



А. С. Попов, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, М. С. Попов

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

Дата поступления: 19 июля 2019 г.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, УДАЛЯЕМЫХ МЕТОДОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Аннотация. Одной из технологических операций при ремонте, а также подготовке для дальнейшей обработки изделия является его очистка. Принцип очистки металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений методом диэлектрического нагрева основан на выделении тепловой мощности в удаляемом материале при воздействии на него электромагнитного поля высокой частоты. Процесс очистки металлических поверхностей в поле высокой частоты производится за счет увеличения этой мощности до необходимого значения, при котором происходит термическая деструкция удаляемого материала. Уровень мощности зависит от параметров электромагнитного воздействия и электрофизических свойств удаляемого материала. Известно, что такие электрофизические параметры непроводящих электрический ток материалов, как тангенс угла поглощения $\operatorname{tg}\sigma$ и относительная диэлектрическая проницаемость ε с ростом температуры изменяют свое значение в сторону роста. Это приводит к увеличению энергии, выделяемой в материале при воздействии на него электромагнитного поля высокой частоты. Для изучения электрофизических параметров удаляемых красок и окисных загрязнений в разных диапазонах частот был выбран прибор «ВМ-560». Данный прибор, для поведения измерений при росте температуры, был дополнительно оборудован кожухом из термостойкого материала, феном, шаговым двигателем, термомпарами и микроконтроллером. Кроме того, был разработан и автоматизирован алгоритм для его управления. Таким образом, была создана автоматизированная система исследований электрофизических свойств красок и окисных загрязнений при изменяющейся температуре.

Ключевые слова: очистка металлических поверхностей, автоматизация, высокочастотное излучение, диэлектрический нагрев, электрофизические параметры.

A. S. Popov, A. V. Livshits, N. G. Filippenko, S. I. Popov, M. S. Popov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: July 19, 2019

AUTOMATION OF THE PROCESS OF DETERMINING THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF THE METAL SURFACE CONTAMINANTS THAT ARE REMOVED BY THE DIELECTRIC HEATING METHOD

Abstract. One of the processing steps in the repair and preparation for further processing of the product is its cleaning. The principle of cleaning metal surfaces from paint and oxide contamination by dielectric heating is based on the generation of thermal power in the removed material when exposed to a high frequency electromagnetic field. The process of cleaning metal surfaces in the field of high frequency is a method of increasing this power to the desired value, at which the thermal destruction of the removed material occurs. This power depends on parameters of electromagnetic influence and electro-physical properties of the removed material. It is known that the electro-physical parameters of non-conductive materials such as: tangent absorption angle $\operatorname{tg}\sigma$ and relative permittivity ε , with increasing temperature, change its value in the direction of growth. This leads to an increase in the energy released in the material when exposed to the electromagnetic field of high frequency. To study the electro-physical parameters of the removed paints and oxide contamination in different frequency ranges, the "VM-560" device was selected. To perform measurements with temperature growth, this device was additionally equipped with: a casing made of heat-resistant material, blow dryer, stepper motor, thermocouples and microcontroller. With that, an algorithm was automated and developed for its control. Thus, an automated system for studying the electro-physical properties of paints and oxide contaminants at varying temperatures was developed.

Keywords: cleaning of metal surfaces, automation, high-frequency radiation, dielectric heating, electro-physical parameters.

Введение

Очистка металлических поверхностей в поле высокой частоты основана на способности краски

и окисных загрязнений, помещенных в поле токов высокой частоты, поглощать электромагнитное излучение и образовывать внутренние источники



тепла. Заряды в покрытиях, связанные молекулярными силами, при воздействии внешнего электрического поля смещаются или ориентируются в направлении поля, эти перемещения происходят с некоторым трением, что вызывает нагрев удаляемого покрытия, вследствие этого энергия внешнего электрического поля, вызывающая поляризацию, выделяется в виде тепла. Наличие в некоторых красках и окисных загрязнениях небольшого количества свободных зарядов приводит к возникновению тока проводимости, протекание которого сопровождается выделением дополнительного тепла. Нагрев разных удаляемых покрытий в электрическом поле происходит с разной интенсивностью, так как в зависимости от электрофизических свойств данных покрытий меняется количество энергии, затрачиваемой на поляризацию и протекание тока проводимости [1–14].

