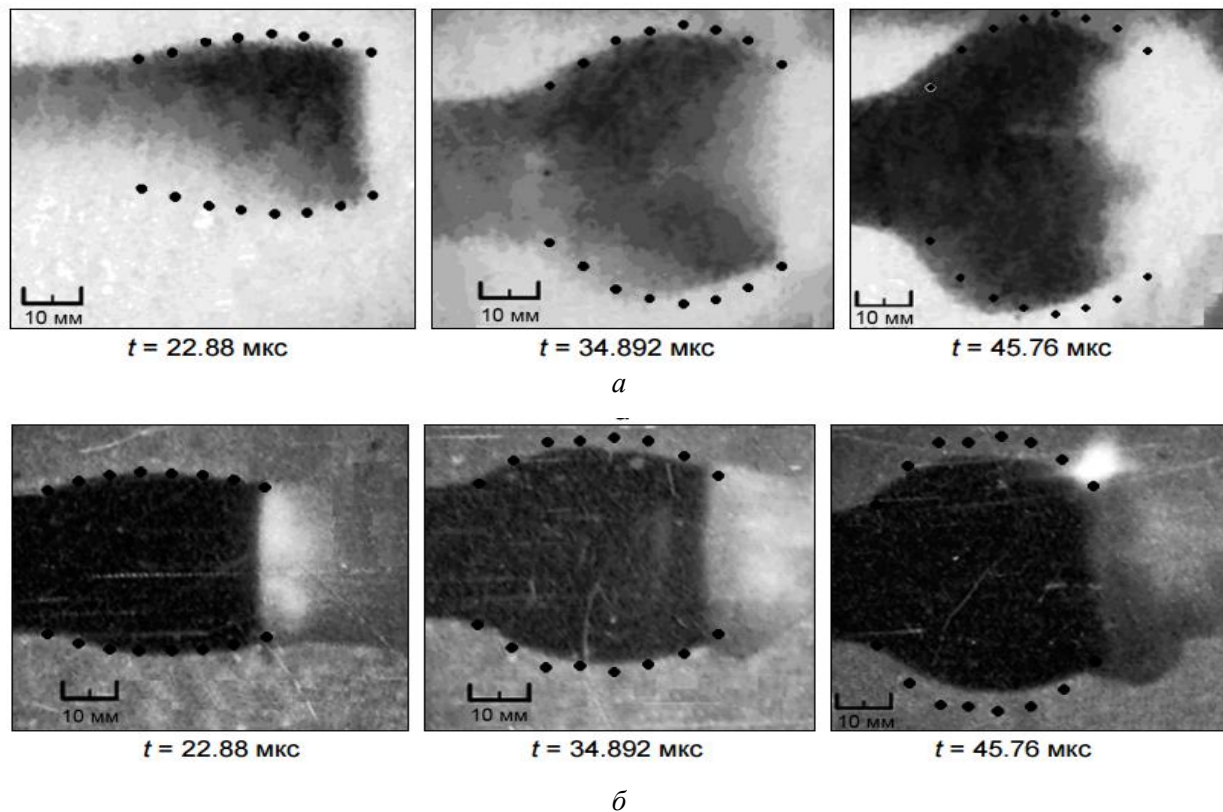


Рис. 3. Снимки скоростной съемки деформирования труб и расчетные профили деформации (точки): а – алюминиевый сплав АД1 (28×4 мм); б – латунь Л70 (25×2,5 мм)

