

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 3 (28)

Сентябрь 2020

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Журнал включён в перечень ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией
Минобрнауки России

Главный редактор

Зам. главного редактора

Ответственный секретарь

КАЛГАНОВА СВЕТЛАНА ГЕННАДЬЕВНА

БЕКРЕНЕВ НИКОЛАЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

ЮДИНА ВИОЛЕТТА ОЛЕГОВНА

Редакционная коллегия

С.Г. КАЛГАНОВА

д.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Н.В. БЕКРЕНЕВ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Ю.В. ГУЛЯЕВ

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН,
Москва

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

В.Б. ДЕМИДОВИЧ

д.т.н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

Л.С. ЗИМИН

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

В.Н. ЛЯСНИКОВ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

А.Н. МАКАРОВ

д.т.н., профессор, ТвГТУ, Тверь

Г.А. МОРОЗОВ

д.т.н., профессор, КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, 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, КТИ, Камышин

В.Н. ХМЕЛЕВ

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

В.А. ЦАРЕВ

д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

В.О. ЮДИНА

ассистент, СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013

Published Quarterly

№ 3 (28)

September 2020

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

The journal is included in the List peer-reviewed scientific publications, recommended for publication by the Higher Attestation Commission of the Ministry of education and science Russia

Editor-in-Chief:

Assistant to the Editor-in-Chief:

Chief Executive Officer

KALGANOVA SVETLANA GENNADIEVNA

BEKRENEV NIKOLAY VALERIEVICH

YUDINA VIOLETTA OLEGOVNA

Editorial Board Members

S.G. KALGANOVA

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

N.V. BEKRENEV

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

Yu.V. GULYAEV

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

Yu.S. ARKHANGELSKY

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

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

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, Kamishin

V.N. KHMELEV

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

V.A. TSAREV

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

V.O. YUDINA

Assistant, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Захаров В.В., Тригорлый С.В. Математическое моделирование СВЧ термообработки диэлектриков с учетом изменения их физических свойств 5

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Баринов Д.А., Коломейцев В.А., Ковряков П.В., Дрогайцева О.В. Возбуждение электромагнитного поля посредством одиночной щели, расположенной на верхней стенке прямоугольного резонатора, с диэлектрической пластиной на его нижней стенке 13

Сивяков Б.К., Григорьян С.В., Сивяков Д.Б. Сверхвысокочастотные многогенераторные технологические установки с бегущими волнами 21

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Попов Д.И. Разработка способа определения мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытаниях методом взаимной нагрузки 31

Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Разработка, создание и концепция развития силовых электромагнитных импульсных систем 38

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Злобина И.В. Твердость отвержденного углепластика с молниезащитным покрытием, модифицированного в СВЧ электромагнитном поле 46

Мулдашева Г.К. Влияние ультразвукового сверления на качество поверхности отверстий в конструкционном углепластике 54

К сведению авторов 59

CONTENTS

ELECTROTHERMY

Zakharov V.V., Trigorly S.V.
Mathematical modeling of dielectric heating with microwave energy regarding the changes in their physical properties..... 5

ELECTRODYNAMICS

Barinov D.A., Kolomeytsev V.A., Kovryakov P.V., Drogaytseva O.V.
Electromagnetic fields excitation over a single slot on the top wall of a rectangular resonator with a dielectric plate on the bottom wall in h-plane 13

Siviyakov B.K., Grigoryan S.V., Siviyakov D.B. Microwave multi-generator technological installations with traveling waves 21

ELECTROMECHANICS

Popov D.I. A method for determining power consumption in testing induction motors by the back-to-back methodology..... 31

Ugarov G.G., Moshkin V.I. Design and concept of the powered electromagnetic pulse systems..... 38

MATERIALS SCIENCE

Zlobina I.V. Hardness of the cured carbon fiber with a lightning-protective coating modified in the microwave electromagnetic field 46

Muldasheva G.K. Effect of ultrasonic drilling on the surface quality of holes in the structural carbon fiber 54

Information for Authors 59

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.365.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИКОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В.В. Захаров, С.В. Тригорлый

MATHEMATICAL MODELING OF DIELECTRIC HEATING WITH MICROWAVE ENERGY REGARDING THE CHANGES IN THEIR PHYSICAL PROPERTIES

V.V. Zakharov, S.V. Trigorly

Рассмотрены математические модели СВЧ нагрева, сушки и плавления диэлектриков с учетом изменения их физических свойств. Разработан общий алгоритм численного моделирования, основанный на использовании метода конечных элементов. Рассмотрены основные этапы математического моделирования СВЧ термообработки диэлектриков с применением программного обеспечения COMSOL Multiphysics.

Ключевые слова: математическое моделирование, СВЧ нагрев, сушка, плавление, диэлектрики, уравнения электродинамики и теплопереноса, блок-схема моделирования

Современные СВЧ установки применяются для сушки, плавления, размораживания, спекания диэлектриков, в которых имеют место процессы с фазовыми переходами, при этом изменяются физические свойства обрабатываемых материалов [1]. Изменение электро- и теплофизических свойств диэлектрика во время нагрева в зависимости от температуры особенно характерно для высокотемпературных процессов. К таким процессам, в частности, относится спекание керамики, при котором диапазон температур спекания может составлять 1000-2000°C.

The article considers mathematical models of dielectric heating, drying, and melting with microwave energy with account for the changes of their physical properties. A general algorithm for numerical modeling based on the use of the finite element method has been developed. The main stages of mathematical modeling of dielectric heating with microwave energy using the COMSOL Multiphysics software are considered.

Keywords: mathematical modeling, dielectric heating, drying, and melting with microwave energy, electrodynamics, and heat and mass transfer equations, simulation block diagram

Примеры температурных зависимостей диэлектрических свойств (относительной диэлектрической проницаемости ϵ'_r и коэффициента потерь ϵ''_r) некоторых материалов, используемых при высокотемпературной СВЧ термообработке, приведены на рис. 1 [2].

Для процессов сушки характерны теплоперенос, сопровождающийся изменением влагосодержания обрабатываемого объекта во время нагрева, фазовые переходы (при испарении влаги), что неизбежно приводит к изменению электро- и теплофизических свойств материала. При СВЧ

сушке диэлектрические потери обусловлены в основном влагосодержанием объекта сушки. Известно, что диэлектрические

свойства воды существенно изменяются в зависимости от ее температуры и частоты электромагнитного поля (рис. 2 [3]).

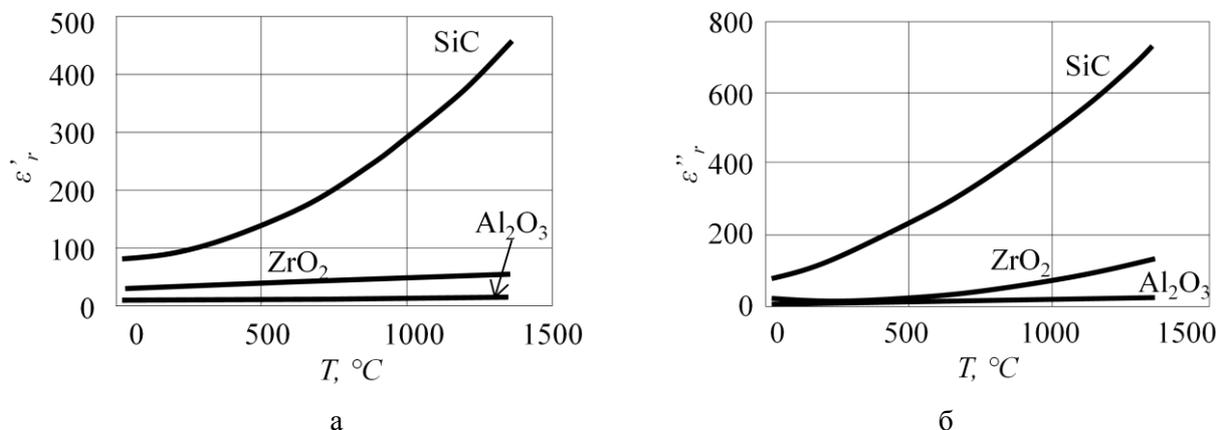


Рис. 1. Температурные зависимости относительной диэлектрической проницаемости (а) и коэффициента потерь (б) карбида кремния (SiC), оксида циркония (ZrO₂) и оксида алюминия (Al₂O₃)

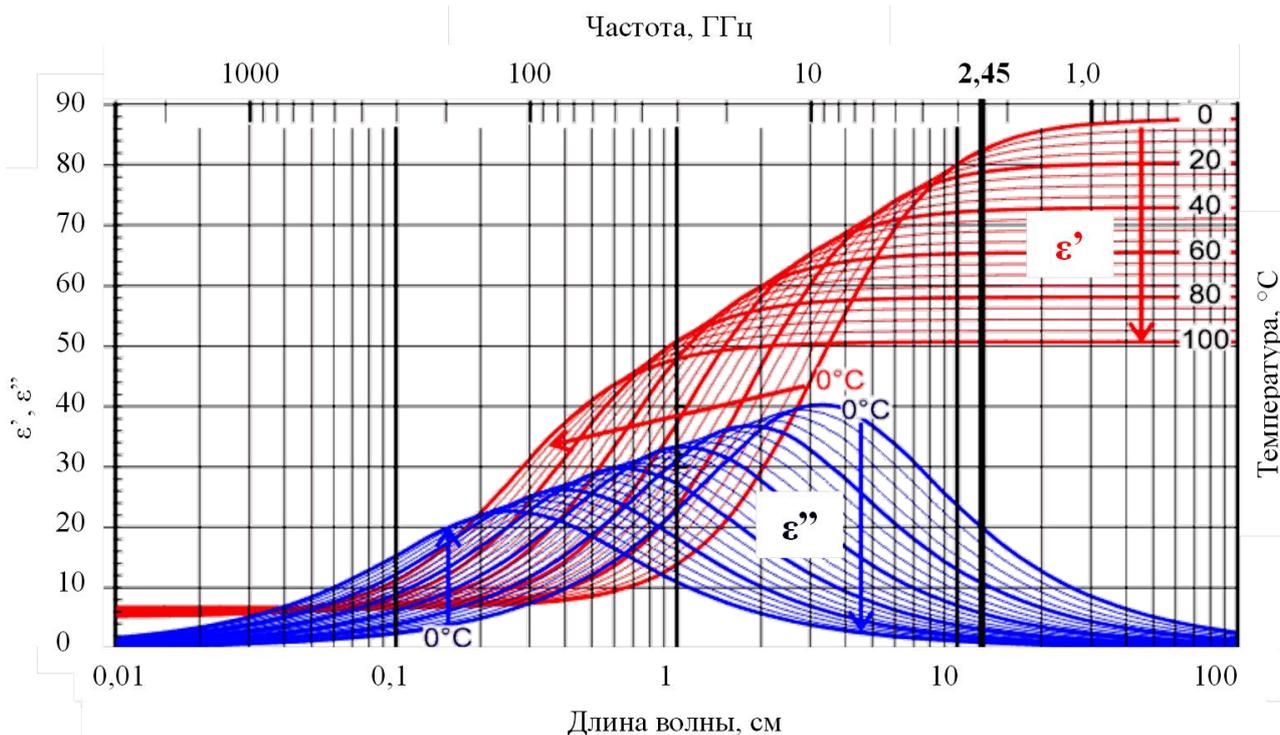


Рис. 2. Диэлектрические свойства воды

При СВЧ плавлении диэлектриков происходит скачкообразное изменение физических свойств при переходе из твердого состояния в жидкое.

Целью данной работы является разработка математических моделей взаимосвязанных процессов СВЧ термообработки диэлектриков (нагрева, сушки, плавления)

с учетом изменения их физических свойств применительно к промышленным СВЧ электротехнологическим установкам различного типа.

Рассмотрим математическую формулировку перечисленных выше задач. Математическое описание процессов СВЧ термообработки диэлектриков основано

на системе взаимосвязанных уравнений электродинамики и тепломассопереноса [1]. В зависимости от конкретных условий термообработки математическая модель может быть дополнена уравнениями термомеханики, гидродинамики, уравнениями, описывающими химические и биологические процессы и пр. [4], или упрощаться, например, преобразованием к системе уравнений электродинамики и теплопроводности (без учета массопереноса при моделировании нагрева предварительно высушенных объектов).

Электродинамическая часть моделей, как правило, неизменна и представляет собой систему уравнений Максвелла [1, 5], которая при рассмотрении волновых процессов преобразуется к системе волновых уравнений Гельмгольца [6]. При этом предполагается, что все поля (\mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{D} , \mathbf{B}) имеют гармоническую зависимость от времени с известной угловой частотой и что все свойства материалов расчетной области (областей) линейны относительно напряженности поля.

При моделировании ограничиваются уравнением Гельмгольца относительно вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} , поскольку остальные поля могут быть получены из поля \mathbf{E} по известным соотношениям (граничным условиям и материальным уравнениям), а также в связи с тем, что мощность внутренних источников теплоты, обусловленных диэлектрическими потерями, q_v , главным образом (помимо диэлектрических свойств и частоты) определяется распределением поля \mathbf{E} :

$$q_v = 0,5\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \cdot |\mathbf{E}|^2, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота электромагнитного поля; ε_0 – электрическая постоянная; ε_r'' – коэффициент потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости).

Соотношение (1) описывает эффект тепловыделения при диэлектрическом нагреве и используется для задания взаимосвязи тепловых и электродинамических процессов при моделировании. Примени-

тельно к высокотемпературным процессам возможно применение и других моделей тепловыделения при воздействии СВЧ энергии.

Уравнение Гельмгольца для вектора напряженности электрического поля и типовые граничные условия, характерные для описания процессов СВЧ термообработки диэлектриков, задаются в виде [7, 8]:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\varepsilon_r' - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0; \quad (2)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0; \quad (3)$$

$$[\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1, \mathbf{n}] = 0; [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0;$$

$$\mathbf{n}(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = 0; \mathbf{n}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0, \quad (4)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ – волновое число; ω – круговая частота; ε_0 – электрическая постоянная; μ_0 – магнитная постоянная; ε_r' – относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть); $\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r''$ – электрическая проводимость; ε_r'' – коэффициент потерь; \mathbf{H}_2 , \mathbf{H}_1 , \mathbf{E}_2 , \mathbf{E}_1 – векторы напряженности магнитного и электрического поля; \mathbf{D}_2 , \mathbf{D}_1 , \mathbf{B}_2 , \mathbf{B}_1 – векторы электрической и магнитной индукции для сред 2 и 1 соответственно; \mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности.

Рассмотрим постановку задачи моделирования процессов СВЧ нагрева диэлектриков. При моделировании процессов СВЧ нагрева, в которых процессами массопереноса можно пренебречь, к уравнениям электродинамики (2)-(4) добавляется уравнение нестационарной теплопроводности с граничными и начальными условиями в виде [9]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) = q_v; \quad (5)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h(T_{ext} - T_c); \quad (6)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon \sigma_r (T_{ext}^4 - T_r^4); \quad (7)$$

$$T_1 = T_2; \quad (8)$$

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_S = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_S; \quad (9)$$

$$T(0) = T_0, \quad (10)$$

где ρ – плотность; c_p – удельная теплоемкость; T – температура; τ – время; λ – коэффициент теплопроводности; q_v – мощность внутренних источников теплоты, обусловленная диэлектрическими потерями; h – коэффициент теплоотдачи с поверхности; T_{ext} – температура окружающей среды; T_c – температура поверхности конвективного теплообмена; ε – коэффициент излучения; σ_r – постоянная Стефана – Больцмана; \mathbf{q} – вектор плотности теплового потока; T_r – температура поверхности радиационного теплообмена; T_1, T_2 – температуры сопрягающихся поверхностей теплообмена областей 1 и 2; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности областей 1 и 2; \mathbf{n} – вектор нормали к поверхности раздела S ; T_0 – начальная температура объекта.

Граничное условие (6) характеризует конвективный теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона – Рихмана, а граничное условие (7) – радиационный теплообмен. Граничные условия (8) и (9) задаются на поверхностях сопряжения и представляют собой условие равенства температур и тепловых потоков на контактирующих поверхностях. Условие (10) задает начальную температуру процесса нагрева.

Рассмотрим постановку задачи моделирования процессов СВЧ нагрева диэлектриков с применением подвижных излучающих систем. Математическое описание данного процесса соответствует рассмотренному выше математическому описанию процесса СВЧ нагрева диэлектрика, при этом уравнение теплопроводности (5) записывается в виде

$$c_0 \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_0 \rho_0 \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = q_v, \quad (11)$$

где \mathbf{u} – вектор скорости перемещения области с диэлектриком относительно источника теплоты q_v .

Здесь использован принцип относительности движения, при котором диэлектрик перемещается относительно стационарных внутренних источников теплоты, подводимой излучателем.

Рассмотрим постановку задачи моделирования СВЧ плавления диэлектриков. В процессах СВЧ плавления имеет место подвижная фазовая граница (фронт плавления), причем из-за неравномерного поглощения энергии электромагнитных волн по объему диэлектрика таких границ может быть несколько. Математическое описание процесса СВЧ плавления диэлектрика соответствует математическому описанию процесса СВЧ нагрева диэлектрика (2)-(10), при этом на фазовой границе задаются граничные условия сопряжения в виде

$$\rho r (\mathbf{v} \times \mathbf{n}) = (\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2) \times \mathbf{n}; \quad (12)$$

$$T|_{pc} = T_{pc}, \quad (13)$$

где r – скрытая теплота плавления; \mathbf{v} – вектор скорости перемещения фазовой границы; $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2$ – векторы тепловых потоков к фазовой границе из жидкой (среда 1) и твердой (среда 2) фаз; T_{pc} – температура плавления.

Температура на границе фазового перехода принимается равной температуре плавления.

Рассмотрим постановку задачи моделирования мягкой СВЧ сушки диэлектриков. При моделировании процессов мягкой СВЧ сушки (при $T < 100^\circ\text{C}$) капиллярно-пористых тел к уравнениям электродинамики (2)-(4) добавляются уравнения тепломассопереноса с граничными и начальными условиями в виде [10, 11]:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \nabla T) + \frac{\varepsilon_{pc} r_0}{c_p} \frac{\partial U}{\partial \tau} + q_v; \quad (14)$$

$$(1 - \varepsilon_{pc}) \frac{\partial U}{\partial \tau} = \nabla(a_d \delta \nabla T + a_d \nabla U); \quad (15)$$

$$-\lambda \nabla T + h(T_{ext} - T) - (1 - \varepsilon_{pc}) r_0 a_m \rho (U - U_{ext}) = 0; \quad (16)$$

$$a_d \delta \nabla T + a_d \nabla U + a_m (U - U_{ext}) = 0; \quad (17)$$

$$T_1 = T_2; \quad (18)$$

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_S = \lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_S; \quad (19)$$

$$T(0) = T_0; \quad (20)$$

$$U(0) = U_0, \quad (21)$$

где ϵ_{pc} – критерий фазового перехода; r_0 – удельная теплота парообразования; U – влагосодержание; a_d – коэффициент диффузии влаги; δ – относительный коэффициент термодиффузии; a_m – коэффициент массоотдачи; U_{ext} – влагосодержание окружающей среды; T_1, T_2, U_1, U_2 – температуры и влагосодержания сопрягающихся поверхностей теплообмена областей 1 и 2; U_0 – начальное влагосодержание тела.

Граничные условия (16)-(17) задают тепло- и массоотдачу между поверхностью объекта и окружающей средой. Выражения (18), (19) – граничные условия сопряжения полей температур. Выражения (20), (21) – начальные условия процесса теплопереноса.

Рассмотрим общий алгоритм математического моделирования взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопереноса при СВЧ термообработке диэлектриков с учетом изменения их физических свойств. Для решения взаимосвязанных дифференциальных уравнений электродинамики и теплопереноса с соответствующими граничными и начальными условиями, воспользуемся методом конечных элементов, реализованным в ПО COMSOL Multiphysics.

Блок-схема общего алгоритма математического моделирования взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопереноса при СВЧ термообработке диэлектриков с учетом изменения их физических свойств приведена на рис. 3.

На первом этапе решения задачи выполняется ввод начальных и граничных условий для рассматриваемых взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопереноса. Задается исходное

положение излучающей системы относительно диэлектрика. Кроме того, вводятся зависимости теплофизических свойств (ТФС) и диэлектрических свойств (ДЭС) объекта термообработки от температуры и влагосодержания, значения которых для первого временного шага рассчитываются по начальной температуре и влагосодержанию.

Далее задается цикл по числу временных шагов, на которые разбивается общее время СВЧ термообработки. Этот цикл завершается при условии достижения заданных технологических параметров (температуры нагрева диэлектрика, его влагосодержания, а для движущейся СВЧ излучающей системы – заданного конечного положения относительно диэлектрика).

В цикле по числу временных шагов предусмотрено выполнение следующих действий:

- исходя из заданных зависимостей, определяется распределение диэлектрических свойств $\epsilon'_r(x, y, z, T, U)$, $\epsilon''_r(x, y, z, T, U)$ и решается уравнение Гельмгольца (2) с использованием данных свойств;

- на основании полученного в результате решения уравнения Гельмгольца распределения поля $E(x, y, z)$ по формуле (1) определяется распределение мощности внутренних источников теплоты $q_v(x, y, z)$;

- определяется распределение теплофизических свойств $c_p(x, y, z, T, U)$, $\rho(x, y, z, T, U)$, $\lambda(x, y, z, T, U)$, решаются уравнения теплопереноса с использованием данных свойств и определяется распределение температуры и влагосодержания $T(x, y, z)$, $U(x, y, z)$.

Если физические свойства диэлектрика удовлетворяют заданной точности, то далее выполняются аналогичные расчеты для следующего временного шага с использованием полученных на предыдущем шаге физических свойств диэлектриков.

