

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 1 (14)
Март 2017

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ – САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю.А.

Главный редактор
Зам. главного редактора
Ответственный секретарь

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ
БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ
ВЫРЫХАНОВ ДЕНИС АЛЕКСАНДРОВИЧ

Редакционная коллегия

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Н.В. БЕКРЕНЁВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Д.А. ВЫРЫХАНОВ	к.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Ю.В. ГУЛЯЕВ	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН, Москва
В.Б. ДЕМИДОВИЧ	д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург
Л.С. ЗИМИН	д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара
С.Г. КАЛГАНОВА	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.А. КОЛОМЕЙЦЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ЛЯСНИКОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
А.Н. МАКАРОВ	д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь
Г.А. МОРОЗОВ	д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ, Казань
Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН	д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза
А.Ф. РЕЗЧИКОВ	д.т.н., профессор, член-корреспондент РАН, ИПТМУ РАН, Саратов
И.В. РОДИОНОВ	д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.П. РУБЦОВ	д.т.н., профессор, НИУ «МЭИ», Москва
Ф.Н. САРАПУЛОВ	д.т.н., профессор, УрФУ, Екатеринбург
Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
Г.Г. УГАРОВ	д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов
В.Н. ХМЕЛЕВ	д.т.н., профессор, БТИ, Бийск
В.А. ЦАРЕВ	д.т.н., профессор, СГТУ Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 1 (14)
March 2017

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

The journal is founded by Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Editor-in-Chief:

ARKHANGELSKY YURI SERGEEVICH

Assistant to the Editor-in-Chief:

BEKRENEV NIKOLAY VALERYEVICH

Chief Executive Officer

VIRIKHANOV DENIS ALEKSANDROVICH

Editorial Board Members

Yu. S. ARKHANGELSKY

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

N.V. BEKRENEV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

D.A. VIRIKHANOV

PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yu.V. GULYAEV

Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Moscow

V.B. DEMIDOVICH

Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», St.Petersburg

L.S. ZIMIN

Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University, Samara

S.G. KALGANOVA

Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.A. KOLOMEITSEV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.N. LYASNIKOV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

A.N. MAKAROV

Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University, Tver

G.A. MOROZOV

Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan

Yu. P. PERELIGIN

Dr.Sc., Professor, Penza State University, Penza

A.F. REZCHIKOV

Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of RAS, Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov

I. V. RODIONOV

Dr.Sc., Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.P. RUBTSOV

Dr.Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

F.N. SARAPULOV

Dr.Sc., Professor, Ural Federal University, Ekaterinburg

Yu. B. TOMASHEVSKY

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

G.G. UGAROV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

V.N. KHMELEV

Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute, Biysk

V.A. TSAREV

Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Гуляев Ю.В., Яфаров Р.К., Суздальцев С.Ю., Шаныгин В.Я. Туннелирование электронов из кристаллов кремния, поверхностно структурированных с использованием микроволновой плазмы аргона.....5

Калганова С.А. Современный потенциал электрометаллургии13

Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., Васильев И.В. Оптимизация стационарного режима двухсекционного индукционного нагревателя.....20

Калганова С.Г., Архангельский Ю.С., Лаврентьев В.А., Тригорлый С.В. Научные основы модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле26

Федоров А.В., Архангельский Ю.С. Улучшение параметров СВЧ рабочей камеры с бегущей волной путем перестройки частоты СВЧ генератора36

Злобина И.В., Бекренёв Н.В. Влияние воздействия СВЧ электромагнитного поля на прочность и микроструктуру баллистических неметаллических материалов40

Сарсенгалиев А.М., Злобина И.В., Бекренёв Н.В. Обоснование контактного метода ультразвуковой очистки труднодоступных внутренних полостей и каналов в изделиях транспортного и энергетического машиностроения48

Фомин А.А., Фомина М.А., Войко А.В., Кошуро В.А., Родионов И.В. Влияние силы тока индуктора на температуру нагрева титановых изделий дисковой и цилиндрической формы53

Горбачёва Е.Ю., Соловьёва Н.Д., Чадина В.В. Влияние предварительной обработки стального электрода на кинетику электроосаждения свинца из перхлоратного электролита.....59

Ченцова Е.В. Исследование формирования сплава цинк-никель в сульфатно-ацетатном растворе потенциодинамическим методом.....65

Савельева Е.А., Шпекина В.И., Коротков В.А. Электроосаждение диоксида свинца в ультразвуковом поле.....69

Фомин А.А., Фомина М.А., Войко А.В., Федосеев М.Е., Кошуро В.А., Зоркин А.Я., Родионов И.В. Влияние процесса окисления и модификации поверхности при обработке токами высокой частоты на кинетику нагрева титана.....73

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Менщиков И.А. Идентификационная модель прогнозирования ресурсных показателей электромеханических комплексов транспортных систем.....83

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Артюхов И.И., Земцов А.И., Гордеев Е.С. Исследование переходных процессов в системе электропитания пакетированного магнетрона промышленного назначения88

Добродум А.С., Федоров А.В., Архангельский Ю.С., Калганова С.Г. Терминологическая база, энергоэффективность и электроснабжение СВЧ электротехнологических установок94

ЭЛЕКТРОНИКА

Тищенко А.А., Тищенко О.Д., Зоркин А.Я., Белова И.В. Причины брака по вытеканию стеклофазы на поверхность комбинированного катода маломощного усилителя прямой волны М-типа103

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Баринов Д.А., Гапонов Д.В., Коломейцев В.А., Тасканов С.А. Собственные электродинамические параметры прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной, расположенной в центре широкой стенки волновода107

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Перинская И.В., Калганова С.Г., Перинский В.В. Твердость и усталостная прочность имплантированного ионами аргона титана для энергетического, металлургического и химического машиностроения115

Фомин А.А., Фомина М.А., Войко А.В., Кошуро В.А., Родионов И.В., Захаревич А.М. Характеристики прочности и пластичности титанового сплава ВТ16 после высокотемпературной обработки ТВЧ.....122

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Мотасов М.И., Давыдов Д.А., Алексеев В.С. Автоматизация управления фокусировкой луча при электронно-лучевой сварке127

Гусев С.А. Энергоинформационная основа формирования интеллектуального управления логистическими системами131

ИЗМЕРЕНИЯ

Архангельский Ю.С., Менщиков И.А. СВЧ измерения и контроль параметров плоских диэлектриков135

Анашкин А.А., Угаров Г.Г. Пути повышения адаптивности средств измерения поляризованного потенциала при воздействии случайных помех.....138

СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Архангельский Ю.С. Дополнительное образование в высшем учебном заведении145

ЛЕТОПИСЬ

Юрий Мичиславович Голембиовский149

Екатерина Михайловна Гришина151

К сведению авторов153

CONTENTS

ELECTROTHERMY

Gulayev Uu.V., Yafarov R.K., Suzdaltsev S.Yu., Shanygin V.Ya. Tunneling of electrons from the crystals of silicon which are superficially structured with use of microwave plasma of argon	5
Kalганova S.G. The potential of modern electro-metallurgy.....	13
Danilushkin A.I., Danilushkin V.A., Vasilyev I.V. Optimization of two-section stationary mode of induction heaters.....	20
Kalганova S.G., Arkhangelsky Yu.S., Lavrentiev V.A., Tripoly S.V. Scientific basis for modification of polymer materials in a microwave electromagnetic field.....	26
Fedorov A.V., Arkhangelskiy Yu.S. Improving parameters of the working chamber with the traveling wave of the microwave frequency by tuning the microwave oscillator.....	36
Zlobina I.V., Bekrenev N.V. Impact of the microwave electromagnetic field on the strength and structure of ballistic non-metallic materials.....	40
Sarsengaliyev A.M., Zlobina I.V., Bekrenev N.V. Validation of the contact method for ultrasonic cleaning of remote internal cavities and channels in the products of transport and power engineering industries	48
Fomin A.A., Fomina M.A., Voyko A.V., Koshuro V.A., Rodionov I.V. Impact of inductor current intensity on the heating temperature rate for titanium disc- shaped and cylindrical items.....	53
Gorbacheva E.Yu., Solovieva N.D., Chadina V.V. Influence of pretreatment processing of the steel electrode on kinetics of electrodeposition of lead from perchlorate based electrolytes	59
Chentsova E.V. Potentiodynamic method for the study of zinc-nickel alloys formed in sulphate-acetate solutions.....	65
Savelyeva E.A., Shpekina V.I., Korotkov V.A. Lead dioxide electrodeposition in an ultrasonic field.....	69
Fomin A.A., Fomina M.A., Voyko A.V., Fedoseev M.E., Koshuro V.A., Zorkin A.Ya., Rodionov I.V. Impact of oxidation and modification of surfaces on titanium heating kinetics under treatment with high-frequency currents.....	73
ELECTROMECHANICS	
Menshikov I.A. Identification model for predicting resource indicators of electromechanical complexes in transport systems	83
ELECTRIC POWER SUPPLY	
Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Gordeev E.S. Research into transient phenomena in power-supply systems of industrial magnetron generators.....	88

Dobrodum A.S., Fedorov A.V., Arkhangelsky Yu. S., Kalганova S.G. Terminology database, energy efficiency and electricity supply for microwave electrotechnology devices	94
--	----

ELECTRONICS

Tishchenko A.A., Tischenko O.D., Zorkin A.Ya., Belova I.V. Defects caused by melting glassy phase on the surface of the combined field emission cathode in the m-type low-power direct wave amplifier.....	103
---	-----

ELECTRODYNAMICS

Barinov D.A., Gaponov D.V., Kolomeytsev V.A., Taskanov S.A. Mathematical Modeling of Soliton Perturbations of the Core of a Charged Dislocation in n-type Semiconductor.....	107
---	-----

MATERIALS SCIENCE

Perinskaya I.V., Kalганova S.G., Perinsky V.V. Hardness and fatigue endurance properties of titanium implanted with argon ions applied in power engineering, metallurgical and chemical engineering industries.....	115
Fomin A.A., Fomina M.A., Voyko A.V., Koshuro V.A., Rodionov I.V., Zakharevich A.M. Strength and plasticity properties of the titanium alloy VT16 after high temperature treatment with HFC	122

CONTROLLING SYSTEMS

Motasov M.I., Davydov D.A., Alekseev V.S. Computer-aided control by focusing the beam under electron-beam welding.....	127
Gusev S.A. Energy database as the basis for intelligent logistics management.....	131

MEASUREMENT

Arkhangelsky Yu.S., Menshikov I.A. Microwave control and measurement characteristics of planar dielectrics.....	135
Anashkin A.A., Ugarov G.G. Ways for improving adaptability properties of polarization measurement tools affected by random noise	138

SOCIAL ASPECT

Arkhangelsky Yu.S. Continuing education programs at higher education institutions	145
--	-----

CHRONICLE

Yuri Michislavovich Golembiovsky	149
Ekaterina Mikhailovna Grishina	151
Information for Authors.....	153

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 537.533.3

ТУННЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ, ПОВЕРХНОСТНО СТРУКТУРИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОЛНОВОЙ ПЛАЗМЫ АРГОНА

Ю.В. Гуляев, Р.К. Яфаров, С.Ю. Суздальцев, В.Я. Шаныгин

TUNNELING OF ELECTRONS FROM THE CRYSTALS OF SILICON WHICH ARE SUPERFICIALLY STRUCTURED WITH USE OF MICROWAVE PLASMA OF ARGON

Yu.V. Gulayev, R.K. Yafarov, S.Yu. Suzdaltsev, V.Ya. Shanygin

С использованием атомной структуры поверхности кристаллов кремния, явлений самоорганизации при осаждении субмонослойных углеродных покрытий и высокоанизотропного микроволнового плазмохимического травления получены катодные матрицы с наноструктурированными эмиссионными центрами. Исследована взаимосвязь их морфологических и автоэмиссионных характеристик. Показано, что наноструктурирование поверхности позволяет более чем на одну треть уменьшить пороги возбуждения автоэмиссии и практически на два порядка увеличить максимальные плотности автоэмиссионных токов, которые на кристаллах кремния n-типа могут достигать $5,7 \text{ mA/cm}^2$.

Ключевые слова: полевая эмиссия электронов, наноструктурирование поверхности, кремний, микроволновая плазма

В плане функционального применения существуют два основных направления исследований при создании холодных источников электронов. Наиболее востребованными являются сильноточные автоэмиссионные катоды, которые могли бы быть использованы взамен термокатодов в мощных СВЧ электровакуумных приборах (ЭВП). В другом направлении, связанном с создани-

With use of atomic structure of a surface of crystals of silicon, the self-organization phenomena at sedimentation of submonolayer carbon coverings and high anisotropic microwave plasmochemical etching cathodic matrixes with the nanostructured emission centers are received. The interrelation of their morphological and field emission characteristics is investigated. It is shown that nanostructuring a surface allows more, than to reduce thresholds of initiation of field emission by one third and practically to increase the maximum density of field emission currents which on silicon crystals n-type can reach $5,7 \text{ mA/cm}^2$ by two orders.

Keywords: field emission of electrons, nanostructuring surface, silicon, microwave plasma

ем радиационностойких активных элементов для применения в составе интегральных схем, изготавливаемых в основном на кремниевых подложках, основным требованием является низкий порог начала полевой эмиссии. Это необходимо для того, чтобы совместить значения электрических напряжений для управления активными элементами на основе автоэлектронных

эмиттеров с остальными элементами интегральной схемы. Для интеграции автоэмиссионных активных элементов с традиционными кремниевыми интегральными схемами, не требующими высоких плотностей тока, наиболее перспективными могли бы быть углеродные нанотрубки (УНТ). Однако по имеющимся литературным данным автоэмиттеры на их основе обладают недостаточно высокой долговечностью. До настоящего времени не найдено удовлетворительного решения проблемы деградации свойств массивов УНТ в процессе их работы в качестве источников электронов.

Анализ публикаций показывает, что создание автоэмиссионных источников электронов неразрывно связано с фундаментальными материаловедческими проблемами поиска условий повышения деградационной стойкости материалов при эксплуатации в сильных электрических полях и температурных градиентах. Работа автоэлектронного катода (АЭК) сопровождается ионной бомбардировкой его поверхности, воздействием пондеромоторных нагрузок, адсорбцией и десорбцией ионов и молекул остаточных газов, поверхностной миграцией атомов и т.п. Стабильность работы чрезвычайно чувствительна к изменению геометрии катода и к состоянию его поверхности. В зависимости от конструкции и режима эксплуатации АЭК перечисленные процессы порознь или в некоторой совокупности приводят к ряду эффектов, изменяющих режим его работы. К ним относятся: катодное распыление материала эмиттера, изменение количества и расположение микровыступов, изменение работы выхода электронов, разогрев катода и механические разрушения. В связи с этим материалы АЭК должны обладать определенной совокупностью свойств: низкими и стабильными значениями работы выхода электронов, малым коэффициентом катодного распыления, высоким значением механической прочности, высокой электро- и теплопроводностью. Кроме того, они должны быть технологичными и доступными. В настоящее время материалы, удовлетворяющие всему комплексу перечисленных требований, отсутствуют.

Трудности в создании автокатодов во многом связаны с тем, что управление прозрачностью потенциальных барьеров, определяющей порог начала и плотности токов автоэмиссии электронов из твердого тела в вакуум, осуществляется за счет высоких напряженностей внешних электрических полей $\sim 10^6$ В/см, что весьма близко к значениям электрической прочности большинства известных в природе материалов (напряженность поля лавинного пробоя кристаллического кремния составляет, например, всего $3 \cdot 10^5$ В/см). Вследствие статистической неоднородности рельефа поверхности это приводит к высокой локальной неоднородности автоэмиссии по поверхности катодов, которая вызывает в процессе эксплуатации в условиях ионной бомбардировки в техническом вакууме и высоких локальных перегревах эмиссионных центров неоднородную деструкцию поверхности.

В связи с вышеизложенным целью работы являлись поиск и практическая реализация альтернативных путей повышения плотностей автоэмиссионных токов автокатодов на основе кристаллического кремния при сравнительно низких уровнях напряженности внешнего электрического поля.

Из квантово-механического представления прозрачности произвольного потенциального барьера следует, что вероятность прохождения частицы сквозь потенциальный барьер очень сильно зависит от ширины барьера и его превышения над уровнем энергии туннелирующего электрона W . Повышение прозрачности потенциального барьера может быть осуществлено не только благодаря традиционному увеличению напряженности внешнего электрического поля, которое достигается, в частности, путем повышения фактора усиления поля β за счет улучшения аспектного отношения, уменьшения радиусов эмитирующих острий или диаметров отверстий в управляющих электродах, но и за счет повышения собственной энергии туннелирующих электронов. Способами повышения собственной энергии электронов являются нагрев автокатода («теплые» автокатоды),

воздействие электромагнитных излучений и размерное квантование, которое может быть реализовано в нанокристаллических структурах [1]. Таким образом, в структурах с квантовым ограничением имеется принципиальная возможность существенного увеличения прозрачности потенциального барьера без повышения напряженности внешнего электрического поля. Это позволит обеспечить повышение плотностей токов автоэмиссии при более низком уровне напряженностей внешних электрических полей, увеличить запас электрической прочности используемых катодных материалов, стабильность их автоэмиссии и долговечность.

Примером практической реализации такого подхода является создание автоэмиссионных катодов на основе вышеупомянутых УНТ, имеющих минимальные для всех известных углеродных материалов работу выхода и порог эмиссии. Пороговая напряженность поля начала автоэмиссии нанотрубных катодов составляет 0,5-1 В/мкм, плотность тока в постоянном режиме достигает 0,5 А/см², а в импульсном – 2 А/см² и более. Согласно данному квантово-механическому рассмотрению снижение порога автоэмиссии УНТ определяется не только высоким коэффициентом усиления поля на их «открытых» концах, как это принято считать, но и тем, что углеродные нанотрубки – квантовые объекты, имеющие повышенную энергию нулевых колебаний носителей. К сожалению, недостаточная адгезия к подложке, подверженность к перенапылению на анод создают проблемы для их практического применения в качестве автокатодов [2].

В настоящей работе изготовление автокатодов с повышенной собственной энергией электронов, которое достигалось наноструктурированием поверхности кристаллов кремния, проводилось в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника на частоте 2,45 ГГц [3]. Процесс осуществлялся в одном технологическом цикле и включал следующие операции: плазмохимическое травление для получения атомно-чистых поверхностей пла-

стин кремния, последующее осаждение на них субнаноразмерных углеродных масочных покрытий и затем высокоанизотропное травление для получения на поверхности наноразмерных столбчатых кремниевых выступов. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля составляли, соответственно, 250 Вт и 875 Гс. В качестве рабочего газа для плазменного удаления естественного оксидного покрытия на кремнии использовался аргон. Давление газа в процессе сухого травления было равным 0,1 Па и обеспечивало выполнение условий электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), при котором степень ионизации плазмы составляла около 5 %. Смещение в процессах удаления защитных окисных покрытий составляло -100 В. Глубина травленного слоя составляла около 100 нм.

Осаждение углеродных покрытий осуществлялось в СВЧ плазме с использованием в качестве рабочего вещества паров этанола. Процесс осуществлялся в условиях малой адсорбции при температуре подложки 250°C и давлении паров этанола около 0,05 Па. Потенциал смещения U_{sm} на подложкодержателе в процессе осаждения углеродного покрытия составлял -100 В. Длительность осаждения варьировалась в диапазоне от 5 до 8 с с интервалом в 1 с. Выбор данного диапазона обусловлен тем, что при длительностях осаждения больше 8 с островковый характер осаждения углеродного покрытия сменяется сплошным (плотным) [4]. Это не позволяет использовать полученные покрытия в качестве островных масок для создания в кремнии (100) столбчатых наносистем в результате последующего высокоанизотропного травления. Высокоанизотропное травление матрицы кремния осуществлялось при положительном смещении на подложкодержателе с использованием хладона-14 при давлении менее 0,1 Па.

В экспериментах использовались пластины монокристаллического кремния Si (100) *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением 0,01-0,02 Ом·см. Наноморфология поверхностей изучалась с помощью сканирующего атомно-силового мик-

роскопа P4-SPM-MDT. В качестве зонда использовались стандартные кремниевые кантилеверы CSG10 пирамидальной формы с радиусом закругления 10 нм и жесткостью 0,1 Н/м. Поле сканирования составляло 3×3 мкм. Обработка результатов измерений производилась с использованием программного обеспечения микроскопа.

Исследования автоэмиссионных свойств осуществлялись в условиях высокого вакуума (10^{-5} Па) на диодной структуре, способной изменять расстояние между электродами с точностью до 1 мкм. Диаметр рабочей поверхности анода, изготовленного из углеродного материала МПГ-6, составлял 3 мм.

На рис. 1, 2 приведены усредненные по времени осаждения в течение 6 и 7 секунд углеродных покрытий на пластины кремния зависимости параметров наноморфологий и автоэмиссионных характеристик от длительностей высокоанизотропного плазмохимического травления в атмосфере хладона-14. На рис. 3 показаны АСМ изображения морфологии поверхностей кремния после различных длительностей высокоанизотропного травления. Видно, что с увеличением длительностей травления через островковую углеродную маску высоты кремниевых выступов увеличиваются с небольшим ускорением от 13 нм при длительности травления 10 мин до 19 нм при 30 мин (рис. 1). Наибольший прирост высот выступов наблюдается при длительностях травления в интервале от 20 до 30 мин. В этом же интервале длительностей наблюдается резкое уменьшение напряженности поля возбуждения автоэмиссии от 160-180 В/мкм при длительностях травления 10 и 20 мин до 125 В/мкм при 30 мин.

Поверхностная плотность кремниевых выступов, полученная с использованием предварительного травления пластин кремния в плазме аргона и последующих субмонослойного осаждения углеродного покрытия и высокоанизотропного плазмохимического травления матрицы кремния в среде хладона-14 через самоорганизованную островковую наноразмерную углеродную маску, находится на уровне (3-5) 10^9 см⁻².

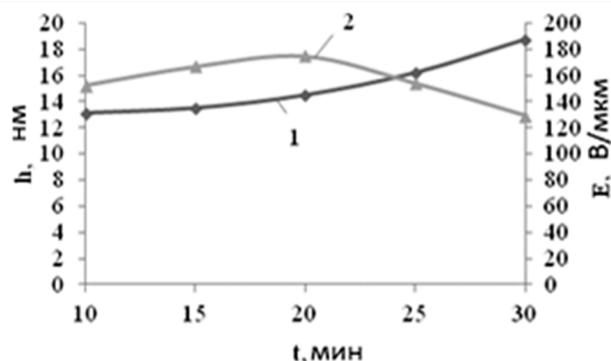


Рис. 1. Зависимости высот выступов (1) и порога возбуждения автоэмиссии (2) от длительности масочного травления пластин кремния с обработкой в плазме аргона

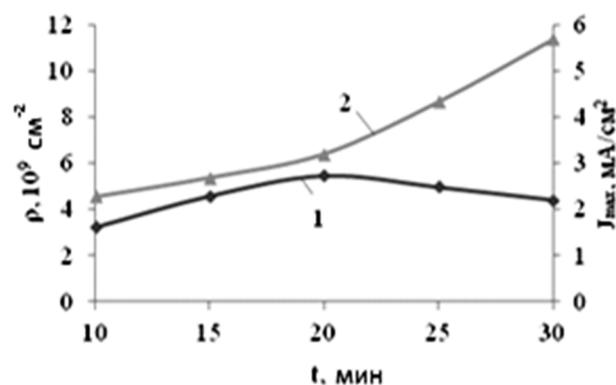


Рис. 2. Зависимости поверхностных плотностей выступов (1) и плотностей максимальных токов автоэмиссии (2) от длительности масочного травления пластин кремния с обработкой в плазме аргона

Это на 3-4 порядка больше, чем при получении эмитирующих кремниевых выступов с использованием традиционных литографических технологий [5,6]. Максимальные плотности автоэмиссионных токов в полученных автоэмиссионных структурах составляют 3-6 мА/см² (рис. 2). Это практически на два порядка превосходит плотности токов, полученных на пластинах кремния с использованием традиционных технологий [7].

По современным представлениям уменьшение порога возбуждения автоэмиссии при увеличении высот эмитирующих выступов обусловлено увеличением коэффициента усиления поля β на их вершинах. Вместе с увеличением высоты выступов вполне естественным является ускоренный рост в интервале длительности

стей травления от 20 до 30 мин максимальных плотностей автоэмиссионных токов, которые достигают $5,7 \text{ mA/cm}^2$. Этот рост обеспечивается улучшением прозрачности потенциальных барьеров за счет увеличения коэффициента β . Рост плотностей токов происходит при некотором уменьшении поверхностной плотности эмитирующих выступов. Этот факт объясняется уменьшением взаимной экранировки внешнего электрического поля эмитирующими выступами при увеличении расстояния между ними. Как и в случае увеличения высоты выступов, это способствует увеличению прозрачности туннельных барьеров при автоэмиссии. Тем не менее из

сравнения диапазонов изменения максимальных плотностей токов в интервалах длительностей масочного травления от 10 до 20 мин и от 20 до 30 мин следует, что в первом интервале изменение максимальных плотностей токов составило всего $0,5 \text{ mA/cm}^2$, в то время как во втором интервале наблюдалось практически двукратное их увеличение (от 3 до $5,7 \text{ mA/cm}^2$) при значительном уменьшении порога возбуждения автоэмиссии. Установленная нелинейность изменения автоэмиссионных свойств в зависимости от длительности масочного травления может быть интерпретирована следующим образом.

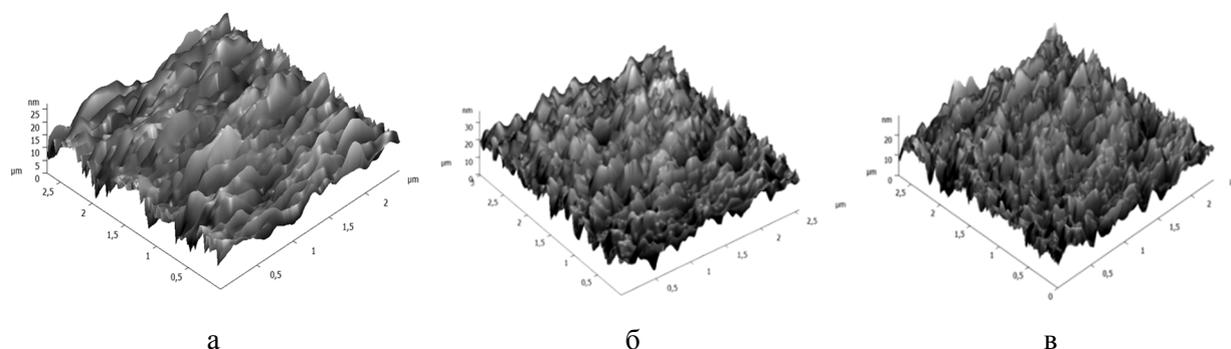


Рис. 3. АСМ изображения поверхностей пластин кремния *n*-типа после различных длительностей высокоанизотропного плазмохимического травления в хладоне-14: а – 10 мин, б – 20 мин, в – 30 мин

Как показано в работе [4], формирование углеродных масочных покрытий на кристаллах кремния в виде наноразмерных островков-доменов осуществляется в процессе микроволнового плазмохимического осаждения из паров этанола по механизму прекурсорной хемосорбции. В основании доменов находится монослой карбида кремния. На нем формируется слой аморфного углерода, выполняющего роль маскирующего покрытия при последующем высокоанизотропном травлении пластины кремния. Высокоанизотропное масочное травление проводится в среде хладона-14 в условиях слабой адсорбции при положительном смещении на подложкодержателе. В этом случае за счет интенсивной электронной бомбардировки реализуются гетерогенные процессы диссоциации и активации адатомов CF_4 с образованием атомарного фтора, который при взаимодействии с

поверхностными атомами кремния образует летучие продукты реакции и вызывает его травление.

При ионно-плазменном травлении пластин кремния в среде аргона одновременно с удалением естественного оксидного покрытия происходят аморфизация приповерхностного слоя и формирование на ней различных кремниевых оксид-нитридных мелкокристаллических нанофаз [8]. Их образование происходит в результате активного взаимодействия поверхностных атомов кремния с оборванными связями с ионами и радикалами кислорода и азота остаточной атмосферы вакуумной камеры. Последующее плазмохимическое осаждение субмонослойного углеродного покрытия приводит к частичному восстановлению оксинитридного кремниевого покрытия, а также к формированию островковой масочной струк-

туры в результате взаимодействия адатомов углерода с поверхностными атомами кремния с образованием Si-C кластеров, которые служат основанием для роста на них углеродных выступов.

Формирование кремниевой оксиднитридной диэлектрической прослойки, несмотря на достаточно большую высоту кремниевых выступов и коэффициенты усиления поля, приводит к увеличению потенциального барьера и порога возбуждения автоэмиссии (рис. 1). Величина барьера зависит от толщины диэлектрического слоя. Он препятствует проникновению электрического поля в полупроводник и выходу носителей из подложки. В результате этого автоэмиссия с кремниевых выступов осуществляется за счет двуступенчатого туннелирования электронов из зоны проводимости кремния через аморфный карбидкремниевый диэлектрический барьер в углеродную поверхностную фазу и затем в вакуум. Вероятность такого туннелирования существенно ниже, чем в случае образования на кремнии монослойных Si-C комплексов. Кроме того, носители, инжектированные из кремниевой подложки в диэлектрический поверхностный слой, взаимодействуют с дефектами, расположенными в его объеме. Результатом этого взаимодействия является захват носителей на ловушечные центры, который приводит к дополнительному увеличению порога автоэмиссии. Плазмохимическое удаление диэлектрического слоя способствует уменьшению порогов возбуждения автоэмиссии и значительному увеличению максимальных плотностей автоэмиссионных токов. Этот результат в заданном режиме травления достигается при длительностях около 30 мин. При этом реализуются минимальный порог возбуждения автоэмиссии, равный 125 В/мкм, и максимальные плотности автоэмиссионных токов, которые достигают 5,7 мА/см². Среднее расстояние между выступами высотой около 18 нм составляет 160 нм.

Увеличение скорости роста высоты выступов в интервале длительностей масочного травления от 20 до 30 мин по сравне-

нию с предыдущим интервалом такой же длительности обусловлено изменением состава поверхностной фазы кремниевых выступов. Благодаря этому, за счет уменьшения скорости травления материала маски при неизменной скорости травления кремниевой матрицы прирост высот кремниевых выступов с увеличением длительностей масочного травления увеличивается. Улучшение селективности травления в гетероструктуре углеродная маска-кристаллический кремний может быть обусловлено обогащением оставшегося масочного покрытия кремнием в виде карбидкремниевых кластеров, селективность травления которых по отношению к кремнию выше, чем селективность травления углерода к кремнию. Карбидкремниевые кластеры формировались на границе кристаллического кремния при осаждении субмонослойного углеродного покрытия в микроволновой плазме паров этанола. Из-за различного сродства к электрону атомов кремния и углерода карбидкремниевые кластеры образуются в виде диполей. Непосредственно на границе кремния они ориентированы перпендикулярно поверхности раздела, придавая поверхности определенный суммарный дипольный момент [9]. С увеличением толщины слоя разориентация диполей увеличивается, а суммарный дипольный момент поверхности уменьшается [10].

В процессе высокоанизотропного масочного травления кремния за счет конечной величины селективности травления толщина углеродного масочного покрытия уменьшается. Суммарный дипольный момент оставшейся поверхностной фазы, напротив, увеличивается. Увеличение дипольного момента, связанного с уменьшением толщины масочного покрытия и улучшением нормальной к поверхности ориентации Si-C кластеров, приводит за счет более высокой по отношению к чистому кремнию электроположительности углерода к уменьшению работы выхода электронов [9]. По сравнению с тем, когда суммарный дипольный момент поверхности при больших толщинах углеродного

покрытия был равен или близок к нулю, это приводит к наблюдаемому ускоренному уменьшению порогов возбуждения автоэмиссии с одновременным увеличением максимальных плотностей автоэмиссионных токов в интервале длительностей масочного травления от 20 до 30 мин (рис. 2).

Аспектное отношение поверхностно наноструктурированных кристаллов кремния с удаленным в плазме аргона естественным оксидным покрытием и поверхностную плотность наноразмерных столбчатых структур, которые обеспечивали в полученных многоострийных катодных матрицах на основе кристаллов кремния минимальные пороги напряженности поля возбуждения автоэмиссии и наибольшие значения максимальных плотностей автоэмиссионных токов, определяли обработкой их АСМ изображений с помощью функции Threshold программного обеспечения Image Analysis 2.2. Обработка заключалась в определении параметров морфологии поверхностей после проведения секущей плоскости параллельно основанию скана таким образом, чтобы ее положение соответствовало максимальному числу выступов на поверхности (рис. 4). Такое сечение позволяет определить высоту кремниевых выступов h , превышающих положение секущей плоскости, латеральный размер L

выступов на уровне секущей плоскости, а также их поверхностную плотность [11].

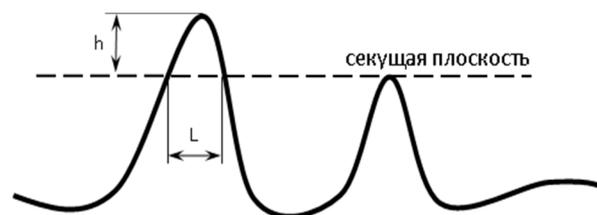


Рис. 4. Схема положения секущей плоскости для расчета аспектного отношения эмиссионных выступов на кристаллах кремния

Для пластин кремния n -типа с удаленным в плазме аргона естественным оксидным покрытием оптимальное значение аспектного отношения, которое рассчитывается как отношение h к L и реализуется при длительности высокоанизотропного травления матрицы через островковую углеродную маску 30 мин, составило 0,04. Этому значению аспектного отношения соответствуют минимальные значения порогов возбуждения автоэмиссии для многоострийных автокатодов на основе кристаллов кремния с поверхностным наноструктурированием. При этом максимальные плотности автоэмиссионных токов увеличиваются по сравнению с неструктурированным кремнием более чем на порядок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10033).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Усанов Д.А.** Методы получения и исследования самоорганизующихся наноструктур на основе кремния и углерода / Д.А. Усанов, Р.К. Яфаров. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2011. 126 с.
2. Very High Field-Emission Current From a Carbon-Nanotube Cathode With a Pulse Driving Mode / Lei Wei, Zhang Xiaobing, Lou Chaogang, Zhao Zhiwei // *Electron Device Letters. IEEE.* 2009. 30, 5. P. 571-573.
3. **Яфаров Р.К.** Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий / Р.К. Яфаров. М.: Физматлит, 2009. 216 с.
4. **Яфаров Р.К.** Прекурсорная самоорганизация при СВЧ вакуумно-плазменном осаждении субмонослойных углеродных покрытий на кристаллах кремния (100) / Р.К. Яфаров // *ФТП.* 2015. Т. 49. Вып. 3. С. 29-335.
5. **Betsui K.** Fabrication and characteristics of Si Field Emitter Arrays: Fourth Int. / K. Betsui // *Vacuum Microelectronics Conf. Nagahama, Japan, Technical Digest.* 1991. P. 26-29.
6. Матричный автоэлектронный катод и электронный прибор для оптического отображения информации / Е.И. Гиваргизов,

В.В. Жирнов, А.Н. Степанова, Л.Н. Обеленская. Патент RU № 2074444.

7. Structures and Field Emission Characteristics of Ion Irradiated Silicon Nanowire Arrays / Fei Zhao, Jian-hua Deng, Dan-dan Zhao, Ke-fan Chen, Guo-an Cheng, and Rui-ting Zheng // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2010. P. 1-5.

8. **Ивановский Г.Ф.** Ионно-плазменная обработка материалов / Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.

9. Введение в физику поверхности / К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин и др. М.: Наука, 2006. 490 с.

10. **Зи С.** Технология СБИС / С. Зи. М.: Мир, 1985.

11. Структурирование поверхности монокристаллического кремния после вакуумно-плазменного травления через островковую углеродную пленку / Р.К. Яфаров, Д.В. Нефедов, В.Я. Шаныгин, С.Ю. Суздальцев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международ. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2016. Т. 2. С. 469-472.

Гуляев Юрий Васильевич – доктор физико-математических наук, академик РАН, научный руководитель Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Яфаров Равиль Кяшшафович – доктор технических наук, заведующий лабораторией «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Суздальцев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Шаныгин Виталий Яковлевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории «Субмикронная электронно-ионная технология» Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Yuri V. Gulyaev – Dr.Sc., Professor, Academician of RAS, Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS

Ravil K. Yafarov – Dr.Sc., head of laboratory «Submicrometer electron-ion technology», Saratov branch of Institute of Radioengineering and electronics them. V.A. Kotelnikov of RAS

Sergey Yu. Suzdaltsev – PhD, senior researcher of the laboratory «Submicrometer electron-ion technology» Saratov branch of Institute of Radioengineering and electronics them. V.A. Kotelnikov of RAS

Vitaliy Ya. Shanygin – PhD, senior researcher of the laboratory «Submicrometer electron-ion technology» Saratov branch of Institute of Radioengineering and electronics them. V.A. Kotelnikov of RAS

Статья поступила в редакцию 11.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

СОВРЕМЕННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ**С.Г. Калганова****THE POTENTIAL OF MODERN ELECTROMETALLURGY****S.G. Kalganova**

Рассмотрены основные концепции развития современных электрометаллургических мини-заводов, основные направления энергетической оптимизации электроплавки стали.

Ключевые слова: *мини-завод, дуговая сталеплавильная печь, электроплавка, энергетическая эффективность*

В современном мире насчитывается свыше 1000 металлургических мини-заводов, специализирующихся преимущественно на производстве металлопродукции неполного цикла. Россия в этом вопросе находится в числе стран, которые отстают по уровню развития мини-заводов. Главным образом подобное положение сложилось исторически: для плановой экономики СССР было выгодно создавать масштабные производства, и вся металлургия строилась на производствах замкнутого цикла, включая коксовое производство и фабрики по обогащению железорудного сырья (рис. 1). За все постсоветские годы на всем социалистическом пространстве было построено лишь два завода неполного цикла производства: Молдавский и Белорусский металлургические комбинаты. В последние годы в российской металлургии наблюдается рост производства проката в сегменте металлургических мини-заводов (рис. 2). Размещая их вблизи рынков сбыта, металлурги тем самым снижают логистические затраты и становятся более мобильными для работы на перспективных рынках сбыта [1].

В концепцию создания мини-заводов заложены следующие основные принципы [2]:

1. Оптимизация технологических процессов и использование современных технологий выплавки, разливки и прокатки.

Describes the main concepts of the development of modern EAF mini-mills, the main directions of energy optimization of electric smelting of steel.

Keywords: *mini plant, electric arc furnace, electrofusion, energy efficiency*

2. Сокращение до минимума энергозатрат при производстве металлопродукции. Основные пути – создание литейно-прокатных модулей (ЛПМ), оптимизация транспортной логистики, использование при возможности вторичных источников энергии, оптимизация производственной программы.

3. Высокая степень автоматизации и механизации технологического процесса.

4. Возможность быстрого перехода на выпуск иного профильного и марочного сортамента металлопроката, что обеспечит производство малотоннажных партий продукции. Указанный принцип должен быть реализован при создании (конструировании) оборудования и разработке современных схем его эксплуатации.

5. Минимизация количества основного производственного и вспомогательного персонала путем совмещения профессий и внедрением аутсорсинга, то есть передачи ряда производственных либо обслуживающих функций другой компании, специализирующейся в данной сфере.

6. Реализация комплекса мероприятий по энерго- и ресурсосбережению, утилизации вторичной теплоты, что предусматривается при создании оборудования и проектировании производства.

7. Обеспечение экологической безопасности создаваемых производств за счет внедре-

ния современных технологий очистки пыле-газовых выбросов, применения замкнутых систем оборотного водоснабжения с систе-

мами водоочистки, технологий утилизации промышленных отходов с их максимально возможным возвратом в производство.

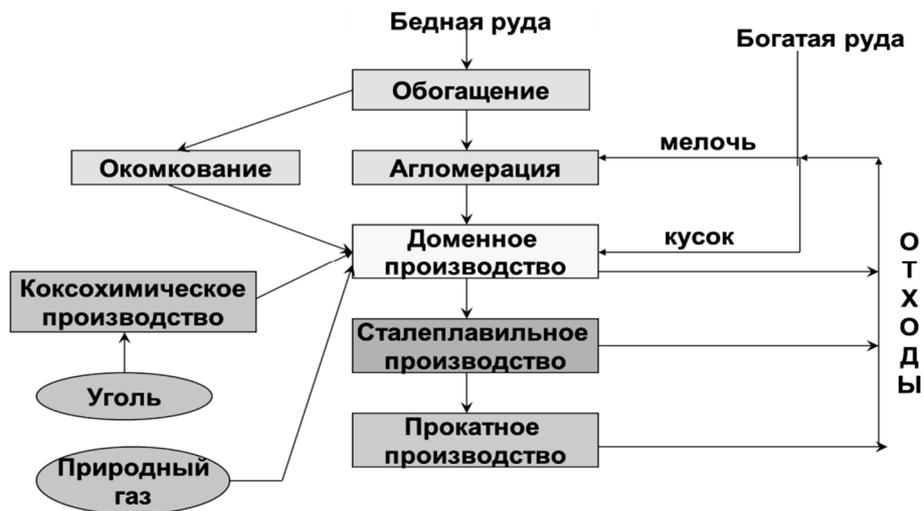


Рис. 1. Схема интегрированного (с полным металлургическим циклом) металлургического завода

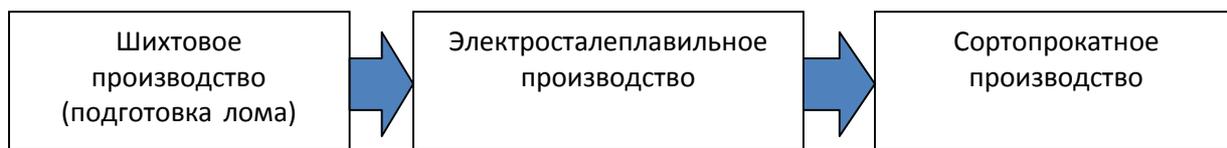


Рис. 2. Схема металлургического мини-завода

Все вышеперечисленные принципы были реализованы при строительстве металлургического мини-завода в Саратовской области компанией «Северсталь».

Сегодня ЗАО «Северсталь-Сортовой завод Балаково» представляет современное, высокотехнологичное, экологически безопасное мини-металлургическое производство металлопродукции с оптимальной себестоимостью и минимальными сроками окупаемости строительства.

Структура технологической линии по неполному металлургическому циклу включает (рис. 3):

- процесс выплавки стали в дуговых электропечах различной мощности, работающих на металлическом ломе, металлизированных окатышах либо в их сочетании;

- процесс доводки жидкой стали до заданного химического состава и температуры в установке ковш-печь;

- процесс разлива стали на машине непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) различных типов, как правило, радиальных;

- прокатка осуществляется на различных типах станов (непрерывных, полунепрерывных, линейных). При проектировании и строительстве мини-заводов используют различные схемы совмещения непрерывной разливки заготовок на МНЛЗ с прокатным станом. Наиболее перспективно осуществление прямого совмещения разливки и прокатки путем создания ЛПМ, что является основополагающей идеей при разработке принципиальной схемы мини-завода, то есть создание полностью непрерывного процесса, начиная от выплавки и разливки стали до получения готовой продукции. Такая схема дает возможность значительно сократить потери теплоты, максимально автоматизировать процесс, исключить склад непрерывнолитых заготовок, снизить затраты на подогрев заготовки, стабилизировать процесс прокатки.

Мировой индекс цен на электроэнергию и топливо по сравнению с другими промышленными ресурсами увеличивается намного быстрее, поэтому в современных

условиях энергетическая экономичность промышленных процессов, в том числе и при выплавке стали, относится к важнейшим показателям производства. Анализ уровня и структуры энергозатрат на полу-

чение стали позволяет наметить перспективные энергосберегающие технологические схемы и пути снижения энергоемкости металлопродукции.

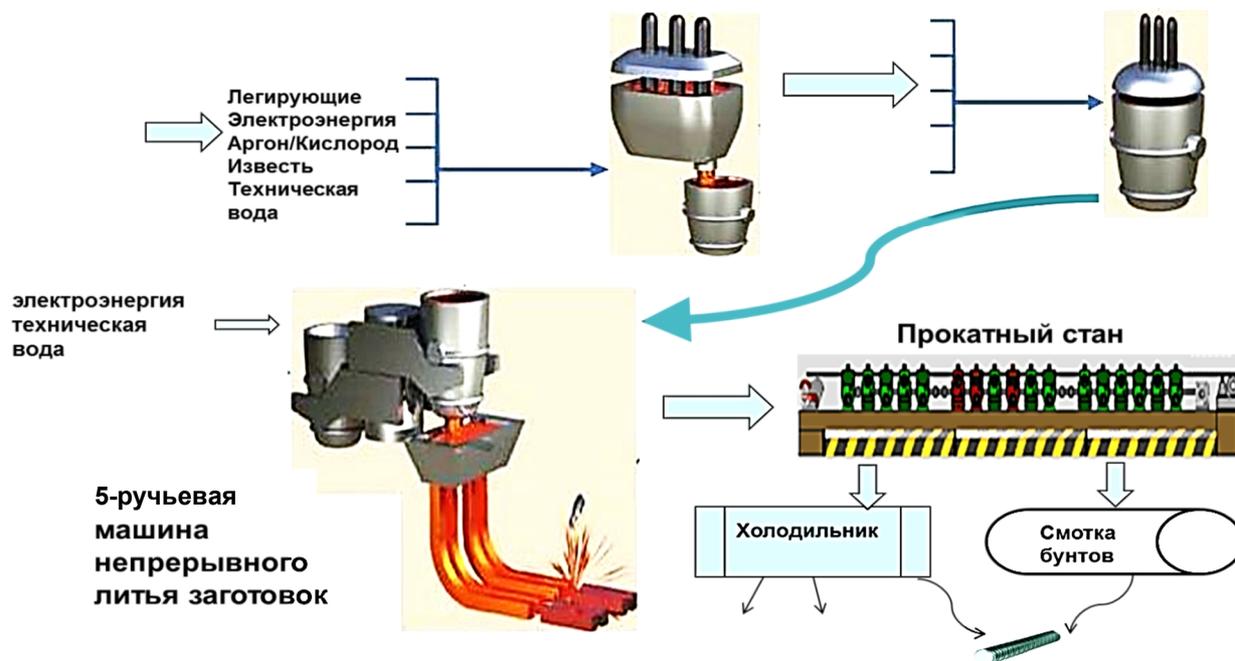


Рис. 3. Схема технологического процесса мини-завода по неполному металлургическому циклу

Анализ показывает, что электросталеплавильный процесс при 100 % лома в шихте является наиболее эффективным по энергозатратам. Важнейшим резервом снижения энергоемкости стали является, кроме повышения доли лома в шихте, экономия топлива и энергии при получении стали. Энергетические балансы обычных электродуговых печей показывают, что примерно 20 % введенной энергии содержится в потоке отходящих газов [3].

Одним из основных направлений энергетической оптимизации электроплавки является наиболее полное использование теплоты отходящих газов для предварительного высокотемпературного нагрева лома.

Количество энергии, вводимой с топливом, при широком использовании на современных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) топливно-кислородных горелок (ТКГ), обычно не превышает 50-70 кВт·ч/т, что сокращает расход электроэнергии на 35-50 кВт·ч/т.

За рубежом теплота отходящих газов ДСП используют для нагрева лома в загрузочных бадах. Однако из-за ограниченной стойкости бадей среднемассовая температура подогрева лома обычно составляет 300-350°C. Такой подогрев обеспечивает снижение расхода электроэнергии на 25-35 кВт·ч/т.

Совместное использование ТКГ и подогрева лома в бадах позволило уменьшить расход электроэнергии до 400-430 кВт·ч/т, а расход первичного топлива, рассчитанного только по энергоносителям, до 1700-1800 кВт·ч/т. Дальнейшее сокращение этих расходов требует значительного увеличения количества топлива, используемого взамен электроэнергии, и перехода к высокотемпературному подогреву отходящими газами всей массы лома.

Предварительный подогрев лома до среднемассовой температуры 1000°C впервые реализован в агрегате ББК-Бруса, в котором объединены ДСП и расположенная над ней вращающаяся трубчатая печь. По-

догрев фрагментированного лома в печи осуществляется в противотоке отходящими газами и ТКГ. При дополнительном расходе природного газа на ТКГ около 30 м³/т (280 кВт·ч/т) расход электроэнергии снизился на 220 кВт·ч/т.

В последние годы в США осваивается так называемый Констил-процесс, в котором используется подогреватель конвейерного типа. Из-за ограниченной стойкости конвейера температура подогрева лома не превышает 600-750°C. Расход электроэнергии без использования ТКГ снизился до 320-340 кВт·ч/т.

Однако такие подогреватели лома дороги, требуют для своего размещения больше площади и не обладают необходимой стойкостью. В связи с этим трубчатые и конвейерные печи для подогрева лома не получили распространения. Более перспективной представляется ДСП с шахтными подогревателями лома конструкции фирмы «ФУКС Системтехник» [4]. Шахтный подогреватель устанавливается на своде печи и является продолжением рабочего пространства. Большая часть лома загружается непосредственно в печь, а остальная – в подогреватель. Технологические газы удаляются из печи через шахтный подогреватель. По мере нагрева лом сходит из шахты в рабочее пространство. Печь оборудована ТКГ и манипулятором для вдувания угля. В последних конструкциях подогреватель имеет в нижней части водоохлаждаемые поворотные пальцы, что позволяет подогревать всю массу шихты. Применение шахтного подогревателя лома и применение ТКГ обеспечивают снижение энергоемкости стали по сравнению с обычной ДСП на 30-40%.

У первого поколения ДСП, использующих подогрев лома, канал прямого газоотвода был увеличен до размеров шахты и интегрирован в рабочее пространство печи. Шахта жестко соединена со сводом, которые совместно открываются для завалки первой круглой корзины. Последующие корзины имеют многогранную геометрию, сходную с геометрией шахты, и завалка и подогрев производятся через шахту. Все количество лома одной плавки загружается до начала

плавки, однако только приблизительно 60% завалки лома (шахтные корзины) подогревается отходящими газами в противотоке. Для выпуска стали свод и шахта поднимаются совместно, однако наклоняется только кожух печи. По вышеописанному принципу работают электродуговые одношахтные печи CO-Steel Sheerness (Ширнис, Англия), EGE Metal (Алиага, Турция), Zhangjiagang Sheen Faith Steel (Шаньганг, КНР); North Star Steel (Кингмэн, Аризона, США).

Фирма «ФУКС Системтехник» разработала способ почти полной повторной утилизации теплоты с помощью шахтной печи с удерживающими пальцами (рис. 4).

Если у вышеописанного поколения шахтных печей шахта на стадии рафинирования не заполнена и отходящий газ покидает в это время шахтную печь неиспользованным, то у нового типа шахтных печей с удерживающими пальцами этот недостаток устранен.

По такому принципу были выполнены одношахтные печи с системой удерживающих пальцев Hylsa (Монтеррей, Мексика), Cockerill Sambre (Шарльруа, Бельгия), Stahl und Walywerke Gerlafingen SWG (Герлафинген, Швейцария), NatSteel (Сингапур).

На ЗАО «Северсталь-Сортовой завод Балаково» в электросталеплавильном производстве используется электродуговая печь переменного тока шахтного типа с удерживающими пальцами емкостью 150 т с трансформатором 85 МВА фирмы «ФУКС Системтехник». Технические характеристики приведены в табл. 1.

У шахтной печи с удерживающими пальцами все количество лома подогревается двумя партиями. Первая корзина подогревается на удерживающих пальцах уже на стадии расплавления, поэтому она может загружаться непосредственно после заделки летки и фиксации печи в горизонтальном положении. Вторая корзина загружается непосредственно вслед за этим, то есть еще до подачи электрической энергии, через шахту на первую подогретую корзину. Подогрев лома способствует вводу электрической энергии через электроды, поэтому уже после первой дуги можно работать с требуемым высоким напряжением.

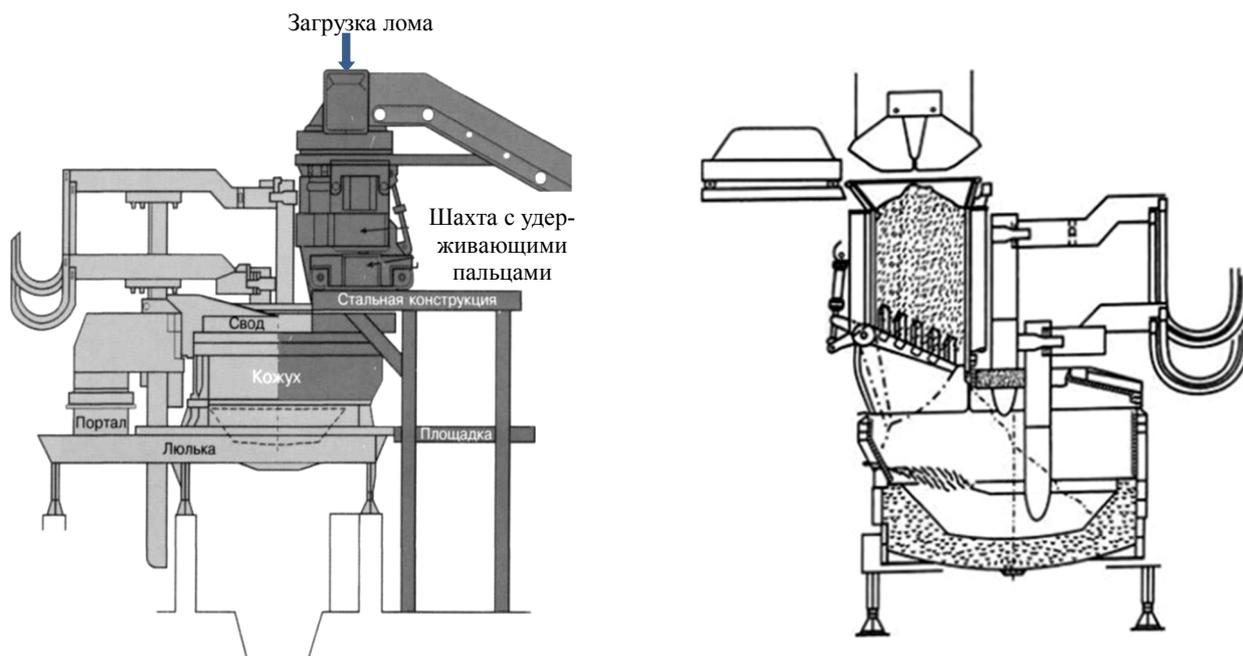


Рис. 4. Схема электродуговой шахтной печи с удерживающими пальцами

Таблица 1

Технические характеристики электродуговой печи ЗАО «Северсталь-Сортовой завод Балаково»

Технические характеристики	Значения
Тоннаж печи (по жидкой стали)	150 т
Масса плавки	120-125 т
Жидкий остаток (болото)	25-30 т
Трансформатор:	
Кажущаяся мощность трансформатора (ABB)	85/100 МВА
Активная мощность: (плавка средняя)	66 МВт
Рафинирование	55 МВт
Ступени напряжения:	
Плавка	1040 В
Рафинирование	920 В
Диаметр электродов	610 мм
Кислородно-газовые горелки	6 шт.

После установления удельного расхода электроэнергии 180 кВт·ч/т садки лом в печи опускается настолько, что удерживающие пальцы могут закрываться и первая корзина следующей плавки может загружаться через шахту. На время загрузки электроды поднимаются, и печь вследствие открытия колпака шахты отделяется от первичного газоотвода.

Время между подогревом и загрузкой первой подогретой корзины посредством

размыкания удерживающих пальцев составляет приблизительно 18 минут (из них 11 минут составляет работа под напряжением). Металлический лом подогревается до температуры 700-800 °С.

Вышеприведенные данные по времени и расходу зависят от качества лома. Если качество первого слоя лома на удерживающих пальцах получается слишком легким, а время подогрева первой корзины вследствие непредусмотренных помех или про-

стоев превышает 30 минут, то возникает опасность, что удерживающие пальцы спекутся с частично расплавленным ломом. На этот недостаток дуговых печей с удерживающими пальцами указывают некоторые авторы [5], доказывая неэффективность работы ДСП таких конструкций.

Однако существует противоположное мнение специалистов [6], имеющих продолжительный опыт практического использования ДСП с удерживающими пальцами. Например, в ПАО «Северсталь» первая ДСП такой конструкции эксплуатируется с 2005 г. Данные печи являются достаточно высокопроизводительными – цикл плавки составляет 50 мин с годовым объемом производства 1,1 млн т одной печью. При этом расход электроэнергии достигает 270 кВт·ч/т. Проблем с механизмом открытия и закрытия пальцев в результате приваривания лома нет. Единственный недостаток, который отмечается в работе [4], – требование к лому, который должен иметь определенный габарит и массу, что связано с возможностью пробоя водоохлаждаемых элементов шахты и пальцев.

Эффективность подогрева лома ограничена переходом теплоты от отходящих газов к лому. Очевидно, что крупногабаритные куски лома нагреваются медленнее, тогда как мелкий скрап даже при коротком времени подогрева в шахте может расплавиться и привариться к пальцам. Опытным

путем установлено, что хорошие результаты работы шахтных печей достигаются смесью разных видов скрапа плотностью 0,7-1,3 т/м³.

На конкурентоспособность процессов производства стали значительное влияние оказывает эффективность использования энергии [5]. При сравнении энергетической эффективности $\mathcal{E}_{эф}$ различных сталеплавильных переделов наиболее объективным и наглядным показателем можно считать отношение энтальпии продуктов плавки (жидкой стали и шлака) к затратам первичной энергии на выплавку стали. Эти затраты первичной энергии включают тепловую энергию, использованную как в собственно сталеплавильном производстве, так и на всех предшествующих этапах получения материалов, применяемых при выплавке, в том числе энергоносители (топливо, электроэнергия), а также затраты энергии на добычу сырья, его транспортировку, подготовку производства.

Минимальная энергетическая эффективность характерна для процессов с высокой долей чугуна в шихте (конверторный, мартеновский). При выплавке стали в ДСП, работающей на 100% лома, $\mathcal{E}_{эф}$ в 1,7-2,3 раза выше и приближается к сквозному коэффициенту полезного использования первичного топлива при работе по схеме ТЭЦ – ДСП, составляющему 20-30 % (табл. 2).

Таблица 2

Энергетическая эффективность способов производства стали

Процесс, агрегат	Доля лома в шихте, %	$\mathcal{E}_{эф}$, %
Конвертерный	25-30	7,4
Мартеновский:		
скрап-рудный	40-50	8,7
скрап-процесс	65	9,7
Электросталеплавильный:		
ДСП	100	17
ДСП с шахтным подогревом лома («ФУКС-Системтехник»)	100	23
Топливоно-дуговой сталеплавильный агрегат	100	27

Из табл. 2 видно, что в электросталеплавильном процессе имеются большие возможности для повышения $\mathcal{E}_{эф}$. Так, эффек-

тивный подогрев лома теплотой отходящих газов позволил при выплавке стали в шахтных печах конструкции «ФУКС Систем-

техник» не только повысить $\Delta_{эф}$, но и сократить долю электроэнергии в общем приходе теплоты с 60 до 51 %. Снижение затрат первичной энергии по сравнению с обычными печами в 1,5-1,6 раза может быть достигнуто двухстадийным процессом в топливно-дуговом сталеплавильном агрегате (ТДСА) конструкции НИИМ [6]. Экономия энергии обеспечивается также донная продувка жидкого металла в ДСП, сокращение продолжительности плавки и другие мероприятия.

В шахтной печи конструкции «ФУКС Системтехник» также учитывается накопленный опыт комбинированного использования в ДСП электроэнергии, газообразного и твердого топлива. Шахтная печь оборудована двумя водоохлаждаемыми кислородными фурмами. Манипулятор, работающий через рабочее окно, находится справа возле дверцы для скачивания шлака на рабочей площадке, а вторая фурма опускается в расплав через отверстие в своде. Кислород и уголь вдуваются через фурмы в плавку. Необходимое количество кислорода (разделено на расход во время расплавления и во время рафинирования) рассчитывается на основе баланса материалов и необходимого содержания углерода в плавке. Вдуваемые количества углерода задаются и учитываются в балансе энергии. Кислород выходит со сверхзвуковой скоростью под определенным углом из двух сопел Лавалея ($2 \times 2000 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{ч}$) на головке фурмы. Угольный порошок с помощью пневмотранспорта подается через интегрированную в фурму трубку в шлак. Вторая водоохлаждаемая фурма, подаваемая через свод, непосредственно установлена на портале на третьей фазе и перемещается как несущий рукав. Объем потока кислорода рассчитан в $2000 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{ч}$.

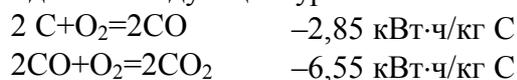
Процесс плавки поддерживается с помощью шести водоохлаждаемых газокислородных горелок, из которых четыре встроены в боковую стенку ниже шахты и по одной соответственно возле дверцы для скачивания шлака и возле летки. Горелки встроены в специальные медные панели (высокоскоростные панели), которые охлаждаются

водой, подаваемой с высокой скоростью. Вода для горелок и высокоскоростных панелей отводится от охлаждения кожуха.

Шахта оборудована водоохлаждаемыми пальцами для приема лома для подогрева. Система состоит из ряда 14 пальцев, установленных в нижней части шахты. Пальцы снабжены демпфирующими элементами, чтобы амортизировать толчки при завалке лома на закрытые пальцы. Все удерживающие пальцы раскрываются и закрываются через систему рычагов и совместный вал с помощью двух гидравлических цилиндров.

Вся система рычагов удерживающих пальцев размещена в корпусе и охлаждается с помощью двух вентиляторов с общим объемом потока $25000 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{ч}$. Воздушные потоки вентиляторов через зазоры отверстий пальцев одновременно участвуют в процессе в качестве воздуха для дожигания.

В ДСП в процессе плавки при окислении сопутствующего элемента углерода образуется CO, который выходит из процесса с отходящими газами. Реакции происходят по следующим уравнениям:



Дожигание CO с помощью кислорода в CO₂ дает при этом значительную долю энергии, которая используется для подогрева лома в шахте.

Таким образом, процесс расплавления шихты в ДСП с комбинированным подводом теплоты интенсифицируется эффективным подогревом лома теплотой отходящих газов, применением топливно-кислородных горелок и продувкой металла кислородом. После полного расплавления шихты металл доводят до заданного химического состава, необходимой температуры и выпускают из печи.