Количество энергии, выделяемое в удаляемом покрытии под воздействием поля высокой частоты (ВЧ), определяется выражением

$$W = \omega C \operatorname{tg} \sigma U^2 \tau, \quad (1)$$

где, ω угловая частота (Гц), C ёмкость конденсатора (Ф), $\operatorname{tg} \sigma$ тангенс угла поглощения, U напряжение между электродами (В), τ время (сек). Для плоского конденсатора

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d},$$

тогда мощность, выделяемая в единице объема удаляемого материала

$$P = \frac{W}{V\tau} = 2\pi f E^2 \varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \sigma, \quad (2)$$

где V – объём, ε относительная диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 электрическая постоянная вакуума.

Уравнение (2) показывает зависимость

мощности, выделяемой в удаляемом покрытии, от параметров электромагнитного поля и свойств покрытия. Проанализировав это уравнение, можно сделать вывод, что нагрев удаляемого покрытия, выраженный через мощность, возможно регулировать путем изменения напряжения или частоты электрического поля с учетом изменения свойств удаляемого материала с ростом температуры [1–14].

Измерение электрофизических параметров красок и окисных загрязнений резонансным методом

Для изучения зависимости электрофизических свойств, удаляемых краски и окисных загрязнений от температуры, был выбран прибор «BM560» (рис. 1).

Генератор G настраивается на заданную частоту работы, емкость L_x подбирается в зависимости от рабочего диапазона частот генератора, между пластин измерительного конденсатора C_x помещается исследуемый материал, подстроечный конденсатор C_0 настраивается колебательный контур L_x, C_x, C_0 на резонансную частоту генератора G . Процесс совпадения частот генератора G и колебательного контура L_x, C_x, C_0 регистрируется показаниями вольтметра V . После достижения системой резонанса, производится расчет тангенса угла поглощения $\operatorname{tg} \sigma$ и относительной диэлектрической проницаемости материала ε по формулам:

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2 Q_1} \frac{C_1}{C_2 - C_1}, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{C_2}{C_1 - C_3}, \quad (4)$$

где Q_2, Q_1 – резонансные показания вольтметра с материалом и без материала между обкладками

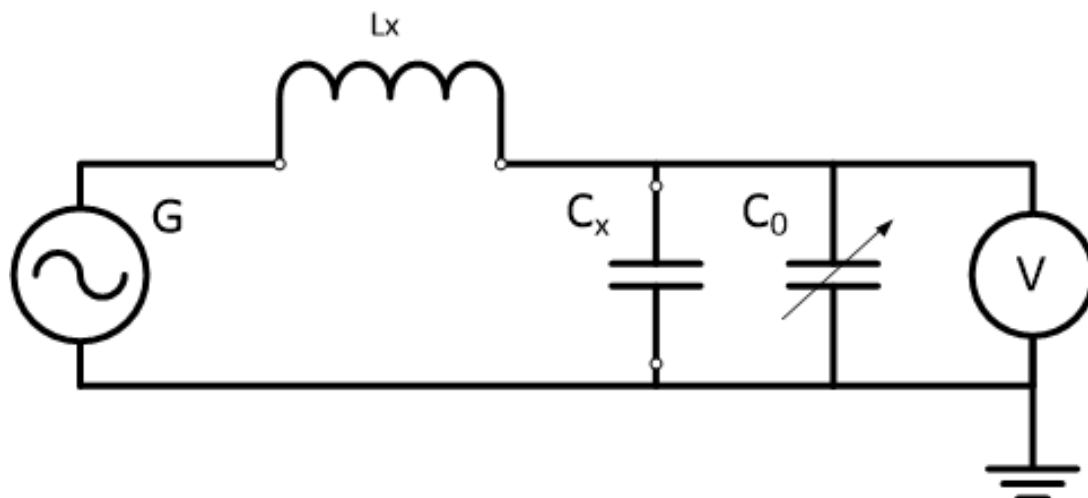


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема BM560



конденсатора; C_x , C_2 , C_1 – емкости подстроечного конденсатора с материалом и без материала между обкладками конденсатора; C_x , C_3 – межэлектродная емкость конденсатора C_x с воздухом [15].