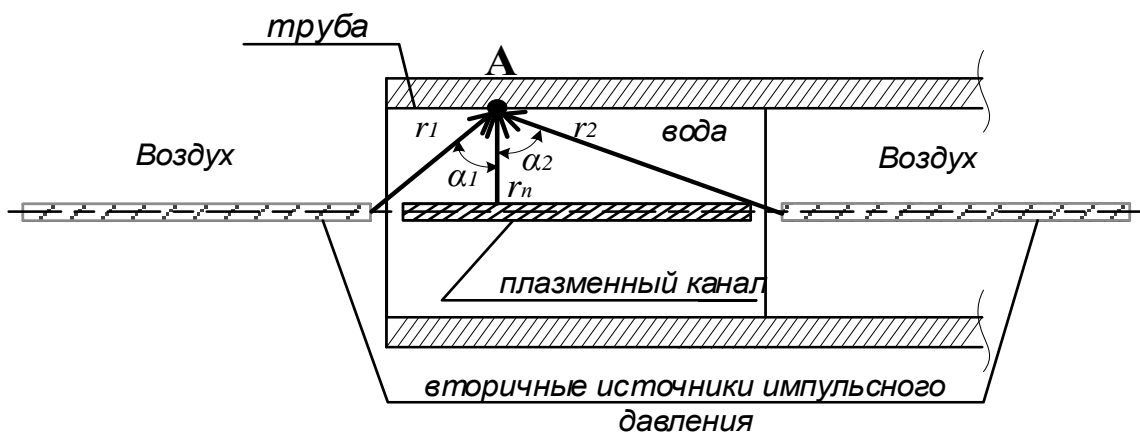


Рис. 4. Расчетная схема для анализа деформирования металлической трубы (цилиндра) с учетом свободных поверхностей лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа

где $U(t)$ – аналог падающей волны давления $P(t)$; h – толщина стенки цилиндра; $L_n \cdot \frac{dI}{dt}$ соответствует $m \cdot \frac{du}{dt}$, $R_n \cdot I$ – соответствует $\frac{\eta}{r_0^2} \cdot \frac{2h}{\sqrt{3}} \cdot u$; $Z_w \cdot i$ – соответствует $\rho_0 \cdot c_0 \cdot u$.

Аналогия выражений (5) и (14) позволяет моделировать скоростное деформирование металлической трубы импульсным давлением, исполь-

зуя программные продукты, предназначенные для расчетов переходных процессов в электрических цепях с распределенными параметрами.

Расчетная электрическая схема для моделирования воздействия импульса давления плазменного расширяющегося канала искры на стенку трубы представлена ниже (рис. 5). Используются следующие обозначения: Z и U_0 – внутреннее сопротивление и электродвижущая сила (ЭДС) источника; R_1 , R_2 , C , L – параметры электрической цепи для моделирования распространения им-



пульса давления в передающей среде; $U(t)$ – напряжение на входе линии, аналог моделируемого импульсного давления; i – электрический ток и, соответственно, скорость деформирования стенки металлической трубы (цилиндра).

Нагрузка в виде последовательно соединенных индуктивности L_n и варистора R_n моделирует механическое нагружение, вызывающее движение и пластическую деформацию стенки трубы.

Электрическая цепь с распределенными параметрами в виде каскадно соединенных «Г»-образных элементов с волновым сопротивлением Z_6 является аналогом передающей среды (области между источником и стенкой трубы). Для электровзрывных картриджей, конструкций [9–11] Z_6 составляло $1,46 \cdot 10^6$ Ом, а соответствующее ему акустическое сопротивление воды $Z_{ак}$ равно $1,46 \cdot 10^6$ Па·с/м (см. рис. 5).

Импульсное напряжение в конце линии на нагрузке является аналогом действующего на стенку трубы давлением

$$U(t) = U_m (e^{-t/\theta} - e^{-t/\tau}) - \\ - [U_m \cdot (e^{-(t-\tau_{z1})/\theta} - e^{-(t-\tau_{z1})/\tau}) \cos \alpha_1] \cdot \\ \cdot I(t - \tau_{z1}) - \\ - [U_m \cdot (e^{-(t-\tau_{z2})/\theta} - e^{-(t-\tau_{z2})/\tau}) \cos \alpha_2] \cdot \\ \cdot I(t - \tau_{z2}).$$