В настоящее время доля электростали в мировом производстве составляет 33-35%. Приведенные данные не позволяют согласиться с мнением о расточительном использовании энергии в электрометаллургии, а также об отсутствии серьезных перспектив на будущее у электрометаллургических процессов получения стали и ферросплавов. Следует также учитывать, что

доля стали, выплавленная тем или иным способом, определяется не только энергетикой, но и другими факторами, в числе ко-

торых производительность агрегатов, содержание примесей в готовом металле, баланс лома в стране и мире и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные электрометаллургические мини-заводы – основа обеспечения регионов качественной металлопродукцией // Федеральный деловой журнал «Бизнес & класс». 2016. № 31.

2. **Металлургические мини-заводы** / А.Н. Смирнов В.М. Сафонов, Л.В. Дорохова, А.Ю. Цупрун. Донецк: Норд-Пресс, 2005. 469 с.

3. **Журавлев А.А.** Расчеты материальных и энергетических балансов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах / А.А. Журавлев, В.Ф. Мысик, А.В. Жданов. Екатеринбург: Из-во Урал. ун-та, 2016. 123 с.

4. Опыт работы шахтной печи в электросталеплавильном производстве ОАО

«Северсталь» / А.В. Зиборов, Б.Я. Балдаев, Е.А. Маслов и др. // Труды 8-го конгресса сталеплавильщиков, 2005. С. 256-257.

5. Дуговые сталеплавильные печи: состояние, проблемы / А.Г. Кузьменко, Ю.Ф. Фролов, М.А. Поздняков и др. // *Электрометаллургия*. 2011. № 3. С. 2-6.

6. Письмо в редакцию по поводу статьи Кузьменко А.Г. «Дуговые сталеплавильные печи: состояние, проблемы» / Ю.Ф. Фролов и др. // *Электрометаллургия*. 2011. № 9. С. 45.

7. **Копцев Л.А.** Управление энергетической эффективностью электросталеплавильного цеха / Л.А. Копцев, Ю.П. Журавлев // *Вестник ЮУрГУ*. 2008. № 17. С. 13-20.

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana G. Kalganova – Dr.Sc., Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

УДК 621.314

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА ДВУХСЕКЦИОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ

А.И. Данилушкин, В.А. Данилушкин, И.В. Васильев

OPTIMIZATION OF TWO-SECTION STATIONARY MODE OF INDUCTION HEATERS

A.I. Danilushkin, V.A. Danilushkin, I.V. Vasilyev

Приведены результаты исследования процесса нагрева ферромагнитных заготовок под пластическую деформацию в двух-

The article presents the results of a study of the process of heating of ferromagnetic workpieces by plastic deformation in the two-

секционном индукционном нагревателе методического действия. Рассмотрены вопросы моделирования взаимосвязанных электромагнитных и температурных полей и методика их расчета в установившемся режиме при дискретно-непрерывном перемещении заготовок через нагреватель. Предложена инженерная методика расчета конструктивных и режимных параметров двухчастотной индукционной нагревательной установки, учитывающая специфические особенности пространственного распределения внутренних источников теплоты и неравномерность температурного распределения в загрузке в процессе нагрева до температуры пластической деформации.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическая модель, источники теплоты, температурное распределение, управление, энергоэффективность

Для нагрева ферромагнитных цилиндрических заготовок в технологических линиях обработки на деформирующем оборудовании применяются высокопроизводительные индукционные нагревательные установки методического действия [1, 2]. При этом частота источника питания выбирается исходя из параметров горячего режима, то есть когда металл теряет магнитные свойства, и составляет в зависимости от диаметра заготовок 500-10000 Гц. Нагрев ферромагнитных заготовок в односекционном индукторе до температур пластической деформации приводит к существенно неравномерному распределению внутренних источников теплоты по длине нагревателя, что значительно усложняет регулирование электрических и тепловых параметров [3, 4]. Наибольшее влияние указанная специфика имеет в нестационарных режимах работы, связанных с процессами выхода на установившийся режим при первоначальном запуске нагревателя или после кратковременных остановок [4, 5]. В том и другом случае выход на установившийся режим неизбежно приводит к потере

section induction heater methodical action. The questions of modeling of interconnected electromagnetic and temperature fields and methods of their calculation in steady state at discrete-continuous movement of billets through the heater. A method of calculating the engineering design and operational parameters of the two-frequency induction heating system, which takes into account the specific features of the spatial distribution of internal heat sources and uneven temperature distribution in the load in the process of heating up the plastic deformation temperature.

Keywords: induction heating, a mathematical model, heat sources, temperature distribution, management, energy efficiency

определенной части недогретых заготовок и непроизводительным затратам энергии на их нагрев. Таким образом, при проектировании индукционных нагревателей рассматриваемого класса задача сводится к выбору таких конструктивных и режимных параметров нагревателя, которые обеспечивают минимальные общие затраты и простую реализацию систем управления электрическим и тепловым режимами.

Исследуемый объект включает две автономные секции, подключенные к независимым источникам питания (рис. 1). В каждой секции находится одновременно несколько заготовок, перемещающихся дискретно. Темп выдачи и мощность секций рассчитаны таким образом, чтобы находящаяся на выходе заготовка к моменту выдачи для дальнейшей обработки нагрелась до температуры, соответствующей потере магнитных свойств. Вторая секция, в которой заготовки нагреваются до температуры пластической деформации, подключена ко второму независимому источнику питания повышенной частоты.

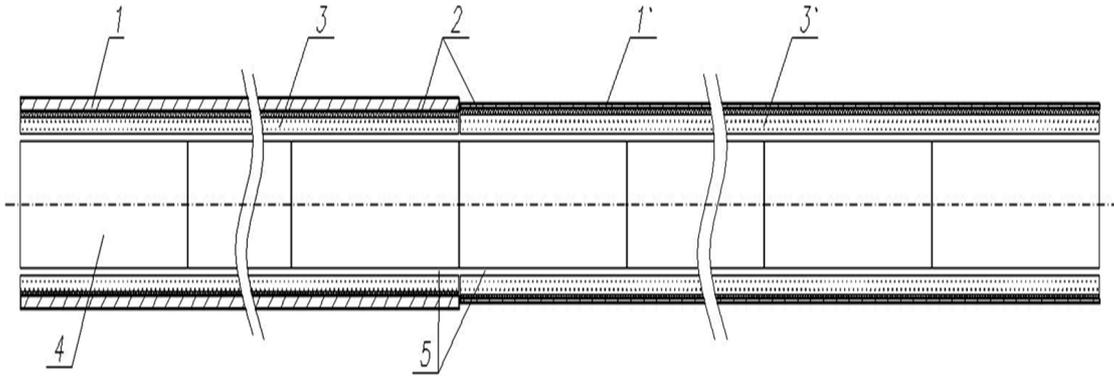


Рис. 1. Эскиз индукционного нагревателя: 1, 1* – катушки индуктора; 2 – футеровка нагревателя; 3, 3* – электрическая изоляция; 4 – заготовки, 5 – направляющие

Особенностью расчёта параметров индукционных нагревателей является сложный характер взаимосвязанных электро- и теплофизических процессов, ярко выраженная неравномерность пространственного распределения внутренних источников теплоты, индуцируемых электромагнитным полем индуктора, зависимость мощности внутреннего тепловыделения от температуры нагреваемых заготовок. В связи с этим для разработки методики расчета двухчастотной индукционной системы, оптимизации конструктивных и режимных парамет-

ров необходимо иметь соответствующую математическую модель, адекватно описывающую процесс нагрева с учетом влияния на параметры нагревателя нелинейной зависимости магнитной проницаемости, удельного сопротивления, удельной теплоемкости от температуры в процессе нагрева. Температурное поле $T_n(r, x, t)$ цилиндрической заготовки при нагреве ее внутренними источниками теплоты в секциях индуктора описывается уравнением теплопроводности вида [6]:

$$\frac{\partial T_n(r, x, t)}{\partial t} = a(T) \left[\frac{\partial^2 T_n(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_n(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{W_n(r, x, \xi(T), t)}{c\gamma},$$

$$0 < r < R, \quad 0 \leq x \leq L \quad t > 0, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где R – радиус цилиндра; L – длина заготовки; N – число заготовок в секции индуктора; $W_n(r, x, \xi(T), t)$ – функция распределения внутренних источников теплоты; $\xi(T)$ – глубина проникновения тока.

Тепловые потери в процессе нагрева учитываются граничными условиями на боковой поверхности заготовки

$$\frac{\partial T_n(R, x, t)}{\partial t} = \alpha_n(T) (T_n(R, x, t) - T_c), \quad (2)$$

где $\alpha_n(T)$ – коэффициент теплообмена между средой и поверхностью n -й заготовки; T_c – температура среды.

Тепловые потери с торца заготовки определяются разностью температур граничащих слева и справа заготовок, причем с левого торца заготовки имеет место отток теплоты

$$\frac{\partial T_n(r, 0, t)}{\partial t} = \alpha_{1n}(T) (T_n(r, t) - T_{n-1}(r, 0, t)), \quad (3)$$

а с правого торца – приток теплоты от более нагретой заготовки

$$\frac{\partial T_n(r, L, t)}{\partial t} = -\alpha_{1n}(T) (T_{n+1}(r, t) - T_n(r, L, t)) \quad (4)$$

при выполнении условия симметричного нагрева

$$\frac{\partial T_n(0, x, t)}{\partial r} = 0, \quad t \geq 0. \quad (5)$$

Начальное распределение температуры по объему цилиндра на входе в первую секцию принимается равномерным, равным температуре окружающей среды.

При индукционном нагреве ферромагнитных заготовок внутренние источники

теплоты $W_n(r, x, \xi(T), t)$ зависят от температуры и эта зависимость существенно нелинейна [7, 8]. Достаточно точно эти зависимости могут быть получены только численными методами.

Основным видом нелинейной среды являются ферромагнитные участки магнитной цепи, для которых связь между индукцией B и напряженностью H магнитного поля выражается зависимостью [2]

$$B = B(H) = \mu(H)H. \quad (6)$$

Задача расчета внутренних источников теплоты формулируется на основе уравнений Максвелла для векторного магнитного потенциала A ($B = \text{rot } A$) и скалярного электрического потенциала U ($E = -\text{grad } U$), E – вектор напряженности электрического поля):

$$\text{rot}(\mu^{-1} \cdot \text{rot} A) = J + \text{rot} H, \quad (7)$$

$$J = g \cdot \text{grad} U - g \cdot \partial A / \partial t, \quad (8)$$

где μ^{-1} – тензор, обратный тензору магнитной проницаемости; g – электропроводимость.

В соответствии с уравнением (8) полный ток в проводнике может рассматриваться как сумма стороннего тока, вызванного приложенным извне напряжением, и вихревого тока, индуцированного переменным магнитным полем

$$J_{\text{стор.}} + J_{\text{вихр.}} \quad (9)$$

где $J_{\text{стор.}} = -g \cdot \text{grad} U$, $J_{\text{вихр.}} = -g \cdot \partial A / \partial t$.

Численный расчёт электромагнитных полей проводился с помощью программного комплекса Elcut [9]. Расчёт проводился в два этапа. На первом этапе электромагнитная задача решалась как задача нестационарного магнитного поля, которая позволяет рассчитывать поле, индуцированное токами произвольной формы, и анализировать переходные процессы.

В исследуемой двухсекционной индукционной нагревательной установке процесс моделирования происходит поэтапно. В начале производится расчет температурных полей в каждой заготовке первой секции нагревателя, питающая частота которого

равна промышленной частоте. При расчете свойства металла цилиндрической загрузки (удельная проводимость, теплоемкость, теплопроводность) задаются в соответствии с изменяющейся на каждом интервале постоянства температурой. По окончании итерационной процедуры расчета электротепловых полей для первой секции нагревателя моделируется процесс нагрева во второй секции нагревателя, причем в качестве начального температурного распределения при решении тепловой задачи принимается температурное распределение заготовки на выходе из первой секции нагревателя.

Алгоритм расчета электромагнитных и тепловых полей положен в основу методики оптимального проектирования параметров двухсекционного индукционного нагревателя дискретно-непрерывного действия.

Задача оптимального проектирования конструктивных и режимных параметров системы индукционного нагрева формулируется следующим образом.

Для объекта, описываемого уравнениями (1)-(5), необходимо найти такие значения параметров основных конструктивных и режимных характеристик системы индукционного нагрева, которые при ее последующем функционировании в оптимальном режиме обеспечивают достижение экстремального значения выходных критериев эффективности в условиях заданных энергетических и технологических ограничений и требований к конечному температурному состоянию объекта нагрева [10]. Данная формулировка приводит к необходимости многократного решения поисковых задач для электромагнитных и тепловых процессов.

Таким образом, достижение оптимума решения обеспечивается применением интегрированного проектирования конструктивных и режимных параметров системы индукционного нагрева.

В работе рассматривается частная задача минимизации общей длины индукционного нагревателя, обеспечивающего на выходе из нагревателя заданное конечное температурное состояние заготовки

$$T(r, x, t) = T_{\text{зад}}(r, x, t_{\text{кон}}) \quad (10)$$

при наличии энергетических и технологических ограничений:

– удельная поверхностная мощность первой секции индуктора

$$0 \leq p_1 \leq p_{1\max}, \text{ кВт/м}^2, \quad (11)$$

– удельная поверхностная мощность второй секции индуктора

$$0 \leq p_2 \leq p_{2\max}, \text{ кВт/м}^2, \quad (12)$$

– максимальный перепад температур по сечению заготовки в период нагрева в области упругих деформаций (на первой стадии нагрева)

$$T(R, x, t) - T(0, x, t) \leq \Delta T_1,$$

– максимальная температура наиболее нагретой точки по объему заготовки

$$T(r, x, t) \leq T_{\max}, \quad (13)$$

– перепад температур между наиболее нагретой точкой и центром заготовки на выходе из нагревателя

$$T_{\max}(r, x, t) - T(0, x, t_{\text{кон}}) \leq \Delta T_{\text{дон}}. \quad (14)$$

Темп перемещения заготовок через нагреватель и время нагрева определяются темпом работы деформирующего оборудования.

В качестве начального условия рассматривается температурное распределение заготовки на входе в первую секцию нагревателя

$$T(r, x, t) = T(r, x, 0) = T_0(r, x). \quad (15)$$

Варьируемые параметры:

– удельная мощность нагрева по длине первой секции нагревателя

$$0 \leq p_1(x) \leq p_{1\max}, \text{ кВт/м}^2, \quad (16)$$

– удельная мощность нагрева по длине второй секции нагревателя

$$0 \leq p_2(x) \leq p_{2\max}, \text{ кВт/м}^2, \quad (17)$$

– частота питающего напряжения.

Для реализации методики оптимального проектирования индукционного нагревателя разработан алгоритм последовательного решения задачи оптимизации с улучшением

требуемых показателей на каждой итерации. При оптимизации общей длины нагревателя используется итерационная модель процесса двухчастотного индукционного нагрева ферромагнитных заготовок. В процессе поиска оптимума на каждой итерации происходит пересчет электромагнитной задачи, уточняющий параметры электромагнитного поля вследствие изменения температуры в конце каждого интервала дискретности. Процесс заканчивается, если полученное температурное распределение и оптимизируемые параметры оказываются близкими к их значениям на предыдущем этапе.

По достижении результатов, отвечающих технологическим условиям нагрева, проводится расчет интегральных параметров двухсекционного нагревателя.

На основе предложенной методики рассмотрена задача оптимального распределения мощности по длине двухчастотного индуктора для нагрева ферромагнитной цилиндрической заготовки диаметром 180 мм и длиной 350 мм до температуры пластической деформации. В первой секции находятся три заготовки, во второй секции – пять заготовок. Таким образом, общая длина нагревателя составляет 2,8 м. Темп выдачи нагретых до заданной температуры заготовок определяется производительностью деформирующего оборудования и составляет 140 с. Уровень мощности для каждой последующей позиции рассчитывается исходя из условия обеспечения технологического ограничения на температуру по объему заготовки в процессе нагрева, то есть сводится к выполнению условия

$$T_{\max}(r_{\max}, x_{\max}, t) \leq T_{\text{дон}},$$

где r_{\max} , x_{\max} – координаты точки с максимальной температурой, изменяющиеся в процессе нагрева в зависимости от времени нагрева и позиции заготовки в индукторе. Показано, что оптимальное распределение мощности по длине нагревателя представляет собой кусочно-непрерывную функцию.

На рис. 2 приведены графики распределения температуры по сечению заготовки в процессе нагрева на последней позиции в нагревателе с параметрами, рассчитанными

по предложенной методике. Нижняя кривая распределения температуры по сечению – температурное распределение через 20 с после начала нагрева на последней позиции, верхняя кривая соответствует окончанию процесса нагрева. Как следует из полученных результатов, максимум температуры находится в некоторой внутренней точке сечения заготовки.

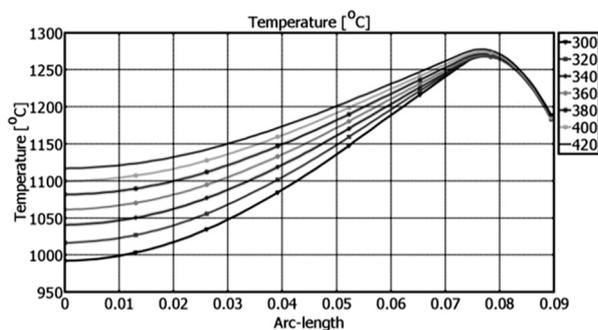


Рис. 2. Графики радиального распределения температуры в секции повышенной частоты в процессе нагрева

Это обусловлено наличием тепловых потерь с поверхности заготовки и специфической индукционного нагрева, при котором нагрев осуществляется внутренними источниками теплоты.

Приведенные в качестве примера результаты получены для технологии, по которой допустимая точность нагрева составляет 150°C. При повышении точности нагрева алгоритм расчета распределения мощности по длине нагревателя остается неизменным, при этом увеличиваются число интервалов постоянства (количество заготовок в нагревателе), уровень мощности на каждом интервале и общая длина нагревателя.

Предложенная инженерная методика проведения оптимизации конструктивных и режимных параметров индукционного нагревателя по критерию минимальной общей длины обеспечивает одновременно максимальные значения электрического КПД и коэффициента мощности индукционной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шамов А.Н.** Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок / А.Н. Шамов В.А. Бодажков. Л.: Машиностроение, 1974. 280 с.
2. **Немков В.С.** Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
3. **Дилигенская А.Н.** Идентификация пространственного распределения внутренних источников тепла в обратных задачах теплопроводности / А.Н. Дилигенская, Э.Я. Рапопорт // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2011. № 4 (32). С. 157-164.
4. **Рапопорт Э.Я.** Оптимальное управление системами с распределенными параметрами / Э.Я. Рапопорт. М.: Высшая школа, 2009. 677 с.
5. **Данилушкин А.И.** Оптимизация переходных режимов работы объектов технологической теплофизики с дискретно-распределенными управляющими воздействиями / А.И. Данилушкин, Ю.Э. Пleshивцева // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды пятой международной конференции. Самара: Самар. науч. центр РАН, 2003. С. 155-162
6. **Лыков А.В.** Теплообмен / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1978. 480 с.
7. **Базаров А.А.** Моделирование процесса теплопроводности для задач синтеза систем управления в среде MATLAB / А.А. Базаров // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2005. Вып. 33. С. 7-11.
8. **Данилушкин А.И.** Моделирование стационарного распределения температуры металла в проходном индукционном нагревателе / А.И. Данилушкин, С.В. Князев, А.П. Мостовой // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. 2012. № 9 (68). С. 41-46.
9. ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8: СПб.: Производственный кооператив TOP, 2010. URL: http://ELCUT.ru/free_doc_r.htm.
10. **Рапопорт Э.Я.** Оптимизация процессов индукционного нагрева металла / Э.Я. Рапопорт. М.: Металлургия, 1993. 279 с.

Данилушкин Александр Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Данилушкин Василий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Васильев Иван Владимирович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета

Aleksandr I. Danilushkin – Dr.Sc., Professor, Department «Power Supply of industrial enterprises», Samara State Technical University

Vasilij A. Danilushkin – PhD, Associate Professor, Department «Power Supply of industrial enterprises», Samara State Technical University

Ivan V. Vasilyev – Postgraduate, Department «Power Supply of industrial enterprises», Samara State Technical University

Статья поступила в редакцию 24.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

УДК 621.365.5

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, В.А. Лаврентьев, С.В. Тригорлый

SCIENTIFIC BASIS FOR MODIFICATION OF POLYMER MATERIALS IN A MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

S.G. Kalganova, Yu.S. Arkhangelsky, V.A. Lavrentiev, S.V. Trigorly

Рассмотрены научные основы модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ электромагнитного поля на свойства полимеров.

Ключевые слова: модификация, полимерные материалы, СВЧ электромагнитное поле, СВЧ воздействие, СВЧ установка

Разработка новых полимерных материалов является одним из приоритетных направлений науки и техники, так как обеспечивает технический прогресс в различных отраслях производства. Не меньший интерес представляет поиск путей модификации традиционных материалов.

Considers the scientific basis of modification of polymeric materials in a microwave electromagnetic field, the results of experimental studies of the effect of microwave electromagnetic field on properties of polymers.

Keywords: modification, polymeric materials, the microwave electromagnetic field of the microwave effect, microwave installation

В настоящее время для интенсификации процессов модификации полимерных материалов широко используются электрофизические методы, такие как упругие колебания звукового и ультразвукового диапазонов частот, виброобработка, токи высокой

частоты, лазерное, электронное, ультрафиолетовое излучения.

Необходимость в альтернативных технологиях модификации полимеров связана с многостадийностью традиционных процессов, высокими энерго- и трудозатратами, экологической напряженностью производства. Исследования по применению электрофизических методов обработки материалов и изделий показали эффективность использования для этой цели энергии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных колебаний. Объемная обработка полимерных материалов и изделий позволяет значительно ускорить процесс модификации по сравнению с другими методами обработки, при этом повышается качество готовых изделий, уменьшаются термомеханические эффекты, габариты производственной установки, улучшаются экономические показатели процесса.

СВЧ электромагнитное поле (СВЧ ЭМП) как источник энергии для обработки диэлектрических сред, материалов и изделий стало использоваться со второй половины XX века. За прошедшие десятилетия выполнены разносторонние исследования термического воздействия СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические материалы. Значительные успехи в этой области достигнуты благодаря работам А.В. Нетушила, И.И. Девяткина, Ю.С. Архангельского, В.А. Коломейцева, И.А. Рогова, Г.В. Лысова, В.В. Игнатова, С.В. Некрутмана. В настоящее время определена природа этого явления, разработаны методы расчета установок СВЧ диэлектрического нагрева, математического моделирования технологических процессов термообработки, создано программное обеспечение необходимых на стадии проектирования оптимизационных процедур, предложена техническая классификация этих установок и спроектированы разнообразные типы установок СВЧ диэлектрического нагрева.

В конце XX века появились работы, в которых упоминается так называемое нетепловое воздействие СВЧ ЭМП на обрабатываемые объекты, описывается полезный технологический эффект от кратковремен-

ного воздействия на полимеры СВЧ ЭМП [1, 2]. Эти новые возможности получения модифицированных материалов с заданным комплексом свойств характеризуют актуальность научных исследований и конструкторских разработок в области нетеплового воздействия СВЧ ЭМП на полимерные материалы.

Разрабатываемое научное направление связано с обнаружением новых явлений, эффектов и т.п. Это в свою очередь ставит перед исследователями проблему терминологической базы, связанной с поиском непротиворечивых терминов, определяющих новые факты. Как показывают результаты обсуждения, наиболее удачными, реально отражающими результаты нетрадиционного кратковременного воздействия СВЧ ЭМП на полимерные материалы без нагрева или при наличии незначительного нагрева, являются термины *нетепловое* и *комбинированное* воздействие СВЧ электромагнитных колебаний. Подобная классификация лежит в основе принципиально нового взгляда на процесс обработки объектов в СВЧ ЭМП.

О нетепловом действии СВЧ ЭМП на биополимеры первыми заговорили микробиологи, биофизики и технологи пищевых производств в связи с применением СВЧ генераторов для пастеризации (стерилизации) жидких сред, в частности молока [3-5].

В первых обобщающих работах обращалось внимание на необходимость детального изучения механизма воздействия СВЧ электромагнитных колебаний на бактериальную клетку, тем более что нетепловое действие СВЧ электромагнитных колебаний ставилось под сомнение некоторыми исследователями, так как, по их мнению, в публикациях о таком действии не содержалось полной информации об условиях экспериментов и научного обоснования этого эффекта.

Сейчас наличие нетеплового действия СВЧ электромагнитных колебаний на бактериальную клетку (на биополимеры), видимо, можно считать доказанным. Современные взгляды и механизмы биологического действия СВЧ электромагнитных колебаний на живые системы представлены,

например, в работах Игнатова В.В., Панасенко В.И. и зарубежных авторов Stuchly M.A. и Illingter K.H. В высокоорганизованных живых системах наблюдаются при этом только им присущие эффекты. Так, основываясь на рассмотрении дипольных и механических свойств молекул биополимеров, показана возможность возникновения колебаний в системе биологических макромолекул в диапазоне частот 10^4 - 10^{12} Гц, от которых у таких систем изменяются функциональные свойства. Экспериментально показано влияние импульсно-модулированных СВЧ электромагнитных колебаний на поведенческие реакции животных по сравнению с влиянием немодулированных колебаний при одной и той же средней удельной поглощаемой мощности $\sim 0,1$ - 1 Вт/см². Эти эффекты обычно рассматриваются как доказательства нетеплового действия СВЧ электромагнитных колебаний.

Результаты нетеплового модифицирующего воздействия СВЧ ЭМП на полимеры небиологического происхождения, например полисульфон, представлены в работе [2], что свидетельствует о существовании такого специфического воздействия.

Теоретически обоснована и экспериментально установлены возможность и целесообразность применения СВЧ электромагнитных колебаний для нетепловой модификации терморективных и термопластичных полимеров.

На наш взгляд, объяснение природы нетепловой СВЧ модификации полимеров следует искать в поляризационных эффектах, их особенностях на сверхвысоких частотах. Под действием внешнего СВЧ электромагнитного поля без разрыва химических связей происходят конформационные изменения макромолекул полимера, заключающиеся в изменении плотности молекулярной упаковки междоменных областей, в результате чего изменяется степень кристалличности полимера и, как следствие, модифицируются его свойства.

Обоснована возможность нетепловой СВЧ модификации терморективных и термопластичных полимеров.

Выявлено влияние СВЧ ЭМП на кинетику отверждения терморективных полимеров на примере эпоксидного компаунда. Установлено, что процесс отверждения реализуется двумя путями: медленным топкинетическим, при котором образуется кристаллическая фаза эпоксидного полимера, и быстрым – с формированием аморфной фазы.

С помощью уравнения Ерофеева – Аврами – Колмогорова получено уравнение роста кристаллической фазы при СВЧ воздействии на процесс отверждения эпоксидного компаунда:

$$\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \xi} \right) \right] = \ln n + n \ln B - \frac{n(A - W)}{RT} + n \ln \tau, \quad (1)$$

где γ – степень конверсии мономера; ξ – величина, характеризующая соотношение аморфной и кристаллической фазы; n – величина, получаемая из данных ИК-спектроскопии построением в двойных логарифмических координатах $\left(\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{\gamma}{1 + \xi} \right) \right] \right)$,

$\ln \tau$); A – энергии активации; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура компаунда; τ – время отверждения.

Поглощенная СВЧ энергия в расчете на 1 моль мономера составляет

$$W = 2,78 \cdot 10^{-13} \frac{f \epsilon' \operatorname{tg} \delta E^2 M \tau_{СВЧ}}{\rho}, \quad (2)$$

где $\tau_{СВЧ}$ – время СВЧ обработки компаунда; M – молекулярная масса мономера; f – частота; ϵ' , $\operatorname{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь эпоксидного компаунда; E – напряженность электрического поля электромагнитной волны (В/см).

Согласно уравнению (1) нетепловое СВЧ воздействие приводит к снижению энергетического барьера реакции отверждения A с образованием кристаллической фазы на величину W за счет увеличения угла вращения полярных групп эпоксидной смо-

лы и отвердителя, что создает дополнительные возможности их взаимодействия и образования большего количества поперечных сшивок при снижении вязкости компаунда.

На основании кинетического уравнения (1) получено выражение

$$\ln K_Y = \frac{n A}{R T_0} - \frac{n A}{R T} + 2,78 \cdot 10^{-13} \frac{n f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2 M \tau_{\text{СВЧ}}}{\rho R T}, \quad (3)$$

согласно которому коэффициент ускорения процесса отверждения компаунда $\ln K_Y$ должен линейно нарастать с увеличением времени СВЧ воздействия $\tau_{\text{СВЧ}}$ и квадратом амплитуды напряженности электрического поля E^2 электромагнитной волны.

Установлено влияние СВЧ электромагнитного поля на структуру отвержденного ЭК методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры в области пропускания 1000-1100 нм, характерной для колебаний эпоксидных групп, свидетельствуют о различной степени отверждения эпоксидного компаунда при разных режимах СВЧ воздействия.

Получена математическая модель теплопереноса, описывающая фазовые переходы в полимерах при воздействии СВЧ электромагнитного поля.

Рассмотрена работа СВЧ установки в периодическом режиме при реализации технологического процесса с фазовым переходом без выраженного теплопереноса. Время обработки единицы объема компаунда $\tau_{\text{обр}}$ может быть найдено из решения системы уравнений

$$\begin{aligned} (\alpha_{\kappa} S_{\kappa} + \alpha_{\phi} V) \Theta + c \rho V \frac{d\Theta}{dt} &= P, \\ \frac{dm}{d\tau} &= \frac{\alpha_{\phi} V \Theta}{r}, \end{aligned} \quad (4)$$

где α_{κ} – коэффициент теплоотдачи конвекцией; α_{ϕ} – коэффициент, учитывающий влияние тепловыделения в единице объема V на рост температуры; S_{κ} – поверхность объекта, с которого идет конвекция; c , ρ – удельная теплоемкость и плотность объекта; r – коэффициент, учитывающий затраты

энергии на реализацию фазового перехода; m – масса отверждаемого объекта; P – мощность, поглощенная от внешнего источника; Θ – температурный напор объекта.

Если ускорение процесса отверждения достигается при малых уровнях мощности P , когда температура компаунда в результате СВЧ воздействия повышается незначительно и $\alpha_{\kappa} S_{\kappa} \Theta \approx 0$, то

$$\tau_{\text{обр}} = \frac{m r + c \rho V \Theta}{P}. \quad (5)$$

Если фазовый переход в результате СВЧ воздействия происходит при достижении некоторого температурного напора, то общее время СВЧ обработки $\tau_{\text{обр}}$ складывается из времени нагрева полимера до заданной температуры $\tau_{\text{нагр}}$ и затрат времени на фазовый переход τ_{ϕ} , тогда

$$\tau_{\text{обр}} = \frac{c \rho V \Theta_{\phi}}{P} + \frac{m r}{\alpha_{\phi} V \Theta_{\phi}}. \quad (6)$$

Определяя экспериментально входящие в соотношения (5), (6) величины, можно исследовать влияние на фазовые переходы в объекте различных способов энергоподвода.

Результаты экспериментальных исследований. Получены результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ электромагнитного поля на свойства термопластичных и терморективных полимеров. Для обработки объектов в СВЧ ЭМП на частоте 2450 МГц использовалась специализированная конвейерная СВЧ установка с регулировкой уровня СВЧ мощности и продолжительности процесса обработки на базе камеры с бегущей волной (рис. 1).

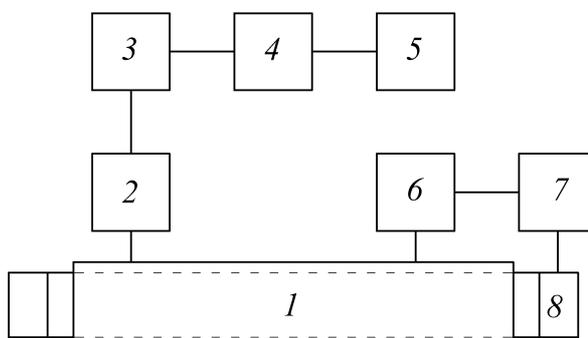
Исследовано влияние режимов нетеплового СВЧ воздействия на свойства волокнистого поликапроамида. При этом установлено увеличение удельной разрывной нагрузки волокна на 12-15% и термической стойкости в среднем в 4,6 раза. Эффект наблюдается при кратковременном СВЧ воздействии в 5-10 с, когда температура объекта в процессе обработки остается постоянной. Этот факт свидетельствует о не-

тепловой природе влияния СВЧ электромагнитных колебаний на полимерную структуру поликапроамидного волокна. Установлена незначительная релаксация

удельной разрывной нагрузки на 3-6%, однако величина остаточного эффекта воздействия указывает на нетепловую модификацию поликапроамида.



а



б

Рис. 1. Специализированная СВЧ установка для научных исследований: а – общий вид; б – структурная схема (1 – СВЧ рабочая камера на прямоугольном волноводе с конвейерной лентой; 2 – измерители падающей и отражённой мощности; 3 – аттенюатор; 4 – ферритовый вентиль; 5 – источник СВЧ энергии; 6 – calorиметрическая балластная нагрузка; 7 – пульт управления; 8 – электрический привод конвейера)

Методом ИК-спектроскопии установлено, что нетепловое СВЧ воздействие приводит к изменениям в структуре поликапроамида (рис. 2), связанным как с внутримолекулярными, так и с межмолекулярными водородными связями и конформационными изменениями молекулы полимера. Результаты ИК-спектроскопии согласуются с данными электронной микроскопии. Выявлено повышение упорядоченности структуры поликапроамида, что может быть причиной упрочнения волокна и повышения его сорбционной способности в результате нетеплового СВЧ воздействия.

Исследовано влияние СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства ткани на основе поликапроамидного волокна. При нетепловом СВЧ воздействии на ткань разрывное напряжение повышается в среднем на 17 %, а устойчивость к истиранию в среднем на 20 %.

Большинство синтетических волокон обладают малой способностью к поглощению влаги. Установлено увеличение гигроскопичности ткани в среднем на 40% для неплотной структуры ткани, которое наблюдается при кратковременном воздействии СВЧ электромагнитного поля в 10-15 с.

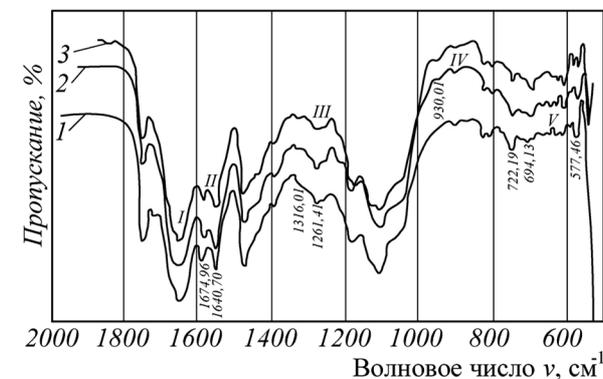


Рис. 2. ИК-спектры волокнистого поликапроамида: 1 – исходный без СВЧ обработки; 2 – сразу после СВЧ обработки; 3 – через 3 месяца после СВЧ обработки

Исследована эффективность применения нетеплового воздействия СВЧ электромагнитного поля на поликапроамидную ткань, пропитанную замедлителем горения антипиреном Т-2, которая обусловлена повышением сорбционной способности ткани на 14 %. По данным электронной микроскопии, в результате СВЧ воздействия антипирен внедряется в объем волокна и располагается на его поверхности в виде мелкодисперсных частиц размером 0,5-8,0 нм, тогда как без СВЧ воздействия антипирен преимущественно располагается на поверхности волокна в виде более крупных частиц размером 0,2-0,3 мкм и агреги-

рованных образований молекул замедлителя горения (рис. 3).

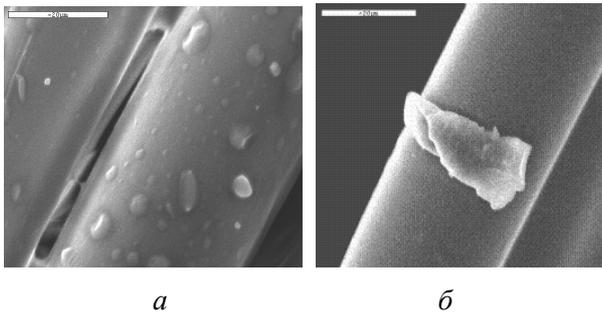


Рис. 3. Распределение антипирена Т-2 на поверхности поликапроамидного волокна: а – обработанного в СВЧ электромагнитном поле; б – без СВЧ обработки

Исследовано нетепловое воздействие СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения эпоксидного компаунда и его физико-механические свойства. Установлено, что СВЧ обработка повышает предел прочности на разрыв σ_B компаунда в 3-4 раза, теплостойкость B в 1,4-1,6 раза по сравнению с компаундом, отвержденным на воздухе в естественных условиях, и интенсифицирует процесс его отверждения в десятки раз (в 5-70 раз для различных режимов СВЧ обработки) (рис. 4, 5).

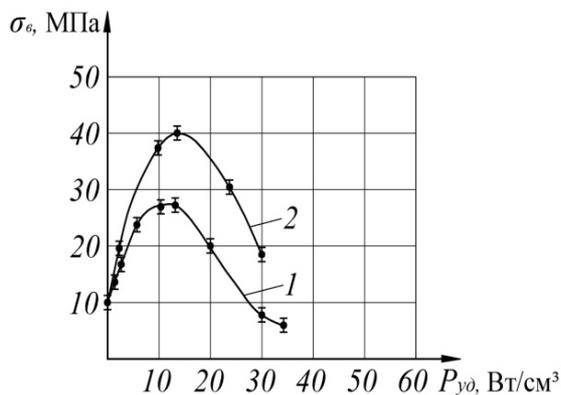


Рис. 4. Влияние удельной поглощенной СВЧ мощности $P_{уд}$ на прочность эпоксидного компаунда при $V_{см}:V_{отв}$: 1 – 10:1; 2 – 12:1

Исследовано влияние СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические свойства полимерных триботехнических смазок и смазочно-охлаждающих технологических жидкостей. В результате кратковременной СВЧ обработки смазки в 5-10 с установлено

незначительное снижение относительной диэлектрической проницаемости ϵ' на 3-4% и увеличение тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta \sim$ в 2,5 раза по сравнению с исходной.

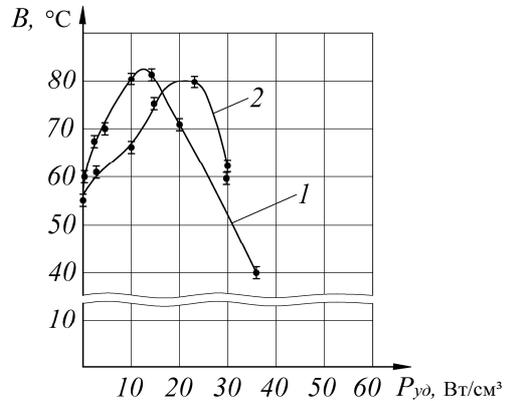


Рис. 5. Влияние удельной поглощенной СВЧ мощности на теплостойкость эпоксидного компаунда $V_{см}:V_{отв}$: 1 – 10:1; 2 – 12:1

Для смазочно-охлаждающих технологических жидкостей ϵ' увеличивается на 7-17% и $\text{tg } \delta$ в 1,5-2,5 раза при времени СВЧ воздействия в 6-10 с по сравнению с необработанным объектом. Изменение диэлектрических параметров свидетельствует о нетепловой природе влияния СВЧ электромагнитных колебаний на структурные изменения смазки и смазочно-охлаждающих технологических жидкостей.

Определена целесообразность применения нетеплового воздействия СВЧ электромагнитного поля для повышения прочности клеевого соединения полимерных композиционных текстильных материалов. Установлено увеличение прочности при расслаивании композиционных материалов с акриловым АК-622 и сополиамидным СПА связующими на 80 и 50% соответственно.

В результате проведенных экспериментальных исследований доказано существование нетеплового модифицирующего воздействия СВЧ электромагнитного поля на полимерные материалы различной структуры, исследовано влияние продолжительности и мощности СВЧ воздействия на основные физико-механические свойства объектов. Получены расчетные значения напряженности электрического поля E , при которых достига-

ется наилучший модифицирующий эффект при обработке объекта.

Следует иметь в виду, что экспериментальные результаты СВЧ воздействия на полимерные материалы получены при расположении объектов в прямоугольном волноводе с сечением 45×90 мм при их расположении тонким слоем в середине широкой стенки параллельно узкой. Так что при использовании результатов эксперимента следует учитывать тип линии, на базе которой будет проектироваться СВЧ установка нетеплового модифицирующего воздействия, потому что в этой линии следует обеспечить в обрабатываемом объекте ту же напряженность электрического поля электромагнитной волны, которая имела место в волноводе экспериментальной установки.

Теоретические основы разработки СВЧ установок нетеплового модифицирующего воздействия. При разработке метода расчета СВЧ установок нетеплового модифицирующего воздействия, нового класса СВЧ электротехнологических установок определены требования, обеспечивающие заданный технологический режим с необходимым качеством, производительностью и надежностью, и структурная схема СВЧ установки, которая отличается от структурной схемы СВЧ электротермической установки двумя основными признаками:

– в СВЧ установках нетеплового воздействия на модификацию полимерного материала тратится незначительная доля СВЧ мощности, поэтому для её утилизации используется балластная нагрузка;

– в СВЧ установках нетеплового воздействия возникает повышенная опасность получения недопустимо больших отражений СВЧ электромагнитной волны от рабочей камеры, поэтому в первую очередь следует обеспечить согласование балластной нагрузки с рабочей камерой и рабочей камеры с линией передачи, соединяющей её с источником СВЧ энергии. Гарантированную защиту генератора от отраженной волны обеспечивает ферритовый вентиль.

Поскольку для достижения модифицирующего эффекта напряженность электрического поля электромагнитной волны E

является величиной заданной, то в СВЧ установках нетеплового воздействия должна иметься возможность регулирования мощности СВЧ генератора, которую можно обеспечить с помощью тиристорного преобразователя источника питания или внешнего переменного аттенюатора.

Расчет рабочих камер СВЧ установок нетеплового воздействия сводится к синтезу камер и нахождению условий достижения максимальной эффективности установок на их основе. Под синтезом рабочих камер СВЧ установок нетеплового модифицирующего воздействия будем понимать расчет геометрических размеров рабочих камер установок с заданными технологическими параметрами, реализующих заданный технологический процесс при максимальной его экономической эффективности.

СВЧ нетепловая модификация может быть реализована в рабочих камерах с бегущей волной и в камерах лучевого типа. Разработаны методы расчета камер со слоистым заполнением.

Для решения задачи синтеза рабочей камеры использовались уравнения Максвелла. Информация об электромагнитных полях позволяет расположить модифицируемый объект в максимуме напряженности электрического поля E электромагнитной волны. Например, в прямоугольном волноводе при нетепловой модификации тел плоской формы объект должен располагаться параллельно узким стенкам волновода.

В качестве собственных волн такого волновода выбраны продольные электромагнитные волны типа LM_{mn} и LE_{mn} (четные и нечетные относительно координаты x). При этом в рабочей камере наибольшую амплитуду переносит нечетная волна LE_{10} . По своей конфигурации электромагнитное поле у этой волны наиболее близко соответствует полю волны H_{10} в прямоугольном волноводе с однородным заполнением, причем чем тоньше слой модифицируемого объекта, тем ближе данное соответствие.

Допустим, известны значения $E_{зад} \pm \Delta E$ в воздушном зазоре слоисто заполненного волновода, при которых имеет место нетепловая модификация полимерного мате-

риала, то при квази- H_{10} волне допустимая длина рабочего участка камеры с бегущей волной равна

$$l_{\text{дон}} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1 + \frac{\Delta E}{E_{\text{зад}}}}{1 - \frac{\Delta E}{E_{\text{зад}}}},$$

а при $2 \frac{\Delta E}{E_{\text{зад}}} < 1$

$$l_{\text{дон}} \approx \frac{2 \Delta E}{\alpha E_{\text{зад}}}, \quad (7)$$

где α – коэффициент затухания в слоисто-заполненном волноводе.

Мощность СВЧ на входе в рабочую камеру в этом случае рассчитывается по соотношению

$$P = \frac{ab}{4} (E_{\text{зад}} + \Delta E)^2 \sqrt{Z_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}, \quad (8)$$

где $Z_0 = 120\pi$ – характеристическое сопротивление воздуха; $a \times b$ – сечение волновода; λ – длина волны генератора.

Производительность СВЧ установки определяется по соотношениям

$$G_v = \frac{d b l_{\text{дон}}}{\tau_{\text{СВЧ}}}; G_1 = \frac{l_{\text{дон}}}{\tau_{\text{СВЧ}}}; \quad (9)$$

$$G_p = \frac{\rho d b l_{\text{дон}}}{\tau_{\text{СВЧ}}},$$

где G_v , G_1 , G_p – объемная [$\text{м}^3/\text{с}$], погонная [$\text{м}/\text{с}$], весовая [$\text{кг}/\text{с}$] производительности; $\tau_{\text{СВЧ}}$ – время модификации объекта в СВЧ электромагнитном поле; d , ρ – толщина, плотность модифицируемого объекта.

Если обеспечить перемещение объекта вдоль узкой стенки камеры с бегущей волной, то получим рабочую камеру, работающую в методическом режиме, производительность которой равна

$$G_1 = l_{\text{дон}} / \tau_{\text{СВЧ}}.$$

Предложены варианты компоновки рабочей камеры для модификации полимерных волокон (рис. 6) [4]. Для обеспечения $E_{\text{зад}}$ к входному фланцу камеры от СВЧ ге-

нератора должна быть подана СВЧ мощность, определяемая соотношением (8). Время пребывания волокна в волноводе равно $\tau = b/G_l$.

Если $\tau > \tau_{\text{СВЧ}} + \Delta\tau$, то время пребывания в волноводе может быть уменьшено за счет уменьшения ширины b узкой стенки волновода. Это потребует уменьшения мощности СВЧ генератора, то есть в источнике питания СВЧ генератора должна быть предусмотрена регулировка СВЧ мощности. При этом не следует опасаться СВЧ пробоя волновода, так как $E_{\text{зад}} < E_{\text{проб}}$. Для согласования волновода рабочей камеры с СВЧ генератором в этом случае потребуется на её входе поставить четвертьволновой согласующий переход.

Если $\tau > \tau_{\text{СВЧ}} - \Delta\tau$, то требуется увеличить время пребывания волокна в СВЧ электромагнитном поле. Это можно обеспечить, за счет протягивания волокна вдоль той же щели в волноводе n раз, используя направляющие ролики (рис. 6 а), причём

$$n = \frac{\tau_{\text{СВЧ}} G_l}{b}. \quad (10)$$

Длина щели в этом случае определяется по соотношению $l \approx n d$, где d – диаметр волокна.

При этом учитывается, что на длине l из-за затухания электромагнитной волны амплитуда напряжённости E уменьшается и $l_{\text{дон}}$ определяется по соотношению (7).

Если $l < l_{\text{дон}}$, то схема протягивания волокна через рабочую камеру, показанная на рис. 6 а, возможна. При $l > l_{\text{дон}}$ необходимо соединить N отрезков волноводов меандром (рис. 6 б), причём N рассчитывается по соотношению

$$N = \frac{\tau_{\text{СВЧ}} G_l}{b}. \quad (11)$$

Общая длина СВЧ тракта в N секциях, на которой происходит затухание электромагнитной волны, равна величине $L = N l$, тогда по аналогии с выражением (6) с учётом уравнения (11) получим

$$l = \frac{2 \Delta E b}{\alpha \tau_{\text{СВЧ}} G_l E_{\text{зад}}}. \quad (12)$$

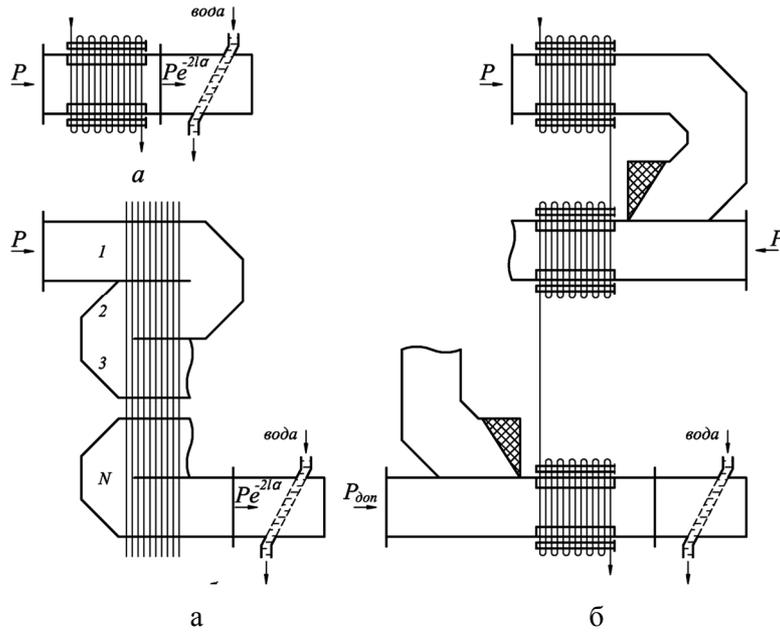


Рис. 6. Варианты компоновки рабочей камеры СВЧ установки нетеплового воздействия для модификации полимерных волокон

Через щель длиной l можно пропустить плоский пучок n волокон, учитывая, что

$$n = \frac{l}{d} = \frac{\Delta E b}{\alpha \tau_{СВЧ} G_1 d E_{зад}}$$

или

$$n = \frac{2 \Delta E b}{\alpha \tau_{СВЧ} E_{зад}}. \quad (13)$$

Так как через рабочую камеру протягиваются одновременно n волокон, общая производительность установки будет составлять $G = n G_1$.

Расчеты показывают, что при больших G_1 число секций становится велико, и длина установки по направлению протягивания волокна может достигать нескольких десятков метров. Задачу можно решить, используя рабочую камеру, схема которой показана на рис. 6 в. Предложена методика расчета такой камеры, которая позволяет найти дополнительную мощность $P_{дон}$, которую надо подать на вход второй секции, чтобы в ней амплитуда напряженности E находилась в пределах от $E_{зад}$ до $E_{зад} \pm \Delta E$:

$$P_{дон} = P \left[1 - \frac{(1 - e^{-2\alpha l}) e^{-0,23 C}}{1 + e^{-0,23 K}} \right], \quad (14)$$

где C, K – переходное затухание и направленность направленного ответвления.

Разработаны методики расчетов рабочей камеры на коаксиальном волноводе, когда в нем существует лишь падающая T волна, и камеры лучевого типа в предположении о распространении в ближней зоне излучателя плоской электромагнитной волны [5].

В качестве излучателей в камерах лучевого типа рекомендованы рупорные излучатели на прямоугольном волноводе (в плоскости H , в плоскости E и пирамидальные) (рис. 7).

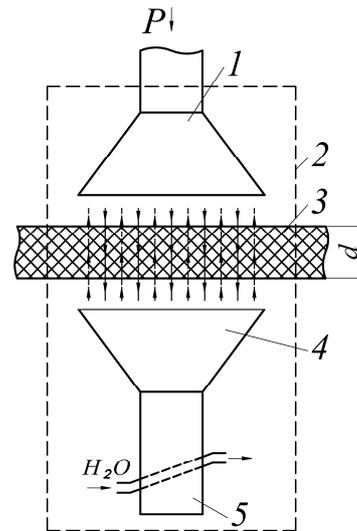


Рис. 7. Схема компоновки камеры лучевого типа с ограниченным объемом: 1 – излучающий рупор, 2 – стенки камеры, 3 – объект, 4 – приемный рупор, 5 – балластная нагрузка

Коэффициент затухания плоской волны в модифицируемом объекте равен

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}, \quad (15)$$

где ε' , $\operatorname{tg} \delta$ – диэлектрические параметры обрабатываемой среды.

Таким образом, на основании теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная проблема, имеющая существенное значение для развития промышленности в области СВЧ технологий модификации полимерных материалов, заключающаяся в создании метода повышения качества полимерных материалов на основе их нетепловой модификации в СВЧ электромагнитном поле и разработке нового класса СВЧ электротехнологического оборудования для её реализации.

Впервые получены результаты экспериментальных исследований влияния режимов нетеплового воздействия СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства терморезактивных и термопластичных полимеров, в целом подтвердившие теоретические положения о модифицирующем влиянии СВЧ электромагнитных колебаний на их структуру.

Установлена возможность управления свойствами эпоксидных компаундов с помощью воздействия СВЧ электромагнитного поля на процесс отверждения, открывающая перспективы для развития нового направления теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации СВЧ технологий при производстве трансформаторов с литой изоляцией обмоток, производстве композиционных материалов, изготовлении литых деталей из эпоксидного компаунда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Девятков Н.Д.** Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Н.Д. Девятков, М.: ИРЭ, 1981.

2. **Гильманова В.А.** Влияние напряженности СВЧ электромагнитного поля на величину относительного удлинения полимерного волоконного сепарационного материала / В.А. Гильманова // Электротехнологические СВЧ установки, функциональные электродинамические устройства: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2003. С. 101-106.

3. Действие ионизирующих излучений и полей сверхвысоких частот на бактериальные объекты: сб. статей. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1974. 64 с.

4. **Панасенко В.И.** Генетические эффекты у микроорганизмов при нагреве микроволнами дециметрового диапазона /

В.И. Панасенко // Механизмы биологического действия электромагнитного излучения. Пушино: НЦБ АН СССР, 1987. С. 110-111.

5. Резонансные явления при действии электромагнитных волн миллиметрового диапазона на биологические объекты / А.З. Смолянская и др. // Успехи современной биологии. 1979. Т. 87. № 3. С. 381-392.

6. **Калганова С.Г.** Расчет рабочей камеры СВЧ электротехнологической установки для модификации полимерных волокон / С.Г. Калганова // Электричество. 2005. № 8. С. 52-54.

7. **Калганова С.Г.** Рабочие камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок для модификации полимеров больших площадей / С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Электричество. 2009. № 1. С. 60-63.

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana G. Kalganova – Dr.Sc., Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Лаврентьев Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тригорлый Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yu. S. Arkhangel'sky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Lavrentyev – PhD, Associate Professor, Department of Automatic Devices and Systems in Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Sergey V. Trigorly – PhD, Associate Professor, Department of Automatic Devices and Systems in Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 05.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

УДК 621.365.5

УЛУЧШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЧ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПУТЁМ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ СВЧ ГЕНЕРАТОРА

А.В. Фёдоров, Ю.С. Архангельский

IMPROVING PARAMETERS OF THE WORKING CHAMBER WITH THE TRAVELING WAVE OF THE MICROWAVE FREQUENCY BY TUNING THE MICROWAVE OSCILLATOR

A.V. Fedorov, Yu.S. Arkhangel'skiy

Проведено сравнение K_{cmU} камеры с бегущей волной на неоднородном прямоугольном волноводе, работающей в одночастотном режиме и с перестройкой частоты СВЧ генератора. Показано улучшение согласования при синхронном с ϵ' и $tg \delta$ изменении в процессе нагрева частоты СВЧ генератора.

Ключевые слова: камера с бегущей волной, установка СВЧ диэлектрического нагрева, расчёт, волновод, длина волны, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, одночастотный режим, широкополосный генератор

The paper presents a comparison between the K_{cmn} chamber with the travelling wave on the non-homogeneous rectangular waveguide operating in the single frequency mode and frequency tuning in the microwave generator. The emphasis is made on improvement in the frequency matching of the microwave generator at synchronous changes with the ϵ' and $tg \delta$ in the process of heating.

Keywords: ray type microwave chamber, microwave installation, calculation, waveguide, wavelength, relative permittivity, loss angle, single frequency mode, broadband generator

При разработке СВЧ установки того или иного технологического назначения важной задачей является выбор типа и расчёт рабочей камеры. Рабочая камера с бегущей волной (КБВ) представляет собой отрезок линии передачи с размещенным внутри диэлектриком. Если предполагается полное поглощение СВЧ энергии обрабатываемым диэлектриком, камера выполняется на короткозамкнутом отрезке линии передачи. В установках, предназначенных для нетепловой модификации полимеров, СВЧ излучение слабо поглощается обрабатываемым объектом. В этом случае для согласования рабочей камеры с СВЧ генератором она должна быть нагружена оконечной согласованной нагрузкой. КБВ отличаются от других рабочих камер высокой равномер-

ностью нагрева диэлектриков, и высоким КПД, однако при этом есть и недостатки.

Основным недостатком является ухудшение параметров рабочей камеры при отклонении диэлектрических параметров обрабатываемого объекта от расчётных значений. КБВ, построенная на нерегулярном короткозамкнутом отрезке прямоугольного волновода (рис. 1 а), имеет $K_{cmU} \approx 1$ только для расчётных значений ϵ' и $\text{tg } \delta$. У большинства диэлектриков диэлектрические параметры зависят от температуры, и при нагреве рабочая камера становится рассогласованной. При этом увеличивается K_{cmU} , то есть снижается КПД, увеличивается неравномерность нагрева.

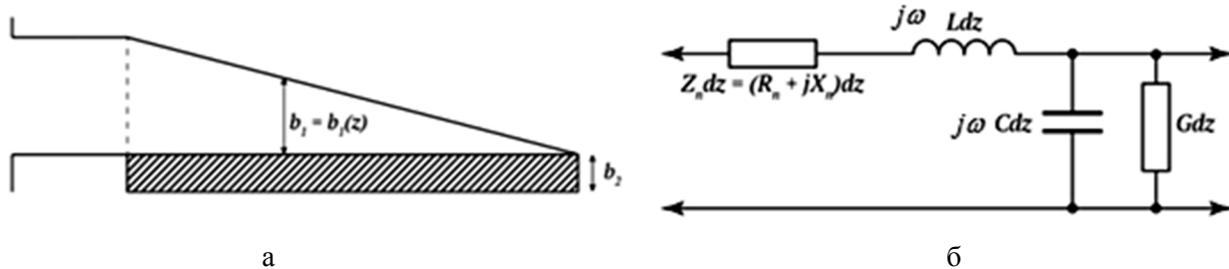


Рис. 1. КБВ на нерегулярном прямоугольном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлектриком: а – КБВ; б – эквивалентная схема отрезка прямоугольного волновода длиной dz , частично заполненного диэлектриком с потерями

Снизить влияние отклонения диэлектрических параметров обрабатываемого объекта от расчетных значений на характеристики рабочей камеры можно, используя генератор с перестраиваемой частотой. Управляя частотой СВЧ генератора синхронно с изменением диэлектрических параметров обрабатываемого объекта, можно стабилизировать параметры рабочей камеры в течение всего процесса термообработки.

Одним из распространенных технологических процессов, в котором применяется СВЧ энергия, является нагрев пищевых продуктов [1]. В качестве примера для расчёта характеристик КБВ в одночастотном режиме и в режиме с перестройкой частоты был выбран диэлектрик – мясо (говядина). Зависимости диэлектрических параметров говядины от температуры были определены экспериментально [2] и показаны на рис. 2.

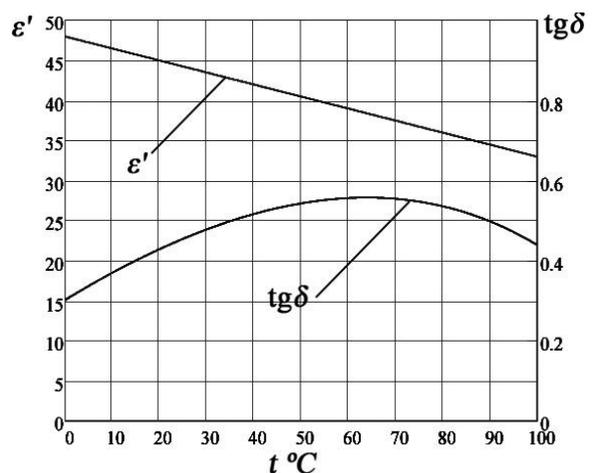


Рис. 2. Зависимости $\epsilon'(t)$, $\text{tg } \delta(t)$ говядины на частоте 2450 МГц

Воспользуемся инженерным методом расчета КБВ, основанном на применении теории цепей [2], при котором КБВ можно представить в виде эквивалентной схемы,

показанной на рис. 1 б. Здесь R_n и X_n – действительная и мнимая части погонного сопротивления поглощающего (нагреваемого) диэлектрика. Величина этих параметров зависит от диэлектрических свойств нагреваемого объекта, длины волны и толщины диэлектрика. Для стабилизации режима работы КБВ важно свести изменения погонных

$$Z_{вх}(t) = \int_0^l [R_n(t) + jX_n(t)] dz + j \frac{2\pi}{\Lambda} \int_0^l \frac{Z_0^2 - [R_n(t)z]^2}{Z_0} dz, \quad (1)$$

где Λ – длина волны в волноводе; l – длина диэлектрика; t – температура диэлектрика; Z_0 – волновое сопротивление, рассчитываемое по соотношению

$$Z_0 = -\frac{\Lambda}{4\pi} X_n + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_n\right)^2 + (R_n z)^2} \quad (2)$$

для средних в диапазоне температуры значений ϵ' и $\text{tg } \delta$, на которую рассчитывается КБВ.

В одночастотном режиме зависимости $K_{смU}$ от выбора расчетной температуры показаны на рис. 3, причем

$$K_{стU} = \frac{1+|\Gamma(t)|}{1-|\Gamma(t)|}, \quad (3)$$

где $\Gamma(t)$ – коэффициент отражения, причем

$$|\Gamma(T)| = \left| \frac{Z_{вх}(t) - Z_{0в}}{Z_{вх}(t) + Z_{0в}} \right|, \quad (4)$$

$Z_{0в}$ – волновое сопротивление линии передачи на входе КБВ.

На рис. 4 а показана зависимость $K_{смU}$ КБВ при термообработке говядины с диэлектрическими параметрами, показанными на рис. 2.

параметров во время нагрева к минимуму. В [3] показано, что путём перестройки частоты добиться $R_n = \text{const}$, $X_n = \text{const}$ одновременно не удаётся, однако можно снизить их разброс по сравнению с одночастотным режимом, что улучшит параметры КБВ.

