

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ЛНР

**ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени ВЛАДИМИРА ДАЛЯ**

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И
ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ
МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
№1 (18) 2017**

Луганск 2017

Сборник включен в Перечень научных специализированных изданий ЛНР
Свидетельство о регистрации: серия МИ-СГР ПИ 000068 от 30.03.2016 г.

Рекомендовано к печати Ученым советом Луганского национального
университета имени Владимира Даля (Протокол № 3 от 25.11.2016 г.).

Сборник имеет Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Редакционная коллегия:

Редакционная коллегия: Рябичева Л.А., д-р техн. наук, проф. (председатель редакционной коллегии), (ЛНУ им. В. Даля); Гутько Ю.И., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Яковченко А.В., д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк); Гедрович А.И., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Гальцов И.А., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Витренко В.А., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Мирошников В.В., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Половинка Д.В., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Шатова Н.А., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Алимов В.И., д-р техн. наук, проф. (ДонНТУ, г. Донецк); Егоров С.Н., д-р техн. наук, проф. (ЮРГПУ им. М.И. Платова, Россия); Скориков А.В., д-р техн. наук, проф. (ЮРГПУ им. М.И. Платова, Россия); Ефремов А.Н., д-р техн. наук, проф. (ДонНАСА, г. Макеевка); Назарова А.В., к-т техн. наук, доц. (ЛНАУ); Дейнека И.Г., д-р техн. наук, проф. (ЛНУ им. В. Даля); Малов В.А., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля); Никитин Ю.Н., к-т техн. наук, доц. (ЛНУ им. В. Даля).

Ответственный за выпуск: д-р техн. наук, проф. Рябичева Л.А.

Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении: Сб. науч. тр. – Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. – 154 с.

ISSN 2218-1806

Статьи сборника посвящены результатам теоретических и экспериментальных исследований в области обработки давлением и материаловедения, литья, резания. Рассмотрены вопросы фундаментальных и прикладных исследований, использования новых материалов, методов повышения качества изделий, новых технологий изготовления изделий и усовершенствования технологического оснащения и узлов машин.

Предназначен для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов.

Материалы печатаются на языке оригинала.

Статьи прорецензированы членами редакционной коллегии.

ISSN 2218-1806

© Луганский национальный университет имени Владимира Даля, 2017.

© Vladimir Dahl Lugansk National University, 2017.

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF LPR
VLADIMIR DAHL LUGANSK NATIONAL UNIVERSITY**

**RESOURCE-SAVING
TECHNOLOGIES OF PRODUCTION AND
FORMING MATERIALS IN MECHANICAL
ENGINEERING**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS
№1 (18) 2017**

Lugansk 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- Хаустова А.В., Солодовник М.Д., Кузнецова М.Н.**..... 11
ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА КАЧЕСТВО
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ
- Витренко В.А., Макухин А.Г., Синдеева Е.В.**..... 17
ОПТИМИЗАЦИЯ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА МЕТОДОМ
ЛП-ПОИСКА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РАСЧЕТНЫХ СИСТЕМ
- Солодовник М.Д, Волков И.В., Кузнецова М.Н., Ясуник С.Н.** 24
ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА И УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В ГАЗОАБРАЗИВНЫХ ПОТОКАХ
- Аветисов Р.А.**..... 31
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АЛМАЗНОГО ОТРЕЗНОГО КРУГА
ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАТЯЖЕНИИ
- Коваленко А.А., Гусенцова Я.А., Чубарова И.А.,
Андрійчук Н. Д., Пилавов М.В.**..... 41
ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
- Брешев В.Е.**..... 48
АСПЕКТЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ
ПРИВодОВ БЕСКОНТАКТНОГО ТИПА

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

- Савицкий И.В., Войтенко В.А.** 57
СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТОНКИХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ,
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ ПРОВОДЯЩИХ
ПЛЕНОК
- Войтенко В.А., Войтенко Г.О.**..... 65
ПОРТАТИВНЫЙ ОЗОНОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА

Войтенко Г.О.	73
РАЗРАБОТКА ФОТОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ	

Металлургия и материаловедение

Дубасов В.М., Могильная Е.П., Шегилова А.А.	81
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОТЖИГА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ЛИТОГО ВАЛКА ИСПОЛНЕНИЯ СШХН-48	

Войтенко В.В., Соколов И.А., Савицкий И.В.	87
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ	

Луцкий Д.В., Волошин А.Д.	96
ИЗМЕРЕНИЕ Э.Д.С. ХОЛЛА И РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МОНОКРИСТАЛЛАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ Sb-VI	

Рябичева Л.А., Нагорный Е.В., Рябов И.А.	102
ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ ДИФФУЗИИ В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ	

Строительство и архитектура

Дубасов В.М., Дубасов А.В., Радченко С.Е.	111
АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИТЫХ И САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	

Гусенцова Я.А., Приколотина К.К.	122
РЕГУЛЯТОРЫ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК	

**Безопасность жизнедеятельности человека.
Национальная безопасность**

Малов В.А., Медяник В.А., Житная С.В.	131
ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПОРТНОГО ТЕПЛОВОЗА ТЭ114И (DEM 2800)	
Сало В.И., Пронина Ю.Г.	137
АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРО- И ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ	
Друзь О.Н.	145
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТОЛБА ДЫМА ПРИ ДУГОВЫХ СПОСОБАХ СВАРКИ	
Требования к оформлению статей	151

CONTENTS

Mechanical engineering and engineering science

Khaustova A.V., Solodovnik M.D., Kuznetsova M.N.	11
INFLUENCE OF THE VIBRATION PHENOMENA ON QUALITY PRODUCTION OF DETAILS ON MACHINES	
Vitrenko V.A., Makukhin A.G., Sineeve E.V.	17
OPTIMIZATION METHOD SPINDLE UNIT LP-BASED SEARCH USE SETTLEMENT SYSTEMS	
Solodovnyk M.D., Volkov I.V., Kuznetsova M.N., Yasunik S.N.	24
NEW METHOD AND DEVICE FOR TREATMENT OF PARTS IN GAS-ABRASIVE FLOWS FEASIBILITY	
Avetisov R.A.	31
DISPLACEMENT FIELD OF DIAMOND CUTTING DISCS WITH UNEVEN TENSION	
Kovalenko A.A., Gusentsova J.A., Chubarova I.A., Andriychuk N.D, Pilavov M.V.	41
BOUNDARY CONDITIONS IN THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PUMPING UNIT OF HYDRAULIC EQUIPMENT	
Breshev V.E.	48
STRUCTURAL SYNTHESIS OF ENERGY SAVING NON-CONTACT DRIVES ASPECTS	

Instrument making, metrology and information and measuring devices and systems

Savitsky I.V., Voytenko V.A.	57
METHOD OF OBTAINING THE CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE THIN MONOCRYSTALLINE, POLYCRYSTALLINE AND AMORPHOUS CONDUCTIVE FILM	
Voytenko V.A., Voytenko G.O.	65
PORTABLE OZONOMETER FOR MEASUREMENTS OF THE CONCENTRATIONS OF OZONE	