Сопротивление Z (см. рис. 5) выбирается по условиям отражения волн от границы раздела «плазменный канал искры – вода». Согласно оценкам параметров [9–11], величина сопротивления Z составляет $1,75 \cdot 10^8$ Ом. Время пробега волны по линии τ_6 принимается равным времени пробега волны давления в промежутке «канал искры –

стенка трубы» и определяется по формуле

$$\tau_6 = \frac{r - r_{np}}{c_0}.$$

Для труб с внутренним диаметром 20 мм при скорости импульса давления $c_0 = 1460$ м/с (скорость звука в воде) составляет $\tau_6 = 4,8$ мкс. Так как при импульсном нагружении сплавы могут переходить в состояние пластического течения, то возникает вопрос учета динамической вязкости сплава трубы. Для учета пластического течения и зависимости скорости деформации от величины давления в нагрузке линии (см. рис. 5) включен варистор с нелинейной характеристикой R_n . Нелинейная вольт-амперная характеристика варистора является аналогом диаграммы деформирования металлов (зависимость механического напряжения от деформации) [4, 8, 11, 13] и аппроксимируется комбинацией трех степенных функций вида

$$\frac{U}{U_{вкл}} = K_i \left(\frac{i}{i_{вкл}} \right)^{1/\alpha}, \quad (15)$$

где U и i – напряжение и ток варистора; $U_{вкл}$, $i_{вкл}$, K_i и α_i – константы аппроксимации функции.

Принято допущение, что линейный участок диаграммы деформирования (область выполнения закона Гука) до предела упругости соответствует области с α_1 вольт-амперной характеристики варистора. Участки пластического деформирования диаграммы соответствуют областям с α_2 и α_3 вольт-амперной характеристики варистора (рис. 6). Константы аппроксимации K_{iu} , a_i определяются из экспериментальных данных [4, 8, 11, 13] для зависимостей давления от скорости деформирования.

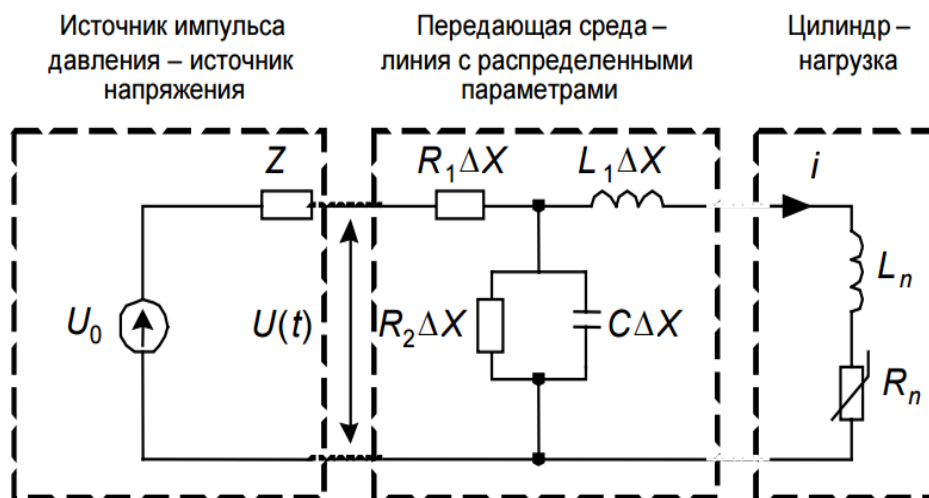


Рис. 5. Расчетная электрическая схема для моделирования воздействия импульса давления плазменного расширяющегося канала искры на стенку трубы

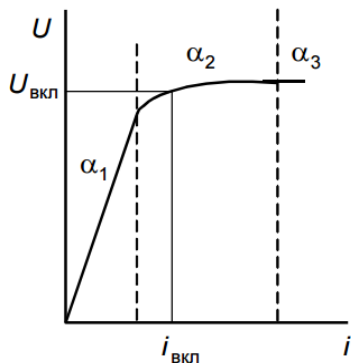


Рис. 6. Стилизованная вольт-амперная характеристика варистора

При моделировании предел упругости диаграммы деформирования соответствует пороговому напряжению срабатывания варистора (точка перегиба вольт-амперной характеристики при переходе от области 1 к 2 (см. рис. 6)). Для алюминиевого сплава $U_{вкл} = 800$ МВ и $I_{вкл} = 25000$ А, что соответствует давлению пластического течения алюминиевого сплава АД1 $P_d = 100$ МПа.

Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов

На основе предложенных модельных представлений в программном комплексе «MATLAB» выполнены расчеты скоростного деформирования металлических труб импульсным давлением плазменного расширявшегося канала электрической искры. Расчеты выполнены для условий изложенных экспериментов [10–12]. Расчетные профили деформации для ряда фиксированных моментов времени указаны на снимках скоростной покадровой регистрации деформирования латунных труб и труб из алюминиевого сплава (см. рис. 3).

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

Расчетное исследование влияния толщины лобовых частей электровзрывного картриджа на профиль деформации металлической трубы

Для исследования влияния толщины лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа на профиль деформирования проведены расчетно-аналитические исследования с использованием предложенной акусто-электроволновой модели. Расчет выполнен для алюминиевой трубы марки АД1 со следующими 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 выше (см. рис. 2), цифрами показаны размеры в миллиметрах. Длина деформируемого участка трубы (x) равна 40 мм и соответствует длине взрывающегося проводника. Толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа в расчетах принимались равными 1, 5, 10, 15 и 20 мм.

Показана зависимость величины деформации Δr для центрального сечения (при расчетах принята точка, находящаяся на равных расстояниях от лобных торцевых частей картриджа) от толщины торцевых частей электровзрывного картриджа для моментов времени 30 и 50 мкс (рис. 7), приведены результаты расчетов профилей труб после деформирования для различных моментов времени и разных толщин представлены на (рис. 7–13).

При толщине левой и правой торцевой части картриджа $h_t = 1$ мм (рис. 8). При толщине левой части электровзрывного картриджа $h_t = 5$ мм, правой $h_t = 2$ мм (рис. 9). При $h_t = 10$ мм (рис. 10) и $h_t = 15$ мм (рис. 11), при $h_t = 20$ мм слева (рис. 12).

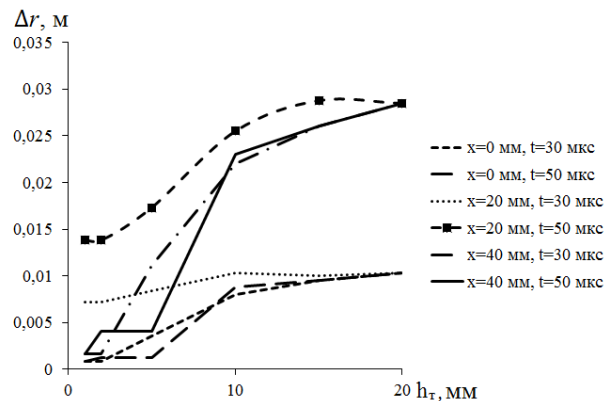


Рис. 7. Зависимость величины деформации металлической трубы от толщины торцевых лобовых частей электровзрывного картриджа

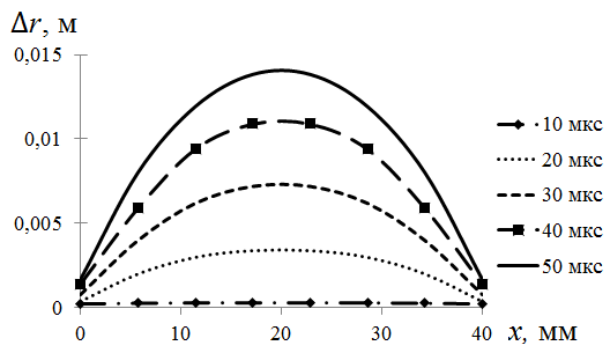


Рис. 8. Расчетные профили стенки трубы по длине взрывающегося проводника картриджа (деформируемый участок трубы) при $h_t = 1$ мм слева и справа