$K_{смU}$ рабочей камеры зависит от её входного сопротивления $Z_{вх}$:

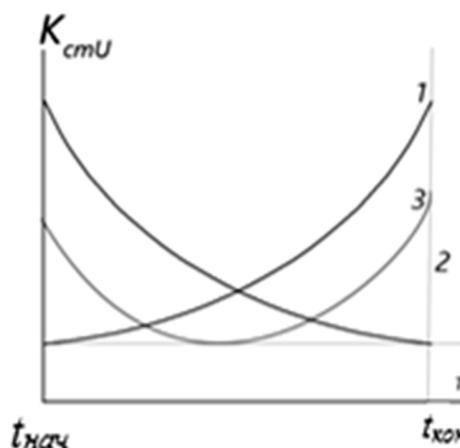
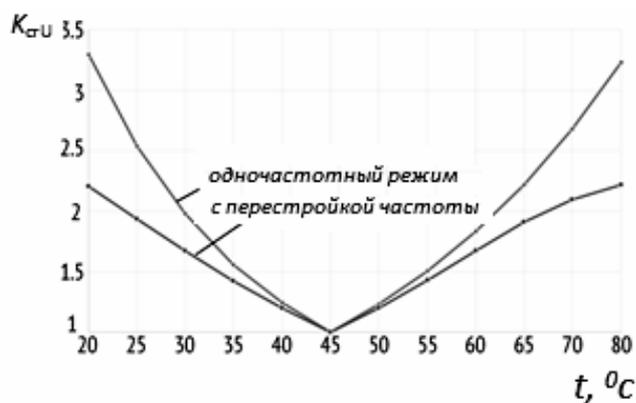
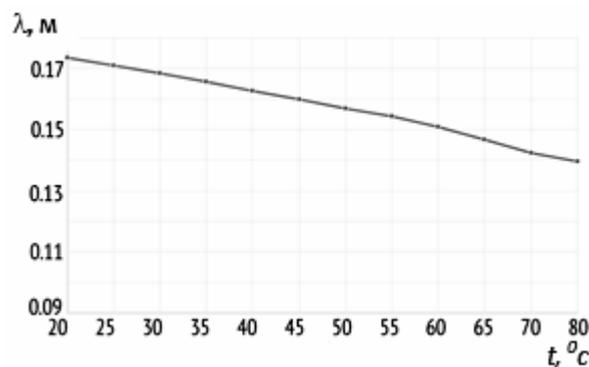


Рис. 3. Зависимости $K_{смU}$ КБВ от температуры диэлектрика (геометрические размеры КБВ рассчитаны на R_n и X_n , соответствующие: 1 – температуре в начале обработки; 2 – температуре в середине обработки; 3 – температуре в конце обработки)



а



б

Рис. 4. Параметры КБВ: а – $K_{смU}$ в одночастотном режиме и с перестройкой частоты в зависимости от температуры диэлектрика; б – зависимость длины волны СВЧ генератора от времени нагрева говядины

В режиме с перестройкой частоты весь процесс нагрева был разбит на несколько временных интервалов, на каждом из которых частота была выбрана такой, чтобы достичь как можно меньшего значения K_{cmU} . При этом диапазон перестройки ограничен полосой пропускания прямоугольного волновода стандартного сечения $4,5 \times 9$ см ($9 < \lambda < 18$ см).

Расчёт показал, что, применяя режим с перестройкой частоты СВЧ генератора, можно получить более низкий K_{cmU} рабочей камеры на всём протяжении термообработки. Особенно важно снизить K_{cmU} в начальный и конечный моменты времени термообработки, когда диэлектрические параметры наиболее сильно отличаются от расчётных. В данном примере удалось снизить K_{cmU} в начальный момент нагрева с 3.3 до 2.2. Результаты расчёта показаны на рис. 4 б.

При этом диапазон перестройки длины волны будет зависеть от направления и интенсивности изменения диэлектрических параметров нагреваемого объекта. В рассматриваемом примере перестройка длины волны показана на рис. 4б.

В качестве перестраиваемого источника СВЧ энергии может быть использована система с мощным электровакуумным генератором (ЛОВ), генератором на ЛБВ или полупроводниковым генератором [4]. При этом требуется разработка системы управления частотой, а также система контроля параметров термообработки для получения информации о температуре обрабатываемого диэлектрика в процессе нагрева или о величине отражения СВЧ энергии от рабочей камеры. На основе этих данных система управления изменяет частоту генератора СВЧ электротермической установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рущиц А.А.** Применение СВЧ нагрева в пищевой промышленности и общественном питании / А.А. Рущиц, Е.И. Щербакова // Вестник ЮУрГУ. Сер. Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2. № 1. С. 9-13.

2. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

3. **Архангельский Ю.С.** К расчёту камер с бегущей волной установок СВЧ ди-

электрического нагрева, работающих в многочастотном режиме. / Ю.С. Архангельский, А.В. Федоров // Вопросы электротехнологии. 2015. № 2. С. 42-49.

4. **Федоров А.В.** Применение полупроводниковых генераторов в СВЧ электротехнологических установках / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Актуальные проблемы электронного приборостроения: сб. тр. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2014. Т. 2. С. 165-169.

Фёдоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton V. Fedorov – Postgraduate, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Yuri S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЧНОСТЬ И МИКРОСТРУКТУРУ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

И.В. Злобина, Н.В. Бекренёв

IMPACT OF THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE STRENGTH AND STRUCTURE OF BALLISTIC NON-METALLIC MATERIALS

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

Исследовано влияние СВЧ электромагнитного поля на прочность баллистических материалов, используемых в производстве элементов индивидуальной защиты I и 2 класса. В экспериментах использовались ТСВМ-ДЖ и сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Установлено, что воздействие СВЧ электромагнитного поля удельной мощностью 14-17 Вт/см³ на арамидные нити и нити из сверхвысокомолекулярного полиэтилена позволяет увеличить прочность на разрыв соответственно в 2 и 1,6-1,7 раза. Констатировано существенное снижение расслоения на волокна обработанных в электромагнитном поле арамидных нитей и сверхвысокомолекулярного полиэтилена после воздействия разрывной нагрузки.

Ключевые слова: СВЧ электромагнитное поле, баллистические материалы, нити, волокна, прочность, расслоение, микроструктура

Наряду с угле- и стеклопластиками в авиационной технике и другом воздушном транспорте применяются конструкционные органопластики, армированные арамидными волокнами, которые относятся к самым легким полимерным композиционным материалам авиационного назначения. Из арамидных органопластиков изготавливают легкие обшивки планера вертолетов, обшивки хвостовых секций несущих винтов вертолетов, обшивки зализов и носков кры-

The research is made into impact of the microwave electromagnetic field on the strength of ballistic materials used in manufacturing personal protective equipment Category I and Category II. ТСВМ-ДЖ and super-high molecular weight polyethylene were applied in the experiments. It was found that the impact of the microwave electromagnetic field with the specific capacity at 14-17 W/cm³ on the aramid filaments and the super-high molecular weight polyethylene filaments allow for increasing the fracture strength by 2 or 1,6-1,7 times. It was stated that the degree of splitting of aramid filaments and the super-high molecular weight polyethylene filaments treated in the electromagnetic field has significantly reduced under the impact of the discontinuous load.

Keywords: the microwave electromagnetic field, ballistic materials, filaments, strength, splitting, microstructure

ла самолетов и др. [1, 2]. Разрушение органопластиков в отличие от стекло- и углепластиков сопровождается множественным разрушением самих армирующих волокон с образованием обширной поверхности разрушения. Такой механизм разрушения требует больших затрат энергии, что обуславливает высокую ударную и баллистическую стойкость органопластиков. Арамидные нити по сравнению с углеродными и стеклянными волокнами менее

хрупкие и пригодны для переработки на обычном оборудовании текстильных производств [3, 4]. Следует отметить, что данные материалы являются универсальными. Из них можно изготавливать не только конструкционные композиционные элементы, но и одежду различного назначения. Высокие прочностные и термостойкие характеристики тканей на основе арамидных нитей определяют их применение в качестве так называемых баллистических материалов, используемых в качестве индивидуальных средств защиты 1 и 2 класса для экипировки служащих МЧС и персонала, работающего в экстремальных условиях, когда возможные аварийные ситуации, сопровождающиеся механическим поражением скоростными объектами, воздействием высоких температур или жидкостей под давлением. Хорошие защитные свойства арамидных тканей в сочетании с легкостью и гибкостью привели к их широкому применению в армии, авиации и на флоте [5-7]. В России к одним из наиболее распространенных баллистических материалов на основе арамидных нитей относятся ТСВМ и новый материал «Русар».

Однако арамидным тканям присущи и значительные недостатки, связанные со слабым противодействием малоскоростным твердым ударникам [6], с ослаблением защитных свойств при намокании, воздействии прямых солнечных лучей, достаточно большой заброневого эффекта, приводящий к серьезным травмам. Вследствие этого конструкция элементов защитной одежды усложняется путем введения водо- и светонепроницаемых карманов или внешних слоев ткани, применения многослойных (20-30 слоев) систем, что утяжеляет защитный комплект и снижает подвижность человека.

Исследования по повышению прочности таких тканей направлены на совершенствование технологий получения исходных компонентов и формирования тканей путем оптимизации плетения [8], что усложняет и удорожает процесс, а также приводит к необходимости перестройки или перевооружения производства, что удлиняет цикл внедрения новых разработок.

Сказанное в полной мере относится и к другому перспективному материалу, используемому в средствах защиты как самостоятельно, так и в качестве внутренних подложек для керамических бронеплиток, – сверхвысокомолекулярному полиэтилену (СВМПЭ), сформированному из плетеных волокон. Этот материал обладает прежде всего высокой химической стойкостью, устойчив к ионизирующему излучению и обладает в многослойном варианте отличными демпфирующими свойствами [5, 7].

В свете изложенного представляет научный и практический интерес исследовать возможность повышения эксплуатационных, в частности прочностных, характеристик уже отработанных в производстве материалов на основе арамидных и СВМПЭ нитей путем управляемых внешних энергетических воздействий на готовые нити и ткани, чтобы избежать существенного изменения дорогих и сложных химических и ткацких технологий. Известно, что воздействие на диэлектрические материалы, к которым относятся и упомянутые выше, СВЧ электромагнитного поля способствует существенному изменению их свойств в зависимости от мощности и вида волны [9]. Ранее нами были получены положительные результаты по повышению прочности композиционных конструкционных материалов на основе полимерной матрицы, армированной углеродными волокнами, после электрофизического воздействия, в частности СВЧ электромагнитным полем определенной удельной мощности [10, 11].

Целью исследований является изучение возможности улучшения эксплуатационных свойств, а именно прочности арамидных материалов и СВМПЭ при воздействии СВЧ электромагнитного поля с целью повышения их защитных характеристик при работе в экстремальных условиях, сопряженных с механическим воздействием на человека.

Нами выполнены исследования влияния СВЧ обработки на физико-механические свойства арамидных нитей ТСВМ-ДЖ артикул 56319А и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), являющихся осно-

вой соответствующих защитных тканей. Во всех экспериментах использовали нити ТСВМ-ДЖ толщиной 0,05 мм, СВМПЭ – 0,05 и 0,03 мм длиной 70 мм.

Эксперименты проводили на лабораторной установке, позволяющей ступенча-

то регулировать мощность СВЧ электромагнитного поля. Испытания образцов до и после обработки проводили на установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий и червячным механизмом нагружения (рис. 1).

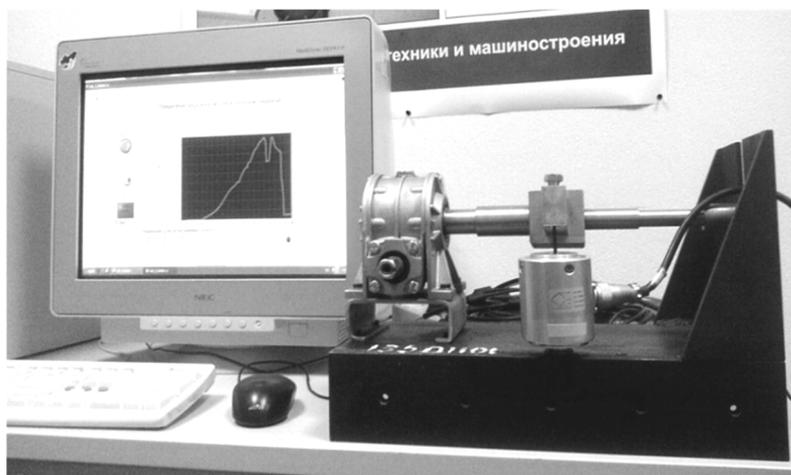


Рис. 1. Экспериментальная установка для испытания образцов

Сигналы датчиков передавались через аналогово-цифровой преобразователь в компьютер. Обработка результатов измерения нарастания приложенной к образцу нагрузки по специальной заложенной в установке программе (LabVIEW, г. Орел) позволила получить графики нагрузки (момента) в динамике от момента приложения до разрушения. Специально разработанное нами оснащение (рис. 2) позволяло выполнять испытания образцов нитей на разрыв при нагружении в осевом и поперечном направлениях. В экспериментах путем регулировки подводимой СВЧ мощности и объема балласта обеспечивали воздействие на образец ее удельных значений 4-5, 14-17 и 28-32 Вт/см³. Время обработки составляло 1, 4, 8 минут. На каждом режиме обрабатывали по 3 образца, которые помещали в камеру установки намотанными на диэлектрические стержни в виде спирали, чтобы уменьшить их протяженность в камере и снизить неравномерность воздействия. Испытания нитей проводили следующим образом.

На тензометрическом столике установки закрепляли кронштейн, в верхней части которого втулочным зажимом фиксировали

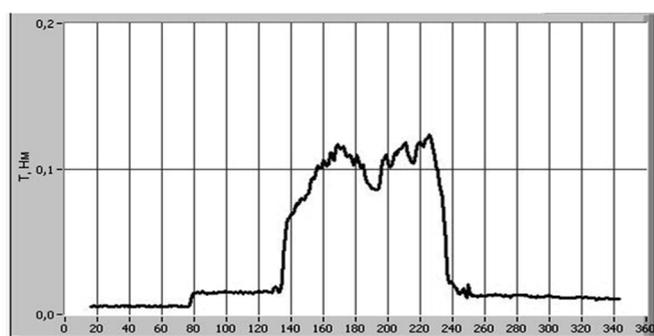
один конец испытываемой нити из свитых волокон. Второй конец нити фиксировали втулочным зажимом в рычаге нагружающего устройства установки. При опускании рычага последний натягивал нить, через которую осевое усилие передавалось на кронштейн, а через него – на тензометрический датчик, с которого оно считывалось программным устройством и преобразовывалось в график момента нагружения на экране компьютера.



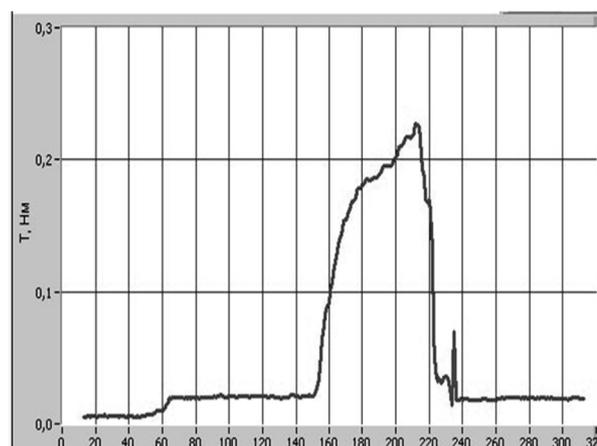
Рис. 2. Оснастка для проведения испытаний на разрыв нитей

В схеме испытаний на поперечный разрыв на тензометрическом столике устанавливали оснастку, в которой во втулочных зажимах нить размещалась горизонтально. При этом в рычаге закрепляли клиновой упор. При опускании рычага упор давил на нить перпендикулярно ее оси, вызывая сложное нагружение, которое воспринималось тензодатчиком. Нагружение продолжали до момента разрыва нити.

Испытания нитей из ТСВМ-ДЖ и СВМПЭ показали следующее. Кинетика нарастания нагрузки при ее приложении к нити ТСВМ-ДЖ в осевом направлении представлена на рис. 3, к нити из СВМПЭ – на рис. 4.



а



б

Рис. 3. Кинетика процесса осевого разрыва арамидной нити ТСВМ-ДЖ толщиной 0,03 мм: а – контрольный образец; б – образец после СВЧ обработки

Графики показывают различный характер разрушения нитей из исследованных материалов. Арамидные нити рвутся практически сразу, графики имеют плавную форму. Графики разрыва нитей из СВМПЭ имеют «пильчатый» характер, показывают периодические всплески и падения нагрузки.

Анализ графиков показывает, что СВЧ обработка при среднем значении удельной мощности повышает осевую разрывную нагрузку на нить ТСВМ-ДЖ практически в 2 раза. Влияние СВЧ электромагнитного поля на прочность нити при воздействии нагрузки в поперечном направлении значительно менее выражено. Прочность на разрыв в поперечном направлении возрастает не более чем на 18-20%.

При СВЧ воздействии малой удельной мощности (4-5 Вт/см³) эффекты по увеличению разрывной прочности значительно ниже и не превышают 25-30 %, что может быть связано с недостатком энергии для организации значительного количества межволоконных связей. При воздействии СВЧ электромагнитного поля более высокой

удельной мощности (28-32 Вт/см³) увеличение прочности или не наблюдается, или она даже снижается на 7-10 %. Этому причиной может быть чрезмерный разогрев нитей, приводящий к деструкции составляющих их волокон. Контрольная нить СВМПЭ после разрыва имеет расслоения составляющих волокон, обработанная нить заметных расслоений не имеет. Нити толщиной 0,05 мм после обработки имеют увеличенную в 1,6-1,7 раза прочность на разрыв, нити толщиной 0,03 мм – примерно в 1,6 раза. При этом отмечено удлинение обработанной нити после разрыва на 15-20 мм. Уменьшение толщины контрольной нити с 0,05 мм до 0,03 мм снижает прочность разрыва на 55 %, обработанной нити – на 65 %.

На основе анализа полученных результатов может быть предложен следующий механизм повышения прочности арамидных нитей после воздействия СВЧ электромагнитного поля. Исследованиями [3, 4] установлено, что структурной единицей арамидных волокон являются жесткие макромолекулы или их агрегаты – фибриллы.

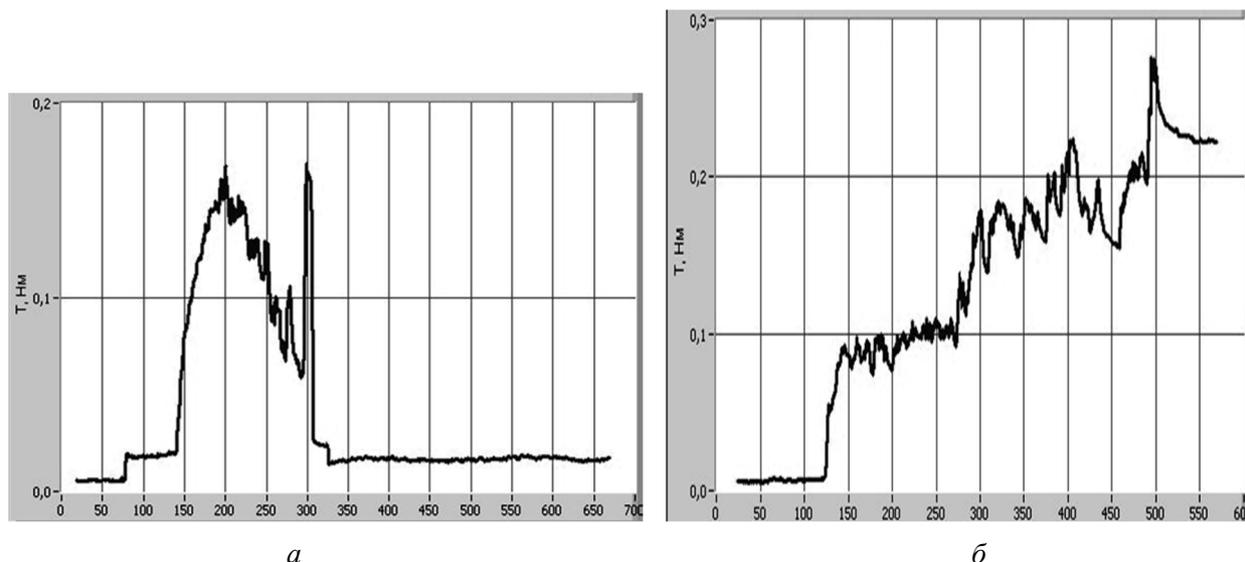


Рис. 4. Кинетика процесса осевого разрыва нити СВМПЭ толщиной 0,05 мм: *а* – контрольный образец, *б* – обработанный образец

Высокая прочность и жесткость таких волокон при растяжении обуславливаются высокой степенью ориентации макромолекул вдоль оси волокна и высокой энергией диссоциации химических связей. Различие напряженного состояния соседних структурных элементов вызывает возникновение в граничной области между волокнами, образующими нить, напряжений сдвига. В результате одноосное растяжение волокна сопровождается прорастанием межфибриллярных трещин вдоль направления действия растягивающего усилия. Однако расщепленное волокно до какого-то предела еще в состоянии воспринимать нагрузку, поэтому графики на рис. 3 *а, б* имеют характер плавного нарастания до какого-то значения. Расщепление нитей, видимо, сопровождается одновременным обрывом отдельных наиболее напряженных фрагментов волокна, после чего нагрузка воспринимается следующим пучком фибрилл до тех пор, пока оставшиеся волокна оказываются не в состоянии сопротивляться нагрузке растяжения. Происходит катастрофическое полное разрушение, сопровождающееся интенсивным расщеплением и распушиванием образца. Воздействие СВЧ электромагнитного поля, скорее всего, способствует росту количества межфибриллярных связей на уровне макромолекул. При росте нагрузки формируются условия совместной, а не раздельной

работы волокон. Ослабляющее структуру возникновение упомянутых выше трещин нивелируется в этом случае описанным действием образованных в СВЧ электромагнитном поле межволоконных структур и дополнительных связей фибрилл.

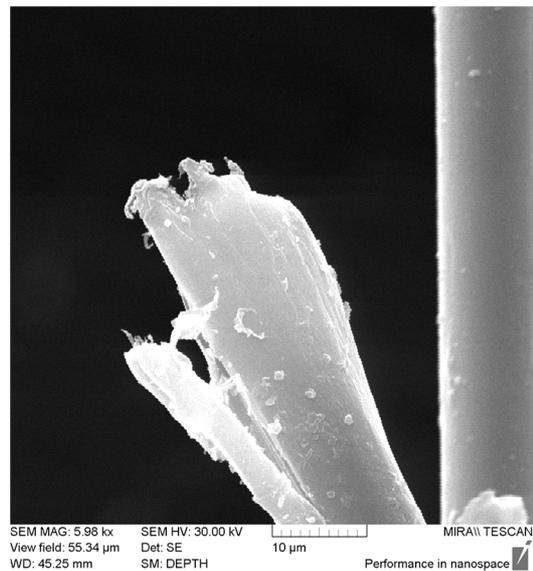
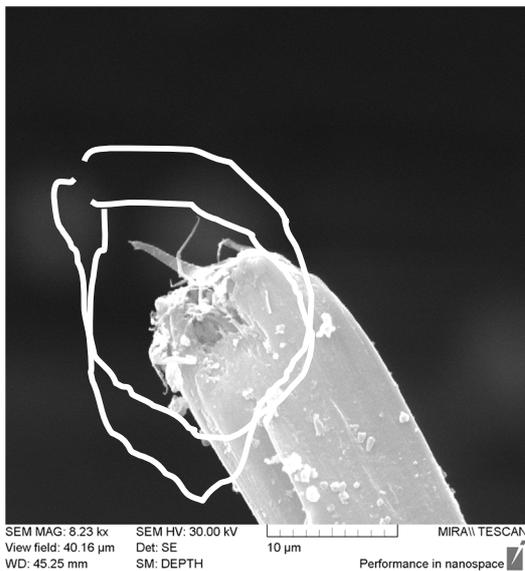
Предложенный механизм в целом подтверждается микрофотографиями (рис. 5), на которых отчетливо видны расщепления контрольных волокон и наличие новых образований на обработанных волокнах, способствующих увеличению контактного взаимодействия.

Характер графиков разрушения контрольных нитей из СВМПЭ (рис. 6 *а*) свидетельствует о том, что каждое волокно или группы волокон работают на растяжение отдельно, не образуя единой структуры нити. По мере разрыва отдельных волокон возникает кратковременное уменьшение прочности, а затем оставшиеся волокна, обладающие повышенным запасом прочности, воспринимают прилагаемую нагрузку.

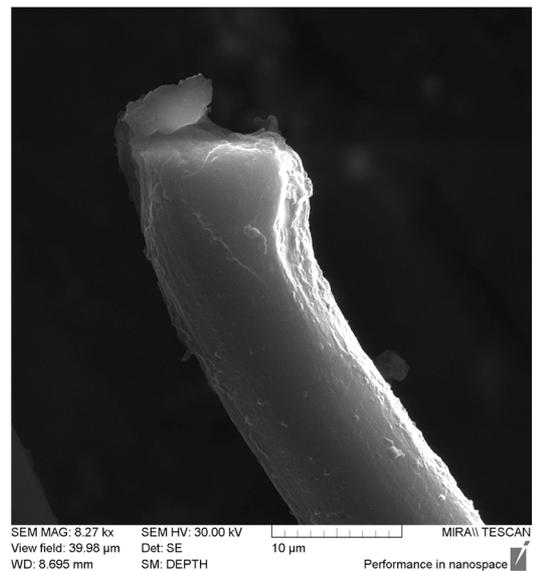
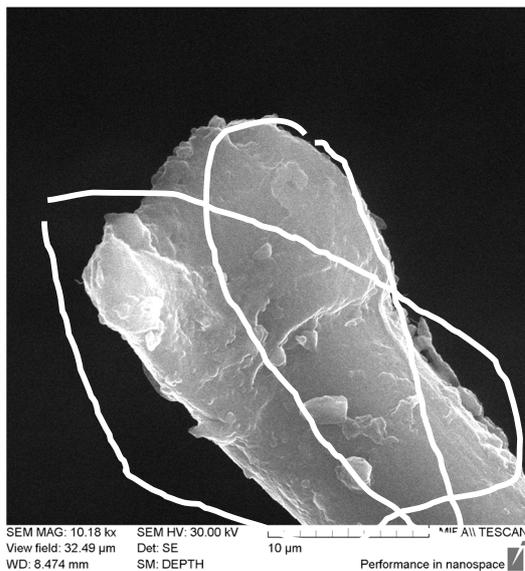
В итоге после разрыва большинства волокон нить теряет целостность и разрывается. При этом каждое волокно испытывает напряжения, приводящие к смещению больших молекул и их микродеформациям. После снятия напряжений эти микродеформации приводят к смещению волокон и появлению продольных разрывов и к «распушиванию» в области потери нитью целост-

ности. Повышение прочности обработанных в СВЧ электромагнитном поле нитей связано с их консолидацией в пучки (рис. 6 б) в результате местных микроплавлений и формирования мостиков микросварки между волокнами. Меньшее расслоение и «распушивание» разорванной нити, подвергнутой обработке в СВЧ электромагнитном поле, может быть связано со следующим. В электромагнитном поле большие молекулы волокон СВМПЭ приобретают большую эластичность, что подтверждается отмеченным выше удлинением нити до 20 мм перед

разрывом, то есть повышенная эластичность способствует определенной релаксации внутренних напряжений и уменьшению поперечной деформации волокон. После разрыва нити составляющие ее волокна сохраняют примерно прямолинейную ориентацию в направлении приложенной нагрузки. Волокна исходного СВМПЭ имеют большую упругость, что способствует сохранению высоких внутренних напряжений после снятия нагрузки (разрыва) и приводит к разнонаправленным деформациям и «распушиванию» жгута волокон (нити).



a



б

Рис. 5. Микрофотографии отдельных нитей ТСВМ-ДЖ в месте разрыва: *a* – контрольные нити; *б* – обработанные нити. Очерчена область с отличиями в строении волокна

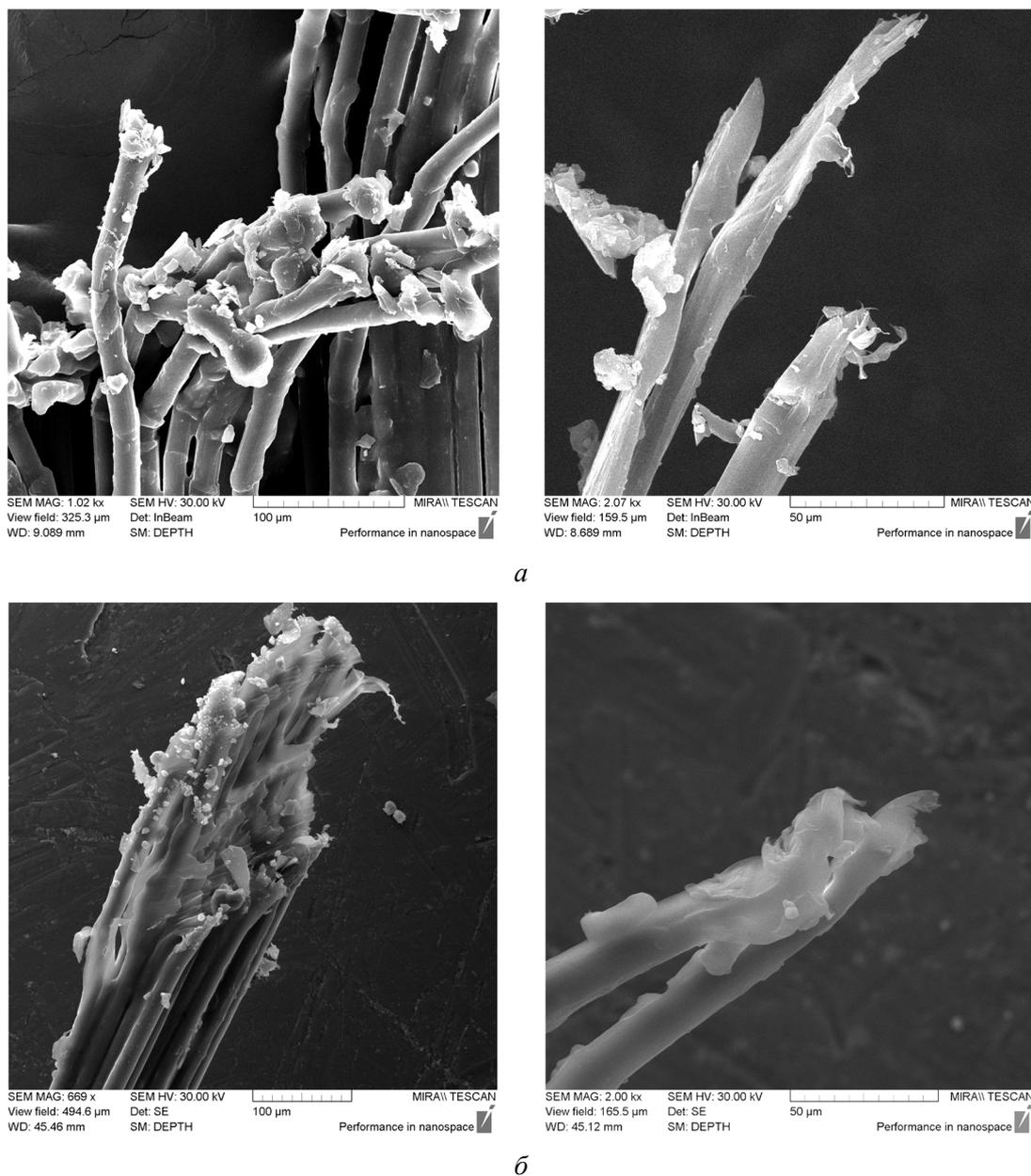


Рис. 6. Микрофотографии отдельных нитей СВМПЭ в месте разрыва: *а* – контрольные нити; *б* – обработанные нити

Кратковременное воздействие СВЧ электромагнитного поля на нити из материалов, используемых при изготовлении гибких индивидуальных средств защиты типа ТСВМ и сверхвысокомолекулярного полиэтилена способствует повышению разрывной прочности отдельных нитей. Причиной полученных результатов является формирование за счет взаимодействия электромагнитного поля с макромолекулами образующего волокно полимера дополнительных зон связей на микроуровне (волокна и фибриллы) и наноуровне (макромолекулы),

а также повышение эластичности волокон. Это обеспечивает повышение суммарной разрывной прочности нитей, а также увеличивает период времени до разрыва.

Применение обработки в СВЧ электромагнитном поле окончательно изготовленных элементов из арамидных тканей и СВМПЭ позволит повысить надежность и стойкость средств индивидуальной защиты личного состава механизированных частей российской армии, экипажей летательных аппаратов и судов, полиции и МЧС, а также легких защитных композиционных армиро-

ванных конструкций технических систем различного назначения.

Для разработки серийных технологий и оборудования необходимо формирование строгого научного описания процессов, происходящих на микро- и наноуровне в волокнистых полимерных материалах при

воздействии электромагнитных полей различного частотного диапазона и интенсивности, для чего целесообразно продолжение исследований с использованием современной аналитической аппаратуры и компьютерного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каблов Е.Н.** Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3-33.

2. **Каблов Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е.Н. Каблов // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. № 6. С. 520-530.

3. **Шустов Ю. С.** Исследование физико-механических свойств тканей из нитей Русар / Ю.С. Шустов, А.В. Курденкова // *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2016. Т. 3. С. 36-40.

4. **Шульдешова П.М.** Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий / П.М. Шульдешова, Г.Ф. Железина // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журнал*. 2014. № 9.

5. **Bhatnagar A.** Lightweight ballistic composites / A. Bhatnagar. Woodhead Publishing Limited: Cambridge England, 2006. 416 p.

6. **Чистяков Е.** Российские бронежилеты и новые броневые материалы / Е. Чистяков. Электронный ресурс: http://ser-sarajkin.narod2.ru/ALL_OUT/TiV_Out_13/RuPersAr/RuPersAr001.htm.

7. **Игнатова А.М.** Аналитический обзор современных и перспективных материалов и конструкций бронепреград и защит от поражения / А.М. Игнатова, А.О. Артемов // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 6. С. 101-105.

8. **Сафонов П.Е.** Разработка оптимальных технологических параметров изготовления арамидных тканей технического назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02 / П.Е. Сафонов. М., 2013. 358 с.

9. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.

10. **Zlobina I.V.** The Influence of Electromagnetic Field Microwave on Physical and Mechanical Characteristics of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) Structural / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Solid State Phenomena, Materials Science Forum*. 2016. Vol. 870. P. 101-106.

11. **Zlobina I.V.** The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // *Научные технологии*. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.

Ирина В. Злобина – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Бекренёв Николай Валерьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nikolai V. Bekrenev – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

ОБОСНОВАНИЕ КОНТАКТНОГО МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ И КАНАЛОВ В ИЗДЕЛИЯХ ТРАНСПОРТНОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.М. Сарсенгалиев, И.В. Злобина, Н.В. Бекренёв

VALIDATION OF THE CONTACT METHOD FOR ULTRASONIC CLEANING OF REMOTE INTERNAL CAVITIES AND CHANNELS IN THE PRODUCTS OF TRANSPORT AND POWER ENGINEERING INDUSTRIES

A.M. Sarsengaliyev, I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

Показана перспективность удаления загрязнений методом ультразвуковой очистки. Предложена зависимость, позволяющая определить параметры ультразвукового воздействия по критерию изгибных напряжений в очищаемых объектах, превышающих адгезионную прочность загрязнений. Определено минимальное время разрушения загрязнений, подтвержденное экспериментально.

Ключевые слова: ультразвук, производительность очистки, кавитация, полости и каналы, загрязнения, контакт, изгибные напряжения, адгезионная прочность

Современное транспортное и энергетическое машиностроение характеризуется применением в перспективных двигателях, топливно-распределительных системах и устройствах транспортировки энергоносителей (например, природного газа) изделий, содержащих элементы сложной геометрической формы, в том числе с закрытыми полостями и каналами. Характерными представителями подобных изделий являются газоперекачивающие агрегаты (ГПА), в качестве привода которых используются конверсионные газотурбинные двигатели. Паспортными данными регламентируются определенная мощность, частота вращения ротора турбин высокого и низкого давле-

Removing pollutants by means of the method of ultrasonic cleaning has proved to be promising. The proposed dependence ensures determination of parameters for the ultrasonic influence by the criterion of flexural tension in the cleared objects exceeding the adhesive durability of pollution. The minimum time for the destruction of pollution was defined and demonstrated experimentally.

Keywords: ultrasound, cleaning productivity, cavitation, cavities and channels, pollution, contact, flexural tension, adhesive durability

ния, а также выбросы в окружающую среду соединений классов COx и NOx. Опыт эксплуатации горелочных устройств на компрессорных станциях выявил некоторые особенности применения данных систем. В процессе эксплуатации выявляется нарушение требуемых параметров горения газозоудшной смеси, что связано с отложением соединений сопутствующих горючему газу элементов на стенках каналов и отверстий. Это вызывает повышенное газодинамическое сопротивление, что приводит к снижению фактической мощности ГПА, а также повышенному содержанию соединений COx и NOx, что сказывается отрицательно на экологических показателях агре-

гата. Отмеченные нарушения проявляются задолго до выработки горелочным устройством паспортного ресурса, что вызывает необходимость замены комплекта этих устройств на новый и дополнительные финансовые расходы для компрессорной станции, что в конечном итоге вызывает рост оплаты услуг по транспортировке газа для потребителей.

Решить указанные проблемы можно путем восстановления загрязненных изделий методами очистки. Среди известных методов очистки наиболее эффективным является ультразвуковой, основанный на эффекте акустической кавитации, при помощи которого удаляется до 98% загрязнений [1]. Принцип ультразвуковой очистки основан на механическом действии ультразвуковых волн на загрязнения, находящиеся на поверхности деталей. При распространении ультразвуковых волн в полупериод растяжения колеблющегося тела в водном растворе происходит возникновение пузырьков, заполненных парами жидкости и растворенными в ней воздухом и другими газами, а в последующий полупериод сжатия колеблющегося тела – их захлопывание. Ударная волна придает жидкости (на микроучастке схлопывания пузырька) огромное ускорение. При схлопывании кавитационного пузырька возникает локальное кратковременное повышение температуры до нескольких тысяч градусов, а также местное повышение давления. Поскольку таких пузырьков образуется до нескольких миллионов в секунду, образуется кавитационная область, где действие указанных факторов весьма значительно. Схлопывание кавитационных разрывов вызывает образование ударных волн, которые создают в ближайшей зоне давления, в 100 раз превышающие первичное давление акустического поля. Под действием этой силы связь загрязнения с поверхностью детали, опущенной в жидкость, нарушается почти мгновенно, и загрязнение удаляется с поверхности [1].

С учетом сложности конструкции горелочного устройства, характеризуемого наличием теневых зон для распространения

волн, изложенные особенности ультразвуковой кавитации позволяют предположить, что обычная схема очистки даже при высокой интенсивности ультразвукового поля обеспечит удаление загрязнений только с внешних поверхностей деталей.

Нами предложено обеспечивать удаление загрязнений путем генерации в элементах очищаемого изделия изгибных напряжений, величина которых превышает адгезионную прочность их слоя. Изгибные напряжения создаются путем формирования изгибных ультразвуковых колебаний в очищаемой области изделия. Целью исследований является повышение эффективности ультразвуковой очистки закрытых полостей и каналов малого диаметра в деталях машиностроения типа горелочных устройств на основе обоснования технологии, включающей сочетание общего кавитационного и местного контактного вибродействия. При контакте ультразвукового излучателя на изделие будет действовать нагрузка, складывающаяся из переменной и постоянной составляющей.

Выполнили анализ существующего метода ультразвуковой кавитационной очистки и предлагаемого метода контактной очистки с учетом скрытого характера загрязнений при допущении, что причиной разрушения последних являются внутренние напряжения, возникающие под действием кавитации и, соответственно, изгибных высокочастотных колебаний очищаемой поверхности. Схема разрушения слоя загрязнений под действием изгибных колебаний представлена на рис. 1.

Условие разрушения слоя внутренних загрязнений может быть записано следующим образом:

$$\sigma_F \geq [\sigma]_{адг}, \quad (1)$$

где σ_F – изгибные напряжения, вызванные ультразвуковыми колебаниями; $[\sigma]_{адг}$ – адгезионная прочность (прочность сцепления) слоя загрязнений с очищаемой поверхностью.

Изгибные напряжения согласно известным выражениям сопротивления материалов [2] определяются по выражению

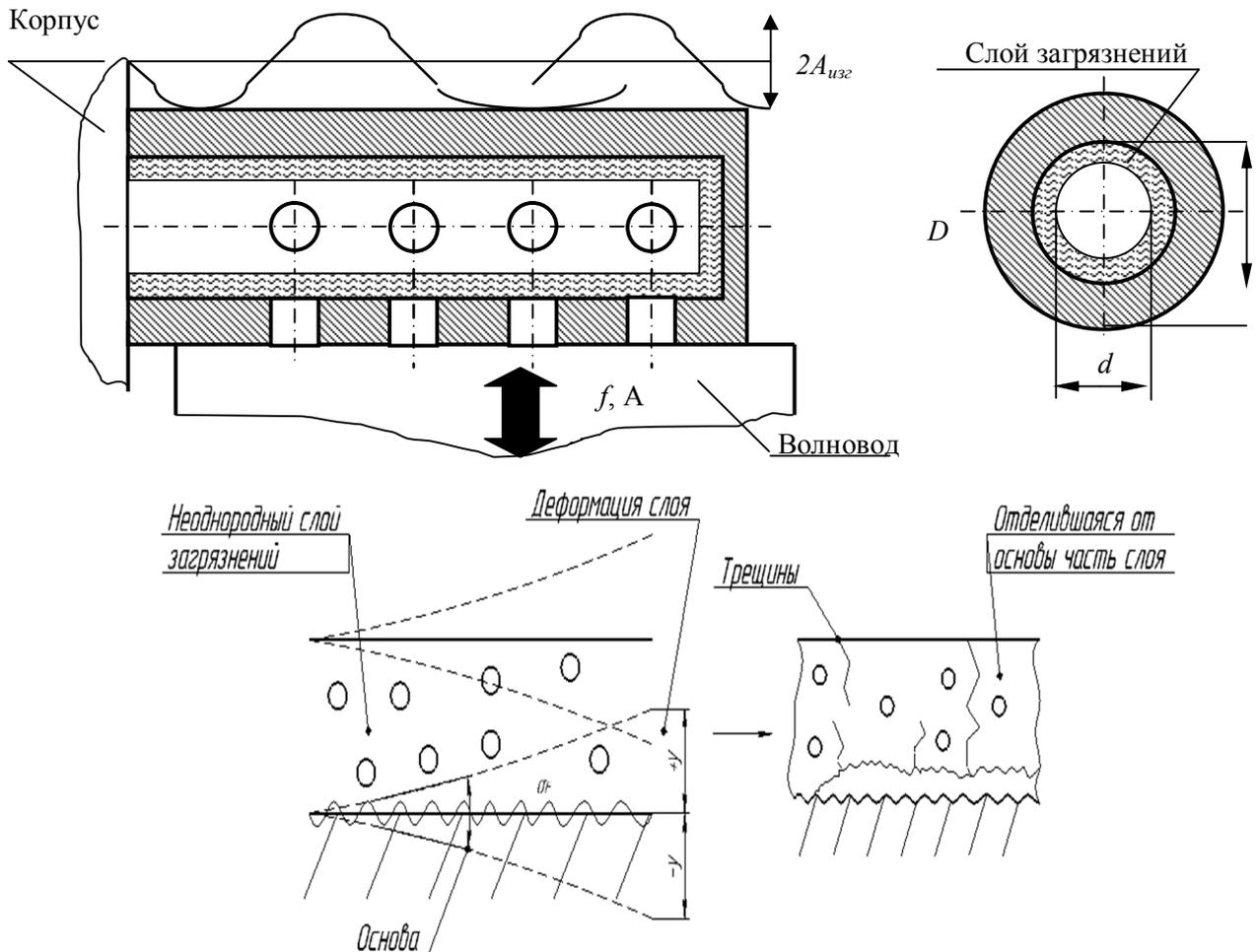


Рис. 1. Схема деформаций элемента конструкции и возникновения напряжений в слое загрязнений при ультразвуковом нагружении

$$\sigma_F = \frac{M}{W}, \quad (2)$$

где M – изгибающий момент; W – момент сопротивления сечения изгибающегося элемента.

Примем для покрытия форму трубки длиной, равной рассматриваемому элементу конструкции. Для кольцевого сечения слоя покрытия момент сопротивления равен [2]:

$$W = 0,1D^3(1 - c^4), \quad (3)$$

где D – диаметр отверстия канала в очищаемом изделии; $c = d/D$, d – внутренний диаметр слоя загрязнений на поверхности канала.

Изгибающий момент, вызванный динамической силой вследствие контакта элемента конструкции с колеблющимся с ультразвуковой частотой волноводом:

$$M = P_0 l = CA^{0,56} l, \quad (4)$$

где C – эмпирический коэффициент динамической силы ультразвука; A – амплитуда ультразвуковых колебаний; l – длина очищаемого элемента конструкции.

В данном выражении величина P_0 взята по зависимости, полученной А.И. Марковым [3].

Подставив (2) и (3) в (1), получим выражение для определения внутренних напряжений изгиба в слое загрязнений, связывающее величину напряжений с амплитудой ультразвуковых колебаний и конструктивными особенностями очищаемого объекта:

$$\sigma_F = \frac{CA^{0,56} l}{0,1D^3(1 - c^4)}. \quad (5)$$

С учетом многоциклового характера нагружений элемента конструкции изгибные напряжения необходимо определять с учетом эквивалентного $N_{\text{Э}}$ и базового N_B циклов его нагружения по известной зависимости [2]:

$$\sigma_{F\text{Э}} = \sigma_F m \sqrt{\frac{N_B}{N_{\text{Э}}}}, \quad (6)$$

где $m = 8$; $N_B = 10^7 - 10^8$ – рекомендуемые значения базового числа циклов нагружения машиностроительных конструкций, при превышении которого возможно разрушение объекта [2].

Примем эквивалентное число циклов нагружений равным частоте ультразвуковых колебаний вынуждающей силы, то есть волновода $N_{\text{Э}} = f$. С учетом этого, подставив (5) в (6), можно переписать (1) следующим образом:

$$\frac{CA^{0,56}l}{0,1D^3(1-c^4)} 8 \sqrt{\frac{N_B}{f}} \geq [\sigma]_{\text{адг}}.$$

Из данного соотношения можно получить выражение для определения амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний, сообщаемых изделию для обеспечения отделения слоя загрязнений от поверхности очищаемого канала:

$$A \geq \frac{\{0,1[\sigma]_{\text{адг}} D^3 (1-c^4)\}^{1,78}}{(Cl)^{1,78} \left(\frac{N_B}{f}\right)^{0,22}}. \quad (7)$$

По данным [3], принимая материал загрязнений преимущественно хрупким, можно принять $C = 16,6$. Расчетом по зависимости (5), принимая стандартное значение $f = 22000$ Гц, получены графики (рис. 2), позволившие установить диапазон параметров эффективной контактной очистки с учетом адгезионной прочности загрязнений $[\sigma]_{\text{адг}} = 12-15$ Н/мм² (максимальные значения по априорной информации).

Анализ графика позволяет определить амплитуду колебаний в случае каналов относительно большего диаметра в 10 мкм, в случае каналов диаметра 1-2 мкм. При этом считали толщину слоя загрязнений постоянной. Примем величину базового цикла нагружений $N_B = 10^7$, тогда период времени до преодоления предела выносливости слоя загрязнений (величины адгезии) при стандартной частоте ультразвука будет равен $t = N_B / f = 10^7 / 22 \cdot 10^3 = 454,5$ с, что составляет примерно 7 минут.

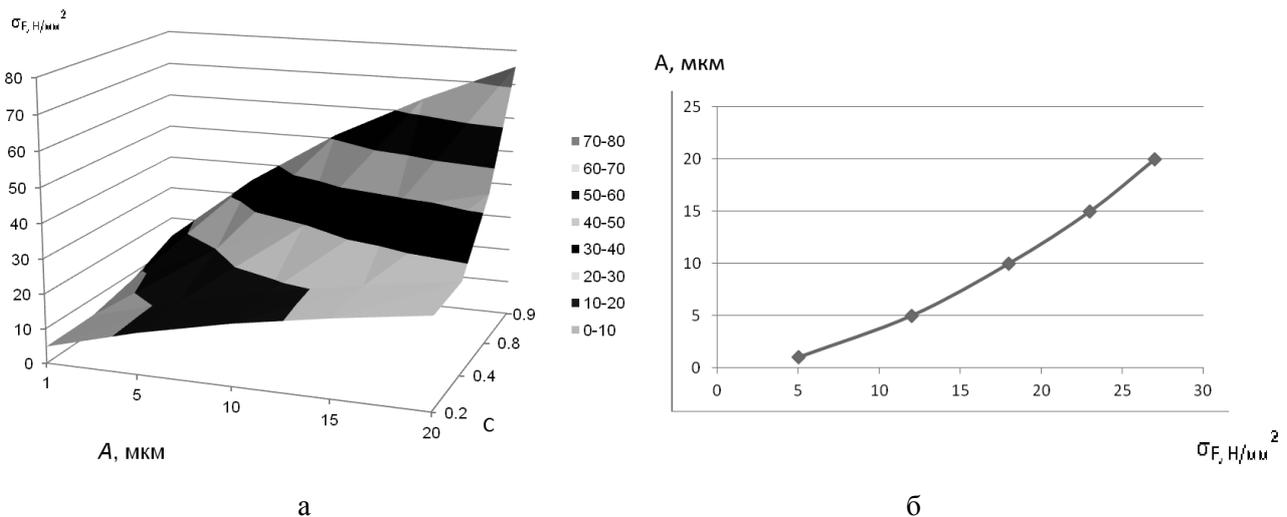


Рис. 2. Изгибные напряжения σ_F (а) в трубчатой конструкции, подвергнутой воздействию ультразвука, в зависимости от амплитуды A и соотношения диаметра канала и внутреннего диаметра поверхности загрязнений c и соответствующие напряжениям средние значения амплитуды ультразвуковых колебаний (б)

В ходе проведенных экспериментальных исследований при помощи компьютерного виброакустического комплекса ВК-01 и электронного частотомера ЧЭ-33 определена фактическая резонансная ча-

стота ультразвукового преобразователя, при которой обеспечивается амплитудное значение виброускорения (см. таблицу) $f = 23350$ Гц.

Зависимость виброускорения и частоты сигнала ультразвукового генератора

Частота f , Гц	22280	22540	22950	23110	23280	23350	23500	23750
Виброускорение a , м/с ²	420	450	460	220	320	500	400	400

С учетом фактической резонансной частоты период времени разрушения слоя загрязнений может быть равен:

$$t_{\min} = N_{B\min} / f = 10^7 / 23350 = 428 \text{ с} = 7 \text{ мин},$$

$$t_{\max} = N_{B\max} / f = 10^8 / 23350 = 4282 \text{ с} = 71,4 \text{ мин}.$$

В ходе экспериментальных исследований [4] нами установлено, что время восстановления пропускной способности каналов в горелочных устройствах предложенным методом составляет 6-7 минут. В ходе производственных испытаний метода на реальных горелочных устройствах при частоте и амплитуде ультразвуковых колебаний преобразователя соответственно 22,3 кГц и 9-10 мкм время восстановления

пропускной способности каналов горелочных устройств в партии составило 10-60 минут.

Таким образом, с учетом существенно-го разброса в адгезионной прочности и толщине слоя загрязнений в каналах горелочных устройств фактическое время их удаления в целом совпадает со временем, установленном теоретически при определенной по полученной нами зависимости (7) амплитуде ультразвуковых колебаний. Это позволяет использовать полученную нами зависимость для предварительного расчета амплитудно-частотной характеристики ультразвукового преобразователя для очистки каналов контактным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: учеб. пособие / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: СГТУ, 2009. 348 с.

2. **Водопьянов, В. И.** Курс сопротивления материалов с примерами и задачами / В.И. Водопьянов, А.Н. Савкин, О.В. Кондратьев. Волгоград: ВолгГТУ. 2012. 136 с.

3. **Марков А.И.** Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А.И. Марков. М.: Машиностроение, 1968. 324 с.

4. Новая ультразвуковая технология восстановления работоспособности горелочных устройств газоперекачивающих агрегатов / Н.В. Бекренев, М.В. Аврамов, А.М. Сарсенгалиев и др. // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 2. С. 39-43.

Сарсенгалиев Айдос Миргенгалиевич – аспирант кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aydos M. Sarsengaliyev – Graduate, Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Zlobina – PhD, Associate Professor, Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikolai V. Bekrenev – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Engineering Mechanics and Machine Parts, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

УДК 621.365

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ТОКА ИНДУКТОРА НА ТЕМПЕРАТУРУ НАГРЕВА ТИТАНОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ДИСКОВОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко, В.А. Кошуро, И.В. Родионов

IMPACT OF INDUCTOR CURRENT INTENSITY ON THE HEATING TEMPERATURE RATE FOR TITANIUM DISC-SHAPED AND CYLINDRICAL ITEMS

A.A. Fomin, M.A. Fomina, A.V. Voyko, V.A. Koshuro, I.V. Rodionov

Представлены результаты измерения силы тока индуктора и температуры нагрева титановых образцов дисковой и цилиндрической формы при обработке токами высокой частоты в частотном диапазоне от 90 до 120 кГц. Установлено влияние силы тока индуктора в диапазоне от 0,3 до 8,5 кА на кинетику нагрева образцов-дисков в температурном диапазоне от 800 °С до 1500 °С на воздухе. Получена регрессионная модель зависимости температуры от электрической мощности, потребляемой устройством нагрева, и продолжительности термообработки.

Ключевые слова: токи высокой частоты, титан, кинетика нагрева, термообработка

The paper presents the measurement results for current intensity in the inductor and the rate of heating temperature for titanium disc-shaped and cylindrical samples when treated with high-frequency currents (HFC) within 90 to 120 kHz. The influence of the current in the inductor in the range from 0.3 to 8.5 kA on the heating kinetics of disc-shaped samples within 800 °C to 1500 °C in the air has been identified. A regression model describing the temperature change depending on the power consumed by the HFC heat treatment device as well as its duration has been simulated.

Keywords: high-frequency currents, titanium, heating kinetics, heat treatment

При нагреве токами высокой частоты (ТВЧ) титановых образцов массой 1,1-1,3 г

дисковой формы диаметром 14 мм и высотой 2 мм и цилиндрических изделий диа-

метров 3,5-4 мм и длиной 10-13 мм используются специальные конструкции индукторов цилиндрической спиралевидной формы. Особенностью конструкции является наличие открытой с двух сторон кварцевой камеры для доступа воздуха к нагреваемому изделию. Для электрического согласования индуктора с генераторной частью устройства для нагрева ТВЧ предусмотрено два слоя витков (рис. 1). Это обеспечивает увеличенную индуктивность индуктора с нагреваемым изделием.

Система индуктор – изделие изучается с применением комплекса стандартных измерительных методов, предусматривающих ряд процедур:

1. Определение резонансной частоты $f_{рез}$ по осциллограммам.
2. Измерение силы тока I_K в колебательном контуре (или силы тока на индукторе) на резонансной частоте.
3. Измерение электрической мощности $P_{эл}$, потребляемой устройством нагрева ТВЧ.

4. Измерение температуры T образца дисковой формы при различной величине электрической мощности $P_{эл}$.

В процессе изучения системы индуктор – изделие определяются основные характеристики устройства нагрева ТВЧ и процесса термообработки. Определение силы тока на индукторе необходимо для разработки технологического процесса с использованием установок нагрева ТВЧ, характеристики которых отличаются от представленных в данной работе. Однако удобнее использовать в качестве технологического фактора величину потребляемой электрической мощности, определяемой произведением напряжения на выходе с ЛАТР и действующего значения потребляемой силы тока [1].

Таким образом, целью данной работы является установление зависимости между потребляемой устройством нагрева ТВЧ электрической мощностью и силой тока на индукторе, а также исследование кинетики нагрева при различной величине мощности.

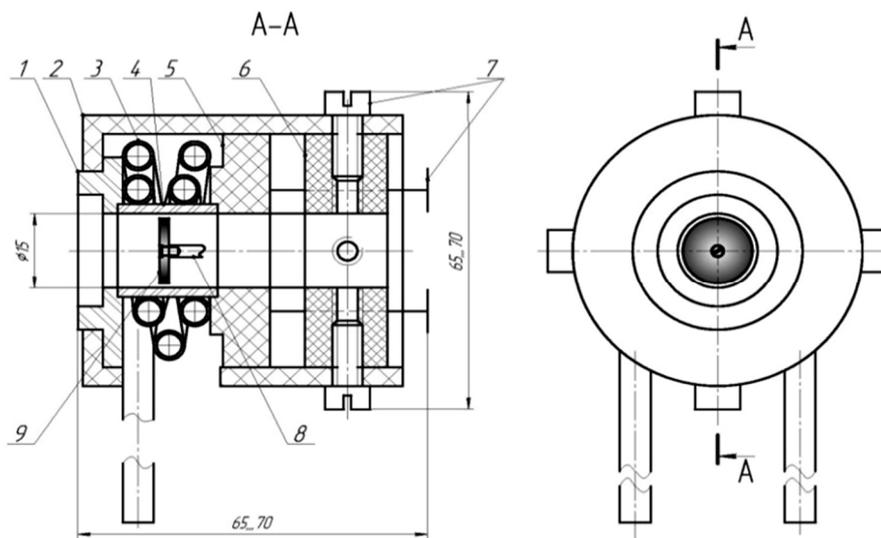


Рис. 1. Эскиз индуктора для термообработки образцов (дисков) диаметром до 14 мм: 1 – керамическая фиксирующая шайба; 2 – диэлектрический защитный кожух; 3 – медный водоохлаждаемый индуктор; 4 – кварцевая трубчатая камера (муфель); 5 – фиксирующая шайба; 6 – упорная фторопластовая шайба; 7 – фиксирующие и прижимные диэлектрические винты; 8 – держатель образца (шток); 9 – экспериментальный образец (диск)

Для измерения силы тока на индукторе использовались токовые клещи «UT 205» (Uni-Trend Group Ltd.). Данная модель обеспечивает измерение действующего значения силы тока I_K в колебательном

контуре от 0 до 4 кА в высокочастотном диапазоне f не менее чем до 150 кГц. Прибор имеет возможность расширения измеряемого диапазона до 10 кА при кратковременном использовании (рис. 2).

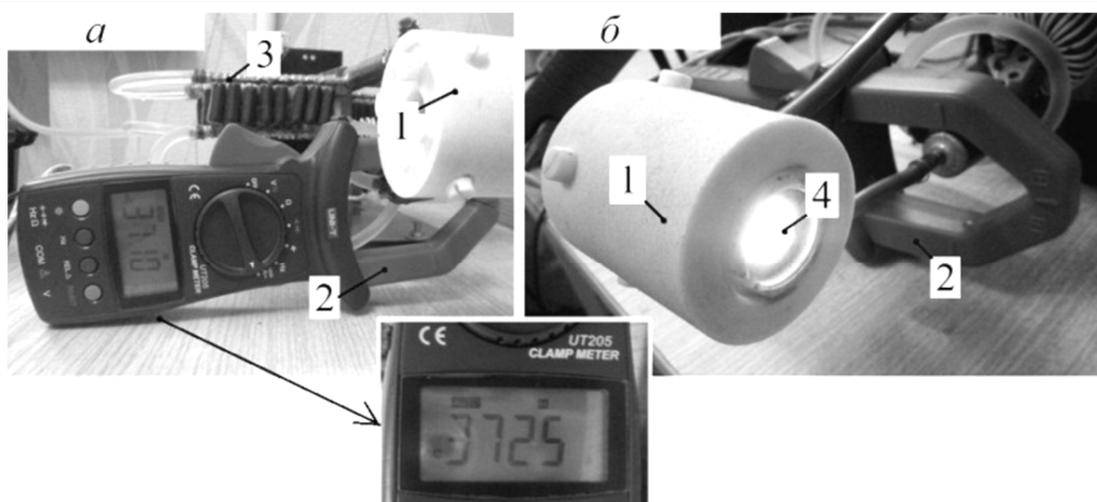


Рис. 2. Измерение силы тока I_K в колебательном контуре: *а* – расположение токовых клещей 2 относительно индуктора 1 и конденсаторной батареи 3 с визуализацией цифрового индикатора (действующее значение силы тока около 3,7 кА); *б* – измерительная часть токовых клещей 2 со стороны нагреваемого образца (диска) 4 в индукторе 1

Контроль температуры T нагреваемых образцов в диапазоне от комнатной $+20^{\circ}\text{C}$ до $+1100^{\circ}\text{C}$ производился бесконтактным методом с применением инфракрасных (ИК) пирометров «DT-8828» (CEM Instruments) и высокотемпературного «MS6550B» (Precision Mastech). Расположение элементов системы индуктор – изделие относительно ИК пирометра предусматривает наличие воздушного промежутка не менее 50-80 мм, исключающего термическое повреждение измерительного прибора (рис. 3) [1, 2].

В случае обработки ТВЧ цилиндрических конструкций (стоматологических имплантатов) с диаметром не более 4 мм контроль температуры осуществлялся визуально через технологические окна (промежутки между витками индуктора) и кварцевую камеру (рис. 4).

Типовая резонансная характеристика колебательного LC -контра, содержащего системы индуктор – образец (диск), имеет максимум при 89,5-90 кГц в выбранном частотном диапазоне (рис. 5).