В противном случае шаг по времени уменьшается, и итерации продолжаются до получения заданной точности определения физических свойств диэлектрика.

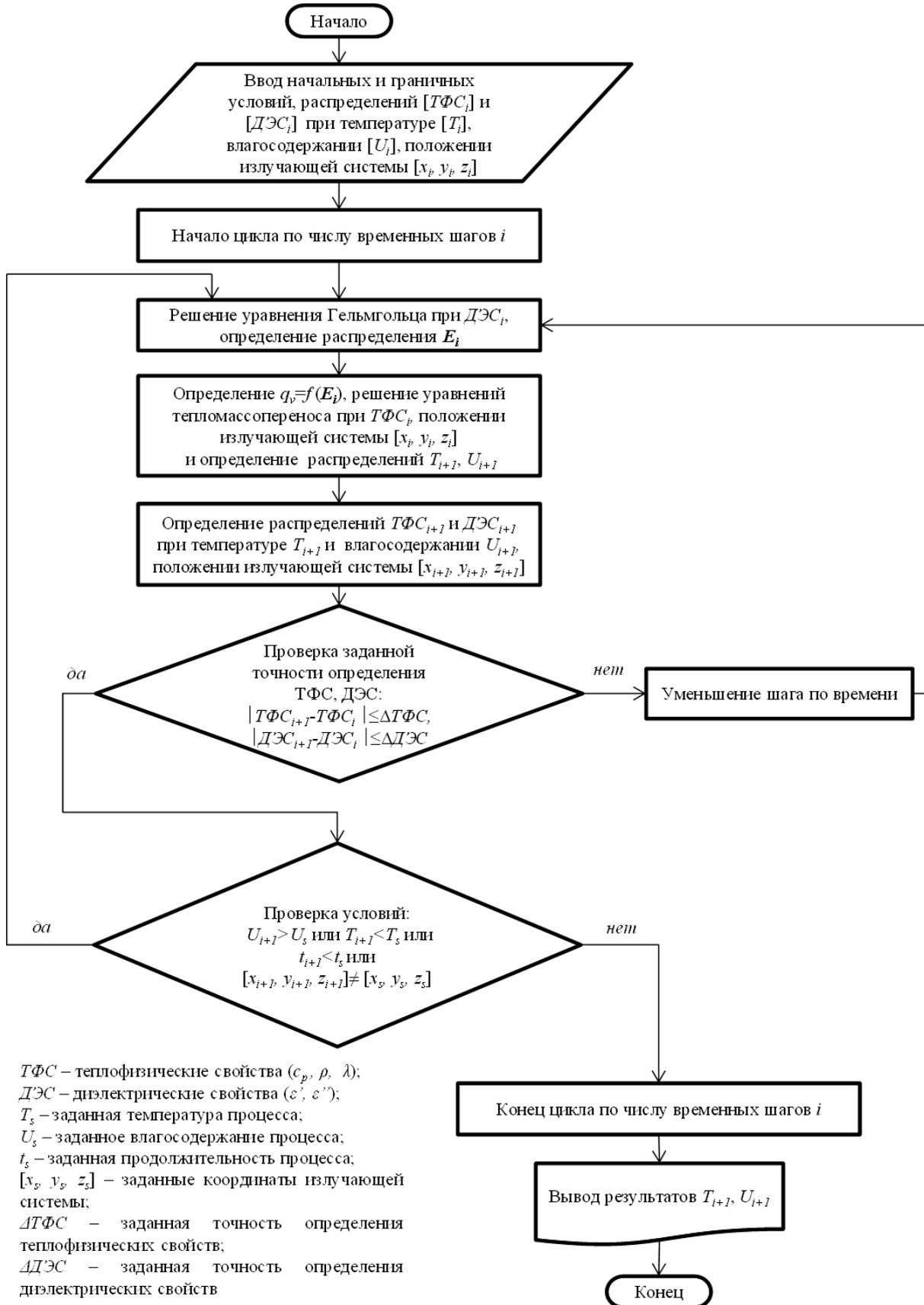


Рис. 3. Блок-схема общего алгоритма математического моделирования взаимосвязанных процессов электродинамики и теплопереноса при СВЧ термообработке диэлектриков с учетом изменения их физических свойств

Реализация общего алгоритма математического моделирования (рис. 2.1) в ПО COMSOL Multiphysics включает, как правило, следующие этапы:

- создание геометрической модели;
- задание уравнений, описывающих рассматриваемый процесс СВЧ термообработки с учетом соответствующей взаимосвязи данных уравнений;
- задание граничных и начальных условий;
- задание свойств материалов модели;
- создание сетки конечных элементов;
- настройка алгоритма решения;
- запуск решения или серии решений при варьировании параметров (в задачах оптимизации);
- вывод и анализ результатов моделирования.

При создании геометрической модели ключевыми аспектами, влияющими на точность моделирования и рациональное использование оперативной памяти компьютера, являются:

- выбор размерности геометрического пространства для моделирования (одномерное, двумерное, трехмерное, осесимметричное и пр.);
- использование симметрий в геометрических моделях (где это возможно).

Для моделирования процессов СВЧ термообработки диэлектриков наиболее предпочтительным является трехмерное, двумерное или осесимметричное моделирование.

Переход от трехмерного к двумерному моделированию возможен при условии, когда исследуемый параметр (температура, влажность и пр.) в третьем измерении не изменяется [12].

Весьма важным этапом при конечно-элементном моделировании является создание сетки конечных элементов.

Для получения точных результатов моделирования при минимальном использовании оперативной памяти компьютера, а в ряде случаев – для обеспечения возможности корректного численного решения задачи необходимо учитывать максимально допустимый размер конечных элементов. Применительно к моделированию процес-

сов СВЧ термообработки диэлектриков правильный подбор размера элементов сетки особенно важен для решения электродинамической части задачи.

Для задач электродинамики, исходя из теоремы Котельникова о дискретизации [6, 13], размер конечного элемента в сетке разбиения должен быть, по крайней мере, вдвое меньше разрешаемой длины волны. Однако данное разбиение является достаточно грубым и может привести к потере точности решения. Практика моделирования [14] показывает, что оптимальным является соотношение не менее пяти элементов на длину волны.

Таким образом, максимальный размер конечного элемента X определяется по формуле

$$X = \frac{\lambda}{5} = (5 \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r)^{-1}, \quad (22)$$

где λ – длина волны в диэлектрике.

С учетом того, что в диэлектриках $\mu_r \approx 1$, при постоянстве частоты поля СВЧ максимальный размер конечного элемента зависит от диэлектрических свойств материалов.

Поскольку при решении задач СВЧ термообработки диэлектриков их диэлектрические свойства могут изменяться при изменении температуры или влагосодержания, размер элементов сетки разбиения рекомендуется подбирать исходя из минимально возможной длины волны при соответствующих значениях диэлектрических свойств. Данная минимальная длина волны должна быть определена перед созданием модели на основании имеющихся зависимостей диэлектрических свойств от температуры или влагосодержания.

Разработанные математические модели взаимосвязанных процессов электродинамики и тепломассопереноса при СВЧ термообработке диэлектриков с учетом изменения их физических свойств, основанные на использовании программного обеспечения COMSOL Multiphysics, могут использоваться с целью синтеза оптимальных СВЧ электротехнологических установок с максимальным КПД и достижения требуемых технологических параметров термообработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. Energy Conversion during Microwave Sintering of a Multiphase Ceramic Surrounded by a Susceptor / J. Lasri, P.D. Ramesh, L. Schachter // Journal of the American Ceramic Society. 2000. № 83 (6). P. 1465-1468.
3. Water and Microwaves [Электронный ресурс] / M. Chaplin. Режим доступа: http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html, свободный (05.10.2019).
4. **Комаров В.В.** Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах / В.В. Комаров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 57-63.
5. A Treatise on Electricity and Magnetism / J.C. Maxwell; 3rd ed. Vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892. 504 p.
6. **Вайнштейн Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
7. The Finite Element Method in Electromagnetics / J. Jian-Ming; 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2002. 389 p.
8. The Principles of Electromagnetic Theory / A. Kovetz. Cambridge University Press, 1990. 221 p.
9. **Исаченко В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергия, 1968. 472 с.
10. **Лыков А.В.** Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. 472 с.
11. **Лыков А.В.** Теория сушки / А.В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
12. **Курушин А.А.** Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL / А.А. Курушин. М.: One-Book, 2016. 376 с.
13. Инструменты для численного моделирования задач электродинамики [Электронный ресурс] / W. Frei. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/simulation-tools-for-solving-wave-electromagnetics-problems/>, свободный (14.09.2018).
14. **Kalganova S.** Computer Simulation of Microwave Heat Treatment of Dielectrics / S. Kalganova, S. Trigorly, V. Zakharov // 2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (INFORINO) / MPEI. М., 2018. P. 1-5.

Захаров Вадим Валерьевич – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., начальник лаборатории научно-исследовательского центра АО «Гипрониигаз»

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

Vadim V. Zakharov – Postgraduate, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Head of Laboratory at R&D Center of JSC Giproniigaz

Sergey V. Trigorly – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

УДК 621.372.8

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОСРЕДСТВОМ ОДИНОЧНОЙ ЩЕЛИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ВЕРХНЕЙ СТЕНКЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА, С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНОЙ НА ЕГО НИЖНЕЙ СТЕНКЕ

Д.А. Баринов, В.А. Коломейцев, П.В. Ковряков, О.В. Дрогайтцева

ELECTROMAGNETIC FIELDS EXCITATION OVER A SINGLE SLOT ON THE TOP WALL OF A RECTANGULAR RESONATOR WITH A DIELECTRIC PLATE ON THE BOTTOM WALL IN H-PLANE

D.A. Barinov, V.A. Kolomeytsev, P.V. Kovryakov, O.V. Drogaytseva

В данной работе анализируется возможность аналитического решения неоднородной задачи электродинамики для прямоугольного резонатора (ПрР) с диэлектрической пластиной, расположенной на нижней стенке резонатора при возбуждении посредством одиночной щели, расположенной на верхней стенке резонатора. Показано, что физическая модель, представляющая сторонний источник электромагнитного (ЭМ) поля посредством поверхностных токов, протекающих на верхней стенке ПрР, успешно работающая при расположении одиночной щели на боковой и задней стенках резонатора, неприменима к верхнему способу возбуждения ЭМ поля. В работе предложена методика расчета однощелевой системы возбуждения (СВ), расположенной произвольным образом на верхней стенке ПрР, учитывающая конечную толщину излучающей щели.

Ключевые слова: электромагнитное поле, прямоугольный резонатор, неоднородная задача электродинамики

Процесс аналитического решения неоднородной внутренней краевой задачи электродинамики (ВКЗЭ), определяемый волно-

In this paper we analyze a possibility for analytical solution to a nonhomogeneous electrodynamics problem relating a rectangular resonator with a dielectric plate on its lower wall when excited via a single slot on the top wall of the resonator. It is shown that a physical model to an external source of the electromagnetic (EM) field presented by means of the surface currents flowing over the top wall of the rectangular resonator, and efficient with a single slot located on the side or the rear wall of the resonator, cannot be applied to the cases of EM field excitation through the top wall. The paper proposes a method aimed to calculate a single-slotted excitation located arbitrarily on the top wall of the rectangular resonator, which takes into account the finite thickness of the radiating slot.

Keywords: electromagnetic field, rectangular resonator, nonhomogeneous problem of electrodynamics

выми уравнениями, продемонстрируем на примере ПрР с двухслойным диэлектрическим заполнением. Решение проводится

методом вариации произвольной постоянной или методом Лагранжа с использованием основных принципов электродинамики ортогональности, суперпозиции и поляризационной двойственности. При расположении диэлектрической пластины на нижней стенке ПрР

аналитическое решение возможно при использовании продольной Y-поляризации ЭМ поля E_y, H_y . Неоднородное уравнение Гельмгольца для E-типов колебаний ($E_y \neq 0, H_y = 0$) при отсутствии джоулевых потерь в диэлектрическом материале имеет вид [1]:

$$\nabla^2 E_{yi}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon_i \mu \frac{\partial^2 E_{yi}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = F_{yi}^{(E)}(\vec{r}, \tau), \quad (1)$$

где

$$F_{yi}^{(E)}(\vec{r}, \tau) = \begin{cases} \mu \frac{\partial j_{y,cm}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\partial \rho_{cm}(\vec{r}, \tau)}{\partial y} & \text{при } i = 1 \\ 0 & \text{при } i = 2 \end{cases}, \quad (2)$$

Решение волнового уравнения (1) представим в виде суперпозиции E-типов колебаний:

$$E_{yi}(x, y, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} q_{ni}^{(E)} T_{mnp}(\tau) \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \Phi_{yni}^{(E)}(y) \sin\left(\frac{p\pi}{l} z\right), \quad (3)$$

где

$$\Phi_{yni}^{(E)}(y) = \begin{cases} \frac{\cos K_{yn1}(b-y)}{\cos K_{yn1}b} & \text{при } i = 1 \\ \cos K_{yn2}y & \text{при } i = 2 \end{cases}, \quad (4)$$

$$q_{ni}^{(E)} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = 1 \\ \frac{1}{\varepsilon_2'} \frac{\cos K_{yn1}(b-d)}{\cos K_{yn1}b \cdot \cos K_{yn2}d} & \text{при } i = 2 \end{cases}.$$

Заметим, что нормировочный коэффициент q_{ni} позволяет привести ортонормированные функции к единой для обеих сред амплитуде. В данном случае нормировка проведена относительно амплитуды ЭМ поля в воздушной среде, то есть в области

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \left(T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau) \right) \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \Phi_{yni}^{(E)}(y) \sin\left(\frac{p\pi}{l} z\right) = -F_{yi}^{(E)}(x, y, z, \tau). \quad (5)$$

Соотношение (5) есть разложение функции источника ЭМ поля $F_{yi}^{(E)}(x, y, z, \tau)$ в ряд Фурье по ортогональным функциям в направлениях X и Z

$$T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau) = \mathfrak{G}_{mnp}^{(E)}(\tau), \quad (6)$$

где

$$\mathfrak{G}_{mnp}^{(E)}(\tau) = \frac{1}{W_{mnp}^{(E)}} \int_0^a \int_0^b \int_0^l F_{yi}^{(E)}(x, y, z, \tau) \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \Phi_{yni}^{(E)}(y) \sin\left(\frac{p\pi}{l} z\right) dx dy dz;$$

$$W_{mnp}^{(E)} = \int_0^a \int_0^b \int_0^l \sin^2\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \left(\Phi_{yni}^{(E)}(y)\right)^2 \sin^2\left(\frac{p\pi}{l} z\right) dx dy dz. \quad (7)$$

ПрР, в которой расположены сторонние источники поля, определяемые функцией $F_{yi}^{(E)}(\vec{r}, \tau)$.

Подставляя решение (3) в неоднородное волновое уравнение (1), получим

по ортонормированным функциям в координатном направлении оси Y. Используя обратные преобразования Фурье, получим

Учитывая, что в общем случае источник ЭМ поля находится вне зоны, в которой расположена диэлектрическая пластина, интегрирование соотношений (6) и (7) должно проводиться в пределах от $y = d$ до $y = b$, при этом для поверхностных

$$T_{mnp}(\tau) = \frac{1}{\omega_{mnp}} \int \mathcal{G}_{yni}^{(E)}(\xi) \cdot \sin \omega_{mnp}(\tau - \xi) d\xi \Big|_{\xi=\tau} . \quad (8)$$

Необходимо отметить, что после проведения интегрирования соотношения (8) необходимо сделать замену переменной $\xi = \tau$. Соотношение (8) определяет решение неоднородной ВКЗЭ для ПрР с частичным диэлектрическим заполнением, которое представляет собой суперпозицию E-типов колебаний. Количество возможных типов колебаний однозначно определяется функци-

$$\begin{aligned} E_{x2}(x, y, z) &= -q_{n2}^{(E)} T_{mnp}(\tau) K_{yn2} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cos \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \sin K_{yn2} y \cdot \sin \left(\frac{p\pi}{l} z \right); \\ E_{y2}(x, y, z) &= q_{n2}^{(E)} T_{mnp}(\tau) \sin \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \cos K_{yn2} y \cdot \sin \left(\frac{p\pi}{l} z \right); \\ E_{z2}(x, y, z, \tau) &= -q_{n2}^{(E)} T_{mnp}(\tau) K_{yn2} \left(\frac{p\pi}{l} \right) \sin \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \sin K_{yn2} y \cdot \cos \left(\frac{p\pi}{l} z \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Соотношения (9) позволяют сформулировать краевую задачу теплопроводности для диэлектрической пластины, нагреваемой электрическим полем E-типов колебаний в ПрР.

источников тока, расположенных на верхней стенке ПрР, необходимо использовать дельта-функцию Дирака $\delta(y, b)$ (верхний способ возбуждения ЭМ поля). Решая уравнение (6) методом вариаций произвольной постоянной [2], получим

ей стороннего источника ЭМ поля и местоположением СВ в рабочей камере (РК). В данной работе исследуются только щелевые системы возбуждения ЭМ поля в РК прямоугольной формы.

Особенностью E-типов колебаний является наличие всех составляющих вектора напряженности электрического поля:

Рассмотрим решение неоднородной ВКЗЭ для ПрР с двухслойным диэлектрическим заполнением, при возбуждении в нем H-типов колебаний ($E_y = 0, H_y \neq 0$). Решение неоднородного волнового уравнения для H_y составляющей магнитного поля:

$$\nabla^2 H_{yi}(\vec{r}, \tau) - \varepsilon_i \mu \frac{\partial^2 H_{yi}(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau^2} = F_{yi}^{(H)}(\vec{r}, \tau), \quad (10)$$

где

$$F_{yi}^{(H)}(\vec{r}, \tau) = \begin{cases} -\mu r_0 t_y \vec{j}_{cm}(\vec{r}, \tau) & \text{при } i = 1 \\ 0 & \text{при } i = 2 \end{cases} \quad (11)$$

представим в следующем виде:

$$H_{yi}(x, y, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} q_{ni}^{(H)} T_{mnp}(\tau) \cos \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \Phi_{yni}^{(H)}(y) \cos \left(\frac{p\pi}{l} z \right), \quad (12)$$

где

$$\Phi_{yni}^{(H)}(y) = \begin{cases} \frac{\sin K_{yn1}(y-b)}{\cos K_{yn1}b} & \text{при } i = 1 \\ \sin K_{yn2}y & \text{при } i = 2 \end{cases}, \quad (13)$$

$$q_{ni}^{(E)} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = 1 \\ \frac{\sin K_{yn1}(d-b)}{\cos K_{yn1}b \cdot \sin K_{yn2}d} & \text{при } i = 2 \end{cases}.$$

Так же как и для Е-типов колебаний, подставив решение (12) в неоднородное волновое уравнение (10), получим

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \left(T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau) \right) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \Phi_{yni}^{(H)}(y) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) = -F_{yi}^{(H)}(x, y, z, \tau). \quad (14)$$

Соотношение (15) есть разложение функции источника $F_{yi}^{(H)}(x, y, z, \tau)$ в ряд Фурье. Используя обратное преобразование Фурье, получим

$$T_{mnp}''(\tau) + \omega_{mnp}^2 T_{mnp}(\tau) = \mathfrak{G}_{mnp}^{(H)}(\tau), \quad (15)$$

где

$$\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)}(\tau) = \frac{1}{W_{mnp}^{(H)}} \int_0^a \int_0^b \int_0^l F_{yi}^{(H)}(x, y, z, \tau) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \Phi_{yni}^{(H)}(y) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) dx dy dz, \quad (16)$$

$$W_{mnp}^{(H)} = \int_0^a \int_0^b \int_0^l \cos^2\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \left(\Phi_{yni}^{(H)}(y)\right)^2 \cos^2\left(\frac{p\pi}{l}z\right) dx dy dz.$$

Решение неоднородного временного уравнения (15), проводимое методом вариации произвольной постоянной для

$$T_{mnp}(\tau) = \frac{1}{\omega_{mnp}} \int \mathfrak{G}_{mnp}^{(E)}(\xi) \sin \omega_{mnp}(\tau - \xi) d\xi \Big|_{\xi=\tau}. \quad (17)$$

Особенностью Н-типов колебаний ПрР с двухслойным диэлектрическим заполнением является отсутствие нормальной к поверхности раздела сред составляющей вектора электрического поля E_y , что приводит к снижению удельной плотности тепловых источников в объеме диэлектрической пластины. Однако при этом вектор

$$\begin{aligned} E_{x2mnp}(x, y, z, \tau) &= -j \omega \mu q_{n2}^{(H)} T_{mnp}(\tau) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin K_{yn2}y \cdot \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right); \\ E_{z2mnp}(x, y, z, \tau) &= j \omega \mu q_{n2}^{(H)} T_{mnp}(\tau) \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin K_{yn2}y \cdot \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right). \end{aligned} \quad (18)$$

Соотношения (18) в совокупности определяют тепловой источник в объеме диэлектрической пластины $q_v(\vec{r}, \tau)$ при возбуждении в РК Н-типов колебаний.

