

Издается с ноября 2013 года
Выходит один раз в квартал

№ 2 (7)

Июнь 2015

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

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

Главный редактор

д.т.н., профессор **Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**

Зам. главного редактора

д.т.н., профессор **Н.В. БЕКРЕНЕВ**

Ответственный секретарь

к.т.н. **В.С. АЛЕКСЕЕВ**

Редакционный совет

Ю.С. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.А. БУШУЕВ

д.э.н., генеральный директор ОАО НПП «Алмаз», г. Саратов

С.М. ЛИСОВСКИЙ

д.т.н., профессор, министр промышленности и энергетики правительства Саратовской области

А.А. СЫТНИК

д.т.н., профессор, первый проректор СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Н.В. БЕКРЕНЕВ

д.т.н., заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Редакционная коллегия

И.Н. АНТОНОВ

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

Н.В. БЕКРЕНЕВ

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

В.Б. ДЕМИДОВИЧ

д.т.н., профессор, СПбГЭУ (ЛЭТИ), Санкт-Петербург

Л.С. ЗИМИН

д.т.н., профессор, СамГТУ, Самара

Н.И. ЛОВЦОВА

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

В.Н. ЛЯСНИКОВ

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

А.Н. МАКАРОВ

д.т.н., профессор, ТГТУ, Тверь

Г.А. МОРОЗОВ

д.т.н., профессор, КНИТУ имени А.Н. Туполева (КАИ), Казань

Ю.П. ПЕРЕЛЫГИН

д.т.н., профессор, ПГУ, Пенза

А.Н. ПЛОТНИКОВ

д.э.н., профессор, 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

Б.К. СИВЯКОВ

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

Ю.Б. ТОМАШЕВСКИЙ

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

Г.Г. УГАРОВ

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

В.Н. ХМЕЛЕВ

д.т.н., профессор, БТИ, Бийск

В.А. ЦАРЕВ

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

В.С. АЛЕКСЕЕВ

к.т.н., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов

Since November 2013
Published Quarterly

№ 2 (7)
June 2015

JOURNAL OF ELECTROTECHNICS

Scientific and Technical Publication

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

Chief Editor
Assistant to the Chief Editor
Chief Executive Officer

Dr.Sc., Professor **YU.S. ARKHANGELSKIY**
Dr.Sc., Professor **N.V. BEKRENEV**
PhD **V.S. ALEKSEEV**

Editorial Advisory Committee

YU.S. ARKHANGELSKIY	Dr. Sc., Professor at Department of Automated Installations and Systems in Electrotechnology, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.A. BUSHUEV	Dr.Sc., Director General at JSC <i>Almaz</i>
S.M. LISOVSKIY	Dr.Sc., Professor at Department of Welding and Metallurgy, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Minister for Industry and Energy in Saratov oblast
A.A. SYTNIK	Dr.Sc., Professor, First Vice-Rector, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr.Sc., Head at Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Editorial Board Members

I.N. ANTONOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
N.V. BEKRENEV	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.B. DEMIDOVICH	Dr.Sc., Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
L.S. ZIMIN	Dr.Sc., Professor, Samara State Technical University
N.I. LOVTSOVA	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.N. LYASNIKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
A.N. MAKAROV	Dr.Sc., Professor, Tver State Technical University
G.A. MOROZOV	Dr.Sc., Professor, Kazan National Research Technological University
YU.P. PERELYGIN	Dr.Sc., Professor, Penza State University
A.N. PLOTNIKOV	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.P. RUBTSOV	Dr.Sc., Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
F.N. SARAPULOV	Dr.Sc., Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg
B.K. SIVYAKOV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
YU.B. TOMASHEVSKY	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
G.G. UGAROV	Dr. Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.N. KHMELEV	Dr.Sc., Professor, Biysk Technological Institute
V.A. TSAREV	Dr.Sc., Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
V.S. ALEKSEEV	PhD, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

СОДЕРЖАНИЕ

Уважаемые коллеги!	5
ЭЛЕКТРОФИЗИКА	
Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Хмелев С.С. Ультразвуковые технологии и оборудование для интенсификации процессов.....	6
Хмелёв В.Н., Сливин А.Н., Абрамов А.Д., Хмелев С.С. Развитие технологии и создание оборудования ультразвуковой сварки георешеток.....	15
Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Попова Н.С., Генне Д.В. Контроль параметров ультразвуковых колебательных систем для исследования кавитационной активности.....	22
Бекренев Н.В., Злобина И.В. Разработка ультразвуковых технологий обработки пластическим деформированием неоднородных композиционных материалов в Саратове	28
Бекренев Н.В., Злобина И.В., Петровский А.П. Модель воздействия энергии ультразвуковых колебаний на структуру твердых хрупких материалов	35
ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ	
Архангельский Ю.С., Фёдоров А.В. К расчёту камер с бегущей волной установок СВЧ диэлектрического нагрева, работающих в многочастотном режиме.....	42
Злобина И.В., Бекренев Н.В. Применение фрактального анализа для количественной оценки влияния СВЧ диэлектрического нагрева композиций органических материалов на параметры их структуры	50
Архангельский Ю.С. К вопросу о экономической, энергетической эффектив-	
ностях и равномерности термообработки в СВЧ электротермических установках.....	55
Захаров В.В. Применение электротехнологии в газовой отрасли	61
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ	
Артюхов И.И., Галета М.В. Моделирование в среде Matlab тиристорного преобразователя частоты для питания индукционных нагревателей	66
Артюхов И.И., Земцов А.И., Тютманова В.В. Экспериментальное исследование характеристик магнетронного генератора малой мощности.....	72
ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА	
Вдовина О.В., Угаров Г.Г. Определение основных параметров технологической зоны силового воздействия линейного электромагнитного двигателя в наплавочных процессах	77
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ	
Бозриков А.В., Антонов И.Н. Композиционный полимерный материал с токопроводящей арматурой.....	82
ЛЕТОПИСЬ	
Бессмертный полк (Беседа с О.Н. Дмитриевой)	86
Бекренев Н.В. Марков Алексей Иванович.....	90
Лаборатория акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института	92
Котина Н.М. Конюшков Геннадий Владимирович	94
К сведению авторов.....	95

CONTENTS

Dear colleagues!	5
------------------------	---

ELECTROPHYSICS

Khmelev V.N., Tsyganok S.N., Khmelev S.S. Ultrasonic Technologies and Equipment for Intensification of Processes.....	6
Khmelev V.N., Slivin A.N., Abramov A.D., Khmelev S.S. Development of Technology and Design of Equipment for the Geocell Ultrasonic Welding.....	15
Khmelev V.N., Barsukov R.V., Ilchenko E.V., Popova N.S., Genne D.V. Controlling Parameters of Ultrasonic Oscillatory Systems to Research the Cavitation Activity.....	22
Bekrenev N.V., Zlobina I.V. Development of Ultrasonic Technologies in the Processing by Plastic Deformation of non-Uniform Composite Materials in Saratov	28
Bekrenev N.V., Zlobina I.V., Petrovsky A.P. A Model to Impact the Ultrasonic Fluctuations Energy on the Structure of Solid Fragile Materials.....	35

ELECTROTHERMY

Arkhangelskiy Yu.S., Fedorov A.V. Calculation of the Running-Wave Cameras of Microwave Plants Operating under the Multiple-Frequency Mode	42
Zlobina I.V., Bekrenev N.V. Application of the Fractal Analysis for the Qualitative Assessment of the Influence of Microwave Oven Dielectric Heating of Organic Materials on the Parameters of their Structure	50

Arkhangelskiy Yu.S. The Issues Commercial and Energy Efficiency and Uniform Heat Treatment in Microwave Electrothermal Installations.....	55
Zakharov V.V. Using Electrotechnology in Gas Industry.....	61

ELECTRIC POWER SUPPLY

Artyukhov I.I., Galeta M.V. Simulation in Matlab of Thyristor Frequency Converters for the Supply of Induction Heaters.....	66
Artyukhov I.I., Zemtsov A.I., Tyutmanova V.V. The Characteristics of the Magnetron Generator of Low Power as an Object of Regulation.....	72

ELECTROMECHANICS

Vdovina O.V., Ugarov G.G. Defining the Basic Parameters of the Technological Power Impact Zone in the Linear Electromagnetic Motor During the Surfacing Processes	77
--	----

MATERIALS SCIENCE

Antonov I.N., Bozrikov A.V. The Composite Polymer Material With a Conductive Armature.....	82
---	----

CHRONICLE

Immortal Regiment (Interview with O.N. Dmitrieva)	86
Bekrenev N.V. Markov Aleksey Ivanovich.....	90
Laboratory of Acoustic Processes and Devices of Biysk Technological Institute	92
Kotina N.M. Konyushkov Gennadiy Vladimirovich.....	94
Information for Authors.....	95

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

В ноябре 2015 года журналу «Вопросы электротехнологии» исполняется два года, и можно будет ходатайствовать о включении журнала в список ВАК.

В связи с Заключением Президиума ВАК №47/307 от 19.12.14 «О формировании перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций», рекомендующим включать в перечень рецензируемые научные издания не более чем по трем отраслям науки, при этом в совокупности не более чем по пяти группам специальностей с указанием специальностей, редакционная коллегия журнала «Вопросы электротехнологии» в ходатайстве в ВАК планирует указать следующие отрасли науки, группы специальностей и специальности:

Физико-математические науки

01.04.14 – Электрофизика, электрофизические установки.

Химические науки

02.00.05 – Электрохимия.

Технические науки

05.09.01 – Электромеханика, электрические аппараты,

05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия,

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы,

05.09.10 – Электротехнология,

05.09.12 – Силовая электроника,

05.11.01 – Приборы и методы измерений (измерения в электротехнологии),

05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (в области электротехнологии),

05.17.03 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии,

05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов.

Рубрикам журнала «Вопросы электротехнологии» соответствуют следующие специальности научных работников:

Электротермия – 05.09.10;

Электрохимия – 02.00.05; 05.09.10; 05.17.03; 05.17.06;

Электрофизика – 01.04.14; 05.09.10;

Электросварка – 05.09.10;

Электромеханика – 05.09.01; 05.09.10;

Электроснабжение – 05.09.03; 05.09.10;

Электроника – 05.09.10; 05.09.12;

Электродинамика – 05.09.10;

Материаловедение – 05.09.02; 05.09.10;

Измерения – 05.09.10; 05.11.01;

Системы управления – 05.09.10; 05.11.16;

Социальный аспект – 05.09.03; 05.09.10.

Главный редактор,
профессор Архангельский Ю.С.

ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 621.9.048.6

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ

В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, С.С. Хмелев

ULTRASONIC TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR INTENSIFICATION OF PROCESSES

V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, S.S. Khmelev

Рассматриваются технологии и оборудование для интенсификации химико-технологических процессов механическими колебаниями ультразвуковой частоты высокой интенсивности. Приводятся конкретные примеры отдельных ультразвуковых технологических аппаратов.

Ключевые слова: *ультразвуковое воздействие, высокоинтенсивные ультразвуковые колебания, ультразвуковой аппарат, интенсификации технологических процессов*

The article describes technologies and equipments for intensification of chemical and technological processes using high intensity ultrasonic vibrations. Examples of ultrasonic technological devices are described.

Keywords: *ultrasonic treatment, high-intensity ultrasonic vibrations, ultrasound equipment, an intensification of technological processes*

Преобразование электрической энергии в упругие, высокоинтенсивные (более 1 Вт/см^2) колебания ультразвуковой частоты (более 20 кГц), введение их в различные технологические среды (твердые, жидкие и газообразные) для изменения структуры и свойств материалов, дают возможность разрабатывать уникальные технологии создания новых материалов. Эти технологии основаны на способности высокоинтенсивных колебаний ультразвуковой частоты разрушать молекулярные и атомные структуры за счет формирования локальных разрывов жидких сред с образованием взрывающихся кавитационных пузырьков.

Возможность переноса большой энергии в любых материальных средах, отра-

жения, фокусирования и направления этой энергии в определенные зоны воздействия обуславливает широкое применение высокоинтенсивного ультразвука в различных областях, таких как:

- интенсификация технологических процессов в жидких и жидко-дисперсных средах;
- интенсификация технологических процессов в твердых материалах;
- мелкодисперсное распыление жидких сред;
- научные и лабораторные исследования по получению новых материалов и изучению их свойств;
- реализация процессов в газовых средах (коагуляция) и воздействие на материальные объекты через нерезонансные

газовые промежутки (сушка, пеногашение);

- получение, обработка и применение наночастиц;
- реализация медицинских технологий разрушающего, стимулирующего и косметического воздействия.

Примеры химико-технологических процессов, основанных на ультразвуковом воздействии:

- в металлургии – переработка минерального сырья, обогащение и процессы гидрометаллургии руд металлов;
- в нефтяной и газовой промышленности – рекуперация нефтяных скважин, экстракция вязкой нефти, процессы разделения в системе песок – тяжелая нефть, повышение жидкотекучести тяжелых нефтепродуктов;
- в машиностроении – рафинирование металлических расплавов, измельчение структуры слитка / отливки, обработка металлической поверхности для ее упрочнения и снятия внутренних напряжений, очистка внешних поверхностей и внутренних полостей деталей машин;
- в химической и биотехнологической промышленности – процессы экстракции, сорбции, фильтрации, сушки, эмульгирования, получения суспензий, смешения, диспергирования, растворения, флотации, дегазации, испарения, коагуляции, коалесценции, процессы полимеризации и деполимеризации, получение наноматериалов;
- в энергетике – сжигание жидкого и твердого топлива, приготовление топливных эмульсий, производство биотоплива;
- в сельском хозяйстве, пищевой и легкой промышленности – процессы проращивания семян и интенсификация роста растений, процессы приготовления пищевых добавок, кондитерской технологии, приготовления алкогольных и безалкогольных напитков;
- в коммунальном хозяйстве – рекуперация водных скважин, подготовка пить-

евой воды, снятие отложений с внутренних стенок теплообменных аппаратов;

- в области защиты окружающей среды – очистка сточных вод, загрязненных нефтепродуктами, тяжелыми металлами, стойкими органическими соединениями, очистка загрязнённых почв, промышленных газовых потоков;
- в области переработки вторичного сырья – девулканизация резины, очистка металлургической окалины от масляных загрязнений.

Применение ультразвуковых колебаний различных частот и интенсивностей позволяет создавать ультразвуковые технологии как в качестве основных, так и вспомогательных, позволяющих интенсифицировать технологический процесс и существенно повысить его качественные характеристики.

Создание электропреобразовательных пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем и электронных генераторов нового поколения позволило лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института совместно с малым инновационным предприятием ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» разработать ряд высокоэффективных ультразвуковых аппаратов для интенсификации и ускорения широкого круга технологических процессов, реализуемых в различных средах.

Эффективность создаваемых аппаратов обусловлена тем, что в их основу заложены информационно-измерительная и управляющая системы, обеспечивающие оптимальные режимы реализации различных технологических процессов [1-5].

Кавитационная обработка жидких и жидко-дисперсных сред. Возможность существенной интенсификации таких процессов, как диспергирование, деагломерация, гомогенизация, эмульгирование, экстракция, очистка без токсичных растворителей, активация полимерных материалов, смол, лаков и красок, пропитка, получение наночастиц, создает предпосылки ускорен-

ными темпами переводить ультразвуковые технологии из стен лабораторий в промышленные производства.

Возможность реализации химических процессов, невыполнимых без ультразвука, многократное увеличение скорости известных процессов, возможность получения новых веществ (сверхтвердых материалов и металлов) или придание известным новым свойств (стерильность, наноразмерность) делают ультразвуковые технологии незаменимыми в современных высокотехнологичных производствах.

Широкому распространению ультразвуковых электронных технологий способствует создание надежных электронных устройств с системами контроля, оптимизации, микропроцессорного управления и эффективных пьезоэлектрических источников ультразвукового излучения.

Эффективность ультразвукового воздействия на жидкие и жидко-дисперсные среды обусловлена кавитацией, при которой на различных примесях и газовых включениях формируются разрывы жидкости, которые превращаются в колеблющиеся паргазовые пузырьки. При схлопывании пузырьков образуются ударные волны и кумулятивные струи, обладающие высокой энергией в локальных объемах.

Реализация кавитационного процесса в высоковязких и высокодисперсных жидкостях может обеспечивать полное и быстрое дегазирование, реализовать различные химические реакции, создать свободные ионы, ускорить химические реакции окисления, полимеризации и деполимеризации, повысить степень эмульсификации, увеличить скорость диффузии; произвести эмульсии высокой концентрации или однородные мелкодисперсионные материалы, экстрагировать ферменты из животных и растительных клеток, осуществить активацию дрожжей и бактерий, удалить вирусы из зараженных тканей, разрушить восприимчивые частицы, в том числе микроорганизмы.

Современные аппараты для кавитационной обработки широко используются для очистки деталей от загрязнений, неудаляемых известными механическими и химическими способами, выделения новых полезных компонентов при экстрагировании растительного и животного сырья, обеспечения стерильности без нагрева и химического воздействия, повышения биологической активности антибиотиков и витаминов, формирования кристаллических решеток с уникальными свойствами в расплавах металлов.

В ультразвуковом оборудовании, создаваемом ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», реализуется автоматическое определение оптимального режима воздействия на любую из обрабатываемых сред на основе установления взаимосвязи акустических свойств кавитирующей жидкой среды, объёмного содержания кавитационных пузырьков, удельного энергетического воздействия ударных волн при схлопывании кавитационных пузырьков с частотой и амплитудой ультразвуковых колебаний.

Для лабораторных исследований технологических процессов в малых объемах в АлтГТУ разработано специализированное оборудование, способное обеспечить кавитационную обработку жидких сред ультразвуковыми колебаниями с интенсивностью от 1 до 100 Вт/см² на частотах от 20 до 100 кГц (рис. 1).

Для мелкосерийных производств разработано также специализированное оборудование для интенсификации различных технологических процессов, в том числе протекающих под высоким давлением (до 2 МПа) и при высоких температурах (до 1000 °С) обрабатываемой среды (рис. 2) и на границе раздела фаз (рис. 3). Кроме того, для промышленных производств предлагается специализированное оборудование мощностью до 8 кВА, характеризующееся высокой производительностью, надежностью и относительно небольшой стоимостью (рис. 4).



Рис. 1. Ультразвуковое оборудование для лабораторных исследований



Рис. 2. Ультразвуковое оборудование для кавитационной обработки жидких сред



Рис. 3. Ультразвуковое оборудование для интенсификации процессов на границе раздела фаз



Рис. 4. Промышленное ультразвуковое оборудование

Распыления жидкостей. Формирование мелких частиц с заданным их распределением по размерам является сложной технической проблемой. Распыление жидких сред за счет ультразвуковых колебаний наряду с возможностью мелкодисперсного и монодисперсного распыления характеризуется низкой энергоемкостью, высокой производительностью, отсутствием распылительных агентов и возможностью распыления высоковязких жидкостей без предварительного снижения их вязкости растворителями.

Распыление жидкостей применяется для нанесения паяльных флюсов и покрытий на печатные платы. С помощью распыления отработанных масел проводят диагностику двигателей, наносят самоочищающиеся покрытия (например, на стекла), ароматические, вкусовые и смазочные покрытия, различные растворители, клеи и наноматериалы.

Ультразвуковое распыление жидкостей в медицинской практике используют для нанесения ингибирующих покрытий на стенты, для формирования фонтанов мелкодисперсионных капель в ингаляторах, напыления лекарственных составов и эфирных масел, дезинфекции помещений, техники и инструмента. Ультразвуковое распыление может использоваться для профилактики инфекционных заболеваний в местах массового скопления людей, при проведении мероприятий по борьбе с насекомыми.

Для высокодисперсного распыления в газовой среде жидкостей различной вязкости без разрушения их структуры и свойств создан ряд ультразвуковых распылителей (рис. 5) [6]. Отличительной особенностью распылителей является наличие систем управления процессом распыления.



Рис. 5. Аппараты ультразвукового распыления

Воздействие на твердое тело. Воздействие ультразвуковых колебаний на твердые среды позволяет осуществлять размерную обработку (сверление, резание, шлифовку, полировку, снятие фасок, выполнение сложнокорпусных пазов) хрупких и

особо твердых материалов, таких как керамика, стеклопластики, полупроводниковые материалы, стекло, кварц, лейкосапфир, драгоценные (алмаз, рубин), полудрагоценные и поделочные минералы, ферриты, вольфрамсодержащие и титанокар-

бидные сплавы, закаленные стали, магнитные сплавы из редкоземельных элементов, термодорунд

При размерной обработке ультразвуком хрупкий материал выкалывается из изделия ударами зерен более твердого абразива, которые направляются торцом рабочего инструмента, а кавитационные процессы в жидкой абразивной суспензии обеспечивают удаление выработанного материала и подачу свежей суспензии. При такой технологии в обрабатываемом изделии формируются полости, копирующие форму рабочего инструмента [7].

Воздействие ультразвука на твердые материалы позволяет изменять их свойства и структуру. Так, применение ультразвука при волочении или штамповке, изменяя пластичность материалов, существенно снижает технологические формирующие усилия, ускоряет процесс и повышает качество формируемой поверхности.

Применение ультразвуковых колебаний для финишной безабразивной обработки металлов (шлифовка, механическая обработка) позволяет за счет высокочастотных деформаций изменять свойства поверхности, обеспечивая недостижимую другими способами точность обработки, чистоту (шероховатость) и твердость поверхности.

Ультразвуковая сварка изделий из полимерных термопластичных материалов не имеет альтернативы при упаковке жидких, пастообразных, порошкообразных и сыпучих материалов. Ультразвуковая сварка сегодня заменяет склеивание и термические методы соединения термопластичных материалов. Она широко применяется при изготовлении изделий в легкой промышленности, парфюмерии, радиоэлектронике и электротехнике, товаров широкого потребления из пластмасс [8].

Оборудование ультразвуковой сварки используется для запрессовки втулок, манжет, выводных зажимов, шарниров, крепежных деталей, рукояток, установочных штифтов, клемм, декоративных деталей металлической арматуры в изделия из полимеров.

Широкое распространение ультразвуковая сварка получила благодаря формированию сварных соединений с прочностью, близкой к прочности основного материала, при температуре ниже температуры его плавления, возможности соединения материалов на большом удалении от места подвода энергии, а также упаковки горючих и взрывоопасных материалов.

Ультразвуковое оборудование, выпускаемое ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», показано на рис. 6. Технические решения, реализованные в оборудовании, позволяют осуществлять непрерывный контроль амплитуды и частоты ультразвукового воздействия на основе взаимосвязи между изменяющейся акустической нагрузкой и амплитудой колеблющейся поверхности.

Ультразвуковое воздействие через газовые промежутки. Представляет интерес применение ультразвуковых колебаний для интенсификации таких процессов, как коагуляция твердых и жидких частиц в газовых средах при улавливании создаваемых мелкодисперсных материалов и очистке газов, сушка легкоокисляемых и взрывчатых веществ и материалов, пеногашение при производстве и упаковке пенящихся продуктов.

Отличительной особенностью таких процессов является необходимость введения ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в газовые среды или их передача на технологические среды через газовые промежутки.

Для интенсификации процессов в газовых средах необходимо создавать и передавать через нерезонансные промежутки в газовых средах различного химического состава, температуры, давления ультразвуковые колебания с частотой более 20 кГц и интенсивностью более 145 дБ. Диапазон используемых частот обусловлен необходимостью обеспечения безопасности человека, а интенсивность излучения – необходимостью обеспечения максимальной эффективности различных процессов [9].

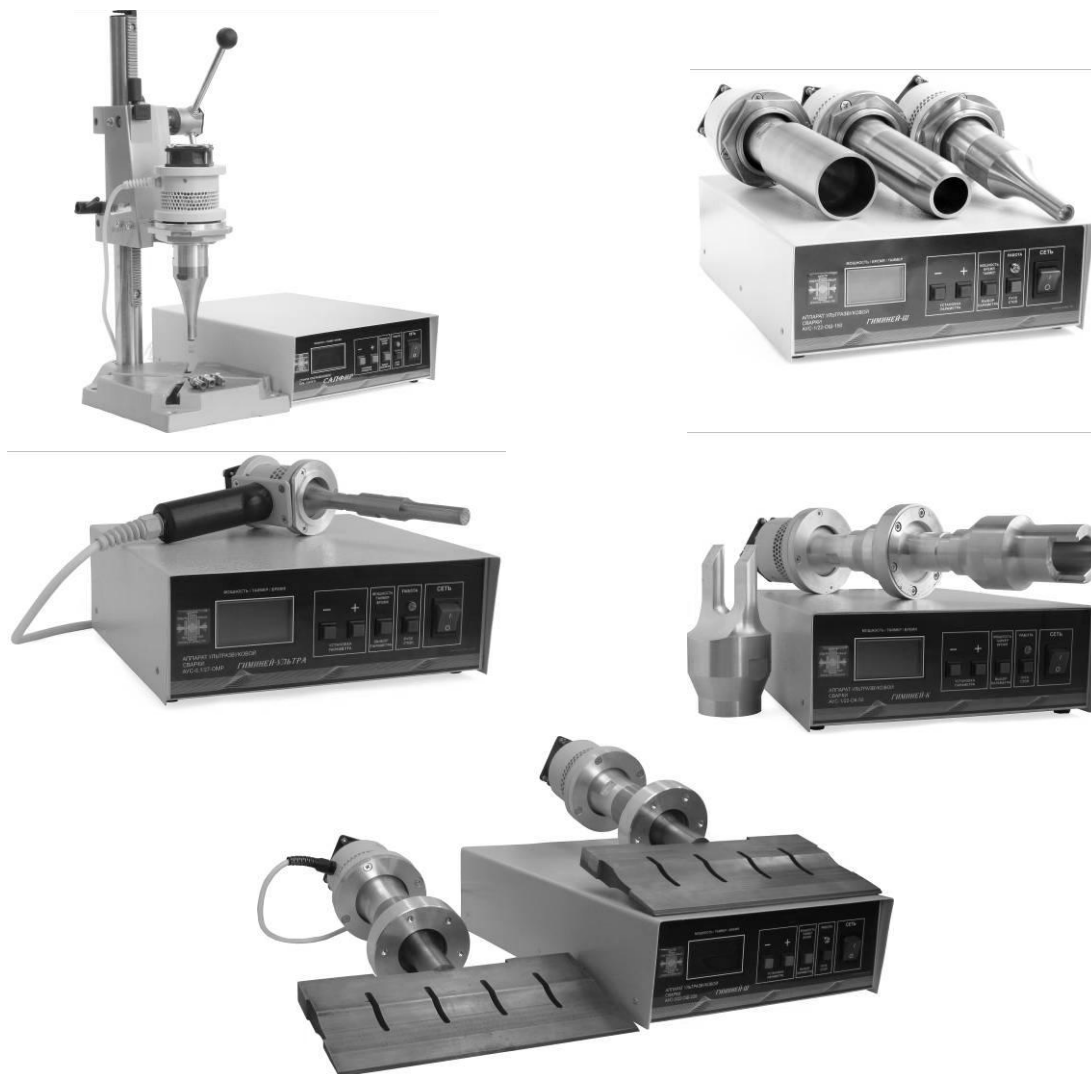


Рис. 6. Аппараты ультразвукового воздействия на твердое тело

Акустическая коагуляция позволяет осаждать высокодисперсные аэрозоли, улавливание которых обычными аппаратами сопряжено со значительными трудностями, а иногда вообще невозможно.

Примером могут служить химические процессы, в которых возможен выброс в атмосферу значительного количества вредных для окружающей среды и человека или ценных для производства продуктов. Как правило, эти продукты находятся в отходящих газах в виде аэрозольных частиц (дым, туман), трудно улавливаемых в обычных аппаратах, использующих действие силы тяжести, инерции и центробежные силы.

Незаменимость ультразвуковой коагуляции особенно ярко проявляется при очистке газов, содержащих частицы разме-

ром менее 1 мкм (наночастицы, частицы кремния при производстве полупроводников, сажа, сернистый туман и т.п.).

Многообразие задач и наличие зависимостей эффективности воздействия от параметров аэрозолей обуславливают необходимость применения различного ультразвукового коагуляционного оборудования.

Образующаяся при реализации процессов химических технологий или упаковке жидких пенящихся продуктов пена препятствует полной загрузке аппаратов, усложняет дозировку, приводит к уносу ценных продуктов. Разрушение пены ультразвуковыми колебаниями происходит в результате пульсации пузырьков пены и воздействия на их поверхность турбулентных вихрей, вызываемых акустическими течениями.

Для каждого типа пены существуют оптимальные условия и режимы ультразвукового воздействия, определяемые геометрическими размерами технологических аппаратов и свойствами пенообразующей жидкости.

Акустическая (ультразвуковая) сушка заключается в интенсификации процесса удаления влаги из материала с помощью ультразвуковых колебаний. Сушка твердых, сыпучих и других материалов является конечной стадией производства химических, биологических и пищевых продуктов.

Ультразвуковая сушка позволяет существенно ускорить процесс обычной тепловой сушки и заменить ее при недопусти-

мости нагрева при сушке термолабильных и легкоокисляющихся продуктов, лекарственных препаратов, молока, ферментов и биологически активных препаратов, а также при сушке пожаро- и взрывоопасных материалов. Эффективность ультразвуковой сушки обусловлена тем, что жидкость с поверхности удаляется не только за счет фазового перехода испарения, но и за счет распыления в виде аэрозоля ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности.

Ультразвуковое оборудование, выпускаемое ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» и предназначенное для воздействия через газовые промежутки, показано на рис. 7.



Рис. 7. Аппараты ультразвукового воздействия через газовые промежутки

Отличительной особенностью этого оборудования является применение пьезоэлектрических преобразователей и изгибно колеблющихся излучателей в виде ступенчато переменных по толщине дисков.

В основу создаваемого в АлтГТУ оборудования положены новые принципы преобразования и введения энергии ульт-

развуковых колебаний в различные технологические среды, новые схемные и конструктивные решения электронных генераторов и колебательных систем, оригинальные алгоритмы управления технологическими процессами и электропреобразовательными устройствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хмелев В.Н.** Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 1997. 173 с.

2. **Хмелев В.Н.** Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве /

В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков и др. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. 400 с.

3. **Хмелев В.Н.** Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.В. Барсуков и др. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 2010. 200 с.

4. **Хмелев В.Н.** Источники ультразвукового воздействия: особенности построения и конструкции / В.Н. Хмелев, С.С. Хме-

лев, С.Н. Цыганок и др. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 2013. 195 с.

5. Сайт ООО «Центр ультразвуковых технологий». Режим доступа: [url:/http://ultrasonic.com/](http://ultrasonic.com/)

6. **Хмелев В.Н.** Ультразвуковое распыление жидкостей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.

7. **Хмелев В.Н.** Ультразвуковая сварка термопластичных материалов / В.Н. Хме-

лев, А.Н. Сливин, С.С. Хмелев и др. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 2014. 281 с.

8. **Хмелев В.Н.** Ультразвуковая размерная обработка материалов / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 1999. 127 с.

9. **Хмелев В.Н.** Ультразвуковая коагуляция аэрозолей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова и др. – Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т, 2010. 235 с.

Хмелев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научно-исследовательской работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Цыганок Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Хмелев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Vladimir N. Khmelev – Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Scientific and Research Activity, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Sergey N. Tsyganok – Ph. D., Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Sergey S. Khmelev – Ph. D., Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Статья поступила в редакцию 12.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

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.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ И СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ГЕОРЕШЕТОК

В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов, С.С. Хмелев

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND DESIGN OF EQUIPMENT FOR THE GEOCELL ULTRASONIC WELDING

V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov, S.S. Khmelev

Представлены результаты исследований и разработок ультразвукового сварочного оборудования, предназначенного для формирования линейных швов различных конфигураций при производстве объемных георешеток. На основании анализа условий формирования швов при использовании инструментов с различными по форме сварочными поверхностями предложены технологические рекомендации по применению аппаратов и выбору оптимальных режимов сварки изделий.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, георешетка, технология

The article presents the results of research of ultrasonic welding equipment applied in the formation of linear seams of various configurations at the production of volumetric geocells. Technical recommendations referring the application of apparatuses and the choice of optimum modes of welding are proposed on the basis of analysis of conditions for the seam formation using the tools with different welding surfaces.

Keywords: ultrasonic welding, geocell, technology

Всё большее применение находят сотовые конструкции, представляющие собой объемные георешетки, выполненные из

полиэтиленовых лент, скреплённых между собой сварными швами высокой прочности (рис. 1) [1].



Рис. 1. Использование георешётки в ландшафтном строительстве

Георешетки обеспечивают укрепление откосов земляного полотна, различных типов дорожных оснований, железнодорожных оснований (насыпей), берегов искусственных и натуральных водоёмов, русел водотоков, мостовых конструкций, развязок автодорог, магистралей, путепроводов.

Современные георешетки изготавливаются из лент прочного и устойчивого к внешним воздействиям полиэтилена высокого давления (ПВД) различной толщины (1-2 мм) и могут иметь различные по размерам ячейки (150×150 мм, 220×220 мм, 305×305 мм).

Потребность в георешётках в нашей стране в полной мере не удовлетворяется. Обусловлено это отсутствием высокоэффективного отечественного оборудования для их производства, способного обеспечивать формирование сварного шва высокой прочности (удовлетворяющего требованиям ГОСТ 32491-2013) длиной 150, 220, 305 мм за время 1-3 с. Технология формирования сварных швов при изготовлении георешеток основывается на послойной укладке друг на друга лент из термопластичного полимерного материала и соединении их в шахматном порядке сварными швами (рис. 2).

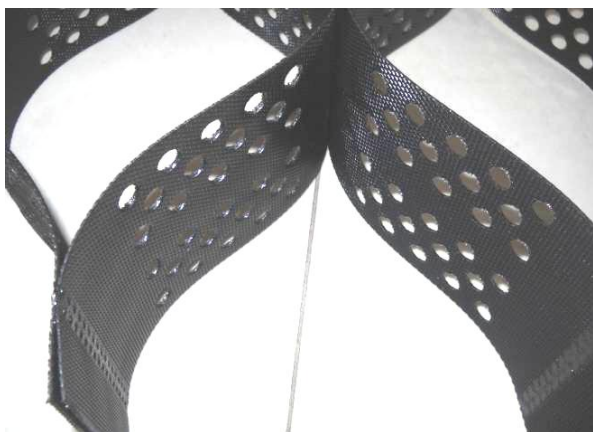


Рис. 2. Соединение лент в шахматном порядке

Наиболее эффективным способом получения подобных сварных соединений при изготовлении решетки с ячейистой структурой является способ ультразвуковой сварки [2]. При реализации ультразву-

ковой сварки (рис. 3) последовательно укладывают ленты 1, 4 на две независимые опоры 2, 3 лестничного типа со сварочными подложками 6 в виде перекладин на участках для формирования швов, создавая при помощи ультразвуковой колебательной системы 5 швы, соединяющие ленты.