Voytenko G.O.	73
DEVELOPMENT OF PHOTOMETER FOR MEASUREMENTS OF THE CONCENTRATIONS OF AEROSOL	

Metallurgy and materials science

Dubasov V.M., Mogilnaja H.P., Shetilova H.A.	81
INFLUENCE OF MODE OF ANNEALING ON MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE CAST ROLLER EXECUTIONS OF CSHXN-48	
Voytenko V.V., Sokolov I.A., Savitsky I.V.	87
INVESTIGATION OF THE PROCESS POLYMERIZATION OF COMPOSITE MATERIAL BY MEASUREMENT OF ITS DIELECTRIC PERMITTIVITY	
Lutskiy D.V., Voloshin A.D.	96
THE HALL VOLTAGE MEASUREMENT AND CALCULATE THE CONCENTRATION AND MOBILITY OF CHARGE CARRIERS IN SINGLE CRYSTALS OF SOLID SOLUTIONS SB-BI	
Ryabicheva L.A., Nagorniy E.V., Ryabov I.A.	102
INFLUENCE OF SPEED DEFORMATION ON PROCESSES OF DIFFUSION IN POWDER MATERIALS	

Construction and architecture

Dubasov V. M., Dubasov And. V., Radchenko S. E.	111
ANALYSIS OF THE USE OF THE CAST AND SELF-COMPACTING CONCRETE IN CONSTRUCTION	
Gusentsova J.A., Prikolotina K.K.	122
FUZZY LOGIC TEMPERATURE CONTROLLERS FOR THE SYSTEMS OF HEAT GENERATION INSTALLATION	

Health and safety of the person. National security

Malov V.A., Medyanik V.A., Zhytnaya S.V.	131
STUDY OF ACOUSTIC PERFORMANCE EXPORT LOCOMOTIVE ТЭ114И (DEM 2800)	
Salo V.I., Pronina Y.G.	137
ANALYSIS OF REGULATORY DOCUMENTS IN THE FIELD OF ELECTRICAL AND FIRE SAFETY	
Druz O.N.	145
MATHEMATICAL MODELLING OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE COLUMN OF THE SMOKE AT ARC WAYS OF WELDING	
Requirements to execution of articles	151

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

УДК 681.3.06

Хаустова А.В., Солодовник М.Д., Кузнецова М.Н.

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА СТАНКАХ

Khaustova A.V., Solodovnik M.D., Kuznetsova M.N.

INFLUENCE OF THE VIBRATION PHENOMENA ON QUALITY PRODUCTION OF DETAILS ON MACHINES

Исследован динамический процесс изготовления длинномерных цилиндрических деталей. Предложена математическая модель по определению деформационных и частотных характеристик, влияющих на точность изготовления деталей, а также приведены недопустимые значения технологических режимов в процессе металлообработки. Данная модель дает оценку минимизации геометрических погрешностей готовой продукции. Получены разрешающие уравнения для численной реализации по определению частотных и деформационных характеристик обрабатываемой детали.

Ключевые слова: исходное уравнение, эквивалентная разрешающая система, аналитическое решение, обоснование достоверности, амплитудные и резонансные оценки, недопустимые режимы обработки

Введение

В современном машиностроении основной является проблема качества продукции. Несмотря на значительные успехи, еще остро стоит вопрос дальнейшего совершенствования машин, увеличения их мощности и производительности, а также точности и длительного сохранения в процессе эксплуатации. Повышение точности механической обработки деталей на металлорежущих станках способствует улучшению эксплуатационных свойств машин и механизмов.

Достижения в исследованиях ученых в вопросах повышения производительности и точности обработки резанием, а также результаты промышленного их использования показывают, что основными направлениями интенсификации процессов резания являются: увеличение жесткости технологической системы и точности изготовления их элементов; выбор технологических режимов и условий протекания процесса, которые обес-

печивают заданную точность; создание систем автоматического управления точностью обработки.

Известно, что на точность изготовления деталей, к примеру, на токарных станках, влияет множество факторов, включая возникновение колебаний, как от источника внешних вибрационных явлений, так и от всего металлообрабатывающего агрегата [1].

Данный вопрос рассматривался в инженерно-технических кругах. Открываются новые производства, растет номенклатура изделий и повышаются требования к готовой продукции. Аналитики применяют новые физико-математические модели и получают, не часто, но более уточненные решения. При этом вопросы качества и, в частности, вопросы точности изготовления изделий остаются на первом плане. В предлагаемой статье дается ответ на вопрос – как повысить точность изготовления длинномерных изделий? Это касается токарной обработки заготовок для прокатных валков, для судовых гребных винтов, компрессорно-турбинных валов авиационных двигателей и т.д.

Новизной настоящей статьи является предложение уточненной математической модели, отличающейся, как следует из обзора литературы [1-3], исходным уравнением математической физики и его сведением к двум обыкновенным дифференциальным уравнениям, решение которых легко поддается аналитическому анализу и реализации на ЭВМ.

Целью работы является изучение динамического процесса изготовления длинномерных цилиндрических деталей, в данном случае, на токарных станках.

Методика исследования

В настоящей статье предложена одна из возможных математических моделей, описывающая изготовление и дающая оценку минимизации геометрических погрешностей готовой продукции. На рис. 1 приведена расчётная схема определяющих усилий, действующих на обрабатываемую деталь.

Следуя [2] соответствующее разрешающее уравнение колебаний оси вала представим в виде:

$$EJ \frac{\partial^4 Z}{\partial x^4} + F \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + M \frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = P(t) \quad (1)$$

где EJ – изгибная жёсткость вала;

F – сила зажима;

M – масса вала;

$$M = \pi r^2 l \rho ,$$

где r и l – радиус и длина заготовки соответственно;
 ρ – плотность.

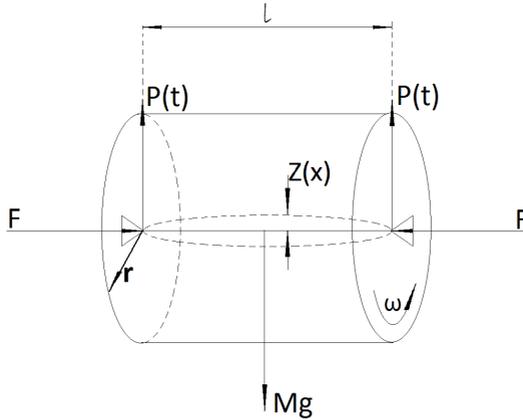


Рис.1. Расчетная схема результирующих силовых воздействий

Ввиду возможного разделения переменных запишем динамический прогиб оси в виде произведения:

$$Z(z, t) = Z(z)Z(t) . \quad (2)$$

Тогда уравнение в частных производных (1) эквивалентно двум обыкновенным дифференциальным уравнениям:

$$\begin{cases} EJ \frac{d^4 Z(x)}{dx^4} + F \frac{d^2 Z(x)}{dx^2} + MZ(x) = 0 \\ M \frac{d^2 Z(t)}{dt^2} = P(t) \end{cases} . \quad (3)$$

В качестве граничных условий для первого уравнения системы (3) необходимо взять:

$$\begin{aligned} Z(0) = Z(l) = 0 \\ Z''(0) = Z''(l) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

(отсутствие прогиба и изгибающего момента в точках крепления заготовки).