Отметим некоторые особенности диэлектрического нагрева с помощью энергии ЭМ поля в СВЧ-устройствах резонаторного типа, позволяющие облегчить решение неоднородной ВКЗЭ. Во-первых, источник

Н-типов колебаний ПрР с двухслойным диэлектрическим заполнением, имеет следующий вид:

$\vec{E}(\vec{r}, \tau)$ не терпит разрыва на поверхности пластины, что положительно сказывается на согласовании источника СВЧ-мощности с РК и на универсальности СВЧ-нагревательной установки. Структура электрического поля Н-типов колебаний может быть представлена следующим образом:

ЭМ поля генерирует периодические колебания с частотой ω , что позволяет представить функцию $\mathfrak{G}_{mnp}(\tau)$ в виде

$$\mathfrak{G}_{mnp}(\tau) = \mathfrak{G}_{0mnp} \sin(\omega t). \quad (19)$$

Заметим, что можно использовать и функцию $\cos(\omega t)$ в соотношении (19). Это непринципиально, поскольку тепловой

источник пропорционален $|\mathfrak{G}_{mnp}|^2$, что приводит к тому, что в решении зависимость $|\mathfrak{G}_{mnp}|^2$ будет пропорциональна $\sim(1 - \cos 2(\omega t))/2$, в которой при усреднении $\mathfrak{G}_{mnp}(\tau)$ на периоде колебаний ЭМ поля исчезает гармоническая составляющая. Как показано в работе [1], для процессов диэлектрического СВЧ-нагрева справедливо адиабатическое приближение, которое позволяет пренебречь изменением температуры на периоде колебания ЭМ поля, что позволяет использовать средние на периоде колебания значения

$$q_v(x, y, z) = 0,5 \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''}{V} \left(|E_{x2}(x, y, z)|^2 + |E_y(x, y, z)|^2 + |E_z(x, y, z)|^2 \right) \text{ для E - типов колебаний;}$$

$$q_v(x, y, z) = 0,5 \frac{\omega \varepsilon_0 \varepsilon''}{V} \left(|E_{x2}(x, y, z)|^2 + |E_{z2}(x, y, z)|^2 \right) \text{ для H - типов колебаний.}$$
(21)

Аналитическое представление собственных ортогональных по координатным направлениям X и Z функций и ортонорми-

$|\mathfrak{G}_{mnp}(\tau)|_{cp}^2$. В то же время соотношение (19) позволяет определить временную составляющую решения неоднородной ВКЗЭ:

$$T_{mnp}(\tau) = \frac{\mathfrak{G}_{0mnp}}{\omega^2 - \omega_{mnp}^2} \sin(\omega t). \quad (20)$$

Соотношение (20) справедливо для E и H-типов колебаний ПрР с двухслойным диэлектрическим заполнением. При этом средняя на периоде колебания ЭМ поля удельная плотность тепловых источников $q_v(\vec{r}, \tau)$ определяется следующим образом [3]:

рованных функций по направлению Y позволяет определить норму собственных функций E и H-типов колебаний:

$$W_{mnp}^{(H)} = \frac{ab}{4} \left(\frac{b}{2} - \left(\frac{\sin 2K_{yn2}d}{4K_{yn2}d} + \frac{\sin 2K_{yn1}(b-d)}{4K_{yn1}} \right) \right);$$

$$W_{mnp}^{(E)} = \frac{ab}{4} \left(\frac{b}{2} + \left(\frac{\sin 2K_{yn2}d}{4K_{yn2}d} + \frac{\sin 2K_{yn1}(b-d)}{4K_{yn1}} \right) \right).$$
(22)

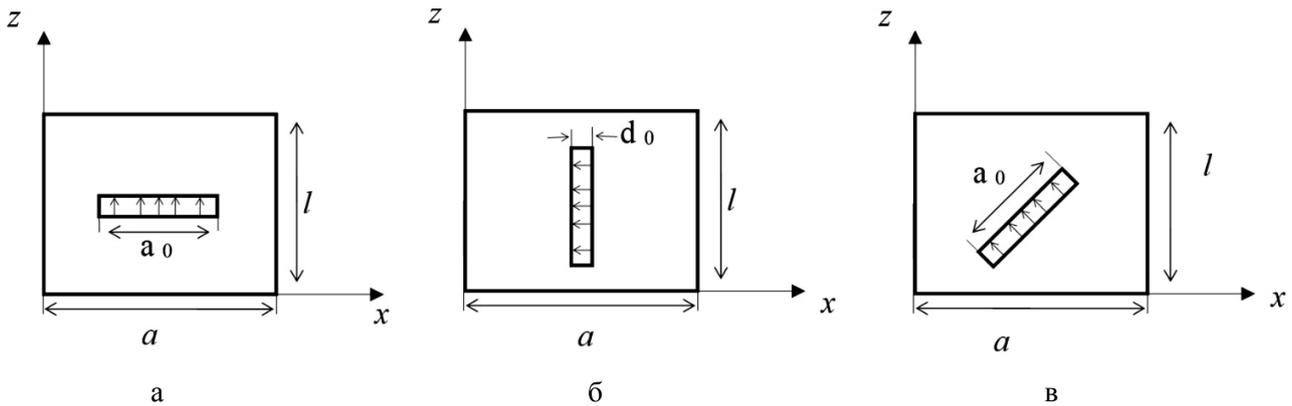


Рис. 1. а – излучающая щель в H-плоскости: $a - j_{cm.z}(x, y)$; б – излучающая щель в E-плоскости: $j_{cm.x}(z, y)$; в – излучающая щель под углом к оси симметрии: $j_{cm.xz}(x, y, z)$

Конкретное решение неоднородной ВКЗЭ для ПрР с двухслойным диэлектрическим заполнением требует конкретизации функции источника ЭМ поля $F_{yi}(\vec{r}, \tau)$.

Рассмотрим верхний способ возбуждения ЭМ поля в ПрР с диэлектрической пластиной, расположенной в H-плоскости, посредством узкой щели, расположенной в центре верхней стенки ПрР (рис. 1).

Верхний способ возбуждения ЭМ поля в ПрР с диэлектрической пластиной, расположенной в Н-плоскости

В соотношении (16) для $\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)}$ интеграл по координате Y :

$$J_{10}^{(H)} = \int_0^l \delta(y, b) \cdot \sin K_{yn1}(y - b) dy = \sin K_{yn1}(y - b) \Big|_{y=b} = 0, \quad (23)$$

что автоматически приводит к $\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)} = 0$, при этом любое смещение щели в плоскости ХZ не позволяет добиться $\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)} \neq 0$. То же самое происходит и с щелью, расположенной в Е-плоскости (рис. 1 б), поскольку при расположении диэлектрической пластины в Н-плоскости ПрР для аналитического решения ВКЗЭ необходимо использовать продольную Y-поляризацию ЭМ поля (E_y, H_y), что приводит к необходимости решения неоднородных уравнений Гельмгольца относительно составляющих E_y, H_y . Возбуждение Е-типов возможно при условии $j_{cm,y} \neq 0$ и $\frac{\partial}{\partial y} \text{div } \vec{j}_{cm} \neq 0$, а Н-типов – при выполнении условий $\partial \delta(y, b) / \partial y \neq 0$; $\partial j_{cm,x} / \partial z \neq 0$

$$\begin{cases} F_{cm,y}^{(E)}(z, x) = 0 \\ F_{cm,y}^{(H)}(z, x) = -\mu_0 \text{rot } t_y \vec{j}_{cm}(x, z) = \mu_0 \frac{\partial j_{cm,x}}{\partial z} \end{cases} \text{ при } \begin{cases} \frac{a - d_0}{2} \leq y \leq \frac{a + d_0}{2} \\ \frac{l - a_0}{2} \leq z \leq \frac{l + a_0}{2} \end{cases}; \quad (24)$$

где

$$j_{cm,y}^{(H)} = A_0 \sin \left(\frac{\pi z}{a_0} \right); \quad A_0 = \omega \mu_0 \beta_{10} \frac{a_1}{\pi} H_{x10}. \quad (25)$$

При расположении щели в Н-плоскости (рис. 1 б) получается аналогичный соотношениям (24), (25) результат,

$$\begin{cases} F_{cm,y}^{(E)}(z, x) = 0 \\ F_{cm,y}^{(H)}(z, x) = -\mu_0 \frac{\partial j_{cm,z}}{\partial x} \end{cases} \text{ при } \begin{cases} \frac{a - a_0}{2} \leq x \leq \frac{a + a_0}{2} \\ \frac{l - d_0}{2} \leq z \leq \frac{l + d_0}{2} \end{cases}; \quad (26)$$

где

$$j_{cm,y}^{(H)} = A_0 \sin \left(\frac{\pi x}{a_1} \right). \quad (27)$$

либо $\partial j_{cm,z} / \partial x \neq 0$. При расположении щели на верхней стенке ПрР данные условия не выполняются. Таким образом, получить аналитическое решение неоднородной ВКЗЭ для поверхностных щелевых источников ЭМ поля и возбудить Е и Н-типы колебаний невозможно.

Использование δ -функций в теории возбуждения ЭМ поля в волноводных и резонаторных структурах подчеркивает поверхностный характер стороннего тока. Однако любая щель имеет определенную толщину b_0 . Так, при подводе СВЧ-мощности к резонатору посредством ПрВ толщина щели достигает $b_0 = 3-4$ мм. Как показано в работах [1, 4], увеличение толщины щели приводит к увеличению излучаемой мощности. Учет толщины щели позволяет получить аналитическое решение задачи возбуждения ЭМ поля в ПрР посредством узкой прямоугольной щели, расположенной на верхней стенке резонатора.

Рассмотрим вариант расположения щели симметрично в центре верхней стенки резонатора в Е-плоскости. В данной щели вектор стороннего тока имеет лишь составляющую $j_{cm,x}(z)$, при этом $\partial j_{cm,x} / \partial x = 0$, что приводит к

изменяется лишь определение источника ЭМ поля в ПрР, которое определяется составляющей $j_{cm,z}$;

Как следует из соотношений (24)-(27), при любом положении излучающей щели на верхней стенке резонатора возбуждаются продольные Н-типы колебаний. Данное

положение справедливо и для многощелевых СВ. Подставляя соотношение (24)-(27) в выражение для $\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)}$ (16), получим

$$\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)} = D_{1mnp}^{(H)} (1 - \cos \Psi_1) \frac{\sin^2 \Psi_1}{\Psi_1} \left\{ \frac{1}{\Psi_2} + \frac{1}{\Psi_3} \sin(\Psi_3 l) \sin(\Psi_3 a_0) \right\}, \quad (28)$$

где

$$\Psi_1 = \frac{1}{2} K_{ynl} b_0; \quad \Psi_2 = \frac{p\pi}{l} \left(1 - \frac{l}{pa} \right); \quad \Psi_3 = \frac{p\pi}{l} \left(1 - \frac{l}{pa_1} \right);$$

$$D_{1mnp}^{(H)} = A_0 \frac{4d_0}{K_{ynl} \cos K_{ynl} b} \cdot \frac{b_0}{(W_{mnp}^{(H)})^2}. \quad (29)$$

b_0 – толщина излучающей щели, при этом чем больше b_0 , тем выше мощность излучения $P_{изл}$. Величина $W_{mnp}^{(H)}$ определяется соотношением (16). Заметим, что поскольку источник ЭМ поля определяется амплитудой основной волны ПрВ, амплитуда стороннего тока A_0 остается неизменной для всех способов возбуждения ЭМ поля и

произвольного расположения щели на поверхности ПрР.

Соответственно для излучающей щели, расположенной в Е-плоскости верхней стенки резонатора, как показано на (рис. 1 б), величина $\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)}$ определяется следующим образом:

$$\mathfrak{G}_{mnp}^{(H)} = D_{2mnp}^{(H)} (1 - \cos \Psi_4) \frac{1}{\Psi_5} \sin \Psi_5 d_0 \cdot$$

$$\cdot \left\{ \frac{1}{\Psi_6} \sin(\Psi_6 d) \sin(\Psi_6 a_0) + \frac{1}{\Psi_7} \sin(\Psi_7 a) \sin(\Psi_7 a_0) \right\}, \quad (30)$$

где

$$D_{2mnp}^{(H)} = \frac{(-1)^p}{(W_{mnp}^{(H)})^2} \frac{2b_0}{K_{ynl} \cos K_{ynl} b} A_0; \quad \Psi_5 = \frac{p\pi}{l}; \quad \Psi_6 = \frac{1}{\pi \left(\frac{1}{a_1} + \frac{m}{a} \right)}; \quad \Psi_7 = \frac{1}{\pi \left(\frac{1}{a_1} + \frac{m}{a} \right)}. \quad (31)$$

Соотношения (16) в совокупности с (29)-(31) позволяют провести аналитический расчет структуры ЭМ поля вынужденных Е- и Н-типов колебаний ПрР с диэлектрической пластиной, расположенной в Н-плоскости. При использовании прямоугольной излучающей щели, произвольным образом расположенной на верхней поверхности резонатора, возбуждаются продольные Н-типы колебаний.

Таким образом, предложенный подход аналитического решения неоднородной ВКЗЭ для ПрР с диэлектрической пластиной, расположенной в Н-

плоскости, базирующийся на представлении решения в виде суперпозиции собственных ортогональных Е- и Н-типов колебаний, позволил провести анализ процесса возбуждения ЭМ поля в ПрР посредством одиночной прямоугольной щели, расположенной на верхней стенке резонатора. Излучающая щель является общим элементом ПрР и подводящего СВЧ-мощность генератора к щели ПрВ. Сторонний ток смещения в щели определяется поверхностными токами, протекающими на нижней широкой стенке волновода. Данный подход решения

ВКЗЭ может быть использован и для многощелевого способа возбуждения ЭМ

поля в ПрР.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Баринов Д.А.** Аналитическое решение совместной внутренней краевой задачи электродинамики и теплопроводности для прямоугольного резонатора, частично заполненного диэлектрическим материалом / Д.А. Баринов и др. // Радиотехника. 2016. № 1. С. 88-98.

2. **Анго А.** Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1965. 685 с.

3. **Коломейцев В.А.** Создание СВЧ нагревательных установок с многощелевой системой возбуждения электромагнитного поля / В.А. Коломейцев, Д.Н. Козлов, А.Э. Семенов // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 9. С. 69-74.

4. **Марков Г.Т.** Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, Л.Ф. Чаплин. М.; Л.: Энергия, 1967. 322 с.

Баринов Дмитрий Анатольевич – заместитель генерального директора по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов

Ковряков Павел Валерьевич – соискатель кафедры «Радиотехника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Коломейцев Вячеслав Александрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации

Дрогайцева Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitriy A. Barinov – Deputy Director General for Research and Development, JSC Scientific-Production Center Almaz-Fazotron, Saratov

Pavel V. Kovryakov – Doctoral student, Department of Radio Engineering and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vyacheslav A. Kolomeytsev – Professor, Dr. Sc., Honored Scientist of the Russian Federation

Olga V. Drogaytseva – PhD, Associate Professor, Department of Radio Engineering and Telecommunications, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

УДК 621.37, 621.365

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МНОГОГЕНЕРАТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ С БЕГУЩИМИ ВОЛНАМИ

Б.К. Сивяков, С.В. Григорьян, Д.Б. Сивяков

MICROWAVE MULTI-GENERATOR TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS WITH TRAVELING WAVES

B.K. Sivyakov, S.V. Grigoryan, D.B. Sivyakov

Сверхвысокочастотные (СВЧ) технологии находят разнообразное применение в современном мире. Они греют, сушат материалы, модифицируют его свойства, придавая им новые качества. Применяются для комплексного воздействия на материалы совместно с ультразвуком и другими физическими и химическими воздействиями в целях улучшения их физических и химических свойств. Находят применение в медицине, биологии, агрономии и других областях. К технологическим СВЧ установкам предъявляются разнообразные требования. Одним из основных требований является обеспечение равномерности воздействия электромагнитным полем на обрабатываемый материал в пределах рабочей камеры установки. В настоящей работе рассмотрены возможности уменьшения неравномерности воздействия за счет применения в СВЧ установках нескольких независимых генераторов с последующим энергетическим воздействием их бегущих электромагнитных волн на материал в рабочей зоне установки.

Ключевые слова: *сверхвысокие частоты, многогенераторные технологические установки, бегущие волны, математическое моделирование, прикладные программы, уменьшение неравномерности энергетического воздействия на обрабатываемый материал*

Введение

Многие применения сверхвысокочастотных технологий требуют однородности по-

Today ultra-high-frequency (UHF) technologies find a variety of applications. They are utilized for heating, drying, and modifying the properties of materials, and as a result, change their qualitative characteristics. The materials are exposed to the systems effects, including ultrasound, and other physical and chemical effects aimed to improve their physical and chemical properties. The UHF technologies are applied in medicine, biology, agronomy, and other areas. Currently, high-power microwaves should satisfy a variety of needs. One of the key requirements is to ensure uniform electromagnetic field effects on the processed material within the working chamber of the installation. We consider a possibility to reduce the non-uniformity of these effects by using a number of independent generators in microwave installations with the subsequent energy deposition of their traveling electromagnetic waves on the material in the working area of the installation.

Keywords: *ultra-high frequencies, technological installations, multi-generator, traveling wave, mathematical modeling, applied programs, reduction of non-uniformity of energy deposition on the processed material*

глощения СВЧ мощности в обрабатываемом материале и высоких уровней электромагнитного поля в рабочей камере [1]. В камерах

с бегущей волной достигается достаточная однородность электромагнитного поля вдоль волнораспространяющей системы при небольших значениях коэффициента затухания поля в обрабатываемом материале, но меньший уровень поля, чем в резонаторных камерах. Поэтому для повышения уровня поля приходится использовать более мощные СВЧ генераторы, что в ряде случаев представляется нецелесообразным по технико-экономическим причинам. Выходом из этой ситуации представляется применение нескольких менее мощных генераторов, вводы энергии которых в камеру распределены по ее длине, и в ней реализуется многоволновый режим обработки материала. При этом достигается более высокая равномерность энергетического воздействия на обрабатываемый материал. Независимые генераторы отличаются своими частотами, в пределах разрешенной для использования полосы частот, поэтому отсутствует интерференционная картина поля вдоль камеры. На материал оказывается только суммарное энергетическое воздействие от каждого генератора.

Ниже приводятся результаты математического моделирования и методика оптимизации такой установки с тремя генераторами для сушки сельхозпродуктов в малых фермерских хозяйствах, проведено исследование ее характеристик, показывающее ее существенное преимущество по сравнению с известными [2].

Одновременно другой актуальной задачей является повышения уровня СВЧ поля в установках с бегущей волной. Решение

этой задачи представляется возможным, если совместить в камере режимы бегущих и стоячих волн от двух независимых генераторов. В работах [3, 4] было предложено использовать для этого прямоугольный волновод, замкнутый в кольцо, по которому распространяются в разные стороны встречные бегущие волны от двух генераторов, вводы энергии которых отстоят друг от друга на расстоянии кратном нечетному числу четвертей волны в волноводе, а длина кольца кратна числу длин волны для обеспечения резонанса. В кольце действующие значения суммарного напряжения и, соответственно, напряженностей электромагнитного поля, воздействующие на материал, практически неизменны вдоль такой камеры. В таких камерах возможно достижение высокого уровня СВЧ поля вследствие резонансного эффекта, необходимого для силовой, а не тепловой модификации свойств материала [5].

В работе также разработана математическая модель и прикладная программа технологической установки со встречными волнами, содержащая замкнутую кольцевую волноводную линию и два независимых генератора.

Трехгенераторная СВЧ камера с бегущими волнами

Рассмотрим конструкцию СВЧ камеры с двумя генераторами, подключенными к противоположным концам желобкового волновода (ЖВ) [8] и третьим генератором в середине камеры.

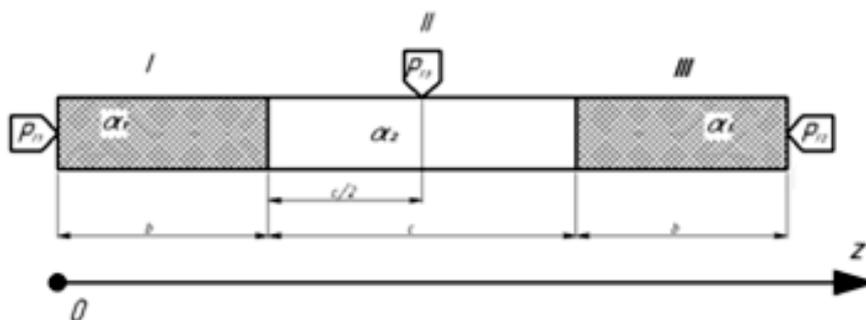


Рис. 1. Волноводная камера на ЖВ с тремя СВЧ генераторами и двумя рабочими зонами для прохождения обрабатываемого продукта: a – координата инъекции дополнительной энергии; b – ширина рабочей зоны; c – свободный участок ЖВ; α_1 – затухание энергии в слое продукта; α_2 – затухание энергии в свободном участке волновода; $P_{Г1} \dots P_{Г3}$ – значения мощностей генераторов

Впервые математическая модель такой камеры и программа моделирования процессов в ней были приведены в нашей работе [7]. В дальнейшем она была уточнена по результатам моделирования удельной области 1, $0 \leq z < b$:

$$P(z) = P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 z} + P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1(b-z)} + 0,5 P_{\Gamma 3} e^{-\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1(b-z)};$$

$$P_{y\partial}(z) = 2\alpha_1 P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 z} + 2\alpha_1 P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1(b-z)} + \alpha_1 P_{\Gamma 3} e^{-\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1(b-z)};$$

область 2, $b \leq z < (b+c)$:

$$P(z) = P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2(z-b)} + P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2(b+c-z)} + 0,5 P_{\Gamma 3} e^{-2\alpha_2|z-(b+c/2)|};$$

$$P_{y\partial}(z) = 2\alpha_2 P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2(z-b)} + 2\alpha_2 P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2(b+c-z)} + \alpha_2 P_{\Gamma 3} e^{-2\alpha_2|z-(b+c/2)|};$$

область 3, $(b+c) \leq z < (2b+c)$:

$$P(z) = P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1[z-(b+c)]} + P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1(2b+c-z)b} + 0,5 P_{\Gamma 3} e^{-\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1[z-(b+c)]};$$

$$P_{y\partial}(z) = 2\alpha_1 P_{\Gamma 1} e^{-2\alpha_1 b} e^{-2\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1[z-(b+c)]} + 2\alpha_1 P_{\Gamma 2} e^{-2\alpha_1(2b+c-z)} + \alpha_1 P_{\Gamma 3} e^{-\alpha_2 c} e^{-2\alpha_1[z-(b+c)]}.$$

Ставится задача добиться максимально возможной равномерности нагрева материала, иными словами, равномерности удельной мощности, характеризующей поглощение СВЧ энергии в материале. Требуемая для данного материала удельная мощность определяется в начале рабочей зоны рабочей камеры при $z = 0$. Исходя из нее, выбираются мощности генераторов $P_{\Gamma 1}$ и $P_{\Gamma 2}$. Мощность генератора в середине камеры $P_{\Gamma 3}$ выбирается из условия достижения максимальной равномерности распределения удельной мощности в рабочих зонах камеры. Поскольку рассматривается симметричная задача относительно середины камеры, можно искать оптимальную мощность генератора $P_{\Gamma 3}$, добиваясь наибольшей равномерности удельной мощности на первом, левом участке рабочей зоны камеры. При этом необходимо учитывать, что на него поступает половина мощности $P_{\Gamma 3}$.