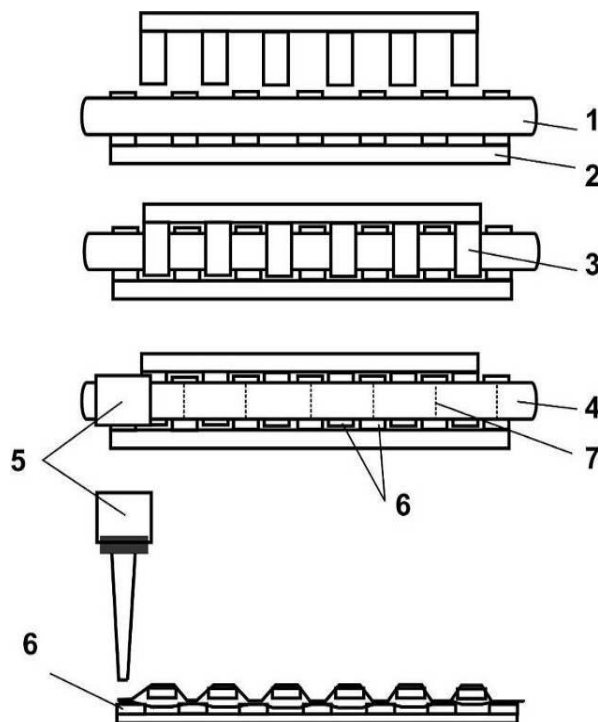


Рис. 3. Схема способа изготовления и ультразвуковой сварки решёток

После соединения двух первых лент нижнюю опору перемещают на поверхность верхней ленты, накладывают следующую ленту, производят формирование швов между третьей и второй лентами. Затем, перемещая после сварки двух очередных лент нижнюю опору на поверхность присоединенной сварными швами ленты и накладывая на нее очередную присоединяемую ленту, обеспечивают ультразвуковую сварку заданного числа лент, обеспечивая формирования линейных сварных соединений (7).

Для определения необходимой величины ультразвукового воздействия рассмотрим схему прессовой сварки, реализуемой при формировании линейных сварных швов (рис. 4).

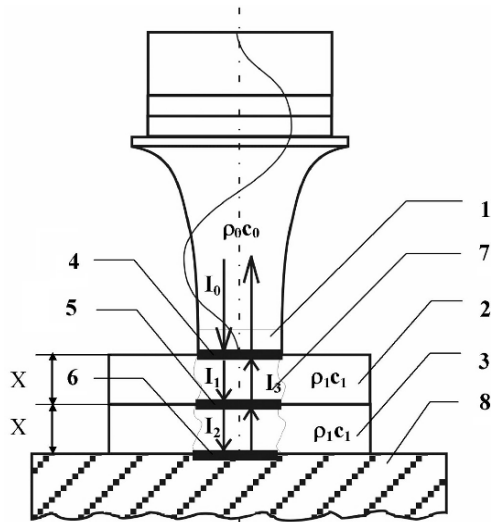


Рис. 4. Схема введения ультразвуковых колебаний в свариваемые материалы. 1 – сварочный инструмент; 2, 3 – свариваемые материалы; 4, 5, 6 – границы раздела материалов, инструмента и опоры; 7 – зона сварки; 8 – опора; I_{0-3} – интенсивности ультразвуковых колебаний

Зависимость времени сварки одного линейного шва от энергетических параметров ультразвукового воздействия имеет вид [3-5]:

$$t = \frac{\rho_1 V_1 \int_{T_n}^{T_{пл}} C dT + \lambda \rho_1 V_2 + Q_3}{2\pi^2 f^2 A_0^2 S \rho_0 c_0 (1 - \eta_1)(1 - e^{-4\alpha x} + \eta_2 e^{-4\alpha x} - \eta_2 e^{-8\alpha x})} \quad (1)$$

где f – частота УЗ колебаний инструмента; A_0 – амплитуда колебаний излучающей поверхности колебательной системы; S – площадь излучающей поверхности сварочного инструмента; ρ_0 и c_0 – плотность материала сварочного инструмента и скорость звука в нем; ρ_1 – плотность свариваемых материалов; η_1 – коэффициент отражения волны на границе сварочный инструмент – материал; η_2 – коэффициент отражения волны на границе материал – опора; α – коэффициент затухания колебаний; x – толщина материала; C – теплоемкость материала; V_1 – объем зоны сварки; V_2 – объем расплавляемой зоны; λ – удельная теплота плавления материала; T_n – температура начальная; $T_{пл}$ – температура плавления материала; Q_3 – потери энергии.

Прочность шва в месте сварки зависит от площади сечения материала изделия и

площади сформированного сварного шва [6-7] и имеет вид [4]:

$$\sigma = \frac{P}{F}, \quad (2)$$

где σ – прочность сформированного сварного шва; P – нагрузка при испытаниях на разрушение сваренного образца; F – площадь сечения сварного шва.

Для практического подтверждения зависимости прочности от площади сварного соединения были разработаны сварочные инструменты, показанные на рис. 5-7, имеющие различные по форме и размерам излучающие поверхности.

В частности, были созданы и испытаны инструменты для сварки, имеющие следующие формы рабочей поверхности (рис. 5): сплошную линейную прямоугольную форму – инструмент №1, двойную сплошную линейную форму – инструмент №2, имеющие прерывистую конфигурацию рабочей поверхности (рис. 6) с чередующимися прямоугольными выступами размерами 5×5 мм – инструмент №3, с чередующимися прямоугольными выступами размерами 2,5×2,5 мм небольшой высоты – инструмент №4, с ромбовидными выступами – инструмент №5 и с чередующимися прямоугольными выступами – инструмент №6 (рис. 7).

В таблице представлены характеристики сварочных инструментов длиной 220 мм с различной формой рабочих поверхностей. Площадь формируемого сварного шва определяется не только горизонтальной рабочей поверхностью сварочного инструмента, но и зависит от того, на какую глубину осуществляется заглубление сварочного инструмента, то есть от формы выступов. В таблице представлена составляющая площади горизонтальной поверхности и составляющая площади вертикальной поверхности, а также суммарная площадь сварного шва при заглублении сварочного инструмента на глубину 0,8 мм, что соответствует половине толщины одной из свариваемых лент.

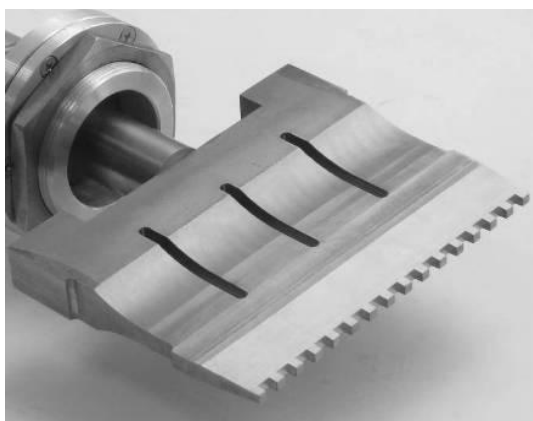


a

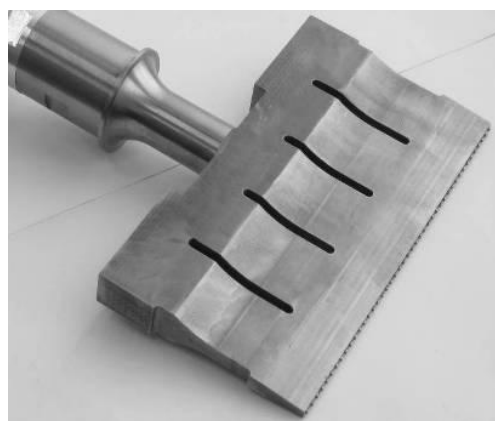


б

Рис. 5. Сварочные инструменты для формирования сплошных швов: *a* – инструмент №1 для формирования шва прямоугольной формы; *б* – инструмент №2 для формирования двойного шва

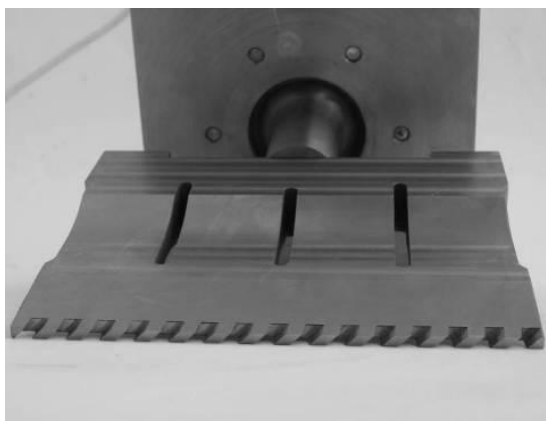


a

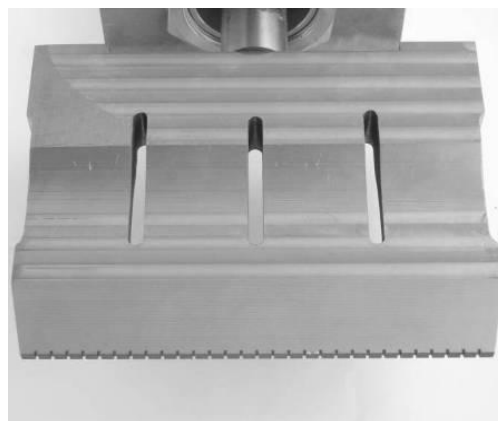


б

Рис. 6. Сварочные инструменты с прерывистой конфигурацией рабочей поверхности: *a* – инструмент №3 с чередующимися выступами размером 5х5 мм; *б* – инструмент №4 с чередующимися выступами размерами 2,5х2,5 мм



a



б

Рис. 7. Сварочные инструменты для формирования прерывистых швов: *a* – инструмент №5 с чередующимися ромбовидными выступами; *б* – инструмент № 6 с чередующимися прямоугольными выступами

Параметры рабочей поверхности сварочных инструментов различной конфигурации и площадь формируемого при этом сварного шва

Конфигурация сварочной поверхности инструмента	Длина сварного шва, мм	Ширина сварного шва, мм	Площадь рабочей поверхности, мм ²	Площадь вертикальной поверхности (выступов), мм ²	Общая площадь формируемого сварного шва, мм ²
Сплошная линейная (инструмент №1)	220	5	1100	352	1452
Сплошная сдвоенная линейная (инструмент №2)	2×220	2×1,6	704	4×176	1408
С чередующимися прямоугольными выступами (инструмент №3)	220	5	550	352	902
С чередующимися прямоугольными выступами (инструмент №4)	220	5	1100	640	1740
С ромбовидными выступами (инструмент №5).	220	5	880	457,6	1337,6
С чередующимися прямоугольными выступами (инструмент №6)	220	5	1068	128	1196

Из таблицы следует, что максимальная площадь сварного шва обеспечивается при использовании инструмента №4. Этот инструмент обеспечивал максимальную прочность соединения.

Обусловлено это тем, что наличие прямоугольных чередующихся выступов позволило обеспечить максимальную площадь сечения материала в зоне сформиро-

ванного сварного шва (формирование линейного шва усилено дополнительными проплавлениями при помощи выступов) и, как следствие, прочность сварного соединения двух лент георешетки, превышающую нормативные требования [7].

На рис. 8 показаны сварочные аппараты, позволяющие формировать сварные швы различной формы [8].



Рис. 8. Ультразвуковые аппараты с различными сварочными инструментами для производства георешёток

Примеры формируемых с их помощью сварных швов представлены на рис. 9:



Рис. 9. Примеры сварных швов различных конфигураций

Проведенные испытания созданных аппаратов с различными окончаниями рабочих инструментов позволили рекомендовать для практического применения, следующие оптимальные параметры процесса сварки.

1. Прижим сварочного инструмента к свариваемым материалам при использо-

вании металлической опоры толщиной 20-50 мм должен быть не менее 1500-2000 Н, что рекомендуется обеспечивать пневмоцилиндром с диаметром поршня не менее 80 мм, при давлении в пневмосети 4-5 атм.

2. Установка на панели управления 100 % мощности аппарата, что соответствует амплитуде ультразвуковых колебаний рабочей поверхности сварочного инструмента не менее 42-50 мкм.

3. Установка на панели управления аппарата времени сварки не более 2,3-2,5 с, со стабилизацией шва не менее 1 с.

4. Цикл сварки рекомендуется реализовывать в следующей последовательности: предварительный прижим к материалам с указанным усилием, ультразвуковое воздействие в течении установленного времени, удержание без ультразвукового воздействия для стабилизации шва.

5. В ходе отработки технологии на конкретных изделиях следует учитывать, что при снижении усилия прижима ниже указанных значений необходимо увеличивать время сварки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Slivin, A.N.** Development of the Method of Manufacture and Ultrasonic Welding of Geo-grids from Thermoplastics / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, S.N. Tchyganok, A.D. Abramov // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. P. 311–315.

2. **Slivin, A.N.** Theoretical investigations of continuous ultrasonic seam welding of thermoplastic polymers and fabrics / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.V. Lehr, A.D. Abramov // 11th Annual International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2010 – Proceedings 2010 11th Annual International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM'2010: Russian Foundation for Basic Research (RFBR). – Altai, 2010. P. 341–344.

3. Способ изготовления решетки с ячеистой структурой для укрепления грунтовых поверхностей / Пат. 2322551 Российская Федерация, МПК5 E02D 17/20 B29C 65/02 B29C 65/18 В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.В. Левин, А.Д. Абрамов; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2006143096/04; заявл. 05.12.2006; опубл. 20.04.2008.

4. **Хмелев, В.Н.** Ультразвуковая сварка термопластичных материалов / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов и др. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. 281 с.

5. **Сливин, А.Н.** Повышение эффективности энергетического воздействия при ультразвуковой сварке / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Научно –

технический вестник Поволжья, 2013. – №3. С. 278–281.

6. **Slivin, A.N.** Perfecting of the Technology and Development of the Apparatuses for Ultrasonic Welding / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM, 2013. – Novosibirsk: NSTU, 2013. P. 182–186.

7. **Khmelev, V.N.** Model of process and calculation of energy for a heat generation of a welded joint at ultrasonic welding polymeric thermoplastic materials / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // 2007 8th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'07 - Proceedings 2007 8th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices

and Materials, EDM'07. Russian Foundation of Basic Researches (RFBR). Novosibirsk, 2007. P. 316–322.

8. **Хмелев, В.Н.** Совершенствование ультразвуковой сварки и создание аппаратов для её реализации / В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. Т. 323. № 4. С. 152–157.

9. **Сливин, А.Н.** Создание ультразвуковых аппаратов с оптимизацией энергетического воздействия для повышения эффективности сварки / А.Н. Сливин // диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Бийск: 2008. 180с.

Хмелев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научно-исследовательской работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Сливин Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерения и автоматизации». Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Абрамов Алексей Дмитриевич – инженер Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Хмелев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Vladimir N. Khmelev – Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Scientific and Research Activity, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Alexey N. Slivin – Ph. D., Associate Professor, Department of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Alexey D. Abramov – Engineer, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Sergey S. Khmelev – Ph. D., Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Статья поступила в редакцию 12.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ

В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Е.В. Ильченко, Н.С. Попова, Д.В. Генне

CONTROLLING PARAMETERS OF ULTRASONIC OSCILLATORY SYSTEMS TO RESEARCH THE CAVITATION ACTIVITY

V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, E.V. Ilchenko, N.S. Popova, D.V. Genne

Приведены результаты экспериментальных исследований, позволивших установить зависимости между электрическими параметрами пьезоэлектрических колебательных систем и мощностью кавитационного шума, возникающего при ультразвуковой обработке жидких технологических сред.

Ключевые слова: ультразвук, электронный генератор, нагрузка, контроль

Реализация большинства ультразвуковых (УЗ) технологических процессов в жидких средах возможна благодаря явлению кавитации. Различают несколько режимов УЗ воздействия на жидкие технологические среды.

Докавитационный режим реализуется при интенсивностях УЗ воздействия ниже порога зарождения кавитации. Для него характерно отсутствие в жидкой среде кавитационных пузырьков.

Режим зарождения кавитации реализуется при превышении интенсивности УЗ воздействия некоторого порогового значения (для каждой среды величина порога различна). Для него характерно зарождение небольшого количества кавитационных пузырьков, которые в процессе роста не достигают максимального размера (эффективность кавитации невысокая).

Режим развитой кавитации реализуется при больших интенсивностях УЗ воздействия (10-20 Вт/см²). Для него характерны высокие концентрации кавитационных пузырьков и высокая эффективность кавитации.

The article presents the results of experimental studies which allowed to establish the relationship between the electrical parameters of piezoelectric vibration systems and the power of cavitation noise produced due to ultrasonic treatment of liquid media technology.

Keywords: ultrasound, electronic generator, load, monitoring

Зарождение и развитие в жидкой среде кавитации изменяет ее акустические свойства. При реализации режима развитой кавитации акустическое сопротивление кавитирующей среды в области излучателя приближается к акустическому сопротивлению газовых сред. Очевидно, что такое сильное изменение волнового сопротивления среды вблизи излучателя изменяет его механические и электромеханические параметры. Рассмотрим результаты исследования влияния кавитационной активности на параметры ультразвуковых колебательных систем.

Практическую часть исследований можно разбить на две части. В первой части приводятся результаты экспериментальных исследований электрических параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем (УЗКС). Во второй части устанавливаются зависимости между электрическими параметрами пьезоэлектрических колебательных систем и мощностью кавитационного шума, возникаю-

щего при ультразвуковой обработке жидких технологических сред.

При проведении исследований в качестве технологических сред использовались:

- водный раствор NaCl; концентрация менялась дискретно в диапазоне 0 - 25% с шагом 2,5%;
- водный раствор сахарозы; концентрация менялась дискретно в диапазоне 0 - 40%, с шагом 5%;
- водный раствор глицерина; концентрация менялась дискретно в диапазоне 0 - 35%, с шагом 5%.

В качестве источника УЗ воздействия был использован аппарат "Волна" модели УЗТА-0,4/22-ОМ [1], электрическая схема которого была дополнена контрольными точками для проведения контрольных измерений.

В основу проводимых измерений был положен анализ физической модели (эквивалентной электрической схемы), разработанной в работах [1 - 4] (рис. 1).

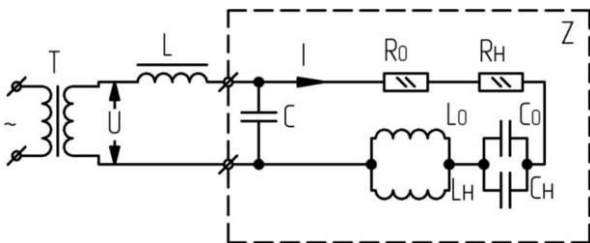


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения УЗКС с преобразователем пьезоэлектрического типа

В эквивалентной электрической схеме: индуктивность L_0 является эквивалентом колеблющейся массы, обусловленной инерционными свойствами УЗ колебательной системы, электрическая емкость C_0 является эквивалентом упругости материала, из которого изготовлена УЗКС, активное сопротивление R_0 эквивалентно сопротивлению механических потерь, R_H – сопротивлению излучения колебательной системы, L_H – колеблющейся массе обрабатываемой жидкой фазы, присоединенной к излучающей поверхности, емкость C_H

обусловлена наличием у обрабатываемой среды упругих свойств, C обусловлена электрической (статической) емкостью пьезопреобразователя. Элемент $R_{эkv}$ (на схеме не показан) является суммой элементов R_0 и R_H .

Методика определения RLC элементов эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС описана в работе [1].

Экспериментально исследовалась кавитационная обработка водного раствора NaCl различной концентрации. Для раствора каждой концентрации измерения проводились на различных уровнях напряжения питания УЗКС. На рис. 2 приведены зависимости сопротивления элемента $R_{эkv}$ от напряжения питания УЗКС U при различных концентрациях раствора. Зависимости значений C_H и L_H в данной статье не рассматриваются, поскольку полученные в ходе экспериментов данные не имеют характерных особенностей и анализу не поддаются.

Согласно рис. 2 возникающая в среде кавитация приводит к изменению активного сопротивления УЗКС при изменении напряжения её питания. По мере увеличения напряжения значения $R_{эkv}$ (для всех концентраций раствора) стремятся к одной величине. Этот факт обусловлен развитием в жидкой среде кавитации и достижением, при определенной интенсивности УЗ воздействия режима развитой кавитации (насыщения жидкой среды парогазовыми пузырьками), которому свойственно сопротивление нагрузки $R_{эkv}$, близкое к сопротивлению газовой среды.

Еще одной особенностью приведенных зависимостей является величина напряжения питания УЗКС, при котором начинается спад $R_{эkv}$. Различный уровень напряжения, при котором сопротивление $R_{эkv}$ начинает изменяться, обусловлен зависимостью кавитационной прочности раствора от его концентрации. По мере увеличения концентрации раствора растет его кавитационная прочность.

Аналогичные измерения были проведены при концентрированных растворах сахарозы и глицерина.

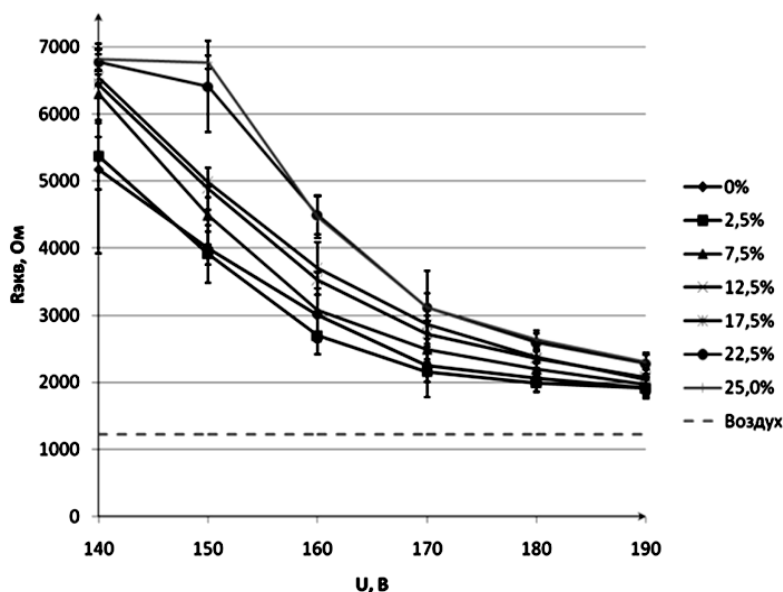


Рис. 2. Зависимость активного элемента $R_{акв}$ механической ветви УЗКС от напряжения питания УЗКС для различных концентраций раствора NaCl

На рис. 3 представлены зависимости сопротивления $R_{акв}$ от напряжения питания УЗКС, полученные для различных концентраций растворов глицерина и сахарозы. Представленные на рис. 3 кривые иллю-

стрируют убывающий характер $R_{акв}$, что связано с развитием в жидких средах явления кавитации по мере увеличения напряжения питания УЗКС.

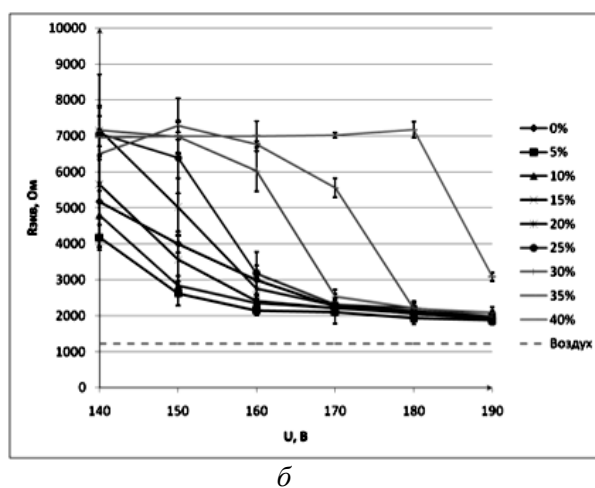
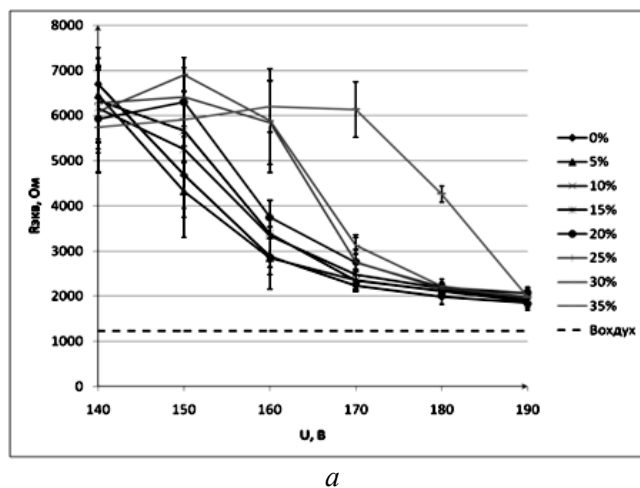


Рис. 3. Зависимость активного элемента $R_{акв}$ механической ветви УЗКС от напряжения питания УЗКС для растворов: а – глицерин, б – сахароза

Контроль кавитационной активности в ходе проведения экспериментов осуществлялся путем измерения уровня звукового давления, создаваемого кавитационным шумом. Измерения проводились с помощью шумомера-анализатора спектра «АССИС-

ТЕНТ SIU30» в звуковом диапазоне (рис. 4). Подобный метод оценки активности кавитации описан в [5], а также положен в основу принципа действия ряда кавитометров [6].

Методика проведения измерений заключалась в измерении уровня звукового

давления в воздушной среде, обусловленного кавитационным шумом при работе УЗКС на различных уровнях напряжения ее питания.

Микрофон при этом располагался на расстоянии 0,3 м от УЗКС. Время экспо-

зиции выбиралось из условия стабилизации показаний прибора и в среднем составляло 60 с. Измерения звукового давления для каждого уровня напряжения питания УЗКС осуществлялись после выхода УЗ генератора на стабильный режим работы.

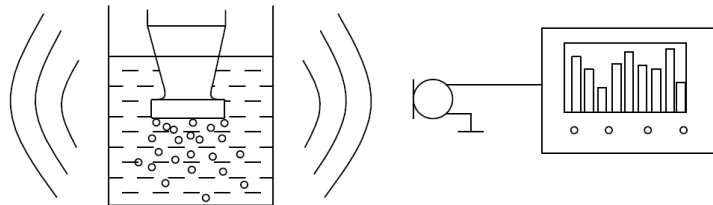


Рис. 4. Эскиз экспериментальной установки

При помощи шумомера-анализатора спектра были получены значения эквивалентных уровней звукового давления кавитационного шума в третьоктавных частотных полосах со средними геометрическими частотами от 25 Гц до 20кГц при

работе ультразвукового генератора на дискретных уровнях возбуждающего напряжения от 120 до 190 В.

На рис. 5 показаны спектры для минимального и максимального напряжений питания УЗКС.

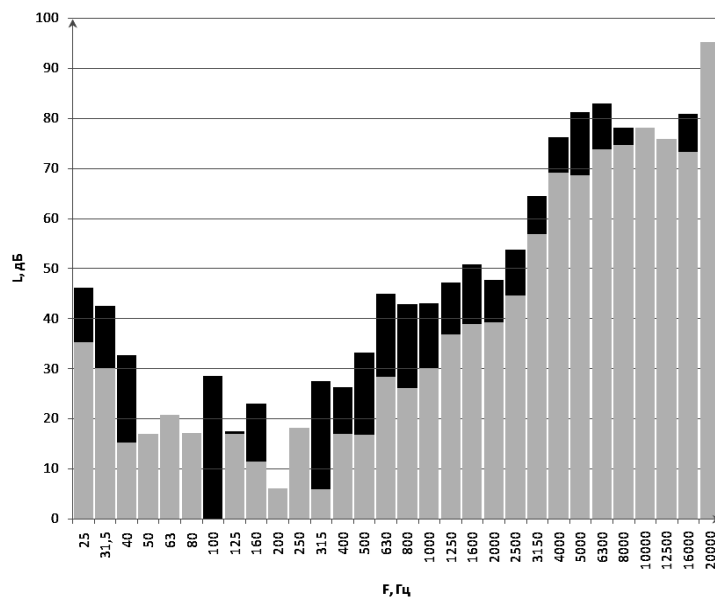


Рис. 5. Спектры кавитационного шума при напряжении питания УЗКС 140В (серый) и 190В (черный)

Анализ полученных спектров показывает, что при дискретном увеличении напряжения питания УЗКС величины эквивалентных уровней звукового давления в третьоктавных полосах, начиная с частоты 250 Гц до 2 кГц, увеличиваются не пропорционально (существенно различны) по мере увеличения напряжения питания УЗКС.

Контроль значения эквивалентного непрерывного уровня звука L_{AeqT} при изменении напряжения питания УЗКС в диапазоне от 120 до 190 В позволил выявить зависимость, показанную на рис. 6.

Характер зависимости соответствует процессу развития в жидкой среде явления кавитации.

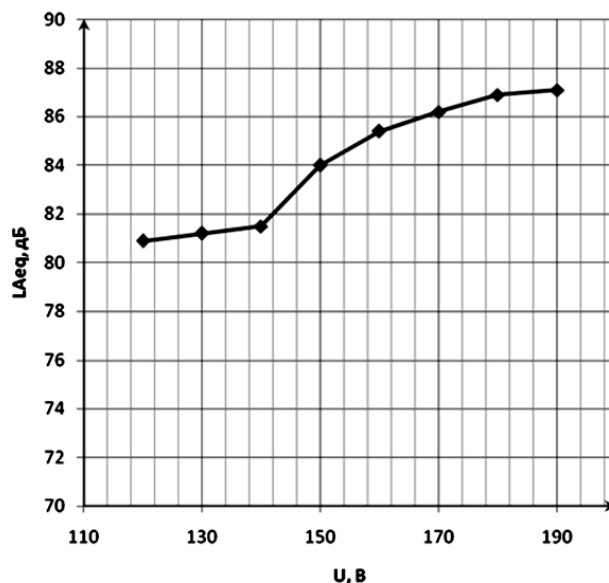


Рис. 6. Зависимость эквивалентного непрерывного уровня звука кавитационного шума от напряжения питания УЗКС

Считая, что эквивалентный непрерывный уровень звука является мерой активности кавитации, построим график зависимости активного сопротивления механической ветви $R_{эkv}$ УЗКС при работе в водной среде от уровня звука при различных напряжениях питания УЗКС. Полученные данные хорошо аппроксимируются линей-

ной зависимостью (рис. 7), при этом величина достоверности аппроксимации равна 0,987, что позволяет сделать вывод о том, что результаты контроля активного сопротивления механической ветви УЗКС могут быть использованы для контроля меры активности кавитации.

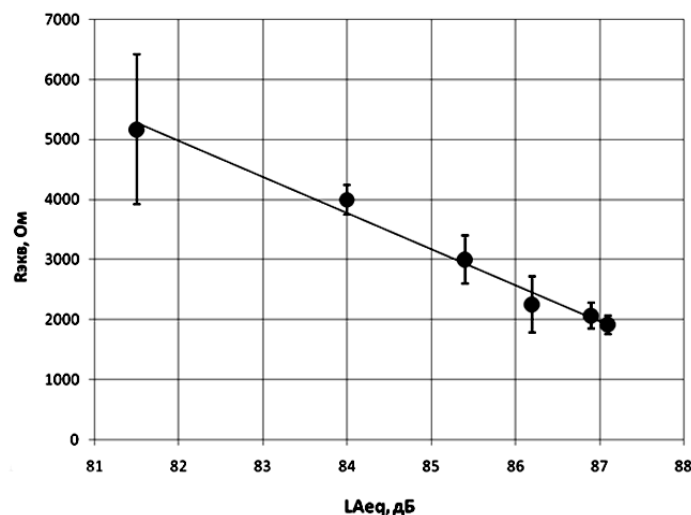


Рис. 7. Зависимость активного сопротивления механической ветви УЗКС от эквивалентного непрерывного уровня кавитационного шума

Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили наличие ярко выраженной зависимости между электрическими параметрами ультразвуко-

вых колебательных систем и кавитационными явлениями, возникающими в жидких технологических средах. Результаты исследований могут быть использованы для

создания систем косвенного контроля режимов кавитационной обработки жидких

сред при реализации в них различных технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна». Режим доступа: http://www.u-sonic.com/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsestov_v_zhidkikh_sredakh/ultrazvukovoy_tekhnologicheskii_apparat_serii_volna_v1/.

2. **Khmelev, V.N.** Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic Load Parameter / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, A.V. Shalunov, E.V. Ilchenko // International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2011. P. 241–244.

3. **Хмелев, В.Н.** Контроль параметров кавитирующих жидких сред, подвергаемых ультразвуковому воздействию / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне и др. // Ползуновский вестник. – 2012. №2/1. С.154–159.

4. **Хмелев, В.Н.** Пути совершенствования электронных генераторов ультразвуковых технологических аппаратов / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Е.В. Ильченко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. № 3. С. 247–254.

5. **Leonov G.V.** Modeling Of Cavitation, Initiated By Ultrasonic Oscillators / Gennadiy V. Leonov, Ecatherina I. Savina EDM'2006.

6. **Колесников, А.Е.** Ультразвуковые измерения / А.Е. Колесников, –М.: Изд-во стандартов, 1970. 248 с.

Хмелев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научно-исследовательской работе Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Барсуков Роман Владиславович – кандидат технических, доцент Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Ильченко Евгений Владимирович – аспирант Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Попова Наталья Сергеевна – магистрант Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Генне Дмитрий Владимирович – инженер Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

Vladimir N. Khmelev – Dr. Sc., Professor, Deputy Director for Scientific and Research Activity, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Roman V. Barsukov – Ph. D., Associate Professor, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Evgeniy V. Ilchenko – Postgraduate, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Natalya S. Popova – Master Student, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Dmitry V. Genne – Engineer, Biysk Technological Institute (branch) of Polzunov Altai State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.03.15, принята к опубликованию 10.06.15

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ НЕОДНОРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В САРАТОВЕ

Н.В. Бекренев, И.В. Злобина

DEVELOPMENT OF ULTRASONIC TECHNOLOGIES IN THE PROCESSING BY PLASTIC DEFORMATION OF NON-UNIFORM COMPOSITE MATERIALS IN SARATOV

N.V. Bekrenev, I.V. Zlobina

Рассмотрено становление и развитие методов соединения деталей из металлов и термопластов при помощи ультразвукового воздействия в г. Саратове. Показан вклад саратовских ученых и инженеров в разработку серийных ультразвуковых технологий и специального оборудования для их реализации.