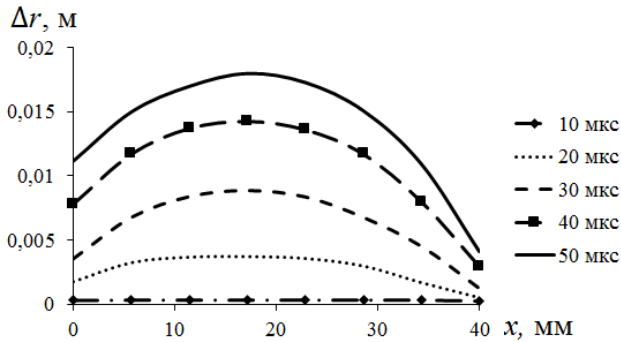


Рис. 9. Расчетные профили стенки трубы по длине взрывающегося проводника картриджа при $h_T = 5$ мм слева, $h_T = 2$ мм справа

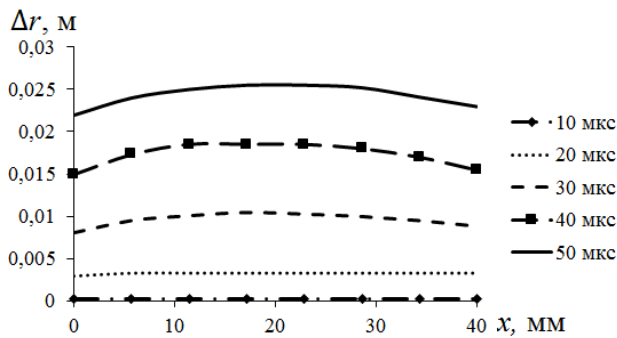


Рис. 10. Расчетные профили стенки трубы по длине взрывающегося проводника картриджа при $h_T = 10$ мм слева и слева

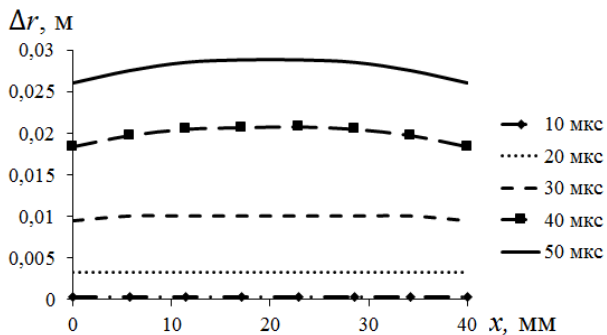


Рис. 11. Расчетные профили стенки трубы по длине взрывающегося проводника картриджа при $h_T = 15$ мм слева и слева

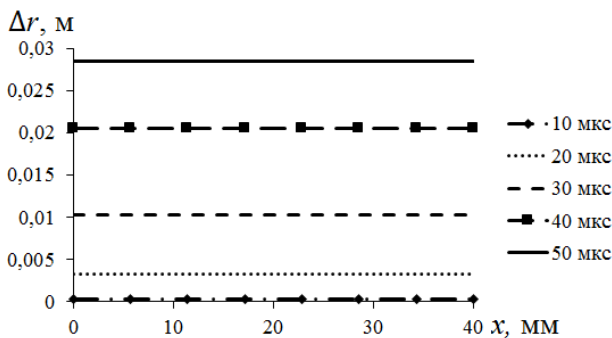


Рис. 12. Расчетные профили стенки трубы по длине взрывающегося проводника картриджа при $h_T = 20$ мм слева и слева

Сопоставление графиков профилей трубы после деформирования при разной толщине торцевых частей электровзрывного картриджа для момента времени 50 мкс