Для второго уравнения начальные условия выбираются по принятой схеме в курсах теории колебаний [3] и взяты в виде:

$$\begin{aligned} Z(0) &= 0 \\ \dot{Z}(0) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

а его решение, как хрестоматийного уравнения, трудностей не представляет.

Собственные формы колебаний, вытекающих из первого уравнения системы (3), как известно, зависят от решения соответствующего характеристического уравнения вида:

$$a\lambda^4 + b\lambda^2 + c = 0, \quad (6)$$

корни которого при отсутствии кубического слагаемого легко определяются. Если обозначить частоту вынужденных колебаний от силы $P(t)$ через p , а через α – параметр, определяющий собственные формы колебаний, вследствие сжимающей силы F , то при условии:

$$p = \alpha \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

для первого частного приближения представление решения уравнения (1) в виде (2) является обоснованным для конкретно рассматриваемой задачи.

Для достижения требуемой точности общего решения уравнения (1), очевидно, надо представить его в виде знакопеременного по косинусам и синусам ряда:

$$\begin{aligned} Z(x,t) &= \sum_0^n Z_n \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} a_n x \cdot Z_n \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} p_n t \\ a_n &= \frac{n\pi}{l}; \quad p_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

Входящие в (8) произвольные постоянные интегрирования определяются из граничных и начальных условий (4) и (5). Очевидно, что увеличение сжимающей силы F , ослабляет жёсткость детали, увеличивает

амплитуду результирующих колебаний, вытекающих из решения (8).

Результаты исследований

В статье определена допустимая технологическая угловая скорость вращения заготовки, которая из (8) равна:

$$\omega_{\text{дон}} \leq \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\pi r^2 M}} c^{-1}. \quad (9)$$

Эта формула свидетельствует о том, что при приближении ω к $\omega_{\text{дон}}$ будет резко увеличиваться динамическая амплитуда колебаний, а это существенно влияет на точность готовой продукции.

Предложенная математическая модель увязывает взаимовлияние внешних вибрационных и силовых воздействий и силы зажима обрабатываемой детали со скоростными режимами обработки, что в конечном итоге, позволяет оптимизировать процесс получения готовой продукции.

Полученный нами результат дает ответ на допустимые режимы обработки этих изделий. Естественно, что обрабатываемый вал кроме вращательного движения совершает поперечные колебания с определенной частотой и амплитудой. Известные явления биения (резонанса) и колебательные движения станков в целом свидетельствуют о недопустимых режимах, которые в основном являются причиной снижения точности готовой продукции. В нашем случае максимальное отклонение от нормативных размеров достигается в середине пролета для низкооборотных валов, например, изготавливаемых на Лутугинском заводе прокатных валков, с которым мы сотрудничаем в научно-техническом направлении. Для высокооборотных изделий, когда спектр амплитуд и частот чрезвычайно широк, амплитуда определяется из хрестоматийного первого статического уравнения системы (3) и общим выражением (8). А допустимая угловая скорость определяется формулой (9), значение которой должно заноситься в технологическую карту (дорожная карта) изготовления изделий и, естественно, ее надо использовать при составлении программ для ЧПУ.

Выводы

Получены разрешающие уравнения для численной реализации по определению частотных и деформационных характеристик обрабатываемой детали, а также приведено технологическое значение допустимой угловой скорости вращения в процессе ее изготовления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зазерский Е.Н., Жолнерчик С.И. Технология обработки деталей на станках с программным управлением.: Л.: Машиностроение, 1985. 208 с.
2. Михайлов В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных. М.: Наука, 1976. 391 с.
3. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959. 439 с.

Khaustova A.V., Solodovnik M. D., Kuznetsova M. N. Influence vibration phenomena on the quality of manufacturing parts for machine tools.

Dynamic process of long-sized cylindrical details production has been investigated. Mathematic model to estimate deformation and frequency characteristics affecting the accuracy of detail production has been offered. A list of invalid values of technological modes in the process of metalworking has been presented. The given model estimates finished goods geometrical errors minimization. Numerical implementation equations aimed at estimation of frequency and deformation characteristics of a detail being treated have been obtained.

Keywords: *the original equation, equivalent resolution system, analytical solution, validation, amplitude and resonance evaluation, invalid processing modes.*

Хаустова Анжела Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: совершенствование технологических вопросов в машиностроении.

Солодовник Михаил Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: аналитические вопросы в технологии машиностроения.

Кузнецова Марина Николаевна – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: прикладные вопросы в технологии машиностроения.

e-mail: kuz_mari@rambler.ru

Khaustova Anzhela – candidate of technical Sciences, associate Professor Department of manufacturing engineering and engineering consultancy, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: technical issues in mechanical engineering.

Solodovnik Mikhail – candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor of the Department of manufacturing engineering and engineering consulting, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: analytical issues in engineering technology.

Kuznetsova Marina – senior lecturer of the Department of manufacturing engineering and engineering consulting, Vladimir Dahl Lugansk National University, c.

Lugansk. Scientific interest: applied problems in engineering technology.

e-mail: kuz_mari@rambler.ru

Статья поступила

13 февраля 2017 г.

© Хаустова А.В., Солодовник М.Д., Кузнецова М.Н., 2017

УДК 621.9.06

Витренко В.А., Макухин А.Г., Синдеева Е.В.

ОПТИМИЗАЦИЯ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА МЕТОДОМ ЛП-ПОИСКА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ СИСТЕМ

Vitrenko V.A., Makukhin A.G., Sindeeva E.V.

OPTIMIZATION METHOD SPINDLE UNIT LP-BASED SEARCH USE SETTLEMENT SYSTEMS

Приведен пример решения задачи оптимизации одного из вариантов шпиндельного узла обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4 на основе ЛП-поиска. Расчет проводится с помощью математического программного пакета Mathcad15. В качестве оптимизируемых переменных были приняты диаметр шпинделя, межопорное расстояние, расстояние между подшипниками в передней и задней опорах. Показано как зависит номер варианта и расстояние между спаренными подшипниками в передней и задней опорах шпиндельного узла.

Ключевые слова: оптимизация, ЛП-поиск, шпиндельный узел, критерий, таблица испытаний.

Введение

Типовые конструкции шпиндельных узлов в настоящее время достаточно хорошо отработаны и унифицированы. Поэтому на первом этапе проектирования расчеты точностных показателей этих узлов носят сравнительный характер и выполняются с целью выбора их наилучшей схемы, а также типоразмеров опор применительно к типу оборудования и заданному режиму обработки. Следующий этап включает расчетную оценку рабочих характеристик и выполнение оптимизационных расчетов, в процессе которых производится обоснование конструктивных параметров выбранного варианта шпиндельного узла (ШУ).

В работе [1] рассмотрена оптимизация шпиндельного узла многоцелевого станка. Варьируемым параметром являлся диаметр шпинделя на переднем конце (базовое значение $D=86$ мм), а также типы конструкции переднего и заднего подшипника.

В результате проведенного расчёта получено несколько вариантов шпиндельного узла, превосходящих по своим характеристикам базовый.

Каждый из эффективных вариантов превосходит по своим параметрам базовый вариант ШУ. Этот пример достаточно наглядно демонстрирует эффективность метода многокритериальной оптимизации, а также показывает, что оптимизация может производиться не только по количественным характеристикам, но и по качественным.