Ключевые слова: ультразвуковые технологии и оборудование, авиационная и ракетная техника, товары народного потребления, клепка, сварка, композиционные и термопластичные материалы

С совершенствованием технологий получения органических и неорганических полимеров во второй половине XX века стало возрастать их применение как несущих конструкционных, так и облицовочных, защитных и декоративных материалов в различных областях техники. Появление композиционных материалов, в частности, угле- и стеклопластиков, кевлара и других еще более расширило долю неметаллов в изделиях приборо- и машиностроения. Этому способствовали уникальные свойства указанных материалов: малый удельный вес и высокая прочность, соизмеримая с прочностью металлических сплавов. Особенно перспективны композиционные материалы в авиа- и ракетостроении. Доля конструкционных угле- и стеклопластиков в современных летательных

The paper considers formation and development of methods for the connection of details from metals and thermoplasts by means of ultrasonic influence in Saratov. Contribution of the Saratov scientists and engineers to the development of serial ultrasonic technologies and special equipment for their realization is shown.

Keywords: ultrasonic technologies and equipment, aviation and rocketry, consumer goods, klepka, welding, composite and thermoplastic materials

аппаратах вполне соизмерима с алюминиевыми и титановыми сплавами, в конструкциях беспилотных и дистанционно управляемых аппаратов она превышает 50%.

С расширением производства деталей из пластмасс и композитов с 80-х годов прошлого века стало развиваться их использование в товарах народного потребления: кассетных магнитофонах, электробритвах, фенах, соковыжималках и других, объем выпуска которых постоянно нарастал.

Основные проблемы при выпуске изделий с элементами из пластмасс и композитов связаны со сборкой путем сварки и клепки. Это связано с тем, что технологии формообразования деталей из указанных материалов достаточно эффективны и позволяют весьма точно и качественно их из-

готовить методами штамповки, прессования и литья, тогда как применяемые методы соединения деталей не обеспечивали стабильной надежности соединений и эстетичного внешнего вида. Использовались операции расплавления заклепок из полимеров струей горячего воздуха или жалом электропаяльника, сварка осуществлялась контактным методом сдавливания стыков с одновременным нагревом. Это приводило к значительным деформациям, появлению заусенцев, облоя, выступов, к искривлению заклепок, неполному формированию головок.

В это же время было установлено положительное влияние ультразвука на процесс пластического деформирования материалов, обусловленное воздействием не только на контактные условия, но и на свойства и структуру деформируемого металла, изменением схемы напряженного состояния. Ультразвуковые колебания снижают статическое напряжение текучести аналогично нагреву. Однако для достижения одного и того же эффекта при воздействии УЗК требуется значительно меньше энергии, чем при нагреве. Например, для достижения нулевого статического предела текучести у алюминия требуется плотность тепловой энергии 10^{22} эВ/см³, в то время как при УЗК тот же эффект наблюдается при 10^{15} эВ/см³. Объясняется это различие тем, что ультразвуковая энергия поглощается в тех местах кристаллической решетки, которые являются носителями механизма пластической деформации (дислокации, границы зерен и т.д.), и почти не поглощается в свободных от дефектов зонах кристаллов [1]. Первоначально этот эффект пытались использовать для совершенствования заклепочных операций при сборке фюзеляжей, плоскостей и оперения самолетов, где применялись алюминиевые сплавы, обладающие высокими пластичными свойствами. Сборка с применением заклепок – основной способ соединения элементов конструкций, работающих под действием вибрационных и знакопеременных нагрузок. Клепкой обеспечивается также прочное соединение де-

талей из разнородных материалов. Именно этим объясняется широкое применение заклепочных соединений в авиастроении. Однако процесс клепки имеет существенные недостатки. Например, при соединении разнопрочных материалов или при использовании высокопрочных заклепок наблюдается разрушение зоны соединения или растрескивание формируемых головок заклепок. Осадка стержней заклепок во многих случаях вызывает деформирование объемных конструкций.

В США в конце 70-х годов XX века фирмой «Боинг» было проведено исследование клепки алюминиевых сплавов с использованием пьезокерамических вибраторов с частотой 10 кГц и питанием от машинного генератора. При подведении ультразвука к заклепке была использована схема, впервые примененная к.т.н., ведущим технологом одного из Саратовских научно-исследовательских институтов А.А. Горбуновым, в которой инструмент не имеет жесткой связи с ультразвуковым преобразователем. Данная схема позволила значительно увеличить ударный импульс, воздействующий на заклепку.

В Саратове под руководством А.А. Горбунова по результатам выполненных исследований был разработан и изготовлен ультразвуковой клепальный пресс (рис. 1), предназначенный для формирования головок заклепок из стали, медных и алюминиевых сплавов, а также для запрессовки деталей. Формировать головку заклепки возможно как с осадкой, так и без осадки тела самой заклепки. В отличие от американской клепальной установки в прессе применен магнитострикционный преобразователь мощностью 1,5 кВт, работающий на ультразвуковой частоте 18 кГц. По сравнению с клепкой без ультразвука усилие прессования уменьшается в 75 – 100 раз, что связано с увеличением в несколько раз амплитуды колебаний пуансона по сравнению с амплитудой концентратора. Пресс обеспечивал заклепочное соединение с диаметрами стержней заклепок из меди и алюминия 1–6 мм, из титана и стали 1–4 мм. Рабочий ход штока составлял до 50 мм [2, 3].

Однако применение ультразвука при клепке металлических деталей не получило распространения. Это связано с возбуждением в листовых крупногабаритных деталях колебаний звукового диапазона частот. Уровень шума при этом значительно превосходит допустимые нормы.

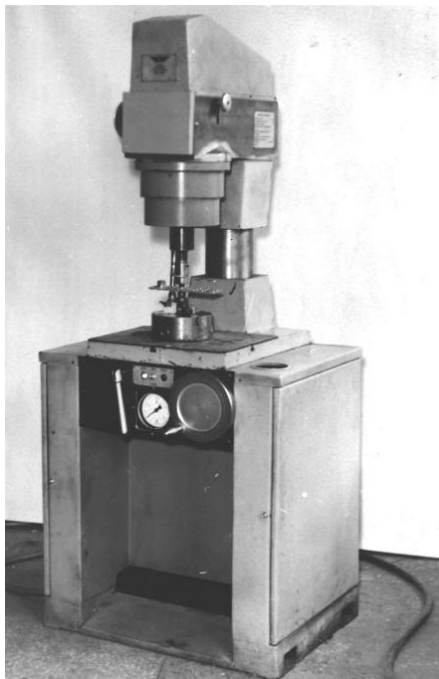


Рис. 1. Ультразвуковой клепальный пресс

Опыт использования ультразвука при клепке металлическими заклепками и исследования пластических деформаций и изменения структуры материала при ультразвуковом нагружении позволили предложить этот метод для соединения деталей из термопластов и композитов.

Особенности воздействия энергии ультразвука на полимерные материалы, в частности термопласты, следующие [4]. Сварка осуществляется за счет поглощения акустической энергии высокочастотных колебаний инструмента материалом соединяемых деталей и выделения теплоты в контактной зоне. При этом твердые полимеры имеют меньший коэффициент поглощения, поэтому их можно сваривать, даже располагая инструмент на некотором расстоянии от стыка. Мягкие полимеры настолько хорошо поглощают энергию колебаний, что даже на расстоянии несколь-

ких миллиметров потери акустической энергии настолько велики, что невозможно сформировать качественный шов. Соответственно различают схему сварки «в ближнем поле», когда расстояние между инструментом и плоскостью стыка не превышает 5 мм, и сварку «в дальнем поле», когда это расстояние может достигать 200–250 мм. В первом случае форма инструмента должна точно копировать форму соединяемых деталей. При этом образуется высококачественный герметичный шов. Во втором случае форма инструмента может быть любой, но добиться герметичности шва не удастся. Основным условием свариваемости полимеров при помощи ультразвука является приблизительное равенство температур плавления и химическое сродство материалов. Также качество сварки определяется подготовкой свариваемых поверхностей. Наибольшее значение имеют выступы, являющиеся концентраторами акустической энергии (рис. 2) [4]. Объем выступов выбирается таким, чтобы материал при деформации в процессе сварки заполнил имеющиеся пустоты, но не вытек наружу за пределы шва. В высокой точности и гладкости шва основное преимущество ультразвукового метода. Ультразвук позволяет армировать полимерную матрицу твердыми элементами, например металлической проволокой, что существенно повышает их прочность.

Использование ультразвука при клепке позволяет надежно соединять разнородные материалы, например металлы с полимерами. При этом заклепка представляет собой стержень, составляющий единое целое с основой. После его ввода в отверстие ответной детали выступ стержня осаживается ультразвуковым инструментом за счет повышения текучести материала под ультразвуковой нагрузкой. При этом формируется ровная прочная головка заклепки (рис. 3) без облоя и заусенцев.

За рубежом признанным лидером в разработке технологий производства установок для ультразвуковой сварки и клепки термопластичных материалов является фирма BRANSON.

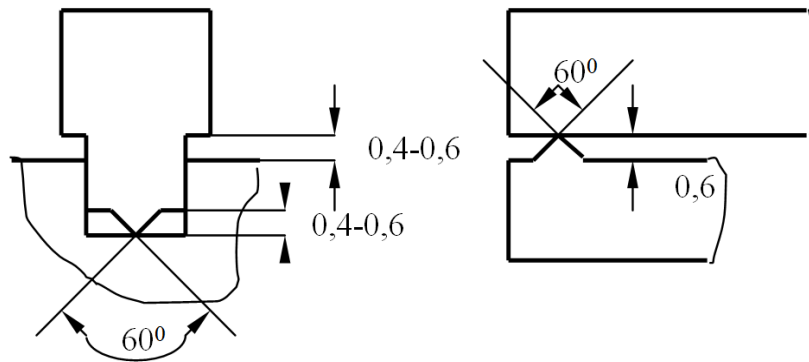


Рис. 2. Стыки деталей из термопластов, подготовленных под ультразвуковую сварку

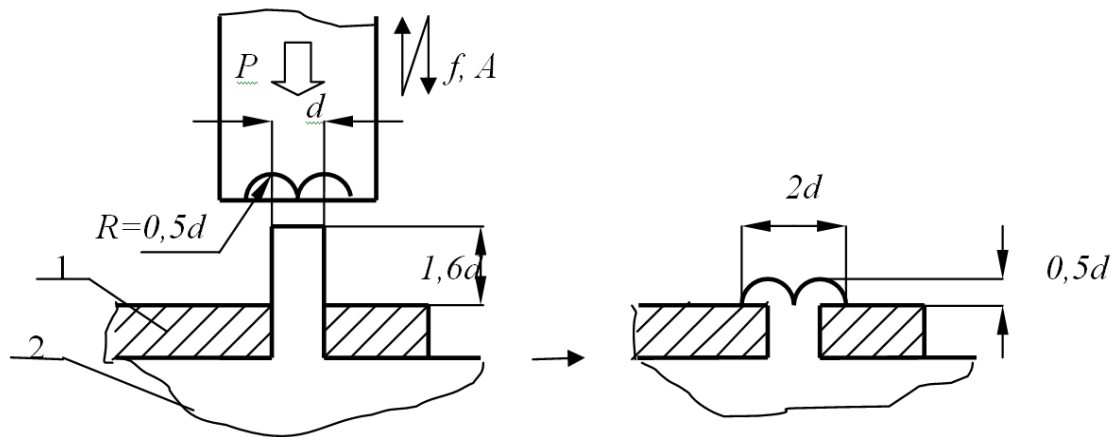


Рис. 3. Схема формирования головки заклепки из термопласта ультразвуковым осаждением. P – сила прижима инструмента, f, A – частота и амплитуда колебаний, d – диаметр стержня заклепки, R – радиус сферической полости на торце инструмента, 1 и 2 – соединяемые детали

В нашей стране разработкой ультразвуковых установок для соединения термопластичных материалов занималось несколько организаций. Существенный вклад в создание типовых конструкций и образцов данной техники был внесен саратовскими учеными и инженерами. Разработкой технологий и оборудования для ультразвуковой сварки и клепки в 80-х – 90-х годах XX века занималась лаборатория электрофизических методов обработки одного из отраслевых институтов. Ранее в ней был создан описанный выше ультразвуковой клепальный пресс. Коллективом лаборатории было разработано несколько моделей установок различной степени автоматизации.

Первой моделью была установка сварки термопластов, предназначенная для соединения изделий из термопластичных полимеров (сополимер стирола МСН, плас-

тик АБС-2020-401, сополимер СФД и др.) путем оплавления и деформирования стержней под действием ультразвуковой энергии при точечной и контурной шовной сварке. Установка (рис. 4) напольного типа состоит из станины, пневматического механизма подачи инструмента, ультразвукового преобразователя и генератора УЗУ-025М. Особенностью установки является то, что преобразователь выполнен выдвижным в направлении, перпендикулярном направлению вертикального перемещения сварочной головки. Привод установочных и рабочих ходов – пневматический.

Установка комплектуется сменными пьезокерамическими преобразователями как для односторонней, так и для многосторонней контурной или многоточечной сварки крупногабаритных деталей. Для многоточечной сварки на основе проведенных исследований разработан многопакетный

преобразователь (рис. 5), содержащий несколько рабочих инструментов концентраторов. Разработана специальная методика расчета, а также методика согласования пакетов на общую резонансную частоту, что обеспе-

чивает одинаковую интенсивность ультразвука и качество во всех точках сварки. Преобразователи собраны на пьезоэлементах ЦТС-19 размерами 56 x 22 x 10 мм и имеют собственную частоту колебаний 22 кГц.

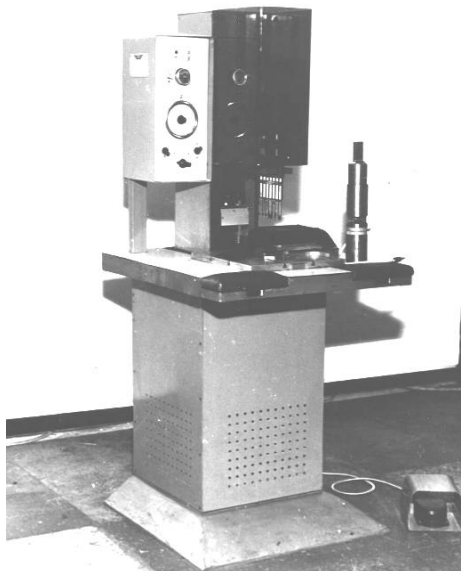


Рис. 4. Установка сварки термопластиков

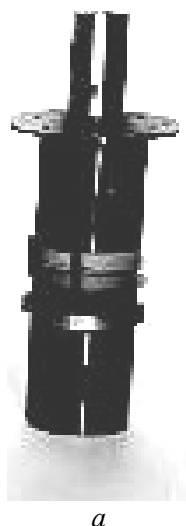


Рис. 5. Ультразвуковые пьезокерамические преобразователи: а – стержневой, б – двухпакетный с одним волноводом для работы с 4-мя инструментами

Установка имеет следующие характеристики: амплитуда колебаний торца преобразователя 15 мкм, установочный ход сварочной головки 200 мм, рабочий ход сварочной головки до 10 мм, усилие прижима сварочной головки 200-500 Н, габаритные размеры 602x652x1430 мм.

Установка оплавления термопластичных материалов (рис. 6) предназначена для соединения деталей путем размягчения и деформирования стержней диаметром 1-5 мм [3]. Установка настольного исполнения с отдельно стоящим тиристорным генератором с обратной связью по частоте. По желанию может дополнительно комплектоваться ручным ультразвуковым паяльником. В установке применен пьезокерамический преобразователь на элементах ЦТС 19 размерами 40 x 22 x 10 мм, в паяльнике – ЦТС-24 размерами 20 x 10 x 5 мм. Резонансная частота преобразователя 22 кГц. Подача инструмента осуществляется вручную, рабочее усилие создается набором грузов. Особенностью установки является

применение реагирующего на давление инструмента подпружиненного стола. При помощи регулировки пружин устанавливается требуемое усилие прижима инструмента, при нагружении стола подачей волновода-инструмента преодолевается установленное сопротивление пружины. Ультразвуковые колебания автоматически включаются только после преодоления сопротивления пружины и смещения стола в осевом направлении по команде датчика. Продолжительность обработки детали устанавливается по реле времени.

Установка имеет следующие технические характеристики: амплитуда колебаний торца инструмента 15 мкм, установочный ход сварочной головки 200 мм, габаритные размеры деталей 100x100x100 мм, усилие прижимания сварочной головки 30-300 Н, время деформирования стержней 2-10 с, рабочий ход сварочной головки до 10 мм. Установка имеет габаритные размеры (без генератора) 430x500x900 мм

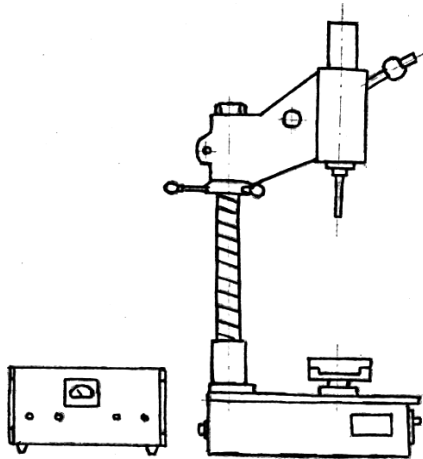


Рис. 6. Внешний вид установки оплавления термопластичных материалов

Ультразвуковой ручной сварочный инструмент «Пульсар» (рис. 7) предназначен для соединения деталей из термопластичных материалов типа полистирола, полиамида, полиэтилена преимущественно в труднодоступных местах методами точечной сварки, оплавления стержней и клепки.

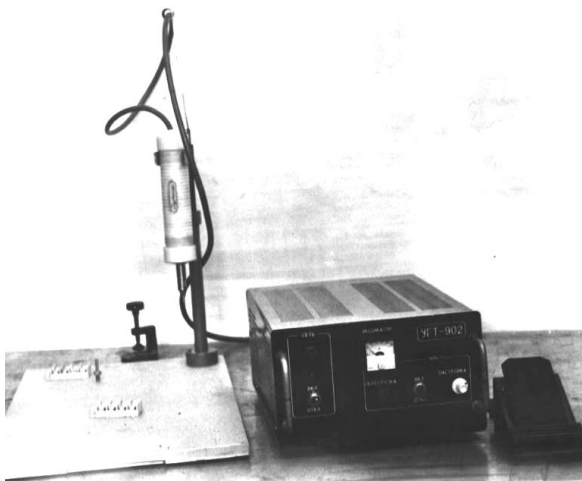


Рис. 7. Ручной ультразвуковой инструмент «Пульсар»

Установка состоит из инструмента в виде паяльника, кронштейна для подвески инструмента, стола со струбиной для крепления деталей, ультразвукового тиристорного генератора. Включение настроенного предварительно в резонанс генератора в процессе сварки (пайки) осуществляется ножной педалью, что освобождает руки оператора для манипуляций с изде-

лием и преобразователем и позволяет выполнять сварку в труднодоступных местах.

Инструмент имеет следующие характеристики: рабочая частота ультразвукового преобразователя 22 кГц, амплитуда колебаний на торце инструмента 18 мкм, габаритные размеры инструмента (головки) Ø 50 x 250 мм, масса инструмента (головки) 0,8 кг, диаметры оплавляемых стержней 0,5 – 5,0 мм, время оплавления стержней 0,5 – 10 с, поверхность стола для размещения деталей 500x500 мм.

Ультразвуковой полуавтомат сварки термопластов (рис. 8) предназначен для выполнения операций точечной сварки, шовной сварки, сварки по контуру, клепки, заваривания отверстий, запрессовки металлической фурнитуры при сборке деталей бытовых и промышленных изделий из термопластичных материалов. По технологическим возможностям пресс не уступает установкам фирм BRANSON и TELSONIC.



Рис. 8. Ультразвуковой полуавтомат сварки термопластов

Полуавтомат разработан на базе конструктивно отработанных на ранних моделях установок узлов и устройств и отличается простотой конструкции и высокой надежностью. Питание стержневого преобра-

зователя осуществляется от тиристорного генератора. Цикл работы полуавтоматический по реле времени, нагружение преобразователя осуществляется пневмоприводом. При автоматизации загрузки изделий при помощи робота-манипулятора пресс может работать полностью в автоматическом режиме.

Технические характеристики полуавтомата следующие: частота ультразвуковых колебаний преобразователя 22 кГц, усилие прижима инструмента к детали 50-600 Н, максимальная площадь соединяемых поверхностей при сварке (точечной по контуру) 150 мм², при клепке (суммарная) 90 мм², время обработки при максимальной соединяемой площади при сварке 10 с, при клепке 5 с, время выдержки соединения под нагрузкой 0,1 – 10 с, расход воздуха 0,2 м³ / час, габаритные размеры 1100x800x1900 мм.

Ультразвук позволяет формировать слоистые композиции путем соединения слоев различающихся по механическим и теплофизическим свойствам материалов. При помощи описанных выше установок осуществлялись технологии соединения полимерной пленки с картоном и стекло-текстолитом, бумаги с винипластом. Проводилось формирование головок заклепок в материалах, имеющих меньшую прочность по сравнению с заклепкой, а также склепывание материалов с большой разницей в прочности. Ультразвуковой метод позволил осуществлять, например, соединение пластин из оргстекла или поликора и стали толщиной 3 мм стальными заклепками диаметром 4 мм. При обычной прессовой и ударной клепке во всех случаях наблюдается разрушение пластин из оргстекла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Северденко В.П.** Ультразвук и пластичность / В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1976. 448 с.

2. **Бржозовский Б.М.** Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев, О.В. Захаров, Д.В. Трофимов: – Саратов: Сарат. гос.

техн. ун-т, 2006. 205 с.

3. **Бржозовский Б.М.** Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

4. **Абрамов О.В.** Ультразвуковая обработка материалов– М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

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

Злобина Ирина Владимировна – ассистент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Irina V. Zlobina - Assistant Lecturer, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Н.В. Бекренев, И.В. Злобина, А.П. Петровский

A MODEL TO IMPACT THE ULTRASONIC FLUCTUATIONS ENERGY ON THE STRUCTURE OF SOLID FRAGILE MATERIALS

N.V. Bekrenev, I.V. Zlobina, A.P. Petrovsky

Предложена феноменологическая модель разрушения кристаллических и аморфных материалов под действием ультразвука. Получены зависимости, позволяющие определить амплитуду колебаний, обеспечивающую требуемый минимальный размер зоны трещинообразования. Установлено, что величина амплитуды колебаний должна выбираться по критерию минимальной величины дефектного слоя в зависимости от особенностей структуры обрабатываемых материалов и размеров ее фрагментов, а частота колебаний должна выбираться исходя из требований обеспечения эффективности процесса обработки. На основе анализа полученных зависимостей предложен алгоритм выбора технологических режимов ультразвуковой обработки с учетом различий в структуре материалов.

Ключевые слова: *глубина дефектного слоя, твердые хрупкие материалы, энергия ультразвука, амплитуда, частота, производительность, модель*

Проблема качества обработки твердых хрупких материалов (керамики, кварца, кристаллов) в последнее время стала весьма актуальной в связи с расширением их применения в перспективных изделиях приборостроения, в частности в средствах навигации, отличающихся высокой точностью (менее 1 мкм) и низкой шероховатостью поверхности (0,08 мкм и менее по параметру R_z). Основная трудность их обработки состоит в высвобождении значительной

The phenomenological model for the destruction of crystal and amorphous materials under the influence of ultrasound is offered. The dependences allowing to determine the amplitude of fluctuations which provide the demanded minimum size of the zone of cracking are received. It is established that the size of the amplitude of fluctuations is to be chosen using the criterion of the minimum size of the defective layer depending on the features of structure of the processed materials and the sizes of its fragments, and the frequency of fluctuations is to be selected according to the requirements ensuring the efficiency of the processing. On the basis of analysis of the received dependences the algorithm of the choice of technological modes of ultrasonic processing taking into account the distinctions in the structure of materials is offered.

Keywords: *depth of a defective layer, solid fragile materials, energy of ultrasound, amplitude, frequency, productivity, model*

поверхностной энергии при разрушении в процессе формообразования, что приводит к интенсивному трещинообразованию и, как следствие, повышению уровня шероховатости и снижению прочности.

До настоящего времени эффективным методом формообразования изделий из хрупких материалов, особенно сложной формы, является ультразвуковая обработка абразивной суспензией [1-3]. Однако физика данного процесса состоит как раз в

образовании сетки микротрещин вследствие превышения предела выносливости материала из-за большого цикла знакопеременных нагрузений, вызванных колебаниями инструмента с частотой 18-44 кГц. Отделившиеся микрофрагменты выносятся водяной суспензией под влиянием кавитации и акустических течений. В соответствии с изложенным представляется важным исследовать возможность снижения интенсивности трещинообразования при ультразвуковой обработке хрупких материалов без уменьшения производительности процесса.

Как известно, все твердые материалы можно разделить на две группы: кристаллические, состоящие из элементов определенной формы, размеров и ориентированных некоторым образом относительно макрообъема материала, и аморфные, в которых невозможно выделить элементы структуры какой-либо формы. К первой группе относятся различные виды керамики, природные и синтетические кристаллы, ко второй – стекла. Существует также группа материалов, которые можно отнести к аморфно-кристаллическим – ситаллы и газотермические оксидные покрытия, которые представляют собой, как правило, скопления кристаллов (зерен), связанных между собой аморфной фазой.

Покажем, что особенности структуры указанных материалов оказывают существенное влияние на механизм их разрушения при ультразвуковой абразивной обработке и их учет при назначении режимов может способствовать повышению качества структуры изделий.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия твердого тела, совершающего ультразвуковые колебания с амплитудой A , с кристаллической структурой.

Примем в качестве модели абразивного зерна правильный многогранник, который можно с достаточной степенью достоверности заменить описанной по вершинам сферой. Под действием ультразвуковых колебаний зерно абразива радиусом R вызывает деформации инструмента и обрабатываемого материала, а также деформиру-

ется само. Пусть Δl – деформация материала изделия, ΔR – деформация зерна, ΔL – деформация инструмента.

Вследствие высокой твердости абразива считаем $\Delta R \rightarrow 0$, вследствие пластичности инструмента считаем, что он деформируется однократно пластически и его упругая деформация $\Delta L \rightarrow 0$, то есть пренебрегаем упругими деформациями инструмента и абразивного зерна и тогда можно считать $A = \Delta l$.

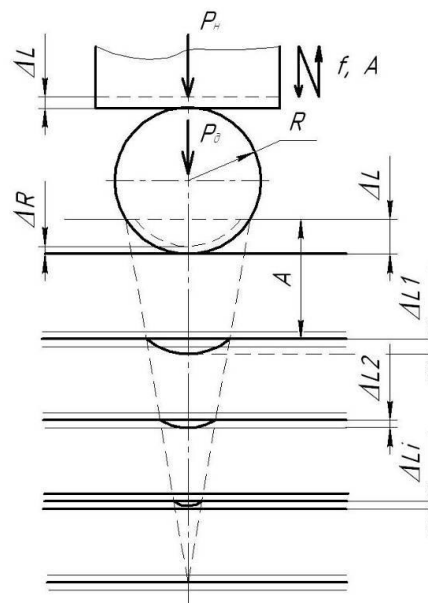


Рис. 1. Схема взаимодействия колеблющегося с ультразвуковой частотой тела с кристаллической структурой

Деформация обрабатываемого материала, если он имеет кристаллическую структуру, будет предположительно складываться из деформаций собственно кристаллов и деформаций межзеренных границ. При этом вследствие малого акустического сопротивления кристаллов можно считать затухание амплитуды в них минимальным, а основной вклад в этот процесс будут вносить межзеренные границы, имеющие большую пластичность и, как следствие внутреннего трения, большее акустическое сопротивление. Поэтому затухание амплитуды будет происходить скачкообразно от слоя кристаллов к слою. Следовательно, пропорционально будет снижаться деформации кристаллов и согласно закону Гука – внутренние напряжения.

Согласно [1] амплитуда ультразвуковых колебаний в твердом теле затухает по закону

$$A = A_M e^{-\delta x}, \quad (1)$$

где A_M – максимальное за период колебаний значение амплитуды смещения торца инструмента, δ – коэффициент затухания, x – расстояние от поверхности до рассматриваемой точки в материале.

Абсолютная деформация материала с учетом наших допущений равна

$$\Delta l = A = A_M e^{-\delta x}. \quad (2)$$

Напряжения в материале равны [4]

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E \frac{A_M e^{-\delta x}}{l}, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, l – толщина обрабатываемого материала.

Примем $x = kh$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, а h – толщина межзеренной границы.

Если происходит разрушение материала, то выполняется условие

$$\sigma \geq [\sigma]. \quad (4)$$

Это означает, что превышает предел прочности материала на сжатие, и можно ожидать образование трещины в структуре и релаксацию напряжений. Однако вследствие принятого предположения о незатухании ультразвука в кристалле истинная величина зоны ожидаемого трещинообразования будет не x , а существенно больше. Очевидно, можно записать, что глубина залегания трещин в поверхностном слое равна

$$H = (k - 1)(a + h), \quad (5)$$

где a – средний размер кристаллов структуры материала.

Подставив (3) в (4), получим

$$\sigma = E \frac{A_M e^{-\delta kh}}{l} \geq [\sigma]. \quad (6)$$

Согласно [5] предел прочности хрупких кристаллических материалов определяется зависимостью

$$[\sigma] = \sigma_0 - k_1 a^{-0,5}, \quad (7)$$

где σ_0 – прочность монокристалла основного компонента материала, k_1 – коэффициент, a – средний размер зерна структуры.

Как известно, трещины в материале начнут образовываться при равенстве действующих напряжений и предела прочности. Поэтому, задавшись допустимой глубиной залегания трещин, определяемой по (5), можно найти максимально допустимую по критерию трещинообразования амплитуду колебаний инструмента.

На основе (5) можно записать

$$k = \frac{H}{a + h} + 1. \quad (8)$$

Преобразовав с учетом (8) выражение (6), получим для максимальной амплитуды колебаний зависимость

$$A_M = \left(\frac{[\sigma] l}{E} \right)^{\delta h \left(\frac{H}{a + h} + 1 \right)} \quad (9)$$

Диаметр кольцевой трещины в хрупком материале при воздействии абразивного зерна равен [6-8]

$$d = 2,2 \sqrt[3]{\frac{RP}{E}}, \quad (10)$$

где R – половина размера зерна кристаллической структуры (радиус описанной вокруг зерна окружности), P – действующая на материал со стороны зерна сила.

При ультразвуковой обработке на зерна абразива и через них на поверхность материала действует динамическая сила, определяемая согласно [2] выражениями

$$P\delta \approx C_2 A^{0,56} \text{ или } P\delta \approx 4P_n, P\delta \approx C_1 P_n^{0,34}.$$

Из этих выражений можно получить

$$P_0 = 4P_n^{0,66} A^{0,56}. \quad (11)$$

С учетом (9) динамическая сила равна

$$P_0 = 4P_n^{0,66} \left[A_M^{-h\delta \left(\frac{H}{a+h} + 1 \right)} \right]^{0,56}. \quad (12)$$

Тогда выражение (10) преобразуется к виду

$$d = 2,2 \sqrt[3]{\frac{R P_n^{0,66} \left[A_M^{-h\delta \left(\frac{H}{a+h} + 1 \right)} \right]^{0,56}}{E}}. \quad (13)$$

Из этого выражения можно найти амплитуду, при которой глубина залегания трещин (протяженность) и поперечные размеры зоны трещинообразования будут не более допустимых. Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод, что для кристаллической структуры материала можно ожидать влияние следующих внешних факторов на качество поверхностного слоя:

- глубина залегания трещины тем больше, чем больше амплитуда ультразвуковых колебаний инструмента и размер зерна структуры;

- с увеличением толщины межзеренных границ глубина распространения трещины убывает из-за снижения амплитуды вследствие затухания колебаний;

- амплитуды ультразвуковых колебаний и напряжения убывают с глубиной ступенчато от кристалла к кристаллу;

- минимальная величина зоны трещинообразования оказывается не меньше размера кристалла структуры, так как при иных условиях возникающие напряжения не превышают предела прочности на сжатие и обработка становится невозможной;

- поперечные размеры зоны трещинообразования (диаметр) зависят также от радиуса округления вершины абразивного зерна R и силы прижима инструмента к поверхности материала P_n ;

- уменьшить поперечные размеры зоны трещинообразования возможно, применяя малые амплитуды колебаний, малые давления инструмента и острые абразивные зерна (алмаз, эльбор или мелкие фракции других абразивов).

Определим минимальную амплитуду ультразвукового воздействия, при которой возможно разрушение элементов кристаллической структуры. Физическая модель разрушения зерна под действием ультразвуковых колебаний внешнего тела может быть представлена следующей схемой (рис. 2, 3). Внешнее тело и нижележащие слои считаются абсолютно жесткими. Первый контакт с зерном происходит в одной из его вершин.

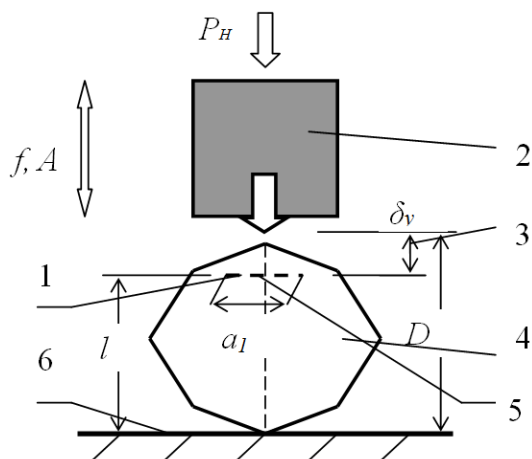


Рис. 2. Схема воздействия колеблющегося тела на зерно при его разрушении

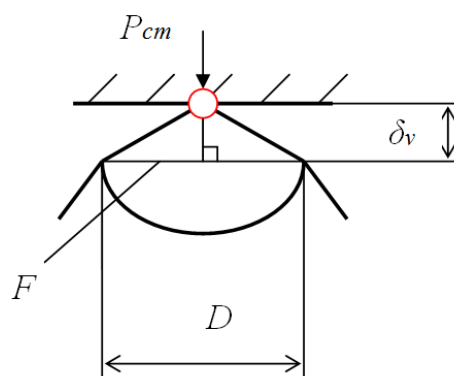


Рис. 3. Схема, показывающая пятно деформации при взаимодействии внешнего тела с зерном

На рис. 2 и 3 обозначено: 1 – контактная площадка упруго деформированного зерна; 2 – внешнее тело (абразив); 3 – упругая деформация зерна структуры под действием нормальной статической силы P_H ; 4 – исходное зерно структуры; 5 – трещина в зерне, делящая его на части; 6 – контртело (ниже лежащие слои структурных зерен); f и A – частота и амплитуда колебаний инструмента; a_1 – величина площадки контакта; D – размер исходного зерна; l – величина трещины; δ_y – величина упругой деформации; P_H и P_δ – нормальная статическая и динамическая силы воздействия, F – хорда абразивного зерна.