Неравномерность распределения удельной мощности на первом участке будем оценивать модулем ее отклонения

мощности, поглощаемой в продукте. Приведем ее.

Рабочая область камеры развита на три области:

от мощности в начале участка $|P_{y\partial}(z) - P_{y\partial}(z=0)|$. Далее находим оптимальную мощность генератора $P_{\Gamma 3}$ с помощью критерия Чебышева:

$$\min \max |P_{y\partial}(z) - P_{y\partial}(z=0)|$$

методом полного перебора на дискретном множестве его значений на отрезке от $P_{\Gamma 3 \min}$ до $P_{\Gamma 3 \max}$.

На рис. 2 представлено рабочее окно программы моделирования камеры с тремя генераторами [7] при одинаковой мощности всех генераторов – 0,5 кВт. Видно, что в данном случае наблюдается высокая неравномерность удельной мощности вдоль рабочих зон камеры.

На рис. 3 показано окно процедуры оптимизации мощности третьего генератора. Оптимальное значение $P_{\Gamma 3} = 1,3$ кВт.

На рис. 3 представлено рабочее окно программы после оптимизации мощности третьего генератора с наибольшей возможной равномерностью удельной мощности.

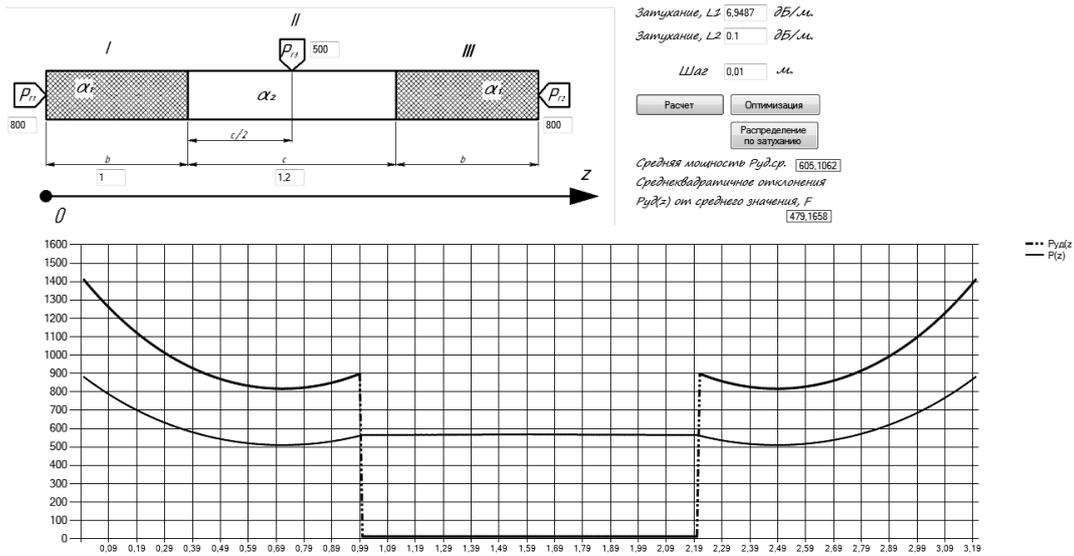


Рис. 2. Рабочее окно программы моделирования камеры с тремя генераторами

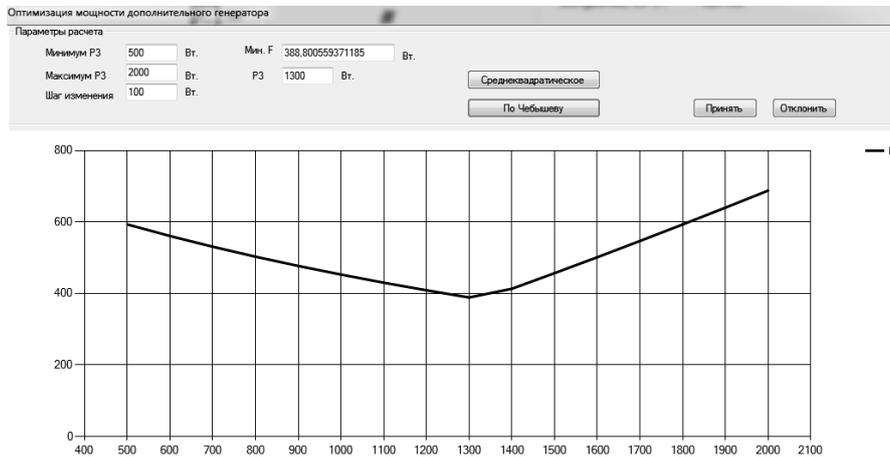


Рис. 3. Рабочее окно процедуры оптимизации мощности третьего генератора

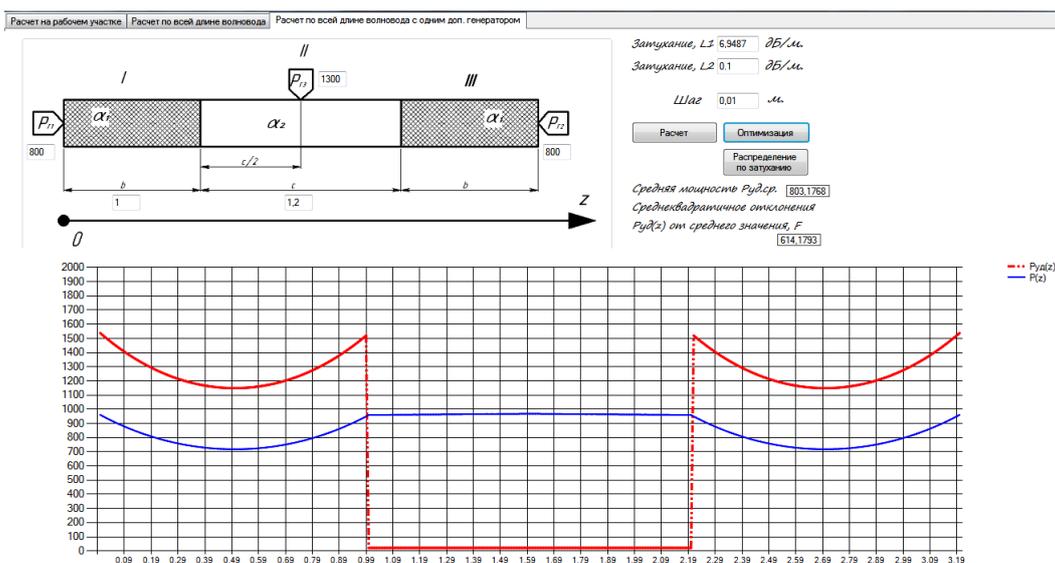


Рис. 3. Рабочее окно программы моделирования камеры с тремя генераторами при оптимальной мощности третьего генератора

Была исследована зависимость оптимальной мощности третьего генератора от коэффициента затухания материала

(рис. 4). С уменьшением коэффициента затухания оптимальная мощность уменьшается.

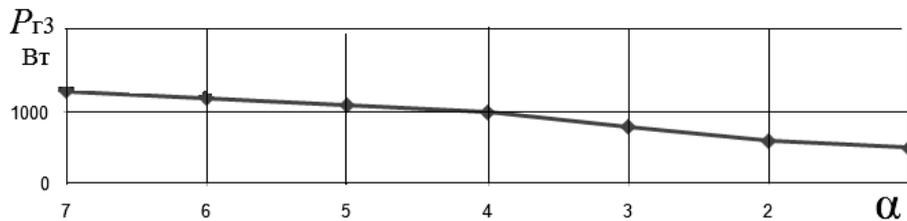


Рис. 4. Зависимость оптимальной мощности третьего генератора от коэффициента затухания α

Разработанные математическая модель, алгоритм, прикладная программа моделирования СВЧ камеры с тремя генераторами и результаты исследования показали возможность реализации оптимального режима работы камеры с минимальной неравномерностью распределения удельной мощности вдоль рабочих зон камеры с круговым движением материала через камеру для реализации многократной циклической его обработки [8].

Двухгенераторная волноводная кольцевая СВЧ камера со встречными бегущими волнами

Рассмотрим процессы в двухгенераторной СВЧ волноводной камере, свернутой в кольцо, со встречными бегущими волнами. Впервые такой тип камеры на волноводе прямоугольного сечения, свернутом в кольцо в форме окружности, был предложен в патенте [3], а в работе [9] описана математическая модель такой СВЧ камеры и приведены результаты анализа процессов в ней.

Сформулируем более универсальную математическую модель для различных вариантов исполнения камер со встречными бегущими волнами с различной замкнутой в кольцо формой. Рассмотрим переходный процесс накопления энергии и установления стоячей волны в однородной кольцевой волноводной линии при включении в нее одного генератора. При средней длине кольца L , составляющей целое число длин волн λ , в рассматриваемой линии будет наблюдаться резонансное увеличение напряженностей электри-

ческого и магнитного полей. Обозначим напряжение волны (рис. 5), распространяющейся по часовой стрелке (прямая волна) $U^+(l^+, t)$, а напряжение волны, распространяющейся в противоположном направлении (встречная волна) $U^-(l^-, t)$, где l^\pm – линейная координата вдоль средней линии в направлении распространения волны, t – текущее время.

Выражения, описывающие процесс распространения волны имеют вид:

для прямой волны

$$U^+(l^+, t) = U_m^+ \cdot e^{-\alpha \cdot l^+} \cdot \sin[\omega \cdot t - \beta \cdot l^+ + \varphi_0^+],$$

для встречной волны

$$U^-(l^-, t) = U_m^- \cdot e^{-\alpha \cdot l^-} \cdot \sin[\omega \cdot t - \beta \cdot l^- + \varphi_0^-],$$

где α – коэффициент затухания волны; β – фазовая постоянная волны, φ_0^\pm – начальные фазы волн при $t = 0$, U_m^+ и U_m^- – амплитуды прямой и встречной волн в сечении ввода энергии. При синфазном возбуждении волн $\varphi_0^+ = \varphi_0^- = \varphi_0$, при противофазном $\varphi_0^- = \varphi_0^+ + \pi$. Возможны и иные варианты возбуждения, определяемые устройством элемента связи. Амплитуды волн U_m^+ и U_m^- также зависят от способа возбуждения резонатора, например, при параллельном подключении входного тракта к волноводной линии резонатора $U_m^+ = U_m^- = U_m$.

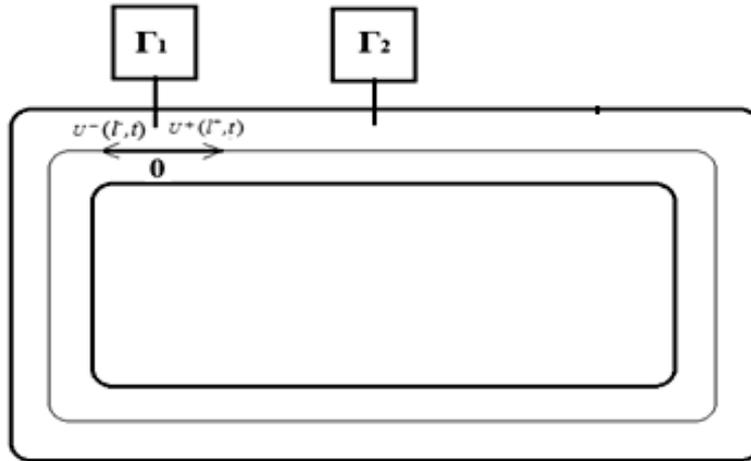


Рис. 5. Схематическое изображение волноводной линии, свернутой в кольцо, с двумя генераторами Γ_1, Γ_2

В отличие от [9] не будем осуществлять переход от линейных координат l^+ и l^- к одной угловой, что было удобно для конфигурации камеры в форме окружности. В общем случае возможные виды таких камер могут иметь самую разнообразную замкнутую конфигурацию, отличную от окружности. С учетом цикличности процессов выразим координаты l^+ и l^- через одну координату на текущем n -м цикле распространения волны в положительном направлении по часовой стрелке x^+ :

$$U^+(n, x^+, t) = U_m^+ \cdot e^{-\alpha \cdot (L \cdot (n-1) + x^+)} \cdot \sin[\omega \cdot t - \beta \cdot [L \cdot (n-1) + x^+] + \varphi_0^+],$$

$$U^-(n, x^+, t) = U_m^- \cdot e^{-\alpha \cdot (L \cdot n - x^+)} \cdot \sin[\omega \cdot t - \beta \cdot [L \cdot n - x^+] + \varphi_0^-].$$

В силу цикличности распространения бегущих волн по одному и тому же пути

$$U_{\Sigma}^+(n, x^+, t) = \sum_{n=1}^N U_m^+ \cdot e^{-\alpha \cdot (L \cdot (n-1) + x^+)} \cdot \sin[\omega \cdot t - \beta \cdot [L \cdot (n-1) + x^+] + \varphi_0^+],$$

$$U_{\Sigma}^-(n, x^+, t) = \sum_{n=1}^N U_m^- \cdot e^{-\alpha \cdot [L \cdot n - x^+]} \cdot \sin[\omega \cdot t - \beta \cdot [L \cdot n - x^+] + \varphi_0^-],$$

где U_m^{\pm} – амплитуда напряжения на вводе энергии в линию $x^+ = 0$, N – число оборотов сложения волн.

Интерференция волн происходит в сечении линии с координатой x^+ , в момент

$$l^+ = L \cdot (n-1) + x^+,$$

где n – номер текущего оборота волны ($n = 1, 2, \dots, N$). Обороты будем отсчитывать с момента времени $t = 0$. Для встречной координаты, соответственно, получим l^- :

$$l^- = L \cdot n - x^+.$$

Таким образом, пути l^+ и l^- , проходимые встречными волнами, выражены через количество оборотов n и координату x^+ на текущем обороте n . Для каждой из волн получим в новой координате x^+ :

происходит интерференция как прямых, так и встречных волн:

времени достижения волнами этого сечения t . Бегущие волны поступают в начальное сечение линии в разные моменты времени t_0 , которые определяются следующими выражениями:

$$t_0 = t - t_p^\pm,$$

где t_p^\pm – время, затрачиваемое прямой и встречной волнами для достижения рассматриваемого сечения (n, x^+) . Отсюда следует, что в сечение с координатой x^+ волны на n -обороте будут пребывать во время $t = t_0 - t_p^\pm$.

Время распространения для каждой волны:

$$t_p^+ = (L \cdot (n-1) + x^+) / V_\phi;$$

$$t_p^- = (L \cdot n - x^+) / V_\phi.$$

Начальные условия для амплитуды напряжения в начале линии $x^+ = 0$:

$$U_m^\pm(t_0^\pm) = \begin{cases} U_m^\pm, & \text{если } 0 \leq t_0^\pm \leq \tau_u \\ 0, & \text{если } \tau_u < t_0^\pm \end{cases}.$$

Таким образом, учтен импульсный характер входного напряжения $U_m(t_0)$ – он определяется законом изменения амплитуды импульса, т.е. его видом, например, $U_m(t_0) = \text{const}$ – прямоугольный импульс.

$$U(x^+, n_t) = \sum_{n=1}^{n_t} U_m^+ \cdot e^{-\alpha \cdot (L \cdot (n-1) + x^+)} \cdot \sin[\beta \cdot (L \cdot (n_t - n) + x^+) + \varphi_0^+] +$$

$$+ \sum_{n=1}^{n_t} U_m^- \cdot e^{-\alpha \cdot [L \cdot n - x^+]} \cdot \sin[\beta \cdot (L \cdot (n_t - (n-1)) - x^+) + \varphi_0^-].$$

Задавая время дискретно как время, необходимое прямой волне на совершение n_t оборотов, по приведенной формуле можно построить зависимость напряжения стоячей волны в волноводной линии от координаты x^+ .

При возбуждении линии от одного генератора положение этого генератора мож-

$$U_2(x^+, n_t) = \sum_{n=1}^{n_t} U_{m_2}^+ \cdot e^{-\alpha \cdot (L \cdot (n-1) + |x^+ - x_2|)} \cdot \sin[\beta \cdot (L \cdot (n_t - n) - |x^+ - x_2|) + \varphi_{0_2}^+] +$$

$$+ \sum_{n=1}^{n_t} U_{m_2}^- \cdot e^{-\alpha \cdot [L \cdot n - |x^+ - x_2|]} \cdot \sin[\beta \cdot (L \cdot (n_t - (n-1)) + |x^+ - x_2|) + \varphi_{0_2}^-],$$

где $|x^+ - x_2|$ берется по модулю, поскольку расстояние отсчитывается от места расположения 2-го генератора.

Прямоугольным импульсом моделируется включение генераторов и переход их в рабочий установившийся режим.

Суммарная стоячая волна является результатом интерференции прямых и встречных волн:

$$U(n, x^+, t) = U_\Sigma^+(n, x^+, t) + U_\Sigma^-(n, x^+, t).$$

Полученное выражение позволяет вычислить напряжение стоячей волны на любом обороте и при любых значениях x^+ и t .

Поскольку обороты начинают отсчитывать с момента времени $t = 0$, то время можно выразить через число оборотов n_t и фазовую скорость волны V_ϕ :

$$t_n = n_t \cdot L / V_\phi.$$

В этом случае распределение стоячей волны вдоль координаты x^+ на обороте n_t примет вид

но считать начальной точкой отсчета. В случае возбуждения линии от двух генераторов положение второго генератора будет определяться координатой x_2 . Выражение для стоячей волны от 2-го генератора в исходной системе координат для первого генератора будет иметь вид

Здесь используются 2 независимых, несинхронизированных генератора. В этом случае в каждой точке пространства волноводной линии эффект от суммарного действия полей, создаваемых двумя генератора-

ми, будет характеризоваться действующим значением напряжения:

$$U_{\Sigma}^{действ.}(x^+, n_t) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^2 (U_k(x^+, n_t))^2}.$$

Проведем математическое моделирование образования стоячих волн в результате интерференции встречных волн от двух независимых генераторов, возбуждающих замкнутую волноводную линию и определим распределение действующего значения напряжения вдоль длины этой линии. Вводы энергии генераторов расположим: один в начале линии – $x_1^+ = 0$ см, а другой – практически в ее середине так, чтобы укладывалось нечетное число четвертей волны $x_2^+ = 161,443$ см. Волноводная линия возбуждается на разрешенной к использованию частоте 2,45 ГГц ее длина – $L = 314,159$ см, амплитуда напряжения волны на вводе энергии от каждого генератора $U_{m_{1,2}}^{\pm} = 100$ В, начальные фазы волн равны, для определенности примем $\varphi_{0,2}^{\pm} = \pi/2$.

На рис. 2 показано изменение амплитуд стоячих волн вдоль длины линии от каждого из генераторов 1 и 2, а также действующего значения напряжения 3 после окончания переходного процесса при $n_t = 1000$ с момента включения генерато-

ров и коэффициенте затухания электромагнитной волны $\alpha = 0,591$ 1/м. Затухание ведет к изменению амплитуд встречных волн от каждого из генераторов вдоль длины линии. В тех местах, где амплитуды встречных бегущих волн не равны, наблюдается режим смешанных волн (стоячей и бегущей).

Бегущая волна обеспечивает, как известно, достаточно равномерное действие на материал вдоль ее распространения, а стоячая характеризуется максимумами и минимумами амплитуд вдоль линии, приводящим к значительной неравномерности действия. Применение двух генераторов, вводы энергии которых отстоят друг от друга на расстоянии, равном нечетному числу четвертей длины волны в линии, позволяет в значительной мере устранить этот недостаток действия стоячих волн на материал. При равных амплитудах стоячих волн действующее значение напряжения остается постоянной величиной вдоль линии. Именно оно определяет энергетическое воздействие на материал. Одновременно в замкнутой линии выполняется условие резонанса бегущих волн, приводящее к значительному увеличению напряжения, что позволяет использовать ее для силовой нетепловой модификации свойств материала.