Разработка автоматизированной системы

Для автоматизации процесса измерений и расчета при меняющихся значениях температуры удаляемого материала на приборе «ВМ 560» были смонтированы шаговый двигатель для регулировки перемещения конденсатора, электрический тэн с вентилятором (фен), термопары для контроля температуры, программируемый контроллер, осуществляющий управление процессом измерений по заданному алгоритму. Измерительная ячейка C_x помещена в кожух из теплостойкого материала. Далее представлена схема автоматизированной системы измерений и расчета тангенса угла поглощения $\operatorname{tg}\sigma$ и относительной диэлектрической проницаемости ε на базе прибора «ВМ 560» (рис. 2).

Описание алгоритма

Для автоматизированной работы данной системы был разработан алгоритм (рис. 3). Исходными данными для него являются: ΔC – изменение емкости подстроечного конденсатора при вращении шагового двигателя на один шаг, ΔP – приращение мощности нагревательного элемента, Δt – приращение температуры, i_{\max} – максимальное ко-

личество шагов двигателя (определяется диапазоном подстроечного конденсатора), τ – время необходимое для прогрева материала и T_{\max} – предельная температура нагрева. Измеряемыми параметрами являются U -показания вольтметра и показания термопар t_1 и t_2 . Работу алгоритма можно разделить на три этапа. На первом этапе оператор настраивает установку на заданную частоту работы, устанавливает в зависимости от исследуемой частоты катушку индуктивности L_x . Далее оператор инициирует работу установки. Производится расчет добротности Q_1 и емкости подстроечного конденсатора C_1 с проверкой действий оператора по подбору параметров измерительной системы. На втором этапе оператор устанавливает исследуемый образец в измерительную ячейку и производится повторная проверка параметров системы. Алгоритм переходит на третий этап работы – автоматический, при котором начинается нагрев исследуемого образца с постоянным расчетом и сохранением значений тангенса угла поглощения $\operatorname{tg}\sigma$ и относительной диэлектрической проницаемости ε для заданного диапазона температур по формулам (3) и (4). Окончание работы алгоритма инициируется достижением системой максимальной исследуемой температуры.