На зерно кристаллической структуры будет действовать периодическая сила, величина которой определяется амплитудой колебаний и силой прижатия внешнего тела. Вследствие воздействия этих сил зерно будет подвергаться циклическому сжимающему действию. Когда число циклов нагружения превысит допустимое по условиям прочности, произойдет разрушение.

Определим величину напряжений, необходимую для первичного раскалывания агломерата [4]:

$$\sigma_{\max} = 1,3[\sigma] \sqrt{\frac{R}{r}}, \quad (14)$$

где $[\sigma]$ – предел прочности материала на сжатие; R – половина размера зерна кристаллической структуры (радиус описанной вокруг зерна окружности); r – радиус округления вершины абразивного зерна, определяемый согласно работам А.В. Королева зависимостью $r = 6,83h^{1,14}d_3^{-0,14}$; h – глубина внедрения абразивного зерна в материал (в случае ультразвуковой обработки хрупких материалов можно приближенно допустить, что $h = A$); d_3 – средний размер абразивного зерна.

Выражение (14) может быть переписано с учетом зависимости радиуса при вершине зерна от его размера и принятого соотношения глубины внедрения абразива и амплитуды колебаний

$$\sigma_{\max} = 1,3[\sigma] \sqrt{\frac{R}{6,83A^{1,14}d_3^{-0,14}}}. \quad (15)$$

С учетом ранее полученных выражений и (15) можно получить зависимость, связывающую амплитуду колебаний инструмента со свойствами обрабатываемого материала и размерами зерна его структуры

$$A = 0,16 \frac{[\sigma]^{0,88} R^{0,44} F^{0,88}}{P_{cm}^{0,584} d_3^{-0,06}}. \quad (16)$$

Видно, что минимальная амплитуда ультразвуковых колебаний инструмента, необходимая для разрушения кристаллической структуры, в высокой степени зависит от прочности материала и размеров элементов его структуры (зерен).

С учетом зависимостей усталостной прочности [4, 8] в условиях высокочастотного циклического нагружения получено выражение, определяющее время разрушения элемента кристаллической структуры материала

$$\tau = \frac{N_B (4P_H^{0,66} A^{0,56})^m}{0,5 f \sigma_3^m}, \quad (17)$$

где $N_B = 10^7$ – принятое в механике разрушения базовое число циклов нагружения; σ_3 – эквивалентные напряжения, зависящие от нормальных и касательных напряжений, а также размеров объекта нагружения; m – показатель степени кривой усталости, определяемый экспериментально для различных материалов и приводящийся в справочниках.

Расчеты по (16) и (17) показывают, что при размерах зерен порядка 30-40 мкм величина амплитуды воздействия составляет у керамических материалов 7 мкм, при размерах зерен 4-5 мкм – 1-2 мкм, а время разрушения одного кристаллического зерна не меньше 10 - 12 с. Во всех случаях эффективная размерная обработка материалов по общепринятой схеме невозможна и необходимо изменение частоты воздействия

ультразвука в соответствии с размерами элементов структуры материала.

В конечном итоге эффективность воздействия ультразвука на твердые тела, жидкости и газы определяется его интенсивностью [3]

$$I_a = 19,72 A^2 f^2 \rho c, \quad (18)$$

где c – скорость звука в обрабатываемом материале; ρ – плотность обрабатываемого материала.

С целью сохранения высокой производительности ультразвуковой обработки с минимальной дефектностью поверхности частота ультразвуковых колебаний инструмента должна быть принята по зависимости, позволяющей выполнить условие $I_a = \text{const}$, а именно

$$f = \frac{0,225 \sqrt{\frac{I_a}{\rho c}}}{A}. \quad (19)$$

В этом выражении I_a – интенсивность ультразвука при стандартных промышленных частотах (18, 22, 44 кГц) и амплитудах (10 – 20 мкм), применяемых для размерной обработки твердых хрупких материалов с требуемой производительностью.

Результаты расчетов по (9), (13), (16), (19) показывают, что с уменьшением размеров кристаллических зерен структуры материала амплитуда колебаний инструмента должна также снижаться, но интенсивность ее снижения существенно меньше. В целом характер зависимости близок

к гиперболическому. Частота ультразвука находится в обратной зависимости от амплитуды. Характер зависимости частоты от размеров кристаллических зерен можно считать близким к параболическому.

Алгоритм назначения режимов высокоэффективной ультразвуковой обработки с обеспечением минимальной дефектности поверхностного слоя на основе полученных моделей может выглядеть следующим образом:

– исходя из технических требований к поверхности детали, задаются размерами зоны распространения трещин d и их протяженности H ;

– подставив d в (13), находят минимальную по критерию трещинообразования амплитуду колебаний A_1 ;

– исходя из средних размеров элементов структуры материала, по (16) находят минимальную по критерию разрушения зерен структуры амплитуду колебаний A_2 ;

– сравнивая A_1 и A_2 , выбирают наименьшее значение амплитуды (если окажется, что $A_1 < A_2$, то, подставив найденное значение A_1 в (16), находят соответствующее значение статической силы прижатия инструмента P_H , обеспечивающей разрушение зерен);

– подставив найденное минимальное значение A в (19) и задавшись рекомендуемой для обработки хрупких материалов величиной интенсивности ультразвука с учетом плотности материала и скорости распространения ультразвуковой волны, находят частоту колебаний, обеспечивающую производительность обработки при сниженной амплитуде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы физики и техники ультразвука / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский и др. – М.: Высш. шк.; 1987. 250 с.
2. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков – М.: Машиностроение, 1980. 300 с.
3. Бржозовский Б.М. Ультразвуковые технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении / Б.М. Бржозовский, Н.В. Бекренев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. 348 с.

4. Ионов В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В.Н. Ионов, В.В. Селиванов – М.: Машиностроение, 1987. 272 с.

5. Url: <http://www.matved.2010.narod.ru>.
6. Орлов А.Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах / А.Н. Орлов М.: Москва. Высш. шк., 1983. 144 с.

7. Выбор технологических условий и режимов алмазного шлифования пластин из хрупких неметаллических материалов / А.В. Балыков, А.Б. Липатова // Технология металлов. 2011. № 1. С. 42-51.

8. Юшко В.И. Изыскание способов сни-

жения глубины нарушенного слоя в хрупких неметаллических материалах при обычном и ультразвуковом шлифовании алмазным инструментом деталей двигателей летательных аппаратов / В.И. Юшко // Дисс. канд. техн. наук. – М.: МАИ, 1989. 144 с.

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

Злобина Ирина Владимировна – ассистент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Петровский Алексей Петрович – кандидат технических наук, ведущий технолог ФГУП «ПО «Корпус»» (г. Саратов).

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

Irina V. Zlobina - Assistant Lecturer, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksei P. Petrovsky – Leading Technologist at FGUP PC Corpus (Saratov)

Статья поступила в редакцию 14.05.15, принята к опубликованию 10.06.15



ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

УДК 621.365.5

К РАСЧЁТУ КАМЕР С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ УСТАНОВОК СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА, РАБОТАЮЩИХ В МНОГОЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ

Ю.С. Архангельский, А.В. Фёдоров

CALCULATION OF THE RUNNING-WAVE CAMERAS OF MICROWAVE PLANTS OPERATING UNDER THE MULTIPLE-FREQUENCY MODE

Yu.S. Arkhangelskiy, A.V. Fedorov

На основе теории цепей проведено сравнение результатов расчёта камер с бегущей волной установок СВЧ диэлектрического нагрева, работающих в одночастотном и многочастотном режимах.

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

Геометрические размеры камеры с бегущей волной (КБВ) на нерегулярном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлектриком (рис. 1 а), при которых КБВ согласована с СВЧ генератором и обеспечивает равномерный нагрев диэлектрика, зависят от длины волны λ генератора, относительной диэлектрической проницаемости ε' и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ нагреваемого диэлектрика [1].

Based on the network analysis the paper presents a comparison of results of calculation relating the running-wave cavity of microwave installations for dielectric heating working under the single-frequency and multiple-frequency modes.

Keywords: the running wave cavity, microwave installation, calculation, equivalent circuit, wavelength, relative permittivity, loss angle, single frequency mode, multiple-frequency mode

Если рассчитывать КБВ с помощью теории цепей, то для её согласования с генератором и равномерного нагрева диэлектрика погонные параметры R_n и X_n эквивалентной схемы КБВ (рис. 1 б) должны удовлетворять условиям [2]

$$R_n = \operatorname{const}, X_n = 0 \quad (1)$$

во всём диапазоне рабочих температур процесса термообработки диэлектрика, причем $R_n(F_R)$ и $X_n(F_X)$, где

$$F_R = \frac{\left(\cos \frac{\delta}{2}\right) \operatorname{sh} \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \sin \frac{\delta}{2}}\right) - \left(\sin \frac{\delta}{2}\right) \sin \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \cos \frac{\delta}{2}}\right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \sin \frac{\delta}{2}}\right) + \cos \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \cos \frac{\delta}{2}}\right)}$$

$$F_X = \frac{\left(\sin \frac{\delta}{2}\right) \operatorname{sh} \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \sin \frac{\delta}{2}}\right) + \left(\cos \frac{\delta}{2}\right) \sin \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \cos \frac{\delta}{2}}\right)}{\operatorname{ch} \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \sin \frac{\delta}{2}}\right) + \cos \left(\frac{4\pi b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \cos \frac{\delta}{2}}\right)}$$
(2)

Здесь b_2 – толщина слоя диэлектрика.

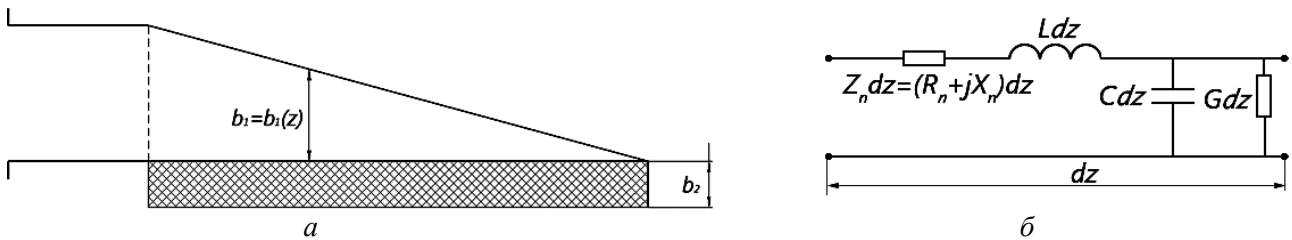


Рис. 1. КБВ на прямоугольном нерегулярном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлектриком: *а* – КБВ; *б* – эквивалентная схема отрезка dz прямоугольного волновода, частично заполненного диэлектриком с потерями

При работе установки СВЧ диэлектрического нагрева на одной из разрешённых частот [3] условия (1) выполняются лишь тогда, когда геометрия КБВ рассчитана на ε' и $\operatorname{tg} \delta$, соответствующие начальной температуре диэлектрика. Но как только диэлектрик начинает нагреваться, ε' и $\operatorname{tg} \delta$ изменяются, условия (1) нарушаются, появляется рассогласование КБВ с СВЧ генератором и неравномерность нагрева диэлектрика. Наилучшее согласование КБВ во всём диапазоне температуры термообработки и наибольшая равномерность нагрева диэлектрика достигаются, если расчёт геометрических размеров КБВ провести на средние в диапазоне температур значения ε' и $\operatorname{tg} \delta$ (рис. 2) [1,2].

Для достижения наилучшего согласования КБВ и наиболее равномерного нагрева, геометрия КБВ должна быть такой, чтобы расчётные области A изменений F_R и F_X приходились на наиболее пологие участки кривых F_R и F_X (рис. 3).

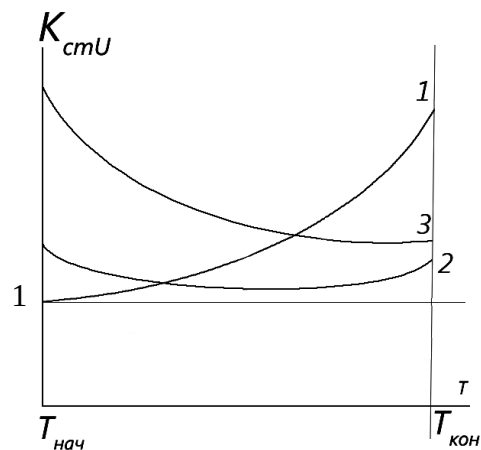


Рис. 2. Зависимости K_{cmU} КБВ от температуры диэлектрика (геометрические размеры КБВ рассчитаны на R_n и X_n , соответствующие: 1 – начальному моменту обработки; 2 – моменту в середине интервала обработки; 3 – моменту окончания обработки)

Для повышения равномерности нагрева в КБВ в работах [1,4] предложено использовать многочастотный режим работы, заменив магнетрон в установках СВЧ диэ-

лектрического нагрева на широкополосный СВЧ генератор. Применяв перестраиваемый по частоте СВЧ генератор, можно плавным изменением частоты компенсировать изменение с температурой величины $\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}$. Это предложение заслуживает детального рассмотрения.

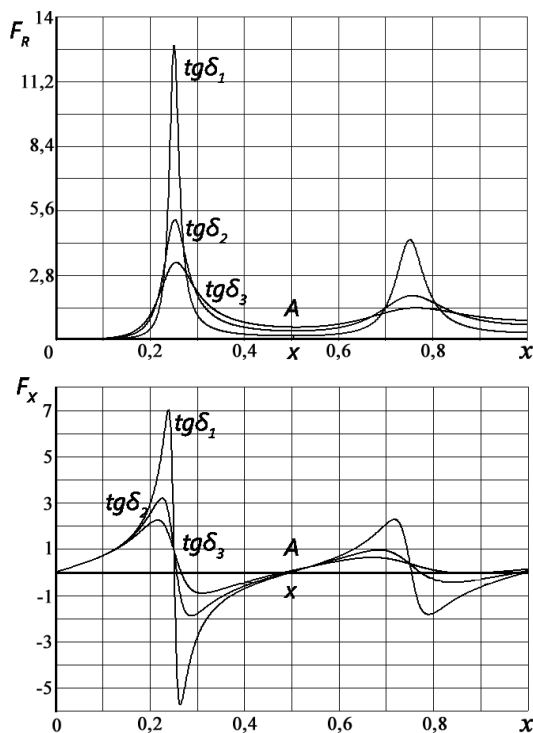


Рис. 3. Зависимости F_R и F_X от

$$x = \frac{b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}$$

Сопоставим результаты расчёта F_R и F_X для КБВ в одночастотном и многочастотном режимах. Пусть КБВ собрана на прямоугольном волноводе сечением 4,5х9 см,

в одночастотном режиме генератор работает на частоте 2450 МГц, а в многочастотном режиме длина волны генератора может меняться в пределах $9 < \lambda < 18$ см. Диэлектрические параметры обрабатываемого диэлектрика в зависимости от температуры могут изменяться по-разному. Выберем 4 типа диэлектриков с широким диапазоном изменения ε' и $\operatorname{tg} \delta$, когда с увеличением температуры T :

- 1) ε' и $\operatorname{tg} \delta$ возрастают;
- 2) ε' и $\operatorname{tg} \delta$ уменьшаются;
- 3) ε' возрастает, $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается;
- 4) ε' уменьшается, $\operatorname{tg} \delta$ возрастает.

Пусть ε' и $\operatorname{tg} \delta$ для каждого из 4 диэлектриков в зависимости от температуры T изменяются так, как показано в табл. 1.

В одночастотном режиме профиль КБВ рассчитывается на средние значения диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика $\varepsilon'_{\text{ср}} = 42,5$ и $\operatorname{tg} \delta_{\text{ср}} = 0,18$. Координата рабочей точки x в областях A зависимостей $F_R(x)$ и $F_X(x)$ (рис.3) выбрана равной $x=0,5$. Тогда толщина слоя диэлектрика $b_{\text{ср}} = 0,93$ см. В процессе нагрева рабочая точка изменяет своё положение в области A так, что

$$x(T) = \frac{b_{2\text{ср}}}{\lambda_{\text{ср}}} \sqrt{\varepsilon'(T) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta(T)}} \quad (3)$$

В табл.2 приведены результаты расчёта $F_R(x)$ и $F_X(x)$ по соотношениям (2) в одночастотном режиме нагрева для всех четырёх диэлектриков.

Таблица 1

Зависимости ε' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика от температуры

T °C	Диэлектрик							
	D_1		D_2		D_3		D_4	
	ε'	$\operatorname{tg} \delta$	ε'	$\operatorname{tg} \delta$	ε'	$\operatorname{tg} \delta$	ε'	$\operatorname{tg} \delta$
20	35	0,1	50	0,25	35	0,25	50	0,1
40	40	0,15	45	0,2	40	0,2	45	0,15
60	45	0,2	40	0,15	45	0,15	40	0,2
80	50	0,25	35	0,1	50	0,1	35	0,25

Зависимости F_R и F_X от $\frac{b_{2\text{нач}}}{\lambda(T)} \sqrt{\varepsilon'(T) \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta(T)}}$ в одночастотном режиме

T °C	Диэлектрик											
	D_1			D_1			D_1			D_1		
	x	F_R	F_X	x	F_R	F_X	x	F_R	F_X	x	F_R	F_X
20	0.45	0.17	-0.3	0.55	0.39	0.28	0.46	0.39	-0.22	0.54	0.17	0.25
40	0.48	0.23	-0.09	0.52	0.3	0.11	0.49	0.3	-0.06	0.51	0.23	0.09
60	0.52	0.3	0.11	0.48	0.23	-0.09	0.51	0.23	0.09	0.49	0.3	-0.06
80	0.55	0.39	0.28	0.45	0.17	-0.3	0.54	0.17	0.25	0.46	0.39	-0.22
	$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0 \pm 0,29$			$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0 \pm 0,29$			$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0,02 \pm 0,23$			$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0,02 \pm 0,23$		

Заметим, согласно табл. 2, непостоянство функций $F_R(x)$ и $F_X(x)$ зависит не от направления движения рабочей точки x по оси, а от характера изменения ε' и $\text{tg} \delta$.

Рассмотрим далее многочастотный режим работы установки СВЧ диэлектрического нагрева с КБВ на прямоугольном нерегулярном волноводе, частично заполненном обрабатываемым диэлектриком.

В многочастотном режиме соотношение аналогичное (3) имеет вид

$$x(T) = \frac{b_{2\text{нач}}}{\lambda(T)} \sqrt{\varepsilon'(T) \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta(T)}} \quad (4)$$

где $b_{2\text{нач}}$ рассчитывается по (4) при заданном $x(T_{\text{нач}}) = A$ и $\lambda(T_{\text{нач}})$ – длине волны СВЧ генератора в начальный момент термообработки; $T_{\text{нач}}$ – начальная температура обрабатываемого диэлектрика.

Так как расчетная точка $x(T)$ для диэлектриков $D_1, \dots, D_4$ при изменении ε' и $\text{tg} \delta$ смещается в ту или иную сторону, то и длину волны λ с изменением температуры диэлектрика требуется увеличивать или уменьшать, поэтому для разных диэлектриков $\lambda_{\text{нач}}$ и $b_{2\text{нач}}$ будут разными. Рассмотрим некоторые имеющиеся здесь варианты.

Вариант 1. Пусть $x(T) = A1 = 0.53$ (A1 на рис. 4). Значения $\lambda_{\text{нач}}$ и $b_{2\text{нач}}$ для диэлектриков $D_1, \dots, D_4$ приведены в табл. 3, а F_R и $F_X, \lambda(T)$ – в табл. 4.

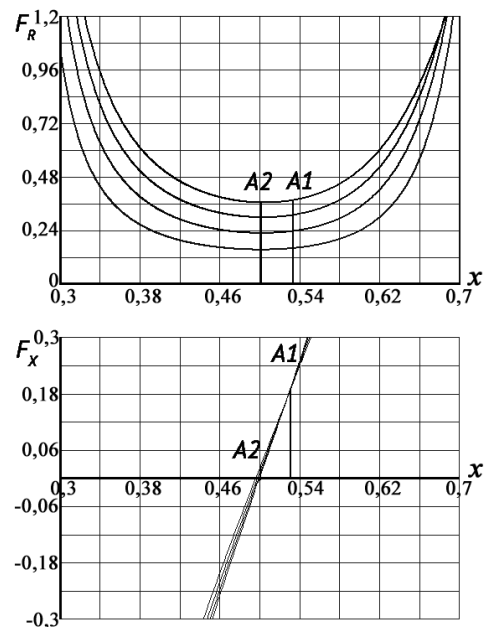


Рис. 4. Зависимости F_R и F_X от $x = \frac{b_2}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}}$ для многочастотного режима

В сравнении с одночастотным режимом, при этом варианте многочастотного режима разброса величины F_X практически нет.

Вариант 2. Пусть $x(T) = A2 = 0.5$ (A2 на рис. 4). Значения $\lambda_{\text{нач}}$ и $b_{2\text{нач}}$ для диэлектриков $D_1, \dots, D_4$ приведены в табл.3, а F_R и $F_X, \lambda(T)$ – в табл. 5.

Во втором случае имеем $F_X \approx 0$ и очень малый разброс этой величины в процессе нагрева ($\approx 0,01$).

Таблица 3

Зависимости $b_{2\text{нач}}$ и $\lambda_{\text{нач}}$ для КБВ с диэлектриками $D_1, \dots, D_4$

Параметры		Диэлектрик			
		D_1	D_2	D_3	D_4
$\lambda_{\text{нач}}, \text{см.}$		10	17	10	17
$b_{2\text{нач}}, \text{см}$	Вариант 1	0,89	1,29	0,9	1,3
	Вариант 2	0,84	1,2	0,83	1,1

Таблица 4

Зависимости $F_R(T)$ и $F_X(T)$ в многочастотном режиме при $x(T) = 0.53$

$T, ^\circ\text{C}$	Диэлектрик															
	D_1				D_2				D_3				D_4			
	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$
20	5,93	0,16	0,19	10	7,18	0,37	0,19	17	6,01	0,37	0,19	10	7,09	0,16	0,19	17
40	6,36	0,24	0,19	10,7	6,77	0,31	0,19	16	6,39	0,31	0,19	10,63	6,75	0,24	0,19	16,2
60	6,77	0,31	0,19	11,4	5,36	0,24	0,19	15	6,75	0,24	0,19	11,23	6,39	0,31	0,19	15,3
80	7,18	0,37	0,19	12,1	5,93	0,16	0,19	14	7,09	0,16	0,19	11,8	6,01	0,37	0,19	14,4
	$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0,19$				$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0,19$				$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0,19$				$F_R = 0,27 \pm 0,11$ $F_X = 0,19$			

Таблица 5

Зависимости $F_R(T)$ и $F_X(T)$ в многочастотном режиме при $x(T) = 0.5$

$T, ^\circ\text{C}$	Диэлектрик															
	D_1				D_2				D_3				D_4			
	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$	$\sqrt{\varepsilon' \sqrt{1 + tg^2 \delta}}$	F_R	F_X	$\lambda, \text{см}$
20	5,93	0,16	0	10	7,18	0,37	0,02	17	6,01	0,37	0,02	10	7,09	0,16	0	17
40	6,36	0,23	0,01	10,7	6,77	0,3	0,02	16	6,39	0,3	0,02	10,63	6,75	0,23	0,01	16,2
60	6,77	0,3	0,02	11,4	5,36	0,23	0,01	15	6,75	0,23	0,01	11,23	6,39	0,3	0,02	15,3
80	7,18	0,37	0,02	12,1	5,93	0,16	0	14	7,09	0,16	0	11,8	6,01	0,37	0,02	14,4
	$F_R = 0,26 \pm 0,1$ $F_X = 0 \pm 0,01$				$F_R = 0,26 \pm 0,1$ $F_X = 0 \pm 0,01$				$F_R = 0,26 \pm 0,1$ $F_X = 0 \pm 0,01$				$F_R = 0,26 \pm 0,1$ $F_X = 0 \pm 0,01$			

Графики зависимостей длин волн от температур для четырёх выбранных диэлектриков приведены на рис. 5.

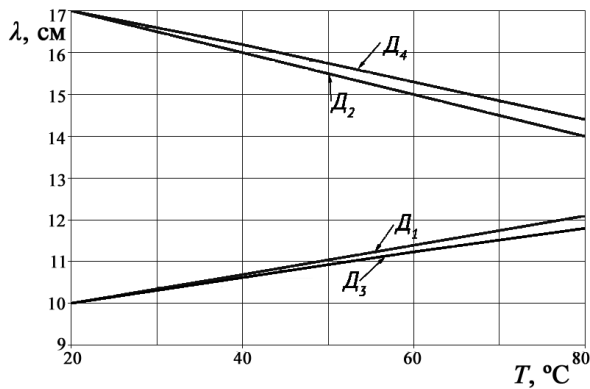


Рис. 5. Графики зависимостей $\lambda(T)$ для четырёх диэлектриков в многочастотном режиме.

Из расчётов видно, что, зафиксировав абсциссу рабочей точки на одном значении

(A1 или A2 на рис.4), полностью скомпенсировать разброс F_R , вызванный изменением $\text{tg}\delta$ в процессе нагрева, не удастся.

Однако существенного снижения разброса значений F_R можно добиться, изменяя длину волны генератора так, чтобы при любом значении $\text{tg}\delta$ ордината рабочей точки была бы постоянна. Пояснение данного метода показано на рис. 6.

При начальной температуре T_1 , рабочая точка соответствует A(T_1). В процессе изменения температуры и соответственно $\text{tg}\delta$ диэлектрика рабочая точка смещается так, что значение F_R остаётся постоянным и равным выбранному уровню. От выбора уровня F_R зависит диапазон движения рабочей точки и соответственно величина разброса F_X .

Рассмотрим варианты 3 и 4, показанные на рис. 6 а, б:

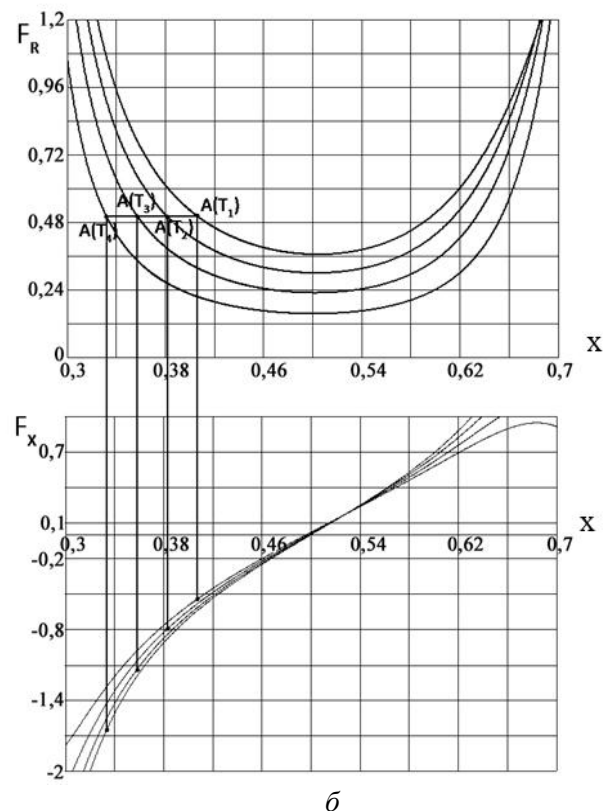
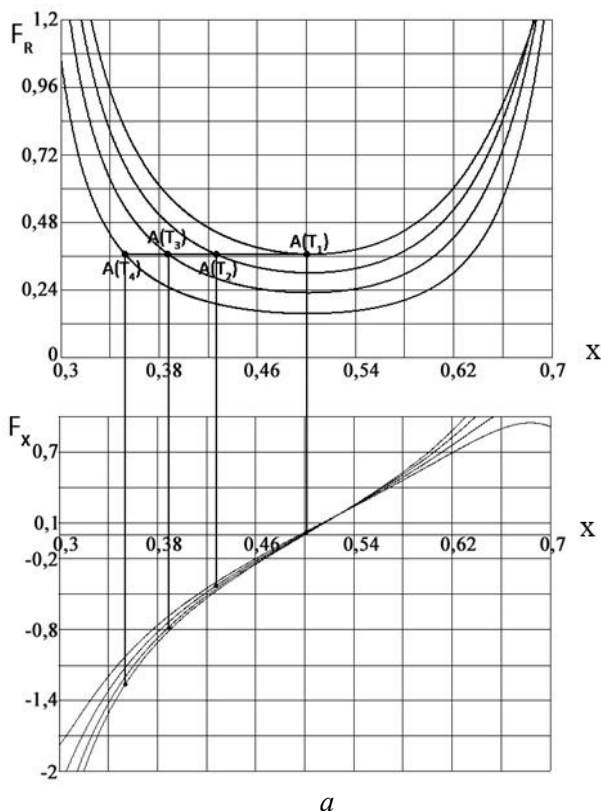


Рис. 6. Алгоритм движения рабочей точки для минимизации разброса F_R (а, б – варианты выбора значений уровней F_R)

Вариант 3. Пусть $F_R = \text{const} = 0.36$ (рис. 6 а). Значения $\lambda_{\text{нач}}$ и $b_{2\text{нач}}$ для диэ-

лектриков $D_1, \dots, D_4$ приведены в табл. 6, а $x(T)$, F_R , F_X и $\lambda(T)$ – в табл. 7.

Таблица 6

Зависимости $\lambda_{нач}$ и $b_{2нач}$ для КБВ с диэлектриками $D_1, \dots, D_4$

Параметры		Диэлектрик			
		D_1	D_2	D_3	D_4
$\lambda_{нач}, \text{см.}$		17	12	10	17
$b_{2нач}, \text{см}$	Вариант 3	1.01	0,85	0,83	0,84
	Вариант 4	0,95	0,68	0,68	0,8

Таблица 7

Зависимости $F_R(T)$ и $F_X(T)$ в многочастотном режиме при $F_R = \text{const} = 0.36$

$T\text{ }^{\circ}\text{C}$	Диэлектрик															
	D_1				D_2				D_3				D_4			
	$x(T)$	F_R	F_X	λ , см	$x(T)$	F_R	F_X	λ , см	$x(T)$	F_R	F_X	λ , см	$x(T)$	F_R	F_X	λ , см
20	0,35	0,36	-1,28	17	0,5	0,36	0,02	12,2	0,5	0,36	-1,28	10	0,35	0,36	0,02	17
40	0,39		-0,79	16,57	0,43		-0,44	13,5	0,43		-0,79	12,47	0,39		-0,44	14,7
60	0,43		-0,44	16,04	0,39		-0,79	14	0,39		-0,44	14,49	0,43		-0,79	12,66
80	0,5		0,02	14,5	0,35		-1,28	14,3	0,35		0,02	16,75	0,5		-1,28	10,15
	$F_R = 0,36$ $F_X = -0,62 \pm 0,65$			$F_R = 0,36$ $F_X = -0,62 \pm 0,65$			$F_R = 0,36$ $F_X = -0,62 \pm 0,65$			$F_R = 0,36$ $F_X = -0,62 \pm 0,65$						

Вариант 4. Пусть $F_R = \text{const} = 0.5$ (рис. 6 б). Значения $\lambda_{нач}$ и $b_{2нач}$ для диэлектриков $D_1, \dots, D_4$ приведены в табл.6, а $x(T)$, F_R , F_X и $\lambda(T)$ – в табл. 8.

В сравнении с вариантами 1 и 2 в вариантах 3 и 4 разброс величины F_R отсутствует, однако имеется несколько больший

разброс величины F_X , чем в одночастотном режиме. В случае $F_R = 0.5$ разброс величины F_X оказался меньшим, чем при $F_R = 0.36$.

Графики зависимости длин волн генератора от температуры для варианта 4 приведен на рис. 7.

Таблица 8

Зависимости $F_R(T)$ и $F_X(T)$ в многочастотном режиме при $F_R = \text{const} = 0.5$

T °C	Диэлектрик															
	D ₁				D ₂				D ₃				D ₄			
	x(T)	F _R	F _X	λ, см	x(T)	F _R	F _X	λ, см	x(T)	F _R	F _X	λ, см	x(T)	F _R	F _X	λ, см
20	0,33	0,5	-1,68	17	0,41	0,5	-0,55	12	0,41	0,5	-0,55	10	0,33	0,5	-1,68	17
40	0,36		-1,15	16,9	0,38		-0,81	12,06	0,38		-0,81	11,32	0,36		-1,15	15,03
60	0,38		-0,81	16,9	0,36		-1,15	12,1	0,36		-1,15	12,77	0,38		-0,81	13,33
80	0,41		-0,55	16,8	0,33		-1,68	12,13	0,33		-1,68	14,44	0,41		-0,55	11,77
	F _R = 0,5 F _X = -1,04 ± 0,56				F _R = 0,5 F _X = -1,04 ± 0,56				F _R = 0,5 F _X = -1,04 ± 0,56				F _R = 0,5 F _X = -1,04 ± 0,56			

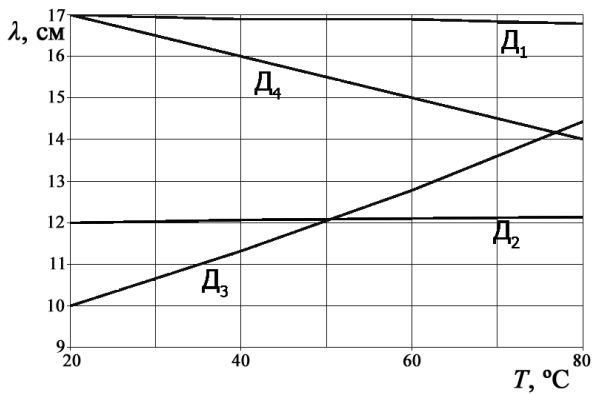


Рис. 7. Графики зависимостей $\lambda(T)$ в многочастотном режиме (вариант 4).