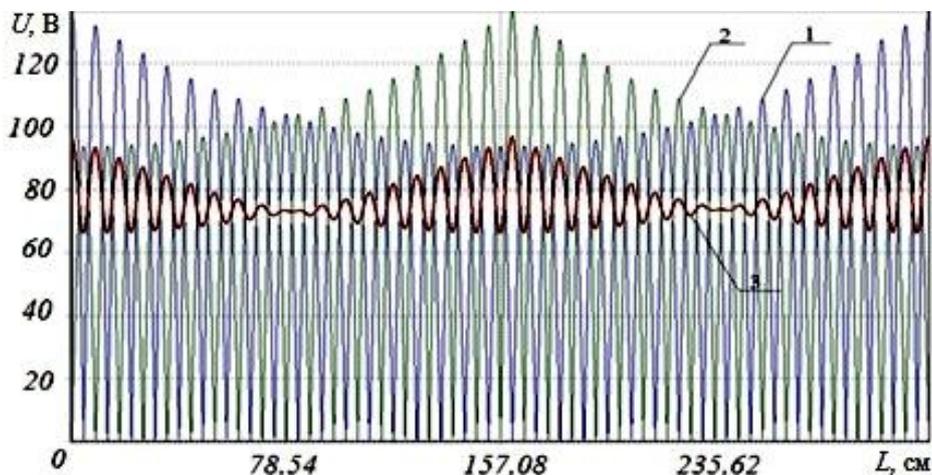


Рис. 6. Графики стоячих волн и действующего значения напряжения в линии, замкнутой в кольцо: 1 – картина стоячей волны от первого генератора, 2 – картина стоячей волны от второго генератора, 3 – действующее значение напряжения в линии

В рассматриваемом случае минимальное напряжение стоячей волны от генераторов, обусловленное затуханием, наблюдается на противоположном по отношению к их вводу энергии сечении линии. Для первого генератора в ее середине, а от второго – практически в начале. Соответственно, на графике действующего значения напряжения вдоль линии (рис. 6, кривая 3) наблюдаются пульсации действующего значения напряжения, вызванные различием амплитуд стоячих волн от первого и второго генераторов. Но эти пульсации намного меньше пульсаций амплитуды стоячих волн.

Заключение

Предложены техническое решение и исследованы возможности применения многоволновых режимов обработки материалов при использовании нескольких независимых генераторов в СВЧ технологических установках. Для технологических камер с многократной циклической обработкой материала разработаны математическая модель, алгоритм оптимизации и прикладная программа для математического моделирования

камеры с тремя генераторами. Результаты исследования показали возможность реализации оптимального режима работы камеры с минимальной неравномерностью распределения удельной мощности вдоль рабочих зон камеры с круговым движением материала через камеру. Разработаны математическая модель и программа для камер со встречными волнами на замкнутых в кольцо волноведущих системах. Математическая модель и программа позволяют исследовать процессы в камере при произвольной кольцевой конфигурации, что расширяет область ее применения. Приведен пример распределения стоячих волн от каждого генератора и действующего напряжения от двух генераторов вдоль камеры. Величина действующего напряжения характеризуется большой величиной постоянной составляющей, что способствует более равномерной обработке материала. Другой особенностью данного типа камер является возможность достижения высоких уровней электромагнитного поля при малом затухании, необходимого для нетепловой, силовой обработки материала, вследствие резонансного эффекта в кольцевой камере.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
2. **Явчуновский В.Я.** Микроволновая и комбинированная сушка: физические основы, технологии и оборудование / В.Я. Явчуновский. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. 217 с.
3. // Патент РФ № 2416891. СВЧ установка для обработки диэлектрических материалов. 2012. Бюл. № 11 / Б.К. Сивяков, Ю.П. Слаповская.
4. **Сивяков Д.Б.** Камера с бегущими волнами на волноводе, свернутом в кольцо / Д.Б. Сивяков // Вопросы электротехнологии. 2017. № 2. С. 29-33.
5. **Калганова С.Г.** Создание научных основ модифицирующего нетеплового СВЧ воздействия на полимерные материалы / С.Г. Калганова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4 (19). Вып. 4. С. 98-102.
6. **Грайсмен Д.** Желобковый волновод // Квазиоптика; пер. с англ. и нем.; под ред. Б.З. Каценеленбаума и В.В. Шевченко. М.: Иностран. лит., 1966.
7. **Сивяков Б.К.** Математическое моделирование многоволновой СВЧ установки для сушки продуктов / Б.К. Сивяков, С.В. Григорьян // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4. С. 8-12.
8. **Сивяков Б.К.** Установка СВЧ сушки сельскохозяйственных продуктов в фермерских хозяйствах / Б.К. Сивяков, С.В. Григорьян // Вопросы электротехнологии. 2019. № 1. С. 9-14.
9. **Слаповская Ю.П.** Математическое моделирование сверхвысокочастотных

кольцевых резонаторов электротехнологических установок / Б.К. Сивяков, Ю.П. Слаповская // Вестник Саратовского

государственного технического университета. 2010. № 3(45). С. 162-170.

Сивяков Борис Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris K. Sivyakov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Григорьян Сейран Вагифович – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Seyran V. Grigoryan – Postgraduate, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сивяков Дмитрий Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry B. Sivyakov – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Engineering and Electrical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.313.333:621.372.632

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МЕТОДОМ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

Д.И. Попов

A METHOD FOR DETERMINING POWER CONSUMPTION IN TESTING INDUCTION MOTORS BY THE BACK-TO-BACK METHODOLOGY

D.I. Popov

Обоснована актуальность совершенствования электротехнических комплексов, предназначенных для проведения нагрузочных испытаний асинхронных двигателей. Отмечена проблема определения мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытаниях методом взаимной нагрузки при питании от управляемых инверторов напряжения. Проанализированы особенности применения известного способа определения мощности, выявлены его преимущества и недостатки по сравнению с аналогами. Предложен новый способ, сохраняющий все достоинства рассмотренного аналога и имеющий перед ним ряд преимуществ: более простую схему, меньшее число необходимых измерений и вычислительных операций. Разработаны алгоритмы этапов осуществления предложенного способа. Разработанный способ позволяет снизить погрешность определения мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытаниях методом взаимной нагрузки.

Ключевые слова: испытательный комплекс, асинхронный двигатель, метод взаимной нагрузки, схема испытаний, определение мощности

Различные категории испытаний электрических двигателей имеют широкий спектр видов испытаний и требуют определения или непосредственного измерения

The challenges connected with improvement of electrical systems designed for testing induction motors using the back-to-back method are relevant. Particular focus has been made on estimating the power consumed by induction motors during the back-to-back tests when powered by controlled voltage inverters. Specific features of the applied method for power consideration have been analyzed, as well as advantages and disadvantages of its analogues have been revealed. The proposed method preserves all the benefits of the considered analogy and has a number of advantages: a simpler scheme, and fewer measurements and computational operations. The algorithms required to implement the stages of the proposed method have been developed. The new method reduces the errors in estimating the power consumed by induction motors during the back-to-back method of testing.

Keywords: test facility, induction motor, the back-to-back method, testing scheme, estimation of power

различных параметров, например в соответствии с ГОСТ 2582-2013, ГОСТ 11828-86 и др. Государственными стандартами допускается к применению проведение испыта-

ний асинхронных двигателей с соединением их по схеме взаимной нагрузки. Примеры таких схем приведены в [1-4]. Стенд для испытания электрических машин представляет собой сложный электротехнический комплекс, требующий при внедрении существенных капиталовложений. Таким образом, снижение его себестоимости, энергопотребления, а также сложности и трудоемкости эксплуатации являются необходимыми условиями его успешного внедрения и перспективными направлениями научных исследований.

В некоторых из схем взаимной нагрузки асинхронных двигателей питание обмоток статора осуществляется от двух управляемых инверторов, формирующих на выходе переменное напряжение посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [5-6]. В таких схемах усложняется процесс измерения мощности, потребляемой асин-

хронным двигателем, ввиду усложнения и удорожания измерительной части схемы.

Ряд исследователей предлагают в таких случаях применять специализированные микроконтроллерные или микропроцессорные устройства, предназначенные для измерения мощности в цепях с несинусоидальным напряжением [7, 8]. Наиболее обоснованной с точки зрения минимизации затрат на специализированное измерительное оборудование представляется способ определения мощности при испытании асинхронных тяговых двигателей, представленный в [9, 10]. Суть данного способа, состоящего из трех этапов, заключается в следующем.

Для осуществления способа определения мощности, потребляемой асинхронными двигателями при взаимной нагрузке для испытательных комплексов, имеющих два преобразователя частоты, необходимо собрать схему, представленную на рис. 1 [9, 10].

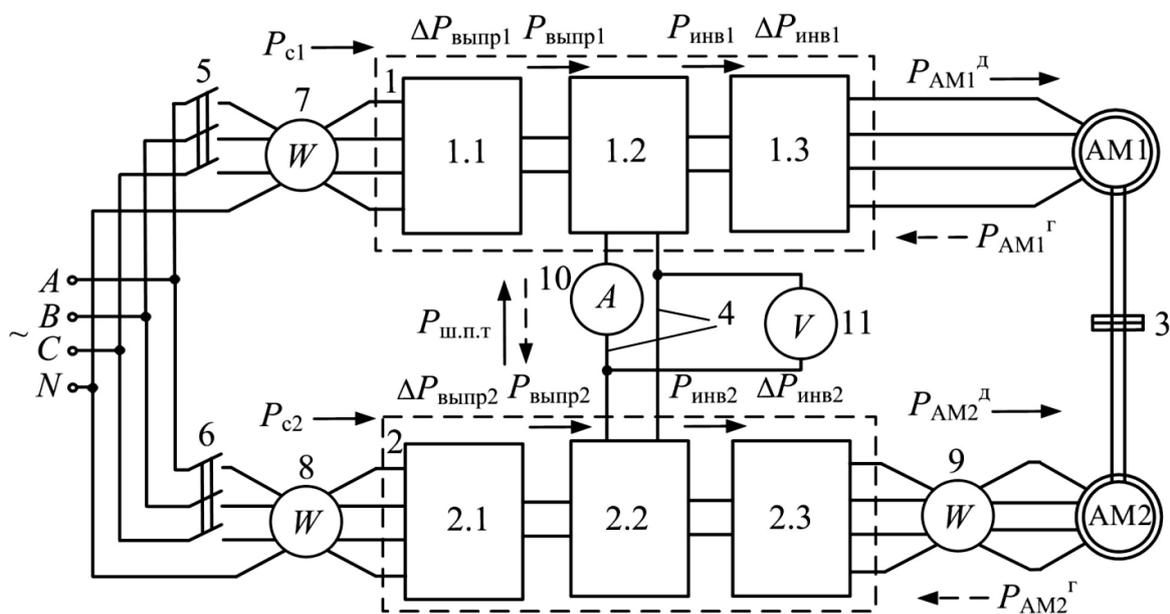


Рис. 1. Схема, обеспечивающая известный способ определения мощности, потребляемой асинхронными двигателями при их испытаниях методом взаимной нагрузки

Данная схема соответствует устройству, в котором применены два двухзвенных преобразователя частоты с шиной постоянного тока (ШПТ), обеспечивающей электрическую связь звеньев постоянного тока [5]. На данной схеме (см. рис. 1) указаны мощности, проходящие по ее участкам, и потери в некоторых элементах. В обозначениях

верхний индекс «д» соответствует направлению при двигательном режиме работы соответствующей машины, «г» – при генераторном режиме. Мощность принимают положительной при ее направлении, совпадающем со стрелкой, изображенной сплошной линией. В обратном случае мощность принимают отрицательной. Измери-

тель мощности 9 требуется только на первых двух этапах осуществления данного способа определения мощности. При этом данный прибор должен быть предназначен для проведения измерений мощности в цепях с несинусоидальным напряжением с широтно-импульсной модуляцией с частотой в несколько килогерц. Данная схема неприменима к устройству, в котором вместо двух преобразователей частоты применяется один общий выпрямитель, к выходу которого подключаются два управляемых инвертора напряжения [6].

На первом этапе при замкнутом контакторе 5 и разомкнутом контакторе 6 ($P_{c2} = 0$, $\Delta P_{выпр2} = 0$, $P_{выпр2} = 0$) с выбранным шагом задают N различных i -х ступеней нагрузки и экспериментально определяют следующие зависимости:

– потерь в управляемом инверторе 2.3 ($\Delta P_{инв2}$) от мощности машины АМ2 (P_{AM2}):

$$\Delta P_{инв2}(P_{AM2}) = P_{ш.н.т}(P_{AM2}) - P_{AM2}; \quad (1)$$

– мощности ($P_{инв2}$), подводимой к инвертору 2.3, от мощности машины АМ2:

$$P_{инв2}(P_{AM2}) = P_{ш.н.т}(P_{AM2}). \quad (2)$$

Из выражения (2) получают зависимость потерь в управляемом инверторе 2.3 от проходящей через него мощности:

$$\Delta P_{инв2} = f(P_{инв2}). \quad (3)$$

На втором этапе при замкнутых контакторах 5 и 6 аналогичным образом экспериментально определяют следующие зависимости:

– мощности на выходе выпрямителя 2.1 ($P_{выпр2}$) от мощности машины АМ2:

$$P_{выпр2}(P_{AM2}) = P_{инв2}(P_{AM2}) - P_{ш.н.т}(P_{AM2}), \quad (4)$$

где $P_{инв2}(P_{AM2})$ – зависимость, принятая по выражению (3);

– потери мощности в выпрямителе 2.1 от мощности машины АМ2:

$$\begin{aligned} \Delta P_{выпр2}(P_{выпр2}(P_{AM2})) &= \\ &= P_{c2}(P_{AM2}) - P_{выпр2}(P_{AM2}). \end{aligned} \quad (5)$$

Второй этап завершается определением зависимости потерь мощности в неуправ-

ляемом выпрямителе 2.1 от подводимой к нему мощности из сети:

$$\Delta P_{выпр2} = f(P_{c2}). \quad (6)$$

Первые два этапа также необходимо повторить для определения зависимостей (1)-(6) для элементов первого преобразователя частоты (с нижним индексом «1»). Для этого при повторении первого этапа необходимо замкнуть контактор 6 и разомкнуть контактор 5, измерительный прибор 9 необходимо переключить в цепь обмотки статора машины АМ1.

Однократно полученные зависимости (1)-(6) многократно применяют на третьем этапе, который проводится при каждом испытании электрических машин методом взаимной нагрузки на испытательном комплексе.

На третьем этапе измеряются величины P_{c1} и P_{c2} в цепи с синусоидальным напряжением и $P_{ш.н.т}$ в шине постоянного тока, по которым находятся следующие величины:

- $\Delta P_{выпр1}$, $\Delta P_{выпр2}$ из зависимости (6);
- $P_{выпр1}$, $P_{выпр2}$ из выражения (5);
- $P_{инв1}$, $P_{инв2}$ из выражения (4);
- $\Delta P_{инв1}$, $\Delta P_{инв2}$ из зависимости (3);
- P_{AM1} и P_{AM2} из выражения (2).

Недостатком приведенного способа определения мощности испытуемых машин является большое количество измерений и вычислений для определения функциональных зависимостей между мощностями и потерями в элементах схемы. Кроме того, несмотря на синусоидальность питающего напряжения (при допущении бесконечной мощности сети, что далеко не всегда допустимо), ток, потребляемый преобразователями частоты, будет несинусоидальным из-за широтно-импульсной модуляции, производимой управляемыми инверторами напряжения. Все это будет приводить к значительной суммарной погрешности при определении мощности, потребляемой двигателями при испытаниях.

Снижения погрешности при определении мощности в рассматриваемом типе схем испытания можно добиться путем применения следующего подключения измерительных приборов, приведенного на рис. 2 и 3, и представленных далее алгоритмов.

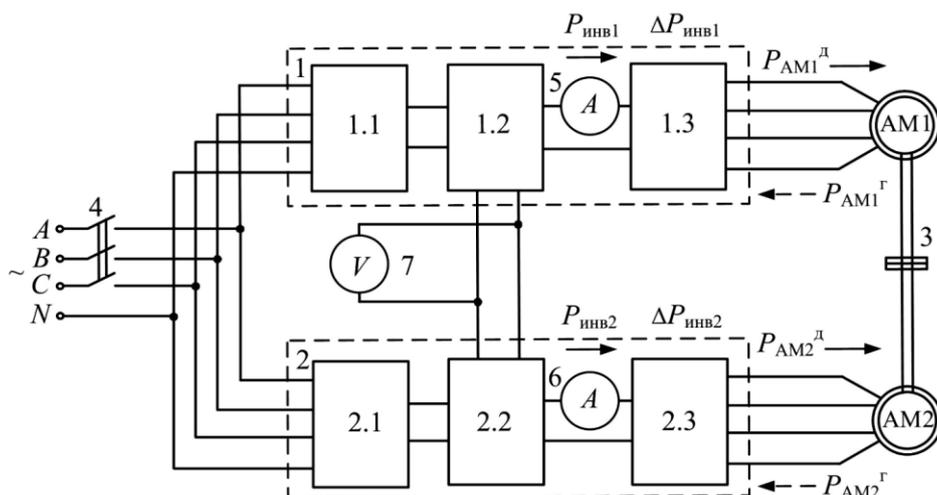


Рис. 2. Схема с двумя преобразователями частоты, обеспечивающая предлагаемый способ определения мощности

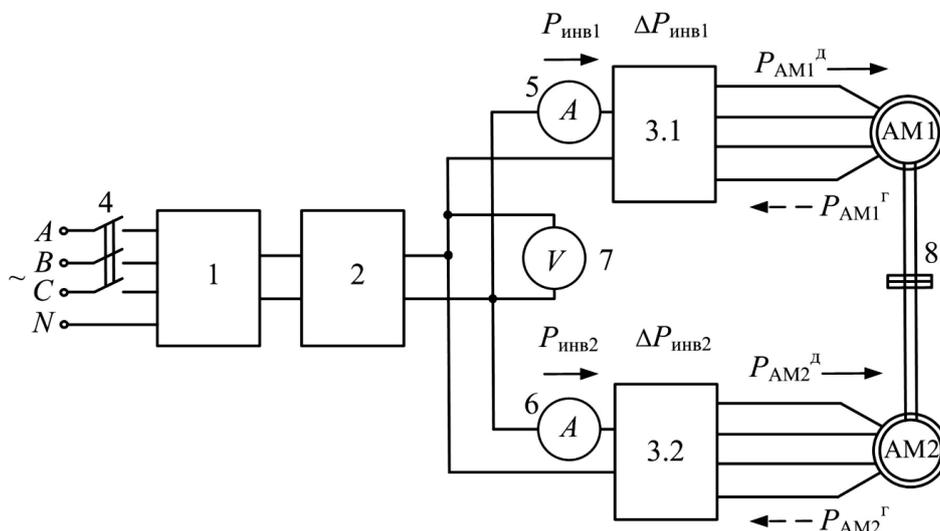


Рис. 3. Схема с одним выпрямителем и двумя управляемыми инверторами, обеспечивающая предлагаемый способ определения мощности

Данная схема испытания асинхронных машин методом взаимной нагрузки состоит из преобразователей частоты 1 и 2, состоящих соответственно из неуправляемых выпрямителей 1.1 и 2.1, звеньев постоянного тока 1.2 и 2.2 и управляемых инверторов напряжения 1.3 и 2.3, коммутатора 4, амперметров (датчиков тока) 5 и 6, вольтметра (датчика напряжения) 7 и асинхронных машин АМ1 и АМ2, валы которых соединены между собой посредством муфты 3. Данная схема соответствует устройству, приведенному в [5].

Для испытательного комплекса с одним выпрямителем и двумя инверторами,

приведенного в [6], схема, обеспечивающая предлагаемый способ определения мощности, должна иметь вид, приведенный на рис. 3.

Данная схема (см. рис. 3) имеет состав оборудования практически аналогичный предыдущей схеме (см. рис. 2), за исключением того, что в ней не применяются преобразователи частоты. Вследствие этого схема упрощена за счет того, что имеет общее звено постоянного тока, а вместо двух параллельно работающих выпрямителей применяется один общий.

Представленные на рис. 2 и 3 схемы позволяют осуществить определение элек-

трической мощности асинхронных машин в два этапа. Алгоритмы, описывающие процесс осуществления первого и второго этапов предлагаемого способа, приведены на рис. 4 и 5 соответственно.



Рис. 4. Алгоритм первого этапа определения мощности (предварительный этап перед испытаниями асинхронных двигателей)

На первом этапе предлагаемого способа необходимо, так же как и на первом этапе предыдущего способа, определить зависимости $\Delta P_{инв1} = f(P_{АМ1})$, $\Delta P_{инв2} = f(P_{АМ2})$, $P_{инв1} = f(P_{АМ1})$, $P_{инв2} = f(P_{АМ2})$, $\Delta P_{инв1} = f(P_{инв1})$ и $\Delta P_{инв2} = f(P_{инв2})$. Данные зависимости для испытательного комплекса необходимо по-

лучить только один раз. Повторное их получение необходимо только при замене статических преобразователей, входящих в состав комплекса. Далее полученные зависимости можно применять на втором этапе, который проводится при каждом испытании асинхронных машин методом взаимной нагрузки на испытательном комплексе. В отличие от предыдущего способа определения мощности для реализации данного способа благодаря наличию амперметров (датчиков тока) 5 и 6 в звене постоянного тока на входе каждого управляемого инвертора отпадает необходимость подключения то одного, то другого преобразователя частоты к сети. В предлагаемых схемах (см. рис. 2 и 3) достаточно иметь только один общий коммутатор 4 на стороне сети.



Рис. 5. Алгоритм второго этапа определения мощности (этап испытаний асинхронных двигателей)

На втором этапе при проведении испытаний (см. рис. 5) измеряются напряжение

постоянного тока $U_{з.п.т}$ (вольтметром 7) и токи, проходящие по соответствующему управляемому инвертору $I_{инв1}$ (амперметром 5) и $I_{инв2}$ (амперметром 6).

Вычисление мощностей $P_{инв1}$ и $P_{инв2}$ осуществляется по произведению напряжения $U_{з.п.т}$ и соответствующего тока.