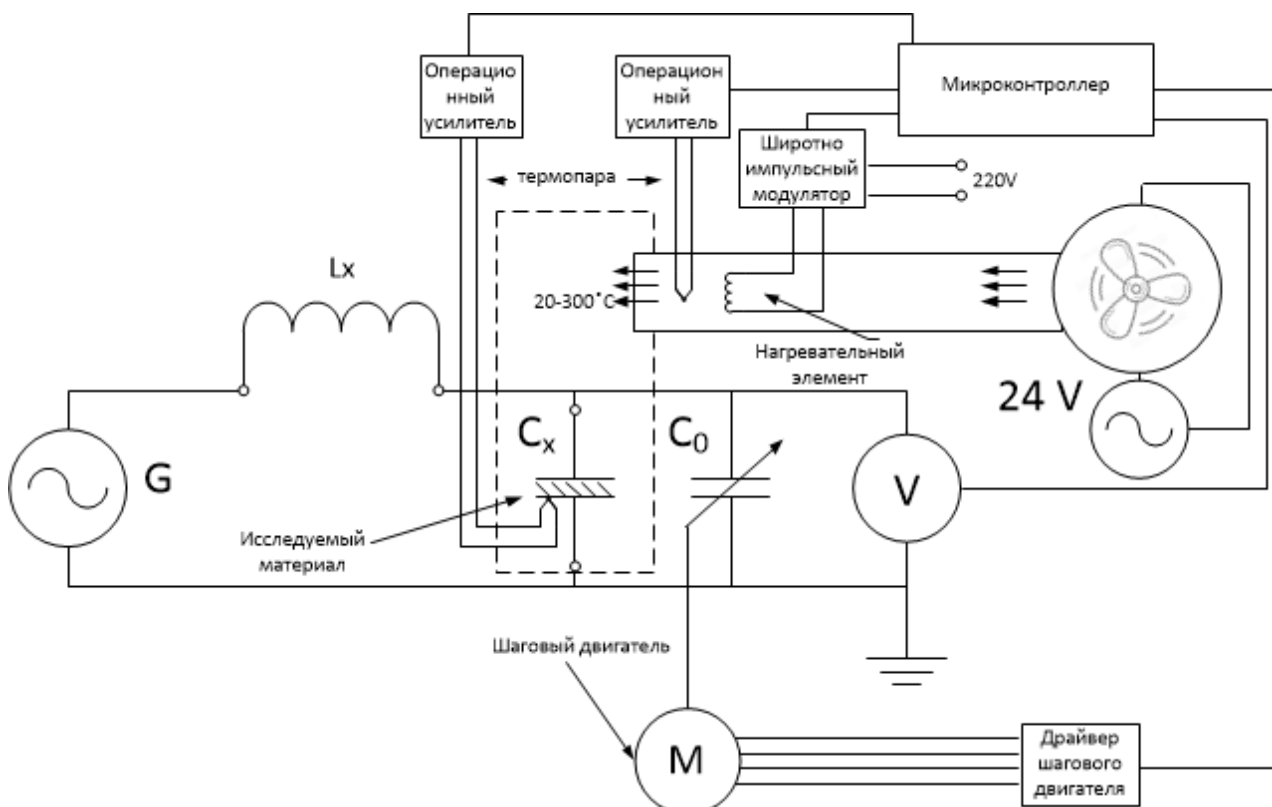


Рис. 2. Схема автоматизированной системы измерений и расчета $\operatorname{tg}\sigma$ и ε , на базе прибора ВМ 560