Таким образом, применяя в установках СВЧ диэлектрического нагрева широкополосные генераторы и изменяя частоту их излучения, можно добиться уменьшения рассогласования рабочей камеры с СВЧ

генератором в сравнении с одночастотным режимом за счёт компенсации изменения диэлектрических параметров ε' и $\operatorname{tg} \delta$ в процессе нагрева диэлектрика.

Разброс значений погонных параметров F_R и F_X в многочастотном режиме может быть снижен в зависимости от выбранной траектории движения рабочей точки x в процессе нагрева.

Итак, рассмотренные варианты алгоритма управления длиной волны СВЧ генератора позволяют уменьшить разброс значений F_X (варианты 1 и 2) или значений F_R (варианты 3 и 4), однако, как показали расчёты, полного согласования рабочей камеры с СВЧ генератором на всём протяжении процесса нагрева (выполнения условий (1)), данным способом добиться не удаётся.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
2. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ электротермии / Ю.С. Архангельский. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
3. **Хардман Л.** Распределение частот электромагнитного спектра в условиях на-

пряженного графика / Л. Хардман // Электроника. 1972. № 20. С. 30-32.

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

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

Фёдоров Антон Витальевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honored Master of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Anton V. Fedorov – Postgraduate, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

**ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ
СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА КОМПОЗИЦИЙ
ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПАРАМЕТРЫ ИХ СТРУКТУРЫ**

И.В. Злобина, Н.В. Бекренев

**APPLICATION OF THE FRACTAL ANALYSIS FOR THE QUALITATIVE
ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF MICROWAVE OVEN
DIELECTRIC HEATING OF ORGANIC MATERIALS ON THE
PARAMETERS OF THEIR STRUCTURE**

I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev

На основе определения фрактальной размерности элементов пористо-агломерированной структуры композиций мясного фарша и муки нута после обработки путем конвекционного и СВЧ диэлектрического нагрева установлены режимы, при которых сохраняются характеристики исходного материала.

Ключевые слова: мясные кулинарные изделия, мука нута, фракталы, СВЧ диэлектрический нагрев, технологические режимы, структура, удельная мощность

СВЧ диэлектрический нагрев достаточно эффективно применяется в производстве и бытовых условиях для тепловой обработки органических материалов пищевого назначения [1, 2]. Воздействие СВЧ электромагнитного поля на материалы приводит к формированию сложной пористо-агломерированной структуры, особенно характерной при обработке композиций на основе мясного фарша и муки нута, при этом размеры пор и агломератов имеют достаточно высокую однородность [3]. Введение в состав композиции муки нута улучшает микроэлементный состав продукта, но при этом изменяет характер структуры по сравнению с изделиями обычного состава, что может изменить

On the basis of fractal dimensions of elements in the porous agglomerated structure of mincemeat compositions and flour of chickpea after processing by convection and microwave ovens of dielectric heating the modes are set at which the characteristics of the initial material are preserved.

Keywords: meat culinary products, chickpea flour, fractals, microwave oven dielectric heating, technological modes, structure, specific power

характер восприятия при употреблении и снизить потребительские свойства. Высокая управляемость процесса СВЧ диэлектрического нагрева и малая инерционность позволяют скорректировать технологические режимы с целью обеспечения требуемых характеристик структуры, однако для этого необходимо провести их количественный анализ.

Известно, что структуры сложной формы могут с достаточной степенью совпадения описываться фракталами – объектами с дробной размерностью, каждому из которых соответствует определенная математическая зависимость [4]. Таким образом, становится возможным достаточно строго описать различные объекты и подо-

брать два объекта с наилучшей схожимостью форм и размеров.

В нашем случае речь может идти о первичной оценке влияния пористо-агломерированной структуры фаршевых систем на их потребительские качества с целью выбора структуры, наилучшим образом соответствующей употреблению изделий в пищу, и последующем подборе режимов обработки, обеспечивающих стабильное формирование такой структуры. При этом возможности СВЧ технологии, обеспечивающей объемное воздействие на изделие и обладающей минимальной инерционностью вследствие скоротечности процесса, представляются более предпочтительными по сравнению с обжаркой по традиционной технологии с использованием электрической или газовой плиты.

Рассмотрим возможность исследования структуры фаршевых систем с использованием фрактального анализа для последующей количественной оценки влияния на них технологических режимов и состава.

Понятия «фрактал» и «фрактальная геометрия», появившиеся в конце 70-х годов XX века, с середины 80-х прочно вошли в обиход математиков и программистов. Слово «фрактал» образовано от латинского *fractus* и в переводе означает «*состоящий из фрагментов*». Оно было предложено Бенуа Мандельбротом в 1975 году [4] для обозначения нерегулярных, но самоподобных структур. Но только в наше время удалось объединить их работы в единую систему. Фактически найден способ легкого численного представления сложных неевклидовых объектов и проведения их количественного анализа.

Анализ микрофотографий поверхности и микрошлифов поперечных срезов фаршевых систем после их обработки показывает чрезвычайное разнообразие как закономерностей залегания пор, так их формы и размеров, а также агломератов. При этом прослеживается некая зависимость между этими параметрами и режимами обработки, а также исходным составом. По-видимому, возможно на основе анализа этой

закономерности подобрать такие технологические режимы термической обработки, которые позволили бы формировать структуру с определенной формой и размерами элементов, что позволит максимально приблизить потребительские параметры изделий к высокому уровню качества, а также обеспечить равномерность условий термической обработки как по объему изделия, так и в партии изделий.

Может быть предложена следующая методика определения режимов.

При фрактальном анализе используется построение фракталов типа «Mandelbrot», «Julia», «Julia-2», «дракон Хартера-Хейтуэя». Для построения фракталов путем изменения коэффициентов и числа итераций используется программа *MyFractal* [5]. Производится последовательное сравнение полученных фракталов с элементами пористой структуры образцов, микрофотографии которых обработаны при помощи программы «*Metallograph*» и преобразованы в черно-белые изображения на компьютерном анализаторе изображений микроструктур АГПМ-6М. При этом сначала выбирается форма элемента, частота появления которого в стандартном поле зрения анализатора превышает 50%. Затем производится сравнение этой формы с построенными фракталами. Принимается, что фрактал, совпадающий по форме более чем с 50% реальных элементов структуры, вполне адекватно описывает ее. При этом для определения размерности используется метод наложения квадратной сетки на профиль компьютерного изображения элемента структуры или фрактала, описывающего данный элемент. Подсчитывается число клеток, в которые попадает исследуемая кривая. Сторона квадрата минимизируется при помощи возможностей компьютера. Расчет осуществляется, когда расстояние между параллельными сторонами клетки становится достаточно малым.

Подсчитывается фрактальная размерность структурного образования и подобранного адекватно описывающего его фрактала по известному выражению [6]

$$D_{nop} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\frac{\ln[N(\delta)]}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)} \right], \quad (1)$$

где $N(\delta)$ – количество клеток, в которое укладывается линия, описывающая контур фрактала; δ – сторона квадрата (расстояние между параллельными сторонами квадрата).

Аналогично определяется фрактальная размерность наиболее адекватной фрактальной модели $D_{фрак}$. Сходимость фрактальных описаний оценивается отношением

$$k = \frac{D_{фрак} - D_{nop}}{D_{фрак}}, \quad (2)$$

где k – коэффициент сходимости (чем ближе величина k к нулю, тем больше совпа

дают фрактальные описания структуры образца и модели, и для приготовления изделий необходимо использовать режимы, при которых была получена данная характеристика структуры).

Для оценки фрактальной размерности элементов структуры исследуемых объектов на компьютерном изображении фрагмента среза образца выделяли характерное образование, увеличивали его и приводили к одному масштабу для всех изображений структуры применительно к рассматриваемым составам и методам обработки. По приведенной выше методике по выражению (1) определяли фрактальную размерность. При этом брали среднее значение по трем образованиям. Ниже приведены подготовленные к расчету фрактальной размерности изображения характерных элементов структуры (рис. 1 – 3).

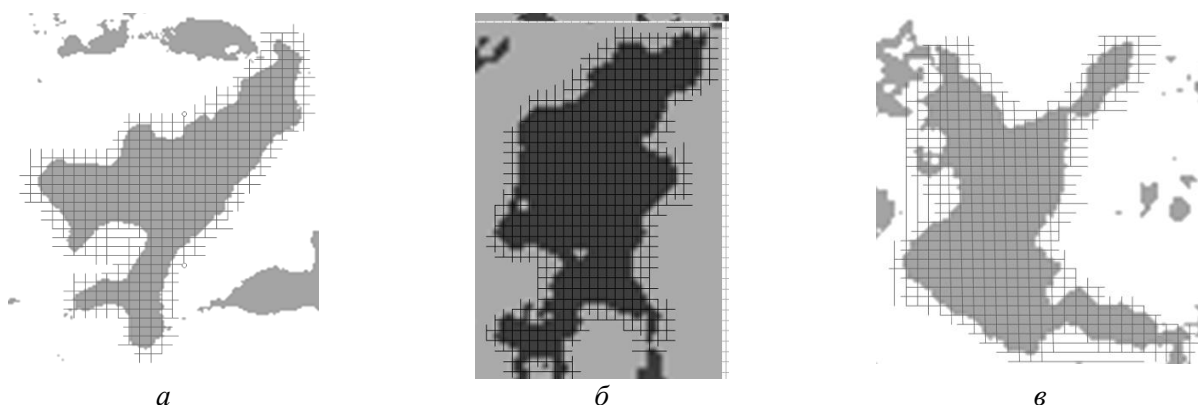


Рис. 1. Характерные элементы структуры (обработанные в программе «Metallograph») контрольных образцов после обжарки на сковороде (а), после СВЧ обработки с удельной мощностью $P_{y\partial} = 14 \text{ Вт/см}^3$ (б), $P_{y\partial} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$ (в)



Рис. 2. Характерные элементы структуры (обработанные в программе «Metallograph») образцов с заменой 5% мяса мукой нута после обжарки на сковороде (а), после СВЧ обработки с удельной мощностью $P_{y\partial} = 14 \text{ Вт/см}^3$ (б), $P_{y\partial} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$ (в)

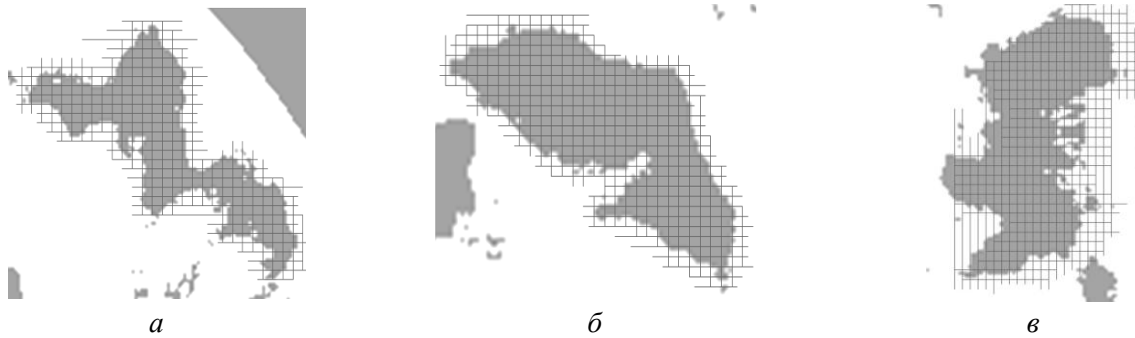


Рис. 3. Характерные элементы структуры (обработанные в программе «Metallograph») образцов с заменой 20% хлеба мукой нута после обжарки на сковороде (а), после СВЧ обработки с удельной мощностью $P_{уд} = 14 \text{ Вт/см}^3$ (б), $P_{уд} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$ (в)

Значения фрактальной размерности приведены в таблице. При рассмотрении изображений срезов образцов после СВЧ диэлектрического нагрева были выбраны образцы, полученные при удельной мощности $P_{уд} = 14 \text{ Вт/см}^3$ и $P_{уд} = 31,9 \text{ Вт/см}^3$. Образцы, полученные при малой удельной мощности, не рассматривались, поскольку в данном случае не удалось довести их до

стадии готовности. За критерий сравнения влияния технологических режимов принимали минимальное расхождение фрактальной размерности контрольного образца после соответствующего метода обработки и образцов с добавкой муки нута, так как это может считаться характеристикой сохранения консистенции традиционного объекта питания.

Фрактальная размерность элементов пористой структуры рубленых мясных изделий в зависимости от состава и метода обработки

Режим СВЧ обработки ($P_{уд}$)	Контрольный образец		Замена 5% мяса мукой нута		Замена 20% хлеба мукой нута	
	Обжарка на сковороде	СВЧ обработка	Обжарка на сковороде	СВЧ обработка	Обжарка на сковороде	СВЧ обработка
14 Вт/см ³	4,299	4,485	4,311	4,591	4,253	4,262
31,9 Вт/см ³		4,555		4,88		4,32

Фрактальные модели, наиболее адекватно описывающие фаршевые структуры, представлены на рис. 4. На основании данных таблицы можно заключить, что введение добавки в виде муки нута в состав фаршевой системы после обжарки на сковороде на электрической плите практически не оказывает влияния на фрактальную размерность элементов структуры. По внешнему виду элементы структуры соответствуют фракталу «Julia» (контрольный образец и образец с заменой 5% мяса) и «дракон Хартера-Хейтуэя» (образец с заменой 20% хлеба). При использовании СВЧ диэлектрического нагрева фрактальная размерность увеличивается как для контрольного образца (на 6%), так и для образца с заменой 5% мяса (6,5% и 13%

соответственно при меньшей и большей удельной мощности). При замене хлеба влияние СВЧ обработки на фрактальную размерность не обнаружено.

Введение муки нута в состав образца при его последующей СВЧ обработке во всех случаях способствует увеличению фрактальной размерности. Внешний вид элементов структуры в этом случае достаточно адекватно может быть описан только одним фракталом «дракон Хартера-Хейтуэя». Это может говорить о большей стабильности процессов, происходящих в изделии при термическом СВЧ воздействии на него. Увеличение фрактальной размерности после СВЧ обработки по сравнению с обжаркой на электрической плите может быть связано со скоротеч-

ностью процессов, протекающих в структуре, что приводит к интенсивному выпариванию жидкости, разрывам связей из-за

кавитационных процессов и т.п. Это формирует более развитые границы элементов структуры.



Рис. 4. Фрактальные модели, описывающие большинство фаршевых структур после термической обработки: *а* – «Julia», *б* – «дракон Хартера-Хейтуэя»

Исходя из принятого условия минимального отличия структуры изделий от контрольных образцов, можно заключить, что этому критерию соответствует удель-

ная мощность СВЧ излучения, равная $P_{уд} = 14 \text{ Вт/см}^3$, что подтверждает ранее полученные нами результаты [3,7].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысоко-частотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов / Ю.С. Архангельский // Вестник СГТУ. - № 4 (3), 2011. С. 5-15.

2. **Рогов И.А.** Сверхвысоко-частотный нагрев пищевых продуктов / И.А. Рогов, С.В. Некрутман – М.: Агропромиздат, 1986. 361 с.

3. **Злобина И.В.** Исследование влияния СВЧ – излучения на структуру мясных рубленых кулинарных изделий с добавлением муки нута / И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, В.А. Кошуро, Н.В. Бекренев // Вестник СГТУ. - №2 (75), 2014. С.124-129.

4. **Мандельброт Б.** Фрактальная гео-

метрия природы / Б. Мандельброт – Москва: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

5. **Шабаршин А.А.** Введение во фракталы [Электронный ресурс] URL: <http://algotlist.manual.ru/graphics/fractart.php>.

6. **Федер Е.** Фракталы / Е. Федер – М.: Мир, 1991. 254с.

7. **Злобина И.В.** Обоснование рациональной удельной мощности СВЧ излучения для термической обработки многокомпонентных диэлектрических материалов типа мясного фарша с добавлением муки нута / И.В. Злобина, В.А. Коломейцев, Н.В. Бекренев // Вопросы электротехнологии. 2014. №3 (4) С.19-26.

Злобина Ирина Владимировна – ассистент кафедры «Техническая механика и детали машин» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

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

Irina V. Zlobina - Assistant Lecturer, Department of Engineering Mechanics and Machine Elements, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

Статья поступила в редакцию 19.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

К ВОПРОСУ О ЭКОНОМИЧЕСКОЙ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЯХ И РАВНОМЕРНОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ В СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Ю.С. Архангельский

THE ISSUES OF COMMERCIAL AND ENERGY EFFICIENCY, AND UNIFORM HEAT TREATMENT IN MICROWAVE ELECTROTHERMAL INSTALLATIONS

Yu.S. Arkhangelskiy

Рассматривается взаимосвязь экономической, энергетической эффективности, равномерности термообработки СВЧ электротермических установок.

Ключевые слова: экономическая эффективность, энергетическая эффективность, равномерность термообработки, СВЧ электротермические установки

При проектировании СВЧ электротермической установки (установки СВЧ диэлектрического нагрева) требуется обеспечить уровни ее экономической, энергетической эффективности, равномерности термообработки, делающие эту установку конкурентоспособной на рынке технологического оборудования. Алгоритм проектирования СВЧ электротермических установок с учетом перечисленных характеристик приведен в работе [1], а сами характеристики, их место в проектировании конкурентоспособных СВЧ электротермических установок рассмотрены в работах [1-4].

Исследования в области СВЧ электротермии в нашей стране идут уже более сорока лет, и в то же время остаются вопросы, которые, на наш взгляд, требуют дополнительных пояснений, рассмотрения, касается это и терминологической базы СВЧ электротермии. Как взаимосвязаны экономическая, энергетическая эффективность, равномерность термообработки (на-

The paper considers the relation between the commercial and energy efficiency, including the uniformity of microwave heat treatment of electrothermal installations.

Keywords: economic efficiency, energy efficiency, uniformity of heat treatment, the microwave electrothermal installations

пример, нагрева) СВЧ электротермических установок? Как следовало бы говорить: сверхвысокочастотный нагрев или микроволновый нагрев, энергосбережение или энергоэффективность, энергоэффективность или энергетическая эффективность, тепло или теплота?

До перехода к рыночной экономике в нашей стране говорили «сверхвысокочастотный», «СВЧ», «СВЧ нагрев», «СВЧ печь». В девяностые годы на прилавках магазинов, торгующих бытовой техникой, появились СВЧ печи зарубежного производства, которые в описаниях, инструкциях по эксплуатации назывались и называются до сих пор микроволновыми печами. С легкой руки торговой сети СВЧ печи стали называть микроволновыми, а потом вместо «СВЧ технологии» стали говорить «микроволновые технологии». Но «сверхвысокочастотный» - исторически сложившийся отечественный термин, он ничем не уступает пришедшему из-за рубежа термину

«микроволновый». На наш взгляд, следует отдать предпочтение термину, сложившемуся в нашей стране [1].

Не сложно сделать выбор между терминами «энергосбережение» и «энергоэффективность». Термин «энергосбережение» означает сбережение энергии, но по закону сохранения энергии так ставить задачу нельзя: энергия лишь переходит из одного вида в другой. К тому же полная реализация идеи энергосбережения формально означает прекращение любой хозяйственной деятельности, а это противоречит здравому смыслу. Когда используют термин «энергоэффективность», то речь идет о рациональном использовании энергии, а полная реализация идеи обеспечения энергоэффективности не означает прекращения хозяйственной деятельности. В последнее время люди, от инженеров до политиков, все чаще говорят об энергоэффективности, но, думается, пока что не произошло понимания справедливости замечаний к термину «энергосбережение» [5].

«Энергоэффективность» или «энергетическая эффективность»? Если речь идет о направлении научной или хозяйственной работы, то, конечно, - «энергоэффективность». Но если мы говорим о характеристике технологической установки, когда наряду с этим речь идет или может пойти об экономической эффективности, то – «энергетическая эффективность», хотя бы потому что у термина «экономическая эффективность» нет сокращения, подобного «энергоэффективность».

И, наконец, следовало бы избегать применения термина «тепло» как устаревшего и использовать термин «теплота».

Вопрос о взаимосвязи экономической, энергетической эффективностей, равномерности термообработки при характеристике, проектировании СВЧ электротермической установки заслуживает более подробного рассмотрения.

Наиболее полно все параметры СВЧ электротермического оборудования отражены в так называемом интегральном за срок службы установки доходе $\mathcal{E}_\Sigma$ (чистом дисконтированном доходе, интегральном

эффекте, социально-экономическом эффекте в терминах работы [6]). Если установка выпускает один вид продукции, чистый дисконтированный доход рассчитывается на интервале в один год, в последующем установка не продается, то $\mathcal{E}_\Sigma$ можно рассчитать по соотношению

$$\mathcal{E}_\Sigma = ПЦ + H + S + M - Z, \quad (1)$$

где $П$ – количество продукции, выпускаемой за год; $Ц$ – цена единицы продукции; H – стоимостная оценка сопутствующего эффекта в производственной сфере; S – стоимостная оценка социально эффекта; M – остаточная стоимость основных фондов производственной инфраструктуры, исключаемых из эксплуатации в течение года; Z – эксплуатационные издержки на работу установки, включая налоги и платежи.

Величина $\mathcal{E}_\Sigma$ выражена в рублях и часто используется для характеристики экономической эффективности установки. Соотношение (1) позволяет с позиции системного подхода выбрать оптимальную структуру и элементную базу СВЧ электротермического оборудования [2, 3, 7-9].

Если $\mathcal{E}_\Sigma > 0$, то оснащение производства новым технологическим оборудованием целесообразно, так что соотношение (1) можно использовать для сопоставления технологических установок, для чего применяют так называемый сравнительный интегральный эффект

$$\Delta \mathcal{E}_\Sigma = \mathcal{E}_{\Sigma 2} - \mathcal{E}_{\Sigma 1}, \quad (2)$$

где индексы 1 и 2 обозначают сравниваемые варианты. Напомним, что использовать сравнительный интегральный эффект можно только при соблюдении сопоставимости сравниваемых вариантов: одинаковая производительность, соблюдение критериев качества окружающей среды, обеспечение заданного уровня надежности электроснабжения сравниваемых установок [3].

В работе [6] для оценки экономической эффективности проекта (установки) кроме чистого дисконтированного эффекта $\mathcal{E}_\Sigma$

предлагается еще так называемый индекс доходности I_δ . Если $\mathcal{E}_\Sigma$ определяется соотношением (1), то

$$I_\delta = \frac{\mathcal{E}_\Sigma}{K},$$

где K – капиталовложения в проект (установку).

Конечно, если $\mathcal{E}_\Sigma > 0$, то и $I_\delta > 0$, но можно проводить технико-экономическую оптимизацию СВЧ электротермического оборудования, решая многокритериальную задачу, когда ищется такая совокупность параметров СВЧ электротермического оборудования, когда $\mathcal{E}_\Sigma$ и I_δ имеют максимально возможные значения [10].

Далее, энергетическая эффективность (энергетический КПД) СВЧ электротермической установки равна [1]

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{эл}}},$$

где $P_{\text{пол}}$ – СВЧ мощность, поглощенная обрабатываемым диэлектриком; $P_{\text{эл}}$ – мощность, потребляемая СВЧ электротермической установкой от сети промышленной частоты.

С другой стороны

$$\eta_{\text{эл}} = \eta_{\text{эл}} \eta_m \quad (3)$$

где $\eta_{\text{эл}} = P_{\text{СВЧ}} / P_{\text{эл}}$ – электрический КПД; $P_{\text{СВЧ}}$ – СВЧ мощность генератора, отдаваемая в согласованную нагрузку; $\eta_m = P_{\text{пол}} / P_{\text{СВЧ}}$ – тепловой КПД; $P_{\text{пол}} = (1 - |\Gamma|^2) P_{\text{СВЧ}} - P_{\text{потерь}}$; Γ – коэффициент отражения от рабочей камеры; $P_{\text{потерь}}$ – мощность потерь в рабочей камере. Тогда

$$\eta_m = (1 - |\Gamma|^2) - \frac{P_{\text{потерь}}}{P_{\text{СВЧ}}} \approx 1 - |\Gamma|^2, \quad (4)$$

так как обычно

$$P_{\text{потерь}} / P_{\text{СВЧ}} \ll 1 \Rightarrow \eta_{\text{эл}} = (1 - |\Gamma|^2) \eta_{\text{эл}}.$$

У современных магнетронов $0,55 < \eta_{\text{эл}} < 0,85$, так что с учетом (3) и (4)

$$\eta_{\text{эл}} = (0,55 \dots 0,85) (1 - |\Gamma|^2) \quad (5)$$

Что касается равномерности нагрева, то, как справедливо отмечено в работе [11], обычно ее оценивают в процентах, но обязательно с указанием средней по объему обрабатываемого диэлектрика температуры, так как в КБВ, например, на разных стадиях нагрева отклонения от средней температуры различны [12].

Какая взаимосвязь между экономической и энергетической эффективностями? $\eta_{\text{эл}}$ от $\mathcal{E}_\Sigma$ или I_δ , разумеется, не зависит, а увеличение $\eta_{\text{эл}}$ может как увеличить, так и уменьшить экономическую эффективность СВЧ электротермической установки.

Так, у проектировщика есть следующие возможности повысить энергетическую эффективность СВЧ электротермических установок:

- повышение электрического КПД $\eta_{\text{эл}}$;
- уменьшение потерь СВЧ энергии на передачу от СВЧ генератора до рабочей камеры;
- уменьшение потерь СВЧ энергии на отражение от рабочей камеры (уменьшение коэффициента отражения Γ);
- уменьшение тепловых потерь в рабочей камере;
- уменьшение потерь на охлаждение СВЧ генератора;
- уменьшение потерь за счет сокращения производственных простоев СВЧ электротермической установки.

Любое из этих мероприятий уменьшает затраты Z . Вопрос лишь в том, насколько возрастает при этом цена установки. Рост величины капиталовложений K приведет к уменьшению $\mathcal{E}_\Sigma$ так, что может быть $\mathcal{E}_\Sigma \leq 0$. Наиболее затратным будет стремление увеличить $\eta_{\text{эл}}$ заменой магнетрона на другой с более высоким КПД $\eta_{\text{эл}}$, потому что требуется весьма затратная разработка более совершенного СВЧ генератора.

От экономической эффективности равномерность термообработки не зависит, а равномерность влияет на величину $\mathcal{E}_\Sigma$, если от нее зависит энергетическая эффективность. Согласно соотношению (5) это может быть в том случае, когда от равномерности нагрева зависит коэффициент отражения Γ .

В работе [11] говорится о возможности повысить энергетическую эффективность СВЧ электротермических установок на камерах лучевого типа путем управления равномерностью нагрева обрабатываемого диэлектрика. Поскольку расчетных соотношений на этот счет в работе [11] не приводится, рассмотрим влияние равномерности нагрева на согласование рабочей камеры с СВЧ генератором подробнее и для всех типов рабочих камер.

Камеры со стоячей волной (КСВ) исторически получили наибольшее распространение. Они позволяют обрабатывать изделия произвольной формы с различными диэлектрическими параметрами. Основным признаком таких камер является наличие стоячей волны, что приводит к неравномерности термообработки. Различные способы выравнивания распределения плотности энергии электромагнитного поля по объему КСВ, такие как металлические решетки, изменение граничных условий с помощью диссектора, изменение фазы излучаемых в резонатор электромагнитных колебаний, использование нескольких возбуждателей, расположение их в разных местах резонатора, работа резонатора в многомодовом режиме и другие, иллюстрируют резервы КСВ, но, как показала практика, не решили задачи равномерной обработки в КСВ [12]. Коэффициент отражения от КСВ Γ зависит не от равномерности нагрева диэлектрика, а от его объема и диэлектрических параметров. Следовательно, в СВЧ электротермических установках на КСВ управление равномерностью нагрева не может привести к увеличению энергетической эффективности.

Другое дело – СВЧ электротермические установки на камерах с бегущей волной (КБВ). Если КБВ собрать на нерегулярном волноводе, частично заполненным обраба-

тываемым диэлектриком, то погонную СВЧ мощность, поглощаемую в этой рабочей камере, можно рассчитать по соотношению [12]

$$P_n = \frac{PR_n}{\operatorname{Re} Z_{\text{ex}}(l)} \exp \left[2\beta \int_z^l \frac{\operatorname{Im} Z_{\text{ex}}(z)}{Z_0(z)} dz \right],$$

где P – мощность генератора; R_n – активная составляющая погонного сопротивления обрабатываемого диэлектрика; $\operatorname{Re} Z_{\text{ex}}(l)$ – активная составляющая входного сопротивления нерегулярного волновода на входе в КБВ; l – длина обрабатываемого диэлектрика (длина нерегулярного волновода КБВ); $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – длина волны в регулярном волноводе на входе КБВ; $\operatorname{Im} Z_{\text{ex}}(z)$ – мнимая составляющая входного сопротивления нерегулярного волновода в сечении z ; $Z_0(z)$ – волновое сопротивление нерегулярного волновода в сечении z , если в волноводе поглощение отсутствует.

Как показано в работе [12], при

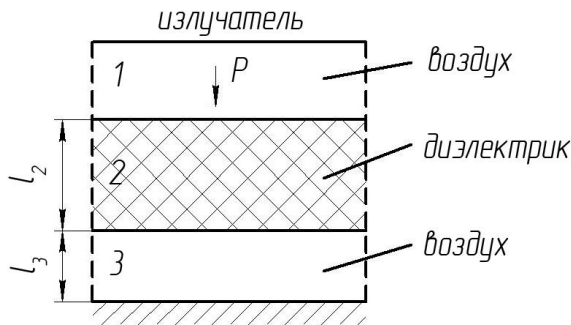
$$Z_0(z) = -\frac{\Lambda}{4\pi} X_n + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_n\right)^2 + (R_n z)^2},$$

где Λ – длина волны в волноводе; X_n – реактивная составляющая погонного сопротивления обрабатываемого диэлектрика, $\operatorname{Im} Z_{\text{ex}}(z) = 0$; $\operatorname{Re} Z_{\text{ex}}(l) = R_n l \Rightarrow P_n = P/l = \text{const}$, и если $R_n l = Z_0$, где Z_0 – волновое сопротивление волновода, соединяющего КБВ с СВЧ генератором, то $\Gamma = 0$, а это значит, что в КБВ можно получить равномерный нагрев и согласование с СВЧ генератором. В реальных условиях, если профиль нерегулярного волновода рассчитан на средние в рабочем диапазоне температур значения диэлектрических параметров ε' и $\operatorname{tg} \delta$, то $0,99 \leq \eta_m \leq 1$, то есть энергетическая эффективность рекордно высока.

Если же в процессе термообработки диапазон изменения величины $\sqrt{\varepsilon'(T)\sqrt{1+\operatorname{tg}^2 \delta(T)}}$,

где T – температура диэлектрика, особенно велик или требуется высокая равномерность нагрева на всех этапах термообработки, то нужно искать способы обеспечения требуемой равномерности нагрева. Весьма перспективным, на наш взгляд, в этом случае было бы применение в СВЧ электротермической установке широкополосного СВЧ генератора, что дает возможность изменять частоту с изменением $\varepsilon'(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$ так, чтобы $P_n \approx \text{const}$, $\Gamma \approx 0$ [13].

Наконец, рассмотрим СВЧ электротермические установки на камерах лучевого типа (КЛТ). Пусть компоновка КЛТ та же, что и в работе [11] (см. рисунок).



Камера лучевого типа

С помощью теории цепей [14] покажем, как влияет компоновка такой КЛТ на энергетическую эффективность СВЧ электротермической установки.

Если от излучателя на поверхность обрабатываемого диэлектрика падает плоская электромагнитная волна, то входное сопротивление короткозамкнутого слоя воздуха между диэлектриком и металлической стенкой камеры равно

$$Z_{\text{ex}3} = jZ_{03} \operatorname{tg} \beta l_3, \quad (6)$$

где Z_{03} – волновое сопротивление слоя воздуха; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – фазовая постоянная коэффициента распространения в слое воздуха; λ – длина волны генератора; l_3 – толщина воздушного слоя.

Это сопротивление является нагрузкой для отрезка длинной линии, представляющей собой обрабатываемый диэлектрик. Тогда

$$Z_{\text{ex}2} = Z_{0\delta} \frac{Z_{\text{ex}3} + Z_{0\delta} \operatorname{th} \gamma l_2}{Z_{0\delta} + Z_{\text{ex}3} \operatorname{th} \gamma l_2} = R_{\text{ex}2} + jX_{\text{ex}2}, \quad (7)$$

где $Z_{0\delta} = \frac{377}{\sqrt{\varepsilon'_\delta (1 - j \operatorname{tg} \delta_\delta)}}$; ε'_δ , $\operatorname{tg} \delta_\delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь обрабатываемого диэлектрика; $\gamma_\delta = \alpha_\delta + j\beta_\delta$ – постоянная распространения в обрабатываемом диэлектрике; α_δ и β_δ – постоянная затухания и фазовая постоянная электромагнитной волны в слое диэлектрика, причем

$$\alpha_\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_\delta} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\delta} - 1)},$$

$$\beta_\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'_\delta} \sqrt{\frac{1}{2} (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\delta} + 1)},$$

l_3 – толщина слоя диэлектрика, а $Z_{\text{ex}3}$ определяется соотношением (6). Тогда с учетом (5)

$$\Gamma = \frac{Z_{\text{ex}2} - Z_{0\delta}}{Z_{\text{ex}2} + Z_{0\delta}} \Rightarrow \eta_{\text{эн}} = (0,55 \dots 0,85) \left(1 - \left| \frac{Z_{\text{ex}2} - Z_{0\delta}}{Z_{\text{ex}2} + Z_{0\delta}} \right|^2 \right), \quad (8)$$

где $Z_{\text{ex}2}$ определяется соотношением (7).

Заметим, в работе [15] таким же путем рассчитано влияние компоновки КЛТ на энергетическую эффективность, когда обрабатываемый диэлектрик находится на транспортной ленте, в работах [15, 16] показано, как с помощью четвертьволнового согласующего трансформатора, располагаемого между рупорным излучателем и обрабатываемым диэлектриком, можно обеспечить максимальную энергетическую эффективность, так как в этом случае $\Gamma = 0$.

Так что влияние компоновки КЛТ, распределения электромагнитного поля в

обрабатываемом диэлектрике на энергетическую эффективность рассчитано еще в 2006-2007 гг.

Наконец, в работе [11] предлагается повысить энергетическую эффективность «...путем увеличения равномерности тепловыделения. Для этого предлагается в установках с камерами лучевого типа предусматривать возможность плавного регулирования расстояния от объекта до отражающей стенки, а также от излучателя до объекта».