Универсальным методом, позволяющим просмотреть всё гиперпространство параметров независимо от его свойств, является метод ЛП-поиска [2]. Однако введение ограничений на фазовые координаты проектируемой модели и её отдельные параметры далеко не во всех случаях может быть увязано в условиях, когда речь идёт о задачах оптимального синтеза.

В работе [3] рассмотрена оптимизация шпиндельного узла внутришлифовального станка методом случайного поиска (ЛП-поиска), которая позволила исследовать комплекс частных критериев и выбрать оптимальный вариант решения, но окончательное решение принимает конструктор.

Современные программные расчетные системы позволяют проводить оптимизацию станочных комплексов и станков по большим параметрам, чем это выполнялось методом ЛП-поиска.

Поэтому решение задачи по оптимизации шпиндельного узла обрабатывающего центра выполним методом ЛП-поиска на основе использования пакета прикладных программ КОМПАС-3DV16 и Mathcad15.

Целью работы является решение задачи оптимизации конструкции шпиндельного узла методом ЛП-поиска на основе использования пакета прикладных программ.

Методика исследования

Сложность задачи многокритериальной оптимизации (МКО) напрямую зависит от количества учитываемых критериев и числа оптимизируемых параметров (размерность задачи). Для многокритериальной оптимизации эффективное применение находит метод ЛП-поиск [4]. Достоинства данного метода заключаются в том, что математический аппарат метода ЛП-поиска обеспечивает формирование векторов X_1, X_2, X_n в N точках, равномерно расположенных в пространстве независимых параметров. Другим важным достоинством этого метода является выработанная удобная форма анализа комплекса частных критериев в виде так называемой таблицы испытаний.

Таким образом, общее число испытаний равно N и для каждого из них вычисляют значения всех частных критериев. Каждому критерию в таблице испытаний отведена одна строка, в которой значения этого

критерия располагают в порядке возрастания с указанием номера испытаний.

Конструктивная схема шпиндельного узла обрабатывающего центра модели СФ68ВФ4, используемая для расчетов, представлена на рис. 1.

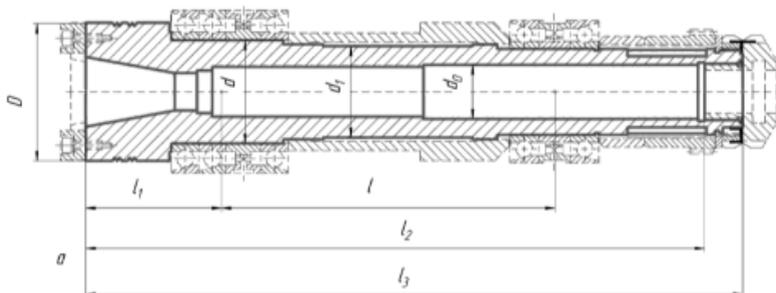


Рис. 1. Конструктивная схема ШУ

Для уменьшения трудоемкости расчета решения данной задачи оптимизации заменяем сдвоенные подшипники одной опорой, переходя к двухопорной расчетной схеме [5].

Данную конструктивную схему рассмотрим, как статически неопределимую балку на четырех опорах (подшипник-опора) (рис. 2).



Рис. 2. Расчетная схема шпиндельного узла

Для решения задачи по оптимизации шпиндельного узла принимаем комплекс частных критериев, используемых при оценке качества работы шпиндельного узла [4]:

1) $y_1(x)$ – упругое радиальное перемещение от единичной силы переднего конца шпинделя, обусловленное податливостью шпинделя и его опор;

2) $y_2(x)$ – максимальный радиус-векторы амплитудной фазо-частотной характеристики (АФЧХ) шпиндельного узла по возмущению от силы резания в радиально направлении на первой собственной частоте .

3) $u_3(x)$ — приведенная нагрузка на переднюю опору шпинделя от единичной силы на его переднем конце.

Базовому варианту шпиндельного узла присваиваем следующие значения составляющих векторов X_0 :

диаметр шпинделя — $D_{ш} = 65$ мм,

межопорное расстояние — $l = 148$ мм,

длина консольной части шпинделя — $l_1 = 68$ мм,

длина фланца — $l_{ф} = 45$ мм,

диаметр фланца — $d_{ф} = 92$ мм,

длина консольной части — $l_{к} = 55$ мм,

расстояние между подшипниками в передней опоре — $l_p = 3$ мм,

расстояние между подшипниками в задней опоре — $l_3 = 3$ мм .

В качестве оптимизируемых переменных принимаем основные конструктивные параметры шпиндельного узла (диаметр шпинделя, межопорное расстояние, расстояние между подшипниками в передней опоре и задней опоре) и накладываем ограничения на оптимизируемые переменные:

$$34 \leq D_{ш} \leq 120$$

$$80 \leq l \leq 250$$

$$0 \leq l_p \leq 30 \quad (\text{мм})$$

$$0 \leq l_3 \leq 60 \quad (\text{мм})$$

В качестве критериальных ограничений принимаем значения частных критериев базового варианта:

$$y_k(x) \leq y_k(x_0), \quad k = 1, 2, 3.$$

Результаты исследований

Результаты расчетов, полученные на основе использования математического программного пакета Mathcad15, представлены в таблице. Каждая строка таблицы соответствует одному из частных критериев, в числителе указан номер i варианта шпиндельного узла (всего было просчитано $N=1 \dots 128$ вариантов), а в знаменателе — нормированное значение частного критерия, соответствующего данному варианту.

Расчеты показали, что сближение подшипников в передней опоре увеличивает ее жесткость, а увеличение l_3 повышает защемляющий эффект задней опоры, что в совокупности с увеличением диаметра межопорной части шпинделя улучшает значение критериев, по оценке качества работы шпиндельного узла.

В таблице приняты следующие обозначения:

Таблица 1

Таблица результатов расчета в программном пакете Mathcad15

$$\Delta = 8.438 \times 10^{-6} \text{ ¶}$$

$$R_{\text{п}} = 1.1957 \text{ ¶}$$

$$A = 8.8363 \times 10^{-5} \text{ ¶}$$

$\Delta s =$		1	2	3	4	5	6	7	¶
	1	87	47	127	79	31	55	103	
	2	1	1.0191	1.0216	1.0221	1.0262	1.0388	...	

$R_{\text{п}} =$		1	2	3	4	5	6	7	8	¶
	1	112	56	25	110	76	42	37	127	
	2	1	1.0717	1.0778	1.0825	1.0843	1.0908	1.0923	...	

$A_s =$		1	2	3	4	5	6	7	¶
	1	87	47	127	79	31	55	103	
	2	1	1.0191	1.0216	1.0221	1.0262	1.0388	...	

На основании этого оптимальным решением по критериям Y_1 , Y_2 и Y_3 , исходя из табл. 1, стали варианты N=25 и 110 для которых и зададим значения управляемых параметров (табл. 2).

Таблица 2

Значения управляемых параметров двух вариантов шпиндельного узла, мм

№ варианта	D_s	L_s	$L_{\text{пс}}$	$L_{\text{зс}}$
25	90.0	489.0625	27.1875	20.625
110	75.0	486.3281	22.2656	22.9688

Зная значения управляемых параметров, проводим построение упруго деформационной модели шпиндельного узла обрабатывающего центра СФ68ВФ4 в программном комплексе КОМПАС-3DV16 с дальнейшим его анализом.