С целью анализа влияния профиля трубы при деформировании на параметры соударения в случае использования импульсного давления на основе ЭВП для крепления труб в трубных решетках построены расчетные профили деформирования для фиксированного момента времени. Представлены расчетные профили алюминиевой трубы при $t = 50$ мкс от начала деформации (рис. 13). Профили деформированных труб построены для следующих толщин левых и правых торцевых частей электровзрывного картриджа: $h_T = 1$ мм; левая торцевая часть $h_T = 5$ мм, правая $h_T = 2$ мм; $h_T = 10$ мм; $h_T = 15$ мм; $h_T = 20$ мм.

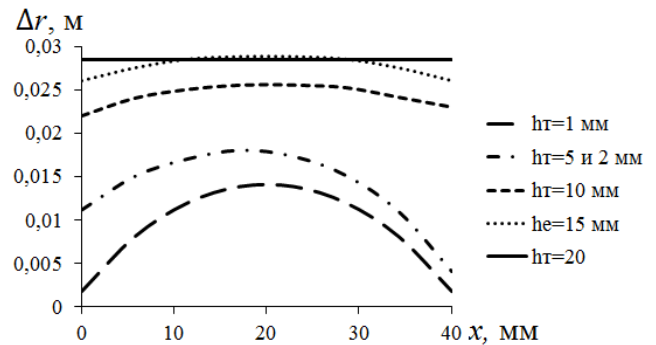


Рис. 13. Расчетные профили стенки трубы по длине деформируемого участка для $t=50$ мкс при разных h_T

Анализ профилей трубы показывает, что с увеличением толщины электровзрывного картриджа h_T профиль выравнивается, а величина деформации увеличивается. Особенно приращение деформации Δr наблюдается в областях близких к торцевым краям картриджа. Эффект от выравнивания профиля трубы при деформировании может быть использован для регулирования параметров соударения поверхности трубы с поверхностью трубной решетки с целью повышения качества соединения или создания более стабильного и управляемого режима вальцовки и соединения (сварки) трубчатых деталей с трубными отверстиями.

Заключение

Выполнены исследования влияния толщины лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа на профиль металлической трубы при ее деформировании импульсным давлением, генерируемым плазменным каналом электрической искры, инициируемой ЭВП в передающей среде картриджа. Показано, что при увеличении толщины лобовых частей электровзрывного картриджа



наблюдается усиление деформации по всей длине деформированного участка, при этом происходит выравнивание профиля трубы.

Благодаря более равномерному профилю трубы и, как следствие, более стабильной скорости деформирования стенки трубы, параметры соударения (V_k и γ) при фиксации (развальцовке,