Однако в работе [16] за 15 лет до этого на странице 78 сказано то же самое:

«...для получения необходимого распределения температуры при нагреве диэлектрика в СВЧ камерах лучевого типа в качестве основных управляющих параметров, кроме СВЧ мощности, можно использовать расстояние от металлической отражающей стенки до объекта термообработки и частоту СВЧ генератора». Так что в работе [16] еще в 2000 году предлагалось менять частоту СВЧ генератора, а вот изменять расстояние между излучателем и диэлектриком, как предлагается в работе [11], бесполезно. На энергетическую эффективность это не повлияет.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Сверхвысоко-частотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов / Ю.С. Архангельский // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та, 2011, №4(61), Вып. 3. С. 5-15.

2. **Толстов В.А.** Эффективность электротехнологических установок / В.А. Толстов, Ю.С. Архангельский. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. 148 с.

3. **Архангельский Ю.С.** Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С. Архангельский, В.А. Воронкин. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2003. 212 с.

4. **Архангельский Ю.С.** Обеспечение максимальной эффективности электротермических СВЧ установок / Ю.С. Архангельский, Е.В. Колесников // Вестник Самар. гос. техн. ун-та, серия «Технические науки», 2005, Вып. 37. С. 9-11.

5. **Архангельский Ю.С.** Энергосбережение или энергоэффективность? / Ю.С. Архангельский // Энергоэффективные электротехнологии: междунар. молодежный форум. – СПб, 2011. С. 12.

6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования / Офиц. изд. – М: Госстрой России, Мин. экономики РФ, Мин. финансов РФ, Госкомпром России, 1994, 31 марта, №7-12/47.

7. **Гришина Е.М.** Техничко-экономическая оптимизация структуры и параметров СВЧ электротермического оборудования на камерах лучевого типа / Е.М. Гришина,

Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2013, №1(1). С. 34-36.

8. **Гришина Е.М.** Техничко-экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования на камерах с бегущей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2014, №1(2). С. 33-35.

9. **Гришина Е.М.** Техничко-экономическая оптимизация СВЧ электротермического оборудования на камерах со стоячей волной / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2014, №2(3). С. 17-20.

10. **Гришина Е.М.** Многокритериальная технико-экономическая оптимизация в СВЧ электротермии / Е.М. Гришина, Ю.С. Архангельский // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та, 2013, №1(69). С. 21-27.

11. **Огурцов К.Н.** Повышение энергоэффективности СВЧ электротермических установок с камерами лучевого типа путем управления источниками внутреннего тепла в объекте / К.Н. Огурцов, Т.Ю. Дунаева // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та, 2015, №2(79). С. 146-149.

12. **Архангельский Ю.С.** СВЧ электротермия / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998, 408 с.

13. **Архангельский Ю.С.** Многочастотные установки СВЧ диэлектрического нагрева / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вопросы электротехнологии, 2014, №1(2). С. 26-33.

14. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. – М: Госэнергоиздат, 1963, 456 с.

15. Архангельский Ю.С. Согласование обрабатываемого диэлектрика с рупорным излучателем камеры лучевого типа СВЧ электротермической установки / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та, 2006, №4(19), Вып. 4. С. 23-26.

16. Архангельский Ю.С. Влияние диэлектрической проницаемости среды, заполняющей согласующий четвертьволновый трансформатор, на энергетическую эффективность камер лучевого типа / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та, 2007, №4(29), Вып. 2. С. 6-9.

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

Yuri S. Arkhangelskiy – Dr.Sc., Professor, Honored Master of the Russian Federation, Department of Automated Electrotechnical Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

УДК 621.365.5

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

В.В. Захаров

USING ELECTROTECHNOLOGY IN GAS INDUSTRY

V.V. Zakharov

Приведен обзор некоторых перспективных направлений применения электротехнологических процессов в газовой отрасли: применение индукционного электронагрева в системах редуцирования газа, искусственной регазификации сжиженных углеводородных газов, применение СВЧ электронагрева для сушки адсорбента в установках осушки газа.

Ключевые слова: *подогрев газа, индукционный нагрев, регазификация сжиженных углеводородных газов, СВЧ электронагрев, осушка газа*

The paper provides an overview of certain promising areas of application of electrotechnological processes in gas industry: utilization of the induction electric heating in reduction gas systems, utilization of the induction electric heating in the systems of artificial regasification of liquefied petroleum gases, utilization of the microwave electrical heating for drying the adsorbent in gas drying plants.

Keywords: *gas heating, induction heating, regasification of liquefied petroleum gases, microwave heating, gas drying*

Электротехнологические процессы широко применяются в промышленности. Газовая отрасль не является исключением. Несмотря на повышенные требования безопасности к электрооборудованию, эксплуатируемому во взрывоопасных зонах, существуют перспективные направления, в которых для достижения наилучших технико-экономических показателей может быть применена электротехнология. В статье приведен обзор некоторых таких направлений.

Применение индукционного электронагрева в системах редуцирования газа. При понижении давления (редуцировании) газа на газораспределительных станциях (ГРС) имеет место эффект Джоуля-Томсона, вызывающий понижение температуры газа (примерно $0,5^{\circ}\text{C}$ на каждые $0,1$ МПа падения давления). Таким образом, при редуцировании газа, например, с давления 7 МПа (давление газа в газотранспортной системе) до $1,2$ МПа (давление газа в газораспределительной системе) температура газа понижается на 29°C . В результате происходит обмерзание технологического оборудования ГРС, образование гидратных пробок в трубопроводах (если газ недостаточно осушен), ухудшение рабочих характеристик технологического оборудования ГРС.

С целью предотвращения указанных явлений газ перед редуцированием подогревают так, чтобы после редуцирования в точке отбора пробы температура газа была не ниже точки росы по воде при давлении в точке отбора пробы [1].

Подогрев газа осуществляется в теплообменнике с помощью промежуточного теплоносителя (вода, диэтиленгликоль), нагрев которого может производиться разными способами: от системы отопления ГРС, специально установленным газовым котлом, с помощью электронагрева (в том числе индукционного). Такой способ подогрева газа является косвенным, так как используется промежуточный теплоноситель. Несомненным плюсом этой системы является безопасность, во взрывоопасную зону вводятся прямой и обратный трубо-

проводы с теплоносителем, а электрические контакты нагревателя с объектом нагрева (участком трубопровода с газом) отсутствуют. Но есть и минусы. Применение промежуточного теплоносителя приводит к дополнительным тепловым потерям, а также к коррозии элементов системы обогрева. Отметим сложность и необходимость периодического технического обслуживания, сложность дистанционного управления, недостаточную гибкость управления, его инерционность, наличие выбросов продуктов сгорания топлива в окружающую среду.

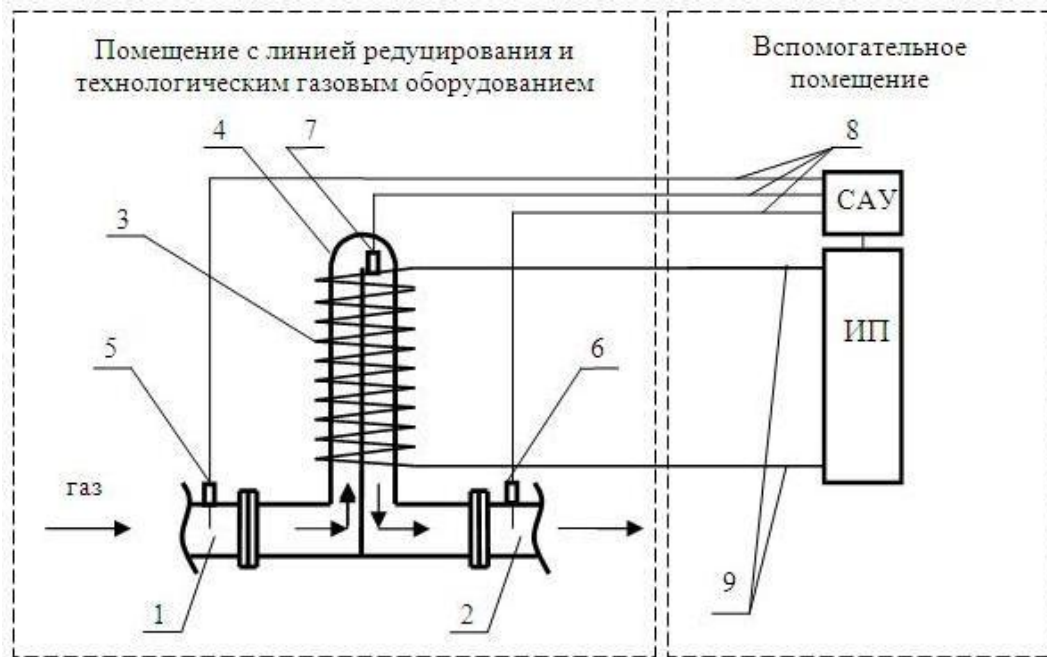
Одним из перспективных направлений является разработка индукционного подогревателя газа (см. рисунок).

Подогрев газа происходит в теплообменном аппарате 4, стенки и внутренние перегородки которого (на рисунке не показаны) нагреваются вихревыми токами, наведенными магнитным полем, создаваемым индуктором 3.

Данная схема имеет следующие преимущества:

- отсутствие промежуточного теплоносителя;
- отсутствие прямого электрического контакта индуктора с нагреваемым элементом [2], что при выполнении качественной электроизоляции индуктора обеспечивает соблюдение требований электробезопасности во взрывоопасных зонах (источник питания и система автоматического управления располагается во вспомогательном помещении);
- широкие возможности регулирования мощности нагрева;
- возможность дистанционного управления, интегрирования в систему телемеханики;
- отсутствие вредных выбросов в окружающую среду.

Из недостатков следует выделить высокую стоимость сетевой электроэнергии по сравнению с газом, что может перекрыть все указанные выше преимущества, так что требуется технико-экономическое сравнение различных вариантов.



Индукционный подогреватель газа. 1 – входной трубопровод; 2 – выходной трубопровод; 3 – индуктор; 4 – теплообменный аппарат; 5 – термопреобразователь (датчик температуры) холодного газа; 6 – термопреобразователь подогретого газа; 7 – термопреобразователь индуктора; 8 – кабели от термопреобразователей к системе автоматического управления; 9 – силовые кабели от источника питания к индуктору; ИП – источник питания; САУ – система автоматического управления.

Однако применение предложенной схемы, например, в сочетании с детандер-генератором может привести к приемлемым технико-экономическим и экологическим показателям по сравнению с существующими технологиями.

Применение индукционного электронагрева в системах искусственной регазификации сжиженных углеводородных газов. При транспортировке и хранении сжиженные углеводородные газы (СУГ) находятся в жидком состоянии. Использование СУГ в качестве топлива происходит в газообразном виде, по этой причине в местах использования их регазифицируют, то есть испаряют. Регазификация может быть осуществлена естественным или искусственным путем.

Искусственная регазификация имеет ряд преимуществ перед естественной:

- состав испаренного газа постоянен и соответствует жидкой фазе, имеющейся в хранилище;
- производительность установки не зависит от количества жидкой фазы в хранилище;

- не требуется большого объема хранилища;

- можно использовать сжиженный газ с большим содержанием бутана.

Имеются и недостатки:

- необходимость непрерывного поступления теплоты от внешнего источника;
- необходимость обеспечить безопасность и регулирование процесса испарения;
- сложность обслуживания установок и необходимость постоянного и тщательного надзора за их работой;
- опасность перегрева или замораживания испарителей;
- возможность конденсации сжиженного газа в газопроводах потребителя [3].

В испарителе применяется главным образом косвенный нагрев жидким или твердотельным промежуточным теплоносителем. В работе [4] рассмотрен нагрев твердотельным промежуточным теплоносителем (ТПТ). Паропроизводительность проточных испарителей СУГ с ТПТ обуславливается величиной теплопритока от трубчатых нагревательных элементов (ТНЭ)

через слой алюминиевой заливки к испарительному змеевику, в котором испаряется СУГ.

Как и в случае, описанном выше, применение промежуточного теплоносителя приводит к дополнительным тепловым потерям. Кроме того, ТНЭ имеют низкий срок службы в сравнении с индукционными нагревателями. В связи с этим представляет интерес разработка испарителя с индукционным нагревателем, в котором нагрев поверхностного слоя испарителя будет осуществляться бесконтактным способом вихревыми токами, наведенными магнитным полем, создаваемым индуктором.

Применение СВЧ электронагрева для сушки адсорбента в установках осушки газа. Осушка газа является одним из этапов подготовки газа к транспортировке. Осушка газа методом адсорбции – это технологический процесс, который заключается в избирательном поглощении порами поверхности твердого адсорбента молекул воды из газа с последующим извлечением их из пор посредством внешних воздействий.

На стандартной установке адсорбционной осушки технологический процесс осушки газа представляет собой последовательное выполнение следующих этапов в рамках одного рабочего цикла осушки: адсорбция, нагрев адсорбента, десорбция, охлаждение адсорбента [5]. Осушка газа, как правило, происходит в двух адсорберах, работающих параллельно циклами. Алгоритм работы предусматривает регенерацию одного аппарата в момент происходящего цикла осушки в другом. Регенерация осуществляется сухим газом, поступающим из хранилища. Каждый адсорбер внутри оснащен электрическим нагревателем, устройством воздушного охлаждения и комплектом адсорбирующих матов. Процесс автоматизирован, управление осуществляется с помощью программируемого логического контроллера.

В качестве адсорбентов обычно применяют оксиды алюминия, синтетические цеолиты, силикагели [6].

Недостатком существующих способов регенерации адсорбентов является то, что нагрев адсорбента происходит главным образом по поверхности, внутренние же слои адсорбента нагреваются за счет теплопроводности, то есть имеет место неравномерность нагрева и, как следствие, его неполноценная осушка. По этой причине некондиционный адсорбент периодически утилизируют, а вместо него в адсорбер загружается новая порция адсорбента.

Перечисленные выше адсорбенты имеют высокий коэффициент поглощения СВЧ электромагнитной волны, поэтому их сушка может быть реализована в СВЧ электромагнитном поле.

Основным преимуществом СВЧ нагрева является объемное тепловыделение. Подбором мощности излучателя, согласованием рабочей камеры с обрабатываемым объектом (адсорбентом) можно добиться такой равномерности нагрева, при которой практически весь адсорбент может быть регенерирован.

Применение СВЧ технологии для регенерации адсорбентов в установках для осушки газа может обеспечить следующие преимущества перед существующими технологиями:

- сокращение расхода адсорбента за счет его практически полной регенерации;
- отсутствие выбросов в окружающую среду;
- улучшение качества газа на выходе из адсорбера за счет его более качественной осушки;
- возможность регулирования мощности нагрева.

Несмотря на то, что эксплуатируемое на объектах газовой отрасли традиционное технологическое газовое оборудование на протяжении долгих лет зарекомендовало себя с положительной стороны, с появлением новых технологий оно должно постоянно совершенствоваться. В этой связи, перспективным направлением является применение электротехнологии в газовой отрасли с целью повышения технико-экономических показателей процессов подготовки, транспортировки и распределения газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 5542-2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. – Введ.2015-01-07. – М.: Стандартинформ, 2015. 9 с.

2. **Слухоцкий А.Е.** Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр.– Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 328 с.

3. **Преображенский Н.И.** Сжиженные углеводородные газы / Н.И. Преображенский. – Л.: Недра, 1975. 279 с., ил.

4. **Усачев А.П.** Электротепловая аналогия и ее применение к решению задачи теплообмена в змеевиковом испарителе сжиженного углеводородного газа с твердотельным теплоносителем / А.П. Усачев, А.В. Рулев, А.Ю. Фролов, Т.А. Усачева // Вестник СГТУ, 2007, № 2 (24) вып. 1, С.128-132.

5. Интернет-ресурс http://www.intech-gmbh.ru/gas_dewatering.php на 29.05.2015.

6. Интернет-ресурс http://www.gas-dewatering.ru/standart_plant.php на 29.05.2015.

Захаров Вадим Валерьевич – старший научный сотрудник НИЦ ОАО «Гирониигаз»

Vadim V. Zakharov - Senior Researcher at the Research Center PLC Giproniigaz

Статья поступила в редакцию 15.05.15, принята к опубликованию 10.06.15



ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

УДК 621.314.58

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ

И.И. Артюхов, М.В. Галета

SIMULATION IN MATLAB OF THYRISTOR FREQUENCY CONVERTERS FOR THE SUPPLY OF INDUCTION HEATERS

I.I. Artyukhov, M.V. Galeta

В среде Matlab с пакетом расширения Simulink разработана имитационная модель для расчета тиристорных преобразователей различного назначения. В модели присутствуют оригинальные блоки, которые позволяют производить исследование электромагнитных процессов в системе электропитания индукционных нагревателей при изменении режимных параметров.

Ключевые слова: имитационное моделирование, тиристорный преобразователь частоты, дроссель, индукционный нагрев

Индукционный нагрев является одним из способов термической обработки металлов. Для реализации этого процесса необходимы источники питания, которые подают на индукционные нагреватели электрическую энергию необходимой частоты [1]. При этом мощность таких источников может составлять сотни киловатт. Поэтому в качестве источников питания индукционных нагревателей применяют тиристорные преобразователи частоты (ТПЧ), которые строят, в основном, по схеме с промежуточным звеном постоянного тока. Упрощенная схема такого преобразователя показана на рис. 1. Сетевое напряжение сна-

A simulation model was created for calculation of thyristor converters to be applied for different purposes in Matlab with the Simulink expansion pack. The model has original blocks which enables investigation of electromagnetic processes in the power supply system of induction heaters when the mode parameters are changed.

Keywords: simulation, thyristor frequency converter, reactor, induction heating

чала преобразуется с помощью выпрямителя на тиристорах VS1...VS6 в постоянное напряжение, которое затем с помощью автономного инвертора тока (АИТ) на тиристорах VS7...VS10 преобразуется в однофазное напряжение заданной частоты. Дроссель LD служит для сглаживания тока во входной цепи АИТ. Конденсаторная батарея С осуществляет компенсацию реактивной мощности нагрузки (индукционного нагревателя) и обеспечивает необходимый угол запираания тириستоров инвертора VS7...VS10.

ТПЧ для индукционного нагрева металлов является сложным электротехничес-

ким изделием, стоимость которого составляет сотни тысяч рублей. При этом каждое изделие выпускается под конкретный технологический процесс, который определяет свои требования к параметрам тириستоров, электромагнитных элементов и другого оборудования. На этапе проектирования ТПЧ информация о токах и напряжениях элементов схемы представляется чрезвычайно важной. Она позволяет правильно

произвести выбор оборудования, избежать ошибок, устранение которых на этапах изготовления и наладки ТПЧ может потребовать значительных материальных затрат. Поэтому разработка программного продукта, позволяющего производить моделирование и расчет ТПЧ для широкого набора технологических процессов является актуальной задачей.

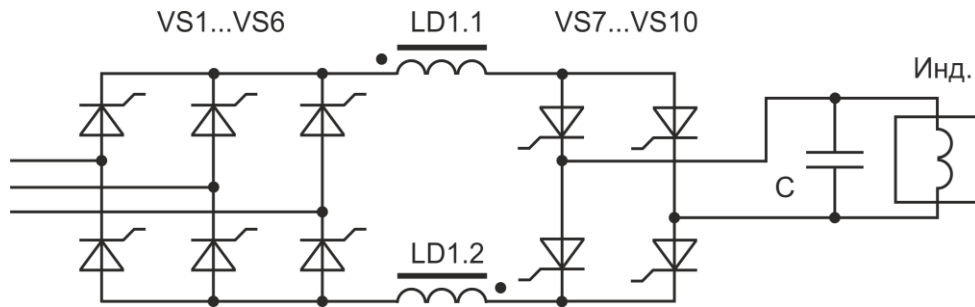


Рис. 1. Схема ТПЧ для питания индукционного нагревателя

В практике расчета ТПЧ на основе АИТ применяют различные методы. Среди них можно особо выделить так называемый метод основной гармоники, который за счет ряда допущений позволяет получить быстрый результат [2]. Естественно, что этот метод обладает погрешностью, величина которой может быть достаточно большой. При этом метод основной гармоники применим только для статических режимов.

Для исследования электромагнитных процессов, происходящих в системе электропитания индукционных нагревателей на базе ТПЧ с АИТ, в среде MATLAB с пакетом расширения Simulink [3] разработана имитационная модель, укрупненная схема которой показана на рис. 2.

Силовую часть ТПЧ моделируют следующие блоки: трехфазный источник напряжения 3-PhaseSource1, трехфазный управляемый выпрямитель Rectifier, Г-образный сглаживающий фильтр L1-C1, однофазный АИТ на тиристорах T1-T4 с дросселем L2 в цепи постоянного тока и активно-индуктивной нагрузкой Rn-Ln, параллельно которой подключен конденсатор C2.

Тиристоры выпрямителя управляются импульсами, которые формирует блок «Synchronized 6-PulseGenerator» под действием трехфазной системы напряжений, генерируемой блоком 3-PhaseSource2. На тиристоры АИТ поступают импульсы, которые формирует блок «Pulsegenerator-forinverter».

В состав модели входят также виртуальные измерительные приборы: вольтметры VM, амперметры CM, цифровые дисплеи Display, мультиметр Multimeter. Кривые токов и напряжений можно наблюдать на экранах осциллографов Scope. Для работы с элементами из библиотеки SimPowerSystem (моделирование энергетических систем) установлен блок графического интерфейса пользователя Powergui (Continuous).

Для мониторинга выходных параметров ТПЧ создан оригинальный блок «Active&Reactivepower, cosphi, loadingfactor» (рис. 3). Особенность данного блока в том, что он позволяет рассчитать величины активной и реактивной мощностей при изменении частоты токов и напряжений, что в свою очередь не позволял сделать блок Power из библиотеки SimPowerSystem, ко-

который рассчитывает составляющие полной мощности только при фиксированном значении частоты. Разработанный блок позволяет также определить характер нагрузки ($\cos\varphi$). Эту функцию осуществляет блок «Cosphiidentifier», который показан на

рис. 3. Для определения коэффициента загрузки инвертора создан блок «B identifier». Его расчетная логика построена по формуле (3). Для получения выходного параметра на вход достаточно подать значение $\cos\varphi$.

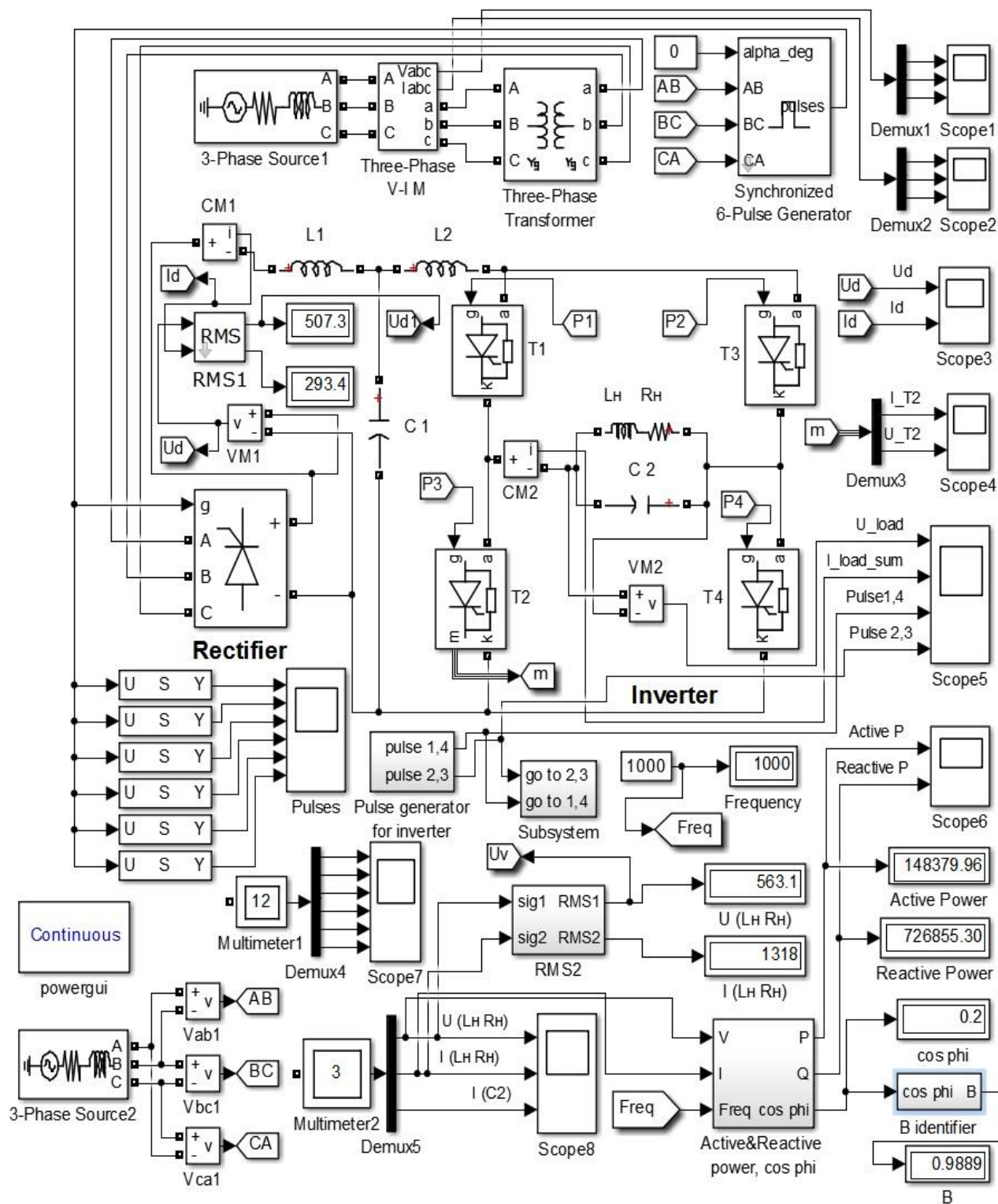


Рис. 2. Имитационная модель ТПЧ для питания индукционного нагревателя

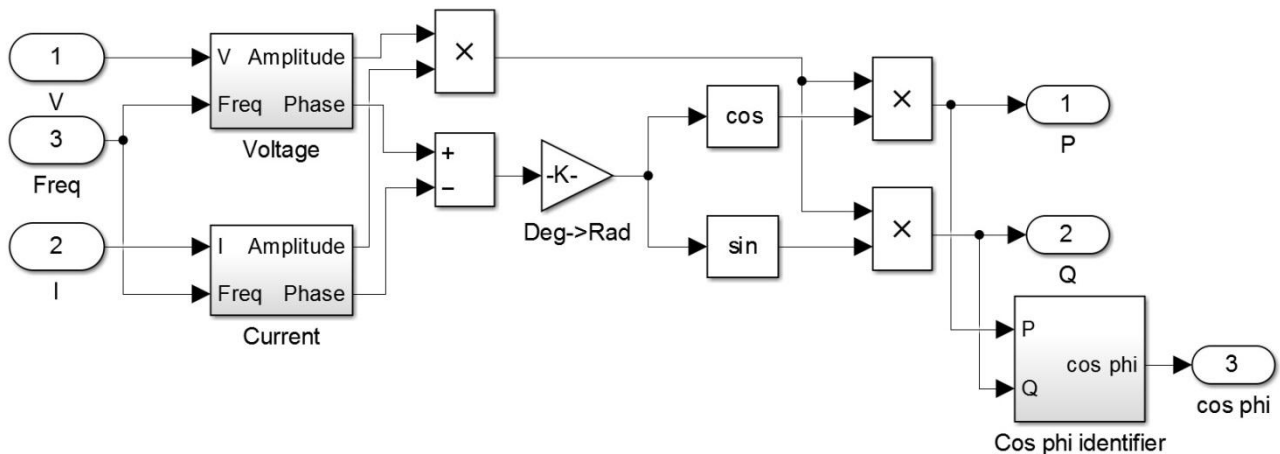


Рис. 3. Оригинальные блоки модели для расчета режимных параметров

Одной из важнейших характеристик АИТ является зависимость

$$U^* = \Psi(B) \quad (1)$$

где $U^* = U/U_d$ – относительная величина действующего значения выходного напряжения; B – коэффициент загрузки.

Зависимости (1), которые называют внешними характеристиками АИТ, рассчитываются для различных значений $\cos \phi$ нагрузки. При этом коэффициент загрузки определяется по формуле

$$B = \frac{1}{z\omega C}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота выходного напряжения; z – модуль полного сопротивления нагрузки; C – емкость конденсатора.

Аналитическое выражение зависимости (1), полученной на основе метода основной гармоники, имеет вид

$$U^* = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{1}{B \cdot \cos \phi} - \operatorname{tg} \phi\right)^2 + 1}. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) следует, что выходное напряжение ТПЧ, построенного на основе АИТ, при заданном значении емкости C зависит от напряжения U_d на входе АИТ, модуля полного сопротивле-

ния z нагрузки и частоты управления f тиристорами.

Если входное звено ТПЧ выполняется в виде управляемого выпрямителя, то за счет регулирования напряжения U_d на входе АИТ можно управлять режимом работы индукционной печи. При этом возмущающим воздействием, с позиций теории автоматического управления, является изменение параметров нагрузки. Однако, как показали результаты экспериментальных исследований [4], в этом случае увеличивается негативное влияние ТПЧ на питающую сеть, которое проявляется в искажении формы кривой сетевого напряжения.

ТПЧ может быть построен также по схеме с неуправляемым (диодным) выпрямителем, негативное влияние которого на сеть существенно меньше, чем управляемого (тиристорного) выпрямителя. Однако в этом случае возмущающим воздействием, наряду с изменениями параметров нагрузки, является величина напряжения U_d , которая определяется величиной входного напряжения ТПЧ. В качестве управляющего воздействия в системе может служить изменение частоты f импульсов, подаваемых на тиристоры АИТ.

На рис. 4 представлены семейства внешних характеристик АИТ, полученных по методу основной гармоники по формулам (2) и (3), а также с помощью разработанной имитационной модели в среде Matlab+Simulink.

На основании анализа построенных зависимостей можно сделать следующие выводы.

Характеристики $U^* = \Psi(B)$ являются нелинейными, при этом их крутизна увеличивается с уменьшением коэффициента загрузки B и $\cos\phi$. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке системы автоматического управления (САУ) технологическим комплексом. В процессе нагрева металла при переходе

точки Кюри происходит изменение ферромагнитных свойств, что приводит к изменению эквивалентных параметров индукционной печи. Поэтому для сохранения устойчивости системы замкнутой САУ необходимо производить коррекцию параметров регулятора.

Для расчета АИТ метод основной гармоники позволяет получить достаточно приемлемые результаты в довольно узком диапазоне коэффициента загрузки $0,8 < B < 1$.

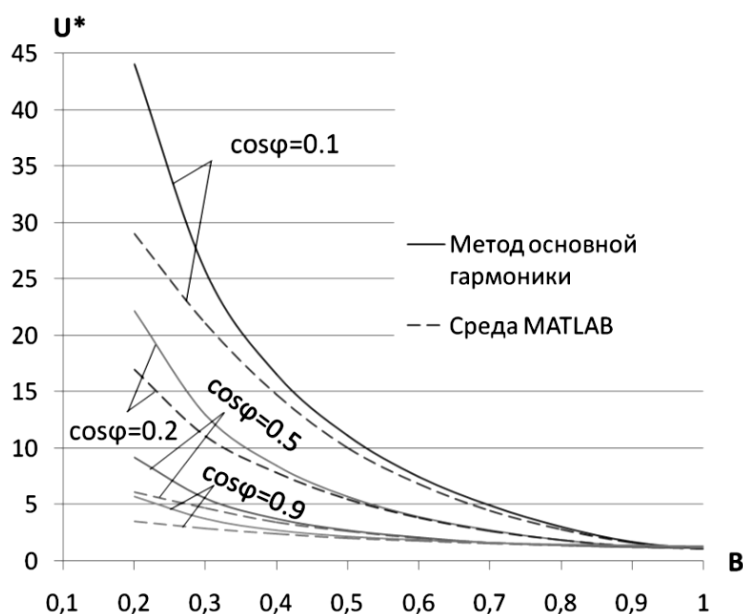


Рис. 4. Внешние характеристики АИТ

Если коэффициент загрузки $B < 0,8$, то наблюдаются расхождения в результатах расчетов. При этом графики, построенные по результатам имитационного моделирования, проходят ниже графиков, полученных по методу основной гармоники. Это объясняется тем, что при имитационном моделировании в среде Matlab+Simulink учитываются потери напряжения на всех элементах схемы, а при расчете по методу основной гармоники учесть эти потери не представляется возможным. Кроме того, при использовании метода основной гармоники индуктивность дросселя L_D при расчетах не используется, так как полагается равной бесконечности. Имитационная модель позволяет учесть конкретную величину этого дросселя.

Некоторые результаты моделирования ТПЧ для питания индукционных нагревателей даны на рис. 5 и 6, где показаны виртуальные осциллограммы напряжения и тока одного из тиристоров АИТ, а также осциллограммы выходного напряжения и тока нагрузки. Моделирование производилось при следующих значениях параметров схемы: индуктивность реактора в цепи постоянного тока АИТ — 3 мГн; индуктивность и активное сопротивление нагрузки — 66,6 мкГн и 0,085 Ом соответственно; емкость конденсатора на выходе АИТ — 373 мкФ. Тиристоры АИТ управлялись с частотой 1000 Гц. Указанное сочетание параметров соответствовало коэффициенту загрузки $B = 1,0$ при $\cos\phi = 0,2$.