Выводы

1. Оптимизация конструкции шпиндельного узла обрабатывающего центра показала, что на основе прикладных расчетных систем можно использовать метод ЛП-поиска.

2. расчетные системы позволяют эффективно моделировать варианты расположения опор на шпиндельном узле.

3. по результатам оптимизации данной конструкции были выбраны варианты № 25 и 110, где уменьшается размер ℓp и увеличивается размер ℓz .

ЛИТЕРАТУРА

1. Горностаев А.В. Использование качественных характеристик при многокритериальной оптимизации методом ЛП-поиска / Материалы международной конференции «Информационные средства и технологии», секция «Информатизация в МС». Москва, 1999.
2. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учеб пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
3. Пуш В.Э. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов, М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
4. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи принятия решений, М.: Машиностроение, 1978. 320 с.
5. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков, К.: Тэхника. 1975. 136 с.
6. Егоров О.Д., Буйнов М.А. Эволюционный алгоритм многокритериальной оптимизации параметров механизмов мехатронных устройств и роботов // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2015, № 3(34). С. 93-97
7. Грязев М.В., Кузнецова О.А. Оптимизация параметров и синтез закона управления методом ЛПт – поиска и применение принципа динамического расширения-сжатия фазового пространства динамического объекта // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. Вып.2. С. 214-224.
8. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т. [под ред. В.В. Бушуева]. Т. 1. М.: Машиностроение. 2012. 608 с.

Vitrenko V.A., Makukhin A.G., Sindeeva E.V. Optimization method spindle unit LP-based search USE settlement systems

The article provides an example solution of optimization problem one of the variants of spindle unit of the machining center model CФ68ВФ4 based on LP-search. The calculation is carried out using a mathematical software package Mathcad15. Constructive and settlement schemes of shpindelny knot of the processing center of the SF68VF4 model are submitted. In article as the optimized variables the key design data of shpindelny knot have been accepted (diameter of a spindle, interbasic distance, distance between bearings in forward and back support). It is shown as number of option and distance between the coupled bearings in forward and back support of shpindelny knot depends.

Keywords: *optimization, LP-search, shpindelny knot, criterion, table of tests.*

Витренко Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск.

Научные интересы: получение новых характеристик шпиндельных узлов на основе использования метода ЛП-поиска.

e-mail: vitrenko.vl@gmail.com

Макухин Анатолий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Станки, инструменты и инженерная графика» Луганского национального университета имени Владимира Даля, г.Луганск. Научные интересы: получение новых характеристик шпиндельных узлов на основе использования метода ЛП-поиска.

e-mail: siig@i.ua

Синдеева Елена Владимировна – ассистент кафедры станки, инструменты и инженерная графика Луганского национального университета имени Владимира Даля, г.Луганск. Научные интересы: получение новых характеристик шпиндельных узлов на основе использования метода ЛП-поиска.

e-mail: siig@i.ua

Vitrenko Vladimir – D.Sc (Eng), Associate professor, Head of the engineering and engineering technology consulting, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: getting new features spindle units on the basis of the method of LP-search.

Makukhin Anatoly – Ph.D., Associate Professor, Head of the machines, tools and engineering graphics, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: receiving new features spindle units on the basis of the method of LP-search.

Sindeeva Elena – assistant of the department machines, tools and engineering graphics", Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: getting new features spindle units on the basis of the method of LP-search.

Статья поступила

27 февраля 2017 г.

© Витренко В.А., Макухин А.Г., Синдеева Е.В., 2017

УДК 621.9.05-62.525

Солодовник М.Д., Волков И.В., Кузнецова М.Н., Ясуник С.Н.

ОБОСНОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В ГАЗОАБРАЗИВНЫХ ПОТОКАХ

Solodovnyk M.D., Volkov I.V., Kuznetsova M.N., Yasunik S.N.

NEW METHOD AND DEVICE FOR TREATMENT OF PARTS IN GAS-ABRASIVE FLOWS FEASIBILITY

Предложен и аналитически обоснован новый способ отделочно-зачистной обработки деталей с использованием физико-механических свойств двухфазных, соответствующим образом создаваемых и управляемых пространственно-вихревых газоабразивных потоков. При данном способе обработки загруженных в навал мелких деталей в результате соударений абразивных частиц потока с «парящими» деталями происходит интенсивный сьем металла и формообразование нового микрорельефа поверхности. Устройство для реализации предлагаемого способа содержит рабочую камеру с вихревым приспособлением и ресивер, подающий пульсирующий поток воздуха в камеру. Предложены зависимости для определения основных параметров обработки.

Ключевые слова: деталь, отделочно-зачистная обработка, двухфазный состав потока, рабочая камера, вихревое приспособление, ресивер, скорость.

Введение

Как известно, улучшение качества поверхности и эксплуатационных свойств выпускаемых изделий в значительной степени зависит от эффективности отделочно-зачистных операций [1- 3]. Часто на данных операциях применяются методы обработки свободными абразивами, которые обеспечивают требуемые выходные показатели и исключают или значительно уменьшают непроизводительный ручной труд. При этом следует обратить внимание на размер обрабатываемых деталей. Так, детали средних размеров выгодно обрабатывать в вибрационных станках внавал. Крупные и легкодеформируемые детали требуют обработки с закреплением – турбоабразивная, шпиндельная вибрационная и т.п. Мелкие же детали закреплять не целесообразно, а при обработке внавал они слипаются в пакеты (при использовании «мокрых» способов обработки деталей свободными абразивами).

Целью работы является обоснование одного из возможных комбинированных, более «мягких» способов обработки мелких деталей в газообразных потоках, программируемых по скорости, расходу и т.д.

Методика исследования

Для реализации отделочно-зачистной обработки мелких деталей предлагается устройство (рис. 1), которое содержит ресивер 1, из которого посредством вентиля 2 в рабочую камеру 3 подается под напором пульсирующий воздушный поток.

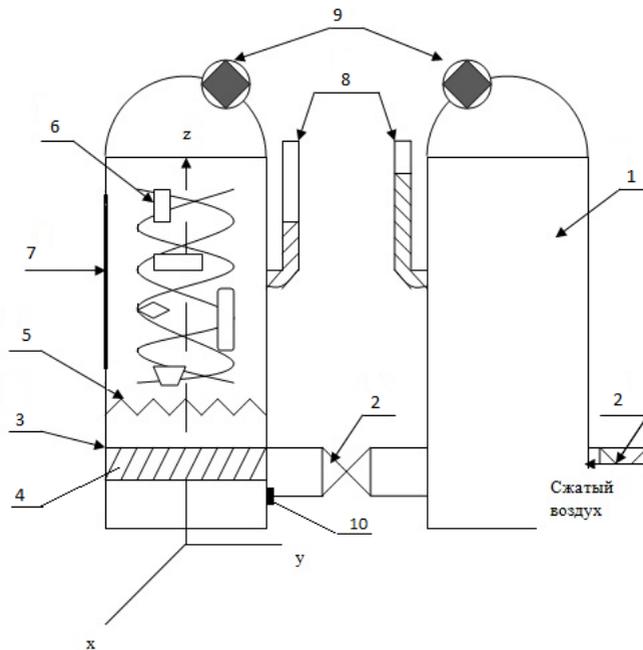


Рис. 1. Устройство для обработки деталей в газообразных потоках:
 1 – ресивер; 2 – вентиль; 3 – рабочая камера; 4 – вихревое приспособление;
 5 – жесткая решетка; 6 – обрабатываемые детали; 7 – смотровое окно;
 8 – манометр; 9 – клапан; 10 – реле времени