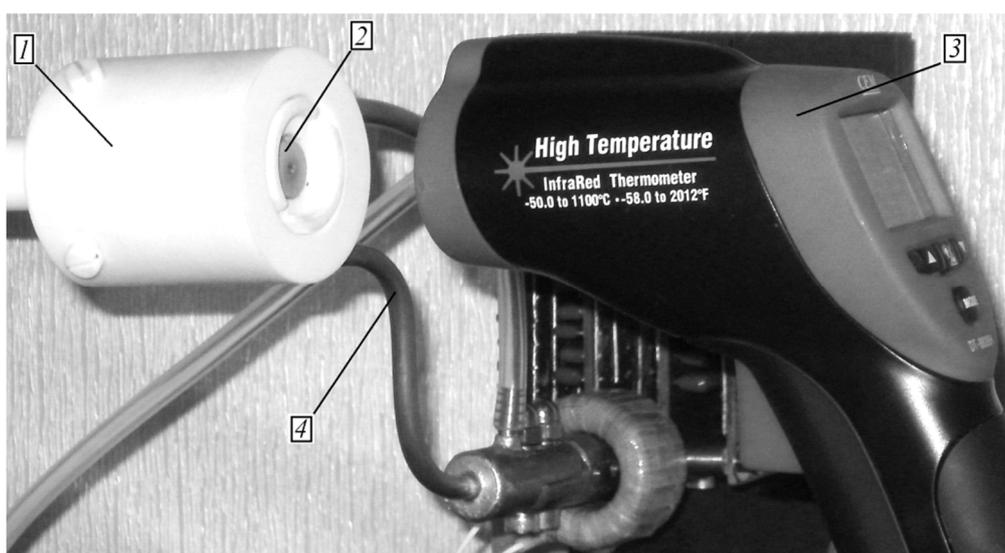


Рис. 3. Измерение температуры образцов (дисков) бесконтактным методом: 1 – кожух камеры индуктора 4 с образцом 2; 3 – ИК пирометр

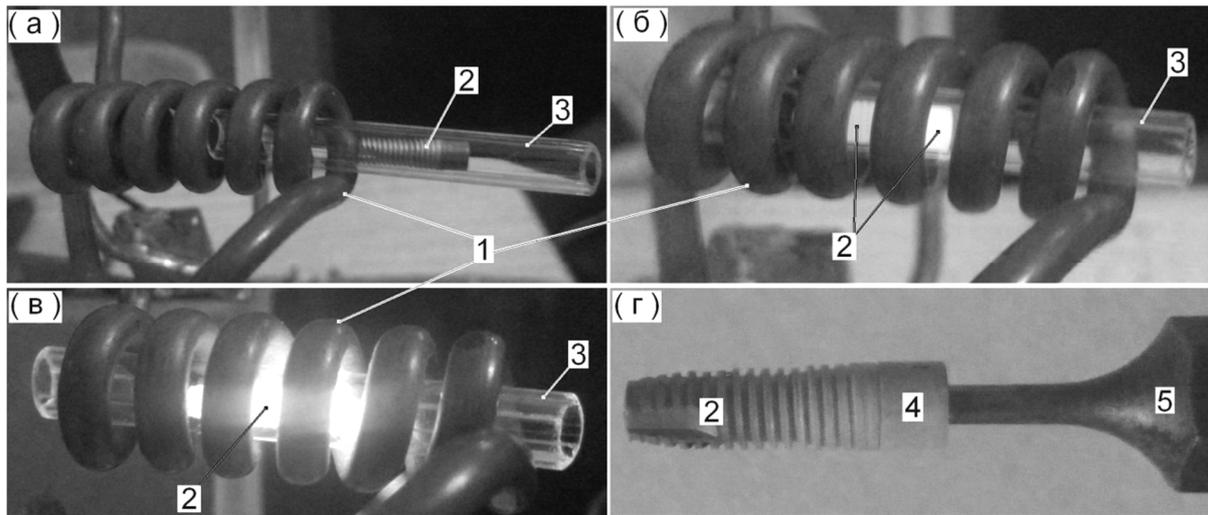


Рис. 4. Обработка ТВЧ цилиндрических изделий (внутрикостных имплантатов): *а* – загрузка кварцевой камеры 3 с титановым изделием 2 в индуктор 1; *б* – среднетемпературная обработка ($T = 800-830^{\circ}\text{C}$); *в* – высокотемпературная обработка ($T = 1000-1050^{\circ}\text{C}$); *г* – имплантат с оксидным покрытием ($D = 3,7-3,75$ мм), заглушка 4 и держатель 5

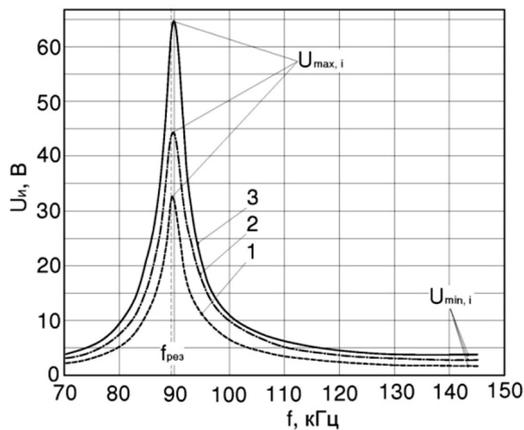


Рис. 5. АЧХ напряжения на индукторе U_n для колебательного контура с системой индуктор – образец (диск с $D = 14$ мм), полученные при различной величине питающего напряжения U_n : 1 – $U_n = 75$ В; 2 – $U_n = 100$ В; 3 – $U_n = 150$ В

Подстройка системы индуктор – изделие в резонанс обеспечивалась с помощью потенциометра для точной регулировки, входящего в задающую RC-цепь генератора [3]. Отклонение от резонансной частоты более чем на 2,5% приводило к снижению силы тока на индукторе практически вдвое, а отклонение от резонансной частоты на 5 и 10% приводило к снижению силы тока примерно в 15 и 30 раз соответственно. Отклонение от резонансной частоты с помощью потенциометра точной подстройки осуществлялось в диапазоне $f_{res} \pm (10-15\%) f_{res}$.

Данное схмотехническое решение позволяет регулировать величину потребляемой мощности устройства обработки ТВЧ, однако для более стабильного управления потребляемой электрической мощностью $P_э$ было использовано регулирование с помощью питающего напряжения U_n (рис. 6).

В графическом виде ВАХ в резонансном режиме устройства обработки ТВЧ представляют собой квазилинейные зависимости $I_n(U_n)$, на которых для большей наглядности линейные участки показаны пунктирной линией, а маркером «квадрат» отмечены точки перегиба (рис. 6).

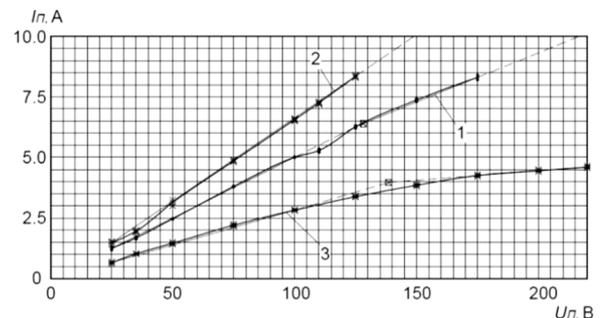


Рис. 6. ВАХ для определения потребляемой электрической мощности $P_э$ устройством обработки ТВЧ при использовании различных типов систем: 1 – индуктор – образец (диск); 2 – индуктор – имплантат; 3 – индуктор – изделие с увеличенными массогабаритными характеристиками (масса изделия в 80 раз больше, чем у образцов дисковой или цилиндрической формы)

Отклонения экспериментальных квазилинейных зависимостей от пунктирных линий могут объясняться происходящими процессами фазово-структурных изменений в титане и снижением эффективности обработки ТВЧ в высокотемпературном диапазоне.

При определении электротехнологических режимов обработки ТВЧ важно знать величину силы тока, действующую в колебательном контуре I_K . Зависимость силы тока I_K от потребляемой электрической мощности $P_{Э}$ была получена также для данных систем индуктор – изделие (рис. 7).

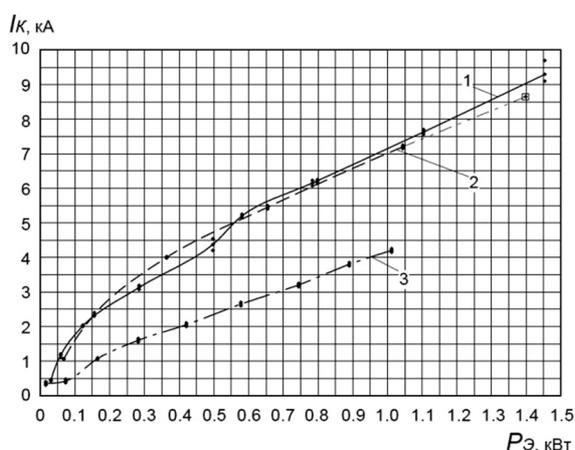


Рис. 7. ВАХ процесса обработки ТВЧ с различными системами: 1 – индуктор – образец; 2 – индуктор – имплантат; 3 – индуктор – изделие с увеличенными массогабаритными характеристиками

Таким образом, имея данные характеристики (ВАХ и ватт-амперную характеристику) устройства и процесса обработки ТВЧ, можно определить технологические режимы для данных типов обрабатываемых образцов (дисков и цилиндрических изделий). При определении режимов обработки ТВЧ титановых изделий необходимо знать экспериментальные кинетические кривые нагрева при выбранной величине потребляемой электрической мощности $P_{Э}$ (если используется разработанное оборудование для обработки ТВЧ) или силу тока в колебательном контуре I_K (при использовании аналогичного оборудования, но с использованием разработанных конструкций индукторов). Обобщенные данные электротехнологических параметров и

кинетические температурные характеристики позволят разработать технологические рекомендации для обработки ТВЧ малогабаритных металлоизделий.

Аппроксимация экспериментальных данных зависимости температуры $T(P_{Э}, t)$ от потребляемой электрической мощности $P_{Э}$ и продолжительности обработки t для рассмотренного температурного диапазона была представлена в полиномиальной формуле:

$$T(P_{Э}, t) = -1700,15 + 315,67 \times \ln(P_{Э}) + 64,85 \times t - 2,27 \times t^2 + (0,04 \times 10^{-2}) \times t^3 - (3,4 \times 10^{-4}) \times t^4 + (1,1 \times 10^{-6}) \times t^5. \quad (1)$$

Данный тип модели позволил установить прямо пропорциональную зависимость температуры от натурального логарифма потребляемой электрической мощности $P_{Э}$. При этом коэффициент множественной детерминации R^2 достигал $\approx 0,91$.

В графическом виде регрессионная модель $T(P_{Э}, t)$ характеризуется наличием участков нагрева и выдержки (рис. 8).

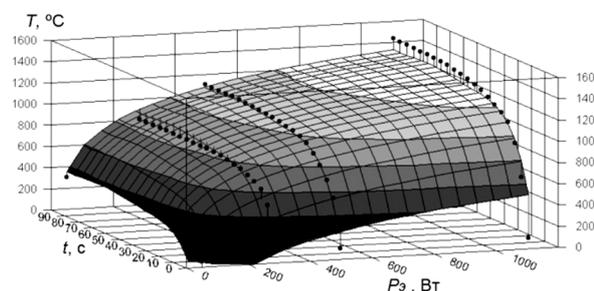


Рис. 8. Графические зависимости $T(P_{Э}, t)$ нагрева ТВЧ титановых образцов дисковой формы

При выборе типа регрессионной зависимости $T(P_{Э}, t)$ необходимо было учесть спадающий характер зависимостей при снижении потребляемой электрической мощности до ≈ 50 Вт (рис. 8). Для удобства восприятия на графиках кинетики нагрева поверхности отклика присутствуют эквипотенциальные линии уровня через каждые 200°C . Таким образом, полученные графики разделены на 8 частей по вертикальной оси в соответствии с температурным диапазоном от 0 до 1600°C .

Полученные зависимости полностью характеризуют исследуемую систему ин-

дуктор – изделие, что необходимо при разработке технологических рекомендаций нагрева ТВЧ до заданной температуры. На основе экспериментальных данных влияния температуры и выдержки при обработке ТВЧ на состав, структуру и свойства титановых изделий определяются рекомендуемые значения электротехнологических параметров: потребляемой величины элек-

трической мощности, силы тока на индукторе в резонансном режиме.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ (проект № 11.1943.2017/ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборудование для индукционно-термической обработки малогабаритных металлических изделий / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Индукционный нагрев. 2013. № 2 (24). С. 44-47.

2. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles / A. Fomin, S. Dorozhkin, M. Fomina et al. // Ceramics international. 2016. Vol. 42. № 9. P. 10838-10846.

3. Induction heat treatment device and technique of bioceramic coatings production on titanium implants / A.A. Fomin, M.A. Fomina, A.B. Steinhauer et al. // 55th Int. Sci. Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. Riga, Latvia, October 14, 2014. P. 111-115.

4. **Fomin A.A.** FEM modeling and experimental data of induction heating of titanium medical devices / A.A. Fomin, M.A. Fomina // 57th Int. Sci. Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. Riga, Latvia, October 13-14, 2016. P. 1-4.

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомина Марина Алексеевна – студентка Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Войко Алексей Владимирович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кошуро Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksander A. Fomin – PhD, Associate Professor, Postdoctoral Researcher, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Marina A. Fomina – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksey V. Voyko – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Koshuro – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor V. Rodionov – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 19.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА НА КИНЕТИКУ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ СВИНЦА ИЗ ПЕРХЛОРАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

Е.Ю. Горбачёва, Н.Д. Соловьёва, В.В. Чадина

INFLUENCE OF PRETREATMENT PROCESSING OF THE STEEL ELECTRODE ON KINETICS OF ELECTRODEPOSITION OF LEAD FROM PERCHLORATE BASED ELECTROLYTES

E.Yu. Gorbacheva, N.D. Solovieva, V.V. Chadina

Установлено влияние предварительной обработки стальной основы электрода на кинетику электроосаждения свинца из перхлоратного электролита с добавкой поверхностно-активного вещества и без нее. Выявлено влияние добавки ПАВ на величину поляризационной емкости. Сделан вывод о целесообразности использования в перхлоратном электролите добавки ПАВ.

Ключевые слова: свинцовое покрытие, поверхностно-активное вещество, подложка, дофазовое осаждение, поляризационная емкость, перхлоратный электролит

Электролитический свинец представляет интерес как обеспечивающий следующие функциональные свойства изделиям: коррозионная стойкость, радиационная защита, хорошие электрохимические характеристики при использовании в качестве электродов химических источников тока (ХИТ). Общими свойствами при использовании электроосажденного свинца в качестве защитного покрытия и электродного материала для ХИТ являются хорошее сцепление с основой, равномерность покрытия, отсутствие пористости. Обеспечение указанных свойств достигается при электроосаждении равномерного, мелкозернистого осадка, формирование которого зависит от ряда технологических параметров, в том числе от плотности поляризующего тока, от состава электролита, его температуры.

The influence of preliminary processing of the steel basis of the electrode on kinetics of electrodeposition of lead from perchlorate based electrolytes with and without additives of surface-active agents is established. The influence of the surfactant additive on the rate of polarizing capacity is revealed. The conclusion is drawn on the expediency of using the perchlorate based electrolytes in surfactant additives.

Keywords: lead covering, superficially-active agent, substrate, pre-phase sedimentation, polarizing capacity, perchlorate electrolytes

Анализ составов электролитов свинцевания показал, что наиболее перспективными являются борфтористоводородные и перхлоратные растворы [1, 2]. Преимущество перхлоратных растворов состоит в возможности использования больших катодных плотностей тока i_K , что позволяет интенсифицировать процесс. Однако увеличение i_K может сопровождаться образованием крупнокристаллических осадков и даже дендритов. Для получения мелкокристаллических осадков в состав электролита целесообразно вводить поверхностно-активные вещества (ПАВ). Морфология и свойства электролитических осадков во многом зависят от предварительной обработки поверхности изделия [2]. Подготовка поверхности должна обеспечить адгезию электроосаждаемого покрытия к материалу

изделия. Для этой цели, помимо обезжиривания, травления поверхности, может быть использовано ее пассивирование или модифицирование поверхностных слоев изделия путем предварительного дофазового (предпотенциального) осаждения металла получаемого покрытия. При пассивировании стальной поверхности формируются оксидные пленки с высокой электронной проводимостью [3]. Следовательно, их присутствие на границе сталь – электролитическое покрытие не должно отразиться на электрохимических характеристиках электрода и в то же время обеспечит большую коррозионную стойкость. Предварительное включение электроосаждаемого металла в поверхностные слои изделия при его дофазовом осаждении изменяет структуру поверхности и, соответственно, влияет на кинетику электроосаждения металла и свойств электроосаждаемого покрытия [4, 5].

Целью настоящей работы является изучение кинетики электроосаждения свинцового покрытия из перхлоратного электролита с добавкой ПАВ и без нее на стальной поверхности, обработанной по двум вариантам: с предварительным дофазовым осаждением свинца и с формированием пассивной пленки на изделии.

Использовались два состава электролита: перхлоратный без добавки ПАВ: $Pb(ClO_4)_2 - 100$ г/л + $HClO_4$ 8 г/л; перхлоратный с добавкой ПАВ: $Pb(ClO_4)_2 - 100$ г/л + $HClO_4$ 8 г/л + ПАВ (5-фенил-3-(3,4-диметоксибензилиден)-3Н-фуран-2-он). Добавка синтезирована на кафедре «Естественные и математические науки» Энгельсского технологического института (филиала) СГТУ имени Гагарина Ю.А. доцентом Чадиной В.В.

Электроосаждение свинцового покрытия проводилось на стальную основу (сталь 08 КПП ГОСТ 503-81). Поверхность стали предварительно подвергалась механической обработке, обезжириванию в ацетоне. Далее электроды обрабатывались по двум вариантам обработки. По варианту 1 стальные электроды подвергались электрохимическому катодному обезжириванию в растворе $KOH - 250$ г/л, декапированию в со-

ляной кислоте (5%), электрохимическому оксидированию в растворе $KOH - 550$ г/л + $NaNO_3 - 125$ г/л. Вариант 2 заключался в дофазовом осаждении свинца в потенциостатическом режиме в электролите свинцевания (с добавкой или без) при потенциале $-0,45$ В относительно насыщенного хлоридсеребряного электрода сравнения (н.х.с.э.с.) при $t = 25^\circ C$. Время процесса составляет 2 мин.

Электрохимическое восстановление Pb проводилось в гальваностатическом режиме при плотностях тока от 10 до 80 mA/cm^2 при температуре $25^\circ C$ относительно н.х.с.э.с. Выбор диапазона плотностей тока основывался на анализе литературных источников и ранее полученных экспериментальных данных [6, 7]. Толщина покрытия составляла 30 мкм.

На рис. 1, 2 представлены примеры E, t кривых электровосстановления Pb из изучаемых растворов электролитов с предварительной обработкой поверхности по вариантам 1 и 2.

На гальваностатических (ГС) кривых электроосаждения свинца для всех плотностей тока независимо от состава электролита и способа предварительной подготовки поверхности стали в начальный момент поляризации наблюдается резкое смещение потенциала от потенциала погружения в область более отрицательных значений, затем спад потенциала и выход его на стационарное значение. Перед выходом на стационарное значение наблюдаются небольшие колебания потенциалов. Длительность колебаний, их амплитуда и частота зависят от плотности поляризующего тока, состава электролита и способа предварительной подготовки стали (рис. 1, 2).

При электроосаждении свинца на поверхности стали, модифицированной его дофазовым осаждением, наблюдается некоторое снижение поляризации электрода в момент включения катодного тока и в установившемся режиме электролиза (0,7-1,3 с) (табл. 1, 2), что связано с облегчением электровосстановления свинца на изделии, содержащим в поверхностном слое уже приблизительно 22,3 %. Это позволяет

интенсифицировать электроосаждение, применяя большие токи поляризации. Введение в электролит свинцевания добавки ПАВ вызывает небольшое смещение потенциала электрода в область отрицательных значений в момент включения поляризующего тока и практически не влияет на

его установившееся значение при предварительной обработке поверхности стали путем дофазового осаждения (табл. 1, 2). Большее действие ПАВ на ход гальваностатических кривых наблюдается при предварительной обработке поверхности по варианту 1 (табл. 1).

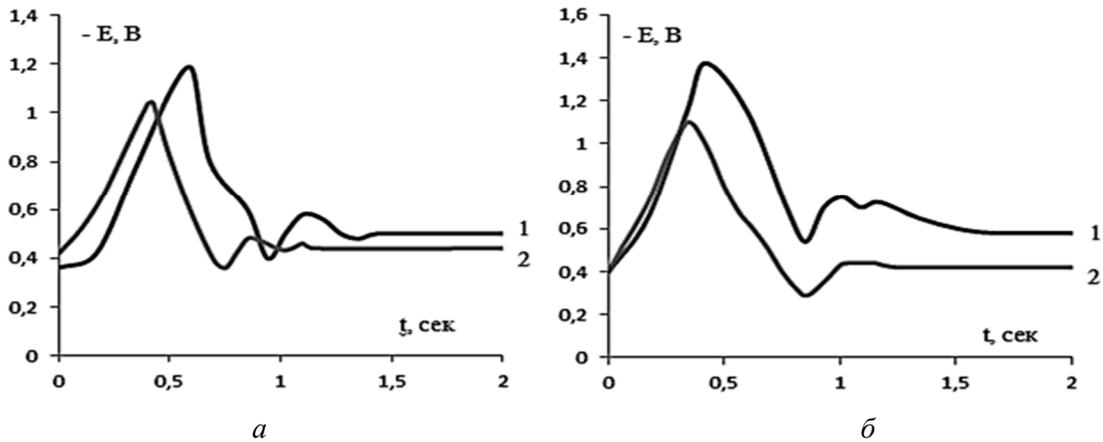


Рис. 1. ГС кривые осаждения свинца на стальную основу, обработанную по варианту 1 (1), по варианту 2 (2) при $i_K = 10 \text{ mA/cm}^2$, $t = 25^\circ\text{C}$ из перхлоратного электролита: *a* – без добавки ПАВ; *б* – с добавкой ПАВ

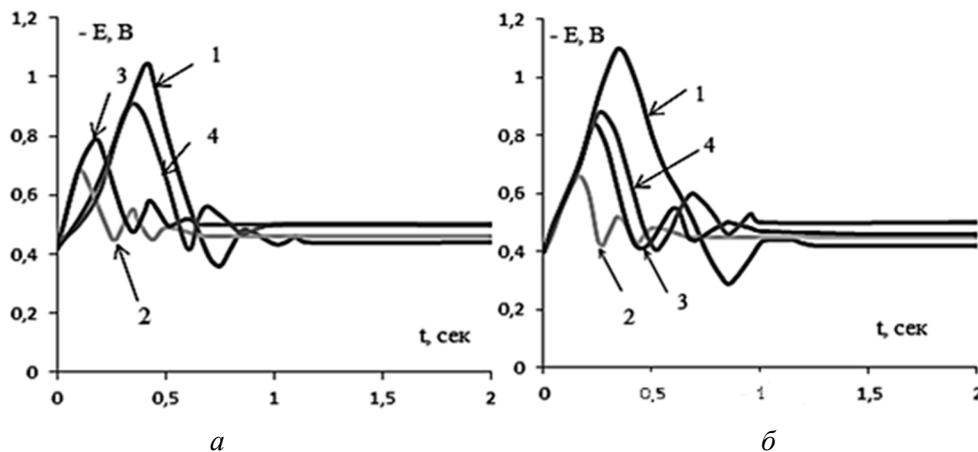


Рис. 2. ГС кривые осаждения свинца на стальную основу, обработанную по варианту 2, при $i_K, \text{ mA/cm}^2$: 1 – 10; 2 – 35; 3 – 60; 4 – 80, $t = 25^\circ\text{C}$ из перхлоратного электролита: *a* – без добавки ПАВ; *б* – с добавкой ПАВ

Таблица 1

Максимальное значение потенциала электрода при включении катодного тока (E_{max} , В), установившегося потенциала на электроде при поляризации ($E_{\text{стац}}$, В), времени достижения $E_{\text{стац}}$ ($t_{\text{стац}}$, с)

Электролит электроосаждения свинца	Обработка поверхности стали	i , mA/cm^2	E_{max} , В	$E_{\text{стац}}$, В	$t_{\text{стац}}$, с
Перхлоратный электролит без добавки ПАВ	Вариант 1	10	-1,18	-0,50	1,4
	Вариант 2	10	-1,04	-0,44	1,2
Перхлоратный электролит с добавкой ПАВ	Вариант 1	10	-1,38	-0,58	1,7
	Вариант 2	10	-1,10	-0,42	1,3

Таблица 2

Максимальное значение потенциала электрода при включении катодного тока (E_{max} , В), установившегося потенциала на электроде при поляризации ($E_{стац}$, В), времени достижения $E_{стац}$ ($t_{стац}$, с). Предварительная обработка стального электрода (вариант 2)

Электролит электроосаждения свинца	i , мА/см ²	E_{max} , В	$E_{стац}$, В	$t_{стац}$, с
Перхлоратный электролит без добавки ПАВ	10	-1,04	-0,44	1,2
	35	-0,68	-0,46	0,7
	60	-0,79	-0,50	0,7
	80	-0,90	-0,50	1,0
Перхлоратный электролит с добавкой ПАВ	10	-1,10	-0,42	1,3
	35	-0,66	-0,45	0,7
	60	-0,84	-0,46	1,1
	80	-0,90	-0,50	1,2

С целью выяснения действия ПАВ на электроосаждение свинца из перхлоратного электролита рассчитывалась поляризационная емкость электрода по уравнению:

$$C_{пол} = \frac{i_k}{\left(\frac{dE}{dt}\right)}$$

где dE/dt – наклон E , t кривых в начальный момент времени (от 0 до 0,2 с).

Результаты расчета приведены в табл. 3 и 4. Анализ результатов по величине поля-

ризационной емкости подтверждает большее влияние добавки ПАВ на электроосаждение свинца при использовании стали, подготовленной по варианту 1.

Морфологический анализ поверхности электроосажденного свинца на сталь проводили с помощью микроскопа CAPL ZELSS JENA (IP-20) и цифрового фотоаппарата SONY DSCP-72 при увеличении в 100 раз.

Таблица 3

Поляризационная емкость электрода при электроосаждении свинца на стали, обработанной по варианту 1 при 25°C

Состав электролита	$C_{пол}$, Ф/см ²					
	i , мА/см ²					
	10	15	20	30	40	50
Перхлоратный электролит без добавки ПАВ	0,0046	0,0054	0,0066	0,0091	0,0180	0,0222
Перхлоратный электролит с добавкой ПАВ	0,0033	0,0028	0,0106	0,0200	0,0100	0,0187

Таблица 4

Поляризационная емкость электрода при электроосаждении свинца на стали, обработанной по варианту 2 при 25°C

Состав электролита	$C_{пол}$, Ф/см ²			
	i , мА/см ²			
	10	35	60	80
Перхлоратный электролит без добавки ПАВ	0,00535	0,01225	0,02470	0,03272
Перхлоратный электролит с добавкой ПАВ	0,00520	0,01680	0,03565	0,04754

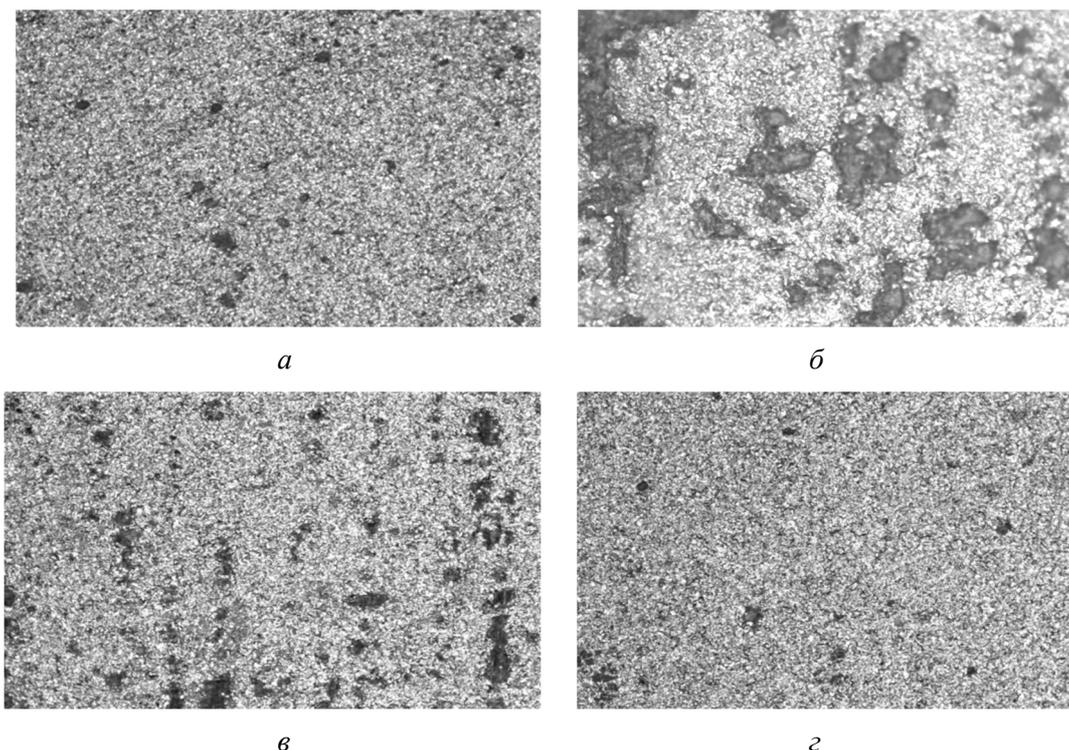


Рис. 3. Микрофотографии свинцового покрытия, осажденного из перхлоратного электролита: *а* – без добавки ПАВ, обработка по варианту 1; *б* – с добавкой ПАВ, обработка по варианту 1; *в* – без добавки ПАВ, обработка по варианту 2; *г* – с добавкой ПАВ, обработка по варианту 2, при $i = 10 \text{ mA/cm}^2$, при увеличении в 100 раз

Установлено, что при осаждении свинца на подложку, предварительно обработанную по варианту 1, добавка ПАВ не позволяет достичь равномерности и мелкой кристалличности осадков, но приводит к увеличению размера зерен (рис. 3 *а*, *б*). Данный факт может быть объяснен тем, что ПАВ в электролите при электроосаждении частично пассивируют поверхность подложки, что приводит к увеличению плотности тока на единицу поверхности за счет сокращения рабочей площади подложки. Возросшая плотность тока приводит к увеличению размера кристаллов осадка [6, 8].

При предварительной обработке по варианту 2 присутствие добавки ПАВ в электролите способствует уменьшению пористости осадка и обеспечивает его равномерное распределение по подложке электродной основы.

Исходя из проведенного анализа полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод о целесообразности использования перхлоратного электролита без добавки ПАВ с обработкой поверхности по варианту 1 и перхлоратного электролита с добавкой ПАВ с обработкой поверхности по варианту 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ильин В.А.** Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание / В.А. Ильин. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1993. 87 с.
2. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник / под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
3. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов. Проблема теории и практики / О.И. Невский и др. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2006. 282 с.
4. **Антропов Л.И.** Наложение дофазового осаждения металлов на выделение водорода при катодной поляризации железа /

Л.И. Антропов, Н.В. Кондрашова // Защита металлов. 1983. Т. 19. № 3. С. 505-506.

5. **Малеева Е.А.** Осаждение цинка на железе в условиях «недонапряжения» из щелочного цинкатного электролита в присутствии органической добавки / Е.А. Малеева, К.С. Педан, И.И. Пономарев // Электрохимия. 1996. Т. 32. № 12. С. 1493-1497.

6. Влияние состава электролита на качество свинцового покрытия / Е.Ю. Боженова, Н.В. Горбачев, Н.Д. Соловьева и др. // Актуальные проблемы электрохимической технологии. 2008. С. 64-67.

7. Кинетические закономерности электроосаждения свинца из перхлоратного электролита / Е.Ю. Горбачева, Н.Д. Соловьева, М.С. Бирюков и др. // Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах: материалы VII Всерос. конф. «Фагран-2015». 2015. С. 72-73.

8. **Боженова Е.Ю.** Влияние состава электролита на физико-химические свойства электролитически осажденного свинца / Е.Ю. Боженова, Н.В. Горбачев, Н.Д. Соловьева // Последние достижения в технологиях и оборудовании: сб. тез. докладов. 2009. С. 12-14.

Горбачёва Екатерина Юрьевна – инженер кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Соловьёва Нина Дмитриевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Чадина Валерия Вячеславовна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Естественные и математические науки» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina Yu. Gorbacheva – Engineer, Department of Chemical Technologies, Engels Technological Institute, branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Nina D. Solovieva – Dr. Sc., Professor, Department of Chemical Technologies, Engels Technological Institute, branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valeria V. Chadina – PhD, Associate Professor, Department of Natural Sciences and Mathematics, Engels Technological Institute, branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция публикует при каждой статье краткие сведения об авторах. В связи с этим просим вас при направлении статьи в редакцию сообщать:

1. Полные имена и отчества всех авторов.
2. Место работы и должность.

Кроме того, напоминаем, что на каждую статью следует представлять краткий (4-5 предложений) реферат на русском и английском языках (включая название), а также ключевые слова.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СПЛАВА ЦИНК-НИКЕЛЬ В СУЛЬФАТНО-АЦЕТАТНОМ РАСТВОРЕ ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Е.В. Ченцова

POTENTIODYNAMIC METHOD FOR THE STUDY OF ZINC-NICKEL ALLOYS FORMED IN SULPHATE-ACETATE SOLUTIONS

E.V. Chentsova

Рассматривается механизм электрохимического формирования гальванического покрытия цинк-никель на стали в сульфатном и сульфатно-ацетатном растворах потенциодинамическим методом при варьировании содержания сульфата никеля и сульфата цинка в растворе.

Ключевые слова: сплавы цинка, сульфатно-ацетатный раствор, потенциодинамический метод

The paper discusses the electrochemical mechanism applied in the process of zinc-nickel plating used on steels in sulfate and sulfate-acetate solutions. The plating is provided by means of the potentiodynamic method with the varying contents of nickel sulfate and zinc sulfate in the solution.

Keywords: zinc alloys, sulfate-acetate solutions, the potentiodynamic method

Электролитические покрытия сплавами цинка с металлами группы железа характеризуются более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с цинковыми покрытиями [1]. Сплавы цинк-никель нашли широкое применение в промышленности в качестве защитно-декоративных покрытий. Неоднозначное и противоречивое объяснение в литературе закономерностей формирования этих сплавов обуславливает проведение исследований по определению механизма осаждения цинка и никеля в сплав [2].

Методика эксперимента. Покрытия цинк-никель осаждали на подложку из стали Ст45. Подготовка поверхности подложки описана в работе [3]. В качестве противоиэлектрода использовали графитовый стержень, в качестве электрода сравнения – хлоридсеребряный электрод (0,222 В).

Электроосаждение покрытия Zn-Ni проводили с помощью потенциостата Р-8 в комплекте с персональным компьютером. В потенциодинамическом методе показания снимали от потенциала погружения

стального электрода в исследуемый раствор до потенциала $-1,50$ В. Потенциал погружения стального электрода и стационарный потенциал полученных образцов гальванических осадков цинк-никель определяли методом потенциометрии с точностью $\pm 0,001$ В. Покрытие цинк-никель наносили из сульфатных и сульфатно-ацетатных растворов при температуре $20-25^\circ\text{C}$.

Для определения количественного состава покрытия цинк-никель осаждали гальваностатическим методом при токе 5 mA/cm^2 . Время электролиза рассчитывали на толщину осаждаемого покрытия 10 мкм .

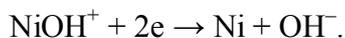
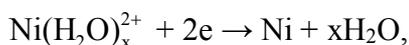
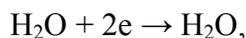
Количественный состав образцов определяли с помощью портативного анализатора химического состава X-Met 7500, model XMDS 2726. Точность измерения $\pm 0,05\%$. Измерения проводились в трех точках образца.

Выход по току определяли гравиметрическим методом.

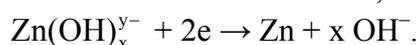
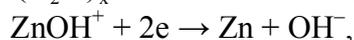
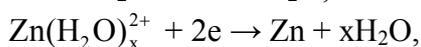
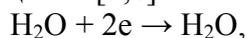
Результаты и их обсуждение. Исследование кинетики электродных процессов,

протекающих на стальном электроде, проведено в сульфатных и в сульфатно-ацетатных растворах потенциодинамическим методом со скоростью развертки потенциала 1 мВ/с (рис. 1).

Хроновольтамперограмма, полученная с раствором сульфата никеля 0,12 моль/л, характеризуется площадками при потенциалах $-0,58...-0,75$; $-0,79...-0,98$ и $-1,00...-1,07$ В, которые могут быть отнесены к реакции выделения водорода, разряда гидратированных ионов никеля и гидроксидов никеля [4, 5]:



В растворе сульфата цинка 0,21 моль/л на зависимости $i-E$ отмечены площадки при значении потенциала $-0,62...-0,88$; $-1,02...-1,05$, $-1,20...-1,23$ и $-1,30...-1,40$ В, которые отвечают реакции выделения водорода, разряда гидратированных частиц цинка и гидроксидов цинка [5,6]:



В растворе смеси солей никеля и цинка на хроновольтамперограмме отмечены площадка в области потенциалов $-0,62...0,68$ В, соотнесенная с выделением водорода, максимум при потенциале $-0,82...-0,85$ В, связанный с осаждением никеля, площадки при $-1,0...-1,05$ В, $-1,13...-1,18$ В и $-1,24...-1,32$ В, отвечающие осаждению цинка и никеля.

Процессы на стальном электроде, протекающие в исследованных растворах при потенциалах положительнее $\sim -1,0$ В, характеризуются низкой скоростью, поскольку разряд ионов никеля сопровождается значительным перенапряжением процесса [1]. При достижении потенциалов выделения цинка на хроновольтамперограммах отмечается рост тока.

Повышение концентрации как одного из компонентов раствора сульфата никеля до 0,2 моль/л, так и двух солей – сульфата цинка до 0,42, сульфата никеля до

0,2 моль/л, не влияет на характер потенциодинамических кривых. Рост тока отмечается при потенциалах отрицательнее $-1,0$ В. Содержание солей металлов в растворе оказывает влияние на состав гальванического осадка. При повышении концентрации ионов цинка в растворе соответственно увеличивается содержание цинка в гальваническом осадке. Величина стационарного потенциала полученных образцов изменяется согласно содержанию элементов в осадке цинк-никель (таблица).

Введение буферующей добавки ацетата натрия 0,7 моль/л не оказывает влияния на величину стационарного потенциала стального электрода ($-0,56...-0,57$ В). Отмечено смещение площадки, соответствующей восстановлению ионов никеля, в отрицательную область значений и повышение тока разряда ионов металла. При введении ацетат-ионов в раствор механизм процесса на электроде не изменяется [7, 8]. Влияние добавки на ход потенциодинамических кривых может быть связано с восстановлением ионов металлов из ацетатных комплексов $[\text{M}(\text{CH}_3\text{COO})]^+$, где М – Ni, Zn, и с буферным действием ацетат-ионов на рНs приэлектродного слоя раствора. Вследствие снижения подщелачивания приэлектродного слоя в растворах с буферной добавкой увеличивается содержание никеля в гальваническом осадке цинк-никель (таблица). Косвенно образование гидроксидов металлов в приэлектродном слое раствора подтверждается аномальной величиной выхода по току вследствие включения частиц приэлектродного слоя в гальванический осадок.

На скорость процессов на электроде оказывает влияние перемешивание раствора. Отмечено повышение тока в области потенциалов $-0,58...-1,05$ В и в растворе, содержащем ацетат натрия. Выход по току при перемешивании снижается (таблица), следовательно, рост тока обусловлен выделением водорода. При перемешивании также уменьшается содержание гидроксидов в приэлектродном слое раствора, ингибирующих выделение никеля на электроде. Соответственно, в осадке цинк-никель повышается содержание никеля (таблица).

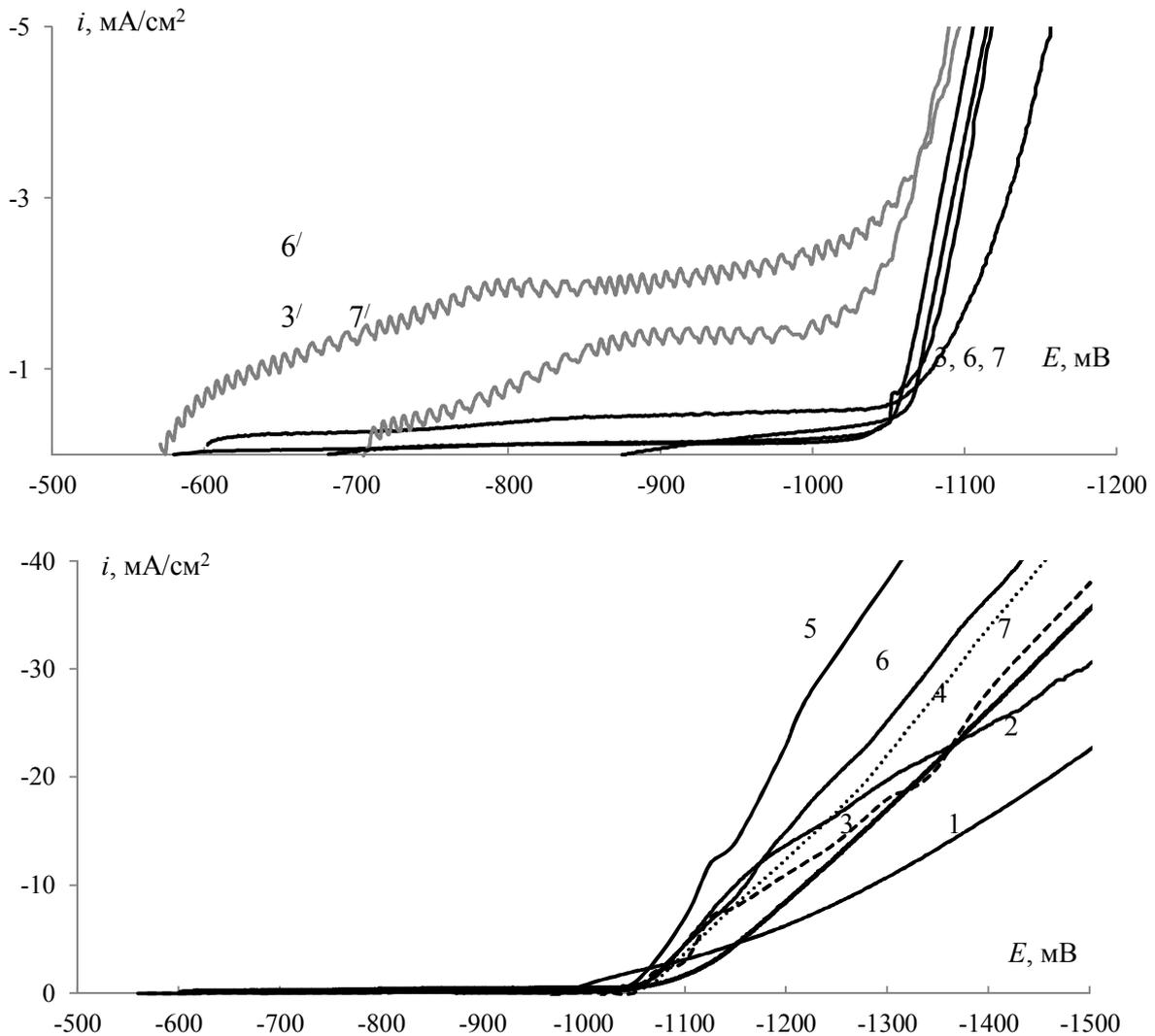


Рис. 1. Потенциодинамические кривые на стальном электроде в сульфатных растворах состава, моль/л: 1 – NiSO₄·7H₂O 0,12, Na₂SO₄ 0,42; 2 – ZnSO₄·7H₂O 0,21, Na₂SO₄ 0,42; 3 – NiSO₄·7H₂O 0,12, ZnSO₄·7H₂O 0,21, Na₂SO₄ 0,42; 4 – NiSO₄·7H₂O 0,20, ZnSO₄·7H₂O 0,21, Na₂SO₄ 0,42; 5 – NiSO₄·7H₂O 0,20, ZnSO₄·7H₂O 0,21, Na₂SO₄ 0,42, CH₃COONa 0,7; 6 – NiSO₄·7H₂O 0,20, ZnSO₄·7H₂O 0,42, Na₂SO₄ 0,42; 7 – NiSO₄·7H₂O 0,21, ZnSO₄·7H₂O 0,42, Na₂SO₄ 0,42, CH₃COONa 0,70

Влияние состава раствора и перемешивания раствора на состав, выход по току ВТ, стационарный потенциал $E_{стат}$ покрытия цинк-никель, осажденного током 5 мА/см²

Состав раствора, моль/л	Перемешивание раствора	Состав осадка, %		ВТ, %	$E_{стат}$, В
		Zn	Ni		
ZnSO ₄ ·7H ₂ O 0,21, NiSO ₄ ·7H ₂ O 0,12, Na ₂ SO ₄ 0,42	–	92,1	7,9	92	–0,998
	+	89,3	10,4	75	–0,990
ZnSO ₄ ·7H ₂ O 0,21, NiSO ₄ ·7H ₂ O 0,20, Na ₂ SO ₄ 0,42	–	93,2	6,8	101	–0,995
ZnSO ₄ ·7H ₂ O 0,21, NiSO ₄ ·7H ₂ O 0,20, Na ₂ SO ₄ 0,42, CH ₃ COONa 0,7	–	88,2	11,8	109	–0,985
ZnSO ₄ ·7H ₂ O 0,42, NiSO ₄ ·7H ₂ O 0,24, Na ₂ SO ₄ 0,42	–	95,5	4,5	91	–0,981
	+	95	5	84	–0,970
ZnSO ₄ ·7H ₂ O 0,42, NiSO ₄ ·7H ₂ O 0,24, Na ₂ SO ₄ 0,42, CH ₃ COONa 0,7	–	93,1	6,9	92	–0,996
	+	93,7	6,3	88	–0,998

В растворе, содержащем ацетат натрия, количество никеля в осадке уменьшается вследствие снижения эффекта буферной добавки при перемешивании раствора.

Таким образом, в работе установлено, что гальванический осадок цинк-никель в сульфатном и в сульфатно-ацетатном рас-

творе формируется по аномальному механизму. Преимущественное содержание цинка в покрытии обусловлено образованием гидроксидов в приэлектродном слое раствора и их ингибированием процесса выделения никеля в осадок.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кудрявцев Н.Т.** Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. М.: Химия, 1979. 352 с.

2. **Бобрикова И.Г.** К вопросу о механизме электроосаждения сплава цинк – никель / И.Г. Бобрикова, Ф.И. Кукоз, В.Н. Селиванов // Электрохимия. 2002. № 10 (38). С. 1269-1273.

3. **Ченцова Е.В.** Электроосаждение покрытия цинк-никель-кобальт на сталь в сульфатно-глицинатном растворе / Е.В. Ченцова, С.Ю. Почкина // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 47-50.

4. Кинетика и механизм электрохимического восстановления комплексов никеля (II) / Н.Б. Березин, Ж.В. Межевич, Т.Н. Березина и др. // Вестник технологического университета. 2015. № 6 (18). С. 82-84.

5. Справочник химика. Т. III / под ред. З.И. Грива, В.А. Кац, В.Д. Паастро,

С.Л. Томарченко. Л.: Химия, 1965. 1005 с.

6. **Березин Н.Б.** Кинетика и механизм восстановления комплексов цинка / Н.Б. Березин, Т.Н. Березина, Ж.В. Межевич // Вестник технологического университета. 2014. № 23 (17). С. 374-379.

7. Кинетика электроосаждения никеля из растворов различного анионного состава / В.Т. Зуен, О.В. Долгих, Н.В. Соцкая, Е.А. Котлярова // Конденсированные среды и межфазные границы. 2009. № 1 (11). С. 37-46.

8. Особенности электроосаждения никелевого покрытия из низкотемпературного ацетатно-хлоридного электролита никелирования / И.В. Антихович, А.А. Черник, И.М. Жарский, А.К. Болвако // Электрохимия. 2015. № 3 (51). С. 328-333.

Ченцова Елена Викторовна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Chentsova – PhD, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Engels Technological Institute, branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В журнале можно опубликовать материалы научно-технических конференций, круглых столов, выставок по тематическим направлениям журнала.

ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ ДИОКСИДА СВИНЦА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Е.А. Савельева, В.И. Шпекина, В.А. Коротков

LEAD DIOXIDE ELECTRODEPOSITION IN AN ULTRASONIC FIELD

E.A. Savelyeva, V.I. Shpekina, V.A. Korotkov

Исследовано влияние ультразвука на процесс электроосаждения диоксида свинца на стальную оксидированную подложку. Выявлено увеличение числа зародышей PbO_2 под действием ультразвука. Разработаны технологические рекомендации по снижению времени изготовления диоксидсвинцового электрода.

Ключевые слова: диоксид свинца, резервный источник тока, сталь, подложка, хлорная кислота, ультразвук, зародышеобразование

Работа большинства видов электронной аппаратуры специального назначения невозможна без современных высокоэффективных и надежных источников тока. Существует множество вариантов химических источников тока.

Резервные источники тока (РИТ) – это устройства, способные к безотказной работе после длительного хранения. РИТ широко применяются в ракетно-космической и военно-морской технике, спецаппаратуре, боеприпасах [1].

Наибольшего внимания заслуживают РИТ на электрохимической системе $Pb/HClO_4/PbO_2$, которые реализуются в виде блока из биполярных электродов диоксид свинца – свинец. Достоинствами этих батарей являются высокие удельная мощность и энергия при минимальном объеме, длительная сохраняемость энергии и работоспособность в условиях значительных механических нагрузок [2].

Существенным недостатком этих элементов является высокий саморазряд, обусловленный взаимодействием PbO_2 и мате-

The paper investigates electrodeposition of lead dioxide on oxidized steel substrates under ultrasonication. An increase in the number of the PbO_2 nuclei under the influence of ultrasound is revealed. Technological recommendations relating decrease in time when manufacturing lead dioxide electrodes are developed.

Keywords: lead dioxide, reserve current source, steel, substrate, perchloric acid, ultrasound, nucleation

риала подложки после заливки элемента. Слой электролитического PbO_2 плотный и полностью покрывает подложку, но нарушение сплошности слоя приводит к коррозии подложки [3]. Еще одним недостатком является длительность технологии изготовления диоксидсвинцового электрода.

Проблема улучшения РИТ на основе хлорной кислоты может быть частично решена путем совершенствования технологии получения диоксидсвинцового электрода, а именно интенсификацией процессов подготовки поверхности подложки и процесса электроосаждения диоксида свинца при использовании ультразвука [4, 5].

Цель работы – изучение влияния ультразвука на кинетику зародышеобразования при электроосаждении диоксида свинца и на свойства полученных электродов.

На стальной оксидированной подложке снимались потенциостатические i - τ кривые в растворе $Pb(NO_3)_2$ – 350 г/л при потенциалах 1,57; 1,6; 1,62; 1,65 В. Кривые i - τ снимались на потенциостате марки Р-8 с автоматической записью на компьютере. Экспе-

риментальные измерения проводились без ультразвука и в УЗ-поле. По методике, приведенной в работе [6], рассчитывалось число зародышей PbO₂ к моменту достижения максимума потенциостатической *i*- τ кривой.

Нанесение диоксида свинца проводилось в две стадии:

– защитный слой наносился из раствора Pb(NO₃)₂ – 130 г/л;

– активный слой наносился из раствора Pb(NO₃)₂ – 150 г/л; HNO₃ – 30 г/л; CH₃COOH – 60 г/л в отсутствие ультразвука в течение 30 минут и под действием ультразвука в течение 30; 15; 8 минут.

Для ультразвукового нанесения диоксида свинца использовалась ультразвуковая установка УЗУ-0,25, частота ультразвука 18÷22 кГц, мощность 0,25 кВт.

Изучалась морфология поверхности нанесенного диоксида свинца с использованием микроскопа AXIO Imager A2.m в различных точках поверхности электродов при увеличении в 200 раз. Толщина покрытия измерялась микрометром в соответствии с ГОСТ 6207-90. Бралась средняя величина из 5-6 измерений в разных точках поверхности электрода.

Разряд макетов резервных источников тока Pb/HClO₄/PbO₂ с электролитически

осажденным диоксидом свинца в 40% растворе хлорной кислоты (1 мл) проводился при плотности тока 60 мА/см² в ячейке с ограниченным объемом электролита.

По разрядным кривым рассчитывалась практическая емкость электрода. Теоретическая емкость рассчитывалась по привесу электрода после электроосаждения.

В табл. 1 представлены результаты расчета числа зародышей. Из таблицы следует, что воздействие ультразвука приводит к увеличению числа образующихся на поверхности стали зародышей диоксида свинца в 1,5 раза.

Согласно современным представлениям о процессе электроосаждения PbO₂ на инертные металлы первой стадией является образование кислородсодержащих частиц ONадс, являющихся центрами электрокристаллизации. УЗ-воздействие приводит к распаду молекул воды на Н• и ОН• радикалы, что и приводит к увеличению центров зародышеобразования.

Микрофотографии поверхности диоксида свинца (рис. 1), электроосажденного под действием ультразвука и без ультразвука, показывают более мелкозернистую структуру с развитой поверхностью у образцов, полученных под действием ультразвука.

Таблица 1

Число зародышей $N \times 10^{-8}/\text{см}^2$ диоксида свинца, образующихся на поверхности оксидированной стали к моменту времени τ_m в отсутствие ультразвука и при его воздействии при различных потенциалах поляризации в растворе Pb(NO₃)₂ – 350 г/л

<i>E</i> , мВ	1570	1600	1620	1650
Оксидированная сталь				
Без ультразвука	3,5	6	4,94	8,8
С ультразвуком	5	7,8	7,1	9,9



a



б

Рис. 1. Микрофотографии поверхности диоксида свинца: *a* – полученного при стационарных условиях; *б* – полученного под действием ультразвукового поля

Учитывая активирующее влияние ультразвука на процесс электроосаждения диоксида свинца на оксидированной стали, были получены три партии электродов под воздействием ультразвука, отличающиеся временем электроосаждения активного слоя диоксида свинца. С электродов были

сняты разрядные кривые (рис. 2). Рассчитывался коэффициент использования активной массы электрода как отношение фактической емкости электрода к теоретически возможной. Результаты представлены в табл. 2.

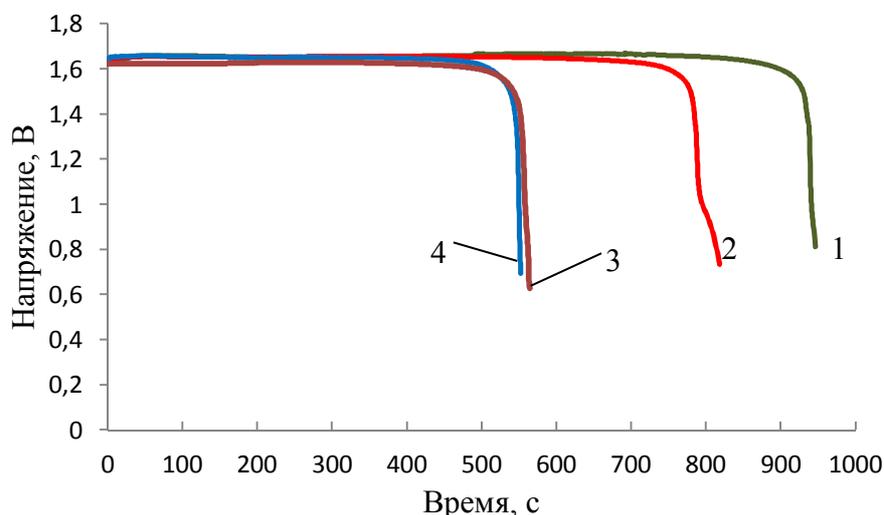


Рис. 2. Разрядные кривые макета РИТ Pb/HClO₄/PbO₂ $i = 60 \text{ мА/см}^2$ при температуре $t = 25^\circ$. Диоксидсвинцовые электроды получены в ультразвуковом поле электроосаждением на стальную подложку в течение: 1 – 30 мин; 2 – 15 мин; 3 – 8 мин; 4 – 30 мин без УЗ

Таблица 2

Свойства диоксида свинца и характеристики РИТ Pb/HClO₄/PbO₂, при разряде $i = 60 \text{ мА/см}^2$ с диоксидсвинцовыми электродами на стальной подложке

Время электроосаждения PbO ₂ на стальную оксидированную подложку, мин		Средняя толщина PbO ₂ , мкм	Привес, г	Теоретическая емкость А·с/см ²	Емкость по разрядным кривым, А·с/см ²	$K_{исп}$, %
внутренний слой	внешний слой					
20	8 (УЗ)	36	0,176	47,3	28,4	60
20	15 (УЗ)	70	0,197	52,9	46,8	88
20	30 (УЗ)	75	0,303	81,4	55	67
20	30	65	0,271	72,8	34	46

Исходя из полученных результатов, рекомендуемое время электроосаждения диоксида свинца под действием ультразвука составляет 15 мин. Диоксидсвинцовые электроды, полученные электроосаждением на стальную оксидированную подложку в ультразвуковом поле в течение 15 мин, обладают удовлетворительной адгезией, имеют высокий коэффициент использования активной массы ($K_{исп} = 88 \%$), выход по току при электроосаждении диоксида свинца составляет 95 %.

Ультразвук позволяет значительно сократить время технологического процесса (табл. 3): УЗ – химическое обезжиривание на стадии предварительной подготовки поверхности проводится в течение 5 минут (вместо 1 часа по действующей технологии), а также применение ультразвука на стадии электроосаждения покрытия снижает время электроосаждения активного слоя с 30 до 15 минут.

Сравнительный анализ времени технологического процесса

Технологический процесс	Материал подложки	Предварительная обработка, мин.	Время осаждения, мин.	Общее время, мин.
Действующий	сталь оксидированная	90	50	140
Предлагаемый	сталь оксидированная (ультразвук)	30	35	65

Таким образом, установлено, что ультразвук ускоряет электроосаждение диоксида свинца за счет интенсификации промежуточной стадии образования ОН-радикалов. Рассчитанное количество зародышей на стальной оксидированной подложке при электроосаждении диоксида свинца под действием ультразвука в 1,5 раза больше, чем без УЗ-воздействия, что приводит к образованию мелкокристалли-

ческого осадка PbO₂ с высокоразвитой поверхностью. Кроме того:

- полученные диоксидсвинцовые электроды превосходят существующие аналоги по емкости на 30%;
- применение ультразвука позволяет сократить время технологического процесса получения диоксидсвинцового электрода со 140 минут до 65 минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нижниковский Е.А.** Современные электрохимические источники тока / Е.А. Нижниковский. М.: Радиотехника, 2015. 294 с.
 2. **Багоцкий В.С.** Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.
 3. **Радкевич Ю.Б.** Особенности восстановления электролитических осадков двуокиси свинца в хлорной кислоте / Ю.Б. Радкевич // Электротехническая промышленность. Сер. Химические и физические источники тока. 1979. Вып. 3. С. 5-7.

4. Microwave activation of electrochemical processes: enhanced PbO₂ electro-deposition, stripping and electrocatalysis / F. Marken, Y.C. Tsai, A.J. Saterlay et al. // SOL. ST. EL. 2001. Vol. 5 (5). P. 313-318.
 5. **Narasimham K.C.** The influence of ultrasonics on the electrodeposition of lead dioxide / K.C. Narasimham, P.S. Gomathi, H.V.K. Udupa // Journal of applied electrochemistry. 1976. Vol. 6. P. 397-401.
 6. **Гамбург Ю.Д.** Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю.Д. Гамбург. М.: Янукс-М, 1997. 384 с.

Савельева Елена Анатольевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena A. Savelyeva – Ph. D., Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Engels Technological Institute, branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Шпекина Варвара Игоревна – кандидат технических наук, инженер кафедры «Химические технологии» Энгельсского технологического института Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Varvara I. Shpekina – Ph. D., Engineer, Department of Chemical Technologies, Engels Technological Institute, branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Коротков Василий Анатольевич – магистрант кафедры «Химия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vasiliy A. Korotkov – Master student, Department of Chemistry, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 18.01.17, принята к опубликованию 17.03.17

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ И МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА КИНЕТИКУ НАГРЕВА ТИТАНА

А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко, М.Е. Федосеев, В.А. Кошуро,
А.Я. Зоркин, И.В. Родионов

IMPACT OF OXIDATION AND MODIFICATION OF SURFACES ON TITANIUM HEATING KINETICS UNDER TREATMENT WITH HIGH-FREQUENCY CURRENTS

A.A. Fomin, M.A. Fomina, A.V. Voyko, M.E. Fedoseev, V.A. Koshuro,
A.Ya. Zorkin, I.V. Rodionov

Представлены результаты решения самосогласованной краевой задачи электродинамики и теплопроводности, описывающие кинетику нагрева титановых образцов дисковой формы при обработке токами высокой частоты до температуры 1500°C на воздухе. Установлено влияние силы тока индуктора в диапазоне от 1,5 до 3 кА на характер нагрева образцов с учетом изменения тепло- и электрофизических свойств титана, а также тепловых потерь на конвекцию, излучение и процесс окислительного модифицирования поверхности. Определено, что наличие на поверхности титана оксидных покрытий с пористо-кристаллической наноструктурой способствует существенному росту тепловых потерь при высокотемпературной обработке. Теоретические зависимости, полученные при решении задачи методом конечных элементов, сопоставляются с экспериментальными данными кинетики нагрева титановых образцов с применением бесконтактного измерения температуры.

Ключевые слова: токи высокой частоты, модификация поверхности, оксидное покрытие, титан, метод конечных элементов, кинетика нагрева

При нагреве токами высокой частоты (ТВЧ) металлоизделий происходят сложные процессы, носящие как стационарный, так и нестационарный характер. Суть бесконтакт-

Solution to the self-consistent boundary problem of electrostatics and thermal conductivity describing the heating kinetics of titanium disc-shaped samples during treatment with high-frequency currents to 1500°C in the air is presented. The influence of the current rate in the inductor within 1.5 and 3 kA on heating the samples considering the changes in thermal and electrophysical properties of titanium and heat losses on convection, radiation, and oxidising modification of the surface was determined. It was found that the presence of oxide coatings on the titanium surface with porous and chrystalline nanostructure leads to bigger heat losses under high temperature treatment. Theoretical dependencies received due to the finite element method were compared to the experimental results for the heating kinetics of titanium samples using non-contact temperature measurements.

Keywords: high-frequency currents, surface modification, oxide coating, titanium, finite element method, heating kinetics

ного (индукционного) нагрева металлов заключается в проникновении переменного магнитного поля заданной частоты в изделие на определенную глубину, называемую скин-

слоем [1]. Переменное магнитное поле индуцируется индуктором при протекании по нему переменного электрического тока той же частоты, являющимся технологическим инструментом бесконтактного подвода энергии непосредственно в приповерхностный слой металла [2]. Этот процесс сопровождается появлением в скин-слое изделия внутреннего источника теплоты, который, в свою очередь, нагревает его.

Вопросам контроля технологических параметров, в частности температуры и скорости нагрева, при обработке ТВЧ металлоизделий посвящены, например, работы [3, 4]. При ускоренном режиме высокотемпературного нагрева металлоизделий наиболее адекватным считается применение бесконтактных методов контроля температуры, в частности инфракрасной пирометрии и колориметрии (по цветам каления) [4]. При обработке ТВЧ малогабаритных изделий процесс измерения температуры существенно усложняется из-за геометрических и технологических факторов:

- характерный размер изделий соизмерим или меньше области, с которой снимаются данные по температуре (конструктивная особенность пирометров);

- нагреваемое изделие располагается в технологической зоне обработки (камере нагрева и термообработки), доступ в которую в ряде случаев ограничен;

- при нагреве свыше 1200-1300°C использование колориметрии не эффективно, так как нагретое изделие характеризуется светло-желтым или белым цветом каления.

Необходимо разработать комплексную методику расчета для достоверного анализа температуры и скорости нагрева, основанную на экспериментальных данных кинетики нагрева и анализе процессов изменения структуры металлов при высокотемпературной обработке. Последнее замечание связано с тем, что многие металлы, в частности технический титан, при нагреве свыше 600°C характеризуются появлением оксидной пленки [4, 5] (рис. 1).