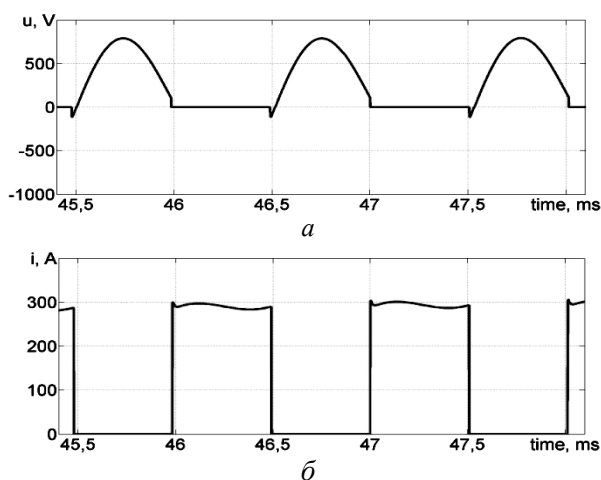


Рис. 5. Виртуальные осциллограммы напряжения на тиристоре (а) и тока тиристора (б) АИТ

Разработанная имитационная модель ТПЧ для питания индукционных нагревателей может быть использована предприятиями электротехнической промышленности при разработке и создании систем электропитания индукционных нагревателей на базе ТПЧ. Использование этой мо-

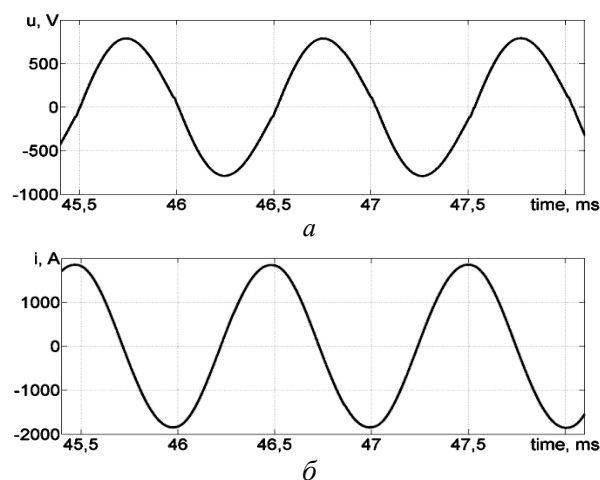


Рис. 6. Виртуальные осциллограммы выходного напряжения (а) и тока нагрузки (б)

дели позволяет снизить время и затраты на разработку и проектирование дорогостоящего силового оборудования. Кроме того, появляется возможность решить задачи по обеспечению электромагнитной совместимости ТПЧ с питающей сетью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Васильев А.С.** Источники питания электротермических установок / А.С. Васильев, С.Г. Гуревич, Ю.С. Иоффе. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.

2. **Яров В.М.** Полупроводниковые преобразователи частоты для установок индукционного нагрева / В.М. Яров, В.П. Терехов, А.Н. Ильгачев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та, 2005. 228 с.

3. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB,

SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

4. **Галета М.В.** Влияние на сеть тиристорного преобразователя частоты для индукционного нагрева металлов / М.В. Галета, А.С. Ивыгин, А.К. Сармульдинов // России - творческую молодёжь: материалы I Всерос. науч.-практ. студ. конф. (Камышин, 22–23 мая 2013 г.). Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2013. Т.3. С. 28 – 30.

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Галета Михаил Владимирович – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan I. Artyukhov – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Mikhail V. Galeta – Undergraduate, Department of Power Supply for Industrial Enterprises Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 22.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

И.И. Артюхов, А.И. Земцов, В.В. Тютманова

THE CHARACTERISTICS OF THE MAGNETRON GENERATOR OF LOW POWER AS AN OBJECT OF REGULATION

I.I. Artyukhov, A.I. Zemtsov, V.V. Tyutmanova

Магнетронные генераторы малой мощности широко применяются в бытовых печах СВЧ нагрева, а также в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии. Для работы магнетрона необходимо наличие двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи. Установлено, что на режим работы магнетрона существенное влияние оказывает величина напряжения, подаваемого на источник питания анодной цепи.

Ключевые слова: магнетрон, источник питания, ток накала, анодный ток

Магнетронные генераторы малой мощности (до 1000 Вт) широко применяются в бытовых печах СВЧ нагрева, а также в промышленных электротехнологических установках с распределенным подводом СВЧ энергии [1]. Функциональное назначение этих генераторов состоит в преобразовании электрической энергии 50 Гц в энергию СВЧ колебаний, имеющих в бытовых печах частоту 2450 МГц.

Для работы магнетрона необходимо наличие двух источников, один из которых осуществляет накал катода, другой служит для питания анодной цепи. Наиболее часто в бытовых печах СВЧ нагрева применяется схема (рис. 1), которая совмещает в себе обе эти функции. Основой схемы является силовой трансформатор Т с двумя вторичными обмотками. Первичная обмотка трансформатора подключается к питаю-

Magnetron generators of low power are widely used in domestic ovens microwave heating, as well as industrial electrotechnological installations with distributed supply of microwave energy. For operation of the magnetron, the presence of two sources, one of which carries the filament of the cathode, the other is used to supply the anode circuit. It is established that the mode of operation of the magnetron is significantly affected by the magnitude of the voltage supplied to the anode power source circuit.

Key words: magnetron, power supply, filament current, anode current

щей сети. Обмотка высокого напряжения U_{2a} и несимметричный удвоитель напряжения на конденсаторе С и диоде VD образуют источник анодного питания магнетрона. Другая вторичная обмотка с напряжением U_{2n} обеспечивает накал катода.

Результаты исследования магнетронного генератора с данной схемой электропитания показали, что из-за инерционности процесса термоэмиссии катода анодный ток достигает рабочего значения спустя некоторое время после подачи напряжения на анод [2]. При этом время задержки существенно зависит от величины сетевого напряжения. Это приводит к тому, что при одном и том же задании режима работы СВЧ печи на панели управления фактическая мощность при широтно-импульсном методе (ШИМ) регулирования также

зависит от величины сетевого напряжения [3]. Понятно, что для печей бытового назначения это обстоятельство не имеет принципиального значения, так как в случае применения печи в условиях с пониженной величиной сетевого напряжения пользователь устройства просто еще раз включает печь и повторяет процесс нагрева продукта до требуемой температуры.

В случае промышленного применения источников СВЧ энергии, схема электропитания которых выполнена по схеме рис. 1, сложно получить необходимые технологические параметры обрабатываемого изделия при изменении величины сетевого напряжения [4].

Если в схеме электропитания магнетрона разделить цепи питания анода и накала

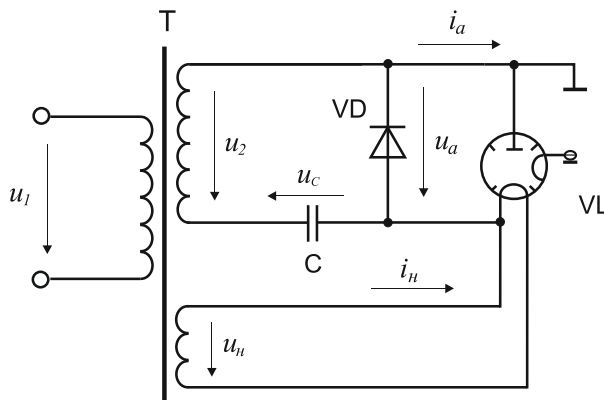


Рис. 1. Схема электропитания магнетрона с одним трансформатором

Исследование характеристик магнетронного генератора малой мощности как объекта управления проведено с помощью экспериментальной установки, схема которой показана на рис. 3. В ее состав входят два трансформатора, один из которых ТА служит для питания анодной цепи магнетрона VL, другой ТН обеспечивает подогрев катода. Первичные обмотки трансформаторов ТА и ТН подключены к питающей сети через регуляторы напряжения РН1 и РН2.

В качестве объекта исследования был выбран магнетрон типа 2М214 фирмы LG. Для снятия осциллограмм анодного тока i_a в цепь питания включен шунт RA, со-

катода, то к моменту подачи напряжения на анод магнетрона VL температура катода будет иметь рабочее значение, вследствие чего время начала генерации на каждом шаге включения источника питания при ШИМ регулирования мощности не будет зависеть от величины сетевого напряжения.

Схема электропитания, которая показана на рис. 2, имеет в своем составе два трансформатора: анодный ТА и катодный ТН. Наличие дополнительного трансформатора в этой схеме, естественно, усложняет конструкцию, однако предоставляет дополнительные возможности за счет разделения процессов управления магнетроном по катодной и анодной цепям.

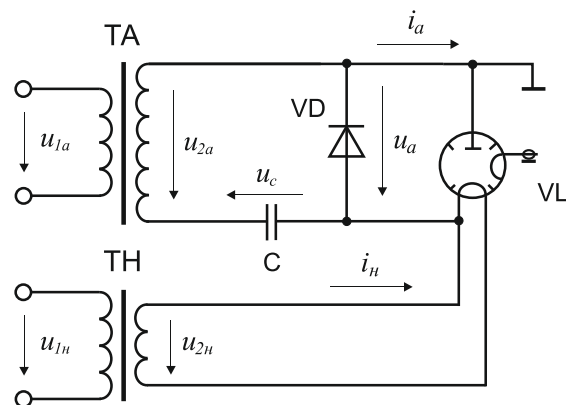


Рис. 2. Схема электропитания магнетрона с двумя трансформаторами

противление которого составляет 1 Ом. Для осциллографирования анодного напряжения параллельно диоду VD подключен делитель напряжения на резисторах R1 и R2, который обеспечивает снижение напряжения в 100 раз. Для записи осциллограмм напряжений и токов использовался двухканальный запоминающий осциллограф Fluke 196C.

Сначала при фиксированных значениях напряжения $U_{1н}$ на первичной обмотке накального трансформатора ТН снимались показания приборов (осциллограммы анодного тока i_a и анодного напряжения u_a , их средние значения I_A и U_A соответственно,

а также осциллограммы тока i_n и напряжение u_{2n} накала, их действующие значения I_n , U_{2n}) для ряда значений напряжений U_{1a} на первичной обмотке анодного трансформатора ТА. Затем для фиксированных

значений напряжений U_{1a} на первичной обмотке анодного трансформатора ТА снимались показания приборов для ряда значений напряжений U_{1n} на первичной обмотке накального трансформатора ТН.

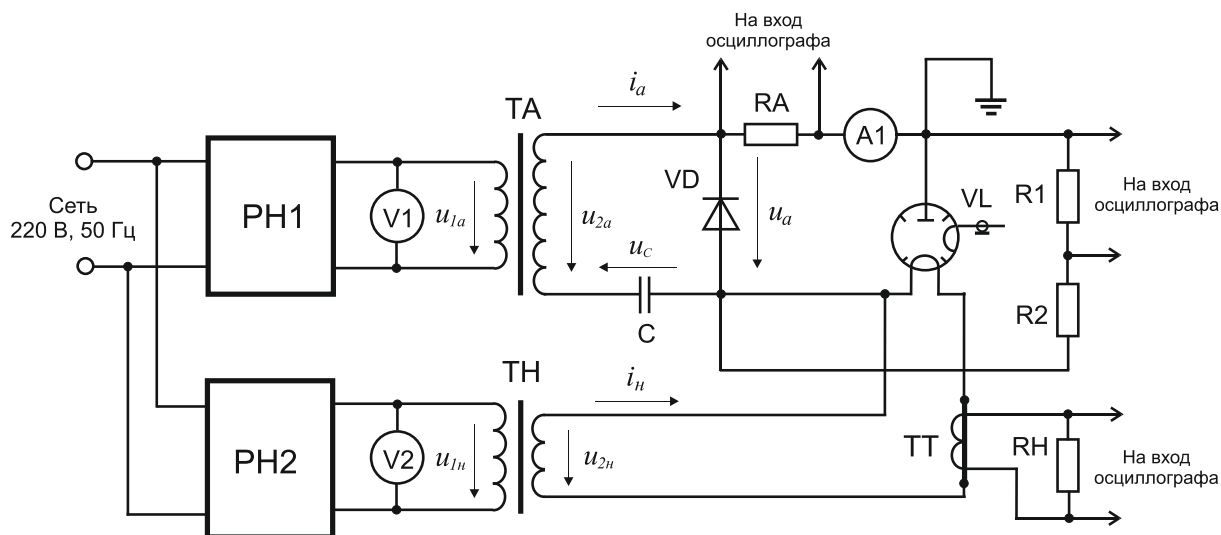


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

В результате проведенных экспериментов установлено, что устойчивая генерация СВЧ-колебаний магнетрона начинается при напряжении питания анодного трансформатора $U_{1a} \geq 170$ В. При дальнейшем увеличении этого напряжения до 240 В происходит увеличение анодного тока от

51 до 250 мА, при этом рассеиваемая на аноде магнетрона мощность возрастает от 180 до 980 Вт.

График зависимости анодного тока магнетрона от напряжения питания анодного трансформатора при $U_{1n} = 220$ В показан на рис. 4.

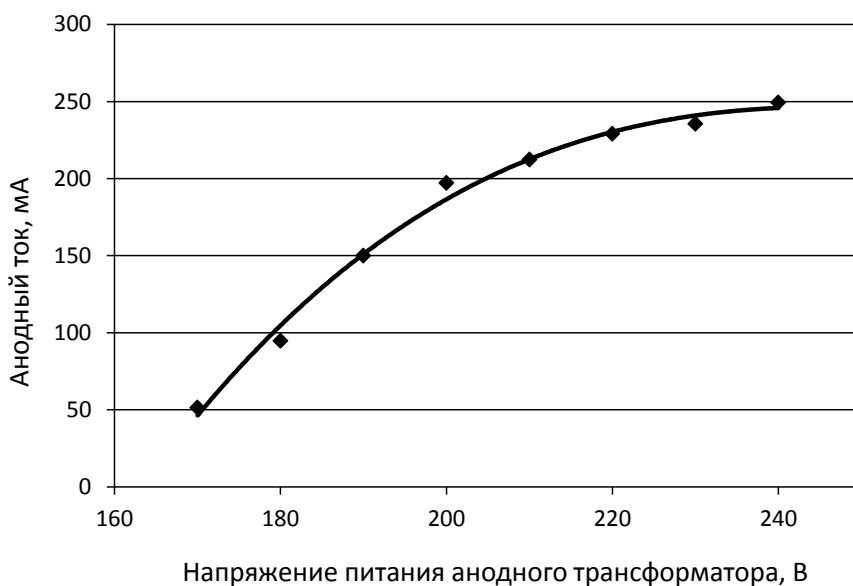


Рис. 4. Зависимости анодного тока магнетрона от напряжения питания анодного трансформатора

Эта зависимость в диапазоне от 170 до 240 В аппроксимируется полиномом третьей степени

$$I_A = 0,2088 \cdot U_{1a}^3 - 7,2794 \cdot U_{1a}^2 + 78,783 \cdot U_{1a} - 25,443.$$

На рис. 5 показаны осциллограммы анодного тока и напряжения на аноде для двух значений напряжения питания анодного трансформатора при фиксированной величине питания накального трансформатора, равной 220 В.

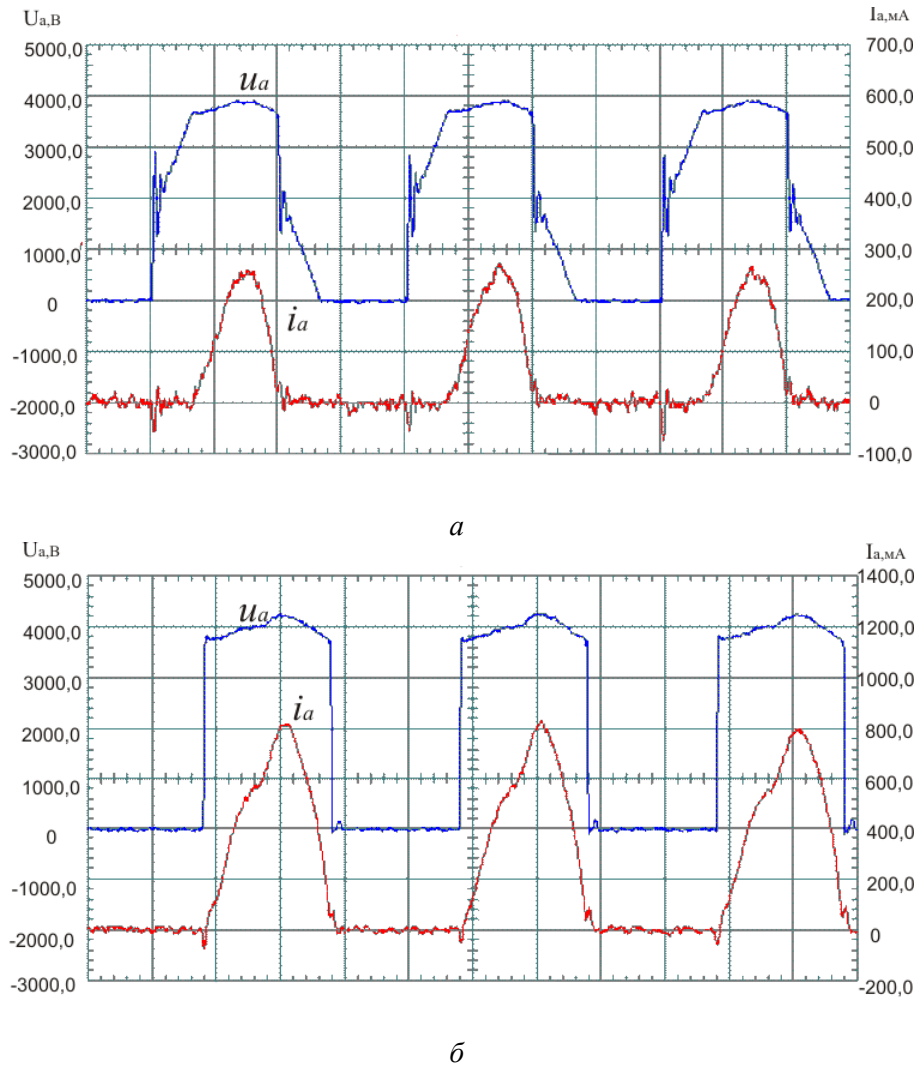


Рис. 5. Осциллограммы анодного тока и напряжения на аноде при напряжении питания анодного трансформатора 170 В (а) и 230 В (б). Масштаб по оси абсцисс: 1 деление – 5 мс

Из этих осциллограмм видно, что для исследуемого магнетрона пороговое значение напряжения, при которой начинается генерация СВЧ колебаний, составляет ориентировочно 3800 В. Если напряжение питания анодного трансформатора равно 170 В, то анодное напряжение u_a достигает указанное пороговое значение только спустя некоторое время после начала полупериода сетевого напряжения. В результа-

те импульсы анодного тока имеют ширину, меньше 180 эл. град. При напряжении питания $U_{1a} = 230$ В начало генерации СВЧ колебаний совпадает с началом полупериода. Ширина импульсов анодного тока составляет 180 эл. град.

Необходимо заметить, что вариация напряжения U_{1n} на первичной обмотке накального трансформатора в диапазоне от 170 до 240 В не приводит к заметным из-

менениям режима работы магнетрона в установившемся режиме. Однако, если напряжения питания на первичные обмотки анодного и накального трансформаторов подаются одновременно, то от величины

напряжения $U_{1н}$ существенно зависит длительность переходного процесса, имея тенденцию к уменьшению с возрастанием указанного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Архангельский Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю.С. Архангельский. – Саратов: Изд-во «Научная книга», 2011. 560 с.

2. **Артюхов И.И.** Динамические характеристики магнетронного генератора / И.И. Артюхов, А.И. Земцов // Антенны. 2012. № 3. С. 47 – 49.

3. **Артюхов И.И.** Переходные процессы в накальной цепи магнетрона малой мощности / И.И. Артюхов, А.И. Земцов //

Вопросы электротехнологии. 2013. № 1. С. 48 – 53.

4. **Цветков Г.А.** Система автоматизированного управления безопасной эксплуатацией СВЧ установки конвейерного типа для сушки древесины на заданную влажность / Г.А. Цветков // URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/geology-313/engineering-geology-313/18511-312-231> (дата обращения: 06.03.2015).

Артюхов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Земцов Артем Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Филиала Самарского государственного технического университета в г. Сызрани

Тютманова Виктория Васильевна – магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Ivan I. Artyukhov – Dr. Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Artem I. Zemtsov – Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Part of Samara State Technical University in Syzran

Victoria V. Tyutmanova – Undergraduate, Department of Power Supply for Industrial Enterprises Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 14.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

К СВЕДЕНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

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

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.79

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЫ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛИНЕЙНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ В НАПЛАВОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ

О.В. Вдовина, Г.Г. Угаров

DEFINING THE BASIC PARAMETERS OF THE TECHNOLOGICAL POWER IMPACT ZONE IN THE LINEAR ELECTROMAGNETIC MOTOR DURING THE SURFACING PROCESSES

O.V. Vdovina, G.G. Ugarov

Определены основные параметры технологической зоны формообразования в наплавочных процессах с использованием линейного электромагнитного двигателя.

Ключевые слова: *формообразование, линейный электромагнитный привод, температура нагрева элементов, наплавочная ванна*

The paper defines the basic parameters of the forming zone in the surfacing processes using a linear electromagnetic motor.

Keywords: *shaping a linear electromagnetic actuator, the temperature of heating elements surfacing bath*

Среди ресурсо- и энергосберегающих технологий в машиностроении и ремонтном производстве значительное место занимают процессы плазменной (дуговой) наплавки [1].

Развитие наплавочных процессов идет в направлении совмещения процессов наплавки и формообразования [2].

Во всех способах наплавки, осуществляемых с использованием дугового, плазменно-дугового разрядов и лазерного нанесения металла, эффективным признан ввод в технологическую зону концентрированных потоков механической энергии. Это позволяет наряду с последующими процессами формообразования управлять физико-механическими свойствами металла (структурой, твердостью), однородностью и

равномерностью его распределения, повысить коэффициент использования металла.

Наиболее перспективным источником механической энергии является линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД), обладающий существенными преимуществами по сравнению с пневматическими, гидравлическими, электромеханическими (вращательного движения) двигателями в отношении управляемости, массогабаритных и энергетических показателей [3-5]. ЛЭМД обладает также конструктивной простотой, надежностью, хорошей регулируемостью выходными механическими параметрами (усилием, частотой, энергией воздействия различного характера) в соответствии с технологическими параметрами обрабатываемого объекта.

При использовании ЛЭМД в указанной области необходимо учитывать особенности как технологического процесса, так и самого ЛЭМД.

При наплавке с вытеснением металла необходимо учитывать: расположение зоны расплава, характер силового воздействия на металл, его фазовый состав, кинематику движения, форму, положение в пространстве, материал формообразующего инструмента (пуансона), вид движения расплава, технологическое назначение, вид нанесения металла.

Для ЛЭМД определяющим является наряду со схемами наплавки и формообразования, также его нагрев от расплава ванны (рис. 1).

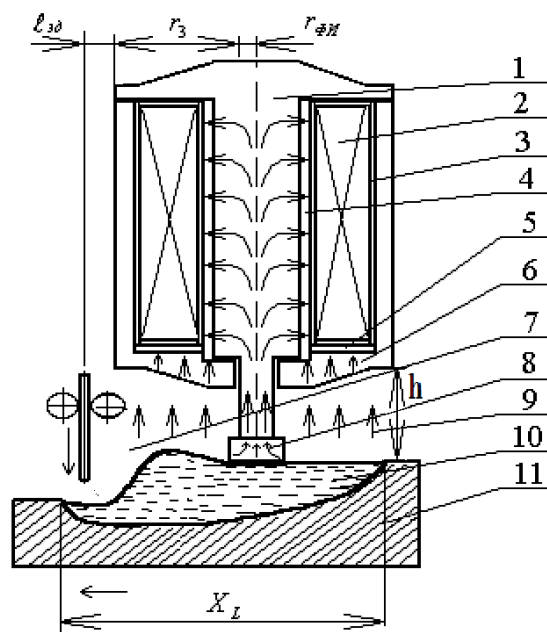


Рис. 1. Схема размещения ЛЭМД относительно наплавочной ванны (1 - якорь, 2 - обмотка, 3 - изоляция обмотки, 4 - воздушный промежуток, 5 - прокладка из плотной бумаги, 6 - нижняя дисковая часть, 7 - сварочная дуга, 8 - пуансон, 9 - потоки тепла, 10 - наплавочная ванна, 11 - наплавляемая деталь)

Нагрев обмотки ЛЭМД осуществляется через якорь, пуансон которого обрабатывает металл и от корпуса двигателя через воздушное пространство теплотой наплавочной ванны. Схема распределения потоков теплоты от наплавочных процессов показана на рис. 1.

Определим температуру нагрева обмотки ЛЭМД с учётом электрических потерь и теплового воздействия наплавочной ванны. При этом предполагается, что длительность импульсов постоянного тока t_u сопоставима с длительностью паузы t_n в цикле, коэффициент теплоотдачи обмотки зависит от температуры нагрева, начальная температура обмотки отлична от температуры окружающей среды T_{oc} ; допускаем, что она составляет $20^\circ C$.

Решение общего уравнения бесконечно большой теплопроводности среды для всего объёма обмотки при расчёте переходного процесса нагрева её постоянным током согласно [6] имеет вид:

- при нагреве обмотки

$$\tau_n = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \tau_o e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (1)$$

- при охлаждении обмотки в безтоковую паузу

$$\tau_{ox} = \tau_n e^{-\frac{t}{T_0}} + \tau_o \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right), \quad (2)$$

где τ_n, τ_{ox} - соответственно превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды в процессе нагрева и в процессе охлаждения; $\tau_y = \tau_{нт} + \tau_{нг}$ - превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды в установившемся режиме за счёт электрических потерь в обмотке и нагреве её от наплавочной ванны; T_n, T_o - соответственно постоянные времени нагрева и охлаждения обмотки; τ_o - начальное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды.

Расчет температуры нагрева остальных элементов ЛЭМД выполнен на основе известных выражений [7,8], приведенных в таблице.

Выражения для определения температуры нагрева элементов ЛЭМД
теплотой от наплавочной ванны и потерь в обмотке

Элементы ЛЭМД	Температура нагрева элементов ЛЭМД
якорь	$T(z, t_k) = \frac{Q_1}{c\gamma\sqrt{4\pi a}} \int_0^{t_k} \frac{dt_k}{\sqrt{t_k}} e^{-\frac{z^2}{4at_k}}$
наружная поверхность внутренней изоляции (излучением пренебрегаем)	$T_{ви} = \frac{x\alpha T(z, t_k)}{\lambda + x\alpha}$
внутренняя поверхность обмотки	$T_o = \frac{x_1 m c_1 T_{ви}}{\lambda_1 + x_1 m c_1}$
наружная поверхность дисковой части статора	$T_\delta = \frac{Q_1 z_1}{\lambda}$
наружная поверхность прокладки из плотной бумаги	$T_\delta = \frac{z_2 m_1 c_1 T_\delta}{\lambda_2 + z_2 m_1 c_1}$
наружная поверхность нижней изоляции	$T_{ни} = \frac{z_3 m_2 c_2 T_\delta}{\lambda_3 + z_3 m_2 c_2}$
наружная нижняя поверхность обмотки	$T_{но} = \frac{z_4 m_3 c_1 T_{ни}}{\lambda_1 + z_4 m_3 c_1}$
обмотка	$T_{нв} = T_o + T_{но}$

В таблице приведены следующие обозначения: $Q_1 = 0,24\eta IU_\delta$ - тепловая мощность наплавочной ванны; η - тепловой КПД процесса нагрева изделия сварочной дугой; I - сила тока дуги; U_δ - напряжение на дуге; t_k - время контакта пуансона с металлом; $T_{н}$, T_o - соответственно постоянные времени нагрева и охлаждения обмотки; τ_0 - начальное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды; c , c_1 , c_2 - соответственно теплоемкость стали, изоляции и прокладки из плотной бумаги; γ - плотность стали; a - коэффициент теплопроводности стали; α - коэффициент теплоотдачи воздуха; λ , λ_1 , λ_2 , λ_3 - соответственно коэффициент теплопроводности воздуха, изоляции, стали и прокладки из плотной бумаги; m , m_1 , m_2 , m_3 - соответственно масса изоляции, фланца, прокладки из плотной бумаги и изоляции нижнего торца; z , z_1 , z_2 , z_3 , z_4 , x , x_1 - соответственно расстояние от источника теплоты до точки с

координатами

$$(x, y, z), (x, y, z_1), (x, y, z_2), \\ (x, y, z_3), (x, y, z_4), (x_1, y, z).$$

На рис. 2 представлены зависимости превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды ЛЭМД τ_i от времени работы t ($t = t_u + t_n$). Расчет произведен по формулам (1)–(2) с учетом табл., при этом $\tau_{нв} = T_{нв} - T_{oc}$.

При работе ЛЭМД в импульсном режиме с частотой ходов 1...3Гц и нагреве от электрических потерь и наплавочной ванны продолжительность включения составляет 15...45%.

Температурная обстановка рассматриваемой технологии является определяющей для выявления технологической зоны силового воздействия ЛЭМД. Другими факторами этой зоны является материал локального вытесненного объема металла, параметры режима нанесения и вытеснения металла, геометрические параметры взаимного расположения наплавочной ванны и ЛЭМД, его размеры.

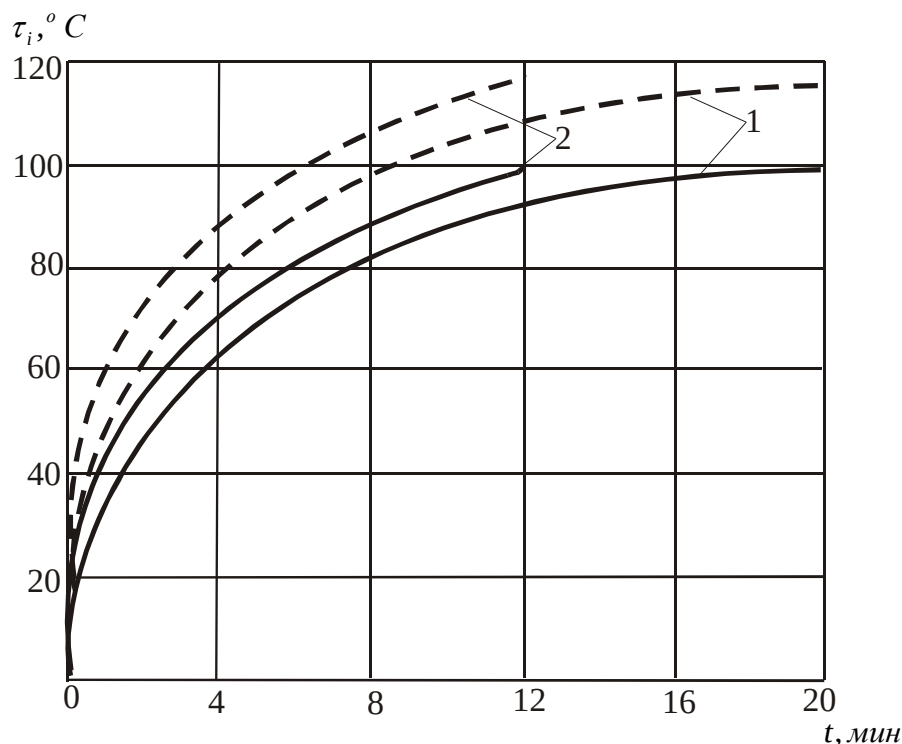


Рис. 2. Зависимости превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды ЛЭМД от времени работы при различной частоте ходов: 1 - 1Гц, 2 – 3Гц (_ _ _ расчёт, ____ эксперимент)

Исходя из схемы размещения ЛЭМД (рис. 1), можно определить расстояние между наплавочным электродом и ЛЭМД $\ell_{эд}$

$$\ell_{эд} = X_L - r_3 - r_{\Phi И}, \quad (3)$$

где $r_{\Phi И}$ - радиус ФИ.

Выражение (3) с учётом

$$X_L = \sqrt[3]{\frac{1,5\sigma_{nn}(K_{ш} + \cos \theta)\alpha_n I}{v\mu\rho_{ж}}} \sqrt[3]{t^2} + x_o,$$

где $K_{ш}$ - коэффициент шероховатости; θ - угол смачивания; $\rho_{ж}$ - плотность расплава; σ_{nn} - коэффициент поверхностного натяжения; v - ширина наплавочной ванны, будет иметь следующий вид

$$\ell_{эд} = \sqrt[3]{\frac{1,5\sigma_{nn}(K_{ш} + \cos \theta)\alpha_n I}{v\mu\rho_{ж}}} \sqrt[3]{t^2} + x_o - r_3 - r_{\Phi И}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет определить оптимальное место расположения ЛЭМД относительно наплавочной ванны.

Параметр зоны h определяется длиной формообразующего элемента. Согласно экспериментальным данным $h \leq 30\text{мм}$.

Итак, проведенные исследования позволили на основе распределения температур нагрева основных элементов технологического объекта выявить основные параметры технологической зоны силового воздействия ЛЭМД при наплавке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Казаков Ю.Н.** Новые методы ресурсосберегающей технологии. Активные методы управления формообразованием при наплавке / Ю.Н. Казаков - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т., 1991. 80с.

2. **Казаков Ю.Н.** Физико-технологические основы механической обработки покрытий с использованием плазменно-дуговых разрядов / Ю.Н. Казаков - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т., 1999. 80с.

3. **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука, 1989. 216 с.

4. **Ряшенцев Н.П.** Ручные электрические машины ударного действия / Н.П. Ряшенцев, П.Н. Алабужев, Н.Н. Никитин и др. – М.: Изд-во «Недра», 1970. 192 с.

5. **Ряшенцев Н.П.** Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия / Н.П. Ряшенцев, Е.М. Тимошенко, А.В. Фролов – Новоси-

бирск: Наука, 1970. 260с.

6. **Залесский А.М.** Тепловые расчеты электрических аппаратов / А.М. Залесский, Г.А. Кукеков - Л.: Энергия, 1967. 380 с.

7. **Рыкалин Н.Н.** Тепловые основы сварки / Н.Н. Рыкалин - М.,Л.: Издательство Академии наук СССР, 1947. 268 с.

8. Производство заготовок свободной ковкой. Методические указания к учебно-исследовательской лабораторной работе / Под. ред. Паниной О.А. - Саратов: СПИ, 1990. 24с.

Вдовина Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Угаров Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Olga V. Vdovina - Ph.D., Associate Professor, Department of Power Supply for Industrial Enterprises, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Gennadiy G. Ugarov – Dr.Sc., Professor, Department of Power Supply for Industrial Facilities, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 29.05.15, принята к опубликованию 10.06.15

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.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.365.411

КОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОЛИМЕРНЫЙ МАТЕРИАЛ С ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ АРМАТУРОЙ

А.В. Бозриков, И.Н. Антонов

THE COMPOSITE POLYMER MATERIAL WITH A CONDUCTIVE ARMATURE

I.N. Antonov, A.V. Bozrikov

Рассмотрен процесс создания и испытания композиционного клея-расплава на полимерной основе с металлическим наполнением. Определена оптимальная концентрация металлического наполнителя для плавления в СВЧ электромагнитном поле.

Ключевые слова: СВЧ диэлектрический нагрев, искусственный диэлектрик, клей-расплав

Во многих отраслях промышленности применяются способы соединения различных материалов с помощью термоплавких (композиционных) клеев-расплавов путем нанесения предварительно расплавленного клея на склеиваемую поверхность. Однако необходимость в разработках и внедрении новых инновационных технологий склеивания остается актуальной.