Особенностью этого устройства является установка в нижней части камеры специального приспособления 4, придающего входящему воздушному потоку вместе с абразивными частицами, находящимися в камере, поступательную и вращательную составляющие движения (создание «танцующего вихря»). Вихревое приспособление (рис. 2) представляет собой фланец с тремя наклонными отверстиями (для устранения застой-

ных зон в придонной угловой части рабочей камеры) и одним осевым (для оттеснения потока к периметру, где скорость потока выше). На некотором расстоянии от дна камеры устанавливается жесткая решетка 5, предотвращающая падение загруженных деталей вниз. За поведением обрабатываемых деталей 6 в рабочей камере можно наблюдать через смотровое окно 7. Для оценки и регулирования величины давления в ресивере и рабочей камере используются манометры 8 и клапаны 9. На входе в камеру установлено реле времени 10.

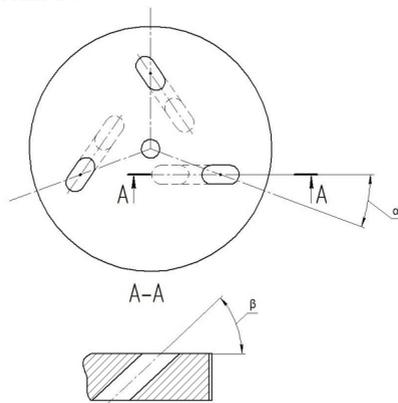


Рис. 2. Вихревое приспособление (пунктирными линиями показаны входные нижние отверстия, сплошными линиями – выходные): $\alpha=20^\circ$; $\beta=20^\circ$

Еще раз отметим, что основной функцией вихревого приспособления является создание максимально турбулизуемого восходящего вихревого движения двухфазной среды по всему объему камеры. Аналогичное приспособление разработано для других устройств и защищено авторскими свидетельствами [4, 5]. Загруженный в камеру абразив и детали приводятся восходящим турбулентным потоком в «парящее» состояние, в процессе которого происходит их взаимное соударение и проскальзывание, в результате чего происходит обработка. При этом отметим, что объемная концентрация абразивных частиц не должна превышать 30% рабочего объема. По окончании обработки производится разгрузка (выемка) деталей из камеры с дальнейшим их контролем.

Аналитическое описание вихревого движения двухфазного состава в рабочей камере подчиняется системе дифференциальных уравнений в частных производных, решение которых возможно только численными методами. Кроме того не меньшую сложность представляет формулировка краевых условий. И тем не менее эта сложная гидроаэродинамическая задача поставлена и решена ранее в [6], где для изучения физического характера вихревого потока и его топографии используется осредненный метод Рейнольдса.

При допустимых физических упрощениях адиабатическое движение газа, вошедшего через суммарную площадь отверстий S в рабочую камеру, можно описать менее сложной системой уравнений, достаточных для обоснования основных параметров разрабатываемого устройства:

$$V^2 + 2P_0 \int \frac{d(P/P_0)}{\rho} = const \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{a_1}{\rho_0} \left[\frac{1}{(P/P_0)^k} + \frac{a}{a_1} \right] \quad (2)$$

$$\rho VS = const \quad (3)$$

где V – скорость;

P_0 и ρ_0 – давление и плотность в ресивере;

$p(t)$ – пульсирующее давление в рабочей камере;

a, a_1 – объемные концентрации абразивных частиц и газа в рабочей камере.

Реализуя систему (1-3) получим одну из основных характеристик движения – скорость двухфазной среды:

$$V = \sqrt{2a_1 \frac{P_0}{\rho_0} \left\{ \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] + \frac{a}{a_1} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right) \right] \right\}} \quad (4)$$

где k – показатель адиабаты.

При этом

$$\vec{V} = \vec{V}_z + \vec{V}_{xy} \quad (5)$$

где \vec{V}_z – вертикальная составляющая;

\vec{V}_{xy} – вихревая составляющая.

Исключая критический режим истечения газа в рабочую камеру, остается изучить характер вихревой турбулентности в ее объеме. Смещение детали вверх-вниз и явление их «зависания – барожирования» по всему объему газоабразивной смеси в инженерно-лабораторном подходе можно определить зависимостью:

$$mg \leq \frac{1}{2} C_z \rho s V_z^2. \quad (6)$$

где m – масса детали;

C_z – коэффициент сопротивления в вертикальном направлении;

g – ускорение свободного падения;

s – площадь миделевого сечения детали.

Результаты исследований

Предложенный новый способ и устройство для обработки мелких деталей в газоабразивных потоках требуют проведения большого объема экспериментальных исследований. Необходимо осуществить оценку влияния на конечный технологический результат (получение допустимой шероховатости, очистка заготовок от окалины, пригара, остатков формовочной смеси либо удаление заусенцев) следующих параметров и факторов:

- материал и зернистость абразива;
- форма и масса обрабатываемых деталей;
- давление, скорость, частота пульсации подаваемого газа;
- траектория движения обрабатываемых деталей;
- время обработки;
- оптимизация вихревого приспособления;
- способы интенсификации и т.п.

Выводы

1. Реализовано ранее высказанное в [2] предложение о необходимости дальнейшего развития способов обработки деталей свободными абразивами.

2. Предложен и аналитически обоснован новый ресурсосберегающий способ обработки мелких деталей, основанный на использовании физико-механических свойств, специально создаваемых и управляемых вихревых движений газоабразивной среды.

3. Предложенный способ обработки мелких деталей на отделочно-зачистных операциях возможно реализовать с помощью устройства, в рабочей камере которого обрабатываемые детали «парят» в газоабразивном потоке. Существенным преимуществом предлагаемого устройства является его компактность, возможность расположения в любом месте существующих производственных площадей, достаточная бесшумность. При необходимости в рабочую смесь могут добавляться химические реагенты для повышения качества обрабатываемых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабичев А.П. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. 624 с.
2. Волков И.В., Ясуник С.Н. и др. Обработка в вибрационных станках. Монография. Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2013. 227с.
3. Мозговой В.Ф., Попенко А.И., Качан А.Я. Технология и оборудование для финишно-упрочняющей обработки деталей ГТД свободным абразивом // Технологические системы. 2001. № 3. С.25-29.
4. Устройство для подавления взрывов и возгораний: А.с. 645308 СССР №2514339/29-12; заявл. 06.10.78. Бюл. (53) С.4:
5. Устройство для подавления загорания: А.с. 671811 СССР №2513289/29-12; заявл. 15.03.79. Бюл.(53) С.4
6. Сьомін Д.О., Дмитрієнко Д.В. Математичне моделювання гетерогенних турбулентних течій в вихрових регулюючих органах // Вісник СНУ ім.В.Даля. 2006. №7 (101). С.69 -73.