Согласно имеющимся экспериментальным данным анализа морфологии поверхности технического титана ВТ1-00, на его

поверхности при высокотемпературной обработке ТВЧ формируются пористо-кристаллические покрытия с нано- или субмикрометровыми зернами и порами [4, 5] (рис. 1 в, г). Таким образом, при высокой температуре обработки площадь поверхности изделия возрастает на несколько порядков по сравнению с его идеальными макроскопическими показателями (рис. 1 а, б). Это наблюдается при сравнении морфологии поверхности при различных масштабах исследования.

Именно с этой морфологически гетерогенной поверхности происходит теплоотдача посредством конвекции и излучения. Однако при решении задачи теплопроводности с применением метода конечных элементов (МКЭ) геометрия изделия задается в идеальном виде, например в форме диска, и без учета сформированного морфологически гетерогенного оксидного покрытия (рис. 1 г). В связи с этим цель данной работы заключается в определении функции Q_V дополнительных тепловых потерь на конвекцию и излучение, вызванных структурирующим геометрическим фактором – модификацией поверхности обработкой ТВЧ и, как следствие, появлением пористо-кристаллической оксидной пленки или покрытия.

Характер нагрева до заданной температуры, то есть его скорость и равномерность, зависит от большого количества переменных факторов, основными из которых являются электрические, электро- и теплофизические, а также пространственно-временные.

1. Параметры электрической цепи:

- сила электрического тока на индукторе;
- количество витков индуктора и тип их соединения (последовательный или параллельный);

- взаимная индуктивность, определяемая геометрией системы индуктор – изделие и, в частности, величиной зазора между ними;

- диэлектрические потери в изоляционных материалах, например воздухе, воде, охлаждающей индуктор, и материалах футеровки (или муфеля) индуктора, в котором располагается нагреваемое изделие.

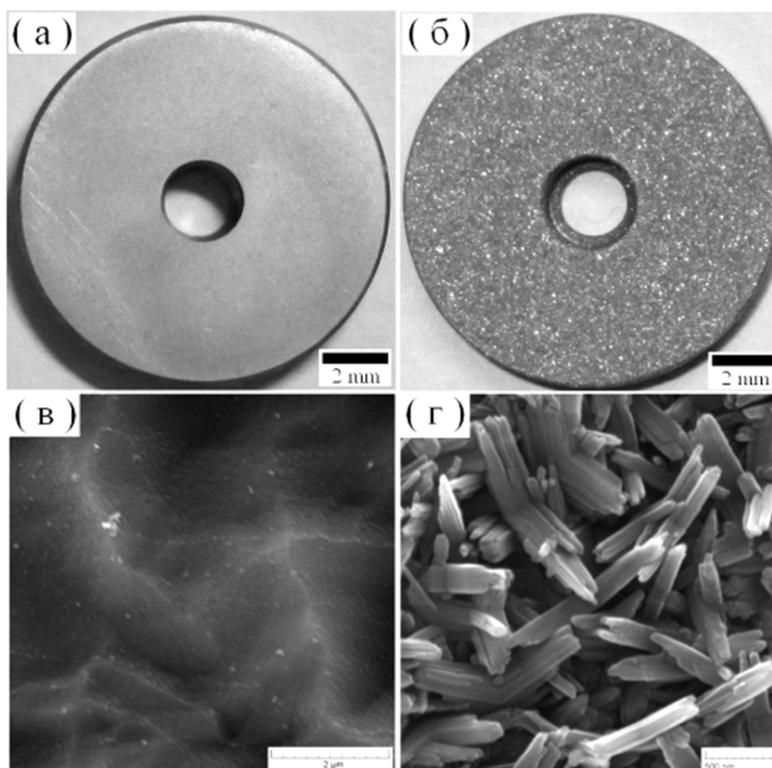


Рис. 1. Титановые образцы-диски: а, б – макроструктура поверхности после шлифования и абразивно-струйной обработки соответственно; в – морфология поверхности шлифованного образца после травления ($\times 50000$); г – морфологически гетерогенная наноструктура, полученная обработкой ТВЧ при температуре 800°C ($\times 200000$)

2. Электрофизические характеристики применяемых материалов:

- электропроводность индуктора и нагреваемой заготовки;

- относительная магнитная проницаемость, в соответствии с которой материалы разделяют на магнитные и немагнитные.

Последний из указанных параметров очень важен при рассмотрении нагрева ферромагнитных материалов, например железоуглеродистых сплавов (сталей) и сплавов на основе железа, кобальта, никеля и некоторых редкоземельных металлов [1, 6]. Многие сплавы этих металлов характеризуются наличием точки Кюри, при достижении которой магнитные свойства изменяются (относительная магнитная проницаемость резко падает до ≈ 1), что отражается на эффективности нагрева ТВЧ.

3. Теплофизические характеристики применяемых материалов:

- коэффициент теплопроводности;
- удельная теплоемкость;
- плотность;

- объемная плотность тепловыделения, которая учитывается при наличии внутренних источников теплоты;

- коэффициенты теплоотдачи при кондуктивном и конвективном теплообмене, а также коэффициент излучающей способности.

Графическая зависимость коэффициента теплопроводности λ и удельной теплоемкости c в диапазоне от 25°C до температуры плавления (около $1668\text{--}1671^{\circ}\text{C}$) характеризуется наличием двух участков ниже и выше температуры фазового превращения $\alpha\text{-Ti} \leftrightarrow \beta\text{-Ti}$, вид которых несколько отличается от прямой пропорциональности (рис. 2).

Особенностью нагрева ТВЧ титана является также и тот факт, что при нагреве в кислородсодержащей среде происходит интенсивное взаимодействие газов, преимущественно кислорода, с поверхностью и приповерхностным слоем. В результате точка фазового перехода $\alpha\text{-Ti}$ в $\beta\text{-Ti}$ сдвигается в область более высокой температуры, при этом кислород выполняет роль стабилизатора α -фазы [8].

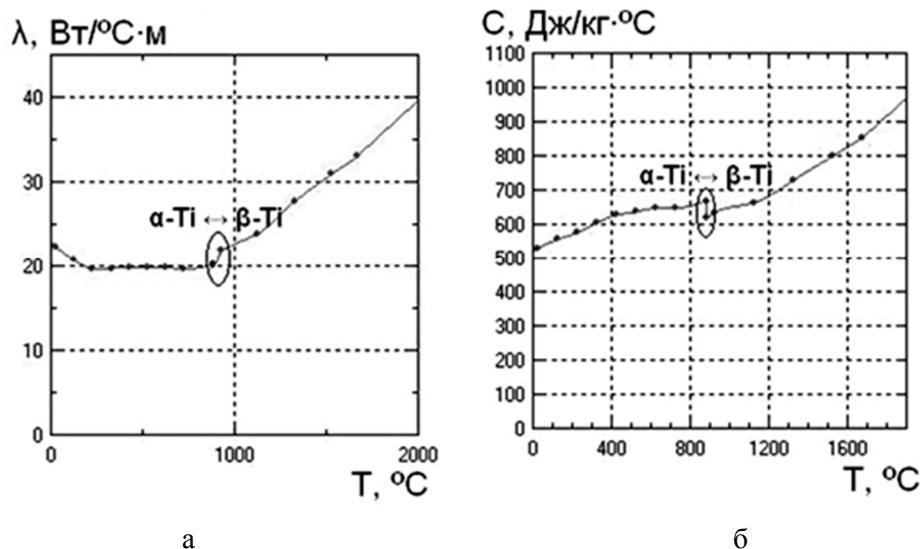


Рис. 2. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности (а) и удельной теплоемкости (б) технического титана [7]

Основной задачей моделирования является определение технологической возможности нагрева титановых экспериментальных образцов-дисков до заданной температуры (не менее 1500 °С), обеспечиваемой разработанным комплексом оборудования для термохимической обработки ТВЧ [9]. При моделировании были получены графические зависимости, иллюстрирующие электродинамические процессы и процессы нестационарной теплопередачи в элементах системы индуктор – образец.

В работе получены экспериментальные данные кинетики нагрева на титановых образцах-дисках диаметром 14 мм и высотой 2 мм. В центральной части образцов находилось технологическое отверстие диаметром 2,5-3 мм, которое при моделировании не учитывалось, так как его назначение связано с точностью позиционирования образца на оси исследуемой системы (рис. 1 а).

Геометрия медного индуктора обусловлена типом нагреваемого образца и представляет собой спираль, число витков которой должно обеспечить равномерное распределение магнитного поля. В работе рассмотрено использование спирального цилиндрического индуктора, который имеет 2 слоя по 2 витка. Внешний диаметр медной трубки, из которой изготовлен индуктор, составляет 6,5 мм, толщина стенки 0,75 мм (рис. 3). Внутренняя часть индук-

тора предназначена для его принудительного жидкостного охлаждения, при этом циркуляция охладителя (воды) обеспечивает сохранение температуры индуктора в диапазоне, исключающем его перегрев в течение продолжительного периода обработки (t не менее 10 мин).

В рассматриваемую систему помимо воды (дистиллированной) и воздуха (сухого) включен кварцевый муфель трубчатого типа. Его внутренний диаметр несколько превышает диаметр образца и составляет 15,5 мм. Длина муфеля равняется длине индуктора (20 мм), толщина стенки муфеля равняется 1 мм. Таким образом, внутренний диаметр индуктора принят равным 17,5 мм. Титановый образец-диск располагается в центре системы и имеет координаты [0; 0], а одна из характерных точек его внешней цилиндрической поверхности имеет координаты [0; 7] (на рис. 3 показаны стрелками).

Параметрами математической модели являются данные электро- и теплофизических свойств материалов, входящих в систему, с учетом их температурной зависимости. В задаче электродинамики задавались следующие показатели: относительная магнитная проницаемость μ ($\mu = 1$); коэффициент электропроводности σ ; сила тока на индукторе I (от 1,5 до 3 кА); частота тока на индукторе f (от 50 до 150 кГц); после-

довательный тип соединения токоведущих элементов системы (табл. 1). Граничные условия задачи электродинамики:

1. На внешней поверхности образца и внутренней поверхности трубчатого индуктора задавалась нулевая величина касатель-

ной составляющей напряженности магнитного поля $H_\tau = 0$ (фазовый сдвиг $\varphi = 0^\circ$).

2. На границе расчета потенциал векторного магнитного поля задавался равным $A_0 = 0$ Вб/м (фазовый сдвиг $\varphi = 0^\circ$).

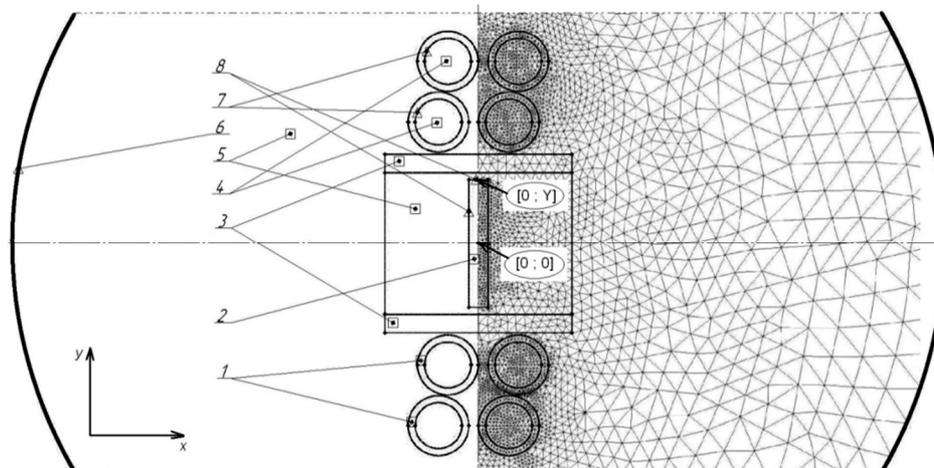


Рис. 3. Модель системы: 1 – медный индуктор; 2 – титановый образец-диск; 3 – кварцевый муфель; 4 – вода; 5 – воздух; 6 – граница расчетной области; 7 – граница внутренней поверхности индуктора; 8 – внешняя поверхность образца (правая полуплоскость показана с сеткой конечных элементов); точка [0; 0] – центр образца и всей системы; точка [0; Y] – периферийная точка образца

Таблица 1

Электрофизические свойства материалов

№	Материал изделия (среды)	Относительная магнитная проницаемость μ	Коэффициент электропроводности σ , См/м
1	Медь <1>	1	56×10^6
2	Титан <2>	1	$2,4 \times 10^6$
3	Кварц <3>	1	0
4	Вода <4>	1	0
5	Воздух <5>	1	0

Примечание: <1> материал – электротехническая медь, из которой изготавливают токоведущие части (витки индуктора); <2> материал – технический титан марки ВТ1-00, из которого изготовлены экспериментальные образцы; <3> материал – кварцевое стекло (аморфное); <4> среда – дистиллированная вода (без учета электрических потерь, возникающих в охладителе); <5> среда – сухой воздух (при нормальных условиях)

Данными для задачи теплопроводности (нестационарной теплопередачи) являются следующие показатели: коэффициент теплопроводности λ ; удельная теплоемкость c ; плотность материала ρ (табл. 2). Ранее было указано, что коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость зависят от температуры, поэтому для титана необхо-

димо учитывать зависимость $\lambda(T)$ и $c(T)$ (рис. 2). Изменением плотности можно пренебречь.

Таким образом, в начальный момент времени при $t = 0$ принято, что температура титанового образца и всей системы равняется $T(t = 0) = 0^\circ\text{C}$ (здесь и далее в работе символ температуры T будет означать температуру в

градусах Цельсия). Это значение температуры задается при учете всех процессов теплоотдачи, включая потери на конвективную

теплоотдачу и излучение. В рассматриваемой системе также отсутствуют начальные стоки (или источники) теплоты.

Таблица 2

Теплофизические свойства материалов

№	Материал изделия	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/К·м	Удельная теплоемкость c , Дж/кг·К	Плотность материала ρ , кг/м ³
1	Медь	387	390	8940
2	Титан	18,85 *	540 *	4505
3	Воздух	0,027	1005	1,16
4	Вода	0,64	4178	996
5	Кварц	1,38	1052	2201

Примечание: * – указаны начальные значения для титана, однако в численном расчете учитывается температурная зависимость $\lambda(T)$ и $c(T)$

Характеристика граничных процессов обусловлена процессами теплоотдачи и соответствующими коэффициентами, которые представлены в табличной форме (табл. 3). Таким образом, теплоотдача излучением (с учетом свойств поверхности излучающего тела – титанового образца) при 600°C составляет 4-5% (можно пренебречь при расчетах) от теплоотдачи конвекцией, однако при 1200°C доля излучения достигает 20-22%. В высокотемпературном диапазоне индукционно-термической обработки (свыше 1000 °C)

происходит интенсивное окисление, поэтому теплоотдача излучением еще возрастает, так как коэффициент излучения (степень черноты) β достигает 0,65-0,7.

Продолжительность и шаг компьютерного эксперимента составили $t = 100$ с и $\Delta t = 5$ с соответственно. Данной продолжительности обработки ТВЧ достаточно для определения стационарной области, а выбранная величина шага обеспечивает необходимую точность описания процесса ускоренного нагрева на начальных участках кинетических зависимостей.

Таблица 3

Теплофизические параметры стоков теплоты в граничных областях

№	Элемент системы и вид охладителя	Коэффициент теплоотдачи α , Вт/°С·м ²	Коэффициент излучения β
1	Медь (внутренняя поверхность трубки) <1>	10000	–
	Вода (спокойная вода)	300-580	–
	Вода (поток воды)	3000-6000 и более	–
	Вода (кипящая вода)	3500-5800	–
	Пар (конденсирующийся)	6000-120000	–
2	Титан (внешняя поверхность образца) <2>	7	0.6 <3>
	Воздух (спокойный)	5-10	–
	Воздух (обдув)	20-300	–

Примечание: <1> – выбрано значение, необходимое для достаточного конвективного охлаждения внутренней поверхности стенки медного индуктора, которое определено при температуре нагрева титанового образца $T = 1200^\circ\text{C}$; <2> – выбрано значение, характерное для конвективной теплоотдачи от внешней поверхности титанового образца при спокойном движении воздуха; <3> – средняя величина коэффициента излучения для окисленного титана $\beta = 0,5-0,7$; k_{sb} – постоянная Стефана-Больцмана

Важнейшей характеристикой, которая используется при тепловом расчете нагрева ТВЧ, является объемная плотность тепловыделения Q . При силе тока на индукторе 1 кА в титановом образце выделяется значительное количество теплоты. Наибольшая величина Q (около $5,7 \times 10^8$ Вт/м³) локализуется у поверхности (координата [0;7]), а далее она спадает на порядок на удалении от поверхности $\sim 1,5$ мм. Для данных образцов-дисков мощность тепловыделения не спадает до нуля при движении в глубину образца, так как в центральной части действует тепловой источник мощностью около $(3,5-4,1) \times 10^7$ Вт/м³. Абсолютное значение тепловыделения на поверхности (координата [0; 7]) при увеличении частоты с 50 кГц до 150 кГц увеличивается более чем в 3 раза, тогда как плот-

ность тока увеличивается не более чем в 1,85 раза (рис. 4).

Для корректного решения самосогласованной краевой задачи электродинамики и теплопроводности для системы индуктор – изделие, описывающего кинетику нагрева при обработке ТВЧ титановых образцов и изделий в зависимости от силы тока на индукторе и продолжительности воздействия ТВЧ, а также учитывающего геометрию элементов системы, изменения тепло- и электрофизических свойств титана и тепловые потери, вызванные конвекцией и излучением, необходимо внести поправку, обусловленную процессами окисления поверхности и формирования морфологически гетерогенного покрытия. Для этого необходимо иметь экспериментальные кинетические кривые нагрева образцов-дисков при различной величине энергопотребления.



Рис. 4. Распределение объемной плотности тепловыделения Q в титановом образце по вертикальной оси Oy от периферии [0; 7] к центру [0; 0] и влияние частоты тока f на глубину скин-слоя (4): 1 – 150 кГц (---); 2 – 90 кГц (—); 3 – 50 кГц (----)

В первом приближении определялось влияние силы тока I одновиткового индуктора (при крайних значениях 1,5 кА и 3 кА) на величину и равномерность нагрева титанового образца-диска на выбранной частоте $f = 90$ кГц. Полученные кривые сопоставлялись с экспериментальными графиками кинетики нагрева (рис. 5).

Теоретические кривые, полученные для периферии [0;7] и центра [0;0] образца-диска при одном значении силы тока индуктора

несколько отличаются, что характеризует неравномерность нагрева. При увеличении силы тока температурная неравномерность по сечению образца также пропорционально увеличивается. Однако теоретические кривые лежат существенно выше экспериментальных зависимостей, что связано с влиянием усиленной теплоотдачи с поверхности морфологически гетерогенной структуры оксидного покрытия [9].

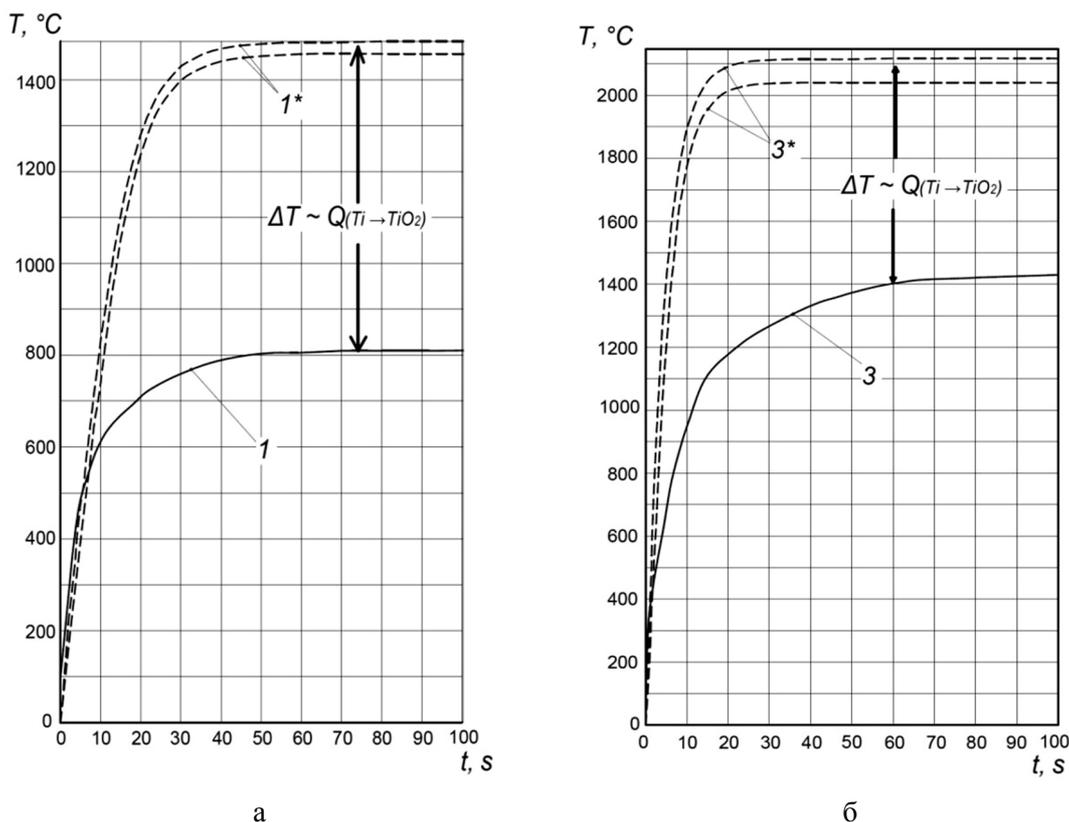


Рис. 5. Экспериментальные зависимости (кривые 1 и 3; —) и теоретические данные (кривые 1* и 3*; - - -) кинетики нагрева титанового образца-диска при силе тока одновиткового индуктора $I_p = 1,5$ кА (а) и $I_p = 3,0$ кА (б) для периферии [0; 7] (верхние кривые 1*, 3*) и центра образца [0; 0] (нижние кривые 1*, 3*)

Таким образом, решение с помощью МКЭ самосогласованной краевой задачи электродинамики и теплопроводности для системы индуктор – изделие, описывающей кинетику нагрева при обработке ТВЧ титановых образцов, требует внесения поправки Q_V , вызванной окислением и ростом покрытия. В программном пакете для решения задачи теплопроводности, входящем в программу расчетов МКЭ «Elcut», имеется возможность графического ввода источника объемной плотности тепловыделения (или поглощения теплоты) как функции от температуры $Q_V(T)$. Величину тепловых затрат, вызванных процессом окисления, можно оценить при анализе разницы между температурными зависимостями, полученными в ходе эксперимента (кривые 1-3) и теоретических расчетов (кривые 1*-3*). Произведение средней величины удельной теплоемкости нагреваемого материала c на его массу m и на полученную разницу ΔT находится в прямо пропорциональной зави-

симости от затраченного количества теплоты Q на образование новой фазы, например диоксида титана. Отношение тепловой энергии Q к термически активированному объему V нагреваемого образца является функцией температуры $Q_V(T)$, поэтому целесообразно представить ее в графическом виде для рассмотренных расчетных случаев (рис. 6).

С увеличением силы тока на индукторе тепловые потери также возрастают и становятся существенными в диапазоне свыше $T = 600^\circ\text{C}$. Это объясняется возрастанием энергетической напряженности процессов при неизменной величине активированного объема приповерхностного слоя образца.

Таким образом, решение поставленной задачи с учетом тепловых потерь представляет собой теоретические кривые 1'-3', которые сверху (для периферии [0;7]) и снизу (для центра [0;0]) ограничивают экспериментальные зависимости (кривые 1-3) кинетики нагрева ТВЧ титановых образцов (рис. 7).

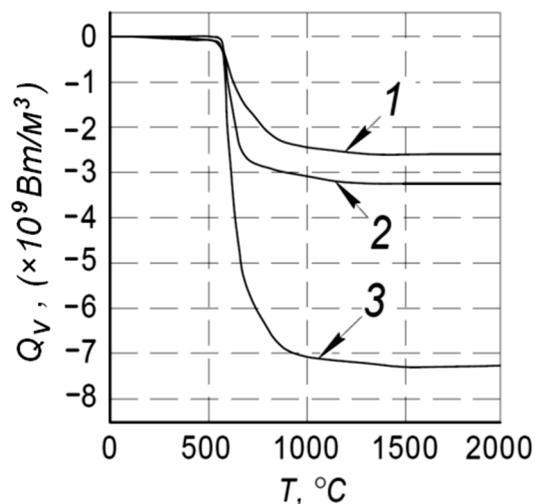


Рис. 6. Зависимость тепловых потерь $Q_V(T)$, используемых для определения теоретических кривых 1*-3*

Данные теоретических расчетов коррелируют с экспериментальными результатами, что подтверждает необходимость учета влияния процесса усиленной теплоотдачи с поверхности оксидного покрытия при расчетах МКЭ. Проникновение переменного магнитного поля, характеризуемого частотой f , в глубину металлического образца приводит к его существенному разогреву и окислению поверхности. В процессе нагрева металлического образца и его последующей выдержки происходит также существенный нагрев окружающей газовой атмосферы. В случае нагрева титана в кислородсодержащей среде (воздухе) на его поверхности будут протекать окислительные процессы, в результате которых поверхность будет менять свои структурно-химические и морфологические характеристики, физико-механические свойства и функциональные качества [4, 5, 10].

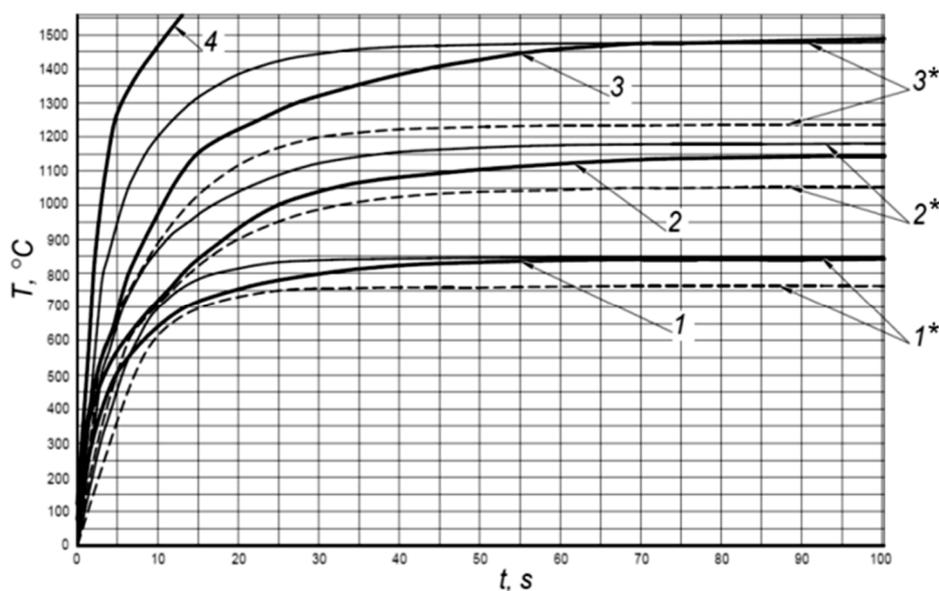


Рис. 7. Экспериментальные зависимости (кривые 1-3) и теоретические данные (кривые 1*-3*) кинетики нагрева титанового образца-диска, полученные с учетом термохимических процессов при формировании оксидных покрытий

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания образовательным

организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ (проект № 11.1943.2017/ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабат Г.И.** Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. М.-Л.: Энергия, 1965. 552 с.
2. Оборудование для индукционно-термической обработки малогабаритных ме-

- таллических изделий / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Индукционный нагрев. 2013. № 2 (24). С. 44-47.
3. **Кувалдин А.Б.** Исследования и применение бесконтактной системы измерений

температур вращающихся дисков турбин при индукционном нагреве / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. № 1. С. 277-281.

4. Composition, structure and mechanical properties of the titanium surface after induction heat treatment followed by modification with hydroxyapatite nanoparticles / A. Fomin, S. Dorozhkin, M. Fomina et al. // Ceramics international. 2016. Vol. 42. № 9. P. 10838-10846.

5. Нанокристаллическая структура поверхностного слоя технически чистого титана, подвергнутого индукционно-термическому оксидированию / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Письма в журнал технической физики. 2013. Т. 39. Вып. 21. С. 70-75.

6. **Слухоцкий А.Е.** Индукторы / А.Е. Слухоцкий. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. 69 с.

7. **Кухлинг Х.** Справочник по физике: пер. с нем. / Х. Кухлинг. М.: Мир, 1985. 520 с.

8. **Murray J.L.** The O-Ti (Oxygen-Titanium) System / J.L. Murray, H.A. Wriedt // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. 1987. Vol. 8. № 2. P. 148-165.

9. **Fomin A.A.** FEM modeling and experimental data of induction heating of titanium medical devices / A.A. Fomin, M.A. Fomina // 57th Int Sci. Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University. Riga, Latvia, October 13-14, 2016. 2016. P. 1-4.

10. **Kofstad P.** High-Temperature Oxidation of Metals / P. Kofstad. Wiley, New York, 1966. 340 p.

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомина Марина Алексеевна – студентка Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Войко Алексей Владимирович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Федосеев Максим Евгеньевич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кошуро Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Зоркин Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksander A. Fomin – PhD, Associate Professor, Postdoctoral Researcher, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Marina A. Fomina – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksey V. Voyko – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Maksim E. Fedoseev – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Koshuro – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksander Ya. Zorkin – Dr. Sc., Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Rodionov Igor V. – Dr.Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 01.03.17, принята к опубликованию 17.03.17

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 681.171.5

ИДЕНТИФИКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

И.А. Менщиков

IDENTIFICATION MODEL FOR PREDICTING RESOURCE INDICATORS OF ELECTROMECHANICAL COMPLEXES IN TRANSPORT SYSTEMS

I.A. Menshikov

Для повышения эффективности эксплуатации электромеханических комплексов и транспортных систем предложено совершенствование структуры систем технической эксплуатации на базе математического расчета остаточного ресурса диагностических параметров в соответствии с фактическим состоянием изоляции электромеханических комплексов и транспортных систем.

Ключевые слова: *остаточный ресурс, диагностические параметры, электромеханические комплексы, транспортные системы, математическое моделирование*

Грузовые электровозы переменного тока серии ВЛ-80С на магистральном железнодорожном транспорте работают в очень тяжелых условиях, поэтому к ним предъявляются высокие требования по техническому обслуживанию отдельных узлов и агрегатов. Особое место при техническом обслуживании занимают тяговые электродвигатели постоянного тока типа НБ-418К6 (ТЭД) и вспомогательные электрические машины (ВЭМ), фазорасщепители типа НБ-455 (ФР), предназначенные для преобразования однофазного напряжения обмотки собственных нужд тягового трансформатора напряжением 660 В в трехфазную систему напряжения 380 В, и асинхронные электродвигатели (АД) типа АЭ92-402 с

The new method is proposed in order to increase the operating efficiency of electromechanical complexes and transport systems by improving the structure of the existing systems of technical operation on the basis of mathematical calculation of the residual life of diagnostic parameters in accordance with actual conditions of insulation of electrical complexes in transport systems.

Keywords: *residual resource, diagnostic parameters of electromechanical systems, transport systems, mathematical modeling*

короткозамкнутым ротором, служащие для приведения в действие главного компрессора пневматической тормозной системы грузового поезда и центробежных вентиляторов охлаждения ТЭД, ВЭМ и ТЭД, являющиеся наиболее нагруженными, наиболее уязвимыми и неконтролируемыми узлами.

На долю ТЭД приходится до 52 % возникающих отказов, на ВЭМ приходится 35 % неисправностей и отказов. Из-за отказов ТЭД и ВЭМ в грузовых электровозах железнодорожный транспорт терпит значительные убытки, связанные с внеплановыми ремонтами, простоями, исчисляемыми десятками часов, а также с аварийными ситуациями, нарушающими безопасность движения, поэтому разработка бортовых

систем технической диагностики ТЭД и ВЭМ является актуальной.

На рис. 1 представлен статистический анализ отказов ТЭД типа НБ-418К6 грузовых электровозов серии ВЛ-80 С за пять лет по локомотивному депо ст. Петров Вал Приволжской железной дороги.

Техническое состояние ТЭД и ВЭМ изменяется со временем и его диагностиче-

ские параметры остаются постоянными лишь на конечном интервале времени, поэтому алгоритм определения остаточного ресурса состояния ТЭД и ВЭМ должен отслеживать их временные изменения, для чего используются система бортовой технической диагностики, включающая метод и средства рекуррентной идентификации отказов и неисправностей в ТЭД и ВЭМ.

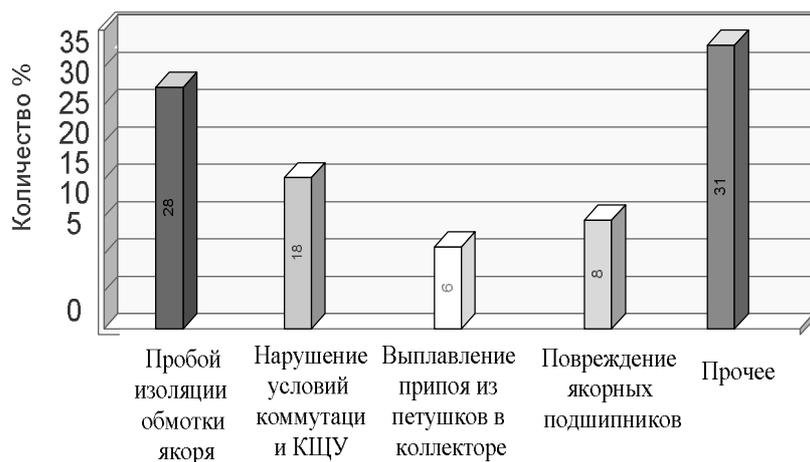


Рис. 1. Статистика отказов тяговых электродвигателей НБ-418К6

При исследовании остаточного ресурса состояния ТЭД и ВЭМ следует ответить на вопросы:

- каков прогноз изменения нескольких последующих значений выходных диагностических параметров ТЭД и ВЭМ;

- как следует изменять входные параметры ТЭД и ВЭМ при очередном шаге управления;

- следует ли изменять режимы обработки диагностической информации.

Конечной целью создания бортовой автоматизированной системы технической диагностики (БАСТД), состоящей из бесконтактных датчиков тока и напряжения, блока измерения диагностических сигналов, а также блока обработки диагностических параметров, содержащего стратегический идентификатор определения остаточного ресурса ТЭД и ВЭМ, является разработка её принципиальной электрической схемы, реализующей заданные условия функционирования [1, 2].

На рис. 2 представлена разработанная автором функциональная схема бортовой

системы технической диагностики электровоза серии ВЛ-80С.

БАДС состоит из следующих элементов: 1 – датчик и преобразователя тока; 2 – датчик и преобразователь напряжения; 3 – порт для передачи информационных сигналов от преобразователя тока; 4 – порт для передачи информационных сигналов от преобразователя напряжения и для подключения питания дистанционных элементов; блок преобразования диагностических сигналов, включающий операционный усилитель сигналов от преобразователей тока и напряжения, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), источник опорного напряжения; блок измерения и прогнозирования диагностических сигналов, состоящий из устройства измерения угловой скорости вращения вала тягового электропривода постоянного тока, устройства измерения коэффициента мощности и качества коммутации тягового электропривода.

Блок преобразования диагностических сигналов (БПДС) предназначен для преобразования входных сигналов с датчиков то-

ка и напряжения сети ДИТ-300 HR MS в соответствующие входные аналоговые диагностические параметры, измерения угловой скорости вращения якоря тягового электропривода и качества коммутации тягового электропривода.

Блок измерения и прогнозирования диагностических параметров (БИДП) предна-

значен для измерения угловой частоты вращения якоря тягового электропривода, измерения коэффициента мощности и качества коммутации тягового электропривода, прогнозирования остаточного ресурса функционирования ТЭД ВЭМ.

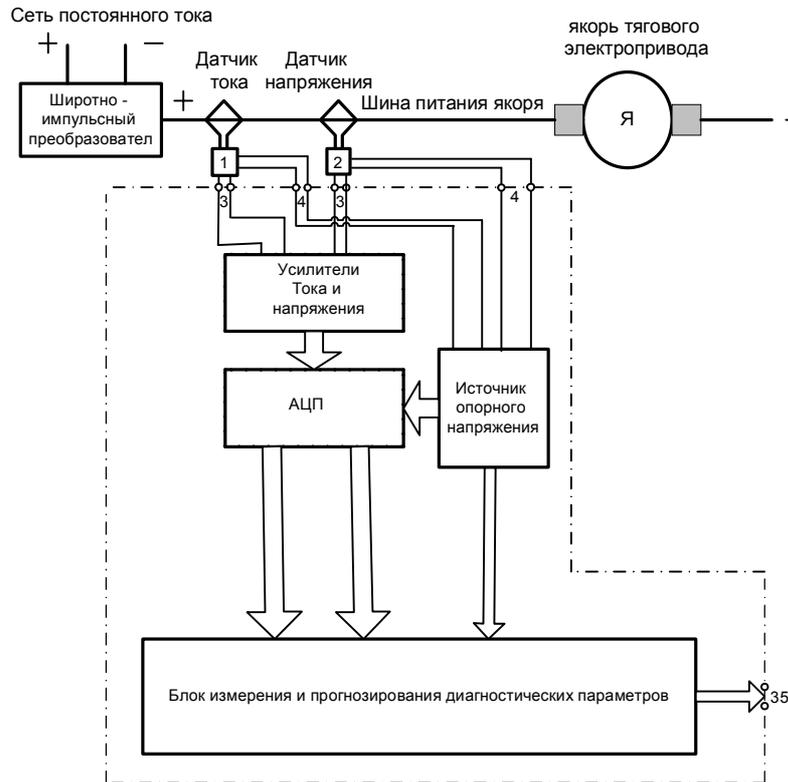


Рис. 2. Функциональная схема бортовой автоматизированной системы технической диагностики электровоза ВЛ-80 С

Функциональная схема БИДП ЭС приведена на рис. 3.

Блок БИДП состоит из устройства измерения коэффициента мощности, устройства измерения величин тока и напряжения, устройства измерения частоты вращения якоря тягового электропривода, устройства допускового контроля и прогнозирования (УДКП) и устройства постоянной памяти ПЗУ, настроенной на образцовый диагностический сигнал.

Для создания микропрограммного автомата идентификации входных и выходных диагностических сигналов блока БИДП необходимо задать функции переходов входных и выходных сигналов. Для этого можно использовать аналитические выражения, графы и таблицы.

Например, последовательность изменения состояний входов автомата идентификации дефектов (АИД) можно представить в виде

$$\begin{aligned}
 P_1(x_1, x_2, x_3) &= 15,85 - 0,033x_1 - 0,095x_2 + 0,023x_3 - 0,033x_1x_2 - 0,033x_1x_3 + \\
 &+ 0,033x_2x_3 + 0,033x_1x_2x_3, \\
 P_2(x_1, x_2, x_3) &= 26,16 - 0,919x_1 + 1,301x_2 + 0,609x_3 + 0,169x_1x_2 - 0,919x_1x_3 + \\
 &+ 0,96x_2x_3 - 0,169x_1x_2x_3, \\
 P_3(x_1, x_2, x_3) &= 177,25 - 1,6x_2 + 0,05x_3.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

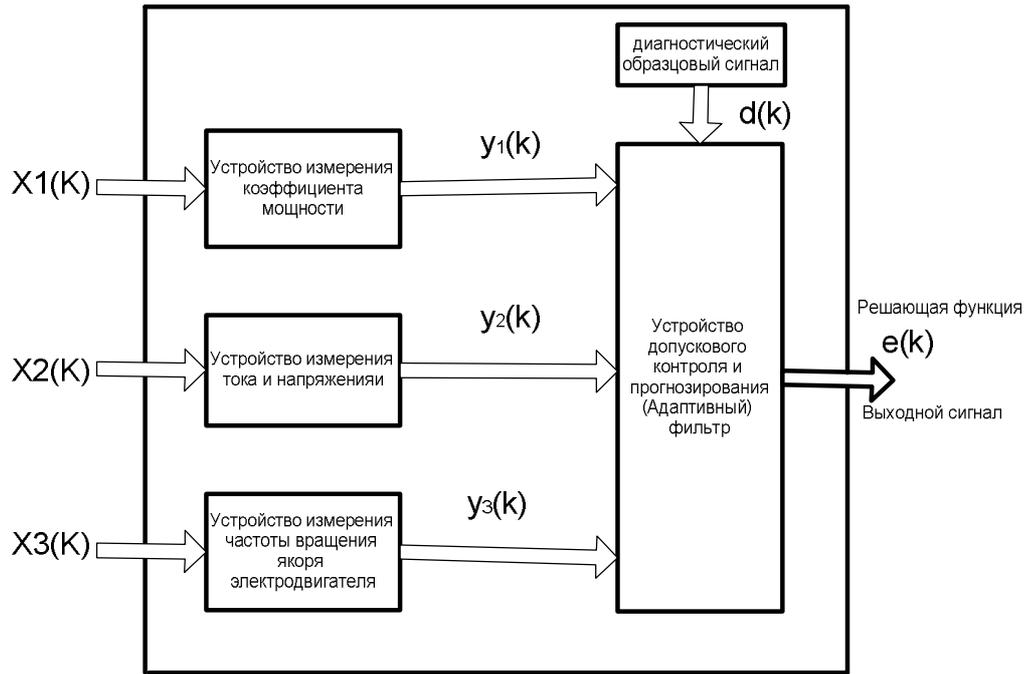


Рис. 3. Функциональная схема измерения и прогнозирования диагностических параметров

В этой записи входная последовательность значений коэффициентов линейного полинома исправного состояния ТЭД, в

$$\begin{aligned}
 P_1(x_1, x_2, x_3) &= 000 \rightarrow 001 \rightarrow 010 \rightarrow 011 \rightarrow 100 \rightarrow 101 \rightarrow 110 \rightarrow 111, \\
 P_2(x_1, x_2, x_3) &= 000 \rightarrow 001 \rightarrow 010 \rightarrow 011 \rightarrow 100 \rightarrow 101 \rightarrow 110 \rightarrow 111, \\
 P_3(x_1, x_2, x_3) &= 000 \rightarrow 001 \rightarrow 010.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Запись набор 000 обозначает, что в начальный момент времени (нулевой такт) на все входы АИД поступают нулевые входные сигналы, а знак \rightarrow означает, что входной набор, записанный слева от него, сменяется в следующем такте входным набором, стоящим справа.

$$\begin{aligned}
 P_1(y_1, y_2, y_3) &= S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow S_5 \rightarrow S_6 \rightarrow S_7, \\
 P_2(y_1, y_2, y_3) &= S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow S_5 \rightarrow S_6 \rightarrow S_7, \\
 P_3(y_1, y_2, y_3) &= S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Условие работы дискретного АИД с памятью определяется функциональными соответствиями между входной и выходной последовательностями. Для математического описания дискретного АИД с памятью будем использовать следующие функциональные зависимости. Состояние памяти АИД в произвольный момент времени $t + 1$ определяется состоянием входов и состоянием памяти АИ в момент времени t :

двоичной системе счисления дискретного АИД имеет вид:

Результатом работы дискретного АИД является выдача выходных сигналов (изменения состояний выходов). Последовательность изменений выходов дискретного АИД будем считать выходной последовательностью. Выходную последовательность обозначим следующим образом:

$$y(t + 1) = \delta[x(t), y(t)]. \tag{4}$$

Рассмотренная функциональная зависимость называется функцией перехода АИД.

Выходной сигнал АИД в произвольный момент времени t определяется состоянием входов и состоянием памяти в этот же момент времени

$$S(t) = \lambda[x(t), y(t)], \tag{5}$$

либо только состоянием памяти

$$S(t) = \lambda[y(t)]. \quad (6)$$

Эти функциональные зависимости называют функциями выходов АИД.

Функция выходов (4) описывается функционированием автомата Мили, а функция выходов (5) описывается функционированием автомата Мура.

На основании результатов анализа изменения во времени диагностических параметров можно сделать вывод, что оценку различия значений наблюдаемых и прогнозируемых параметров можно выполнить методом средних, в соответствии с которым определяется среднее значение и сред-

неквадратичное отклонение каждой из выборок.

Для обнаружения неслучайных отклонений значений диагностических параметров необходимо их непрерывно измерять с помощью датчиков за периоды T_y (устойчивого функционирования ТЭД и ВЭМ) и T_N (неустойчивого функционирования ТЭД и ВЭМ). Измерения и непрерывный контроль совокупности n_y значений объема параметров контроля W за период, соответствующий устойчивому функционированию ТЭД, и совокупности n_N значений за отрезок времени, соответствующий неустойчивому функционированию ТЭД, повышают надежность и эффективность эксплуатации электровозов серии ВЛ-80 С.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гольдберг О.Д.** Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.С. Свириденко. М.: Высш. шк., 2001. 512 с.

2. **Осипов Л.А.** Эффективные алгоритмы и программы цифровой обработки сигналов / Л.А. Осипов. М.: РГОТУПС, 1999. 60 с.

Меншиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 04.03.17, принята к опубликованию 17.03.17

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Редакция готова опубликовать сведения о ваших вузах и предприятиях, об их истории, научных и производственных успехах, планах на будущее. Объем публикации – одна страница текста с фотографиями.

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПАКЕТИРОВАННОГО
МАГНЕТРОНА ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ****И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев****RESEARCH INTO TRANSIENT PHENOMENA IN POWER-SUPPLY
SYSTEMS OF INDUSTRIAL MAGNETRON GENERATORS****I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, E.S. Gordeev**

Для создания СВЧ электротехнологических установок требуются регулируемые источники СВЧ энергии. Такие источники могут быть построены на магнетронах пакетированного типа, при этом должна быть решена задача оперативного управления режимом работы магнетрона за счет изменения анодного тока. С помощью имитационной модели, построенной в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink, исследованы переходные процессы в системе электропитания пакетированного магнетрона мощностью 3 кВт. Система электропитания оснащена пропорционально-интегральным регулятором, который позволяет стабилизировать анодный ток магнетрона на заданном уровне путем импульсно-фазового управления тиристорами, которые встречно-параллельно включены между сетью и повышающим трансформатором с высоковольтным выпрямителем.

Ключевые слова: магнетрон, система электропитания, пропорционально-интегральный регулятор, переходные процессы, имитационное моделирование

Разработка источника СВЧ энергии, выходная мощность которого может изменяться в широких пределах по сигналу управления, является актуальной задачей, так как решение этой задачи позволит реализовать раз-

Regulated microwave generators are required in designing various types of industrial electric appliances. These generators could be represented by a packaged magnetron on condition of solving the problem with maintaining the operation mode through the anode current operation control. The paper presents a research into transient phenomena in a 3 kW packaged magnetron power-supply system using the MATLAB+Simulink environment simulation. The power supply anode circuit current is provided with a pulse-phase PI-control of the 3-phase anti-parallel thyristor rectifier in the low voltage side of the power supply.

Keywords: magnetron, power-supply system, proportional-integral controller, transient phenomena, simulation modeling

личные электротехнологические процессы как в промышленности, так и при проведении научных исследований [1].

Для построения источников СВЧ энергии в настоящее время имеется широкая гамма

электронных приборов. Наиболее часто применяются магнетроны, которые различаются системами создания магнитного поля [2]. В каталогах фирм заявлены как пакетированные магнетроны (со встроенными магнитами), так и магнетроны с электромагнитами. Известны также магнетроны с комбинированной магнитной системой.

Функционирование пакетированного магнетрона осуществляется с помощью системы электропитания (СЭП) из двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи. Для магнетрона с электромагнитом требуется еще источник с возможностью регулировки тока электромагнита.

Для источника анодного напряжения магнетрон представляет собой нагрузку со специфическими свойствами, к числу которых относятся следующие:

- узкая область рабочих значений анодного напряжения, зависящих от магнитной индукции и параметров нагрузки;

- малая величина динамического сопротивления и существенная зависимость выходной мощности от анодного тока.

Величины тока и напряжения, при которых магнетрон работает с источником анодного питания, определяется точкой пересечения вольт-амперной характеристики (ВАХ) магнетрона и внешней характеристики источника.

ВАХ магнетрона при кусочно-линейной аппроксимации имеет вид

$$U_a = R_{дин} \cdot I_a + U_0, \quad (1)$$

где $R_{дин}$, U_0 – соответственно динамическое сопротивление и пороговое напряжение магнетрона.

Внешняя характеристика источника анодного питания может быть представлена следующим образом:

$$U_a = E - R_{вн} \cdot I_a, \quad (2)$$

где E , $R_{вн}$ – ЭДС и внутреннее сопротивление источника соответственно.

Из (1) и (2) получим выражение для определения анодного тока

$$I_a = \frac{E - U_0}{R_{вн} + R_{дин}}.$$

Таким образом, требуемое значение анодного тока можно получить за счет изменения ЭДС источника питания E или его внутреннего сопротивления $R_{вн}$.

Заметим, что, когда магнитное поле создается электромагнитом, заданное значение анодного тока магнетрона можно обеспечить регулировкой тока электромагнита, поэтому необходимость регулировки анодного питания отсутствует.

Источники питания анодной цепи для магнетронов промышленного назначения создают в основном на базе трехфазного мостового выпрямителя с повышающим трансформатором. Регулирование анодного напряжения осуществляется встречно-параллельно соединенными тиристорами, которые включаются между сетью 50 Гц и первичной обмоткой повышающего трансформатора.

В работе [3] предложена имитационная модель подобного источника, которая позволяет исследовать его статические характеристики. На рис. 1 показана схема усовершенствованной версии этой модели, с помощью которой можно исследовать переходные процессы в СЭП пакетированного магнетрона, в частности при изменении сигнала уставки. Модель силовой части источника включает следующие блоки: Three-Phase Source (трехфазная сеть), High-Voltage Three-Phase Transformer (высоковольтный трехфазный повышающий трансформатор), Universal Bridge (трехфазный мостовой выпрямитель). К выходу выпрямителя подключена подсистема Magnetron, в состав которой входят последовательно соединенные блоки Diode, $R_{дин}$ и DC Voltage Source. Тиристорный регулятор напряжения представлен блоками Thyristor1 – Thyristor6, управляющие входы которых соединены с соответствующими выходами подсистемы Control. Эта подсистема синхронизирована с напряжениями питающей сети. На входе In1 можно задавать величину угла управления тиристорами.

Для измерения анодного тока служит резистор R_0 , напряжение на котором через измеритель $U1$ и через блок Transfer Fcn, имитирующий фильтр низких частот, пода-

ется на один из входов элемента сравнения (блок Sum_1). На другой вход этого элемента поступает сигнал уставки, задающий требуемое значение анодного тока. В результате формируется сигнал ошибки, ко-

торый подается на пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, выходной сигнал которого через блок ограничения Saturation подается на вход подсистемы Control.

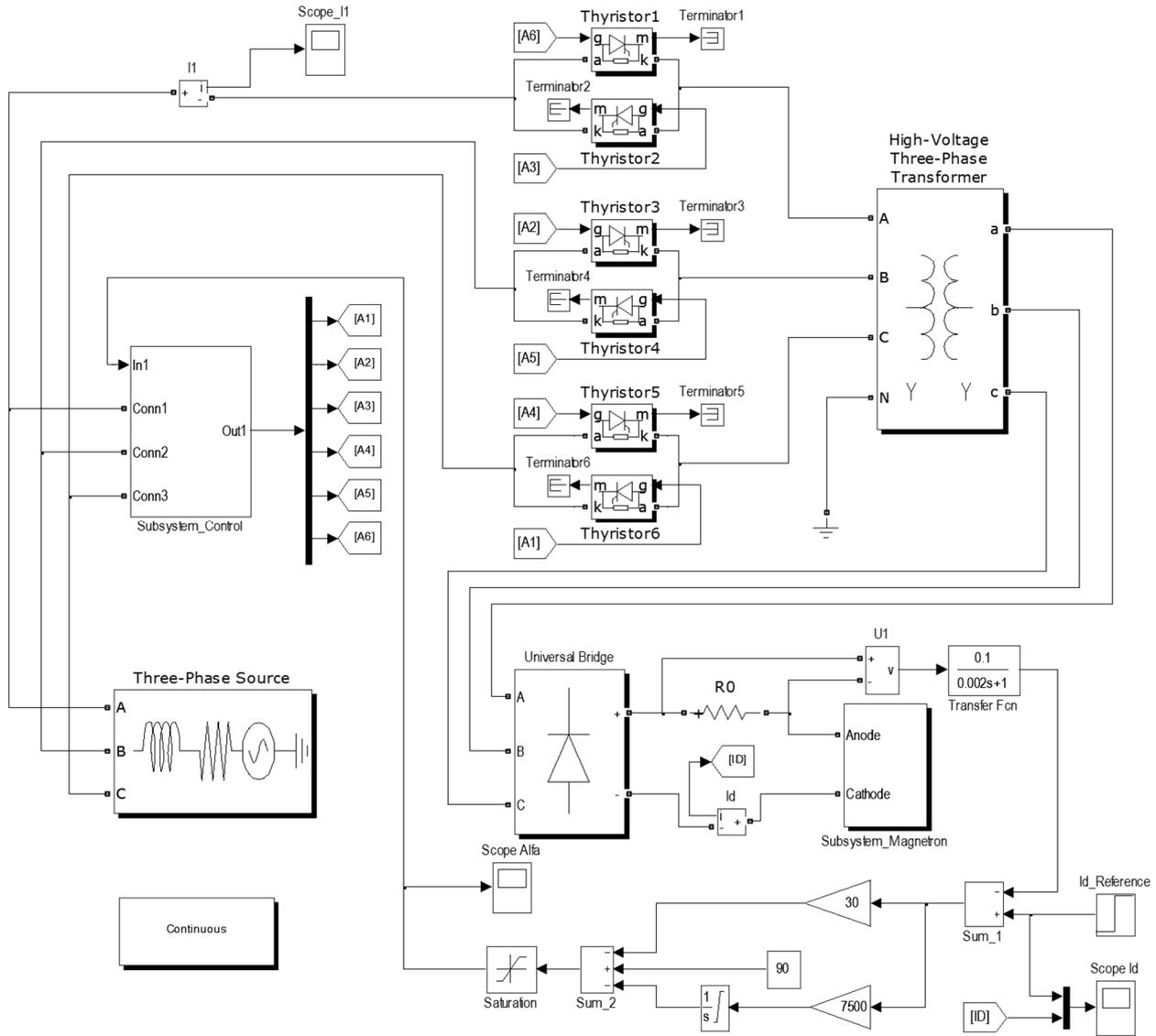


Рис. 1. Схема имитационной модели для исследования переходных процессов в системе электропитания пакетированного магнетрона

ПИ-регулятор устанавливает на входе блока Control такую величину угла управления α , при котором ошибка регулирования ΔX стремится к нулю. Для того, чтобы в динамических режимах угол управления α не принимал значения, при которых будет происходить сбой работы тиристорного регулятора, в блоке Saturation заданы допустимые пределы указанного угла от 50 до 90 эл. град.

Выражение в операторной форме для приращения угла управления тиристорами регулятора имеет вид

$$\Delta\alpha(p) = -\left(K_1 + \frac{K_2}{p}\right)\Delta X(p), \quad (3)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты автоматического регулятора.

Знак минус в формуле (3) присутствует по той причине, что приращения ошибки ре-

гулирования и угла управления тиристорами регулятора имеют противоположные знаки.

Ошибка регулирования в операторной форме записывается следующим образом:

$$\Delta X(p) = I_{ref}(p) - I_a(p) \frac{K_3}{T_3 p + 1}, \quad (4)$$

где $I_{ref}(p)$, $I_a(p)$ – заданное и фактическое значение анодного тока; K_3 , T_3 – коэффициент передачи и постоянная времени фильтра низких частот.

С помощью модели (рис. 1) проведено исследование переходных процессов в СЭП пакетированного магнетрона E3328 фирмы Toshiba мощностью 3 кВт [4]. Исходя из параметров этого магнетрона, при моделировании приняты пороговое напряжение 4500 В, динамическое сопротивление 200 Ом. СЭП магнетрона подключена к трехфазной сети 50 Гц с напряжением 380 В. Индуктивность и активное сопротивление сети составляли 100 мкГн и 0,01 Ом соответственно. Номинальная мощность повышающего трансформатора 10 кВА, коэффициент трансформации – 0,0655.

Результаты исследований показали, что существенное влияние на качество переходных процессов оказывают параметры ПИ-регулятора. При неблагоприятном сочетании коэффициентов K_1 , K_2 возможны значительные перерегулирования в ходе колебательного процесса. Возможны также ситуации, когда процесс имеет асимптотический характер с недопустимо большой длительностью.

На рис. 2 показаны виртуальные осциллограммы, которые получены при моделировании ситуации, когда начальное значение анодного тока составляет 0,2 А. Затем подается команда на увеличение анодного тока до 0,8 А с последующей стабилизацией его на этом уровне. Коэффициенты ПИ-регулятора имели следующие значения: $K_1 = 30$; $K_2 = 7500 \text{ с}^{-1}$. Сопротивление измерительного резистора составляет 10 Ом. Фильтр низких частот имеет следующие параметры: $K_3 = 0,1$; $T_3 = 0,002 \text{ с}^{-1}$.

Из графиков видно, что система автоматического управления выполняет свои

функции. Длительность переходного процесса находится в пределах одного периода сети 50 Гц. Начальное значение угла управления α составляет примерно 85 эл. град. Сразу после подачи команды на увеличение анодного тока угол α резко уменьшается до минимального значения в 50 эл. град. Затем начинает возрастать и после небольшого перерегулирования устанавливается на уровне 62 эл. град, при котором обеспечивается заданное значение анодного тока. Амплитуда сетевого тока увеличивается примерно в 3 раза, при этом наблюдается изменение формы этого тока.

При анализе полученных результатов возникает естественный вопрос: почему кратность изменения анодного тока магнетрона равна четырем, а кратность изменения амплитуды сетевого тока при этом всего три?

Этому явлению может быть дано следующее объяснение.

СЭП магнетрона потребляет из сети переменный ток несинусоидальной формы, основная гармоника которого смещена относительно первой гармоники сетевого напряжения на некоторый угол φ . Активная мощность, отбираемая от сети, в этом случае может быть определена по формуле

$$P_c = 3 \cdot \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t)i(t)dt = 3 \cdot U_c \cdot I_c \cdot \chi, \quad (5)$$

где $u(t)$, $i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока;

$$U_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t)^2 dt}, \quad I_c = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t)^2 dt} \quad -$$

среднеквадратичные значения напряжения и тока одной фазы сети; χ – коэффициент мощности, который зависит от угла φ и гармонического состава кривых напряжения и тока.

Активная мощность на аноде магнетрона определяется формулой

$$P_a = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u_a(t)i_a(t)dt,$$

где $u_a(t)$, $i_a(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока анода.

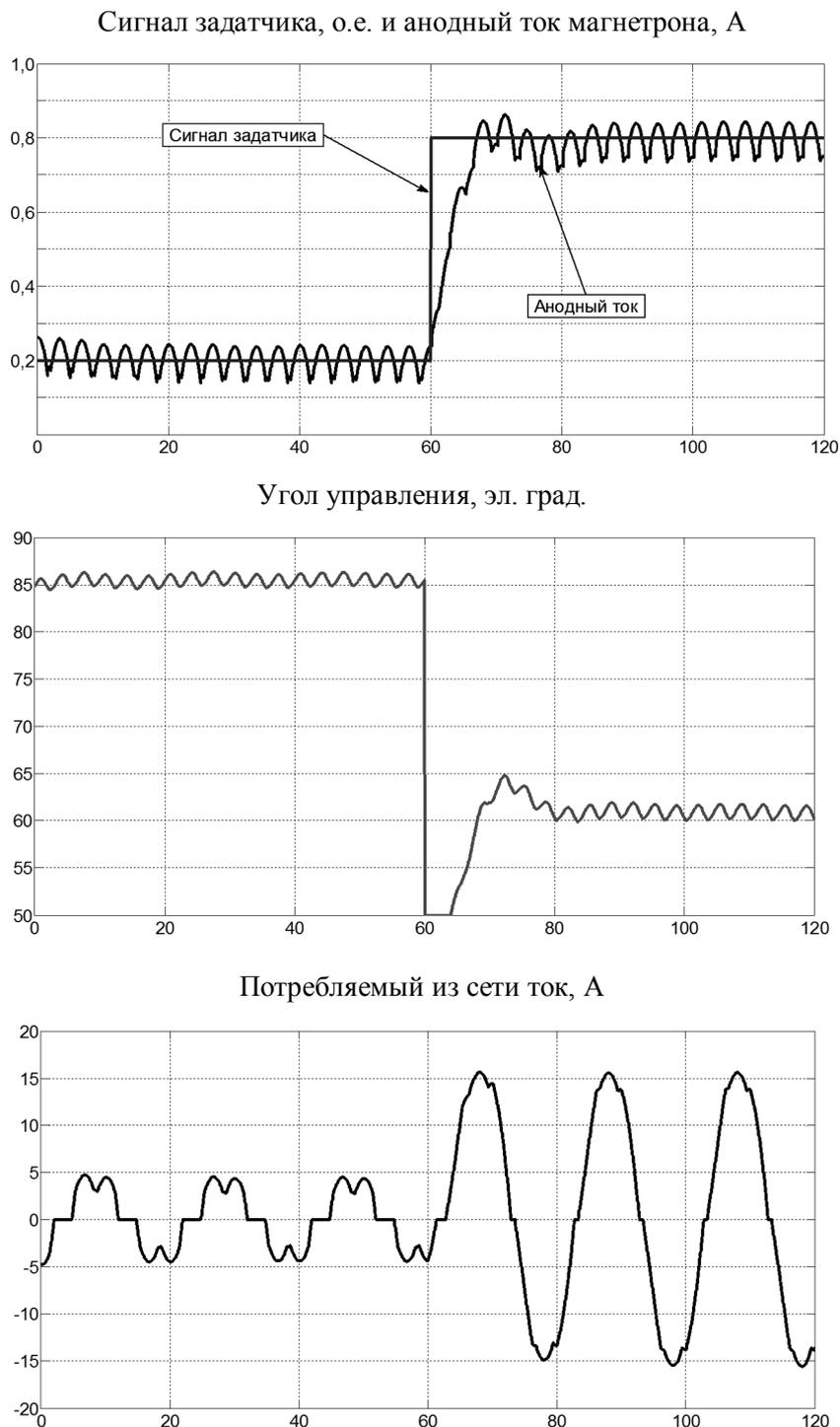


Рис. 2. Виртуальные осциллограммы. По оси абсцисс – время в миллисекундах

Так как напряжение на аноде и ток анода имеют малые пульсации, выражение (7) с достаточной степенью точности можно записать следующим образом:

$$P_a = U_a \cdot I_a,$$

где $U_a \cdot I_a$ – средние значения напряжения и тока анода.