Далее по зависимостям $\Delta P_{инв1} = f(P_{инв1})$ и $\Delta P_{инв2} = f(P_{инв2})$, полученным на первом этапе, вычисляются потери в инверторах, исходя из которых, находится мощность потребляемая или вырабатываемая асинхронными машинами АМ1 и АМ2 по выражениям:

$$P_{AM1} = P_{инв1} + \Delta P_{инв1}; \quad (7)$$

$$P_{AM2} = P_{инв2} + \Delta P_{инв2}. \quad (8)$$

Таким образом, предложенный способ определения мощности имеет меньшее количество промежуточных измерений (в пяти электрических цепях) по сравнению с приведенным выше аналогичным способом (в шести электрических цепях). Также исключается погрешность, связанная с аппроксимацией зависимостей $\Delta P_{выпр1} = f(P_{с1})$, $\Delta P_{выпр2} = f(P_{с2})$, полученных по эксперимен-

тальным данным. Следовательно, предложенный способ определения мощности имеет меньшую погрешность по сравнению с аналогом, сохраняя все его преимущества.

Упрощение предложенной схемы по сравнению с аналогом обусловлено отказом от применения двух ваттметров на входе преобразователей частоты, а также двух контакторов (коммутаторов) взамен одного, но при этом вместо одного амперметра в шине постоянного тока необходимо наличие двух амперметров, подключенных к входам управляемых инверторов. Такое изменение схемы снижает ее себестоимость и повышает надежность.

Выводы: предложенный способ имеет более широкий спектр применения в различных схемах испытательных комплексов, позволяет повысить их надежность за счет упрощения схемы и уменьшения состава оборудования, а также повысить достоверность определения мощности, потребляемой асинхронными двигателями при их испытаниях методом взаимной нагрузки, за счет исключения ряда погрешностей, связанных с измерениями и вычислениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харламов В.В. Совершенствование технологии испытаний асинхронных тяговых двигателей локомотивов / В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. 160 с.
2. Попов Д.И. Научные основы создания энергоэффективных методов и средств испытаний электрических машин / Д.И. Попов. Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. 175 с.
3. Пат. РФ 80018. Устройство для испытания асинхронных тяговых электродвигателей / О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин, Е.В. Бейерлейн. Оpubл. 20.01.2009. Бюл. № 2.
4. Пат. РФ 2200960. Устройство для испытаний бесколлекторных электрических машин переменного тока / А.С. Курбасов, И.Л. Таргонский, Э.А. Долгошеев. Оpubл. 20.03.2003. Бюл. № 8.
5. Пат. РФ 140678. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Оpubл. 20.05.2014. Бюл. № 14.
6. Пат. РФ 145998. Схема испытаний асинхронных двигателей методом их взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, В.В. Харламов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Оpubл. 27.09.2014. Бюл. № 27.
7. Пат. РФ 2296338. Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока / Н.М. Алейников, А.Н. Алейников. Оpubл. 27.03.2007. Бюл. № 9.
8. Пат. РФ 2229723. Способ измерения активной мощности нагрузки в электрических цепях переменного тока / В.Д. Михотин, В.И. Чернецов. Оpubл. 27.05.2004. Бюл. № 15.

9. Пат. РФ 143346. Схема для определения электрической мощности, потребляемой асинхронными двигателями при испытании их методом взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов. Опубл. 20.07.2014. Бюл. № 20.

10. Авилов В.Д. Методика определения потерь в двухзвенных преобразователях частоты в составе стенда для испытания асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки / В.Д. Авилов, Д.И. Попов, А.В. Литвинов // Известия Транссиба. 2014. № 1 (17). С. 2-8.

Попов Денис Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения

Denis I. Popov – Ph.D., Associate Professor, Department of Electrical Machines and General Electrical Engineering, Omsk State Transport University

Статья поступила в редакцию 10.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

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.

РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ

Г.Г. Угаров, В.И. Мошкин

DESIGN AND CONCEPT OF THE POWERED ELECTROMAGNETIC PULSE SYSTEMS

G.G. Ugarov, V.I. Moshkin

На основе результатов исследований, выполненных в Саратовском государственном техническом университете, представлена концепция развития силовых электромагнитных импульсных систем. Были выявлены пути дальнейшего повышения удельных энергетических показателей импульсных линейных электромагнитных двигателей.

Ключевые слова: *силовая электромагнитная импульсная система, импульсный линейный электромагнитный двигатель*

Современная социально-экономическая ситуация в России требует технологической модернизации производственных процессов и создания конкурентоспособной техники для прогрессивных технологий в машиностроении, строительстве, горнодобывающей и химической промышленности, геолого-разведке, приборостроении, перерабатывающих отраслях, электромонтажном производстве и т. д. Среди многочисленных технологических процессов в этих и других отраслях наиболее важные связаны с изменением состояния, формы и других характеристик прочных естественных или искусственных материалов. Наиболее эффективно отмеченные процессы осуществляются с помощью импульсных технологий, характеризующихся дискретным подводом энергии к объекту воздействия и реализуемых посредством взрыва, магнитно-импульсных и электроразрядных установок, ударных машин и других устройств импульсного действия [1-4]. Импульсный подвод концентри-

The article presents a concept to designing the powered electromagnetic pulse systems that has been developed based on the research conducted at Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. The trending parameters for the increase of specific energy indicators to pulsed linear electromagnetic motors.

Keywords: *powered electromagnetic pulsed system, pulsed linear electromagnetic motor*

рованных потоков энергии в ряде случаев имеет значительные преимущества перед непрерывным характером энергопотребления технологическим объектом: появляется возможность обработки материалов, лишенных такой возможности при традиционных способах, получение новых структур материалов. Как правило, импульсные установки имеют по сравнению с устройствами, работающими в непрерывном режиме, при равной потребляемой мощности меньшие габариты, более высокие энергетические показатели. Такой способ подвода энергии позволяет за счет управляемой дозировки длительности и интенсивности воздействия резко повысить плотность энергии, вводимой в технологический объект, оптимально управлять нестационарными механическими, тепловыми, химическими и другими процессами и получить ряд специфических эффектов. К таким эффектам относятся следующие: увеличение импульсной мощности, изменения амплитуды силы, скорости ввода

механической энергии в зону объекта, пространственной концентрации мощности, нестационарности, волновые эффекты. В ряде случаев определяющую роль в импульсных процессах и технологиях играет механическая энергия. К машинам, генерирующим механическую энергию, относятся пневматические, гидравлические, дизель-молоты, электрические. Среди электрических импульсных машин основная роль принадлежит электромагнитным машинам с возвратно-поступательным движением якоря. В этих машинах якорь – единственная движущаяся деталь – может одновременно быть основным рабочим органом, например бойком в молотках и молотах, поршнем в компрессорах и насосах, пуансоном в прессах. По сравнению с другими электрическими машинами электромагнитные имеют большие потенциальные возможности в приводе машин ударного и вибрационного действия. В настоящее время утвердилась концепция рассмотрения всех вопросов создания, исследования и использования импульсных электромагнитных машин в рамках силовой электромагнитной импульсной системы (СЭМИС), генерирующей механические импульсы силы определенной частоты и интенсивности, и включающей в качестве основных структур, кроме импульсного линейного электромагнитного привода, технологический объект, состоящий из рабочей машины (рабочей среды).

В СЭМИС сочетается конструктивная простота, надежность и долговечность работы, экономичность регулирования выходных характеристик, возможность работы при экстремальных параметрах окружающей среды (под водой, при низких температурах, глубоком вакууме), хорошая совместимость с рабочими органами машин ударного и вибрационного действия с линейными электромагнитными двигателями (ЛЭМД). В ряде случаев применение СЭМИС не имеет альтернатив.

В нашей стране интерес к импульсным электромагнитным системам проявился еще в сороковые годы прошлого века и получил практическую реализацию в виде мелкосерийного производства ручных

ударных машин (молотков) для угольной промышленности и строительства [1].

Новый этап в развитии этого направления начался в пятидесятые годы прошлого столетия в Томском политехническом институте, где Н.П. Ряшенцеву при поддержке профессоров О.Д. Алимova и П.М. Алабужева удалось создать творческую группу (Тимошенко Е.М., Фролов А.В., Тронов А.П., Малов А.Т.). Результатом работы явилось серийное производство на Саратовском заводе «Электродеталь» гаммы молотков и перфораторов нового поколения.

Дальнейшее развитие работ по электромагнитным ударным машинам продолжилось в Институте горного дела СО АН СССР (г. Новосибирск), куда переехал основной состав исследовательской группы д.т.н. Ряшенцева Н.П. В ИГД СО АН СССР были получены основополагающие результаты по электромагнитным машинам широкого спектра применения.

Было организовано широкомасштабное серийное производство большой гаммы ручных электрических ударных машин (молотков и перфораторов) на Даугавпилском заводе «Электроинструмент» для механизации специальных работ в электромонтажном производстве, горном деле, строительстве и других отраслях экономики.

Работы по ручным электрическим ударным машинам были удостоены Государственной премии нашей страны.

В те же годы Н.П. Ряшенцевым и Е.М. Тимошенко была разработана программа работ по исследованию и созданию электромагнитных машин возвратно-поступательного действия [5]. Эта программа периодически корректировалась [3] и окончательно была сформулирована профессором, доктором технических наук Н.П. Ряшенцевым как программа работ по силовым электромагнитным импульсным системам.

Авторы настоящей статьи длительное время были связаны с учебной и научной деятельностью в Саратовском политехническом институте (позднее Саратовский государственный технический университет

имени Гагарина Ю.А.) и поэтому отразили итоги развития СЭМИС в этот период.

Другие результаты авторов, связанные с Институтом горного дела СО РАН, Курганским государственным университетом и другими организациями, отражены в соответствующих изданиях.

Учитывая условия работы в вузе (дефицит финансовых, материальных ресурсов, лабораторных помещений), авторы сосредоточили усилия в практической деятельности по СЭМИС на системах сравнительно небольшой мощности (до 10 кВт). Результаты опубликованы в работах [6-10].

Согласно основным структурам СЭМИС выделены результаты по следующим группам.

Магнитные системы и конструкции ЛЭМД

Разработаны новые конструкции броневых цилиндрических магнитных систем ЛЭМД: с несколькими рабочими зазорами и комбинированным якорем, укороченной магнитной системой, ферромагнитным направляющим корпусом, зубцовым магнитопроводом, многократным использованием магнитного потока, позволяющие в 1,5-2,2 раза повысить удельные значения тяговой силы и механической энергии импульсных ЛЭМД, расширить их функциональные возможности и области применения.

Обоснован выбор магнитных систем ЛЭМД для импульсных машин различной мощности и энергии удара: короткоходовые, работающие на основном магнитном потоке, для которых величина рабочего хода δ якоря не превышает величину радиуса r_1 якоря – для машин малой мощности (до 2 кВт) и энергии удара до 100 Дж; среднеходовые, использующие магнитные потоки основные и рассеяния, для которых $\delta > r_1$ – для машин средней мощности (до 10 кВт) и энергии удара до 10^3 Дж; длинноходовые, работающие на потоках рассеяния, для которых $\delta > r_1$ – для машин большой мощности (свыше 10 кВт) и энергии удара свыше 10^3 Дж. С целью формирования желаемых по виду тяговых характеристик, повышения значений

начальных сил разработаны конструкции ЛЭМД с интегрированной структурой основных элементов магнитной цепи (якоря, стопа и т.д.).

Для форсированного аккумулирования магнитной энергии в импульсных ЛЭМД с целью радикального средства улучшения их технико-экономических показателей разработаны конструкции двигателей с интегрированными магнитопроводами и источниками магнитодвижущих сил. Такие конструкции ЛЭМД действуют как на этапе трогания, так и при движении якоря.

Исходя из условий максимума значений удельной интегральной механической работы и силы тяги определены оптимальные геометрические соотношения основных размеров броневых ЛЭМД цилиндрической структуры.

Режимы электромагнитного и электромеханического преобразования энергии в ЛЭМД

Импульсный ЛЭМД относится к электромеханическим преобразователям электромагнитного типа циклического действия и с ограниченным перемещением якоря. Цикличность и ограниченность перемещения влияют на особенности энергопреобразования в двигателе. Очевидно, что для повышения удельных энергетических показателей импульсных ЛЭМД требуются практически полное преобразование магнитной энергии, накопленной в рабочих зазорах, в механическую работу. При этом, если для частотударных электромагнитных машин имеется возможность использовать остаточную магнитную энергию в последующем цикле, то для редкоударных машин её нет.

Особенностью энергопреобразования в импульсных ЛЭМД является то, что такие двигатели могут работать в так называемом «совмещенном» режиме, при котором происходит одновременное преобразование магнитной энергии рабочих зазоров и в механическую работу (двигательный режим), и в электрическую энергию, генерируемую в источник питания (генераторный режим). Однако для импульсного ЛЭМД генериро-

вание электроэнергии не является целью, и этот режим следует избегать.

По сравнению с известными десятью энергетическими режимами (циклами) [1, 11] нами установлены 14 таких режимов электромеханического преобразования [12], отличающихся коэффициентом восстановления (или ослабления) магнитной энергии при движении якоря: 7 режимов при уменьшении рабочего зазора (двигательные и совмещенный режимы) и ещё 7 – при увеличении (генераторные и совмещенный). С помощью коэффициента восстановления определены режимы, позволяющие повысить удельные энергетические показатели ЛЭМД в 2-4 раза.

Рабочие процессы

Установлены аналитические зависимости, определяющие взаимосвязь показателей рабочих процессов в импульсных ЛЭМД и выходных характеристик машин в длительном, кратковременном и повторно кратковременном режимах.

Эти зависимости, в частности, позволяют оптимизировать значения энергии единичного удара и количество одиночных циклов в соответствии с режимами работы. Развита методика к осуществлению эффективных энергопреобразовательных процессов, основанная на использовании режима индуктивного накопителя магнитной энергии, что обеспечивает достижение более высоких силовых и энергетических показателей в рабочем цикле.

Системы питания и управления (СПУ)

СПУ в значительной степени определяет рабочий процесс электромагнитной машины, ее электромеханические параметры, в частности, основные выходные характеристики: энергию удара, энергию воздействия и частоту генерируемых механических импульсов (частоту ударов). В этом направлении выполнены следующие работы:

- разработаны принципы построения тиристорных схем питания и управления источников постоянного, переменного, однофазного и трехфазного тока, накопителей

электрической энергии, позволяющие осуществлять коммутацию обмоток двигателей практически с любой величиной индуктивности;

- разработаны способы управления электромагнитными машинами, позволяющие в 2-3 раза повысить их удельную мощность, в 1,3...1,5 раза – КПД, в 3...4 раза улучшить коэффициент мощности;

- разработаны основы для создания систем питания и автоматизированного управления электромагнитными машинами ударного действия с варьируемой частотой ударов в минуту (0,1...3000) и энергией ударов (0,001...400 кДж). Созданные системы питания и управления использовались в прессовом оборудовании, сейсмоисточниках, специальной технике и плазменно-дуговых технологиях.

Передача импульсной механической энергии

Разработаны принципы и конструктивные схемы устройств согласования и передачи импульсной механической энергии технологическому объекту, обеспечивающие высокий КПД и надежность устройств.

Методы расчета и проектирования СЭМИС

Разработаны научные основы расчета и проектирования систем и электромеханических параметров составляющих их элементов. Разработаны методы расчета магнитных полей, статических и динамических характеристик ЛЭМД. На основе взаимных соотношений в электромеханике распространение получил интегрально-энергетический метод расчета основных структур и элементов СЭМИС. Разработаны методики расчета предельной энергии в объеме ЛЭМД.

Результаты практической реализации разработанных СЭМИС

Широкая гамма электромагнитных прессов (ПЭМ) усилием (1...100) кН нашла применение в машиностроительной, электротехнической, приборостроительной радиотехнической, местной и других отрас-

лях промышленности для холодной штамповки изделий из тонколистового стального или цветного проката. В разработанном прессовом оборудовании усилием (1...100) кН удалось достичь удельной энергии воздействия 6...8 Дж/кг, в 2...2,6 раза увеличить частоту ходов, в 2...2,5 раза снизить массу прессов. Разработаны электромагнитные молоты с малой энергией ударов (до 400 Дж) – для забивки-выдергивания стержней, электродов, разрушения крепких материалов, ударного бурения, динамического зондирования грунтов, средней энергией ударов (до 1000 Дж) – для импульсной наземной, невзрывной сейсморазведки.

Разработанные СЭМИС для обработки металлов давлением или ударным воздействием нашли применение в технологиях, основанных на использовании концентрированных потоков энергии, среди которых доминируют процессы плазменной (дуговой) наплавки [7, 13]. Такую концепцию разработал доктор технических наук, профессор Ю.Н. Казаков. Она позволяла создать гибкое производство деталей машин и инструмента на основе синтеза процессов комплексного нанесения расплавленного металла с термосиловым воздействием на него. Реализация этой технологии сдерживалась из-за отсутствия генератора импульсной механической энергии, способного работать в стесненных условиях применения при дуговых и плазменных процессах. Использование внешних импульсных механических воздействий в наплавочных процессах позволяет управлять структурой, твердостью и физико-механическими свойствами металла, а также однородностью и равномерностью его распределения на всех этапах нанесения металла от переноса до полного охлаждения, когда он находится в жидкой, вязкопластичной и твердой фазах.

Технологическая реализация методов и средств наплавки с принудительным формообразованием показала ряд достоинств: получение мелких деталей и различного рода утолщений и выступов в изделиях при высоком коэффициенте использования

металла, сведение к минимуму припуска на обработку за счет изменения наплавочных форм оригинального состава, наложение низкочастотной вибрации или ударов, применение вытесняющего формообразующего инструмента; обработка в едином технологическом цикле практически с любой твердостью наплавленного металла при снижении сил резания в 2...4 раза и повышение стойкости инструмента в 3...5 раз, а в некоторых случаях – с эффектом безотходности (режущий инструмент выполняет функции резания и подачи стружки в сварочную ванну для повторного переплава; получение изделия с улучшениями свойствами).

Из специальных машин, использующих разработанные СЭМИС, перечислим следующие: установки для запрессовки втулок и колонок в штампы и пресс-формы; установки для уплотнения формовочных смесей; установки для ударного формования бетонных изделий; машины для постановки металлической фурнитуры на швейные и кожгалантерейные изделия; установки для клеймения и маркировки ювелирных изделий, инструмента, деталей машин.

Дальнейшее развитие и расширение области применения СЭМИС в традиционных и новых технологиях связано с повышением удельных силовых и энергетических показателей импульсных ЛЭМД и связанных с ним систем, совершенствованием методов расчета.

Для решения этих задач необходимо дальнейшее развитие фундаментальных вопросов теории СЭМИС.

С этой целью необходимо продолжить работы по изучению процессов электро-механического преобразования энергии. Основными вопросами исследований в рамках этого направления являются следующие:

1. Разработка теоретических основ новых принципов возбуждения и гашения магнитных полей.

2. Установление параметров и характеристик импульсной электромагнитной системы, которые определяют основные закономерности электро-механического преобразования энергии.

3. Выявление общих взаимосвязей между электрической, магнитной, механической, тепловой подсистемами и электромагнитной импульсной системой.

4. Исследование влияния энергии, запасаемой в индуктивных, емкостных, инерционных, гравитационных, газовых, вакуумных, пружинных накопительных элементах, на рабочий процесс системы.

5. Определение связей между рациональной структурой рабочего цикла машины, ее конструктивной схемой, параметрами, назначением.

6. Установление общих закономерностей изменения массогабаритных показателей импульсных электромагнитных машин в зависимости от величины энергии, частоты ударов, способов охлаждения.

7. Обоснование эффективных способов формирования тяговых усилий на основе гибридных двигателей, использующих не менее двух принципов действия импульсных линейных электромеханических преобразователей энергии.

8. Обоснование эффективной совместности различных принципов работы электромеханических преобразователей в гибридных импульсных ЛЭМД.

9. Оценка эффективности интеграции импульсных ЛЭМД с механическими, пневматическими, гидравлическими преобразователями движения.

10. Исследование взаимодействия импульсных электромагнитных машин с источниками питания и электрическими преобразователями (вторичными источниками питания).

11. Определение типовых структур и рациональных областей применения СЭМИС.

12. Сравнение устройств и систем с различными видами импульсных линейных приводов: пневматическими, гидравлическими, электрическими, комбинированными с целью определения рациональных областей применения каждой из силовых импульсных систем (СИС).

13. Использование и адаптация методов расчета, разрабатываемых в смежных областях, применительно к исследованию сило-

вых электромагнитных импульсных систем: методов структурного синтеза релейных схем, теории удара, теории вибрационных машин, топологические методы анализа и пр.

14. Создание новых и уточнение разработанных методов расчета статических и динамических характеристик импульсных ЛЭМД на основе полевых и комбинированных методов.

15. Разработка приближенных (инженерных) методов расчета различных ЛЭМД на основе экспериментальных исследований физических моделей и обработки численных экспериментов.

16. Распространение разработанных методов расчета электромагнитных импульсных (ударных) машин на другие виды систем и машин, в том числе, на гибридные.

17. Анализ моделей сложных (многообмоточных) силовых электромагнитных импульсных систем, как совокупность однотипных (однообмоточных) электромагнитных устройств.

18. Решение задач синтеза сложных структур силовых электромагнитных импульсных систем на основе модульного принципа.

19. Применение эксергетического метода анализа с целью выявления степени использования электрической, магнитной, механической энергий.

В области практических результатов перспективных исследований СЭМИС актуальны следующие работы по отдельным классам машин.

Ручной электроинструмент

Необходимо продолжить разработку и производство перфораторов и молотков с электромагнитным приводом. Это объясняется следующими факторами, отмеченными в [14]: независимое регулирование энергии и частоты ударов от изменения сопротивления вращения инструмента; изолированность корпуса перфоратора и руки оператора от воздействия знакопеременных импульсных усилий, обеспечивающих возвратно-поступательное движение бойка; большая надежность из-за отсутствия преобразователя вращательного движения в возвратно-

поступательное, вызывающего большие динамические нагрузки, возрастающие с увеличением энергии единичного удара; отсутствием компрессионно-вакуумных связей в ударном механизме, устраняющих повышенную чувствительность перфоратора к внешним воздействиям (отскоку бойка от инструмента, усилию нажатия); меньшие требования к точности изготовления деталей и меньшая трудоемкость их изготовления из-за отсутствия компрессионно-вакуумных связей в ударном механизме.