крепления, сварке) трубы в трубной решетке по длине участка соединения более стабильны. Таким образом, с помощью регулирования толщины лобовых торцевых частей электровзрывного картриджа возможно управление процессами крепления труб в трубных решетках технологического оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.И. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 369 с. : ил.
2. ГОСТ Р 52630-12. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. – Введ. 2013-04-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 87 с.
3. Дмитриев В.Г., Платоненко В.Т., Колмаков В.П., Кудинов В.М. Определение параметров соударения при сварке труб с трубными решетками электрическим взрывом проводника // Автоматическая сварка. – 1981. – №9. – С. 33–35.
4. Колмаков В.П., Гречнева М.В. Исследование герметичного соединения труба-решетка выполненного сваркой взрывом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – №3(27). – С. 45–50.
5. Дмитриев В.Г. Сварка электрическим взрывом проводника соединений труба-решетка теплообменных аппаратов // Научно-технический сборник ЦНИИТЕНЕФТЕХИМ (эксплуатация, модернизация и ремонт оборудования). – 1976. – №10. – С. 9–11.
6. Zhutckov A.I., Zinoviev N.T., Filatov G.P. Pressing of tubes in tube slabs using multiple electrical discharge in liquid // III International Conference "PLASMA PHYSICS AND PLASMA TECHNOLOGY", Minsk, 18-22 September. 2000. – P. 558–561.
7. ГОСТ 23691-79 – ГОСТ 23693-79. Соединение труб с трубными решетками и коллекторами теплообменных аппаратов. Запрессовка труб с применением источников импульсного давления. – Введ. 1981-01-01. – М.: Изд-во Стандартов, 1986. – 65 с.
8. Колмаков В.П. Соединение трубчатых деталей электрическим взрывом проводника / В.П. Колмаков [и др.]. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – 152 с.
9. Мазуровский Б.Я. Электрогидроимпульсная запрессовка труб в трубных решетках теплообменных аппаратов. – Киев: Наукова Думка, 1980. – 172 с.
10. Чеботнягин Л.М. Соединение трубчатых деталей импульсным давлением расширяющегося плазменного канала электрического разряда: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.12 : защищена 26.11.2014 : утв. 06.04.2015 / Чеботнягин Леонид Михайлович. – Томск, 2014. – 137 с.
11. 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. DOI: 10.1007/s11182-015-0462-4
12. 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. DOI: 10.1007/s11182-015-0484-y
13. 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. DOI: 10.1080/09507116.2014.960699
14. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Новосибирск: Наука, 1980. – 221 с.
15. Cole R. H. Underwater Explosions: Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1948. – 495 с.
16. Анучин М. А. Штамповка взрывом. Основы теории. – М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.
17. Драбкина С.И. К теории развития канала искрового разряда // ЖЭТФ. – 1951. – Т. 21. – Вып. 4. – С. 473–483.
18. Круг К.А. Основы электротехники. Ч.2. – М.: Госэнергоиздат, 1946. – 637 с.

REFERENCES

1. Bazhan P.I., Kanevets G.I., Seliverstov V.M. Spravochnik po teploobmennym apparatam [Handbook of heat exchangers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989. 369 p.: il.
2. GOST R 52630-12. Sosudy i apparaty stal'nye svarnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Vved. 2013-04-01 [Vessels and apparatus welded steel. General specifications. Introduced on 2013-04-01]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 87 p.
3. Dmitriev V.G., Platonenko V.T., Kolmakov V.P., Kudinov V.M. Opredelenie parametrov soudareniya pri svarke trub s trubnymi reshetkami elektricheskim vzryvom provodnika [Determination of collision parameters during welding of pipes with pipe grids by electric explosion of wire]. Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding], 1981. No.9. Pp. 33–35.
4. Kolmakov V.P., Grechneva M.V. Issledovanie germetichnogo soedineniya truba-reshetka vpolnennogo svarkoi vzryvom [A study of the hermetic pipe-grid connection made by explosion welding]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2010. No.3(27). Pp. 45–50.
5. Dmitriev V.G. Svarka elektricheskim vzryvom provodnika soedinenii truba-reshetka teploobmennyykh apparatov [Welding pipe-grid connections using electric wire explosion in heat exchangers]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik TsNIITENEFTEKhim (ekspluatatsiya, modernizatsiya i remont oborudovaniya) [Scientific and technical collection of TsNIITENEFTEKhim (operation, modernization and repair of equipment)], 1976. No.10. Pp. 9–11.
6. Zhutckov A.I., Zinoviev N.T., Filatov G.P. Pressing of tubes in tube slabs using multiple electrical discharge in liquid. III International Conference "PLASMA PHYSICS AND PLASMA TECHNOLOGY", Minsk, 18-22 September. 2000. Pp. 558–561.
7. GOST 23691-79 – GOST 23693-79. Soedinenie trub s trubnymi reshetkami i kollektorami teploobmennyykh apparatov. Zapressovka trub s primeneniem istochnikov impul'snogo davleniya. Vved. 1981-01-01 [Connection of pipes with pipe grids and collectors of heat exchangers. Pressing of pipes with the use of pulse pressure sources. Introduced on 1981-01-01]. Moscow: Izd-vo Standartov Publ., 1986. 65 p.