Изменение анодного напряжения в процессе регулирования анодного тока может быть определено формулой

$$\Delta U_a = R_{дин} \cdot I_a.$$

Для рассматриваемого примера в процессе регулирования анодного тока от 0,2 до 0,8 А изменение анодного напряжения

составляет 120 В. По отношению к величине порогового напряжения магнетрона $U_0 = 4500$ В это изменение не превышает 3%, что позволяет им пренебречь при расчете мощности на аноде по формуле (4). Вследствие этого при изменении анодного тока в 4 раза мощность на аноде изменяется практически в 4 раза.

Обратимся снова к формуле (5). Регулирование анодного тока магнетрона осуществляется за счет изменения угла управления тиристорами α . Когда анодный ток магнетрона был равен 0,2 А и угол управления составлял 85 эл. град, то первая гармоника тока отставала от первой гармоники напряжения на угол φ_1 , при котором коэффициент мощности имел значение χ_1 . Увеличение анодного тока до значения 0,8 А было достигнуто за счет уменьшения угла управления до 62 эл. град., при этом первая гармоника тока отстает от первой гармоники напряжения на угол $\varphi_2 > \varphi_1$, а коэффициент мощности $\chi_2 > \chi_1$.

Предположим, что сеть имеет достаточно большую мощность, при которой изменение режима работы магнетрона не приводит к изменению сетевого напряжения. В этом случае активную мощность, потребляемую из сети, для этих двух режимов работы магнетрона найдем по формулам:

$$P_{c1} = 3 \cdot U_c \cdot I_{c1} \cdot \chi_1; \quad (6)$$

$$P_{c2} = 3 \cdot U_c \cdot I_{c2} \cdot \chi_2, \quad (7)$$

где I_{c1} , I_{c2} – среднеквадратичные значения сетевого тока для первого и второго режима соответственно.

Естественно предположить, что при изменении мощности на аноде магнетрона в 4 раза аналогичным образом изменится величина активной мощности, потребляемой из сети. Из выражений (6) и (7) получим

$$I_{c2} \cdot \chi_2 = 4I_{c1}\chi_1.$$

В процессе имитационного моделирования было получено, что кратность изменения сетевого тока составила примерно 3. В результате получим выражение, которое связывает значения коэффициентов мощности в двух рассмотренных режимах

$$\chi_1 = 0,75\chi_2.$$

Таким образом, за счет изменения угла управления тиристорами α происходит изменение угла сдвига фаз φ между основными гармониками сетевого напряжения и тока, а также изменение формы сетевого тока. Это приводит к соответствующему изменению коэффициента мощности χ , в результате чего кратности изменения сетевого и анодного тока не совпадают.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 506 с.

2. **Артюхов И.И.** Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов: СГТУ, 2000. 48 с.

3. **Артюхов И.И.** Имитационная модель регулируемого источника анодного напряжения для пакетированного магнетрона промышленного назначения / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, Е.С. Гордеев // Вопросы электротехнологии. 2016. № 4(13). С. 33-38.

4. TOSHIBA Industrial Magnetron E3328. http://www.hokuto.co.jp/eng/products/ind_magnetron/pdf/E3328_E.pdf

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan I. Artyukhov – Dr.Sc., Professor, Department of Electricity Supply to Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Земцов Артём Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани

Гордеев Егор Сергеевич – магистрант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Artem I. Zemtsov – PhD, Associate Professor, Department of Electricity Supply to Industrial Enterprises, branch of Samara State Technical University in Syzran, Doctoral student at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Egor S. Gordeev – Master Student, Department of Electricity Supply to Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.17, принята к опубликованию 17.03.17

УДК 621.365.5

**ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК**

А.С. Добродум, А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский, С.Г. Калганова

**TERMINOLOGY DATABASE, ENERGY EFFICIENCY
AND ELECTRICITY SUPPLY
FOR MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGY DEVICES**

A.S. Dobrodum, A.V. Fedorov, Yu.S. Arkhangelsky, S.G. Kalganova

Приведены основные термины в области применения СВЧ энергии в технологических процессах и установках, оценки энергетической эффективности СВЧ электротехнологических установок разного типа, рассмотрены схемы электроснабжения СВЧ генераторов и возможности применения в СВЧ электротехнологических установках широкополосных СВЧ электровакуумных приборов.

Ключевые слова: терминологическая база, энергетическая эффективность, электроснабжение, СВЧ электротехнологические установки

За годы исследований и разработок в области применения СВЧ энергии в технологических процессах обработки диэлектрических материалов, сред и изделий сло-

The provided main terms refer to the area of microwave energy application in technological processes and installations, estimation of power effectiveness of the various types microwave electrotechnological installations. The authors consider the schemes of power supply to microwave generators and possibility of utilizing three-lane microwave electrovacuum devices in microwave electrotechnological installations.

Keywords: terminological base, energy efficiency, electricity, microwave electrotechnological installation

жилась весьма широкая терминологическая база.

В электротермии говорят о диэлектрическом нагреве, установках диэлектриче-

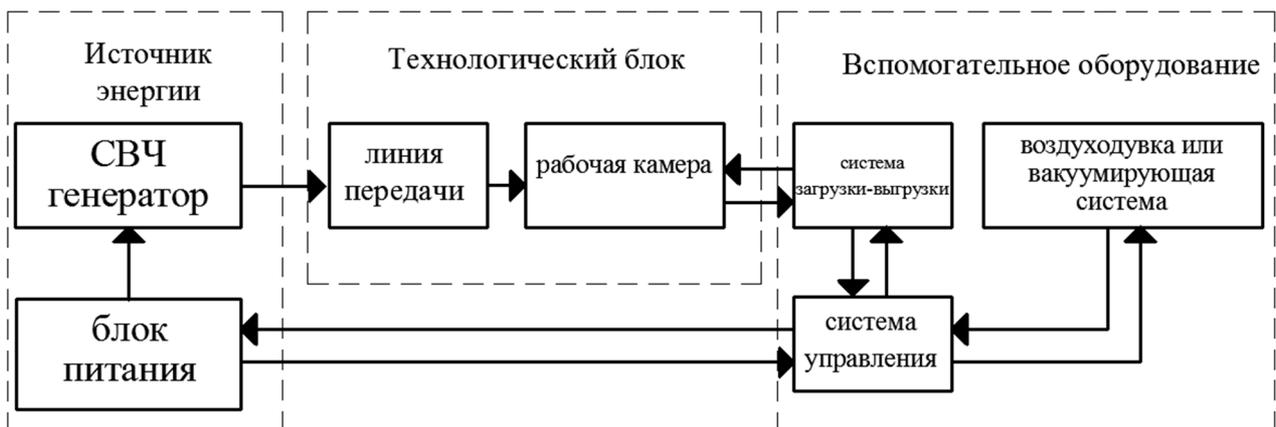
ского нагрева, СВЧ диэлектрическом нагреве, установках СВЧ диэлектрического нагрева [1-3]. Технологи в радиоэлектронике говорят о СВЧ нагреве, СВЧ нагревательных установках (установках СВЧ нагрева) [4, 5]. Позднее появились термины СВЧ электротермия, СВЧ электротермические установки [6], а с появлением в вузах специальности «Автоматизированные электротехнологические установки и системы – СВЧ электротехнология, СВЧ электротехнологические установки [7, 8].

Наконец, в 90-е годы XX века специалисты в области радиоэлектроники, перешедшие в результате конверсии промышленных предприятий работать в области СВЧ электротехнологии, стали широко использовать термины *микроволновый нагрев, микроволновые установки* [9].

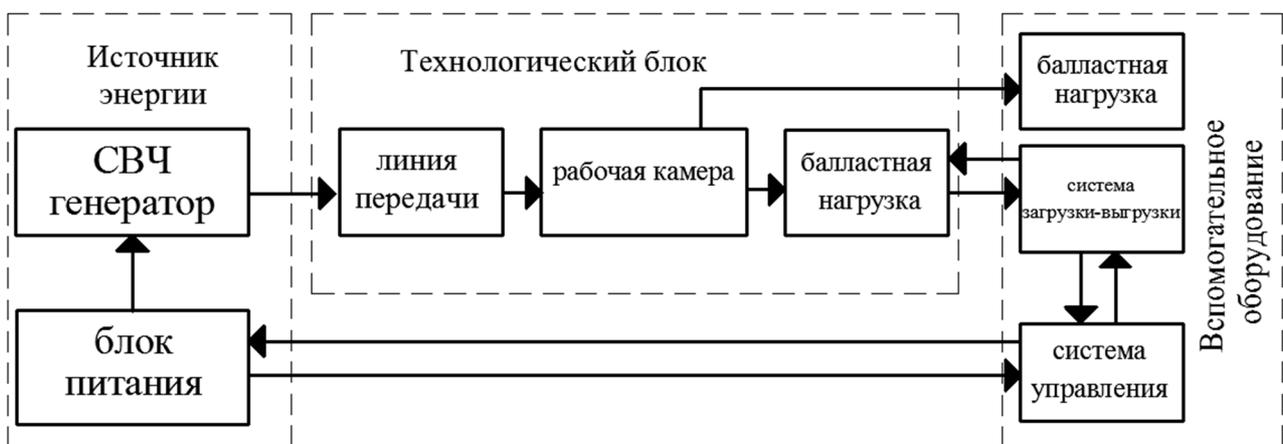
Еще в 70-е годы при разработке первых отечественных СВЧ пастеризаторов молока было установлено, что подавление микроорганизмов (биополимеров) в СВЧ электромагнитном поле происходит при значительно меньшей температуре, чем при традиционной тепловой пастеризации молока [10].

В 90-е годы было показано наличие так называемого нетеплового модифицирующего полимеры действия СВЧ электромагнитных колебаний. Так стали говорить о *тепловой и нетепловой СВЧ модификации полимеров, о СВЧ электротехнологических установках теплового и нетеплового действия* [11, 12].

Структурная схема СВЧ электротехнологической установки (СВЧ ЭТУ) теплового действия (ТД) приведена на рис. 1 а, а СВЧ ЭТУ нетеплового действия (НД) – на рис. 1 б.



а



б

Рис. 1. Структурные схемы СВЧ ЭТУ: а – СВЧ ЭТУ ТД; б – СВЧ ЭТУ НД

Энергетическая эффективность (КПД) СВЧ ЭТУ ТД определяется соотношением

$$\eta_{\text{ЭН}} = \frac{P_{\text{погл}}}{P_{\text{эл}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{погл}}$ – СВЧ мощность, поглощаемая (выделяющаяся) в обрабатываемым объектом; $P_{\text{эл}}$ – мощность, потребляемая установкой от сети промышленной частоты, то есть

$$\eta_{\text{ЭН}} = \eta_{\text{эл}} \eta_m, \quad (2)$$

тогда электрический КПД

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{СВЧ}}}{P_{\text{эл}}}. \quad (3)$$

Здесь $P_{\text{СВЧ}}$ – СВЧ мощность генератора, генерируемая на согласованную нагрузку.

Но в пренебрежении мощностью потерь в рабочей камере (из-за конвекции, излучения, теплоотдачи теплопроводностью)

$$P_{\text{погл}} = (1 - |\Gamma|^2) P_{\text{СВЧ}}, \quad (4)$$

где $|\Gamma|$ – коэффициент отражения от рабочей камеры, так что с учетом (3) и (4)

$$\eta_m = 1 - |\Gamma|^2, \quad (5)$$

а с учетом (2) и (5)

$$\eta_{\text{эл}} = (1 - |\Gamma|^2) \eta_{\text{эл}}. \quad (6)$$

Электрический КПД $\eta_{\text{эл}}$ СВЧ ЭТУ ТД определяется в первую очередь КПД СВЧ генератора установки. В работе [13] приведены параметры типичных серийных магнетронов, обычно применяемых в качестве СВЧ генераторов источников энергии СВЧ ЭТУ ТД. Так, КПД магнетронов на частотах 2450 МГц, 915 МГц и 433 МГц, составляет 60...75%.

Тогда, приняв $\eta_{\text{эл}} = 0,6...0,75$, соотношение (6) можно записать в виде

$$\eta_{\text{эл}} = (0,6...0,75)(1 - |\Gamma|^2), \quad (7)$$

то есть $\eta_{\text{эл}}$ зависит от согласования рабочей камеры с СВЧ генератором, причем

$$|\Gamma| = \frac{K_{\text{смч}} - 1}{K_{\text{смч}} + 1},$$

где $K_{\text{смч}}$ – коэффициент стоячей волны по напряжению рабочей камеры.

Обычно минимальный $K_{\text{смч}} \approx 1,2$ у камер с бегущей волной, со стоячей волной и камер лучевого типа. Согласование этих рабочих камер обеспечивается надлежащим их расчетом с учетом длины волны генератора λ и зависимости относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ обрабатываемого диэлектрика от температуры [8, 14, 15], так что

$$0,75 \leq \eta_m \leq 0,99, \quad (8)$$

а с учетом (7) и (8)

$$0,45 \leq \eta_{\text{ЭН}} \leq 0,74. \quad (9)$$

Проектировщик СВЧ ЭТУ ТД улучшить предельные значения $\eta_{\text{эл}}$ (соотношение (9)) за счет $\eta_{\text{эл}}$ не может, так как повышение КПД генератора – задача разработчиков и производителей СВЧ электровакуумных приборов, но он может повысить минимальное значение η_m в соотношении (8), используя в СВЧ ЭТУ ТД широкополосный СВЧ генератор (ЛБВ – генератор или ЛОВ). В СВЧ ЭТУ ТД с одночастотным генератором (магнетроном) рабочая камера (КБВ, КЛТ) рассчитывается на фиксированную длину волны СВЧ генератора и некоторую среднюю в диапазоне температур

термообработки величину $\sqrt{\epsilon' \sqrt{1 - \text{tg}^2 \delta}}$ [14, 15], а потому практически во все время термообработки рабочая камера не бывает идеально согласованной с СВЧ генератором, тогда как, изменяя частоту синхронно с изменением ϵ' и $\text{tg } \delta$ в процессе нагрева, можно существенно уменьшить $K_{\text{смч}}$ рабочей камеры на всех стадиях нагрева. Впервые эта идея высказана в работе [5] и получила развитие в работах [16-20].

На рис. 2 приведена структурная схема СВЧ ЭТУ ТД с системой управления частотой широкополосного СВЧ генератора. В качестве контролируемого параметра в такой установке можно использовать модуль коэффициента отражения от рабочей камеры.

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{P_{\text{отп}}}{P_{\text{над}}}},$$

где $P_{отр}$ – отраженная от рабочей камеры СВЧ мощность, $P_{пад}$ – СВЧ мощность, поступающая (падающая) на вход в рабочую камеру.

В процессе термообработки у обрабатываемого объекта изменяются ϵ' и $\text{tg } \delta^\circ$, что приводит к изменению $P_{отр}$ и, как следствие, $|\Gamma|$. С помощью системы управления, управляющей перестройкой длины волны (частоты) СВЧ генератора, сигнал с измерителя $|\Gamma|$ подается в источник питания, изменяющего напряжения на электродах СВЧ генератора так, чтобы с течением времени поддерживалась величина $P_{отр}$ минимальной. Если, например, при этом в течение СВЧ модификации диэлектрика удастся обеспечить $K_{стч} \leq 2$, то соотношения (8) и (9) примут вид

$$0,89 \leq \eta_m \leq 0,99,$$

$$0,53 \leq \eta_{эн} \leq 0,74,$$

а если $K_{стч} \leq 1,5$, то

$$0,94 \leq \eta_m \leq 0,99,$$

$$0,56 \leq \eta_{эн} \leq 0,74.$$

Что касается СВЧ ЭТУ НД, то для нетепловой СВЧ модификации в ней полимерного объекта в рабочей камере при заданной частоте СВЧ генератора следует обеспечить необходимую напряженность E электромагнитной волны, для чего может потребоваться значительная СВЧ мощность $P_{СВЧ}$, и время пребывания объекта в электромагнитном поле (определяются экспериментально) [11]. У многих полимерных объектов (например, полисульфон, синтетические нити и волокна и др.) $\text{tg } \delta \approx 0$, то есть они не нагреваются, мала и доля СВЧ мощности, затрачиваемая на нетепловую СВЧ модификацию. В таком случае энергетическая эффективность СВЧ ЭТУ НД $\eta_{эн} \approx 0$.

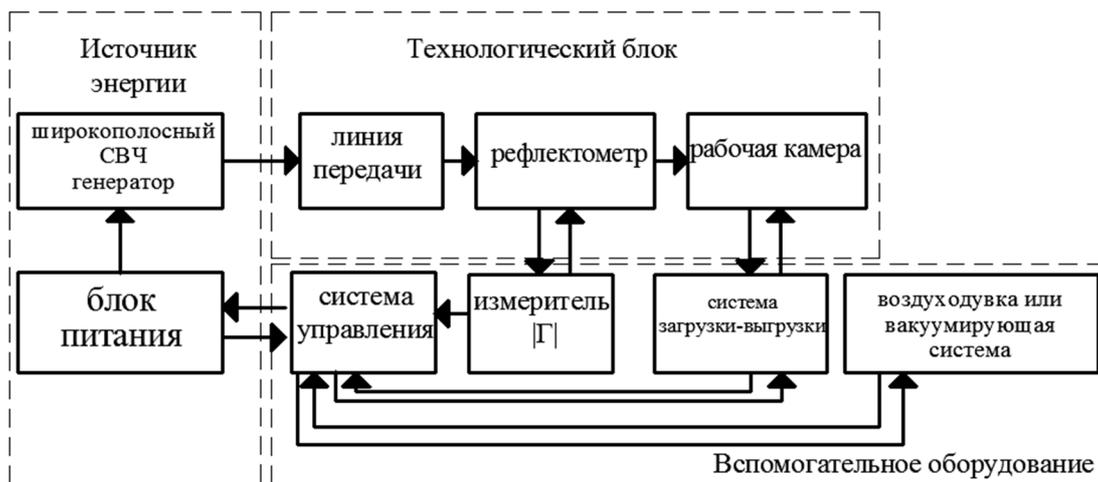


Рис. 2. Структурная схема СВЧ ЭТУ ТД с широкополосным СВЧ генератором

В то же время нетепловая СВЧ модификация придает полимерному объекту обработки новые полезные технологические свойства, цена получаемой продукции позволяет получить весьма достойную чистую прибыль, то есть экономическая эффективность СВЧ ЭТУ НД делает разработку и применение таких установок целесообразным и даже при низкой энергетической эффективности.

СВЧ мощность электромагнитной волны $P_{прош}$, прошедшей СВЧ ЭТУ НД, рассе-

ивается в балластной нагрузке (рис. 1 б), которая обычно представляет собой короткозамкнутый прямоугольный волновод, с наклонной к его оси трубкой из радиопрозрачного материала, по которой прокачивается вода, поглощающая всю поступающую СВЧ мощность, причем $P_{прош} = P_{СВЧ}$.

Для повышения энергетической эффективности $\eta_{эн}$ СВЧ ЭТУ НД можно вместо балластной нагрузки использовать вторую рабочую камеру, в которой пришедшая из первой рабочей камеры СВЧ мощность ис-

пользуется для тепловой СВЧ модификации второго (другого) диэлектрика, у которого $\operatorname{tg} \delta > 0$. Обе рабочие камеры можно рассматривать как гибридную камеру. Такие установки, в которых осуществляется как тепловая, так и нетепловая СВЧ модификации, уже нельзя называть СВЧ ЭТУ НД. Их обычно называют СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой или гибридными СВЧ ЭТУ.

Структурная схема такой установки показана на рис. 3.

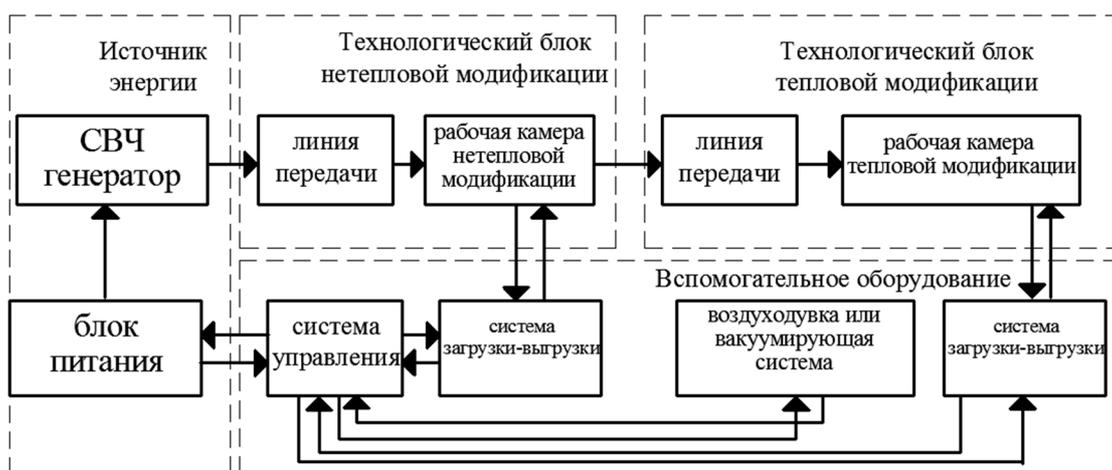


Рис. 3. Структурная схема СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой

Другими словами, технологический процесс нетепловой СВЧ модификации определяет величину напряженности E электрического поля электромагнитной волны в рабочей камере, что, в свою очередь, определяет величину $P_{СВЧ}$ в конкретной рабочей камере, так что дополнительная СВЧ мощность, требующаяся в рабочей камере тепловой СВЧ модификации, определяется соотношением:

$$P_{доп} = P_{ТМ} - P_{СВЧ}.$$

Энергетическая эффективность СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой определяется в основном рабочей камерой технологического блока тепловой модификации, а ее величина определяется соотношением (9).

СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой дороже СВЧ ЭТУ ТД или СВЧ ЭТУ НД, но ее экономическая эффективность выше, так как в этой установке выпускаются два вида ценных продуктов. При проектировании СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой

Если СВЧ мощности, поступающей в рабочую камеру технологического блока тепловой модификации, недостаточно для термообработки диэлектрика, то эту мощность можно увеличить, используя несколько СВЧ генераторов, запитывающих рабочую камеру нетепловой СВЧ модификации (рис. 4 а) [21], или используя дополнительный СВЧ генератор, запитывающий рабочую камеру тепловой модификации (рис. 4 б).

приходится решать специфическую задачу: для предприятия, производящего продукцию с использованием нетепловой СВЧ модификации, нужно подобрать отвечающий профилю предприятия выпуск другой продукции, для которой требуется тепловая СВЧ модификация. Так, на предприятии, производящем синтетические нити или волокна, СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой может дополнительно осуществлять первичную обработку шерсти (сушку мытой шерсти) для изготовления шерстяных изделий (полиэстера).

При этом

$$P_{СВЧ} t_{обр} \approx c m_{вш} (T_{нагр} - T_0) + m_e r,$$

где $t_{обр}$ – время сушки шерсти в рабочей камере; c – удельная теплоемкость шерсти; $m_{вш}$ – масса влажной шерсти, загруженной в рабочую камеру; $T_{нагр}$, T_0 – температура шерсти в рабочей камере и начальная температура; m_e – масса воды в шерсти, находящейся в рабочей камере; r – теплота испарения.

Другой особенностью проектирования СВЧ ЭТУ с гибридной камерой является необходимость синхронизировать работу системы загрузки-выгрузки рабочей камеры тепловой СВЧ модификации и источника энергии рабочей камеры нетепловой СВЧ модификации: во время загрузки-выгрузки технологического блока тепловой СВЧ модификации, работающего в периодическом режиме, источник энергии технологического блока нетепловой СВЧ моди-

фикации должен быть выключен, чтобы избежать излучения СВЧ энергии из рабочей камеры тепловой СВЧ модификации в окружающее пространство и отражения электромагнитной волны от этой рабочей камеры с $K_{смч} > 3$. По этой причине в СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой целесообразно использовать методический режим работы технологического блока тепловой СВЧ модификации.

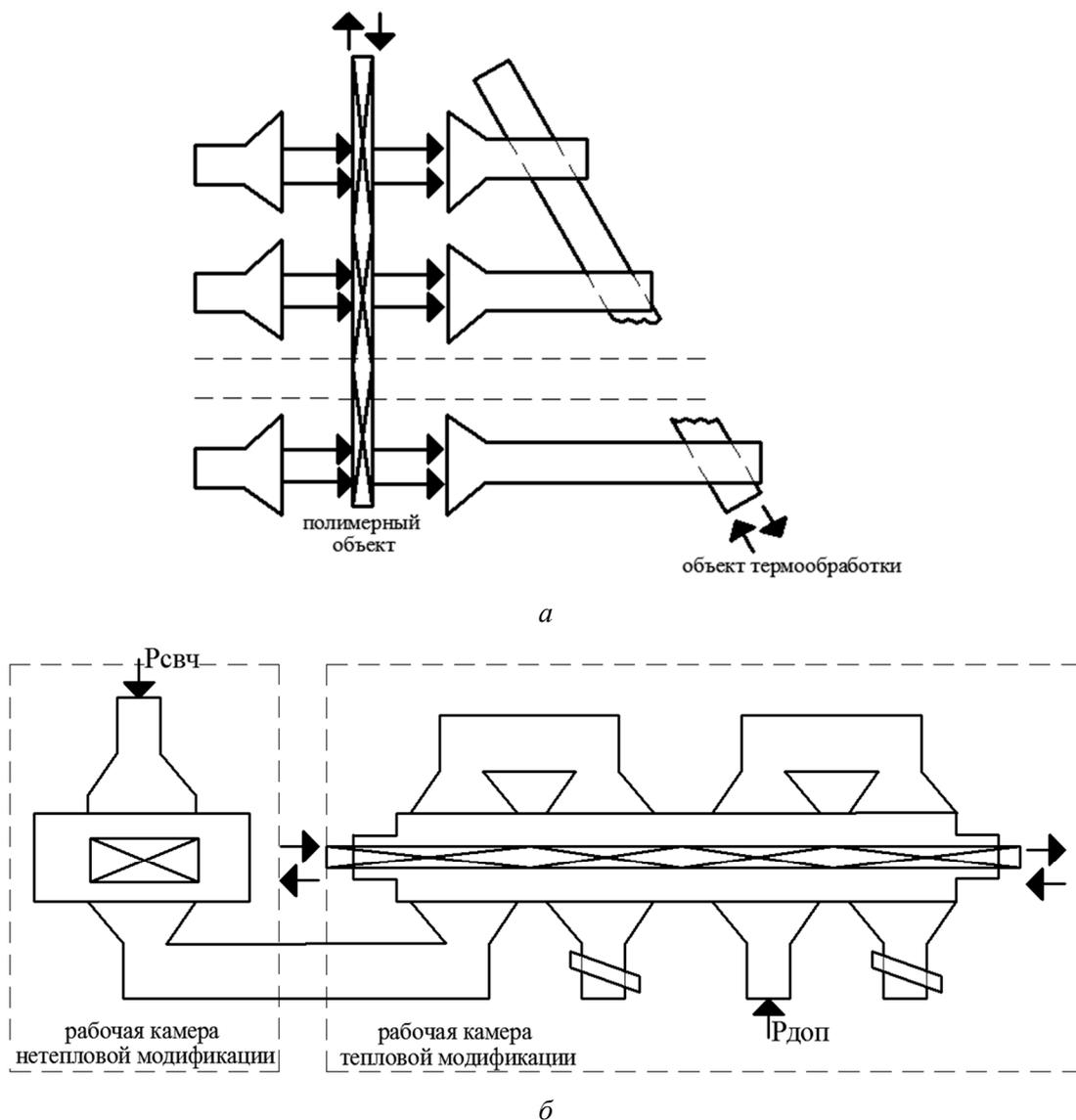


Рис. 4. Технологические блоки СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой: *а* – установка с несколькими СВЧ генераторами рабочей камеры нетепловой СВЧ модификации; *б* – установка с дополнительным СВЧ генератором рабочей камеры тепловой модификации

Загрузка-выгрузка модифицируемого полимерного объекта в рабочую камеру нетепловой СВЧ модификации не накладыва-

ет ограничений на работу источника энергии технологического блока нетепловой СВЧ модификации.

Что касается системы электроснабжения СВЧ ЭТУ, то она может быть однофазной или трехфазной [2], а источник питания СВЧ генератора должен содержать высоковольтный трансформатор, выпрямитель и сглаживающий фильтр. Для упрощения и удешевления источника энергии в его источнике питания в СВЧ ЭТУ ТД зачастую отказываются от фильтра и даже выпрямителя. Но при проектировании СВЧ ЭТУ НД и СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой нужно иметь в виду, что эффективность нетепловой СВЧ модификации установлена и исследована при постоянном (стабильном) СВЧ электромагнитном поле [11].

Об электроснабжении СВЧ ЭТУ говорится практически во всех работах о СВЧ генераторах этих установок [2-5, 22-24]. В последние годы к вопросу электроснабжения СВЧ ЭТУ интерес снова возрос [25, 26]. Во всех этих работах решаются исключительно технические вопросы и задачи, тогда как при проектировании многогенераторных СВЧ ЭТУ ТД, СВЧ ЭТУ НД и СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой приходится решать, какова должна быть компоновка системы электроснабжения установки (СВЧ генераторов) и делать это с помощью технико-экономической оптимизации, общие принципы которой изложены в работах [27, 28]. Решение этой задачи сводится к нахождению глобального максимума экономической эффективности (чистого дисконтированного дохода, чистой прибыли):

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma}(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (10)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – параметры задачи, которых больше 30 в задачах об СВЧ ЭТУ ТД и СВЧ ЭТУ НД и более 40 в задачах об СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой.

Среди независимых параметров в задаче о многогенераторной СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой находятся N_1 СВЧ генераторов технологического блока нетепловой модификации и число N_2 СВЧ генераторов технологического блока тепловой СВЧ модификации. Система уравнений полученная на базе соотношения (10), имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}_1}{\partial N_1} &= 0, \\ \frac{\partial \mathcal{E}_2}{\partial N_2} &= 0, \\ \frac{\partial \mathcal{E}_2}{\partial x} &= 0, \\ &\dots \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{\Sigma}}{\partial x_k} &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Из системы уравнений (11) находятся оптимальные количества СВЧ генераторов N_{onm1} и N_{onm2} , а также $x_{onm1}, \dots, N_{onmK}$, где x_1, \dots, x_K – независимые параметры оптимизационной задачи.

Итак, приведенные сведения и предложения необходимо учитывать при проектировании СВЧ ЭТУ ТД, СВЧ ЭТУ НД и СВЧ ЭТУ с гибридной рабочей камерой, что позволит создать установки, обладающие максимальной экономической и энергетической эффективностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехнологические промышленные установки / И.Е. Евтюхова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
2. **Архангельский Ю.С.** Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2010. 280 с.
3. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотные нагревательные установки для

- интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.
4. **Долгополов Н.Н.** Электрофизические методы в технологии строительных материалов / Н.Н. Долгополов. М.: Стройиздат, 1971. 240 с.
5. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1988. 408 с.

6. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
7. **Колесников В.Е.** Проектирование и эксплуатация электротехнологических установок / В.Е. Колесников, Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2008. 197 с.
8. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов, Е.М. Гришина. Саратов: Полиграфия Поволжья, 2010. 229 с.
9. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысокочастотный или микроволновый? / Ю.С. Архангельский // Тепло- и электротехнологические процессы и установки: межвуз. науч. сб. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2003. С. 4-5.
10. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В.В. Игнатов, В.И. Панасенко, А.П. Пиденко и др. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 80 с.
11. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. Саратов: СГТУ, 2012. 288 с.
12. **Калганова С.Г.** Создание научных основ модифицирующего нетеплового СВЧ воздействия на полимерные материалы / С.Г. Калганова // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. 2006. № 4 (19). Вып. 4. С. 98-102.
13. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 2000. 148 с.
14. **Архангельский Ю.С.** Камеры с бегущей и стоячей волной / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников. Саратов: Буква, 2015. 232 с.
15. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа / Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорный. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.
16. **Архангельский Ю.С.** Многочастотные установки. СВЧ диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 26-31.
17. **Гришина Е.М.** Применение широкополосных генераторов в СВЧ электротехнологических установках / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 3(4). С. 74-77.
18. **Федоров А.В.** Применение полупроводниковых генераторов в СВЧ электротехнологических установках / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2014. № 3 (4). С. 70-73.
19. **Федоров А.В.** Определение погонных параметров рабочей камеры с бегущей волной на прямоугольном волноводе, работающей в многочастотном режиме / А.В. Федоров, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3 (8). С. 30-36.
20. **Архангельский Ю.С.** К расчету камер с бегущей волной установок СВЧ диэлектрического нагрева, работающих в многочастотном режиме / Ю.С. Архангельский, А.В. Федоров // Вопросы электротехнологии. 2015. № 2 (7). С. 42-49.
21. **Гришина Е.М.** Теория расчета многофункциональной электротехнологической установки / Е.М. Гришина // Вестник Сарат. гос. техн. ун-та. 2008. № 1 (3). Вып. 2. С. 260-266.
22. **Артюхов И.И.** Магнетронные генераторы для установок СВЧ нагрева / И.И. Артюхов, М.А. Фурсаев. Саратов: СГТУ, 2000. 48 с.
23. **Девяткин И.И.** Источник питания магнетрона непрерывного действия от сети переменного тока / И.И. Девяткин, А.С. Зусмановский // Электронная техника. Электроника СВЧ. 1969. № 2. С. 112-118.
24. Система электропитания СВЧ генератора магнетронного типа с промежуточным звеном повышения частоты / И.И. Артюхов и др. // Вопросы преобразовательной техники, частотного электропривода и управления: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 1996. С. 49-59.
25. **Артюхов И.И.** Переходные процессы в накальной цепи магнетрона малой мощности / И.И. Артюхов, А.И. Земцов // Вопросы электротехнологии. 2013. № 1 (1). С. 49-53.
26. **Артюхов И.И.** Экспериментальное исследование характеристик магнетронного генератора малой мощности / И.И. Артюхов, А.И. Земцов, В.В. Тесьманова // Во-

просы электротехнологии. 2015. № 2 (7). С. 72-76.

27. **Гришина Е.М.** Технико-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа / Е.М. Гри-

шина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2013. № 1 (1). С. 34-36.

28. **Архангельский Ю.С.** Элементная база электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. Саратов: СГТУ, 2003. 212 с.

Добродум Антон Сергеевич – студент магистратуры кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton S. Dobrodum – Master student, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Федоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton V. Fedorov – Postgraduate, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana G. Kalganova – Dr.Sc., Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 21.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.032.213

ПРИЧИНЫ БРАКА ПО ВЫТЕКАНИЮ СТЕКЛОФАЗЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОГО КАТОДА МАЛОМОЩНОГО УСИЛИТЕЛЯ ПРЯМОЙ ВОЛНЫ М-ТИПА

А.А. Тищенко, О.Д. Тищенко, А.Я. Зоркин, И.В. Белова

DEFECTS CAUSED BY MELTING GLASSY PHASE ON THE SURFACE OF THE COMBINED FIELD EMISSION CATHODE IN THE M-TYPE LOW-POWER DIRECT WAVE AMPLIFIER

A.A. Tishchenko, O.D. Tischenko, A.Ya. Zorkin, I.V. Belova

С целью выявления причин выплавления стеклофазы на поверхность катода исследовалось влияние материала вторично-электронного эмиттера, материала автоэлектронного эмиттера, припоя, параметров технологической среды. Экспериментально определено, что выплавление стеклофазы обусловлено присутствием окиси кобальта в припое. Проведены исследования по получению молибден-кобальтового припоя с присадкой бора с температурой плавления 1200°C.

Ключевые слова: автокатод, молибден-кобальтовый припой, стеклофаза, спекание

Основное преимущество электровакуумных приборов (ЭВП) сверхвысоких частот (СВЧ) М-типа является мгновенная готовность. Задачи применения новых принципов управления СВЧ сигналом с сохранением мгновенной готовности требуют разработки новых приборов с пониженным уровнем мощности входного сигнала.

Мгновенная готовность ЭВП СВЧ М-типа определяется вторичноэмиссионным свойством катода – величиной первого критического потенциала. Из известных катодов, выпускаемых современной промышленностью, наилучшими свойствами для

The investigation refers the production of molybdenum-cobalt solder doped with boron 1200°C melting point. In order to identify the causes of melting glass phase on the surface of the cathode material, we studied the effect of secondary electron emitter, the field emitter material, solder, and technological parameters of the medium. We obtained experimental data relating the melting of the vitreous due to the presence of cobalt oxide in the solder, and in this case obtained in the sintering operation solder.

Keywords: *autocathodes, molybdenum-cobalt solder, glass phase, caking*

маломощных приборов обладает пропитанный алюминатный катод.

Для реализации мгновенной готовности и включения с первого импульса усилителя прямой волны магнетронного типа (УПВМ) малой мощности была предложена конструкция катода, рабочая поверхность которого выполняется в виде чередующихся вторичноэмиссионных и автоэмиссионных шайб. В качестве вторичного эмиттера был выбран импрегнированный алюминатный катод, представляющий собой пористый вольфрам, пропитанный алюминатом бария и кальция ($3\text{BaO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). В качестве материала

автокатода использовалась сверхтонкая (4 мкм) танталовая фольга (рис. 1).

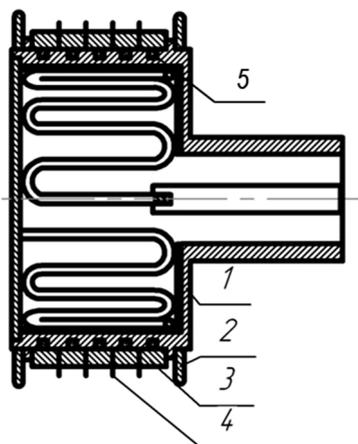


Рис. 1. Комбинированный катод: 1 – kern катода, 2 – экран, 3 – вторичноэмиссионная шайба, 4 – автоэмиссионная шайба, 5 – канавки с молибден-кобальтовым припоем

Опыт производства комбинированных катодов показал, что периодически наблюдается брак по вытеканию стеклофазы на поверхность катода в зоне автоэмиттера. Кроме того, температура пайки может возрастать с 1200 до 1300°C.

При проведении исследований для приготовления припоя использовались следующие компоненты:

- молибденовый порошок;
- окись кобальта;
- бор кристаллический не отожженный;
- бор кристаллический отожженный;
- бор аморфный.

Окись кобальта восстанавливалась в водороде при температуре 800°C в течение 20-30 мин. Бор отжигался в вакууме при температуре 1400°C.

В ходе эксперимента были получены следующие результаты:

- припой, приготовленный на основе не отожженного бора, имел температуру плавления 1200°C;
- припой, приготовленный на основе отожженного бора, имел повышенную температуру плавления. Это вероятно объясняется тем, что в результате отжига произошло укрупнение зерна, что, в свою очередь, привело к неравномерному распределению бора по объему молибден-кобальтового

припоя и повышению температуры припоя с 1200 до 1240-1260°C;

– с целью более равномерного распределения бора пытались применить бор аморфный, но вместо понижения температура плавления припоя выросла до 1300°C. Для выяснения причин был проведен отжиг бора различных партий в водороде при температуре 900-950°C (температура спекания припоя в канавках керна). При отжиге аморфный бор практически улетучился (рис. 2). Следовательно, вместо Mo-Co-B после спекания оставался Mo-Co припой, а его температура плавления приблизительно 1300°C.

Таким образом, для получения молибден-кобальтового припоя с присадкой бора с температурой плавления 1200°C необходимо использовать бор кристаллический в не отожженном состоянии или после отжига, обеспечивающего неизменность грансоства (не более 1100°C).



Рис. 2. Kern катода паяного молибден-кобальтовым припоем, приготовленным на основе бора аморфного

Следующим этапом исследований было выявление причин вытекания стеклофазы на поверхность катода.

При пайке катодов было замечено, что выплавление стеклофазы носит совершенно бессистемный характер:

- выплавление на отдельных участках;
- выплавление одностороннее;
- равномерное выплавление по границе автоэмиттера.

С целью выявления причин выплавления исследовалось влияние:

- материала вторичноэлектронного эмиттера (ВЭЭ);
- материала автоэлектронного эмиттера (АЭЭ);

- припоя;
- параметров технологической среды.

Влияние материала ВЭЭ исследовалось путем сборки катода из эмиттерных втулок различных партий (рис. 3).

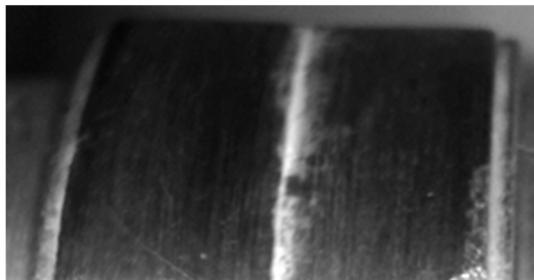


Рис. 3. Катод, собранный из различных партий втулок

Эксперимент показал, что выплавление не зависит от партии. На катодах из одной партии втулок выплавление либо полностью отсутствует, либо есть на всех втулках, либо наблюдается бессистемно по расположению его на катоде.

Влияние материала АЭЭ исследовалось путем сборки катода с АЭЭ из танталовой фольги и без нее. Выплавление имело бессистемный характер, и никакой закономерности не обнаружено.

Влияние припоя исследовалось, во-первых, с точки зрения влияния присутствия бора в припое, во-вторых, с точки зрения возможности окисления бора.

Известно, что окись бора образует эвтектические соединения с температурой плавления 900-1150 °С со свободными окислами всех компонентов алюмината (BaO, CaO, Al₂O₃), а эта область температур совпадает с температурами, при которых наблюдаются выплавления стеклофазы.

Анализ литературных данных показал, что окись бора образуется при температурах отжига более 1100°С, что выше температуры спекания припоя (порядка 200-300°С), то есть окисление возможно лишь во время вакуумного отжига бора при ухудшении вакуумных условий. Однако применение бора без отжига, с различными температурами отжига не давало повторяемого результата по отсутствию стеклофазы и сводилось лишь к изменению температуры плавления припоя.

Дальнейшие эксперименты показали, что случаи выплавления стеклофазы наблюдаются на катодах без АЭЭ паянных молибден-кобальтовым припоем без содержания бора (рис. 4).

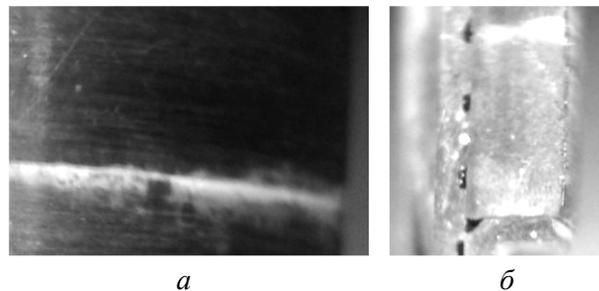


Рис. 4. Катод без АЭЭ, паянный молибден-кобальтовым припоем без содержания бора

Таким образом, оставалось предположить возможность окисления кобальта на одном из этапов технологического цикла и дальнейшего взаимодействия окиси кобальта с компонентами алюмината.

В связи с этим исследовалось влияние вакуума в процессе прокаливания и пайки катодов. Эксперимент показал, что при одной и той же степени разрежения в рабочей камере характер выплавления стеклофазы оставался бессистемным.

Из всей технологической цепочки оставался только процесс спекания припоя. Спекание припоя проводится в водородной печи туннельного типа. При анализе процесса спекания припоя было обнаружено его окисление. В случае спекания большого количества кернов более подвержены окислению нижние керны, причем возможно одностороннее (с нижней стороны керна) окисление. Впоследствии это приводит к одностороннему вытеканию стеклофазы.

Таким образом, приходим к выводу, что выплавление стеклофазы обусловлено присутствием окиси кобальта в припое полученной на операции спекания припоя. Однако надо иметь в виду, что присутствие кислорода может создавать условия для образования окиси кобальта и на других операциях, поэтому необходимо следить за вакуумными условиями, а также полнотой прохождения химических реакций по образованию алюмината.

1. **Татаренко Н.И.** Автоэмиссионные наноструктуры и приборы на их основе / Н.И. Татаренко, В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2006. 192 с.

2. Исследование вакуумных автоэмиссионных катодов с углеродными микро-, наноструктурами / Ю.А. Григорьев, А.А. Бурцев, П.Д. Шалаев, В.Г. Пименов // Вестник СГТУ. 2008. № 3 (2). С. 100-105.

Тищенко Ольга Дмитриевна – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga D. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Зоркин Александр Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Alexander Ya. Zorkin – Dr. Sc., Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Тищенко Артем Александрович – аспирант кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Artem A. Tishchenko – Postgraduate, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Белова Ирина Всеволодовна – ведущий технолог ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», НПЦ-5, Саратов

Irina V. Belova – Principal Manufacturing Engineer, Radio Engineering Institute of Academician A.L Mints, Saratov

Статья поступила в редакцию 10.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Экземпляры номеров журнала «Вопросы электротехнологии» можно приобрести в редакции журнала по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77 (СГТУ имени Гагарина Ю.А., редакция журнала «Вопросы электротехнологии», корпус 1, первый этаж, ком. 133 а, тел.: 8 (8452) 99-87-63).

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК. 621.369.96

**СОБСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ
ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА
С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНОЙ,
РАСПОЛОЖЕННОЙ В ЦЕНТРЕ ШИРОКОЙ СТЕНКИ ВОЛНОВОДА**

Д.А. Баринов, Д.В. Гапонов, В.А. Коломейцев, С.А. Тасканов

**INHERENT ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF A RECTANGULAR
WAVEGUIDE WITH A DIELECTRIC PLATE LOCATED
IN THE CENTER OF THE BROAD WALL OF THE WAVEGUIDE**

D.A. Barinov, D.V. Gaponov, V.A. Kolomeytsev, S.A. Taskanov

На основе аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики определен спектр критических длин волн E- и H-типов прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной, расположенной в центре широкой стенки волновода. Полученные результаты представляют интерес для техники и электротехнологии СВЧ.

Ключевые слова: внутренняя краевая задача электродинамики, волновые уравнения Гельмгольца, принцип поляризационной двойственности, суперпозиции и ортогональности, E- и H-типы волн при продольной поляризации электромагнитного поля, дисперсионное уравнение для E- и H-типов волн волновода, частично заполненного диэлектриком, граничные и начальные условия, векторы напряженности электрического и магнитного поля, электродинамические параметры волновода с трехслойным диэлектрическим заполнением

В работе исследуются электродинамические свойства прямоугольного волновода с диэлектрической пластиной, расположенной в E-плоскости прямоугольного волновода (ПрВ) в центре широкой стенки (рис. 1).

Based on the analytical solution of internal boundary problem of electrodynamics defined range of critical wavelengths E- and N-types of rectangular waveguide with a dielectric plate, located in the center of the broad wall of the waveguide. The obtained results are of interest for engineering and Electrotechnology microwave.

Keywords: internal boundary-value problem of electrodynamics, the wave equation, the Helmholtz principle of the polarization of duality, superposition and orthogonality, E- and H-types of waves with longitudinal polarization of the electromagnetic field; the dispersion equation for E- and H-types of waves of the waveguide partially filled with dielectric, boundary and initial conditions, vectors of electric and magnetic fields, electrodynamic parameters of the waveguide with laminated dielectric filling

Как показано в работе [1], для аналитического решения внутренней краевой задачи электродинамики (ВКЗЭ) для данного диэлектрического заполнения волновода необходимо использовать продольную поляризацию электромагнитного (ЭМ) поля

(E_x, H_x) , что приводит к необходимости решения двух скалярных волновых уравнений для собственных типов волн:

$$\nabla^2 E_{xq}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E_{xq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 H_{xq}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 H_{xq}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = 0.$$

Система уравнений (1) представляет собой однородную систему уравнений Гельмгольца, описывающую электродинамические процессы в ПрВ с трехслойным диэлектрическим заполнением ($q = 1, 3$ – воздушная среда; $q = 2$ – диэлектрическая пластина).

$$E_y = \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(j\omega\mu \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial^2 E_x}{\partial x \partial y} \right),$$

$$E_z = \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(j\omega\mu \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{\partial^2 E_x}{\partial x \partial y} \right),$$

где $k_{\perp}^2 = k_y^2 + k_z^2$; k_{\perp} – поперечное волновое число ПрВ; k_y, k_z – волновые числа по координатным направлениям Y и Z ; ε, μ – абсолютные значения диэлектрической и магнитной проницаемости; ω – круговая частота.

$$E_{xq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} E_{xqmn}(x, y) \cdot e^{j(\omega\tau - \beta mnz)}, \quad (3)$$

$$H_{xq}(x, y, z, \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} E_{xqmn}(x, y) \cdot e^{j(\omega\tau - \beta mnz)},$$

где

$$E_{xqmn}(x, y) = (a_{1qm} \cos k_{xqm}x + b_{1qm} \sin k_{xqm}x) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \quad (4)$$

$$H_{xqmn}(x, y) = (a_{2qm} \cos k_{xqm}x + b_{1qm} \sin k_{xqm}x) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right),$$

β_{mn} – постоянная распространения волны.

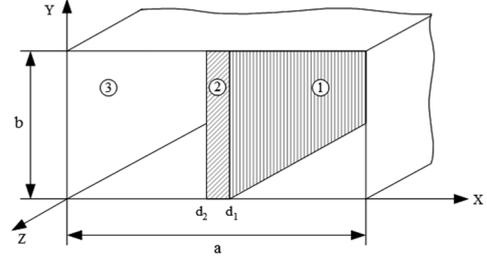


Рис. 1. Прямоугольный волновод с диэлектрической пластиной, расположенной в центре широкой стенки (трехслойное заполнение): 1, 3 – воздушная среда; 2 – диэлектрическая пластина

При этом остальные компоненты ЭМ поля определяются на основе принципа поляризационной двойственности через компоненты E_x, H_x следующим образом:

$$H_y = \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y} + j\omega\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$H_z = \frac{1}{k_{\perp}^2} \left(\frac{\partial^2 H_x}{\partial x \partial y} + j\omega\varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial y} \right),$$

Рассмотрим прямые волны в ПрВ с трехслойным диэлектрическим заполнением. Учитывая принцип суперпозиции и ортогональности, решение уравнений (1) представим в виде суперпозиции E ($E_x \neq 0, H_x = 0$) и H ($E_x = 0, H_x \neq 0$) типов волн:

Подставляя соотношения (4) в (2), получим структуру ЭМ поля E- и H-типов волн:

$$\begin{aligned} E_{xqmn}(x, y) &= -\frac{k_{xqm}}{k_{\perp mn}^2} \left(\frac{n\pi}{b} \right) (-a_{1qm} \sin k_{xqm}x + b_{1qm} \cos k_{xqm}x) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right), \\ E_{zqmn}(x, y) &= -\frac{j}{k_{\perp mn}^2} k_{xqm} \beta_{mn} (-a_{1qm} \sin k_{xqm}x + b_{1qm} \cos k_{xqm}x) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_{xqmn}(x, y) &= \frac{\omega \varepsilon_q}{k_{\perp mn}^2} \beta_{mn} (a_{1qm} \cos k_{xqm}x + b_{1qm} \sin k_{xqm}x) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right), \\ H_{zqmn}(x, y) &= -\frac{j\omega \varepsilon_q}{k_{\perp mn}^2} \left(\frac{n\pi}{b} \right) (a_{1qm} \sin k_{xqm}x + b_{1qm} \cos k_{xqm}x) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right) \end{aligned}$$

для E-типов волн,

$$\begin{aligned} E_{yqmn}(x, y) &= \frac{\omega \mu \beta_{mn}}{k_{\perp mn}^2} (a_{2qm} \cos k_{xqm}x + b_{2qm} \sin k_{xqm}x) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right), \\ E_{zqmn}(x, y) &= -\frac{j\omega \mu}{k_{\perp mn}^2} \left(\frac{n\pi}{b} \right) (a_{2qm} \cos k_{xqm}x + b_{2qm} \sin k_{xqm}x) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} H_{yqmn}(x, y) &= -\frac{k_{xmq}}{k_{\perp mn}^2} \left(\frac{n\pi}{b} \right) (-a_{2qm} \sin k_{xqm}x + b_{2qm} \cos k_{xqm}x) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right), \\ H_{zqmn}(x, y) &= -j \frac{\beta_{mn}}{k_{\perp mn}^2} k_{xmq} (-a_{2qm} \sin k_{xqm}x + b_{2qm} \cos k_{xqm}x) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right) \end{aligned}$$

для H-типов волн.

Удовлетворяя соотношения (4)-(6) граничным условиям по координатному направлению x

$$\begin{aligned} E_{z1} = 0|_{x=a}, \quad E_{z3} = 0|_{x=0}, \quad E_{z1} = E_{z2}|_{x=d1}, \quad E_{z2} = E_{z3}|_{x=d2}, \quad E_{x1} = \varepsilon'_2 \cdot E_{x2}|_{x=d1}, \\ E_{x1} = \varepsilon'_2 \cdot E_{x2}|_{x=d2}, \quad E_{y1} = 0|_{x=a}, \quad E_{y3} = 0|_{x=0}, \quad E_{y1} = E_{y2}|_{x=d1}, \quad E_{y3} = E_{y2}|_{x=d2}, \\ H_{x1} = H_{x2}|_{x=d1}, \quad H_{x2} = H_{x3}|_{x=d2}, \quad H_{x1} = 0|_{x=a}, \quad H_{x3} = 0|_{x=0}, \quad H_{y1} = H_{y2}|_{x=d1}, \\ H_{z1} = H_{z2}|_{x=d1}, \quad H_{z2} = H_{z3}|_{x=d2}, \quad \frac{\partial H_{z1}}{\partial z} = 0|_{x=d1}, \quad \frac{\partial H_{z3}}{\partial z} = 0|_{x=d2}, \end{aligned} \quad (7)$$

получим следующие дисперсионные трансцендентные уравнения для E- и H-типов волн ПРВ с трехслойным диэлектрическим заполнением:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} k_{xm1} d = \varepsilon'_2 \frac{k_{xm1}}{k_{xm2}} \frac{\operatorname{tg} k_{xm1} (a - d_1) + \operatorname{tg} k_{xm1} d_2}{\left\{ \left(\frac{k_{xm1}}{k_{xm2}} \varepsilon'_2 \right)^2 \cdot \operatorname{tg} k_{xm1} (a - d_1) \cdot \operatorname{tg} k_{xm1} d_2 - 1 \right\}}, \quad \text{E-типы волн,} \\ \operatorname{tg} k_{xm2} d = \frac{k_{xm2}}{k_{xm1}} \frac{\operatorname{tg} k_{xm1} (a - d_1) + \operatorname{tg} k_{xm1} d_2}{\left\{ \left(\frac{k_{xm2}}{k_{xm1}} \right)^2 \cdot \operatorname{tg} k_{xm1} (a - d_1) \cdot \operatorname{tg} k_{xm1} d_2 - 1 \right\}}, \quad \text{H-типы волн,} \end{aligned} \quad (8)$$

где ε'_2 – относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины; $d = d_1 - d_2$ – толщина пластины.

Отметим, что уравнения (8) справедливы для быстрых волн в ПрВ ($\beta c/\omega < 1$).

$$\operatorname{tg}k_{xm1}d = \varepsilon'_2 \cdot \frac{|k_{xm1}|}{k_{xm2}} \cdot \frac{\operatorname{th}|k_{xm1}|(a-d) + \operatorname{th}|k_{xm1}|d_2}{\left\{ 1 - \left(\frac{|k_{xm1}|}{k_{xm2}} \varepsilon'_2 \right)^2 \operatorname{th}|k_{xm1}|(a-d_1)\operatorname{th}|k_{xm1}| \cdot d_2 \right\}}, \quad \text{E-типы волн,}$$

$$\operatorname{tg}k_{xm2}d = \frac{k_{xm2}}{|k_{xm1}|} \cdot \frac{\operatorname{th}|k_{xm1}|(a-d) + \operatorname{th}|k_{xm1}|d_2}{\left\{ 1 - \left(\frac{|k_{xm1}|}{k_{xm2}} \varepsilon'_2 \right)^2 \operatorname{th}|k_{xm1}|(a-d_1)\operatorname{th}|k_{xm1}|d_2 \right\}}, \quad \text{H-типы волн.}$$

Уравнения (9) справедливы в диапазоне изменения коэффициента замедления волны $1 \leq \frac{\beta c}{\lambda} \leq \sqrt{\varepsilon'_2}$ то есть в области распространения медленных волн в ПрВ с трехслойным диэлектрическим заполнением. Необходимо отметить, что дисперсионные уравнения (8) позволяют определить спектр критических длин волн $\lambda_{кр,mn}$ E- и H-типов волн и, следовательно, коэффициент широкополосности ξ , что принципиально важно для конвейерных СВЧ нагревательных устройств на основе ПрВ, поскольку термообработка листовых материалов в данных установках осуществляется на основной волне, диапазон распространения которой определяется величиной ξ . Система уравнений (9) позволяет исследовать процесс трансформации ЭМ поля в воздушной среде (стягивание поля к поверхности раздела сред) при трехслойном диэлектрическом заполнении ПрВ, позволяющий интенсифицировать процесс термообработки.

Особенностью дисперсионных уравнений (8), (9) является неоднозначность их решения, поскольку каждое уравнение содержит две неизвестные величины k_{xm1} , k_{xm2} . Для однозначного решения необходимо определить связь между волновыми числами k_{xm1} , k_{xm2} , что, как показано в работах [2, 3], достигается посредством обобщенных волновых дисперсионных уравнений для каждой из сред, заполняющих ПрВ

В диапазоне длин волн, в котором распространяются медленные волны ($\beta c/\omega > 1$), то есть $k_{xm1} = j|k_{xm1}|$, уравнения (8) принимают следующий вид:

(в нашем случае это две среды – воздушная среда и диэлектрическая пластина):

$$k_1^2 = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 = k_{xm1}^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \beta_{mn}^2, \quad (10)$$

$$k_2^2 = \omega^2 \varepsilon_2 \mu_0 = k_{xm2}^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + \beta_{mn}^2.$$

В зависимости от решаемой задачи могут использоваться различные формы связи между волновыми числами k_{xm1} и k_{xm2} или их представления через другие электродинамические параметры. Так, при определении спектра критических длин волн ($\beta_{mn} = 0$) необходимо использовать следующее соотношение [4]:

$$k_{xm1} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{крmn}} \right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2}, \quad (11)$$

$$k_{xm2} = \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda_{крmn}} \right)^2 \varepsilon'_2 - \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2}.$$

Подставляя соотношения (11) в дисперсионные уравнения (8), (9), получим уравнение, определяющее величину $\lambda_{кр}$ E- и H-типа волн. При определении волновых чисел k_{xm1} , k_{xm2} необходимо использовать соотношение, определяющее связь между данными волновыми числами, получаемое посредством вычитания соотношений (10):

$$k_{xm2} = \sqrt{k_{xm1}^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (\varepsilon'_2 - 1)}. \quad (12)$$

Соотношение (12) позволяет определить дисперсионные зависимости $k_{xm1}(\lambda)$, $k_{xm2}(\lambda)$ и, соответственно, основную дисперсионную зависимость коэффициента замедления $\frac{\beta c}{\omega} \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)$.

Основной интерес при исследовании ПрВ с трехслойным диэлектрическим заполнением представляет симметричное расположение диэлектрической пластины в центре ши-

рокой стенки волновода, то есть в максимуме электрического поля основной волны волновода, при котором наблюдается максимальное поглощение СВЧ мощности, что принципиально важно при создании СВЧ устройств на ПрВ для непрерывной термообработки листовых материалов, а также аттенуаторов и согласованных нагрузок. Учитывая, что $d_1 = \frac{a+d}{2}$, а $d_2 = \frac{a-d}{2}$, получим

следующую систему дисперсионных уравнений, определяющих диапазонные свойства ПрВ с симметричным диэлектрическим заполнением в Е-плоскости:

$$\operatorname{tg} k_{xm2} d = \varepsilon'_2 \cdot \frac{k_{xm1}}{k_{xm2}} \cdot \frac{2 \operatorname{tg} \left(k_{xm1} \cdot \frac{a-d}{2} \right)}{\left\{ \left(\varepsilon'_2 \cdot \frac{k_{xm1}}{k_{xm2}} \right)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(k_{xm1} \cdot \frac{a-d}{2} \right) - 1 \right\}} \quad \text{при } k_{xm1}^2 > 0, \quad (13)$$

$$- \operatorname{tg} k_{xm2} d = \varepsilon'_2 \cdot \frac{|k_{xm1}|}{k_{xm2}} \cdot \frac{2 \operatorname{th} \left(|k_{xm1}| \cdot \frac{a-d}{2} \right)}{\left\{ \left(\varepsilon'_2 \cdot \frac{|k_{xm1}|}{k_{xm2}} \right)^2 \cdot \operatorname{th}^2 \left(|k_{xm1}| \cdot \frac{a-d}{2} \right) - 1 \right\}} \quad \text{при } k_{xm1}^2 < 0, \text{ для Е-типов волн}$$

и соответственно

$$\operatorname{tg} k_{xm2} d = \frac{k_{xm2}}{k_{xm1}} \cdot \frac{2 \operatorname{tg} \left(k_{xm1} \cdot \frac{a-d}{2} \right)}{\left\{ \left(\frac{k_{xm2}}{k_{xm1}} \right)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(k_{xm1} \cdot \frac{a-d}{2} \right) - 1 \right\}} \quad \text{при } k_{xm1}^2 > 0, \quad (14)$$

$$- \operatorname{tg} k_{xm2} d = \frac{k_{xm2}}{|k_{xm1}|} \cdot \frac{2 \operatorname{th} \left(|k_{xm1}| \cdot \frac{a-d}{2} \right)}{\left\{ \left(\frac{k_{xm2}}{|k_{xm1}|} \right)^2 \cdot \operatorname{th}^2 \left(|k_{xm1}| \cdot \frac{a-d}{2} \right) - 1 \right\}} \quad \text{при } k_{xm1}^2 < 0, \text{ для Н-типов волн.}$$

С помощью уравнений (13), (14) рассмотрим характеристики доминантного диапазона ПрВ с трехслойным диэлектрическим заполнением, для чего используем соотношение (11). В табл. 1, 2 приведены $\lambda_{кр}$ основного и первого высшего типа волн ПрВ с указанным диэлектрическим заполнением для различной толщины и относительной диэлектрической проницаемости пластины ε'_2 .

Значения $\lambda_{кр}$, приведенные в табл. 1, 2, позволяют определить коэффициент широкополосности ПрВ с трехслойным диэлектрическим заполнением, симметрично расположенным в Е-плоскости волновода. В табл. 3 приведены значения ξ в ПрВ при различных d и ε'_2 .