Прессовое оборудование

Возрастающая роль прессового оборудования в машиностроительном производстве связана с увеличением применения в машинах деталей, имеющих точные размеры и изготавливаемых методами обработки давлением. При этом неизбежно расширение номенклатуры и диапазона типоразмеров прессового оборудования за счет сложившихся в технике потребностей в увеличении размеров, с одной стороны, и, с другой стороны, в миниатюризации используемых в изделиях деталей. Указанные тенденции определяют создание для привода прессового оборудования, как микроэлектродвигателей, так и линейных электродвигателей большой мощности и соответствующих устройств питания и управления.

Мощные силовозбудительные установки

Совершенствование и создание новых технологий в технике в значительной степени связано с генерированием импульсов механической энергии со сверхвысокими параметрами в несколько миллионов ньютон

тонов и джоулей: погружение свай и уплотнение грунта в строительстве нефтяных и газовых платформ, активации продуктивного пласта, уплотнении грунта при выштамповке котлованов, возбуждение акустических сейсмических волн при разведке полезных ископаемых, испытание строительных конструкций, физическое моделирование экстремальных техногенных и природных воздействий на объекты жизнедеятельности и т. д. [10, 15].

Низкочастотные возбудители

Необходимо продолжить исследования по совершенствованию и созданию новых низкочастотных (до 100 Гц) вибрационных и виброударных возбудителей для интенсификации процессов, обработки поверхностей, дезинтеграции, транспортировки и сепарации материалов и т. д.

Несмотря на трудности и проблемы развития России в постсоветский период, отражающиеся на состоянии науки и образования, исследования по СЭМИС продолжаются в Институте горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирском государственном техническом университете (НЭТИ), Курганском государственном университете, Волгоградском государственном техническом университете, Тольяттинском государственном техническом университете, Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А., Саратовском государственном аграрном университете им. Н.И. Вавилова. По результатам работ по СЭМИС в обозреваемый период (40 лет) опубликованы 6 монографий, более 120 статей, получены 40 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ручные электрические машины ударного действия / Н.П. Ряшенцев, П.М. Алабужев, Н.И. Никитин и др. М.: Недра, 1970. 269 с.
2. Электромагнитные молоты / А.Т. Малов, Н.П. Ряшенцев, А.В. Носовец, Г.Г. Угаров и др. Новосибирск: Наука, 1979. 269 с.

3. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. Новосибирск: Наука, 1981. 150 с.
4. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. Новосибирск: Наука, 1989. 216 с.

5. **Ряшенцев Н.П.** Основные направления и программа работ по исследованию и созданию электромагнитных машин возвратно-поступательного действия / Н.П. Ряшенцев, Е.М. Тимошенко // Труды межвуз. конф. по электрическим машинам ударного действия. Новосибирск, 1967. С. 12-18.

6. **Усанов К.М.** Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. 284 с.

7. Формообразование и свойства деталей при дуговых процессах с внешним воздействием / Ю.Н. Казаков, В.В. Хорев, Г.Г. Угаров и др. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2007. 328 с.

8. **Мошкин В.И.** Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. 220 с.

9. **Егоров А.А.** Импульсный линейный электромагнитный привод устройств маркирования и клеймения мелкоразмерных деталей и изделий / А.А. Егоров, В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. 136 с.

10. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях / К.М. Усанов, В.И. Мошкин, В.А. Каргин, А.В. Волгин. Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2015. 202 с.

11. Мошкин В.И. Влияние режимных и конструктивных параметров линейных электромагнитных двигателей на эффективность электромеханического преобразования энергии / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. № 2 (66). Вып. 2. С. 124-129.

12. Мошкин В.И. Энергетические режимы импульсных линейных электромагнитных двигателей / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров // Труды IX Междунар. (XX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016). Пермь, 3-7 октября 2016 г. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2016. С. 71-76.

13. **Мошкин В.И.** Импульсные линейные электромагнитные приводы в энергосберегающих электротехнологиях / В.И. Мошкин, Г.Г. Угаров, О.В. Вдовина // Вопросы электротехнологии. 2014. № 1 (2). С. 86-90.

14. **Тимошенко Е.М.** Ручные электромагнитные перфораторы. Целесообразность разработки и производства / Е.М. Тимошенко, В.И. Попов, С.Н. Кучанов // Инструментальный мир. 2006. № 2 (15). С. 61-63.

15. Певчев В.П. Проектирование мощных короткоходовых импульсных электромагнитных двигателей: монография / В.П. Певчев, В.В. Ивашин. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 142 с.

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Камышинского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Мошкин Владимир Иванович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетика и технология металлов» ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет»

Gennady G. Ugarov – Dr. Sc., Professor, Department of Industrial Power Supply, Kamyslin Institute of Technology (branch) at Volgograd State Technical University, Russia

Vladimir I. Moshkin – Dr. Sc., Associate Professor, Head: Department of Energy and Metals Technology, Kurgan State University, Russia

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

ТВЕРДОСТЬ ОТВЕРЖДЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА С МОЛНИЕЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ, МОДИФИЦИРОВАННОГО В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.В. Злобина

HARDNESS OF THE CURED CARBON FIBER WITH A LIGHTNING -PROTECTIVE COATING MODIFIED IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD

I.V. Zlobina

В настоящее время отмечается повышенный интерес к полимерным композиционным материалам применительно к различным отраслям промышленности. Среди них можно выделить авиастроение, судостроение, ветроэнергетику. Это обусловлено высокими требованиями к прочностным характеристикам в сочетании с легкостью таких материалов. Особенно это важно в связи с крупногабаритными элементами, которые используются в установках данных отраслей.

В связи с вышесказанным актуальным является совершенствование таких материалов, в частности за счет дополнительного введения молниезащитных покрытий в сочетании с обработкой в СВЧ электромагнитном поле с целью повышения изотропии свойств композитов.

Ключевые слова: молниезащитное покрытие, равномерность свойств, повышение значений твердости, изотропия, полимерные композиционные материалы, СВЧ электромагнитное поле

Для изделий современной и перспективной авиационной техники и ветроэнергетики характерно широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1-4].

Currently, there is a growing interest to polymer composite materials applied in various industries, including aircraft manufacturing, shipbuilding, and wind power sector. This is due to strict requirements to their strength properties coupled with the light weight characteristic of these materials. This is of particular importance for the large-sized components installed in the units applied in these industries.

Therefore, it is critical to upgrade the quality of such materials, in particular, due to additional lightning protection coatings combined with their processing in the microwave electromagnetic field aimed to improve the properties related to isotropy of the composites.

Keywords: lightning protection coating, uniformity of properties, increased hardness, isotropy, polymer composite materials, microwave electromagnetic field

Необходимость конструирования крупногабаритных объектов для авиастроения и ветроэнергетики обуславливает сочетание использования таких конструкторско-технологических методов, как внедрение

в поверхностный слой материалов молниезащитных покрытий в виде металлических, например медных, сеток и воздействие СВЧ электромагнитного поля на отвержденные материалы с целью повышения их прочностных характеристик по значению и снижению их разброса. Молниезащита конструктивных элементов современных летательных аппаратов и лопастей ветрогенераторов, выполненных из полимерных композиционных материалов, являющихся диэлектриками, представляет собой одну из важнейших задач обеспечения надежности этого вида технических систем при эксплуатации в сложных метеоусловиях грозовых фронтов и активной циклонической деятельности. Это связано как с поражением разрядами молний, так и с накоплением статического электричества. В особенности сказанное относится к стекло- и органоэластикам. Углепластики, являясь полупроводниками, при поражении разрядами атмосферного электричества также получают повреждения, не обеспечивающие гарантированной безопасности дальнейшей эксплуатации объекта [5, 6]. Для молниезащиты используют различные технические решения, но наиболее распространенным в настоящее время является применение покрытий (МЗП) в виде металлической сетки, защищенной внешним полимерным или композиционным слоем.

Одним из эффективных технологических методов повышения прочности ПКМ является модифицирование структуры в процессе кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля, о чем свидетельствуют полученные отечественными и зарубежными исследователями результаты [7-11]. Нами установлен положительный эффект упрочнения угле- и стеклопластиков при воздействии на них СВЧ электромагнитного поля в отвержденном состоянии на финишной стадии технологического цикла [12, 13]. Однако полученные положительные результаты касались прочности стекло- и углепластиков при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг и не затрагивали вопросов изменения твердости материала под действием СВЧ электромагнитного по-

ля. В случае снижения твердости возможно ослабление сопротивления проникновению твердых предметов при ударном воздействии, что понизит обобщенные эксплуатационные характеристики изделия. Также наличие встроенной мелкоячеистой металлической сетки может создать экранирующий эффект и уменьшить воздействие СВЧ электромагнитного поля на расположенные за ней структуры. Важно также определить изменение твердости на различных участках поверхности изделия, что имеет значение для крупногабаритных конструкций.

Целью исследований явилось изучение влияния различных схем воздействия СВЧ электромагнитного поля на распределение твердости по поверхности образцов из отвержденного армированного углеродными волокнами ПКМ, в том числе с МЗП, в виде встроенной в поверхностный слой металлической медной сетки.

В экспериментах использовали образцы в виде плоскопараллельных пластин размерами $70 \times 35 \times 5$ мм из угле- и стеклопластика на эпоксидной матрице ЭД-20 производства ООО «Еврокомплект» (г. Калуга). Внешний вид образцов представлен на рис. 1. Экспериментальное количество образцов углепластика было разделено на две части. Одна часть испытывалась в исходном виде, на одну из поверхностей второй части образцов было нанесено молниезащитное покрытие из медной луженой сетки производства завода «Текстильмаш». Просвет ячеек сетки 0,5 мм. МЗП внедрено в слой эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА толщиной 1-1,5 мм. Образцы обрабатывали на экспериментальной установке, созданной на базе микроволнового излучателя «Жук-2-02» производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.). Использовали по 5 контрольных образцов и подвергнутых воздействию в течение 2 минут СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц с плотностью потока энергии (ППЭ) для углепластика $17 \cdot 10^4$ мкВт/см², для стеклопластика $(22-25) \cdot 10^4$ мкВт/см². При данных режимах согласно выполненным нами ранее исследованиям [12, 13] обеспечивается максималь-

ное повышение прочности ПКМ при действии статических нагрузок.

Обработку образцов с МЗП осуществляли по следующим схемам: воздействие СВЧ электромагнитного поля со стороны поверхности, несущей МЗП; воздействие СВЧ электромагнитного поля на поверхность, противоположную поверхности с МЗП; последовательное воздействие в течение равного промежутка времени на поверхность с МЗП и затем – на противоположную поверхность.

Определяли твердость двух поверхностей образцов до и после обработки в

15 точках, отстоящих друг от друга на расстоянии не менее 10 мм. Точки измерений располагали в три ряда (вблизи краев образца и в средней плоскости) по 5 точек. Для измерений использовали цифровой твердомер по Шору-Д NOVOTEST ТШ-Ц. Результаты измерений усредняли и по известным методикам статистической обработки результатов измерений [14, 15] определяли основные параметры распределения твердости и оценивали соответствие законов распределения этой величины нормальному.

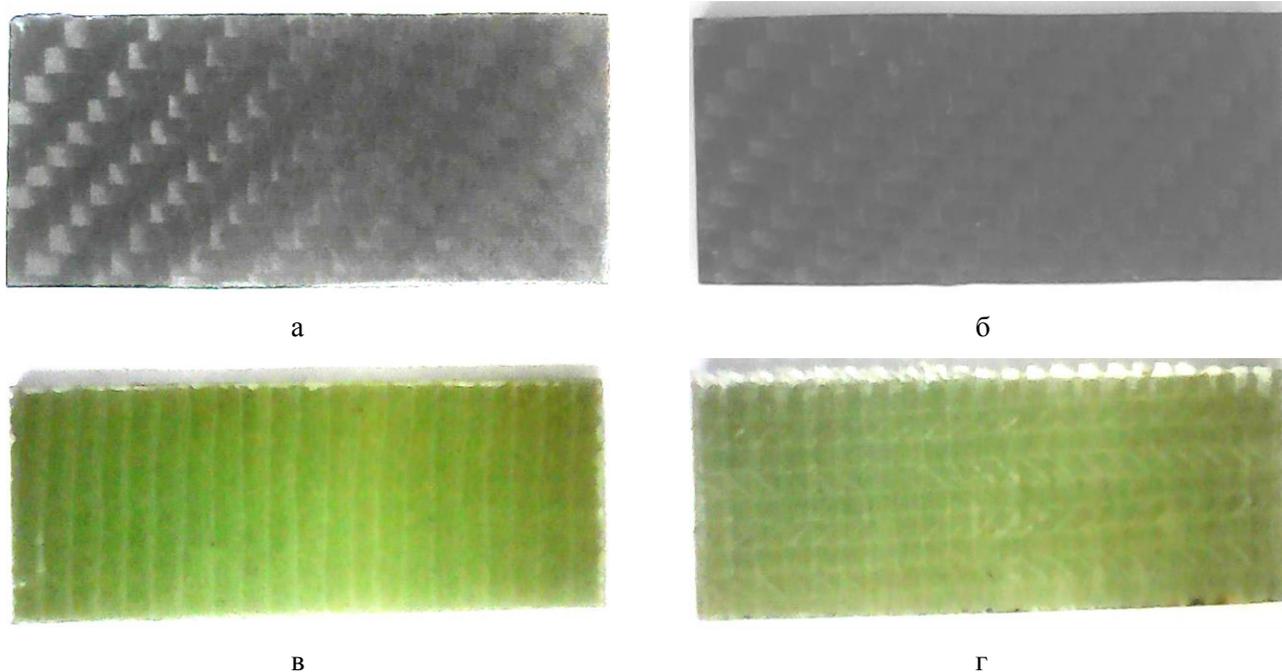


Рис. 1. Лицевая (а, в) и обратная (б, г) поверхности образцов угле- и стеклопластика

Установлено, что среднее значение твердости лицевой стороны контрольного и опытного образцов углепластика в серии из 25 измерений составляет соответственно 81,87 и 92,46 единиц. Твердость обратной стороны составляет соответственно 78,87 и 89,75 единиц. Таким образом, твердость поверхности опытных образцов возросла на (13-14)%. Данное увеличение твердости опытных образцов углепластика может являться следствием проявления одного из механизмов структурирования отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле, заключающегося в увеличении количества контактных областей матрицы и волокна

[13], уменьшении размеров макро- и мезоопор (рис. 2) и снижении общей пористости, что приводит к повышению плотности структуры матрицы.

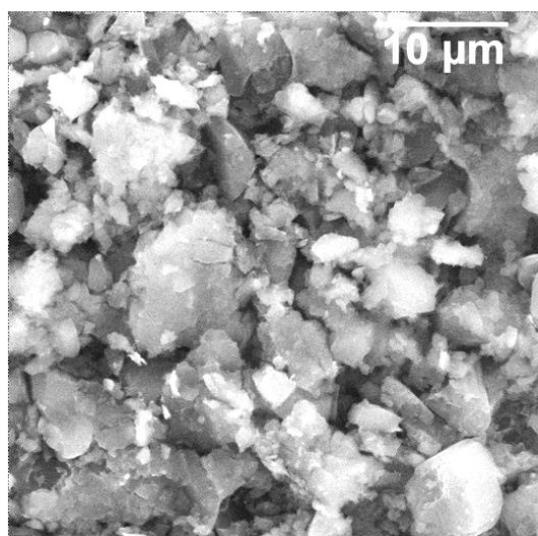
При испытаниях стеклопластика установлено, что средняя в серии из 25 измерений твердость лицевой (гладкой) стороны контрольного и опытного образцов составляет соответственно 85,58 и 88,3 единицы. Твердость обратной (рифленой) стороны составляет соответственно 79,0 и 82,3 единицы. Таким образом, после воздействия СВЧ электромагнитного поля увеличение твердости поверхности отвержденного стеклопластика возросла на (3-4)%, что ма-

лозначимо и не выходит за пределы статистической погрешности измерений. Причиной данного результата является то, что в принятых условиях эксперимента температура СВЧ диэлектрического нагрева матрицы и армирующих волокон оказалась недостаточной для конформационного структурирования матрицы и протекания в ней диффузионных процессов с формированием прочных межзеренных границ.

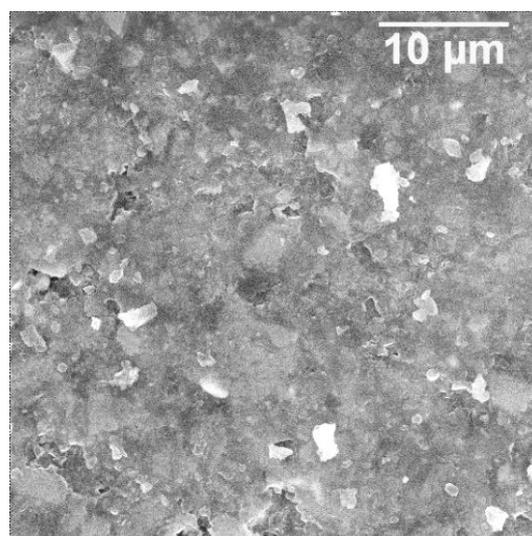
В углепластике, очевидно, помимо диэлектрического нагрева, проявляется до-

полнительное повышение температуры в межфазном слое «матрица-волокно» вследствие скин-эффектов в проводящих углеродных волокнах, что оказывается достаточным для реализации указанных механизмов, но при этом вследствие скоротечности не приводит к деструктивным изменениям материала.

Результаты исследований твердости поверхности образцов углепластика с МЗП и их обработки представлены в табл. 1 и на рис. 3.



а



б

Рис. 2. Микроструктура матрицы контрольного (а) и опытного (б) образцов углепластика

Таблица 1. Статистические параметры распределения твердости контрольных и опытных образцов углепластика с МЗП

Схема обработки образца	Измерения	Размах вариации $R = X_{\max} - X_{\min}$	Коэффициент вариации $V = (\sigma/X_0)100\%$
Контрольный	Со стороны сетки	6,5	1,946
	С противоположной стороны	5	1,42
Обработанный со стороны сетки	Со стороны сетки	5	1,31
	С противоположной стороны	2	0,635
Обработанный с противоположной стороны	Со стороны сетки	5	1,67
	С противоположной стороны	3,5	1,084
Обработанный со стороны сетки и затем с противоположной стороны	Со стороны сетки	6	1,815
	С противоположной стороны	2,5	0,638

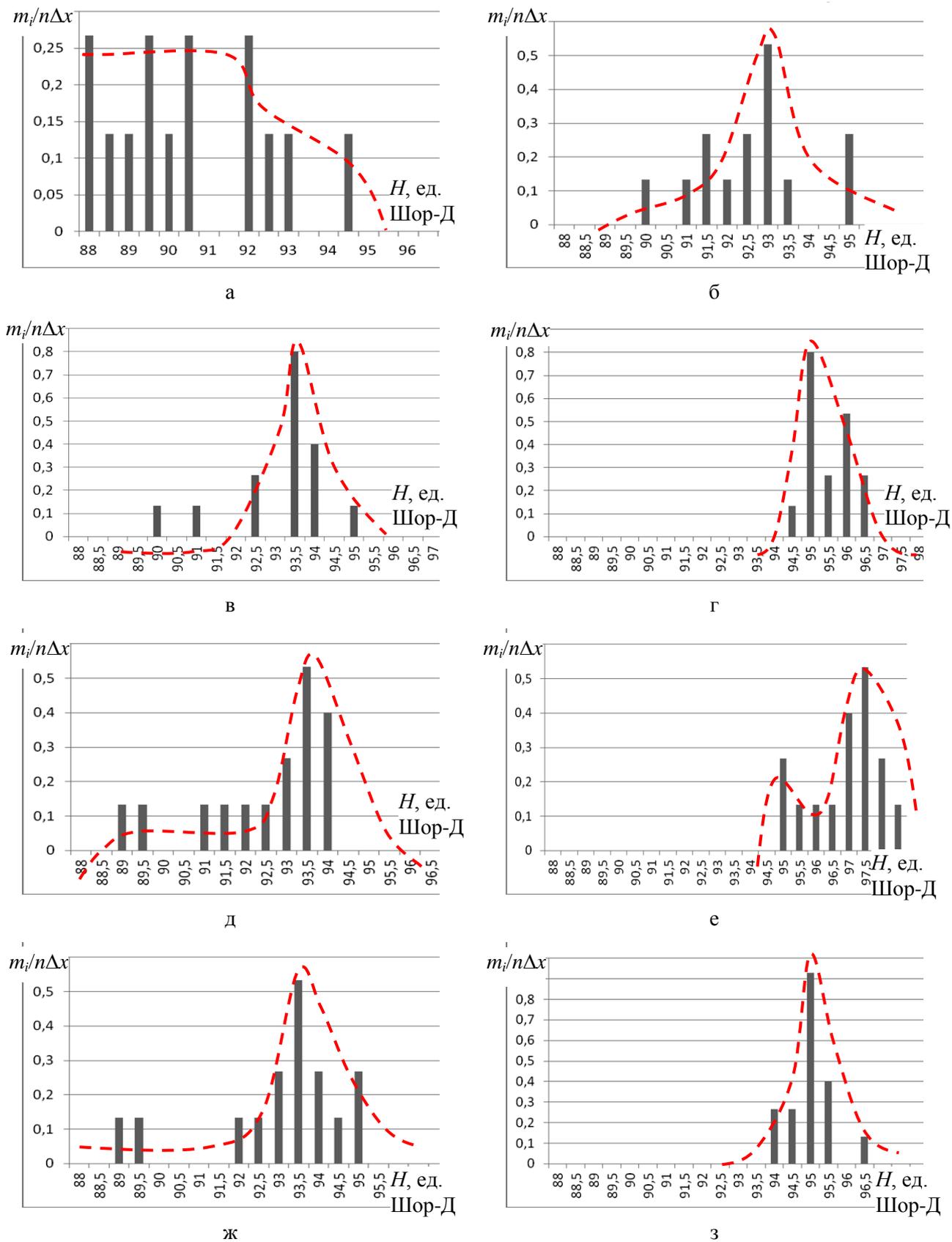


Рис. 3. Гистограммы плотности вероятности распределения твердости поверхности контрольных образцов (а, б) и опытных, обработанных со стороны МЗП (в, г), обработанных со стороны, противоположной МЗП (д, е), и обработанных последовательно с двух сторон (ж, з). Остальные пояснения в тексте

В результате исследований установлено увеличение средней твердости обработанной поверхности относительно исходной на (1,5-4,5)%, что можно считать малозначимым и не выходящим за пределы ошибки измерений. Наибольшие изменения – увеличение на (6-8)% – касаются поверхности внешнего слоя эпоксидной смолы, покрывающей МЗП. Однако и эти значения можно считать малозначимыми, не выходящими за пределы статистической погрешности и точности прибора. Существенные отличия касаются параметров, характеризующих статистическое распределение значений твердости по поверхности.