Solodovnyk M., Volkov I., Kuznetsova M., Yasunik S. New method and device for treatment of parts in gas-abrasive flows feasibility

New method of finishing and condition treatment of parts using physical and mechanical characteristics of created and controlled two-phase space-vortex gas-abrasive flows has been offered and analytically grounded. Using this method of small parts loaded in bulk treatment, intensive stock removal and a new surface micro-texture formation takes place when a flow of abrasive particles collides with a flow of 'soaring' parts. The device for realization of the offered method comprises a working chamber equipped with vortex appliance and receiver supplying pulsating air flow into the chamber. The article offers dependencies for major parameters of treatment determination. Fig. 2. Literature 6.

Keywords: *part, finishing and condition treatment, flow two-phase composition, working chamber, vortex appliance, receiver, speed.*

Солодовник Михаил Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: аналитические вопросы в технологии машиностроения.

Волков Игорь Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: обработка деталей свободными абразивами.

e-mail: volnaana@mail.ru

Кузнецова Марина Николаевна – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: прикладные вопросы в технологии машиностроения.

e-mail: kuz_mari@rambler.ru

Ясуник Светлана Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры

технологии машиностроения и инженерного консалтинга Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: обработка деталей свободными абразивами.

e-mail: jsn@ukr.net

Solodovnik Mikhail – candidate of Sciences (Physics and Mathematics) associate Professor, Department of production engineering and engineering consulting, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: analytical issues in production engineering.

Volkov Igor – candidate of Sciences (Engineering), associate Professor, Department of production engineering and engineering consulting, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: treatment of parts with free abrasives.

Kuznetsova Marina – senior lecturer, Department of production engineering and engineering consulting, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: applied problems.

Yasunik Svetlana – candidate of Sciences (Engineering), associate Professor, Department of production engineering and engineering consulting, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: treatment of parts with free abrasives.

*Статья поступила
27 февраля 2017 г.*

© Солодовник М.Д., Волков И.В., Кузнецова М.Н., Ясуник С.Н., 2017

УДК 539.5:621.91

Аветисов Р.А.

ПЕРЕМЕЩЕНИЯ АЛМАЗНОГО ОТРЕЗНОГО КРУГА ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАТЯЖЕНИИ

Avetisov R.A.

DISPLACEMENT FIELD OF DIAMOND CUTTING DISCS WITH UNEVEN TENSION

Определяется поле перемещений в неравномерно натянутом алмазном отрезном круге с внутренней режущей кромкой (АКВР). Решается задача теории упругости в перемещениях. Приводится выражение для определения максимально допустимой (в процентах) неравномерности при натяжении отрезных кругов в соответствии с нормами ГОСТ 26004-83 на радиальное биение. Показано, что даже при неравномерности натяжения менее 2% радиальное биение превышает нормы, установленные стандартом.

Ключевые слова: отрезной круг, резка монокристаллов, неравномерность натяжения, кольцевая пластина, задача Ламе.

Введение

Алмазные отрезные круги с внутренней режущей кромкой (АКВР) являются одним из наиболее распространенных инструментов для резки монокристаллов полупроводниковых материалов при резке монокристаллов. Одним из основных факторов, оказывающих пагубное влияние на точность и качество поверхности пластин, является искажение формы режущей кромки [1, 2, 3].

В работе [3] экспериментально доказано, что силу натяжения отрезного круга, произведенную при помощи n пар болтов, равномерно распределенных по его контуру можно разложить на сумму постоянной составляющей с амплитудой q и переменной составляющей амплитудой q_0 . В статье [4] автором были найдены напряжения, возникающие при таком характере растяжения отрезного круга. Для определения деформаций режущей кромки, используя результат предыдущей статьи, необходимо решить задачу теории упругости в перемещениях.

Целью работы является определение деформаций, возникающих при неравномерном натяжении отрезных кругов с внутренней режущей кромкой.

Математическая модель

В работе [4] показано, что при натяжении по наружному контуру отрезного круга, неравномерным усилием

$$q(\theta) = q + q_0 \cos(2\theta), \tag{1}$$

с постоянной составляющей q и амплитудой неравномерности q_0 (рис. 1), в круге возникают напряжения, определяемые формулами (2):

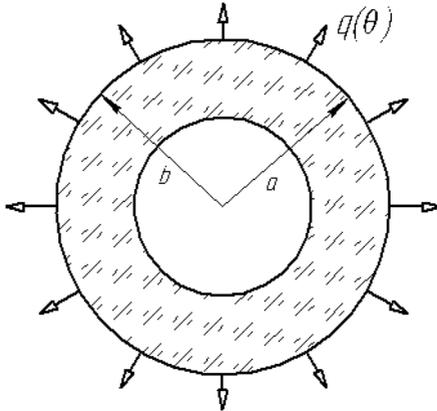


Рис. 1. Расчетная схема кольцевой пластинки с неравномерной по контуру нагрузкой

$$\begin{cases} \sigma_r(r, \theta) = -2 \left(B + \frac{3C}{r^4} + \frac{2D}{r^2} \right) \cdot \cos(2\theta) \\ \sigma_\theta(r, \theta) = 2 \left(6Ar^2 + B + \frac{3C}{r^4} \right) \cdot \cos(2\theta) \\ \tau_{r\theta}(r, \theta) = - \left(2D \frac{1}{r^2} - 2B - 6Ar^2 + \frac{6C}{r^4} \right) \cdot \sin(2\theta) \end{cases} \tag{2}$$

где r, θ - переменные полярной системы координат;

a, b - наружный и внутренний радиусы соответственно;

$\alpha = b/a$.

$$\begin{aligned}
 A &= q_0 \frac{a^4(a^2 + 3b^2)}{2(3a^8 - 9a^6b^2 + 9a^4b^4 - 3a^2b^6)}; \\
 B &= -q_0 \frac{a^4(a^4 + a^2b^2 + 2b^4)}{2(a^8 - 3a^6b^2 + 3a^4b^4 - a^2b^6)}; \\
 C &= -q_0 \frac{a^4(3a^2b^4 + b^6)}{2(3a^6 - 9a^4b^2 + 9a^2b^4 - 3b^6)}; \\
 D &= q_0 \frac{a^4(a^4b^4 + a^2b^6) \cdot (2a^4 + a^2b^2 + b^4)}{2(a^6b^2 + a^4b^4)(a^6 - 3a^4b^2 + 3a^2b^4 - b^6)}; \\
 Q &= \frac{q_0}{1 - 3\alpha^2 + 3\alpha^4 - \alpha^6}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Как известно [5], перемещения в изотропно-упругом теле выражаются через напряжения формулами (4)

$$\begin{cases}
 E \frac{du}{dr} = \sigma_r - \mu \cdot \sigma_\theta \\
 \frac{E}{r} \left(\frac{dv}{d\theta} + u \right) = \sigma_\theta - \mu \cdot \sigma_r \\
 G \left(\frac{1}{r} \frac{du}{d\theta} + r \frac{d}{dr} \left(\frac{v}{r} \right) \right) = \tau_{r\theta}
 \end{cases} \tag{4}$$

Для определения перемещений u и v , используя выражения (2), решим систему (4). Подставим в первое уравнение из (4) напряжения, полученные в (2):

$$E \cdot \frac{du}{dr} = -2 \left(\begin{aligned}
 &B + \frac{3C}{r^4} + \frac{2D}{r^2} + \\
 &+ \mu \cdot \left(6Ar^2 + B + \frac{3C}{r^4} \right)
 \end{aligned} \right) \cos(2\theta), \tag{5}$$

после интегрирования по переменной r получим:

$$u = \frac{2 \cos(2\theta)}{E \cdot r^3} \left(C - B \cdot r^4 + 2D \cdot r^2 + \right. \\ \left. + C \cdot \mu - 2A\mu \cdot r^6 - B \cdot \mu \cdot r^4 \right) + \frac{\zeta(\theta)}{E}, \quad (6)$$

где $\zeta(\theta)$ - функция, зависящая только от θ .