8. Kolmakov V.P. et al. Soedinenie trubchatykh detalei elektricheskim vzryvom provodnika [Connecting tubular parts by the electric explosion of wire]. Irkutsk: IrGTU Publ., 2011. 152 p.
9. Mazurovskii B.Ya. Elektrogidroimpul'snaya zapressovka trub v trubnykh reshetkakh teploobmennyykh apparatov [Electrohydroimpulse pressing of tubes in tube grids of heat exchangers]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1980. 172 p.
10. Chebotnyagin L.M. Soedinenie trubchatykh detalei impul'snym davleniem rasshiryayushchegosya plazmennogo kanala elektricheskogo razryada: dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.14.12 : zashchishchena 26.11.2014 : utv. 06.04.2015 [Connection of tubular parts by pulse pressure of expanding plasma channel of electric discharge: Ph. D. (Engineering) diss.: 05.14.12 : defended 26.11.2014 : approved 06.04.2015]. Tomsk, 2014. 137 p.
11. 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. Pp. 56-62. DOI: 10.1007/s11182-015-0462-4
12. 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. DOI: 10.1007/s11182-015-0484-y
13. 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, Pp. 633-638. DOI: 10.1080/09507116.2014.960699
14. Deribas A. A. Fizika uprochneniya i svarki vzryvom [Physics of hardening and explosion welding]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1980. 221 p.
15. Cole R. H. Underwater Explosions: Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1948. 495 p.
16. Anuchin M. A. Shtampovka vzryvom. Osnovy teorii [Explosion stamping. Fundamentals of the theory]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 150 p.
17. Drabkina S.I. K teorii razvitiya kanala iskrovogo razryada [On the theory of the spark discharge channel development]. ZhETF [JETP]. 1951. Vol. 21. Iss. 4. Pp. 473-483.
18. Krug K.A. Osnovy elektrotekhniki. Ch.2. [Fundamentals of electrical engineering. Part 2]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1946. 637 p.

Информация об авторах

Authors

Чеботнягин Леонид Михайлович – к. т. н., доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, e-mail: leonid@istu.edu.

Потапов Василий Васильевич – к. т. н., доцент, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника», ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, e-mail: otep2@istu.edu.

Leonid Mikhailovich Chebotnyagin – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: leonid@istu.edu.

Vasilii Vasil'evich Potapov – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Prof. at the Subdepartment of Power Supply and Electrical Engineering, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: otep2@istu.edu.

Для цитирования

For citation

Чеботнягин Л. М. Влияние конструкции электровзрывного картриджа на профиль металлической трубы при скоростном деформировании импульсным давлением / Л. М. Чеботнягин, В. В. Потапов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 13–22. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).13–22

Chebotnyagin L. M., Potapov V. V. Vliyanie konstruktssii elektrovzryvnogo kartridzha na profil' metallicheskoj truby pri skorostnom deformirovaniy impul'snym davleniem [The effect of the electroexplosive cartridge design on the profile of a metal pipe at high-speed deformation by pulse pressure]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]*, 2019. Vol. 63, No. 3, pp. 13–22. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).13–22

УДК 620.179

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).22–31

М. А. Степанов, А. П. Степанов

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 04 апреля 2019

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗГИБНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФЕКТОВ ВНУТРИ СИММЕТРИЧНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ

Аннотация. В статье анализируются способы обнаружения и распределение изгибных напряжений и дефектов в материале симметричных поперечных сечений протяженных стальных профилей по картинам магнитного поля, предварительно созданных симметричными относительно геометрических фигур их поперечных сечений. При анализе картин внешнего магнитного поля на поверхности контролируемого поперечного сечения на участке контроля протяженного профиля возникают задачи оценки внутренних напряжений и дефектов в сечении, а также задачи, связанные с распределением магнитной индукции с указанными напряжениями и дефектами и напряжения в сечениях на участке контроля. В работе использовались спосо-