Таблица 1

Критические длины волн основного типа волны H_{10} при различных значениях ϵ'_2 и d пластины

d , см	$\lambda_{кр}$, см									
	ϵ'_2									
	1	2	4	9	16	25	36	49	64	81
0,5	18	18.991	20.914	25.286	30.521	36.224	42.19	48.314	54.54	60.835
1	18	19.936	23.498	30.887	39.056	47.576	56.277	65.083	73.955	82.871
2	18	21.602	27.618	38.93	50.74	62.751	74.863	87.031	99.236	111.464
3	18	22.929	30.626	44.453	58.584	72.835	87.145	101.488	115.853	130.231
5	18	24.64	34.292	50.986	67.772	84.595	101.436	118.287	135.145	152.007
7	18	25.345	35.767	53.588	71.421	89.261	107.101	124.943	142.787	160.631
9	18	25.456	36	54	72	90	108	126	144	162

Таблица 2

Критические длины волн первого высшего типа волны H_{20} при различных значениях ϵ'_2 и d пластины

d , см	$\lambda_{кр}$, см									
	ϵ'_2									
	1	2	4	9	16	25	36	49	64	81
0,5	9	9.005	9.016	9.044	9.09	9.162	9.276	9.46	9.76	10.222
1	9	9.041	9.134	9.435	10.061	11.147	12.602	14.253	16	17.798
2	9	9.324	10.128	12.504	15.597	18.952	22.415	25.931	29.477	33.042
3	9	9.956	12	16.437	21.273	26.242	31.27	36.33	41.409	46.5
5	9	11.64	15.572	22.793	30.14	37.533	44.949	52.376	59.812	67.252
7	9	12.53	17.59	26.282	34.995	43.717	52.442	61.17	69.9	78.63
9	9	12.728	18	27	36	45	54	63	72	81

Как следует из приведенных в табл. 1-3 данных, значения критических длин волн основного и первого высшего типов волн возрастают с увеличением ϵ'_2 , что связано с увеличением эквивалентной диэлектрической проницаемости частично заполненного диэлектриком волновода, при увеличении которой происходит возрастание $\lambda_{кр}$ всех типов волн [5]. При этом коэффициент широкополосности ξ полого и полностью заполненного ПрВ остается неизменным и равным $\xi = 2$. Однако величина коэффициента широкополосности, зависящая от $\lambda_{кр}$ основного и первого высшего типов, существенно зависит от структуры ЭМ поля данных типов волн в волноводе, частично заполненном диэлектрическим материалом. Так, расположение диэлектрической пластины толщиной $d = 0,5$ см в центре широкой стенки волновода оказывает максимальное влияние на основной тип волны, у

которого в центре ПрВ наблюдаются максимум электрического поля и минимальное влияние на первый высший тип волны, для которого при $x = a/2$ наблюдается минимум величины E_y , что и приводит к максимуму коэффициента широкополосности.

При увеличении толщины диэлектрической пластины влияние ее на первый высший тип возрастает, а на основной тип уменьшается, что и приводит к уменьшению коэффициента широкополосности ξ . Данное положение необходимо учитывать при разработке и проектировании рабочих камер конвейерных СВЧ нагревательных установок, предназначенных для термообработки листовых и тонкопленочных диэлектрических материалов.

На рис. 2 а приведены зависимости $\lambda_{кр}(\epsilon'_2)$ для различных толщин диэлектрической пластины d для основного типа волны H_{10} ПрВ с трехслойным симметричным

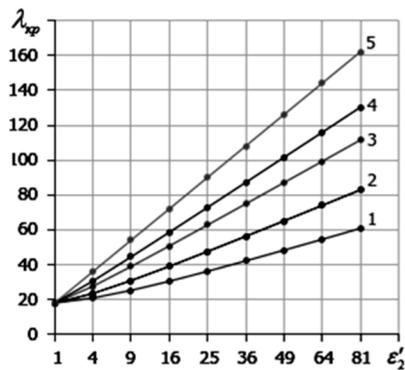
заполнением волновода диэлектрической пластиной, расположенной в Е-плоскости в центре широкой стенки волновода. На

рис. 2 б приведены аналогичные зависимости первого высшего типа волны H_{20} .

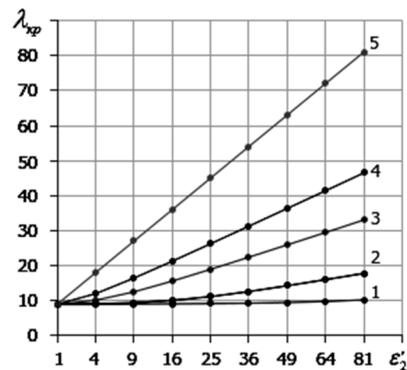
Таблица 3

Значения коэффициента широкополосности ξ прямоугольного волновода с трехслойным диэлектрическим заполнением для различных d и ϵ'_2

d , см	ξ , см									
	ϵ'_2									
	1	2	4	9	16	25	36	49	64	81
0,5	2	2.098	2.319	2.795	3.357	3.953	4.548	5.107	5.588	5.951
1	2	2.205	2.572	3.273	3.881	4.268	4.465	4.566	4.622	4.656
2	2	2.316	2.726	3.113	3.253	3.311	3.339	3.356	3.366	3.373
3	2	2.303	2.552	2.704	2.753	2.775	2.786	2.793	2.797	2.8
5	2	2.116	2.202	2.236	2.248	2.253	2.256	2.258	2.259	2.26
7	2	2.022	2.033	2.038	2.04	2.041	2.042	2.042	2.042	2.042
9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2



а



б

Рис. 2. Зависимость $\lambda_{cp}(\epsilon'_2)$ прямоугольного волновода при различной толщине диэлектрической пластины (кривая 1 – $d = 0,5$ см, 2 – $d = 1$ см, 3 – $d = 2$ см, 4 – $d = 3$ см, 5 – $d = 9$ см): а – для основного типа волны H_{10} ; б – для первого высшего типа волны H_{20}

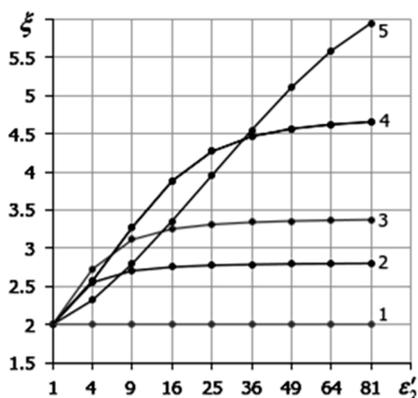


Рис. 3. Зависимость коэффициента широкополосности $\xi(\epsilon'_2)$ при различных толщинах диэлектрической пластины, расположенной в Е-плоскости ПрВ в центре широкой стенки волновода (кривая 1 – $d = 9$ см, 2 – $d = 3$ см, 3 – $d = 2$ см, 4 – $d = 1$ см, 5 – $d = 0,5$ см)

На рис. 3 приведены зависимости коэффициента широкополосности $\xi(\epsilon'_2)$ для различных значений толщины диэлектрической пластины, которые иллюстрируют данные представленные в табл. 3, из которых следует, что максимального значения широкополосности можно достичь при $0,2 \text{ см} \leq d \leq 0,5 \text{ см}$ на частоте 2450 МГц в прямоугольном волноводе сечением $90 \times 45 \text{ мм}$, то есть на частоте, на которой осуществляется нагрев с помощью энергии СВЧ поля.

В отличие от расположения диэлектрической пластины в Н-плоскости ее расположение в Е-плоскости приводит к более высоким значениям величины ξ , что позволяет увеличить равномерность нагрева по-

средством продольного изменения размеров РК. Это позволяет повысить уровень поглощаемой материалом мощности, то есть увеличить КПД СВЧ нагревательного устройства.

Таким образом, в работе приведенные результаты исследования диапазонных свойств ПрВ с трехслойным диэлектрическим заполнением в Е-плоскости волновода. Определен спектр критических длин

волн основного и первого высшего типов волн в зависимости от толщины диэлектрической пластины и ее относительной диэлектрической проницаемости. Показано, что для повышения равномерности нагрева надо повысить коэффициент широкополосности РК, что позволяет осуществлять равномерный нагрев листовых и тонкопленочных материалов в более широком диапазоне частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение собственных электродинамических параметров прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, Д.А. Баринов, В.Н. Посадский, А.Э. Семенов // Радиотехника. 2014. № 10. С. 41-45.

2. Определение спектра собственных резонансных частот и структуры электромагнитного поля прямоугольного резонатора с частичным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, П.В. Ковряков, В.А. Лойко, И.И. Салимов // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 6. С. 68-88.

3. Электродинамические свойства Е-типов колебаний прямоугольного резонатора с трехслойным диэлектрическим за-

полнением / Д.А. Баринов, П.В. Ковряков, В.А. Коломейцев, Е.А. Морозов // Радиотехника. 2016. № 3. С. 62-71.

4. Аналитическое решение совместной внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности для прямоугольного резонатора, частично заполненного диэлектрическим материалом / Д.А. Баринов, В.А. Коломейцев, В.Н. Посадский, А.Э. Семенов // Радиотехника. 2016. № 1. С. 88-97.

5. Распределение электрического поля собственных типов колебаний прямоугольного резонатора с двухслойным диэлектрическим заполнением / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин, М.А. Лукьянов, А.Э. Семенов // Радиотехника. 2016. № 1. С. 98-106.

Баринов Дмитрий Анатольевич – заместитель генерального директора ЗАО НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г Саратов

Гапонов Даниил Вячеславович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Коломейцев Вячеслав Александрович – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Тасканов Сергей Александрович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry A. Barinov – Deputy General Director of CJSC SPC «Almaz-Phasotron», Saratov

Daniil V. Gaponov – student, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav A. Kolomeytsev – Dr.Sc., professor of department «Radio electronics and telecommunications», Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Sergey A. Taskaev – student, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.382

**ТВЕРДОСТЬ И УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ
ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИОНАМИ АРГОНА ТИТАНА
ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
И ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

И.В. Перинская, С.Г. Калганова, В.В. Перинский

**HARDNESS AND FATIGUE ENDURANCE PROPERTIES OF TITANIUM
IMPLANTED WITH ARGON IONS APPLIED IN POWER ENGINEERING,
METALLURGICAL AND CHEMICAL ENGINEERING INDUSTRIES**

I.V. Perinskaya, S.G. Kalganova, V.V. Perinsky

Исследовано влияние облучения ионами аргона на твердость, усталостную прочность, морфологию и элементный состав титана. Предложен способ модификации поверхности титана ионами аргона, открывающий возможность применения титановых элементов электротехнических устройств в энергетическом, химическом и металлургическом машиностроении.

Ключевые слова: ионно-лучевая обработка, ионная имплантация, углеродсодержащее беспористое покрытие, титан технический, аргон, твердость, усталостная прочность

Проблемы науки и технологии, связанные с методами поверхностной обработки, постоянно привлекают внимание ученых, инженеров-электротехнологов, работающих в энергетическом, химическом и металлургическом машиностроении.

Несмотря на то, что для улучшения характеристик конструкционных материалов, зависящих от состояний поверхности, определяющих сопротивление износу, усталостную прочность, антикоррозионные свойства, существует целый набор технологических процессов (вакуумное

The paper concerns the experimental results based on application of ion implantation of argon (Ar^+), which allows for increasing hardness and fatigue resistance of titanium. The effect of surface synthesis of the carbon-bearing covering on the implanted titanium in case of implantation of ions of argon (Ar^+) is probed. A physical model of the surface mechanism of the ion-ray synthesis connected to polymerization of carboniferous fragments is offered.

Keywords: ion-beam processing, ionic implantation, carboniferous pore-free covering, titan technical, argon, hardness, fatigue endurance

напыление, микродуговое оксидирование, азотирование, электротехнологические покрытия), каждый из них в отдельности либо недостаточно эффективен, либо не является универсальным [1, 2].

Одним из электрических методов поверхностной обработки материалов, значительно расширяющих возможности технологов воздействовать на характеристики поверхности и приповерхностного слоя в сотни и тысячи ангстрем, является ионная имплантация. Метод ионной имплантации обладает рядом достоинств:

– метод не лимитируется диффузионным процессом, так что химические характеристики поверхности могут быть изменены до любой заданной величины;

– механические свойства (прочность, вязкость) в объеме материала сохраняются на заданном уровне при одновременной оптимизации химического состава и структуры поверхности; при этом резкой границы между зоной ионной имплантации и основой материала нет.

Задача состоит в экспериментальном исследовании и моделировании физико-технического эффекта, сопровождающего ионно-лучевую обработку поверхности титана ионами аргона Ag^+ в углеводородной среде с целью создания на поверхности титана углеродного алмазоподобного сверхтонкого покрытия, обеспечивающего не-

обходимую твердость и усталостную прочность.

Цель данной работы – исследование влияния имплантации аргона на механические свойства, морфологию и элементный состав титана в зависимости от энергии и дозы облучения.

Образцы титана ВТ1-0 представляли собой пластины 25×20 мм толщиной 2 мм, вырезанные из листа электроискровым способом. Механически обработанную, полированную поверхность титановых образцов облучали ионами аргона Ag^+ на установке ионного легирования «Везувий-5» с ускоряющим напряжением 40-130 кэВ и дозой $(1-4) \cdot 10^{16}$ ион/см². Модернизированная приемная камера ускорителя «Везувий-5» представлена на рис. 1.

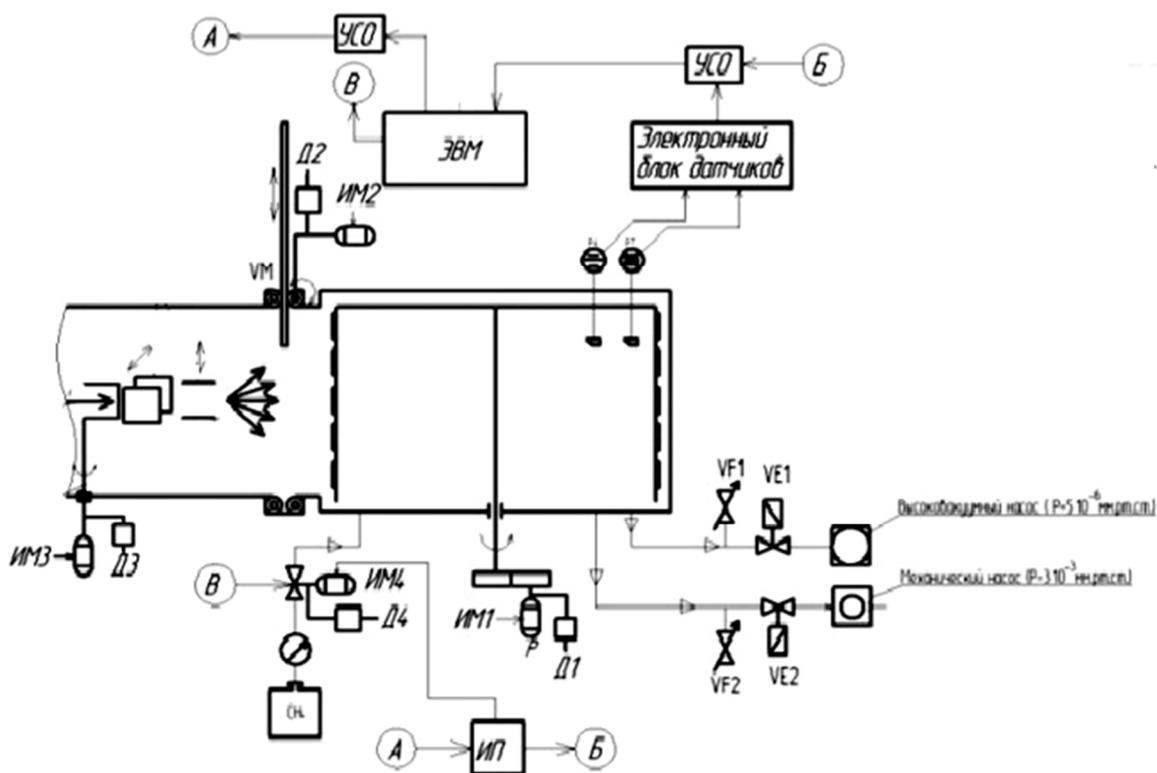


Рис. 1. Схема модернизированной приемной камеры установки ионного легирования «Везувий-5»

Микротвердость поверхностных слоев измеряли методом вдавливания алмазного индентора на установке ПМТ-3 при нагрузке 20 г в течение 15 с. Испытания на усталостную прочность осуществляли методом знакопеременного консольного изгиба до разрушения с частотой 22,5 Гц.

Распределение элементов по глубине определяли методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Морфологические изменения фиксировали с помощью металлографического микроскопа ММР-4Р и растрового электронного микроскопа с холоднополевой эмиссией, предназначен-

ного для исследования наноструктур со сверхвысоким разрешением при малых ускоряющих напряжениях JSM-6701F [3, 4].

Титан BT1-0, применяемый в энергетическом, химическом и металлургическом машиностроении относится к классу «титан технический» [5].

Увеличение микротвердости при облучении титана ионами аргона имеет вид, соответствующий представлениям, что увеличение микротвердости при ионно-лучевой обработке связано с образова-

нием радиационных дефектов, закрепляющих дислокации [6]. Экспериментальными параметрами имплантации ионов аргона являются: ускоряющее напряжение $U = 40-130$ кВ и доза $\Phi = (1-4) \cdot 10^{16}$ ион/см² [7], причем за пределами данного диапазона, видимо, не происходит формирования углеродного алмазоподобного беспористого покрытия титановой поверхности, снижаются твердость и усталостная прочность изделий (рис. 2-4).

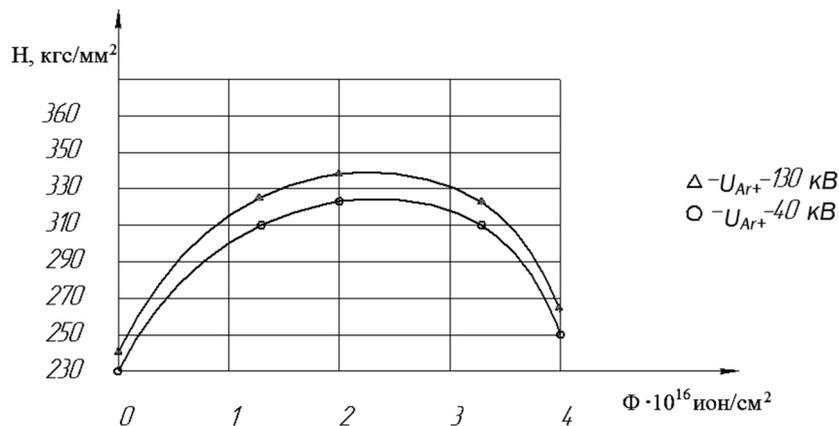


Рис. 2. Дозовая зависимость твердости титана при имплантации ионов аргона

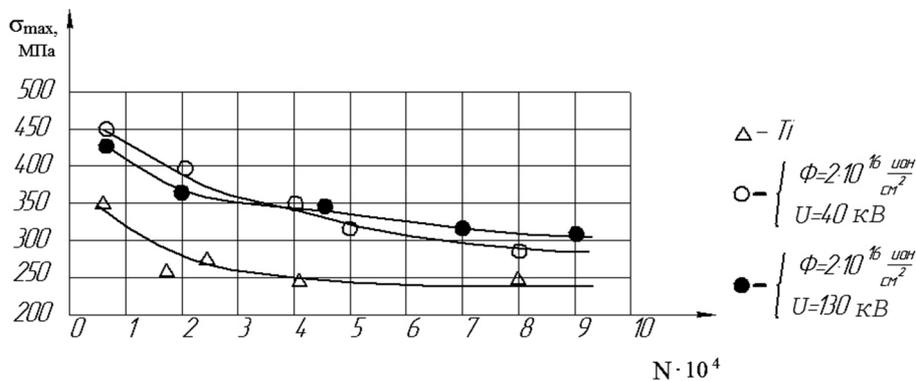


Рис. 3. Влияние имплантации ионов аргона на усталостную прочность титана

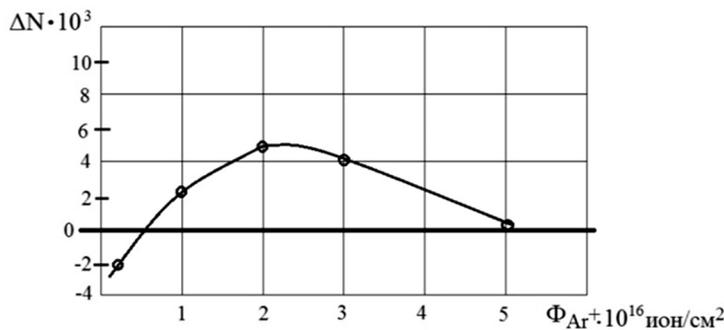


Рис. 4. Зависимость усталостной прочности пористого титана BT1-0 от дозы ионов аргона

Испытания на усталостную прочность проводили по схеме консольного изгиба до разрушения. Максимальное знакопеременное изгибающее напряжение по сечению образца ~450 МПа при частоте 22,5 Гц.

Максимальное увеличение усталостной прочности происходит при дозе имплантации ионов аргона $\Phi = (1-4) \cdot 10^{16}$ ион/см², что совпадает с максимумом дозовой зависимости твердости. Зависимость от энергии ионов незначительна. Это связано с механизмами формирования углеродной алмазоподобной беспористой пленки на титане. Удаление этого слоя химическим травлением приводит к изменению морфо-

логии, ухудшению усталостных свойств и уменьшению микротвердости [8].

Исследование элементного состава поверхностных и подповерхностных слоев методом ВИМС показало, что в результате ионной имплантации аргона происходит распад оксидов, увеличивается концентрация свободного кислорода и значительно повышается концентрация углерода и углеродсодержащих соединений (углеводородов), причем концентрация углерода возрастает и в приповерхностном слое титана (см. таблицу) [9].

Одновременно повышается структурное совершенство имплантированных поверхностей титана (рис. 5).

Элементный состав по данным ВИМС

Элемент, соединение	Масса, а.е.м.	Содержание, отн. ед.		Относительное приращение
		исходный образец	облученный образец	
С	12	500	700	1,2
СН	13	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	1,0
СН ₂	14	190	230	1,2
СН ₃	15	250	300	1,2
О (СН ₄)	16	180	220	1,2
Н ₂ О	18	300	700	2,3
Н ₂ (СО)	28	1600	4700	2,9
О ₂	32	18	13	0,7
СО ₂	44	250	750	3,0

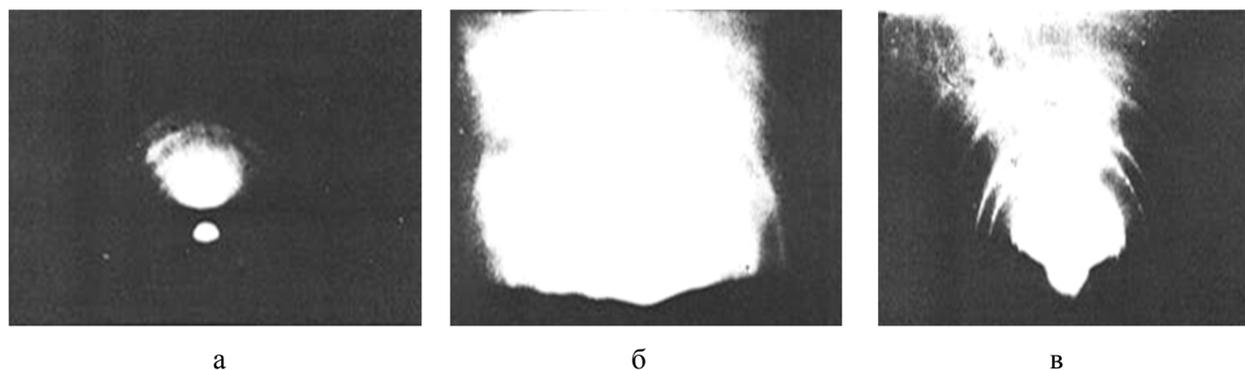


Рис. 5. Микродифракция от поверхностных слоев титана ($U = 40$ кВ): а – необлученные слои; б – слои, облученные ионами аргона при $\Phi = 1 \cdot 10^{16}$ ион/см²; в – слои, облученные ионами аргона при $\Phi = 2 \cdot 10^{16}$ ион/см²

Сопоставление данных, полученных для титана, с результатами испытаний химической активности других металлов, имплантированных ионами химически инертных примесей (рис. 6), свидетель-

ствует о качественно близком характере происходящих изменений.

В настоящее время разработаны типы ПЭ-РЭМ (например, JSM-6701F с торможением электронов перед образцом), в ко-

торых возможно получение эффективной энергии взаимодействия электронов с образцом на уровне 100-300 эВ за счет приложения к образцу отрицательного тормозящего потенциала до 2 кВ. В таком ПЭ-РЭМ стало возможным наблюдение

нанорельефа углеродной алмазоподобной пленки, синтезированной на поверхности титана ионной имплантацией аргона с разрешением 15 нм (рис. 8) [10].

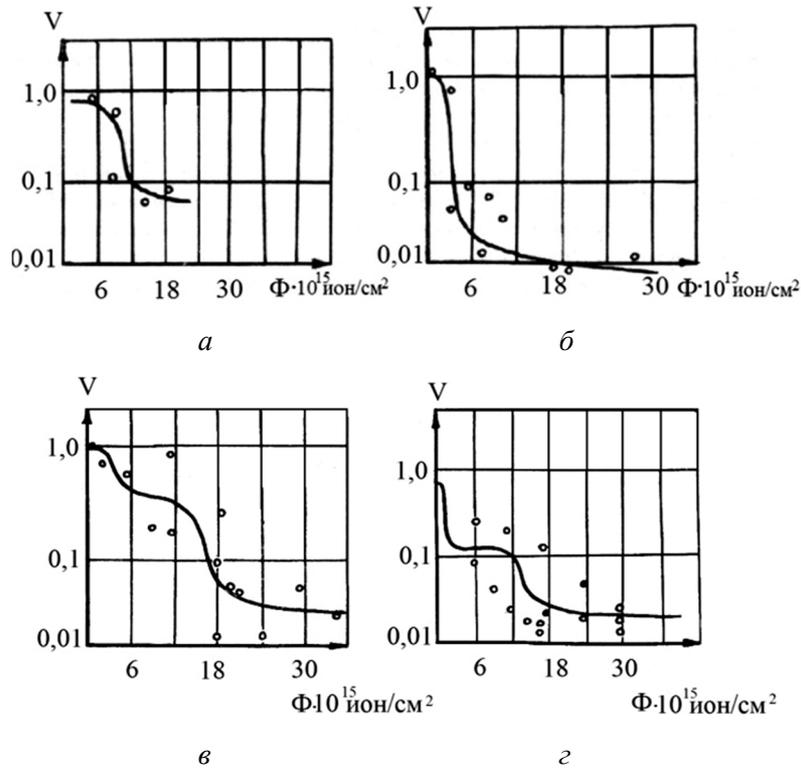


Рис. 6. Зависимость нормированной скорости травления титана и других металлов от дозы Ag^+ : *a* – алюминий ($U = 75$ кВ); *б* – титан ($U = 75$ кВ); *в* – хром ($U = 60$ кВ); *г* – никелид железа ($U = 60$ кВ) (V – нормированная скорость травления: $V = V_u/V_n$, где V_u – скорость травления имплантированного титана, V_n – скорость травления не имплантированного титана)

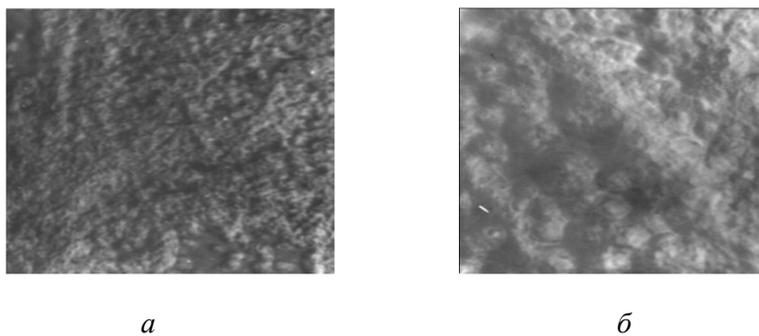


Рис. 7. Влияние химического травления на морфологию поверхности титана, имплантированного ионами аргона ($U = 100$ кВ, $\Phi = 3,1 \cdot 10^{16}$ ион/см²), время травления: *a* – исходный материал; *б* – 55 с

Поверхностный механизм синтеза, на наш взгляд, связан с полимеризацией углеродсодержащих фрагментов, введенных в вакуумную камеру, на поверхности имплантируемого слоя. На его роль в имплантированных материалах указывают эксперимен-

тальные результаты, такие как изменение морфологии поверхности, данные ВИС о кинетике осаждения углеродных фрагментов, проявление диэлектрических свойств имплантированных поверхностей, усиление этих эффектов при многократном облуче-

нии, ослабление эффекта при увеличении ионного тока и уменьшении времени ионно-лучевой обработки, что ограничивает адсорбцию углеводородов, близость пороговых доз для различных металлов. Необходимо отметить, что высокая воспроизводимость свойств синтезированной пленки, зависимость от рабочего вакуума, уникальные защитные и механические свойства при незначительной (десятки нанометров) толщине указывают на специфический механизм образования, равномерность и беспористость возникающих пленок.



Рис. 8. Морфология нанокристаллической углеродной алмазоподобной пленки, синтезированной на поверхности Ti ионной имплантацией аргона с разрешением 15 нм ($\times 250000$)

Оправданным является допущение об электронном механизме ионно-стимулированной полимеризации, согласно которому при ионно-лучевой обработке в поверхностном слое углеродсодержащих адсорбированных фрагментах происходят процессы ионизации и диссоциации молекулярных фрагментов, приводящие к возникновению заряженных радикалов с ненасыщенными связями, процесс сшивания которых и их адсорбция стимулируются энергетическим воздействием ионного пучка и контролируется поступлением электронов из нижележащего металла и вакуума. По мере увеличения толщины полимеризованного диэлектрического слоя поступление электронов к поверхности реакции затрудняется, и при достижении толщины порядка длины туннелирования электронов рост прекращается. Наиболее интенсивно процесс протекает на участках с меньшей толщиной полимерного слоя и в местах возможного образования пор, что обеспечивает высокую равномерность и беспористость возникающей пленки.

Следует отметить, что значительное локальное повышение давления и температуры в процессе имплантации стимулирует протекание разнообразных химических и фазовых превращений в каскадах внедряемых ионов, в том числе формирование алмазоподобных группировок атомов, входящих в состав отдельных полимерных цепей. Как известно, алмазоподобные полимерные пленки обладают рядом уникальных свойств, в том числе высокой химической инертностью и механической прочностью. Другая особенность связана с ионным перемешиванием фрагментов полимерной пленки и приповерхностных слоев металла, что обуславливает высокую адгезию образующейся пленки к титану.

Итак, на основании полученных экспериментальных результатов авторами установлено, что применение ионной имплантации аргона Ar^+ позволяет повысить твердость и усталостную прочность титана, оптимизировать характеристики трещиностойкости, во многом определяемые состоянием поверхности.

Исследован эффект поверхностного синтеза углеродсодержащего покрытия на имплантированном титане при имплантации ионов аргона с ускоряющим напряжением $U = 40-130$ кВ и дозой $\Phi = (1-4) \cdot 10^{16}$ ион/см² в среде углекислого газа CO_2 .

Ионная имплантация аргона в среде углекислого газа приводит к увеличению микротвердости пористого титана ВТ1-0 на 20-30%, причем максимум эффекта достигается в диапазоне дозы ионов $(1,5-3,2) \cdot 10^{16}$ ион/см².

Усталостная прочность образцов титана зависит от дозы имплантированных ионов аргона в среде углекислого газа. Самое большое повышение усталостной прочности обнаружено при дозе облучения $(1,5-3,2) \cdot 10^{16}$ ион/см².

Предложена физическая модель поверхностного механизма ионно-лучевого синтеза, связанного с полимеризацией углеродсодержащих фрагментов, нормированно введенных в вакуумную камеру, на поверхности имплантируемого слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ройх И.Л.** Нанесение защитных покрытий в вакууме / И.Л. Ройх, Л.Н. Колтунова, С.Н. Федосов. М.: Машиноведение, 1976. 362 с.
2. **Брынзан А.П.** Применение микродугового оксидирования для получения диэлектрических покрытий / А.П. Брынзан, Ч.Т. Канцер, В.А. Каплин // Электронная обработка металлов. 1990. № 4. С. 20-21.
3. **Синдо Д.** Аналитическая электронная микроскопия / Д. Синдо, Т. Оикава. М.: Техносфера, 2006. 206 с.
4. **Иванов С.А.** Применение электронной микроскопии и микроанализа для исследований наноматериалов и наноприборов / С.А. Иванов // Оборудование, технологии и аналитические системы для материаловедения, микро- и нанoeлектроники: труды V семинара. 18-19.06.2007. М.: МИСиС, 2007. Т. 1. С. 32-49.
5. **Ильин А.А.** Титановые сплавы. Состав. Структура. Свойства / А.А. Ильин, Б.А. Калачев, И.С. Полькин. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 186 с.
6. Влияние параметров облучения ионами Si^+ и Ag^+ на механические свойства и состав поверхности слоев титанового сплава / П. В. Быков и др. // Известия Академии наук. Сер. физическая. 2004. Т. 68. № 3. С. 443-446.
7. **Перинская И.В.** Механизмы влияния ионной имплантации на химическую активность металлов / И.В. Перинская, В.В. Перинский, В.Н. Лясников // Технология металлов. 2009. № 8. С. 22-25.
8. **Перинская И. В.** Направленное изменение микротвердости, химических и структурных свойств поверхности титана при ионно-лучевой обработке / И.В. Перинская, В.Н. Лясников, В.В. Перинский // СВЧ-приборы и устройства. Микро- и нанoeлектроника. Технология материалов. Вакуумная коммутационная аппаратура: сб. ст. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2009. С. 49-51.
9. **Перинская И.В.** Совершенствование и применение ионно-лучевой технологии субмикронной пассивации металлов для безрезистной литографии и защиты от коррозии: автореф. ... канд. техн. наук / И.В. Перинская. Саратов: СГТУ, 2010. 18 с.
10. **Перинская И.В.** Ионно-лучевая нанотехнология и компоненты СВЧ устройств / И.В. Перинская, В.В. Перинский, В.Н. Лясников. Саратов: ИЦ «Наука», 2012. 142 с.

Перинская Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Калганова Светлана Геннадьевна – доктор технических наук, заведующая кафедрой «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Перинский Владимир Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina V. Perinskaya – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Svetlana G. Kalganova – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir V. Perinsky – Dr. Sc., Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 28.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT16 ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ ТВЧ

А.А. Фомин, М.А. Фомина, А.В. Войко, В.А. Кошуро,
И.В. Родионов, А.М. Захаревич

STRENGTH AND PLASTICITY PROPERTIES OF THE TITANIUM ALLOY VT16 AFTER HIGH TEMPERATURE TREATMENT WITH HFC

A.A. Fomin, M.A. Fomina, A.V. Voyko, V.A. Koshuro,
I.V. Rodionov, A.M. Zakharevich

Исследованы характеристики прочности и пластичности стержневых образцов титанового сплава VT16 после обработки токами высокой частоты в диапазоне от 600 до 1200°C. Установлено, что воздействие ТВЧ обеспечивает повышение характеристик прочности на 5-14% при незначительном снижении их пластичности.

Ключевые слова: токи высокой частоты, упрочнение, оксидное покрытие

Биосовместимые материалы, используемые в имплантологии, широко представлены различными металлами и неметаллами, композитами и покрытиями [1]. Конструктивной основой имплантатов (внутрикостных медицинских изделий) чаще всего служат различные металлические материалы, например технический титан (VT1-0, VT1-00) и сплавы на основе титана (VT6, VT16), нержавеющие стали, кобальтохромовые сплавы, сплавы циркония и тантала [2].

При установке конструкция имплантата находится под действием динамической нагрузки. Отдельные конструктивные элементы имплантата подвергаются воздействию высоких механических напряжений [3]. Для повышения прочностных характеристик металлов используются методы поверхностной пластической деформации, легирования и последующей упрочняющей термообработки [4, 5]. Недостатками ука-

The characteristics of strengthening and plasticity of the rod samples from the high-strength titanium alloy VT16 after treatment with high frequency currents (HFC) in the range from 600 to 1200°C have been studied. It has been established that the HFC effect increases the strength characteristics by 5-14%, whereas their plasticity is slightly lowered.

Keywords: high frequency currents, strengthening, oxide coating

занных методов являются снижение циклической прочности конструкций и наличие токсичных элементов в составе сплава (V, Mo и др.). Достаточно высокую эффективность для повышения физико-механических свойств, в частности твердости, модуля упругости и стойкости к царапанию, показал метод обработки токами высокой частоты (ТВЧ) изделий из технического титана в диапазоне температуры от 600 до 1200°C [2]. В связи с указанным целью данной работы является изучение влияния режимов термической обработки ТВЧ на механические характеристики стержневых образцов высокопрочного титанового сплава VT16.

Экспериментальные образцы представляют собой цилиндрические стержни с диаметром 5,35-5,40 мм и длиной рабочей части 40-55 мм, изготовленные из высокопрочного конструкционного ($\alpha+\beta$)-

титанового сплава ВТ16 (ОСТ 1 90013-81). В ходе исследований устанавливалось влияние ТВЧ на процессы упрочнения в диапазоне температуры от 600 до 1200°C. Режимам обработки экспериментальных образцов покрытий была присвоена двойная нумерация: первое число соответствует температуре обработке ТВЧ металлической основы, второе – продолжительности процесса термообработки.

Основные характеристики прочности (предел упругости $\sigma_{0,05}$, предел текучести σ_T и предел прочности σ_B) и пластичности (относительное удлинение δ) определялись по диаграммам напряжение – относительное удлинение, полученным с применением разрывной машины Р-5 при стандартном методе испытаний на растяжение со скоростью деформации 0,05 мм/мин (ГОСТ 1497-84) (рис. 1) [6].

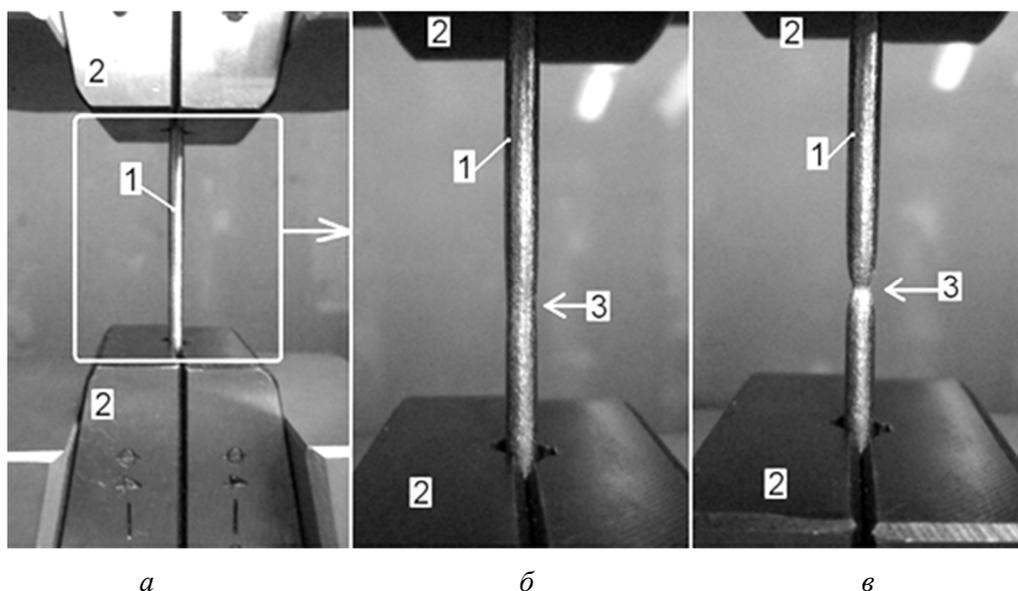


Рис. 1. Общий вид испытания (а) на растяжение титанового стержня (1), закрепленного в фиксирующих губках (2), а также стадии начала (б) и окончания (в) формирования шейки растяжения (3)

Вопрос сохранения высокой прочности и достаточной пластичности при термической обработке металлоизделий также является важным. Известно, что при высокотемпературной обработке металлов и сплавов могут происходить фазово-структурные и химические превращения, которые приводят к снижению физико-механических и эксплуатационных свойств. Для определения влияния обработки ТВЧ на характеристики прочности при растяжении и пластичности были выбраны титановые образцы, на поверхности которых формировалась кислородно-насыщенная оболочка с высокими показателями физико-механических свойств поверхности [7].

Для образцов из титанового сплава ВТ16 был разработан план, включающий изучение 8 экспериментальных образцов, подвергнутых обработке ТВЧ, и 1 кон-

трольного образца, не подвергнутого обработке ТВЧ (см. таблицу).

При сравнении полученных результатов использовались данные для титанового сплава ВТ6, который по своим механическим характеристикам наиболее близок к сплаву ВТ16. Сплав ВТ6 выпускается в виде прутка, например диаметром 10-12 мм после отжига и закалки со старением, в соответствии с ГОСТ 26492-85. Предел прочности для данного сплава изменяется в широком диапазоне от 885 до 1050 МПа (для закаленных сплавов свыше 1080 МПа), относительное удлинение составляет от 4 до 10 %.

Характерный прирост предела текучести σ_T и предела прочности σ_B образцов из сплава ВТ16 составил 3-22 % и 5-14 % соответственно, относительное удлинение оставалось на том же уровне (рис. 2).

Результаты определения механических характеристик для образцов сплава ВТ16

Образец №	Предел упругости $\sigma_{0,05}$	Предел текучести σ_T	Предел прочности σ_B	Относительное удлинение, δ	Обозначение режима обработки ТВЧ
	МПа	МПа	МПа	%	
1	141	505	983	18,3	КО*
2	90	449	834	23,2	600-030
3	91	434	855	21,0	600-120
4	95	440	848	19,2	800-030
5	90	443	885	18,5	800-120
6	96	452	923	16,4	1000-030
7	95	521	1028	17,4	1000-120
8	87	614	1123	19,7	1200-010
9	87	472	988	16,1	1200-030

Примечание: КО* – исходный образец титанового сплава ВТ16, не подвергнутый обработке ТВЧ

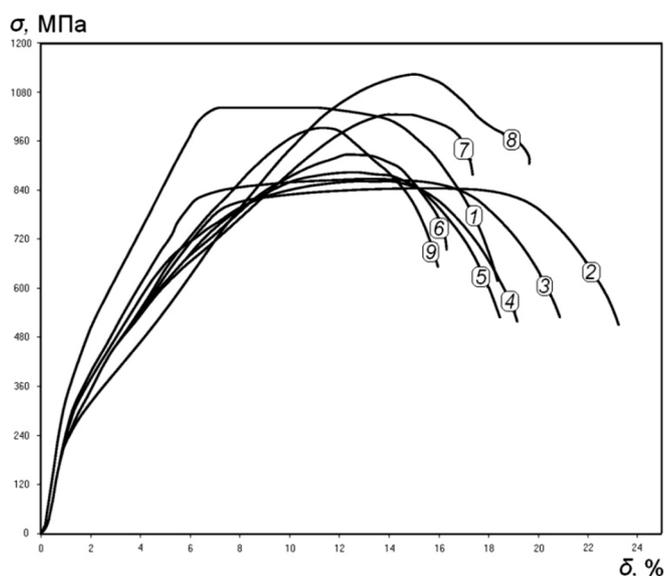


Рис. 2. Диаграммы напряжение σ – относительное удлинение δ для образцов титанового сплава ВТ16 (цифровые обозначения даны в соответствии с таблицей)

После обработки ТВЧ предел упругости $\sigma_{0,05}$ высокопрочного сплава ВТ16 снижался на 32-38%, что обеспечивает снижение механических напряжений в контактной области имплантат – кость при использовании данных образцов в процессе изготовления медицинских изделий внутрикостного назначения.

При анализе механических характеристик исследовались также фактограммы (поверхности разрушения) при различных увеличениях (рис. 3). На представленных изображениях РЭМ четко различаются области растяжения (центральная часть образцов) и сжатия (периферийная оболочка), что характерно для шейки образца после испытания.

Оболочка, испытывающая напряжения сжатия, имеет толщину около 0,5-0,7 мм для всех образцов, включая контрольный образец сплава ВТ16 (рис. 3 а). Фактограммы для образцов с повышенной прочностью (режимы обработки ТВЧ 1000-120, 1200-010 и 1200-030) отличаются более сложной морфологией и отсутствием четкого контура разрушения (рис. 3 в). Оболочка образца сильно изменяется, что может быть связано с повышением предела прочности σ_B и незначительным снижением пластичности δ для образцов, обработанных по режимам 1000-030 и 1200-030. Сердцевина образцов характеризуется кластерной структурой, величина зерен не превышает 2-4 мкм (рис. 3 б, г).

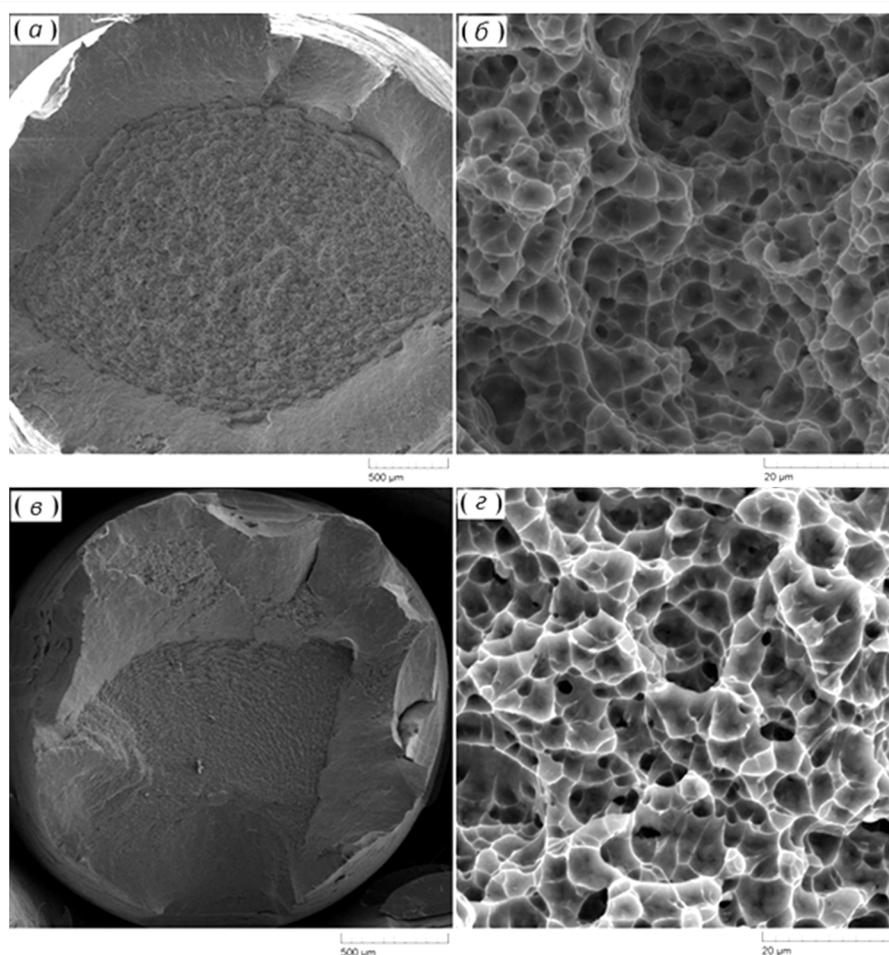


Рис. 3. Фрактограммы образцов титанового сплава ВТ16: *а, б* – исходный образец, не подвергнутый термообработке (общий вид, $\times 120$) и центральная часть ($\times 5000$); *в, г* – образец после обработки ТВЧ по режиму 1200-030 (общий вид, $\times 160$) и центральная часть ($\times 5000$)

Образцы из сплава ВТ16 сохраняют высокую прочность при высокотемпературной (около $1000 \pm 20^\circ\text{C}$) обработке ТВЧ и упрочняются на 5-14 % при кратковременном (не более 10 с) экстремально высокотемпературном (около $1200 \pm 30^\circ\text{C}$) воздействии ТВЧ. Пластические характеристики, в частности относительное удлинение, при обработке ТВЧ на указанных режимах 1000-120 и 1200-010 остаются практически неизменными. Таким образом, медицинские титановые изделия после упрочняющей термообработки будут характеризоваться повышенными механическими свойствами по сравнению с ис-

ходным сплавом ВТ16 и стандартным сплавом ВТ6, что в сочетании с необходимыми структурными изменениями поверхности (формированием оксидного биосовместимого покрытия) позволяет рекомендовать обработку ТВЧ для улучшения качества имплантатов.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания образовательным организациям высшего образования, подведомственным Минобрнауки РФ (проект № 11.1943.2017/ПЧ).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Paital S.R.** Calcium phosphate coatings for bio-implant applications: Materials, performance factors, and methodologies /

S.R. Paital, N.B. Dahotre // Materials science and engineering: R., 2009. № 66. P. 1-70.

2. **Fomin A.A.** Chapter 19 – Chemical composition, structure and properties of the surface of titanium VT1-00 and its alloy VT16 after induction heat treatment / A.A. Fomin, I.V. Rodionov // Handbook of nanoceramic and nanocomposite coatings and materials. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2015. P. 403-424.

3. Свойства покрытий диоксида титана, полученных индукционно-термическим оксидированием сплава VT1-00 / А.А. Фомин, А.Б. Штейнгауэр, И.В. Родионов и др. // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 1. С. 43-51.

4. **Catledge S.A.** Nanostructured surface modifications for biomedical implants / S.A. Catledge, M. Fries, Y.K. Vohra // Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology, 2004. № 1. P. 741-762.

5. Surface Structure of Titanium Materials Intended for Interosseous Implants / V.I. Kalita, A.S. Trushnikova, M.A. Vocharova, B.N. Shaternikov // Russian Metallurgy (Metally). 2005. Vol. 3. P. 282-288.

6. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение. Переизд. с изм. М.: Стандартиформ, 2008. 22 с.

7. Химический состав, структура и свойства поверхности титана VT1-00 и сплава VT16 после индукционно-термической обработки / А.А. Фомин, И.В. Родионов, М.А. Фомина и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 3. С. 481-494.

Фомин Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Фомина Марина Алексеевна – студентка Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Войко Алексей Владимирович – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Кошуро Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Родионов Игорь Владимирович – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Захаревич Андрей Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией диагностики наноматериалов и структур Образовательно-научного института наноструктур и биосистем Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

Aleksandr A. Fomin – PhD, Associate Professor, Postdoctoral Researcher, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Marina A. Fomina – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksey V. Voyko – Undergraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir A. Koshuro – PhD, Associate Professor, Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor V. Rodionov – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Andrey M. Zakharevich – PhD., Head of Laboratory for Diagnostics of Nanomaterials and Structures, Educational Scientific Institute of Nanostructures and Biosystems, Chernyshevsky Saratov State University

Статья поступила в редакцию 26.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-523.6

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОКУСИРОВКОЙ ЛУЧА ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ

М.И. Мотасов, Д.А. Давыдов, В.С. Алексеев

COMPUTER-AIDED CONTROL BY FOCUSING THE BEAM UNDER ELECTRON-BEAM WELDING

M.I. Motasov, D.A. Davydov, V.S. Alekseev

Рассматривается имитационная модель системы управления фокусировкой луча с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета Matlab.

Ключевые слова: автоматизация управления, электронно-лучевая сварка, вторичный электронный ток, передаточная функция

The paper considers the imitation focusing model used for beam control by means of the Simulink Program being part of the Matlab package.

Keywords: computer-aided control, electron-beam welding, secondary electron current, transfer function

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) является одним из высокотехнологичных методов соединения материалов, который позволяет получать изделия и детали весьма высокого качества. Многие отрасли производства зависят от развития технологий сварки [1, 2], поэтому задачи оптимизации процесса ЭЛС с помощью систем автоматизированного управления являются одними из приоритетных в области сварки.

Фокусировка электронного луча имеет значительное влияние на геометрические параметры сварного шва. Выбор неоптимальной точки фокусировки или ее дрейф в процессе сварки могут привести к специфическим дефектам сварного шва, появлению корневых трещин и несоответствию геометрических параметров требуемым значениям, следовательно, отсутствие контроля фокусировки может привести к снижению качества сварного шва до значений, не соответствующих заявленным для технологического процесса ЭЛС. Таким образом, положение фокуса напрямую связано с

понятием качества сварного соединения, и решение задачи его стабилизации в процессе сварки позволит существенно повысить качество шва, позволяя при этом оптимизировать технологический процесс за счет исключения операций предварительной настройки фокуса перед началом процесса сварки.

В настоящий момент в технологическом процессе ЭЛС реализованы системы, основанные на измерении вторичного электронного тока в плазме над зоной сварки, которые обеспечивают надежную работу в узком диапазоне мощностей и функционируют только при сварке статическим электронным пучком. Системы позволяют устанавливать ток фокусировки непосредственно в процессе сварки, но не работают в автоматическом режиме.

Внедрение в технологический процесс контура автоматического регулирования фокуса луча позволит повысить эффективность процесса за счет устранения субъективного фактора и обеспечения воспроиз-

водимости фокусировки электронного луча при сварке. Анализ показал, что известные подходы не обеспечивают качественного решения задачи оперативного управления фокусировкой без периодического прерывания процесса.

В соответствии с приведенными фактами целью настоящей работы является разработка локальной системы автоматизированного управления фокусировкой при электронно-лучевой сварке со сканированием фокального пятна на основе анализа вторичного электронного тока в плазме.

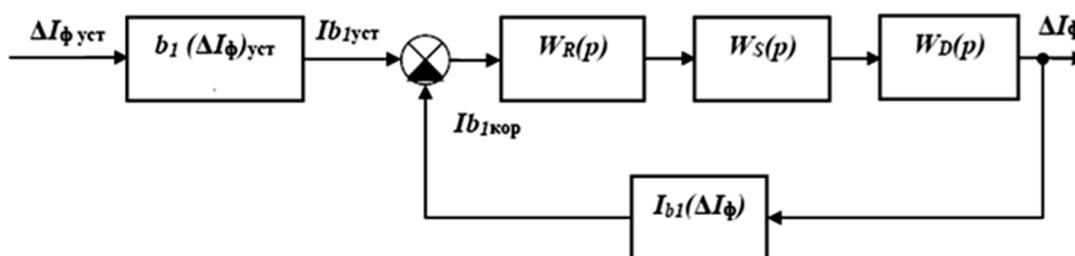


Рис. 1. Структурная схема системы управления фокусировкой: $W_S(p)$ – передаточная функция фокусирующей катушки; $W_R(p)$ – передаточная функция регулятора; $W_D(p)$ – передаточная функция датчика; I_k – ток коллектора электронов; I_ϕ – ток фокусировки; ΔI_ϕ – отклонение тока фокусировки от значения, при котором достигается максимальная глубина канала проплавления; $I_{\phi\text{кор}}$ – корректирующее воздействие на ток фокусировки

Каждый элемент характеризуется своими параметрами с точки зрения ТАУ. Звено ПИД-регулятора W_R описывается следующей передаточной функцией:

$$W_R(p) = K_p \left(1 + \frac{K_I}{p} + K_D p \right),$$

где $K_p = 2$ – коэффициент пропорциональной составляющей; $K_I = 10$ – коэффициент интегральной составляющей; $K_D = 0,01$ – коэффициент дифференциальной составляющей.

Данные значения коэффициентов получены в ходе настройки регулятора методом Зиглера-Никольса.

Также в контур управления током фокусировки входит отклоняющая катушка с усилителем тока. Подобный тракт с точки зрения ТАУ обычно представляется аperiodическим звеном первого порядка с передаточной функцией вида

$$W_S(p) = \frac{K_S}{T_S p + 1},$$

При создании модели системы управления необходимо опираться на основы теории автоматического управления (ТАУ), помимо этого, процесс моделирования можно значительно ускорить, если использовать программные пакеты, такие как Matlab. Разработка имитационной модели системы управления фокусировкой луча велась с использованием программной среды Simulink, входящей в состав пакета Matlab. На рис. 1 представлена структурная схема системы автоматического регулирования положения фокуса луча [3].

где $K_S = 1$ – коэффициент усиления тракта; $T_S = 0,1$ с – постоянная времени тракта фокусировки.

Помимо данных элементов в контуре управления также стоит учесть особенности датчика вторичного тока электронов, в схеме которого реализуется метод синхронного детектирования, который подразумевает использование на выходе фильтров низких частот с частотой среза $\omega_0 \ll \omega$. Следовательно, в терминах ТАУ переходную характеристику датчика необходимо аппроксимировать аperiodическим звеном второго порядка:

$$W_D(p) = \frac{1}{T_1 p^2 + T_2 p + 1},$$

где $T_1 = 0,0009$ с; $T_2 = 0,14$ с.

С помощью надстройки Simulink программного пакета Matlab был выполнен анализ устойчивости и динамических характеристик системы управления (рис. 2).

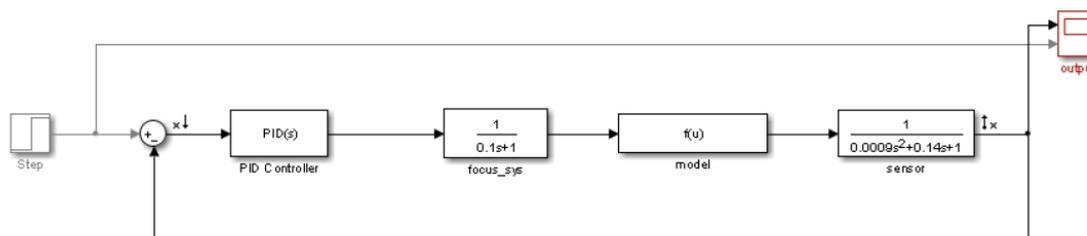


Рис. 2. Модель системы управления в среде Simulink

Переходная характеристика системы (реакция на ступенчатый сигнал) приводится на рис. 3. Согласно полученной характеристике длительность переходного процесса составляет 0,4 с, что является приемлемым быстродействием для технологическо-

го процесса ЭЛС. Величина перерегулирования составила примерно 15 %, что также находится в допустимых пределах для процесса сварки. Статическая составляющая ошибки регулирования не превысила 0,05 %.

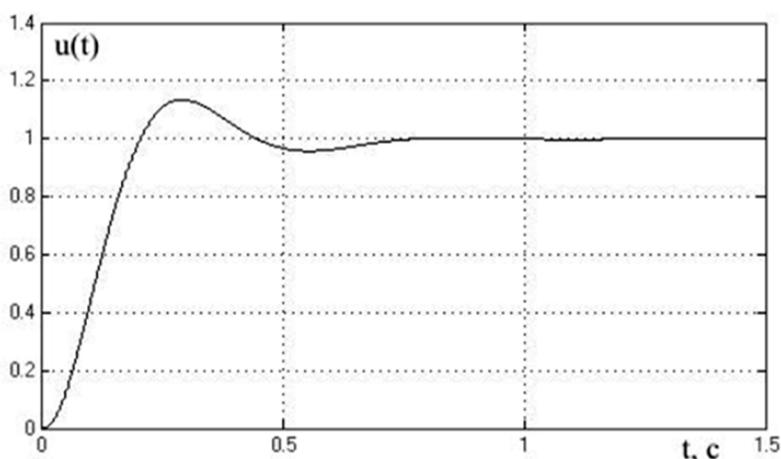


Рис. 3. Переходная характеристика системы управления фокусировкой

Для анализа устойчивости исследуемую систему необходимо разомкнуть и построить ее амплитудно-частотную характеристику [5]. АЧХ в логарифмической системе координат для исследуемой системы представлена на рис. 4. Согласно данной характеристике можно утверждать, что замкнутая система управления фокусировкой луча будет устойчивой с запасом, который можно оценить следующими параметрами:

- запас устойчивости по амплитуде равен 22,5 дБ;

- запас устойчивости по фазе равен 53°.

По результатам анализа структурной схемы с точки зрения ТАУ можно заключить, что система является устойчивой, но при технической реализации следует учитывать ограничения, налагаемые математической моделью, при котором каждому значению тока фокусировки соответствует

единственное значение конечной функции. Метод позволяет осуществлять регулирование тока фокусировки поддержанием значения результата синхронного детектирования b_1 на постоянном уровне, соответствующем определенной величине удельной мощности электронного луча. При этом возможно как поддержание нулевого значения отклонения тока фокусировки от острой, так и ненулевого отклонения в некотором диапазоне. Диапазон устойчивой работы системы в общем случае ограничен начальной величиной отклонения тока фокусировки от острого значения. Величина этого отклонения не должна выходить за пределы области монотонного изменения сигнала b_1 . Для электронно-лучевых пушек конструкции ИЭС им. Е. Патона этот диапазон составляет $\Delta I_f \in (-15,15)$ мА.

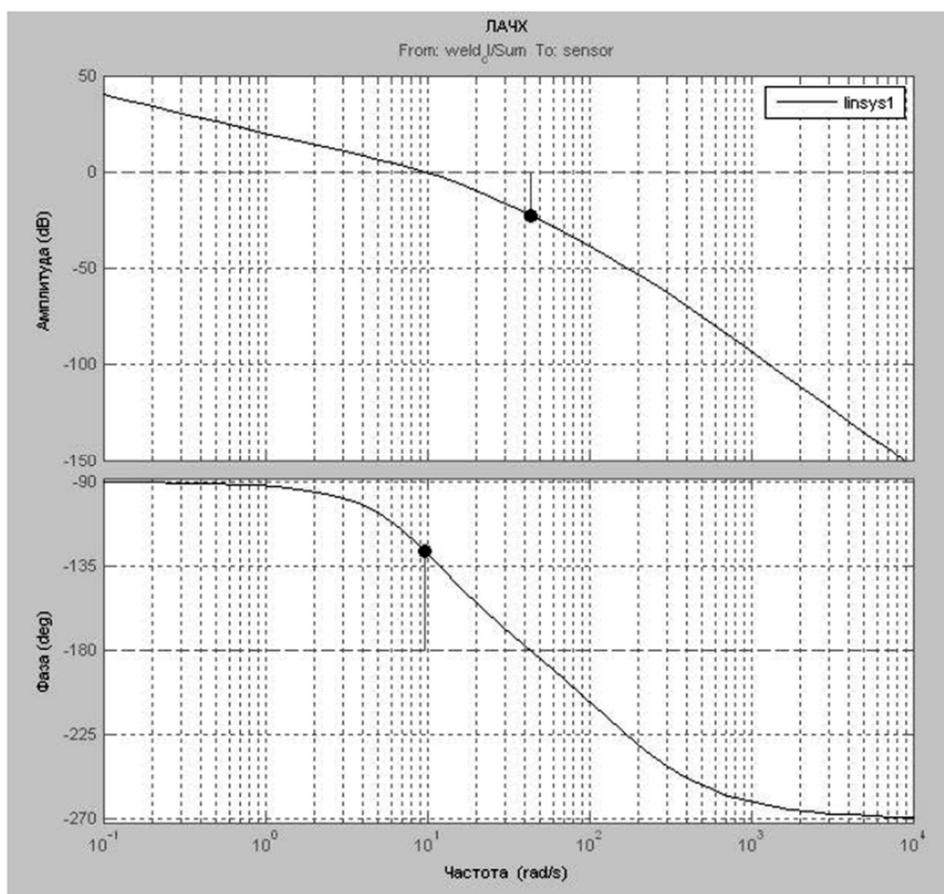


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика системы управления фокусировкой

Для решения задачи поиска оптимальной точки фокусировки непосредственно во время процесса сварки предлагается использовать данную модель в составе системы ПИД-регулирования. Моделирование работы регулятора с помощью модуля Simulink пакета Matlab позволило оценить быстродействие системы: длительность переходного процесса при реакции на единичный ступенчатый сигнал составила 0,4 с. Натурные испытания подтвердили быстродействие системы, а

тонкая подстройка ПИД-регулятора позволила сократить длительность переходного процесса в 2 раза.