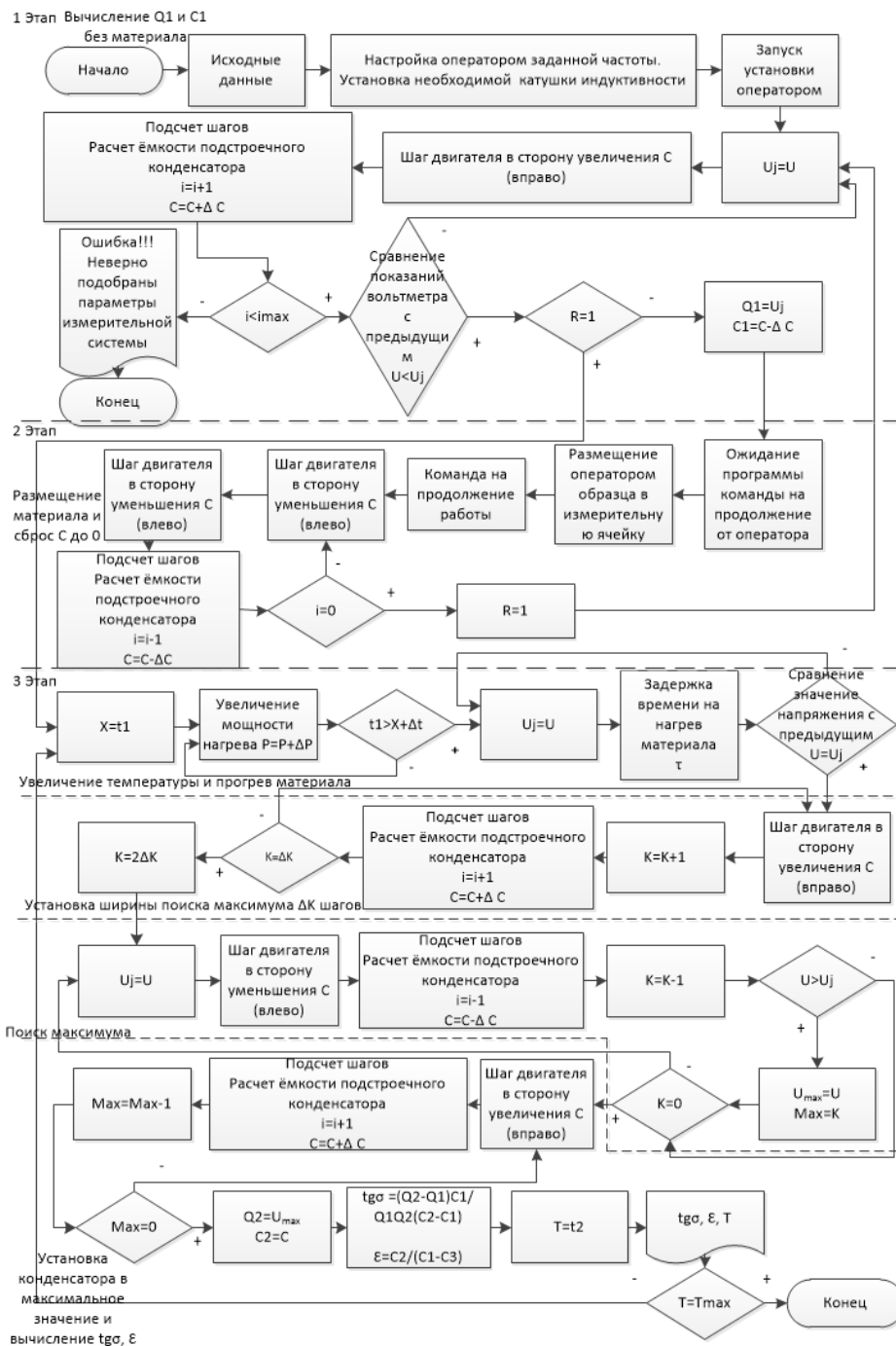


Рис. 3. Алгоритм работы автоматизированной системы измерений

Заключение

Апробация алгоритма была осуществлена на автоматизированной установке, собранной на базе прибора «ВМ560», при исследовании образцов краски и окисных загрязнений. Были получены удовлетворительные результаты измерений тангенса угла поглощения и относительной диэлек-

трической проницаемости в разных температурных диапазонах. Эти данные будут использованы при регулировании режимов очистки металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений диэлектрическим методом на промышленном оборудовании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брицын Н.Л. Нагрев в электрическом поле высокой частоты, Промышленное применение токов высокой частоты, Машгиз, 1952, 423 с.
2. Мазнин А. Н., Нетушил А. В., Парипи Е.П., Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников, Госэнергоиздат, 1950.
3. Высокочастотная электротермия. Справочник под редакцией док. техн. наук Донского А.В. М. Машиностроение, 1965. 156 с.



4. Лившиц А. В. Управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 120–126.
5. Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г., Каргапольцев С. К. Высокочастотная обработка полимерных материалов. Организация систем управления. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2013. 172 с.
6. Classical electrodynamics / By John David Jackson. Copyright 1962 by John Wiley & Sons, Inc. All right reserved
7. Глуханов И.П. Физические основы высокочастотного нагрева. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 64 с.
8. Попов С.И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров : дис. канд. тех. наук. Иркутск, 2013. 120 с.
9. Попов С. И., Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г., Ларченко А. Г. Устройство для очистки металлических поверхностей от краски и окисных загрязнений. Патент на полезную модель № 135545. Патентообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20.12.2013 г
10. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика электродинамика сплошных сред. 2-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 621 с. (т. VIII)
11. Абрагам-Беккер. Теория электричества. Том 1. (2-е изд.). Л.-М.: ГОНТИ, 1939.
12. Шелобский В. И. Индебром В. Л., Применение куметра для измерения ёмкости, диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь на высокой частоте, Заводская лаборатория, № 6, 1954.
13. Удерман Э.Г. Измерения мощности и угла потерь при высокочастотном нагреве, Электричество, 1950, № 6
14. Metaxas A.C. (1996). Foundations of Electroheat, A Unified Approach. John Wiley & Sons.
15. Измеритель добротности VM560. Инструкция по эксплуатации. TESLA Брно, нац. предпр., Брно, ЧССР. С. 48–49.