Видно, что модальные и средние значения твердости как исходной, так и обработанной по различным схемам поверхности, практически не отличаются. В то же время плотность вероятности модальных значений твердости и максимумы функции плотности вероятности для опытных образцов выше от 1,18 до 2,5 раза.

По представленным диаграммам плотности вероятности распределения твердости отмечается, что обе поверхности контрольных образцов характеризуются крайней неравномерностью твердости, что особенно выражено у поверхности с МЗП, где практически не удается выделить единственное модальное значение. Это может быть связано с нестабильным взаимодействием однослойного эпоксидного покрытия и медной сетки. Равномерность твердости противоположной поверхности выше, но тоже имеет несколько выраженных экстремумов.

Гистограммы твердости поверхности опытных образцов имеют выраженные экстремумы, определяющие модальные значения исследуемого параметра. Полученные гистограммы имеют схожий характер, зависимости в целом являются плавными и носят сглаженный характер.

После обработки в СВЧ электромагнитном поле происходит существенное (от 1,8 для поверхности с МЗП до 2,2 раза для противоположной поверхности) сни-

жение коэффициента вариации твердости от среднего значения. Указанные результаты отмечаются для схем обработки ПКМ со стороны, противоположной МЗП, или при последовательной обработке с двух сторон. Значительно меньший эффект при обработке со стороны МЗП связан с отражением части волны СВЧ электромагнитного поля во внешнюю среду.

Отмеченные эффекты по повышению равномерности твердости по поверхности опытных образцов углепластика с МЗП, очевидно, аналогичны указанным выше и связаны со структурированием матрицы и интенсификацией диффузионных процессов в СВЧ электромагнитном поле. При этом в случае обработки образцов со стороны, противоположной МЗП, дополнительное воздействие оказывается отраженным от МЗП внутрь ПКМ полем.

Таким образом, показано, что воздействие СВЧ электромагнитного поля способствует повышению твердости поверхности углепластика, значимо не влияя на данный параметр стеклопластика.

При обработке углепластика с МЗП СВЧ воздействие способствует выравниванию значений твердости поверхности материала как со стороны сетки МЗП, так и с противоположной стороны, о чем свидетельствует снижение коэффициента вариации в 1,8-2,2 раза и размаха вариации в 1,5-2 раза, не приводя к значимому изменению средних ее величин.

Полученные результаты подтверждают гипотезу об упрочняющем эффекте воздействия СВЧ электромагнитного поля на отвержденные полимерные композиционные материалы по механизму структурирования матрицы и увеличения количества поверхностей контактного взаимодействия в межфазном слое и могут быть использованы при разработке технологий финишной обработки изделий из отвержденных ПКМ для повышения устойчивости последних к воздействию ударных нагрузок.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-00240

«Раскрытие механизма взаимодействия микроволнового излучения с отвержденными полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон в сочетании с внедренными в поверхностный слой связанными металлически-

ми элементами, периодически распределенными в плоскости армирования наполнителем, применительно к конструкционным элементам авиационных робототехнических комплексов».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кошкин Р.П.** Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем / Р.П. Кошкин. <http://spmagazine.ru/420>.

2. <http://compositeonline.ru/technology/3989/>.

3. https://vpk.name/news/195774_fpi_sozd_at_kompaktnogo_letayushego_robota.html.

4. **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.

5. Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты лопастей ветрогенераторов / Л.Р. Вишняков, О.В. Зубков, В.А. Коханый, И.Н. Коханая // *Технологические системы*. 2014. № 1. С. 58-63.

6. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содержащие наночастицы / Г.М. Гуняев, Л.В. Чурсова, А.Е. Раскутин и др. // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2012. № 3. С. 24-35.

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

8. **Калганова С.Г.** Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле: дис. ... д-ра техн. наук / С.Г. Калганова. Саратов: СГТУ, 2009.

9. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа / В.А. Коломейцев, Ю.А. Кузьмин,

Д.Н. Никуйко, А.Э. Семенов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2013. Т. 18. № 12. С. 25-31.

10. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, et al. // *Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*. 2004. № 11. P. 33.

11. Inderdeep Singh Feasibility study on microwave joining of 'green' composites / Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajraia, et al. // *Akademeia*. 2011. № 1 (1): ea0101. P. 1-6.

12. **Злобина И.В.** Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструкционных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Саратов: СГТУ, 2017. 164 с.

13. Теоретико-экспериментальное исследование влияния параметров межфазной зоны отвержденного полимерного композиционного материала под действием микроволнового излучения на его прочностные характеристики / И.В. Злобина, К.С. Бодягина, С.П. Павлов и др. // *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева Сер. Механика предельного состояния*. 2018. № 4 (38). С. 34-48.

14. **Кравченко Н.С.** Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учеб. пособие / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. 88 с.

15. Показатели, характеризующие вариацию значений признака. <https://studfiles.net/preview/5316293/page:3/>.

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

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

Статья поступила в редакцию 20.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

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.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СВЕРЛЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРСТИЙ В КОНСТРУКЦИОННОМ УГЛЕПЛАСТИКЕ

Г.К. Мулдашева

EFFECT OF ULTRASONIC DRILLING ON THE SURFACE QUALITY OF HOLES IN THE STRUCTURAL CARBON FIBER

G.K. Muldasheva

Статья посвящена описанию результатов исследования морфологии поверхности сквозных и глухих отверстий малого диаметра, полученных ультразвуковым сверлением в конструкционном углепластике. Установлено, что сообщение инструменту ультразвуковых колебаний малой амплитуды способствует формированию однородной морфологии поверхности отверстий без вырывов, отслоений и раковин. На боковой поверхности отверстий, обработанных с воздействием ультразвука, практически отсутствуют выдернутые и разориентированные армирующие волокна, что свидетельствует о повышении качественных показателей размерной обработки углепластиков.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, ультразвук, сверление, дефекты, морфология поверхности

Для современного этапа производства перспективных транспортных и энергетических систем характерно расширение применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных тканями на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон. Аналитиками прогнозируется рост мирового потребления ПКМ с 12,3 млн т в 2020 г. до 14,0 млн т в 2024 г. [1, 2]. Это определяется их большей по сравнению с металлами и сплавами удельной прочностью и возможностью формировать свойства ма-

The article presents the results of research into surface morphology of the through and blind holes with small diameters obtained by ultrasonic drilling of the structural carbon fiber. It has been established that imparting ultrasonic vibrations of small amplitudes to a work tool ensures a uniform morphology to the surface of the holes, which helps avoiding the breaks, delaminations, or blow holes. On the sides of the holes treated by the ultrasound, the pulled and disoriented reinforced fibers are missing, which provides higher dimensional accuracy to the carbon fiber reinforced plastics.

Keywords: polymer composite materials, ultrasound, drilling, defects, surface morphology

териала одновременно с конструкцией изделия. Помимо технологий синтеза компонентов и формования многослойных изделий в их производстве, значительное место занимают так называемые операции постобработки: кромочная, образование крепежных отверстий и стыковочных пазов и базовых точных поверхностей, выполняющиеся методами резания лезвийным и абразивным инструментом [3]. Неоднородность структуры отвержденных формованных углепластиков, состоящих из относительно мягкой и вязкой

матрицы и высокотвердых нитевидных армирующих структур, приводит к усложнению механизмов резания, а также дефектам: шероховатости, волнистости, вырывам и сколам, ворсистости, трещинам и царапинам, отклонению формы и взаимного расположения поверхностей [4]. Для устранения указанных проблем механической обработки ПКМ используют различные методы. В частности, нанесение дополнительного покрытия на основе эпоксидных смол, применение технологических наполнителей, терморезание с глубоким охлаждением материала, обработка с предразрушением, вибрационное резание, применение специальной заточки инструмента для формирования оптимальных углов резания неоднородной структуры материала и др. [5-8]. При этом наибольшую трудность с точки зрения обеспечения качества поверхности резания представляет сверление ПКМ вследствие пакетирования канавок матрицей, пластичность которой оказывается повышенной вследствие нагрева при выделении тепла в зоне резания, а также выдергивания волокон, срезание которых затруднено по причине большой прочности и упругости.

С учетом положительного отечественного и зарубежного опыта представляется целесообразным исследовать эффективность ультразвука при сверлении ПКМ.

Целью работы явилось исследование влияния ультразвуковых колебаний инструмента на качество поверхности отверстий при обработке конструкционных углепластиков.

Изучали качество поверхности сквозных и глухих отверстий при сверлении углепластика с сообщением спиральному сверлу ультразвуковых колебаний. Обработывали образцы размерами $70 \times 10 \times 5$ мм из углепластика производства ООО «Еврокомплект», г. Калуга. Использовали сверла со стандартной заточкой из стали Р6М5 $\varnothing 3,5$ мм. Обработку осуществляли на токарно-винторезном станке ТВ-106,

на пиноли задней бабки которого закрепляли пьезокерамический электромеханический преобразователь не пьезокерамических элементах ЦТС-19 диаметром 30 мм (рис. 1). Рабочая частота преобразователя – 25,0 кГц, на вершине сверла обеспечивалась амплитуда колебаний 3-8 мкм. Обработку осуществляли при частоте вращения шпинделя 375 об/мин. Экспериментальный образец с целью исключения дополнительных повреждений поверхности при вскрытии отверстия выполняли из двух частей, собираемых в специальной оснастке. Сверление осуществляли с прохождением оси отверстия через плоскость стыка частей образца. После окончания процесса сверления нескольких отверстий образцы разделяли и изучали их кромки и поверхность отверстия при помощи цифрового оптического микроскопа Bresser LCD MICRO 5MP при увеличении $\times 40$. С целью минимизации влияния затупления кромок инструмента сверление осуществляли с чередованием метода обработки: первое отверстие – без ультразвука, второе – с ультразвуком, третье – без ультразвука и т. д.

Регулировку амплитуды колебаний вершины сверла осуществляли изменением величины напряжения в силовом контуре генератора в диапазоне 150-200 В. Стабильная работа колебательной системы обеспечивалась подстройкой частоты выходного напряжения в резонанс с собственной частотой системы путем изменения емкости регулирующего конденсатора.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2 и 3.

Внешний вид половины образца с отверстиями представлен на рис. 2. Внешний вид кромок отверстий и микрорельеф их поверхности представлены на рис. 3. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о существенном улучшении поверхности отверстий, полученных при сообщении сверлу ультразвуковых колебаний.

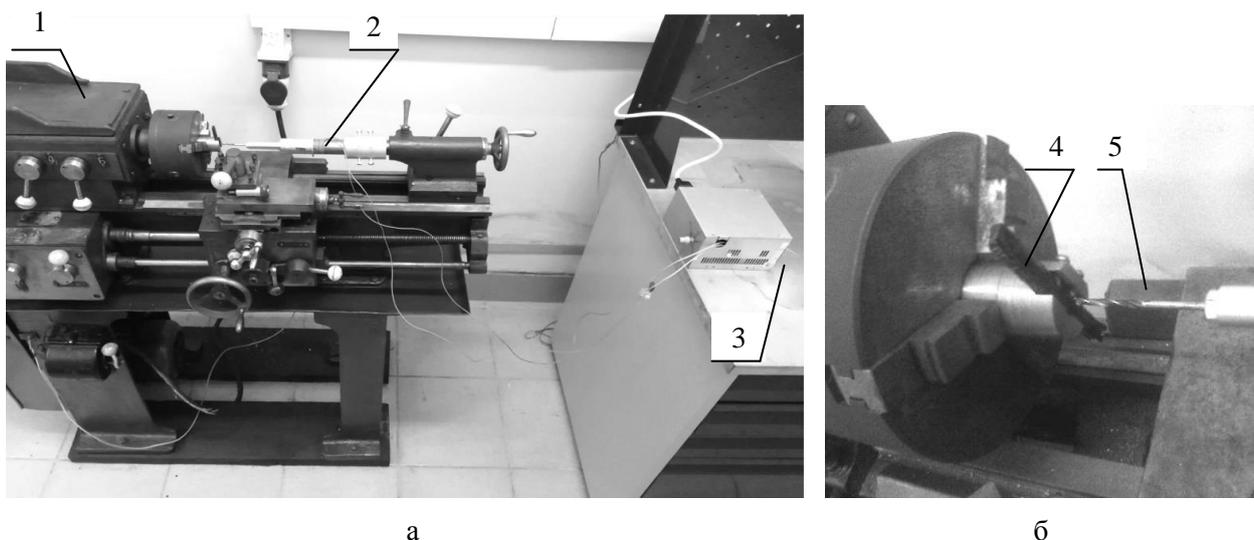


Рис. 1. Рабочее место для исследования ультразвукового сверления углепластиков: а – общий вид станка с ультразвуковым устройством; б – рабочая зона с закрепленным в оснастке образцом; 1 – токарно-винторезный станок, 2 – ультразвуковой электромеханический преобразователь на задней бабке станка, 3 – ультразвуковой генератор, 4 – образец, 5 – сверло



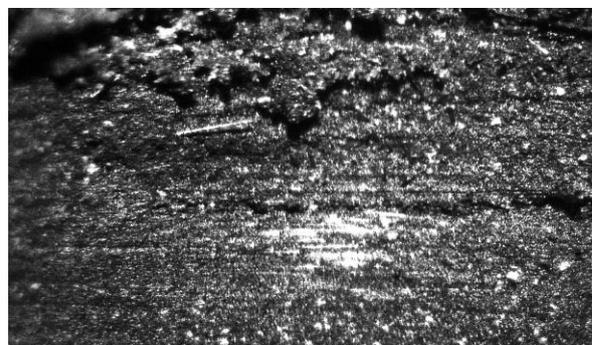
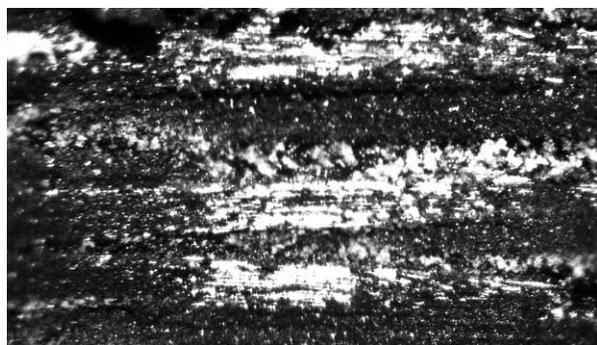
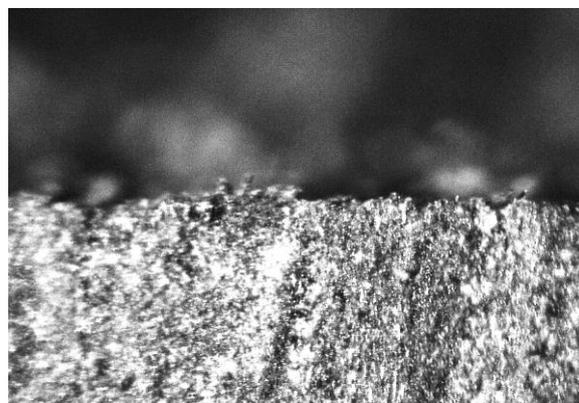
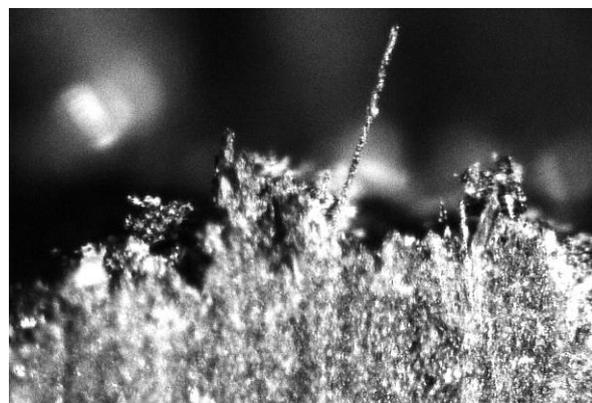
Рис. 2. Образец со сквозными и глухими отверстиями. Разъем по средней плоскости отверстий

Если на кромках отверстий в процессе обычного сверления образуются каверны в матрице и отдельные вырванные из основного материала армирующие волокна с образованием микрорельефа со средней высотой элементов до 40-60 мкм, то микрорельеф поверхности отверстий, обработанных с воздействием ультразвука, характеризуется однородностью, отсутствием каверн и выдернутых волокон. Средняя высота элементов профиля не превышает 5-6 мкм. Поверхность отверстия ровная с незначительными микротрещинами, в то время, как на поверхности отверстий при обычном сверлении вследствие вырыва отдельных волокон и их жгутов образуются кольцевые канавки, приводя к крайне неод-

нородному микрорельефу. При этом значимость отмеченных эффектов зависит от амплитуды колебаний вершины инструмента. При амплитуде 3-4 мкм эффект повышения качества поверхности менее выражен, наблюдается пакетирование стружки в канавках сверла, хотя и в меньшей степени, стружка выглядит более рыхлой, что свидетельствует о более низких температурах в зоне резания, препятствующих сплавлению частиц матрицы. Максимальный эффект достигается при амплитудах 5-6 мкм. При амплитудах более 6 мкм дальнейшего снижения дефектности поверхности не происходит, поэтому ее увеличение нецелесообразно вследствие повышенного выделения тепла на пьезоке-

рамических элементах преобразователя, вызванных переходом значительной части энергии колебаний зерен пьезокерамики

в тепловую при их смещении от положения равновесия с большей амплитудой.



а

б

Рис. 3. Характерный вид продольных кромок и морфологии поверхности отверстий ($\times 40$), полученных обычным (а) и ультразвуковым (б) сверлением

Полученный результат может быть объяснен облегчением разрушения более твердых и жестких волокон армирующего компонента при воздействии ультразвука за счет быстрого исчерпания их запаса усталостной прочности, что характерно для данного метода воздействия. В результате волокна не выдергиваются из менее прочной матрицы, а диспергируются. Продукты диспергирования эвакуируются по спиральным канавкам сверла вместе с частицами матрицы.

Таким образом, сообщение сверлу ультразвуковых колебаний с амплитудой

5-6 мкм может быть использовано для повышения качества размерной обработки изделий из конструкционных углепластиков различного назначения. Целесообразно продолжение исследований в части установления зависимости качества и производительности обработки от частоты колебаний инструмента и ориентации вектора колебаний с учетом схемы армирования ПКМ, а также определить рациональные соотношения скорости резания и колебательной скорости вершины сверла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г.М. Гуняев, В.В. Кривонос, А.Ф. Румянцев и др. // Конверсия и машиностроение. 2004. № 4. URL: [www: viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

2. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов / М.С. Дориомедов // Труды ВИАМ. 2020. № 6-7 (89). С. 29-37.

3. **Комаров Г.В.** Свойства ПКМ, влияющие на их способность соединяться / Г.В. Комаров // Полимерные материалы. 2010. № 2-3. С. 18-27.

4. **Мешкас А.** Пути решения проблем механической обработки композиционных материалов на машиностроительном предприятии / А. Мешкас, В. Макаров, В. Ширинкин // Станкоинструмент. 2016. № 3. С. 55-59.

5. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого, В.А. Колесник и др.; под общ. ред. проф. В.А. Залого. Сумы: Университетская книга, 2013. 272 с.

6. **Ярославцев В.М.** Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов / В.М. Ярославцев // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2012. № 4. С. 1-22. 77-30569/361759. № 04 апрель 2012 г. <http://technomag.edu.ru> 14

7. **Зубарев Ю.М.** Особенности технологии механической обработки углепластиков / Ю.М. Зубарев, А.В. Приемьшев, А.С. Заостровский // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 5. С. 30-33.

8. **Лобанов Д.В.** Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: монография / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин. Старый Оскол: ТНТ, 2012. 296 с.

Мулдашева Гузель Канаткалиевна – соискатель кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Gusel K. Muldasheva – Doctoral student, Department of Mechanics and Mechatronics, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.01.20, принята к опубликованию 15.02.20

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 телефону:

8 (951) 880-19-13 – Юдина Виолетта Олеговна (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Калгановой С.Г. 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.

Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д., и т. п.). Допускается введение предварительно расшифрованных сокращений.

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 Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (8452) 99-87-63
E-mail: eltech@sstu.ru

Подписано в печать 28.09.2020
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 7,5 Уч. изд. л. 3,3
Тираж 500 экз. Заказ 96 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 1-е полугодие 2021 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by 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: 28.09.2020
Paper size: 60×84 1/8. Offset-Print
Conventional printed sheet 7,5 Publication base sheet 3,3
Circulation: 500 printed copies. Order 96 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*