Для полученного контура управления составлена переходная функция, произведен анализ быстродействия, устойчивости. По результатам анализа можно заключить, что система является устойчивой, и ее быстродействие соответствует параметрам автоматизируемого технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бочаров А.Н.** Определение ширины плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению при электронно-лучевой сварке / А.Н. Бочаров, А.В. Мурыгин // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 4. С. 78-84.

2. **Беленький В.Я.** О природе вторичного тока в плазме, образующейся в зоне

взаимодействия электронного луча при сварке / В.Я. Беленький, В.М. Язовских, А.П. Журавлев // Физика и химия обработки материалов. 1983. № 6. С. 128-129.

3. **Ланкин Ю.Н.** Экспериментальное исследование эмиссии заряженных частиц и теплового излучения как параметров автоматического регулирования процесса электрон-

но-лучевой сварки / Ю.Н. Ланкин. Киев: ИЭС им. Патона АН УССР. 1982. 32 с.

4. **Зорин Ю.Н.** Выбор оптимального диапазона частоты модуляции тока луча при ЭЛС / Ю.Н. Зорин, А.П. Шахорин // Электронно-лучевая сварка. 1986. № 8. С. 28-33.

5. **Углов А.А.** Автоколебательные процессы при воздействии концентрированных потоков энергии / А.А. Углов, С.В. Селищев, С.И. Анисимов. М.: Наука, 1987. 132 с.

Мотасов Максим Игоревич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Давыдов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Алексеев Вадим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Maksim I. Motasov – Undergraduate, Institute of Energetics and Transportation Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Dmitry A. Davidov – PhD, Associate Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vadim S. Alekseev – PhD, Associate Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 27.02.17, принята к опубликованию 17.03.17

УДК 656.13

ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННАЯ ОСНОВА ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

С.А. Гусев

ENERGY DATABASE AS THE BASIS FOR INTELLIGENT LOGISTICS MANAGEMENT

S.A. Gusev

Рассмотрены вопросы развития теории и методологии логистической науки в направлении формирования энергоинформационной основы интеллектуального управления логистическими системами. Исследованы вопросы классификации и

The paper discusses the issues related with advances in the theory and methodology of logistics science towards developing the energy database for intelligent management of logistics systems. The article focuses on the classification and defining the level of logistics sys-

уровневой принадлежности логистических систем, в том числе с учетом ретроспективы моделей и методов, применяемых для оптимизации их функционирования. Обосновано использование оптимальных решений, баз знаний, направленных на сокращение циклов производства, исключения двойной работы, что позволяет повысить производительность и эффективность производства работ и услуг.

Ключевые слова: логистика, система, процесс, управление, интеллект, инструментарий, ресурс, обеспечение

«Будьте внимательны к своим мыслям, они начало поступков».
(Лао-Цзы)

Экономика в широком смысле определяется как совокупность производственных отношений, соответствующих данной ступени развития производительных сил общества, господствующий способ производства в обществе. В условиях рыночной экономики огромное внимание уделяется снижению затрат и повышению качества товаров, работ, услуг.

Для оптимизации процессов функционирования на предприятии, сохранения показателей качества услуг при снижении затрат эффективно используется логистика. Традиционное восприятие логистики связано с материальными потоками, обеспечивающими производственный процесс на предприятии. В дополнение рассматриваются процессы формирования и функционирования потоков информации, финансов, трудовые потоки.

Развитие теории и методологии логистической науки сопровождается исследованиями вопросов сервиса (сервисные потоки), права (правовые потоки), транспорта (транспортные потоки) [1, 2]. Достаточно подробно рассмотрена классификация и уровневая принадлежность логистических систем, в том числе с учетом ретроспективы моделей и методов, применяемых для оптимизации. Наиболее короткое и полное определение логистики – теория и практика

tems with account to a retrospective review of models and methods used to optimize their operation. The author demonstrates the need for optimal solutions and knowledge bases aimed at reducing production cycles, and eliminating the double-work which ensures an increase in productivity and efficiency of works and services.

Keywords: logistics system, process management, intelligence, tools, resource, security

управления материальными и связанными с ними информационными потоками.

В числе оригинальных точек зрения относительно вопросов развития терминологии логистики необходимо отметить работы проф. И.И. Сидорова, выделявшего потоки информации, генерируемые индивидом, обеспечивающие целенаправленное и упорядоченное движение информационного ресурса; информационные ресурсы, хранящиеся в памяти индивида или в искусственной информационной системе; энергетический ресурс (химическая энергия топлива различных видов, атомная энергия и т. д.), из которого производится тепловая, механическая, электрическая энергия, другие виды энергии; поток энергии собственных нужд, необходимый для возникновения и поддержания процесса превращения энергетических ресурсов в различные виды энергии; материальные ресурсы в виде сырья, материалов, комплектующих изделий, различного рода проводники, воздушная среда и т. д.; основные фонды.

Специфика данного подхода состоит в том, что передаваемый посредством соответствующей материальной среды и потока энергии информационный ресурс, чтобы стать информационным потоком, должен получить целенаправленное и упорядоченное воздействие информационного потока, генерируемого индивидом.

В искусственных системах ничто «само» не организуется без соответствующих затрат энергии и прежде всего интеллектуальной энергии человека. Если в естествен-

ных системах хаос или порядок определяется «поведением» энергии, то в искусственных системах хаос или порядок всецело определяется «поведением» информации, генерируемой индивидом (индивидами) [3, 4]. Направление вектора идей (замыслов), связано с практической реализацией на производстве товаров и услуг, в том числе обеспечивающих и поддерживающих его жизнедеятельность. Данный процесс предлагается назвать эмиссией (выпуском) идей.

Идея – это основная мысль, которая лежит в основании теоретической системы [5]. Безусловно, речь идет об идеализации представляемых процессов.

Формой выражения интеллектуальных потоков являются знания, формирующие интеллектуальные ресурсы общества. В связи с этим авторы, исследующие данный вопрос, выделяют основные задачи, сформулированные в концепции управления знаниями, такие как инновация, быстрота реагирования, производительность и компетенция.

Поиск и многократное использование оптимальных решений и других знаний, направленных на сокращение циклов производства, исключение двойной работы, позволяют повысить производительность.

Важными факторами управления знаниями являются документирование, каталогизация и распространение корпоративных информационных ресурсов.

При этом компетенция и инновация относятся в основном к области создания знаний, а производительность и восприимчивость относятся к области использования имеющихся знаний.

Согласно мнению д.э.н., проф. А.И. Таркина, отраженному в работе «Интеллектуальный ресурс общества: сущность, классификация и роль в социально-экономическом развитии», сущность интеллектуального ресурса заключается в следующем:

1. Интеллектуальный ресурс остается наименее исследованной и ограниченно используемой в российской практике возможностью существенного улучшения си-

туации в социально-экономическом и общественно-политическом развитии.

2. Интеллектуальный ресурс в отличие от природного (минерально-сырьевого) и человеческого считается ресурсом воспроизводимым и постоянно увеличивающимся.

3. Интеллектуальный ресурс при его разумном использовании является наиболее эффективным ресурсом, способным выступать «эффективной добавкой» и для человеческого, и природного ресурса.

3.1. Интеллектуальный ресурс в отличие от других ресурсов обладает универсальными свойствами повышать эффективность всех ресурсов и на всех стадиях воспроизводственного цикла.

3.2. Интеллектуальный ресурс является источником не только социально-экономического, но и всего общественно-политического и мирового развития (интеллектуальный ресурс обладает универсальным свойством быть импульсом развития национальных, внутринациональных и мировых систем).

Рассматривая логистические технологии, мы обособленно исследуем процессы в логистических системах, однако современные тенденции в их организации связаны с комплексным восприятием проблемы доставки товара от поставщика к потребителю. Одними из важных и значимых факторов в исследовании логистики являются цена на товар, конкурентные механизмы и условия ее формирования. Цена есть денежное выражение стоимости товара. Логистика затрагивает практически все сферы жизнедеятельности, и поэтому вопросы организации и эффективного функционирования данных систем имеют решающее значение в формировании конкурентных преимуществ товара на рынке. Изменением величины цены можно измерять, управлять, стимулировать и перераспределять вновь созданную стоимость, а также регулировать экономические процессы. В основе цены в соответствии с постулатами известных теорий ценообразования лежат издержки производства и количество общественно необходимых затрат. При рассмотрении данного вопроса

необходимо учитывать вопросы ценообразования, такие ценовые явления, как инфляция, факторы, влияющие на уровень

цены, например измерение эффективности инвестиций и инноваций, управление экономическими структурами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лукинский В.С.** Логистика и управление цепями поставок / В.С. Лукинский, В.В. Лукинский, Н.Г. Плетнева. М.: Юрайт, 2016. 359 с.

2. **Щербаков В.В.** Автоматизация бизнес-процессов в логистике / В.В. Щербаков, А.В. Мерзляк, Е.О. Коскур-Оглы. СПб.: Питер, 2016. 464 с.

3. Логистическая концепция управления предприятием / И.И. Сидоров и др. СПб.:

С.-Петербург. институт внешнеэкон. связей, экономики и права, 2001. 163 с.

4. **Кудрявцева Е.И.** Когнитивная экономика и когнитивный менеджмент: новая концепция управления человеческими ресурсами / Е.И. Кудрявцева // Управленческое консультирование. 2014. № 4 (64). С. 62-69.

5. Режим доступа: <http://elhow.ru/ucbeba/opredelenija/ij/chto-takoe-ideja> (дата обращения 08.12.2016).

Гусев Сергей Александрович – доктор экономических наук, профессор кафедры «Организация перевозок и управление на транспорте» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey A. Gusev – Dr. Sc., Professor, Department of Logistics and Transport Management, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 14.02.17, принята к опубликованию 17.03.17



ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621. 372. 853: 621.365

**СВЧ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ
ПЛОСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ****Ю.С. Архангельский, И.А. Менщиков****MICROWAVE CONTROL AND MEASUREMENT CHARACTERISTICS
OF PLANAR DIELECTRICS****Yu.S. Arhangel'sky, G.I.A. Menshikov**

Показана возможность использования СВЧ электромагнитных колебаний для измерения и контроля таких параметров плоских диэлектриков, как их строение, толщина, диэлектрические параметры ε' и $\operatorname{tg} \delta$.

Ключевые слова: СВЧ электромагнитные колебания, измерение, контроль, параметры, плоский диэлектрик

В СВЧ электротехнологии рупорный излучатель обычно используется в камерах лучевого типа (КЛТ) СВЧ электротехнологических установок для передачи СВЧ мощности от генератора к обрабатываемому диэлектрику с обычно плоской поверхностью [1, 2]. Для повышения эффективности установки (КПД по использованию СВЧ энергии), защиты СВЧ генератора от отраженной от поверхности обрабатываемого диэлектрика электромагнитной волны в КЛТ используют согласующий четвертьволновый трансформатор, представляющий собой слой диэлектрика без потерь с рассчитываемыми относительной диэлектрической проницаемостью ε' , толщиной и расстоянием от него до поверхности обрабатываемого диэлектрика [2].

Однако коэффициент отражения Γ от обрабатываемого диэлектрика электромагнитной волны несет в себе информацию о структуре, толщине обрабатываемого объекта (толщинах слоев, если диэлектрик

The paper demonstrates a possibility for using the microwave electromagnetic oscillations used in measuring and control of the characteristics of planar dielectrics, including their structure, thickness, and the dielectric parameters ε' and $\operatorname{tg} \delta$.

Keywords: microwave electromagnetic oscillations, measurement, control, settings, flat dielectric

многослойный), диэлектрических параметрах этого диэлектрика (его слоев). Следовательно, измерение коэффициента отражения от диэлектрика

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{P_{OTR}}{P}}, \quad (1)$$

где P – мощность СВЧ генератора (обычно волноводная линия передачи, связывающая СВЧ генератора с рупорным излучателем, и рупорный измеритель со свободным воздушным пространством согласованы); P_{OTR} – СВЧ мощность, отраженная от поверхности обрабатываемого диэлектрика, можно использовать для контроля или измерения параметров обрабатываемого диэлектрика.

Структурная схема устройства для регистрации коэффициента отражения электромагнитной волны показана на рисунке.

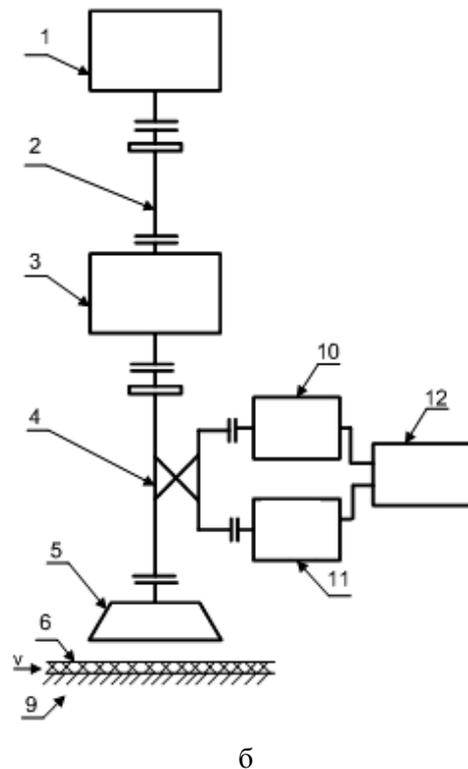
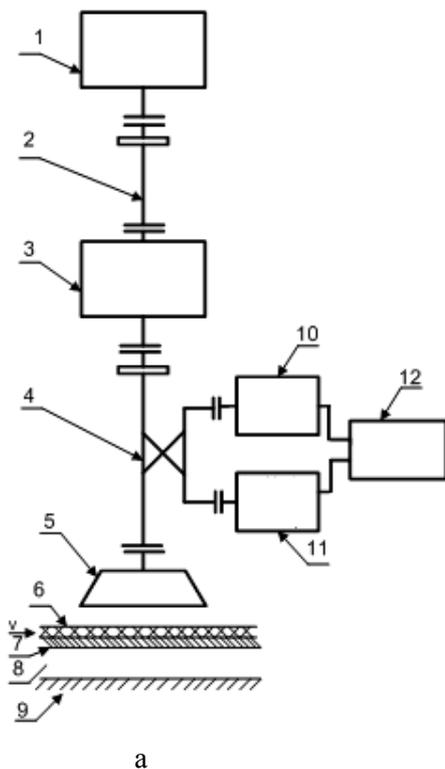
СВЧ энергия, генерируемая СВЧ генератором 1, передается через однородный волновод без потерь 2, ферритовый вентиль

ИЗМЕРЕНИЯ

3, рефлектометр 4, рупорный излучатель 5 и попадает на обрабатываемый диэлектрик 6, перемещающийся в технологической линии на конвейерной ленте 7 [3], на металлической пластине 9 (см. рисунок) или с помощью толкающего электропривода [4].

На границе раздела воздух – контролируемый диэлектрик возникают отраженная

электромагнитная волна и волна, прошедшая в диэлектрик. Проходя по диэлектрику, электромагнитная волна затухает, отражаясь от границ раздела, в том числе и от металлической стенки, что, в конце концов, формирует отраженную электромагнитную волну от поверхности диэлектрика 6.



Устройство для регистрации коэффициента отражения электромагнитной волны: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – прямоугольный однородный волновод; 3 – ферритовый вентиль; 4 – рефлектометр; 5 – рупорный излучатель; 6 – контролируемый диэлектрик; 7 – транспортная лента; 8 – воздушный слой; 9 – металлическая стенка; 10 – измеритель отраженной мощности; 11 – измеритель мощности СВЧ генератора; 12 – измерительный прибор

Эта волна улавливается рупорным излучателем 5, поступает в рефлектометр 4, с помощью которого измеряют мощность СВЧ генератора и мощность отраженной волны $P_{отр}$.

Если с помощью диэлектрика с заданными параметрами определить значение коэффициента отражения $|\Gamma_0|$, то при эксплуатации устройства, показанного на рис. 1, можно то контролировать соблюдение технологических требований к изготовленной продукции, оценивая отклонение реального $|\Gamma|$ от $|\Gamma_0|$, и принимать меры к соблюдению технологии изготовления.

С другой стороны, величину $|\Gamma_0|$ можно рассчитать. Сделать это можно с помощью теории цепей [5]. Так [2],

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_{ex} - Z_0}{Z_{ex} + Z_0} \right|,$$

где $Z_0 = 377$ Ом – волновое сопротивление воздуха; Z_{ex} – входное сопротивление последовательно соединенных цепей (слоев, рисунок а), причем

$$Z_{ex} = Z_0 \cdot \frac{Z_{ex,мл} + Z_{ог} \operatorname{th} \gamma_g l_g}{Z_{ог} + Z_{Омм} \operatorname{th} \gamma_g l_g}.$$

Здесь $Z_{og} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_{og}(1 - j \operatorname{tg} \delta_{og})}}$ – волно-

вое сопротивление контролируемого диэлектрика, ϵ'_{og} , $\operatorname{tg} \delta_{og}$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь контролируемого диэлектрика; l_g – толщина контролируемого диэлектрика; $\gamma_g = \alpha_g + j\beta_g$ – постоянная распространения электронной волны в контролируемом диэлектрике; α_g , β_g – коэффициент затухания и фазовая постоянная

$$\alpha_g = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{0,5\epsilon'_{og} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{og}} - 1 \right)},$$

$$\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{0,5\epsilon'_{og} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_{og}} + 1 \right)},$$

λ – длина волны генератора; $Z_{ex.ml}$ – входное сопротивление цепи диэлектрика по слоям, причем

$$Z_{ex.ml} = Z_{oml} \cdot \frac{Z_{ex.e} + jZ_{oml} \operatorname{tg} \beta_{ml} l_{ml}}{Z_{oml} + jZ_{ex.e} \operatorname{tg} \beta_{ml} l_{ml}}.$$

Однако транспортная лента сделана из диэлектрика без диэлектрических потерь,

поэтому $Z_{oml} = \frac{377}{\sqrt{\epsilon'_{ml}}}$ – волновое сопро-

тивление транспортной ленты; ϵ'_{ml} – относительная диэлектрическая проницаемость материала транспортной ленты;

$\beta_{ml} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'_{ml}}$; l_{ml} – фазовая постоянная

постоянной распространения электромагнитной волны в транспортной ленте и ее толщина; $Z_{ex.e}$ – входное сопротивление отрезка длиной линии, представляющей собой слой воздуха толщиной l_e ,

$$Z_{ex.e} = jZ_{og} \operatorname{tg} \beta_g l_g,$$

где $\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная постоян-

ной распространения электромагнитной волны в воздухе.

Таким образом, при известных l_e , l_{ml} , ϵ'_{ml} , λ соотношение (1) определяет зависимость измеренного с помощью рефлектометра значения $|\Gamma|$ от l_g , ϵ'_g , $\operatorname{tg} \delta_g$.

$$|\Gamma| = f(\epsilon'_g, \operatorname{tg} \delta, \lambda).$$

Для нахождения параметров контролируемого диэлектрика нужно провести три измерения, изменяя, например, частоту источника СВЧ энергии. ϵ'_g , $\operatorname{tg} \delta$, строго говоря, зависят от частоты, но в пределах рабочей полосы частот прямоугольного волновода 2 эти различия малы, ими можно пренебречь. В этом случае источник СВЧ энергии должен быть с изменяемым по частоте СВЧ генератором.

Можно провести измерения на одной частоте, но тогда надо поочередно размещать между рупорным излучателем и контролируемым диэлектриком дополнительно слои диэлектриков с известной толщиной и диэлектрическими параметрами, учтя, разумеется, этот слой в выражении для расчета $Z_{ex.e}$ в соотношении (1).

Если же речь идет о контролируемом диэлектрике, лежащем на металлической стенке (рисунок б), то в этом случае в соотношении (1)

$$Z_{ex} = Z_{og} \operatorname{th} \gamma_g l_g,$$

и нахождение параметров контролируемого диэлектрика проводим так же, как это описано выше.

Подобным образом можно контролировать и измерять параметры плоского твердого, жидкого, сыпучего диэлектрика, в том числе и в таре, но в этом случае в выражении для $Z_{ex.e}$ нужно учитывать параметры материала, из которого произведено дно тары.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермические установки лучевого типа // Ю.С. Архангельский, С.В. Тригорлый. Саратов: СГТУ, 2000, 122 с.

2. **Архангельский Ю.С.** Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок / Ю.С. Архангельский, К.Н. Огурцов,

Е.М. Гришина. Саратов: Полиграфия Поволжья, 2011. 229 с.

3. **Архангельский Ю.С.** Толкательная СВЧ электротермические установки на базе камеры бегущей волны / Ю.С. Архангельский, В.О. Юдина // Вопросы электротехнологии. 2015. № 4 (9). С. 14-19.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Меншиков Игорь Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

4. **Архангельский Ю.С.** Применение теории цепей при синтезе рабочих камер СВЧ электротермических установок и математическом моделировании термообработки в СВЧ электромагнитном поле / Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2015. № 3 (8). С. 9-15.

Yuri S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor A. Menshikov – PhD, Associate Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 03.03.17, принята к опубликованию 17.03.17

УДК 620.197.5

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ АДАПТИВНОСТИ СРЕДСТВ
ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ ПОМЕХ**

А.А. Анашкин, Г.Г. Угаров

**WAYS FOR IMPROVING ADAPTABILITY PROPERTIES
OF POLARIZATION MEASUREMENT TOOLS AFFECTED
BY RANDOM NOISE**

A.A. Anashkin, G.G. Ugarov

Описан способ измерения поляризационного потенциала, при реализации которого в процессе выполнения каждого измерения осуществляется автоматическая подстройка временных параметров цикла измерения под конкретные амплитудные и частотные параметры наведённой на защищаемое сооружение помехи от посторонних источников переменного тока. Измерение потенциала осуществляется в

The paper describes a way to measure the polarization potential, which in the process of implementation of each measurement procedure provides automatic adjustment of time parameters of a measurement cycle to the specific amplitude and frequency settings induced noise on protected construction from AC sources. The potential measurements are carried out within the time interval when the current value of the noise is minimum. The pro-

тот промежуток времени, когда текущее значение помехи находится в области минимальных значений. Приведены осциллограммы потенциала реального трубопровода, модулированного сигналом помехи, находящегося в зоне действия блуждающих токов. Приведена функциональная схема измерительного средства и эпюры напряжений, поясняющие его работу. Приведена схема алгоритма реализации изложенного в статье способа.

Ключевые слова: поляризационный потенциал, вспомогательный электрод, электрод сравнения, цикл измерения потенциала, фаза задержки измерения, фаза измерения, длительность цикла измерения потенциала, длительность фазы поляризации, длительность фазы измерения, ключ поляризации, накопитель энергии

Одним из основных критериев эффективности защиты подземного металлического сооружения от электрохимической коррозии является отклонение фактически измеренного значения поляризационного потенциала (ПП) защищаемого сооружения (ЗС) от его нормативного значения. Метод измерения ПП подробно описан во многих информационных источниках, например: [1-3] и используется в серийных приборах для измерения параметров электрохимической защиты сооружений, например в приборах: «ПКИ-02», «Орион ИП-01», «ИПП-01 Менделеевец», «Мультиметр 43313», а также применяется в серийных станциях для катодной защиты с автоматическим управлением, например: «ПКЗ-АР», «СКЗ-ИП», «МПН-ОПЕ-М14», «НГК-ИПКЗ-Евро».

Суть метода измерения ПП заключается в контроле разности потенциалов между вспомогательным электродом (ВЭ) и электродом сравнения (ЭС) после последовательного выполнения определенных манипуляций, составляющих цикл измерения потенциала (ЦИП), а именно: соединение ВЭ и ЗС на время, именуемое фазой поляризации (ФП), с целью выравнивания их

vided oscillograms demonstrate real-time capacity of a pipeline, with modulation of the interference signal in the zone of wandering currents. The functional diagram presents the measurement tools and stress distributions. The diagram with the algorithm is used in implementation of the presented method.

Keywords: *polarizing potential, auxiliary electrode, reference electrode, the measurement cycle capacity, phase delay measurement, measurement phase, duration of the measurement cycle capacity, phase duration, phase delay measurement, key measurement, energy storage*

потенциалов; отключение ВЭ от ЗС на время, именуемое фазой задержки измерения (ФЗИ), с целью исключения омической составляющей из результата измерения; подключение ВЭ на время, именуемое фазой измерения (ФИ), к накопителю энергии (НЭ) с целью считывания остаточного потенциала ВЭ с последующим его сохранением в памяти процессора измерительного средства. Фаза поляризации, фаза задержки измерения и фаза измерения составляют цикл измерения потенциала. На рис. 1 приведена функциональная схема измерителя ПП, а на рис. 2 – эпюры напряжений, поясняющие его работу.

В настоящее время в практике эксплуатации подземных сооружений, в том числе в большинстве серийных приборов «ПКИ-02», «Орион ИП-01», «ИПП-01 Менделеевец», приняты следующие значения временных параметров ЦИП: длительность цикла измерения потенциала (ДЦИП) 20 мс; длительность фазы поляризации (ДФП) 15 мс; длительность задержки измерения (ДЗИ) 0,2 мс, 0,4 мс, 0,8 мс, 1,6 мс; длительность фазы измерения (ДФИ) в соответствии с длительностью задержки измерения: 4,8 мс, 4,6 мс, 4,2 мс, 3,4 мс.

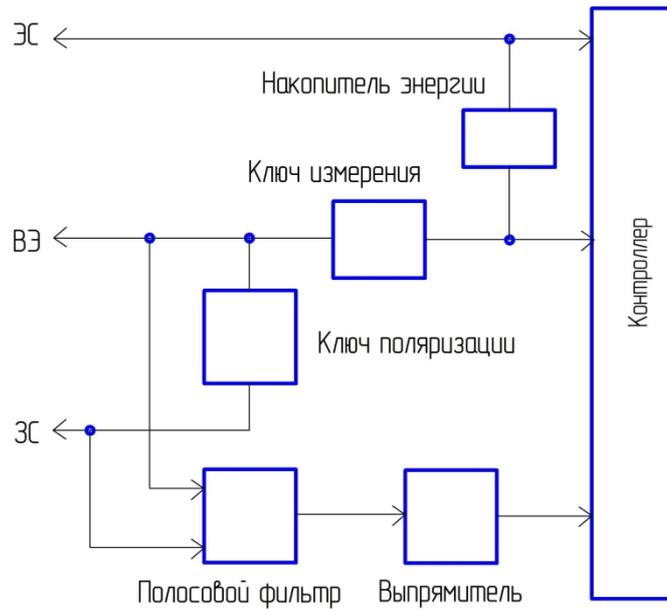


Рис. 1. Функциональная схема измерителя ПП

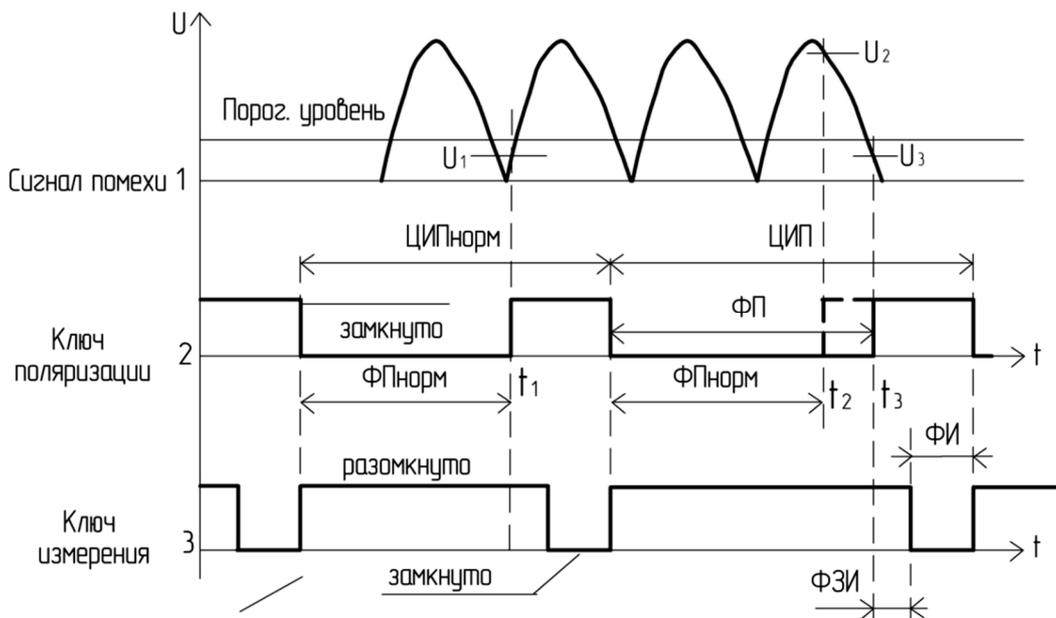


Рис. 2. Эпюры напряжений, поясняющие работу измерителя ПП

Однако данный метод измерения ПП имеет существенные ограничения при использовании в зоне действия блуждающих токов от электрифицированного транспорта на переменном токе, а также в зоне действия токов, индуцированных высоковольтными линиями электропередач. Это объясняется тем, что наложение на потенциал сооружения переменной составляющей сигнала, наведённого от внешнего источника тока, может исказить результат измерения как в большую, так и

в меньшую сторону. На рис. 3 приведена осциллограмма сигнала помехи потенциала трубопровода, расположенного в зоне действия блуждающих токов, представляющего собой периодический сигнал разной полярности формы, похожей на синусоиду. На этом же рисунке отображён синхроимпульс считывания потенциала с ВЭ в фазе измерения, представляющий собой последовательность прямоугольных импульсов положительной полярности.

Из рис. 3 следует, что синхроимпульсы считывания потенциала ВЭ с номерами 1, 3, 5 совпадают с максимумом положительной полуволны сигнала помехи, а синхроимпульсы считывания потенциала ВЭ с номерами 2, 4, 6 совпадают с максимумом отрицательной полуволны сигнала помехи. Очевидно, что результаты измерений потенциала, совпадающие с чётными номерами синхроимпульсов, будут существенно отличаться от результатов измерений потенциала, совпадающих с нечётными номерами синхроимпульсов, хотя собственное значение потенциала ЗС при всех измерениях осталось неизменным. И чем выше уровень помехи, тем более существенным будет разброс в результатах измерения. Безусловно, накопитель энергии, на который в фазе измерения переносится остаточный заряд ВЭ,

являясь фильтром нижних частот первого порядка, частично подавляет переменную составляющую сигнала помехи, считываемого с ВЭ, но его возможности ограничены уровнем помехи с амплитудой не более 5-6 В. В то же время в практике эксплуатации подземных сооружений уровень помехи с амплитудой 15-20 В – довольно распространённое явление.

Таким образом, метод измерения ПП в том виде, в котором он описан выше и применяется в серийных измерительных средствах, имеет существенное ограничение при его использовании в зоне действия блуждающих токов от электрифицированного транспорта на переменном токе, а также в зоне действия токов, индуцированных от высоковольтных линий электропередач.

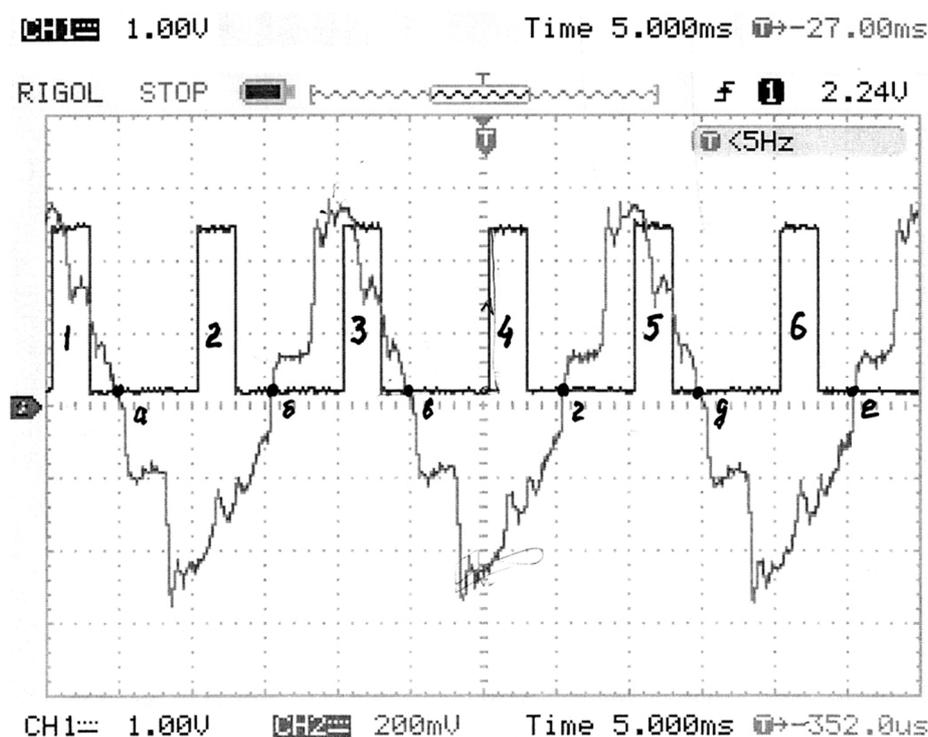


Рис. 3. Осциллограмма сигнала помехи, наведённой на потенциал ЗС

Существенное повышение помехоустойчивости описанного выше метода измерения ПП достигается синхронизацией фазы измерения с моментом перехода переменной составляющей сигнала помехи через своё нулевое значение (моменты времени, помеченные на рис. 3 маркерами «а», «б», «в», «г», «д», «е»).

Однако согласно описанному выше методу измерения ПП такая синхронизация не предполагается, как не предполагается и изменение временных параметров ЦИП в ходе единичного измерения. Не предусмотрено это и в серийных средствах измерения ПП, построенных на базе описанного выше метода измерения ПП. Например, для таких

временных параметров цикла измерения потенциала, как ДЦИП иДФП, регулировка в ходе эксплуатации после изготовления измерительного средства не предусмотрена, а для таких параметров, какДФЗИ – предусмотрена дискретная установка фазы задержки измерения вручную перед началом измерения. В любом случае в ходе единичного измерения изменение временных параметров ЦИП не обеспечивается ни одним серийным измерительным средством. Так как временные параметры цикла измерения потенциала при проведении измерений описанным выше методом не синхронизированы с сигналом помехи, разброс результатов измерений в зоне действия помех, наведённых посторонними источниками переменного тока, неизбежен.

Нами разработана и испытана в реальных условиях модификация описанного выше метода измеренияПП, позволяющая за счёт синхронизации фазы измерения с интервалом времени, в течение которого переменная составляющая сигнала помехи имеет минимальное значение, существенно повысить помехоустойчивость метода в зоне действия блуждающих токов. Достигнута устойчивость показаний средства измеренияПП на уровне помех с амплитудой до 20 В.

Согласно нашему варианту метода измеренияПП в измерительное средство введён канал измерения переменной составляющей сигнала помехи, осуществляющий выделение из общего сигнала, формируемого на ВЭ, переменной составляющей сигнала помехи заданного частотного диапазона (рис. 1, полосовой фильтр); преобразование сигнала помехи в пульсирующий однополярный сигнал (рис. 1, выпрямитель), измерение и сравнение выпрямленного сигнала помехи с заданным пороговым уровнем (рис. 1, встроенные средства контроллера).

Суть нашего варианта метода измеренияПП заключается в следующем. В памяти контроллера измерительного средства хранятся временные параметры нормированного ЦИП, которые используются, если текущее значение сигнала помехи не превышает хранящееся в памяти контроллера заданное пороговое значение уровня помехи.

С началом цикла измерения потенциала запускается таймер выполнения фазы поляризации нормированной длительности, на протяжении которой измеряются и сохраняются в памяти контроллера все колебания потенциала ВЭ, подключённого к ЗС. По окончании нормированной ФП осуществляется измерение текущего значения сигнала помехи и сравнение его с пороговым уровнем. Если уровень помехи ниже порогового, то ФП завершается, ВЭ отключается от ЗС, запускается таймер выполнения фазы задержки измерения, после окончания которой ВЭ подключается к накопителю энергии (НЭ) и запускается таймер выполнения фазы измерения. После завершения фазы измерения ВЭ отключается от НЭ и вновь подключается к ЗС. После этого начинается очередной ЦИП.

Приведённая выше последовательность действий отражена на рис. 2 в левой его части и соответствует нормированному циклу измерения потенциала, для которого в момент окончания ФП (момент времени t_1 , эпюра 2, рис. 2) текущее значение сигнала помехи меньше порогового уровня (эпюра 1, рис. 2 для момента времени t_1), поэтому длительность ФП заканчивается после достижения нормированного значения – Фпнорм (эпюра 2, рис. 2). Если же после завершения ФП нормированной длительности результат сравнения уровня помехи с пороговым уровнем показал, что сигнал помехи выше порогового уровня (момент времени t_2 , эпюра 1 и эпюра 2, рис. 2), то контроллер измерительного средства продлевает ФП, продолжая измерять уровень сигнала помехи и сравнивать его с пороговым значением. После уменьшения текущего значения сигнала помехи ниже порогового уровня (момент времени t_3 , эпюра 1 и эпюра 2, рис. 2) контроллер измерительного средства даёт команду на завершение фазы поляризации и отключения ВЭ от ЗС. Далее цикл измерения потенциала продолжается в последовательности, соответствующей нормированному циклу измерения потенциала. На рис. 4 приведена схема алгоритма работы измерительного средства в соответствии с авторской модификацией метода измеренияПП.

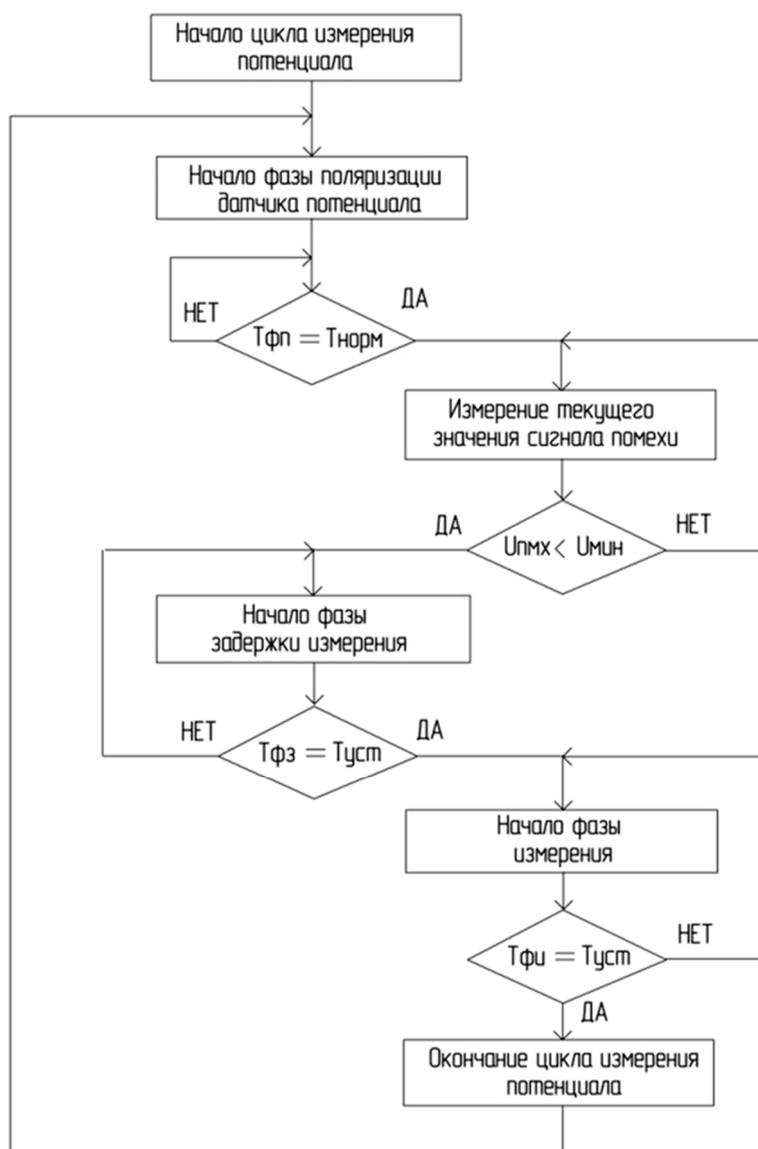


Рис. 4. Схема алгоритма работы измерительного средства

Итак, изложенный метод измерения ПП обладает повышенной помехоустойчивостью к сигналам, наведённым на защищаемое сооружение посторонними источниками переменного тока. Повышение помехоустойчивости обеспечивается тем, что операция считывания информации с датчика потенциала, в качестве которого используется ВЭ, осуществляется в промежутки времени, когда текущее значение сигнала

помехи находится в зоне своих минимальных значений. В свою очередь, возможность синхронизации фазы измерения потенциала и минимального значения сигнала помехи достигается алгоритмом автоматического изменения в процессе каждого измерения временных параметров ЦИП, адаптированного к хаотично изменяющимся амплитудным и частотным параметрам сигнала помехи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Стрижевский И.В.** Защита подземных теплопроводов от коррозии / И.В. Стрижевский, М.А. Сурис. М.: Энергоатомиздат, 1983. 308 с.

2. ГОСТ ИСО 9.602-2005. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Введ. 2005-06-25. М.: Изд-во стандартов, 2006. Прил. Р

ИЗМЕРЕНИЯ

3. Устройство для измерения потенциалов подземных трубопроводов: Патент РФ № 2 229 704, МПК (2006.1) G01N27/00 / И.Г. Кулаков, А.И. Логвинов, А.А. Енин; заявитель и патентообладатель ООО «Завод газовой аппаратуры «НС». № 2002128305/282002128305/28. Заявл. 21.10.2002; опубл. 27.05.2004. Бюл. № 15.

4. ВРД 39-1.10-026-2001. Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов. Введ. 2001-01-29. М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2001.

5. Способ измерения потенциала подземного сооружения и устройство для его

осуществления: Патент РФ № 2 421 737, МПК (2006.1) G01R19/00 / М.А. Юдаков, А.А. Анашкин, В.В. Чулючкин, Т.Р. Дянов; заявитель и патентообладатель г. Саратов, ООО «Центр инновационных технологий-ЭС». № 2010106940/28. Заявл. 24.02.2010; опубл. 20.06.2011. Бюл. № 17.

6. Устройство для измерения потенциалов подземного сооружения: Патент РФ № 2 513 666, МПК (2006.1) G01R19/00 / А.А. Анашкин, В.В. Чулючкин; заявитель и патентообладатель г. Саратов, А.А. Анашкин. № 2012121997/28. Заявл. 28.05.2012; опубл. 20.04.2014. Бюл. № 11.

Анашкин Анатолий Александрович – инженер Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anatoly A. Anashin – Engineer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Gennady G. Ugarov – Dr.Sc., Professor, Department of Electricity Supply to Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 27.02.17, принята к опубликованию 17.03.17



СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

УДК 621.365

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В ВЫСШЕМ УЧЕБНОМ ЗАВЕДЕНИИ

Ю.С. Архангельский

CONTINUING EDUCATION PROGRAMS AT HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Yu.S. Arkhangelsky

Рассматриваются задачи дополнительного образования в высшем учебном заведении и пути их решения.

Ключевые слова: дополнительное обучение, высшее учебное заведение, бакалавр, специалист, инженер, образование, предприятие, трудоустройство

Отмена в высших учебных заведениях распределения на работу выпускников дала молодым специалистам свободу выбора в решении вопроса трудоустройства. Переход высшей школы от подготовки специалистов (инженеров) с пятилетним обучением к подготовке бакалавров с четырехлетним обучением по более широким направлениям, чем специальности подготовки инженеров, существенно облегчил выпускникам вузов поиск места работы, а введение государственных образовательных стандартов гарантировало получение определенного объема знаний по выбранному направлению, профилю [1].

Однако составление учебных планов подготовки бакалавров и специалистов (инженеров) дает основание говорить о существенном снижении уровня профессиональной подготовки ядра, скажем, электротехнического социума при естественном замещении опытных инженеров-электриков бакалаврами, что весьма опасно, учитывая распространение электротехнических процессов и систем в нашей жизни [2].

The paper considers the issues relating continuing education programs at institutions of higher learning, and ways to solve these problems.

Keywords: continuing education, higher education institution, bachelor, engineer, education, enterprise, employment

Так, составление учебных планов подготовки специалистов в СГТУ имени Гагарина Ю.А. по специальности 140605 (180500) «Электротехнологические установки и системы» с учебными планами подготовки бакалавров по направлению 1400400.062 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электротехнологические установки и системы» показало, что, на наш взгляд, подготовка бакалавра весьма уступает подготовке специалиста (инженера):

– время учебной и другой практики при подготовке бакалавра меньше, чем при подготовке специалиста (инженера), на 34,5 %, тогда как 72,4 % опрошенных студентов-энергетиков считают, что им не хватает практических навыков;

– студенты бакалавриата выполняют на 38,1 % меньше курсовых проектов и работ;

– в цикле математических и естественно-научных дисциплин учебных планов подготовки бакалавров существенно меньше часов, чем в учебных планах подготовки специалистов (инженеров), по математике

на 43,75 %, по химии на 28 %, по информатике на 16 %;

– четыре дисциплины специализации с объемом аудиторных занятий 289 часов, двумя курсовыми проектами и курсовой работой в учебном плане подготовки специалистов-электротехнологов заменены в учебном плане подготовки электротехнологов-бакалавров на два курса по выбору с объемом аудиторных занятий 135 часов без курсовых проектов и с двумя курсовыми работами, что на 53% меньше.

Да, в учебном плане подготовки бакалавров время, выделенное на самостоятельную работу студентов, по сравнению с учебным планом подготовки специалистов (инженеров) больше на 20,4%, но опрос студентов-электриков показал, что 20,4% из них самостоятельной работе не уделяют должного внимания.

В работе [2] названы пути повышения уровня подготовки бакалавров:

- существенная переработка учебно-методического обеспечения;
- глубокая модернизация имеющейся и разработка новой лабораторной базы;
- мотивация преподавателей на выполнение большой дополнительной работы;
- расширение и активизация вузовской структуры (системы) дополнительного образования.

За три года, прошедших с времени публикации работы [2], произошли положительные сдвиги в решении проблемы объема профессиональных знаний и навыков бакалавров. Так, в СГТУ:

– проведено объединение кафедр «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» и «Электроснабжение промышленных предприятий» в единую кафедру «Электроснабжение и электротехнология», что существенно повышает учебный и научный потенциал кафедры в подготовке студентов по направлению «Электроэнергетика и электротехника»;

– проведена существенная переработка учебных планов новой кафедры, учитывающая указанные выше недостатки в подготовке бакалавров по циклу профессиональных дисциплин;

– проведена ревизия состояния лабораторной базы кафедры, давшая возможность спланировать модернизацию и создание новых учебных лабораторий;

– государство повысило заработную плату ППС.

И главное – предприятия (работодатели) почувствовали необходимость повышения профессиональной подготовки работающих у них бакалавров. К тому же приходят и бакалавры, получившие опыт профессиональной конкуренции с коллегами, получившими высшее образование в прежние годы. В свою очередь, понимают остроту проблемы и в высшей школе. Вузы активизируют работу своих структур дополнительного образования, ставят перед ними новые задачи.

Системы дополнительного образования существовали в вузах и во времена подготовки специалистов (инженеров). В те годы их задачей было повышение квалификации инженерных кадров по заказу предприятия в связи с новыми техническими задачами, производством новой продукции, освоением нового технологического оборудования и т.п. Содержание дополнительного образования, его объем и длительность обучения согласовывались с предприятием-заказчиком. Индивидуальных занятий практически не проводилось.

В нынешних условиях перед вузовской системой дополнительного образования стоит более сложная общественно значимая задача обеспечить уровень профессиональной подготовки сотрудников предприятий, отвечающий современному, все возрастающему уровню производства. Решение этой задачи требует организационного совершенствования работы этих систем, расширения сферы их деятельности, вовлечения в работу ППС в первую очередь выпускающих кафедр.

Для организации и реализации дополнительного образования в вузе, на наш взгляд, нужно:

– разработать нормативную базу дополнительного образования, определяющую его цели и задачи, вид обучения (очное, вечернее, заочное, дистанционное), форму обучения (индивидуальная, малая группа, группа, поток), порядок определения со-

держания, объема и продолжительности обучения, порядок зачисления, отчисления, аттестации, форму и содержание документа о полученном дополнительном образовании, порядок оплаты образовательных услуг вузу, порядок привлечения к работе в системе дополнительного образования ППС (добровольная, обязательная работа), оплату работы ППС и др.;

– разработать учебно-методическую документацию предлагаемых вузом учебных программ, порядок согласования их с предприятиями-заказчиками дополнительного образования;

– объективно оценить возможность использования имеющейся лабораторной базы, аудиторного фонда в учебном процессе в рамках дополнительного образования, оснастить кафедры и межкафедральные лаборатории новым необходимым оборудованием;

– учесть увеличение учебной нагрузки ППС при их участии в дополнительном образовании при составлении штатного расписания на перспективу;

– если в вузе используется рейтинговая система оценки работы ППС, следует поощрять работу преподавателей в системе дополнительного образования дополнительными баллами;

– разъяснить ППС вуза задачи дополнительного оборудования, его возросшую роль, порядок и условия привлечения ППС к этой форме учебной работы;

– объяснить студентам бакалавриата возможность, необходимость и условия получения дополнительного образования;

– рекламировать систему дополнительного образования в вузе в средствах массовой информации, в молодежных программах местного телевидения.

В начале кампании по расширению (распространению) дополнительного образования необходимо совещание (круглый стол), где руководители вуза и предприятий, пополняющих штат своих сотрудников выпускниками данного вуза смогут согласовать свои позиции в вопросе о целесообразности и объеме дополнительного образования. Подобные мероприятия полезно провести институтам (факультетам) вуза, на которых могли бы быть обсуждены запросы на дополнительное образование по соответствующим направлениям образования. Сотрудничество с конкретными предприятиями в рамках профиля направления с представителями предприятий могут провести заведующие выпускающими кафедрами. Ориентация в этой работе на переговоры преподавателей с представителями предприятий вряд ли принесет ожидаемые результаты, так как большинство преподавателей в процессе своей учебной и научной работы общаются с сотрудниками предприятий, не имеющими отношения к проблеме повышения квалификации кадров.

Наиболее сложным, трудоемким и затратным в развитии дополнительного образования в высших учебных заведениях, безусловно, является создание необходимой и достаточной лабораторной базы дополнительного образования. Задача еще больше обостряется, если вуз планирует, кроме дополнительного образования бакалавров, вести подобные занятия с имеющими среднее профессиональное образование. В этом случае надо иметь в виду, что преподаватели вуза не могут передать обучающимся дополнительные практические навыки. Для этого вузу придется принять в штат мастеров производственного обучения и создать в вузе специальную лабораторно-практическую базу.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кириянова Т.А.** Студенты-электрики об учебном процессе на примере энергетического факультета СГТУ имени Гагарина Ю.А. / Т.А. Кириянова, Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электро-технологии. 2015. № 1 (6). С. 115-119.

2. **Архангельский Ю.С.** Подготовка научно-технических кадров для электро-технического социума / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вопросы электро-технологии. 2014. № 1 (2). С. 113-116.

Архангельский Юрий Сергеевич – заслуженный деятель наук РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехнология» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelsky – Honoured Worker of Science of the Russian Federation, Dr.Sc., Professor, Department of Electricity Supply and Electrotechnics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 02.03.17, принята к опубликованию 17.03.17



ЛЕТОПИСЬ

ЮРИЙ МИЧИСЛАВОВИЧ ГОЛЕМБИОВСКИЙ



Юрий Мичиславович Голембиовский – доктор технических наук, профессор кафедры «Системотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. Родился в 1937 г, окончил в 1959 г. Саратовский автодорожный институт, преобразованный в 1960 г. в политехнический институт, продолжив свое образование на факультете электронной техники и приборостроения СПИ по специальности «Автоматика и телемеханика».

Юрий Мичиславович начал трудовую деятельность в 1959 г. в должности инженера. С 1963 г. работает в СГТУ (до 1992 г. – Саратовский политехнический институт) сначала в должности старшего инженера, затем старшего научного сотрудника научно-производственной лаборатории кафедры «Автоматика и телемеханика».

В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию в Новосибирском электротехническом институте. С 1973 г. начал работать на кафедре «Автоматизированные системы управления» (сейчас – «Системотехника») в должности старшего преподавателя, а с 1974 г. – в должности доцента и заместителя заведующего кафедрой.

В 2001 г. защитил докторскую диссертацию на тему: «Топологический синтез автономных инверторов и систем для централизованного электроснабжения» в Нижегородском государственном техническом университете. В 2002 г. был избран на должность профессора кафедры «Системотехника».

Голембиовский Ю.М. много лет является заведующим научно-производственной

лабораторией энергетической электроники, состоит членом двух диссертационных советов Д 212.242.10 при Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. и Д 212.165.02 при Нижегородском государственном техническом университете имени Р.Е. Алексеева.

Работая заместителем заведующего кафедрой, Голембиовский Ю.М. внес большой вклад в становление и развитие кафедры «Системотехника». Его человеческие качества позволили создать на кафедре атмосферу доброжелательности и ответственного отношения к учебному процессу и научной работе. Высокая требовательность к себе служит примером для коллег и студентов. Особо хочется отметить его отеческое отношение к аспирантам, подавляющее большинство которых стали кандидатами наук. Он был научным консультантом по докторским диссертациям Митяшина Н.П. и Томашевского Ю.Б., ставших профессорами кафедры «Системотехника».

Голембиовский Ю.М. является ярким представителем Саратовской школы силовой электроники, созданной Кантером И.И.

В 60-х годах прошлого столетия, когда Юрий Мичиславович начинал свою научную деятельность, преобразовательная техника была достаточно консервативной дисциплиной, в которой основным методом исследования был так называемый метод основной гармоника, не требующий большого вычислительного ресурса. Кандидатская диссертация Голембиовского Ю.М. отличалась от основного потока исследований как раз применением только-только появляющейся вычислительной техники как вычислительного инструментария и введением системного подхода в методологию исследований. В результате ему удалось всесторонне исследовать новую схему автономного инвертора, доказав на ее примере существование особого класса автономных инверторов, которые в течение нескольких десятилетий служили базовыми

схемами групповых преобразователей частоты, внедренных и эксплуатирующихся на ряде подшипниковых предприятий. Приверженность к системному подходу в исследованиях преобразователей частоты, к применению новых перспективных методов Голембиовский Ю.М. продемонстрировал в докторской диссертации. В ней он развил тензорную методологию исследований устройств силовой электроники, позволившую по-новому решать вопросы анализа и синтеза новых схем. В последние годы Голембиовский Ю.М. и его ученики стали пионерами в применении эволюционных методов синтеза схем автономных инверторов.

Поздравляем Юрия Мичиславовича с восьмидесятилетием! Желаем творческого долголетия и успехов в научной и учебной работе.

Коллектив кафедры «Системотехника» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

В начале 80-х по решению ректора по пути с кафедры «Электроника» факультета электронной техники и приборостроения на кафедру «Электроснабжение промышленных предприятий» и к созданию на энергетическом факультете Саратовского политехнического института кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» мне довелось два года заведовать недавно созданной кафедрой «Автоматизированные системы управления». Заместителем заведующего этой кафедрой в те годы работал к.т.н., доцент Ю.М. Голембиовский.

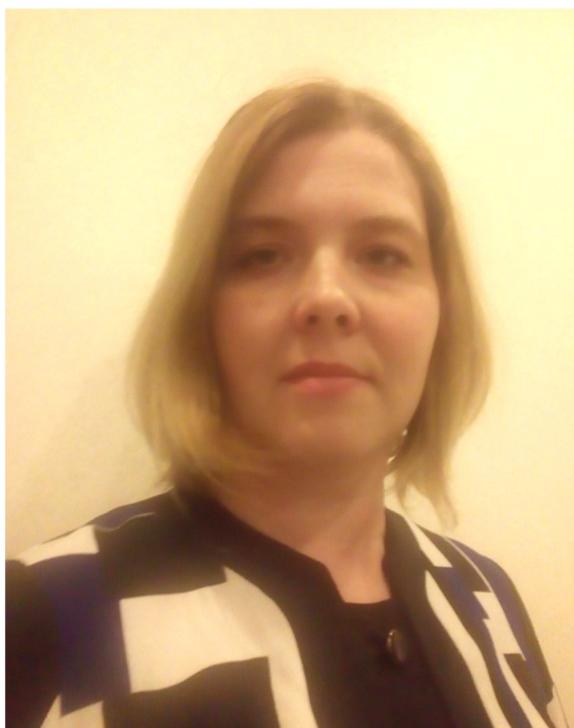
С тех пор прошло 35 лет, а я с большой теплотой вспоминаю годы совместной ра-

боты с Юрием Мичиславовичем. Восхищаюсь его профессионализмом, педагогическим мастерством, деликатностью, трудолюбием, чувством долга и ответственности. А научные достижения д.т.н., профессора Ю.М. Голембиовского в областях силовой электроники, систем управления, электроснабжения! А успехи его учеников, защитивших кандидатские и докторские диссертации!

От всей души, горячо и сердечно поздравляю Юрия Мичиславовича с восьмидесятилетием и желаю ему здоровья и успехов.

Профессор Архангельский Ю.С.

Екатерина Михайловна Гришина



Екатерина Михайловна Гришина – кандидат технических наук, доцент, окончила Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. по специальности «Электротехнологические установки и системы».

После окончания СГТУ имени Гагарина Ю.А. по кафедре «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Екатерина Михайловна поступила на эту кафедру в аспирантуру, в 2009 г. защитила кандидатскую диссертацию по специальности 05.09.10 – Электротехнология «Рабочие камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок для модификации диэлектриков», начала работать доцентом на кафедре АЭУ, получила ученое звание доцента.

Участвовала в организации издания журнала «Вопросы электротехнологии».

Екатерина Михайловна создала общую теорию СВЧ электротехнологических установок на базе камер лучевого типа для тепловой и нетепловой модификации диэлектрических объектов, столь разных по конструкции и технологическому процессу, получила патент на полезную модель гибридной рабочей камеры, в которой можно одновременно проводить как тепловую, так и нетепловую модификации двух разных диэлектриков, показала, как оценивать целесообразность проектирования в СВЧ электротехнологии в отсутствие альтернативных вариантов достижения технологического эффекта.

Результаты своих научных исследований Е.М. Гришина опубликовала в монографиях, написанных с соавторами, «СВЧ модификация полимеров» (2012 г.), «Электрофизические методы СВЧ обработки»

(2014 г.), а также в многочисленных статьях, в том числе 14 статей опубликованы в журнале «Вопросы электротехнологии». С начала издания нашего журнала в 2013 г. Екатерина Михайловна обеспечивала организацию и проведение рецензирования поступающих в журнал статей, рассылку изданных номеров и их архивирование.

Екатерина Михайловна была близка к завершению докторской диссертации о технико-экономическом и социальном аспектах электротехнологии, но в декабре 2016 г. решила перейти на работу на производстве и в январе 2017 года уволилась из СГТУ. В ноябре 2016 г. в СГТУ объединены кафедры ЭПП и АЭУ в одну кафедру «Электроснабжение и электротехнология» (ЭЛЭТ), появились новые задачи и перспективы... Почему уходят из высшей школы? Что не устраивает?

ЛЕТОПИСЬ

Заведующая кафедрой ЭЛЭТ, сообщая на заседании кафедры о решении Е.М. Гришиной, выразила надежду, что, получив опыт производственной работы, Екатерина Михайловна вернется в университет.

Редакция журнала «Вопросы электротехнологии» благодарит Екатерину Михайловну за сотрудничество и желает ей успехов на новом месте работы.

Главный редактор журнала
«Вопросы электротехнологии»
Архангельский Ю.С.



К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефонам:

8 (8452) 99-87-63 – Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

8 (937) 224-08-05 – Вырыханов Денис Александрович (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте eltech@sstu.ru.

Требования к оформлению публикаций

Печатный вариант публикации предоставляется объемом до 10 стр. формата А4; поля: сверху и снизу по 25 мм, справа и слева по 20 мм, через одинарный интервал, шрифт Times New Roman 12, абзацный отступ 0,63 см, формат файла *.doc, редактор Microsoft Word 2003.

Иллюстрации (рисунки, графики) выполняются в формате .jpg, располагаются в тексте статьи и должны иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

ОБЯЗАТЕЛЬНО наличие индекса УДК и списка использованных источников, оформленного по ГОСТ 7.1-2003 и включающего: фамилию и инициалы автора, название статьи, название журнала, том, год, номер или выпуск, страницы, а для книг – фамилии и инициалы авторов, точное название книги, место издания (город), издательство, год издания, количество страниц.

Также предоставляется информация об авторах (**ФИО полностью, почетные звания, ученая степень, ученое звание, должность, место работы, телефон, e-mail**), название статьи, аннотация и ключевые слова. Данная информация дублируется на **английском языке**.

Специалисты в технических и естественно-научных отраслях к публикации **ОБЯЗАТЕЛЬНО** прилагают экспертное заключение.

Публикации принимаются в течение всего года.

Публикации, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

За дополнительной информацией обращайтесь на сайт журнала «Вопросы электротехнологии» www.sstu.ru/nauka/nauchnye-izdaniya/voprosy-elektrotekhnologii

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка О.В. Пачина, Ю.Л. Жупилова
Перевод на английский язык А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 25.03.2017
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 19,25 Уч. изд. л. 9,3
Тираж 500 экз. Заказ 26 Цена свободная
Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
E-mail: izdat@sstu.ru
Полная электронная версия журнала размещена в системе РИНЦ
в открытом доступе на платформе eLIBRARY.RU
Подписной индекс 70841 (каталог «Газеты. Журналы» на 2-е полугодие 2016 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by O.V. Pachina, Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Print date: 25.03.2017
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 19,25 Publication base sheet 9,3
Circulation: 500 printed copies Order 26 Subscription and individual copies: open rates
Published by SSTU Publishing, 410054 Saratov, 77 Politekhnikeskaya Str.
Online at www.eLIBRARY.RU
The certificate of media source registration: *PI No. FS77-54621 dated 1 July 2013*