Клей-расплав представляет собой не содержащую растворителя термопластичную полимерную композицию, переходящую в вязкотекучее состояние при нагревании и быстро возвращающуюся в твердое состояние при охлаждении до комнатной температуры [1].

В качестве клеев-расплавов используются полиэфирные, полиамидные и сополимерные (этилен с винилацетатом) полимеры и композиты на их основе. Клей-расплавы применяются для склеивания мате-

The paper deals with the process for creating and testing a composite polymer-based metal-filled hot-melt adhesive. The optimal concentration of the metal filler metal to melt in the microwave electromagnetic field is defined.

Keywords: microwave dielectric heating, artificial dielectric, hot melt adhesive

риалов в обувной, мебельной, полиграфической промышленности, а также в строительстве и при ремонтных работах.

Они наносятся на поверхности склеиваемых материалов при температуре 100-200°C с помощью термодозаторов различного типа, либо вручную с помощью кистей и других инструментов в зависимости от области применения. После нанесения клея изделие помещается под пресс.

К клеем-расплавам относятся также нефтяные битумы, которые используются для кровельных и гидроизоляционных работ и для склеивания материалов в строительной отрасли. Плавление битума при ремонте гидроизоляции кровли производят в электрических битумоварках, в котлах посредством погружных нагревателей, а также в котлах, нагреваемых твердым топливом (дрова, уголь). Как правило, транспортировка битума производится путем

подачи горячего битума на объект, что создает специальные требования для техники безопасности. Иногда используется локальный подогрев по месту для улучшения качества склеивания с помощью газовых горелок и паяльных ламп, что может привести к возгоранию.

Известный ассортимент клеев-расплавов достаточно ограничен как по своей физико-химической природе, так и по технологиям их нанесения. В свою очередь, характеристики клея должны обеспечивать необходимые эксплуатационные показатели изделия, изготовленного с его использованием.

Поэтому эффективность процесса склеивания клеем-расплавом требует усовершенствования, поскольку существующая технология состоит как минимум из двух отдельных стадий, а именно плавление и нанесение клея. В связи с этим в момент нанесения клей частично остывает, меняются его вязкостные характеристики, в какой-то степени меняется его растекаемость, внедрение в поры склеиваемого материала (когезия), и в результате всего ухудшается адгезия. Все это влияет на качество склеиваемых материалов и в итоге увеличивает время процесса склеивания.

Недостатки технологий склеивания можно исключить, если использовать модифицированные клеи-расплавы. Предлагается ввести в состав клея-расплава электропроводящие наполнители, которые могут разогревать весь объем клея за счет воздействия на них электромагнитного поля СВЧ или ТВЧ (токов высокой частоты).

Механизмы взаимодействия СВЧ и ТВЧ с металлами проявляются в индукционном разогреве токопроводящего наполнителя и выделения при этом теплоты в матрицу клея-расплава. Тем самым мы достигаем эффекта объемного плавления полимерных материалов.

Вид реализуемого механизма нагрева материала, помещенного в индуктор при нагреве за счет ТВЧ, зависит от природы материала (магнитный или немагнитный материал), от его удельной проводимости и магнит-

ной проницаемости, в зависимости от чего происходит нагрев металла за счет токов Фуко, скин-эффекта или перемангничивания.

Были проведены эксперименты по использованию СВЧ излучения для объемного разогрева композиционной матрицы.

В этом случае в расплавленную матрицу клея-расплава добавлялся токопроводящий порошок. Затем матрица охлаждалась, и полученный образец использовался для объемного разогрева в СВЧ электромагнитном поле.

Следует отметить, что технологии СВЧ и ТВЧ нагрева зарекомендовали себя как эффективные методы, позволяющие быстро и с высоким КПД проводить термическую обработку взаимодействующих с электромагнитным полем материалов [2].

Достоинства электромагнитных установок: компактность, простота в управлении и обслуживании, малые расходы по содержанию, надежность и долговечность.

Локализация энергии и объемный разогрев определяют малую продолжительность технологического процесса, а также высокую производительность.

Эксперименты проводились с битумным клеем - расплавом ТУ-БКР-01М-2010, который применяется в строительстве для связывания (склеивания) материалов, а также для обеспечения гидрофобных свойств [3].

В качестве наполнителя использовалась алюминиевая пудра ПАП-1.

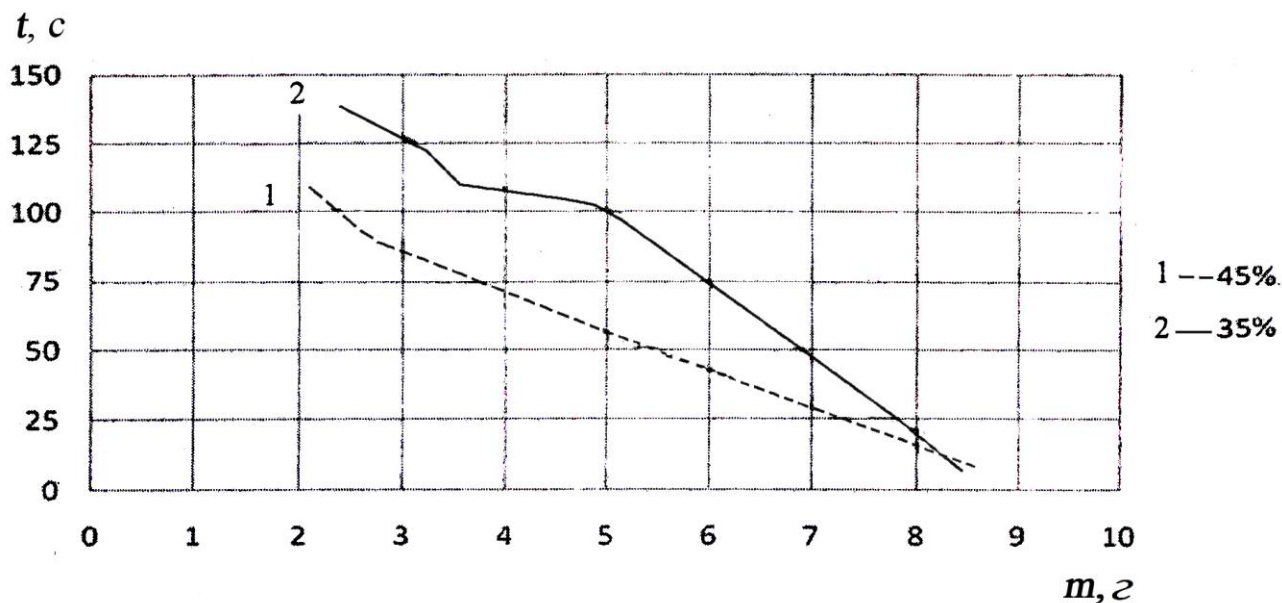
Отобранная проба битумного клея-расплава помещалась в металлическую емкость объемом 100 мл и нагревалась в термощкафу до температуры 145–155⁰С. Затем в него постепенно вводился металлический порошок, и расплав перемешивался до равномерного распределения наполнителя, после чего композицию разливали в формы для испытаний в СВЧ печи.

Цилиндрические образцы нагревались в бытовой СВЧ печи (частота 2450 МГц, мощность 800 Вт) и измерялось время нагрева до наступления вязкотекучего состояния (время плавления) (см. рисунок).

Эксперименты показали зависимость времени плавления от размера частиц наполнителя.

При размере частиц алюминия 0,25 - 0,55 мкм и различных концентрациях наполнителя (35%, 45%) время плавления не превысило 2,5 минуты, а при размере частиц

алюминия более 0,5 мм композиция не разогревалась вообще, в то время как плавление аналогичных образцов в термошкафу составляло значительно большее время.



Зависимость времени разогрева битумного клея-расплава с алюминиевой пудрой в качестве наполнителя в СВЧ печи от массы образца композиционного материала. Содержание наполнителя составляет 35% (2) и 45% (1)

Поскольку металлический наполнитель может оказать влияние на качество склеиваемых образцов, было проведено сравнение клеев-расплавов с наполнителем и без него. На деревянные рейки размером 50x10мм наносилась отобранная проба композиционного клея-расплава. Одна группа реек помещалась в бытовую СВЧ печь, а другая склеивалась в комнатных условиях. Дополнительно готовились пробы без металлического наполнителя в качестве эталонов, которые склеивались обычным способом. Затем проводились испытания прочности клеевого шва динамометрическим способом. Было установлено, что при склеивании образцов в бытовой СВЧ печи адгезия по сравнению с эталонными образцами не ухудшалась, а в случае сэвильенового композиционного клея-расплава заметно улучшалась.

Таким образом, наполнитель не оказывает влияния на качество склеивания поверхностей. Проведенные эксперименты демонстрируют высокую скорость полу-

чения расплавов, экологическую, санитарную и пожарную безопасность технологии.

Процесс может быть обеспечен автоматизированной системой управления.

Вместе с тем, требуются дополнительные работы для определения оптимального соотношения матрица-наполнитель; оценки энергетического баланса, технологического регламента и подбора конфигурации композиционного клея-расплава в зависимости от его применения (пленка, гранулы, порошок).

Разрабатываемый композиционный материал может быть использован в качестве радиопоглощающих защитных экранов для обеспечения экранирования от внешнего электромагнитного излучения, теплогидроизоляционных покрытий, клеящих пленок и т.п.

Литературный поиск показал, что аналогов предложенной технологии на сегодняшний день нет, поэтому работа является инновационной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Композиционные материалы: Справочник / под ред. Васильева В.В., Тарнопольского Ю.М. – М.: Машиностроение, 1990. 512 с.

2. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверх-

высоких частот / Г. Пюшнер. – М.: Энергия, 1968. 311 с.

3. Строительные материалы: Справочник / под ред. Болдырева А.С., Золотова П.П. – М.: Стройиздат, 1989. 568 с.

Бозриков Алексей Васильевич – аспирант кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Антонов Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey V. Bozrikov – Postgraduate, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Igor N. Antonov – Dr.Sc., Professor, Department of Automated Electrotechnological Plants and Systems, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 25.05.15, принята к опубликованию 10.06.15



БЕССМЕРТНЫЙ ПОЛК



Ольга Николаевна Дмитриева – кандидат исторических наук, заслуженный работник культуры РФ, начальник отдела культурно-эстетической работы управления воспитательной работы СГТУ имени Гагарина Ю.А.

«ВЭ» Ольга Николаевна, в этом году Вы участвовали в акции «Бессмертный полк». Поделитесь, пожалуйста, Вашими впечатлениями.

О.Н.Д. Участие в этой акции оставило в моей душе и в моём сердце неизгладимый след. Удивительно, но со временем это событие затмило даже необыкновенный Парад Победы на котором мне также посчастливилось присутствовать, и из-за которого я и попала 9 мая в Москву. За день до этого во время моих сборов на Парад Победы, мне позвонила руководитель оркестра «Серебряные струны» студенческого клуба СГТУ Ольга Ивановна Зубихина и, узнав о моей поездке, сообщила, что 9 мая в Москве состоится акция «Бессмертный полк». Шествие начнётся в 15.00 от Белорусского вокзала. Оно будет проходить по Тверской улице до Красной площади. Я приняла мгновенное решение участвовать в нём и пронести по улицам столицы, по Красной площади портрет моего дяди Соловьёва Ивана Тихоновича, единственного брата отца, пропавшего без

вести во время Сталинградской битвы в девятнадцатилетнем возрасте. Для меня это было очень важно... Мои родители просили меня разыскать его место захоронения, так как их предыдущие поиски не увенчались успехом. К сожалению, мне тоже не удалось это установить, как и то, в каком сражении, и за какой населённый пункт он сложил свою голову. Казалось бы, всё просто, написать письмо в Центральный архив Министерства обороны в Подольске и получить результат... Но, как оказалось, обязательно нужно назвать номер воинской части, в которой служил дядя, или хотя бы указать его полевую почту. Номер части нам был неизвестен. Конечно, он был не назван в единственном письме, которое дядя прислал с фронта, а штемпель с номером полевой почты был стёрт. Письмо было написано 8 января 1943 г. с хутора Гусынка Петропавловского района Воронежской области. Призывался в Красную Армию Иван Соловьёв из Сталинграда. По свидетельству родителей учился на «командирских курсах». Больше они мне никаких подробностей сообщить не могли, так как во время Сталинградской битвы жили они в селе Среднее-Погромное напротив Сталинграда, папе было 5 лет, а маме – 3 года.

Смутно надеясь, что если я приму участие в акции «Бессмертный полк», возможно, дядю кто-то узнает и что-то сможет сообщить о его судьбе, я, несмотря на то, что до отъезда оставалось очень мало времени, побежала в фотоателье и распечатала фотографию. В фотоателье отнесли ко мне с большим пониманием, сделали заказ быстро и оформили портрет дяди в фоторамку. Но я уже не успевала набрать и распечатать на компьютере текст к фотографии, поэтому, бросив в чемодан маркер красного цвета (чёрного не оказалось под рукой), линейку, ножницы и карандаш, отправилась на вокзал. Надпись к портрету «Соловьёв Иван Тихонович (1923-1943). Пропал без вести» я, насколько могла, старательно и с большим трепетом сделала в пути за столиком купейного вагона.

После грандиозного Парада, переполнившего нас чувством гордости за Россию, мы пешком добрались до Представительства Саратовской области в Москве, а затем нас подбросили на машине до Белорусского вокзала. Мы прибыли туда за 7 минут до начала марша, но не стояли на вокзальной площади ни секунды. Люди стихийно, без какой-либо специальной организации, самостоятельно формировались в колонны и двигались в сторону Тверской улицы. Самое удивительное заключалось в том, что, в тот момент, когда мы только вступили на Тверскую и прошли буквально несколько сотен метров, по радиорепродуктору объявили, что Президент России В.В. Путин во главе колонны «Бессмертного полка» с портретом отца в руках вступил на брусчатку Красной площади. А от неё до Белорусского вокзала – четыре километра. Впереди нас с портретами родных, внёсших вклад в победу над фашизмом, двигался бесконечный людской поток. Я оглянулась и увидела, что конца этого невиданного марша, в котором деды и прадеды шли в одном строю с сыновьями, внуками и правнуками, не видно и позади нас. Кто-то рядом воскликнул: «Да это не бессмертный полк, а бессмертный фронт!»

Впервые за последние тридцать лет я увидела такое единение людей разных сословий, разных национальностей. Рядом с нами было мало москвичей. Возможно, большая их часть находилась впереди колонны. А с нами в едином строю шли представители Самары, Пензы, Омска, Томска, Севастополя, Петербурга, кавказских республик, пятеро гостей из Германии, как оказалось, бывших жителей Красноармейского района нашей области. Мы знакомились, рассказывали друг другу о родственниках, изображённых на портретах разных размеров с аннотациями и без них. Некоторые участники акции несли одни таблички с надписями без фотографий. У одних из них не осталось ни одного снимка или не было их изначально, у других снимки сгорели во время пожара. Были среди участников марша и те, кто шёл без

табличек и фотографий, но с цветами, шарами и флагами в руках. Очень приятно было смотреть на девушек, юношей и детей в военной форме. У многих девушек и юношей в гражданской одежде на голове были красноармейские пилотки. То здесь, то там звучала гармошка, пели песни Великой Отечественной войны. Некоторое время прямо за нами шёл московский вокальный самодеятельный коллектив, с которым мы дружно спели «Тёмную ночь», «Катюшу» и «Смуглянку». Периодически колонна, особенно при появлении в небе вертолёт, кричала: «Ура!» Это было тоже нечто необыкновенное... Возглас, выражающий общее воодушевление, катился звуковой волной издалека, возможно от самой Красной площади. Постепенно звук приближался, нарастал и вдруг, достигнув наших рядов, взрывался мощно и раскатисто так, что невозможно было молчать и во всю силу не кричать боевой клич защитников Отечества.

С балконов зданий Тверской колонну приветствовали москвичи, махали руками, флагами. Многие из них держали в руках портреты своих родственников-фронтовиков, выражая тем самым единство с нашим шествием.

На Красной площади звучали патриотические марши и песни. Трибуны были заполнены нарядными людьми с флагами и шарами, приветствующими участников «Бессмертного полка». Было очень много теле- и видеокамер, которые снимали, снимали и снимали... И я испытала чувство глубокого удовлетворения, что таким образом память о дяде, отдавшем свою молодую жизнь за Родину, сохранится. Когда мы вышли к Васильевскому спуску, я позвонила родителям и сообщила, что Иван Соловьёв, который за свою короткую жизнь не успел побывать в Москве, прошёл с нами по центру столицы и по её главной площади. Родители, смотревшие в это время шествие по телевизору, были потрясены. Для них это был неожиданный сюрприз. А меня в тот момент переполняли чувства глубочайшей благодарности к инициаторам, организаторам и всем участ-

никам «Бессмертного полка», оказавшегося необходимым для миллионов жителей разных уголков нашей необъятной Родины.

«ВЭ» В 1995 году, накануне 50-летия Победы я спросил студентов-технологов: «Кто победил во Второй мировой войне?» И они мне дружно ответили : «США». А на свой следующий вопрос «Кто победил в Великой Отечественной войне?», уже получил нечто неуверенно-вопросительное: «США?». Какие выводы Вы можете сделать о том, как страна отметила 70-летие Победы?

О.Н.Д. В 90-е годы в России были силы, которые стремились сделать всё возможное для уничтожения нашей исторической памяти, нашего патриотизма. Как бывший музейный сотрудник с тридцатилетним стажем работы могу сказать, что в музейной деятельности денежные гранты выдавались в подавляющем большинстве случаев на проекты, способствующие разъединению нашей страны, вроде бы направленные на рост национального самосознания различных народностей, а на самом деле, с прицелом на разжигание национальной розни. Стремилась уничтожить у россиян гордость за свою страну. Но были в нашей истории святые, объединявшие всех россиян события: победа над фашистской Германией в Великой Отечественной войне и над милитаристской Японией во Второй мировой войне, а также первый полёт человека, советского космонавта Ю.А. Гагарина, в космос. Поэтому замахнулись и на них. На американские деньги недобросовестными, я бы сказала, продажными историками писались школьные учебники, в которых выпячивалась роль США и не признавался основной вклад СССР в победу во Второй мировой войне. С экранов телевизоров, из радиоэфира, книг, газет и журналов на подростков обрушивался шквал информации антироссийской направленности. В последнее время заговорили об информационной войне, но она открыто велась с середины восьмидесятых годов прошлого века.

Но, как когда-то большевики пытались искоренить православие, а вера, несмотря на официальные гонения, передавалась из поколения в поколение, так же, судя по всему, в наших семьях передавалась информация, возможно даже на генетическом уровне, о самой страшной войне в истории человечества. Отсюда и такой небывалый всплеск патриотизма в стране в год 70-летия Победы. Честные, порядочные люди устали от фальши, двойных стандартов. Участвуя в акции «Бессмертный полк», многие не только отдавали дань памяти своим отцам и дедам, отстаившим наше право на жизнь, но и выражали протест против возрождающегося фашизма. Неслучайно грудь практически всех участников шествия украшали георгиевские ленточки, так ненавидимые оголтелыми бандеровцами. Полмиллиона георгиевских ленточек на Тверской и Красной площади как будто взывали: «Вставай, страна огромная! Вставай на смертный бой с фашистской силой тёмною, с проклятою ордой»!

«ВЭ» Пока отец был жив, мы с ним часто езжали на 9 мая в Волгоград. Под-

нимались на Мамаев курган, а потом долго сидели среди других на склоне кургана. Все молча смотрели на Волгу...

Ольга Николаевна, как Вы думаете, как будут праздновать новые поколения День Победы? Будут ли слёзы на глазах?

О.Н.Д. Это зависит, по-моему, от современного поколения, от того, какую информацию передаст уже оно своим детям и внукам. Меня очень порадовало, что на акцию откликнулось большое количество молодёжи. Примером для подражания должны стать родители, которые участвовали в шествии вместе с маленькими детьми. Некоторые из малышей преодолели неблизкий путь, восседая на родительских плечах. Думаю, то, что они видели в этот день, навеки останется в их памяти. И спустя годы они будут рассказывать об этом уже своим детям, внукам и правнукам, а 9 мая пойдут с ними и портретами прапрадедушек и прапрабабушек по центральным улицам и площадям свободной, независимой, гордой России.

«ВЭ» Спасибо, Ольга Николаевна.



МАРКОВ АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ



Марков Алексей Иванович родился в 1923 г. в городе Дзержинске Нижегородской области. Профессор Московского авиационного института имени Серго Орджоникидзе. Доктор технических наук, профессор. Один из основоположников ультразвуковой размерной обработки. Основатель научного направления «Комбинированная обработка материалов резанием с воздействием ультразвука малой амплитуды». Автор ставшей классической монографии «Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов».

С Алексеем Ивановичем Марковым я познакомился в 1981 году в Москве на конференции по ультразвуковой технике. Я тогда работал инженером в лаборатории электрофизических технологий Научно-исследовательского технологического института. К этому времени под руководством А.И. Маркова защитили кандидатские диссертации начальник нашей лаборатории Евгений Петрович Калинин и мой наставник, ведущий технолог Александр Андреевич Горбунов. В лаборатории решили послать меня на конференцию с сообщением о наших разработках ультразвукового оборудования, порекомендовали встретиться с Алексеем Ивановичем и обсудить наши задачи.

Во время перерыва я увидел высокого худощавого пожилого человека с высоко поднятой головой, и как-то сразу понял, что это – он. Надо сказать, в то время у нас отношение к профессорам, было трепетно почтительным, и я очень удивился тому, что этот человек, идя по проходу конференц-зала, не просто ответил на приветствие, но остановился поговорить. Меня поразила простота общения без всяких академических премудростей. Эта простота и интеллигентность с тех пор постоянно поражали меня во время наших последующих частых встреч не только на кафедре, но и у него дома.

Результатом той командировки стало приглашение поступить в заочную аспирантуру факультета авиационных двигателей МАИ, на одной из кафедр которого работал Алексей Иванович. Именно А.И. Марков сформировал мое последующее отношение к науке, производству, благодаря чему я впоследствии стал начальником лаборатории, в которой начинал трудовую деятельность, стал доктором технических наук и заведующим кафедрой в Саратовском государственном техническом университете.

А тогда, вернувшись в Саратов, я доложил об итогах поездки и получил рекомендацию для поступления в заочную аспирантуру. Надо сказать, что заместитель начальника института по научной работе д.т.н. Виктор Алексеевич Бербер всячески поддерживал молодых специалистов, обучающихся в аспирантуре, требовал выполнения плана исследований и сроков защиты.

В аспирантуре пришлось сдавать кандидатские экзамены по технологии авиационных двигателей и по процессам механической и физико-химической обработки. Здесь неоценимую помощь оказал А.И. Марков. Он снабдил меня книгами и статьями по авиадвигателям из своей библиотеки, дал много советов. А мое знакомство с факультетом он начал с экскурсии в музей авиационных и ракетных дви-

гателей. Больше всего на меня произвели впечатление самый мощный в мире последний поршневой двухвальный авиационный мотор к дальнему бомбардировщику и «колокола» камер сгорания ракетных двигателей от гигантов, высотой под три метра до маневровых размерами со спичечный коробок или зажигалку.

Насколько Алексей Иванович был прост в общении, настолько же был дотошен во всем, что касалось исследований и интерпретации их результатов. Не единожды, привезя к нему графики и фотографии, я затем многократно переделывал описание и обоснование полученных данных, поскольку он требовал максимальной достоверности и ясности. В то же время он всегда давал дельные советы, как выйти из сложной ситуации. Помню, как-то уже на завершающем этапе работы я приехал к нему домой и пожаловался, что никак не получается сколько-нибудь серьезная теоретическая часть. На это Алексей Иванович ответил: «Вы работаете в отраслевом институте, связаны с заводами. У Вас уникальные возможности по постановке экспериментов, моделированию и промышленной апробации, которых нет у нас в МАИ и других вузах. Вы можете создавать новое оборудование. Это Ваша основная задача в отличие от очных аспирантов. Занимайтесь этим. Решайте эти задачи и не волнуйтесь». Тогда эти слова прибавили мне уверенности и сил. Алексей Иванович давал не только научные советы, но и всегда был готов придать уверенность и успокоить. Как-то раз во время предзащи-

ты на кафедре мне пришлось очень нелегко: каверзные вопросы сыпались один за другим, много было весьма ядовитых выступлений. Но Алексей Иванович после заседания подошел ко мне, похлопал по плечу и сказал: «Не волнуйтесь. Все будет хорошо. Просто некоторые на кафедре хотят цапнуть меня». И действительно, меня допустили до защиты. А уже незадолго до самой защиты Алексей Иванович мне написал, что желательно привезти на заседание совета стенд с образцами деталей и инструментов для ультразвуковой обработки отверстий. «Ведь Вы будете защищаться не где-нибудь а в МАИ» - сказал он. Пришлось повозиться.

Хотелось бы отметить бескорыстие Алексея Ивановича. Когда после защиты я хотел подарить ему саратовские сувениры, то увидел, каким он может быть жестким и резким. Уже много позднее, когда я готовился защищать докторскую диссертацию в СГТУ, будучи в командировке в Москве, я заехал к нему домой. Он за несколько дней прочитал все без малого 500 страниц, сделал пометки, дал рекомендации и порекомендовал оппонента в МГТУ «СТАНКИН». Так Алексей Иванович стал еще и «крестным отцом» моей докторской диссертации.

Алексей Иванович Марков без сомнения – яркий представитель старшего поколения отечественных ученых, которым мы обязаны всем, чего достигли, и на которых должны равняться.

*Н.В. Бекренев, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой «Техническая механика и
детали машин» СГТУ имени Гагарина Ю.А.*

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

В разделе «Летопись» можно опубликовать воспоминания, рассказ, информацию об ученых, преподавателях, представителях промышленности, бизнеса, работающих в области электротехнологии.

ЛАБОРАТОРИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ БИЙСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА



Для развития и распространения ультразвуковых технологий 24 мая 1994 года в Бийском технологическом институте была создана научно-исследовательская лаборатория акустических процессов и аппаратов. Руководство лабораторией было поручено доктору технических наук, профессору Хмелеву В.Н.

В состав лаборатории были объединены сотрудники Бийского технологического института, ФГУП ФНПЦ «Алтай» (ныне ОАО ФНПЦ «Алтай»), НПАП «Алтаймедприбор», работавшие над проблемами применения ультразвуковых колебаний, в том числе в медицине.

Основная деятельность лаборатории направлена на применении существующих

и создании новых ультразвуковых технологий для современных производств и потребителей.

Развитие технологий и оборудования осуществляется за счет разработки и создания новых схемных и конструктивных решений генераторов электрических колебаний ультразвуковой частоты, ультразвуковых колебательных систем, рабочих инструментов, создания серий многофункциональных и специализированных аппаратов.

Применение технологий направлено на удовлетворение потребности современных производств. Разрабатываются методические рекомендации по использованию ультразвуковых технологий в условиях малых и средних производств, сельского хозяй-

ства, бытового обслуживания и при индивидуальном применении в домашнем хозяйстве.

Коллектив лаборатории успешно сотрудничает как с российскими фирмами и академическими институтами, так и принимает участие в международных проектах с фирмами Германии, Кореи, Норвегии, Украины, Казахстана, Белоруссии.

Передовые разработки позволили коллективу лаборатории получить ряд премий и наград, таких как премия Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых (2005 г.), премия Алтайского края в области науки и техники (2004, 2009, 2011, 2012 г.).

В 2005 году на базе лаборатории для коммерциализации научных разработок было создано ООО «Центр ультразвуковых технологий».

Помимо научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы материально-техническая база лаборатории используется в учебном процессе Бийского технологического института. В лаборато-

рии проводятся практические и лабораторные занятия по курсам «Ультразвуковые технологии», «Электроника в приборостроении», «Акустоэлектроника», «Применение микропроцессоров в технике и технологиях», «Программное обеспечение измерительных процессов», «Методы и средства измерений» и «Аппаратные интерфейсы информационных систем».

Ежегодно на базе лаборатории успешно защищаются 10-15 дипломных работ, посвященных различным аспектам разработки и использования ультразвуковых технологий и реализующих их аппаратов.

На сегодняшний день коллектив лаборатории акустических процессов и аппаратов – молодой, динамично развивающийся коллектив, в составе которого 2 доктора технических наук, 10 кандидатов технических наук и более 20 высококвалифицированных инженеров, способных решать широкий круг задач, связанных с ультразвуковыми технологиями и оборудованием для его реализации.



КОНЮШКОВ ГЕННАДИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ



Доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка и металлургия», Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный изобретатель СССР, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, член немецкого сварочного общества DVS, лауреат ряда Всесоюзных конкурсов на лучшую научную работу, эксперт Национального агентства контроля и сварки НАКС, руководитель Средне-Волжского головного аттестационного центра НАКС, лауреат Премии имени Якова Гальперина, академик Международной академии энергоинформационных наук и президент Поволжского отделения Международной академии энергоинформационных наук, Ветеран труда, мастер спорта СССР по гребле на каноэ.

Конюшков Г.В. – известный ученый с мировым именем в области соединения материалов способом диффузионной сварки. В июне 2015 года исполняется год со дня смерти Геннадия Владимировича Конюшкова. Это важная дата для его учеников, сотрудников кафедры «Сварка и металлургия» ИнЭТМ СГТУ имени Гагарина Ю.А. и для тех специалистов, кто развивает его тематику научных исследований. Для всех нас важны и личность Геннадия Владимировича, и построенное им здание теории и технологии диффузионной сварки. Важны многие вопросы технологии решения сложных научно-технических задач в области сварочного производства.

Геннадий Владимирович в 1960 году с отличием закончил Саратовский автомобильно-дорожный институт. С 1964 года работал в Саратовском политехническом институте. В 1969 году защитил кандидатскую диссертацию в МВТУ им. Э.Н. Баумана, а в 1980 году – докторскую диссертацию в ЛЭТИ имени В.И. Ульянова (Ленина). С 1979 по 2013 год являлся заведующим кафедрой «Полупроводниковое и электровакуумное машиностроение» (переименованной в «Электронное машино-

строение», потом в «Электронное машиностроение и сварка»). В 1998 году Конюшкову Г.В. присвоено звание «Заслуженный деятель науки РФ».

Геннадий Владимирович создал научную школу в области диффузионной сварки, являясь учеником профессора Николая Федотовича Казакова, создателя диффузионной сварки. Подготовил 3 докторов и 19 кандидатов технических наук; создал учебно-научную лабораторию вакуумно-сварочной техники и в 2014 году под его руководством в СГТУ была открыта специальность «Оборудование и технология сварочного производства».

Геннадий Владимирович Конюшков создал Средне-Волжский головной аттестационный центр НАКС и был его бесменным руководителем.

Геннадий Владимирович, обладая трудолюбием, добротой и высоким профессионализмом, посвятил всю свою жизнь российской науке.

В своих работах Геннадий Владимирович все время был нацелен не на абстрактные проблемы, а на оптимальную реализацию той или иной технической задачи. Именно это делает результаты его работ неуязвимыми на протяжении последующих лет.

*Кандидат технических наук,
доцент кафедры СМ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Котина Н.М.*

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Приглашаем к сотрудничеству ученых, преподавателей, сотрудников научных коллективов кафедр и лабораторий вузов, научно-исследовательских институтов, аспирантов, студентов, руководителей промышленных предприятий, разработчиков новой продукции, инвесторов, представителей органов власти.

По вопросам публикации статей в научно-техническом журнале «Вопросы электротехнологии» обращаться по телефонам:

8(8452)99-87-63 — Архангельский Юрий Сергеевич (главный редактор),

8(8452)99-87-21 — Алексеев Вадим Сергеевич (ответственный секретарь).

Просьба направлять публикации по адресу:

Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, ком. 1/133а, гл. редактору журнала «Вопросы электротехнологии» Архангельскому Ю.С. и по электронной почте aeu@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.

Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0** и иметь нумерацию.

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 естественнонаучных 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.

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка – В.И. Ермолаев, Ю.Л. Жупилова
Перевод на английский язык – А.Х. Аскарова

Почтовый адрес: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Подписано в печать __.__.2015
Формат 60×84 1/8 Бум. офсет.
Усл. печ. л. 11,5 Уч. изд. л. 5,1
Тираж 500 экз. Заказ 121 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 2015 г.)
Свидетельство о регистрации СМИ *ПИ № ФС77-54621 от 01.07.2013*

Editor L.A. Skvortsova
Computer-assisted layout by V.I. Ermolaev, Yu.L. Zhupilova
Translation into English by A.H. Askarova

Address: 77 Politekhnikeskaya Str., 410054, Saratov, Russia
Tel.: (845-2) 99-87-63
E-mail: aeu@sstu.ru

Print date: __.__.2015
Paper size: 60×84 1/8 Offset-Print
Conventional printed sheet 11,5 Publication base sheet 5,1
Circulation: 500 printed copies Order 121 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*

Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова



В середине прошлого столетия в г. Бийске были созданы крупные промышленные предприятия. Возникла потребность в инженерных кадрах. В городе был открыт вечерний факультет Алтайского политехнического института им. И.И. Ползунова. В 1959 году произошел первый набор студентов.

Сегодня Бийский технологический институт (БТИ) – современное инновационное высшее учебное заведение, имеющее шесть факультетов.

В 2014 г. в БТИ создан Инженерный специальный факультет.

Институт является основным техническим вузом наукограда Бийска, готовящим специалистов в областях машиностроения и приборостроения, техники, технологий, химической и биотехнологий, пищевой инженерии, информационных технологий, товароведения, коммерции и торговли, транспорта, строительства, экономики.

Институт тесно сотрудничает с предприятиями наукограда и Алтайского края, входит в состав краевого биофармацевтического кластера, участвует в образовательной программе РОСНАНО развития кадрового потенциала компаний, занятых производством полимерных энергонасыщенных и нанокompозитных материалов, создает новые материалы и пищевые продукты, программные продукты и экономические разработки, электронные и ультразвуковые устройства.

Достижения сотрудников получили высокую оценку государственных и общественных структур в виде премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых, премий Алтайского края в области науки и техники, гранта Президента РФ по поддержке научных школ, грантов Президента РФ по поддержке молодых ученых, ряда медалей Международных выставок и дипломов конференций различного уровня.

Научная и инновационная деятельность преподавателей, сотрудников и студентов института реализуется через государственные контракты в рамках ФЦП «Кадры», гранты РФФИ и РГНФ, Федеральные программы «СТАРТ», «УМНИК».

Научные разработки сотрудников реализуются в 11 малых инновационных предприятиях.

БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова включен в реестр образовательных организаций, готовящих специалистов для авиационной промышленности.