REFERENCES

1. Britsyn N.L. Nagrev v elektricheskom pole vysokoi chastoty [Heating in an electric field of high frequency]. *Promyshlennoe primeneniye tokov vysokoi chastoty [Industrial application of high frequency currents]*. Moscow: Mashgiz Publ., 1952, 423 p.
2. Maznin A.N., Netushil A. V., Paripi E.P. Vysokochastotnyi nagrev dielektrikov i poluprovodnikov [High-frequency heating of dielectrics and semiconductors]. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1950.
3. Vysokochastotnaya elektrottermiya. Spravochnik pod redaktsiei dok. tekhn. nauk Donskogo A.V. [High frequency electrothermy. A handbook edited by Donskoy A.V. (D. Sc. (Eng.)). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1965. 156 p.
4. Livshits A. V. Upravlenie tekhnologicheskimi protsessami vysokochastotnoi elektrotremii polimerov [Management of technological processes of high-frequency electrothermal polymers]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii [Problems of mechanical engineering and automation]*, 2015. No. 3. Pp. 120-126.
5. Livshits A.V., Filippenko N.G., Kargapol'tsev S.K. Vysokochastotnaya obrabotka polimernykh materialov. Organizatsiya sistem upravleniya [High-frequency processing of polymeric materials. Organization of management systems]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2013. 172 p.
6. Jackson J. D. Classical electrodynamics. John Wiley & Sons, Inc., 1962.
7. Glukhanov I.P. Fizicheskie osnovy vysokochastotnogo nagreva [Physical basis of high-frequency heating]. 4th ed., revised and enlarged. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1979. 64 p.
8. Popov S.I. Avtomatizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami vosstanovleniya ekspluatatsionnykh svoystv polimerov : dis. kand. tekhn. nauk [Automation of control of technological processes of restoration of operational properties of polymers: Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk, 2013. 120 p.
9. Popov S. I., Livshits A. V., Filippenko N. G., Larchenko A. G. Ustroystvo dlya ochistki metallicheskikh poverkhnostei ot kraski i oksinykh zagryaznenii [Device for cleaning metal surfaces from paint and oxide contaminants]. Utility Model Patent No. 135545. Patent Owner: FGBOU VPO IrGUPS. Registered in the State Register of Utility Models of the Russian Federation 12/20/2013
10. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika elektrodinamika sploshnykh sred [Theoretical physics, electrodynamics of continuous media]. 2nd ed., rev. Moscow: Nauka. Ch. ed. of Phys.-Math. lit., 1982. 621 p. (vol. VIII).
11. Abrakham M., Bekker R. Teoriya elektrichestva [Electricity theory]. Vol 1. (2nd ed.). Leningrad-Moscow: GONTI Publ., 1939.
12. Shelyubskii V.I. Indebrom V.L., Primeneniye kumetra dlya izmereniya emkosti, dielektricheskoi pronitsaemosti i dielektricheskikh poter' na vysokoi chastote [The use of a meter for measuring capacitance, permittivity and dielectric loss at high frequency]. *Zavodskaya laboratoriya [Factory laboratory]*, No. 6, 1954.
13. Uderman E.G. Izmereniya moshchnosti i ugla poter' pri vysokochastotnom nagreve [Measurements of power and loss of angle during high-frequency heating]. *Elektrichestvo [Electricity]*, 1950, No. 6.
14. Metaxas A.C. Foundations of electroheat, a unified approach. John Wiley & Sons, 1996.
15. Izmeritel' dobrotnosti VM560. Instruksiya po ekspluatatsii [The quality factor meter BM560. User's manual.]. TESLA Brno, nation. enterpr., Brno, ChSSR. Pp. 48–49.

Информация об авторах

Попов Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: popov_as@irgups.ru.

Лившиц Александр Валерьевич – д. т. н., проректор по научной работе, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, livshic_av@irgups.ru.

Филиппенко Николай Григорьевич – к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Pentagon@mail.ru

Попов Сергеевич Иванович – к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: popov_si@irgups.ru.

Попов Максим Сергеевич – аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск e-mail: popov_as@irgups.ru.

Authors

Aleksandr Sergeevich Popov – Ph.D. student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: popov_as@irgups.ru.

Aleksandr Valer'evich Livshits – Doctor of Engineering Science, Vice-Rector for Research, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: livshic_av@irgups.ru.

Nikolay Grigorievich Filippenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Automation of Production Processes", Irkutsk State University of Communications, Irkutsk, e-mail: Pentagon@mail.ru

Sergei Ivanovich Popov – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: popov_si@irgups.ru.

Maxim Sergeevich Popov – Ph.D. student of the Subdepartment of Automation of Production Processes, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: popov_ms@irgups.ru.



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. Sistemyi 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