Подставим (6) и напряжения (2) во второе уравнение (4), разрешим последнее относительно производной $\frac{dv}{d\theta}$ и проинтегрируем по переменной θ :

$$v = \frac{\sin(2\theta)}{E \cdot r^3} \left(2A \cdot r^6 (3 + \mu) + 2B \cdot r^4 (1 + \mu) + \right. \\ \left. + 2C \cdot (1 + \mu) - 2D \cdot r^2 (1 - \mu) \right) - \int \frac{\zeta(\theta) d\theta}{E} + \frac{\eta(r)}{E} \quad (7)$$

где $\eta(r)$ - функция, зависящая только от переменной r .

Подставим перемещения (6) и (7), также напряжение $\tau_{r\theta}$ из решения (2) в последнее уравнение системы (4) и после дифференцирования получим:

$$r^3 \cdot \int \zeta(\theta) d\theta + r^3 \frac{d\zeta(\theta)}{d\theta} - r^3 \cdot \eta(r) + r^4 \frac{d\eta(r)}{dr} + \\ + 4 \cdot (1 + \mu) \left(3A r^6 + B \cdot r^4 - 3C - D \cdot r^2 \right) \sin(2\theta) - \\ - 2 \cdot \frac{E}{G} \left(3A \cdot r^6 + B \cdot r^4 - 3C - D \cdot r^2 \right) \sin(2\theta) = 0. \quad (8)$$

Принимая во внимание выражение модуля сдвига

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (9)$$

замечаем, что сумма последних двух строк равна нулю. Отсюда получаем интегро-дифференциальное уравнение:

$$r^3 \cdot \int \zeta(\theta) d\theta + r^3 \frac{d\zeta(\theta)}{d\theta} - r^3 \cdot \eta(r) + r^4 \frac{d\eta(r)}{dr} = 0. \quad (10)$$

Перепишем его в более удобном для исследования виде:

$$\int \zeta(\theta) d\theta + \frac{d\zeta(\theta)}{d\theta} = \eta(r) - r \frac{d\eta(r)}{dr}. \quad (11)$$

Дифференцируя один раз по угловой переменной θ , получим:

$$\frac{d^2\zeta(\theta)}{d\theta^2} + \zeta(\theta) = 0. \quad (12)$$

Общее решение этого уравнения: $\zeta(\theta) = A_1 \cdot \cos\theta + B_1 \cdot \sin\theta$. Подставим его в уравнение (10):

$$u(r, \theta) = \frac{2 \cos(2\theta)}{E \cdot r^3} \cdot \left(\begin{array}{l} C(1 + \mu) - B(1 + \mu) \cdot r^4 + \\ + 2D \cdot r^2 - 2A\mu \cdot r^6 \end{array} \right) + \frac{1}{E} (A_1 \cdot \cos\theta + B_1 \cdot \sin\theta), \quad (13)$$

и потребуем выполнения условий периодичности решения на контуре пластинки:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(r, 0) = u(r, \pi); \\ u\left(r, \frac{\pi}{2}\right) = u\left(r, \frac{3\pi}{2}\right) \end{array} \right. \quad (14)$$

Первое условие дает $A_1 = 0$, второе условие также дает $B_1 = 0$ Тогда:

$$\zeta(\theta) \equiv 0, \quad (15)$$

и для радиального перемещения получим следующее окончательное выражение:

$$u(r, \theta) = \frac{2 \cos(2\theta)}{E \cdot r^3} \left(\begin{array}{l} C(1 + \mu) - B(1 + \mu) \cdot r^4 + \\ + 2D \cdot r^2 - 2A\mu \cdot r^6 \end{array} \right). \quad (16)$$

Так как $\zeta(\theta) \equiv 0$, то уравнение (11) принимает вид:

$$r \frac{d\eta(r)}{dr} - \eta(r) = 0. \quad (17)$$

Это уравнение с разделяющимися переменными с общим решением:

$$\eta(r) = C_1 \cdot r. \quad (18)$$

Подставим это решение в выражение (11), помня при этом, что $\zeta(\theta) \equiv 0$:

$$v(r, \theta) = \frac{\sin(2\theta)}{E \cdot r^3} \left(\begin{array}{l} 2A \cdot r^6 (3 + \mu) + \\ + 2B \cdot r^4 (1 + \mu) + \\ + C \cdot (1 + \mu) - 2D \cdot r^2 (1 - \mu) \end{array} \right) + C_1 \cdot r. \quad (19)$$

Условия периодичности решения на контуре пластинки выполняются при любом C_1 . Следовательно, его значение нужно искать из условия симметрии задачи (рис. 2):

На рисунке 2 а угол $\Delta\theta$ положительный и перемещение v (штрихованная область) положительно, т.к. совпадает с направлением орта \mathbf{e}_θ . На рисунке 2 б угол $-\Delta\theta$ отрицательный и соответствующее ему перемещение $v(-\Delta\theta)$, симметричное перемещению $v(\Delta\theta)$, направлено против орта \mathbf{e}_θ , т.е. отрицательное.

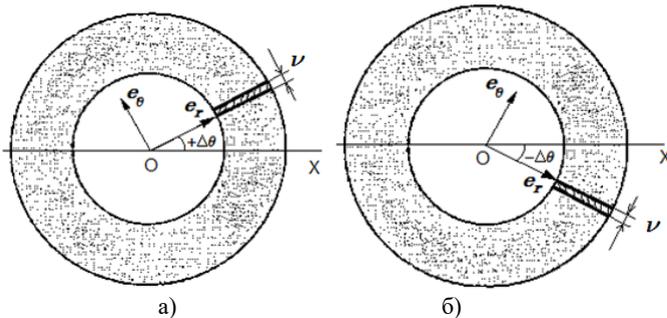


Рис. 2. Симметрия окружных перемещений относительно оси OX

Функция $v(r, \theta)$, как это видно из рис. 2, должна принимать одинаковые по модулю и противоположные по знаку значения в симметричных относительно оси OX точках $(r; +\Delta\theta)$ и $(r; -\Delta\theta)$, где $b \leq r \leq a$. Множество этих точек вдоль радиуса r образует два симметричных отрезка, которые на рис. 2 выделены жирной линией. Так как функция $v(r, \theta)$ – нечетная функция аргумента θ , то для неё справедливо равенство:

$$u_{\theta\theta}(r, \Delta\theta) = -u_{\theta\theta}(r, -\Delta\theta) \quad (20)$$

Подставляя в равенство (20) выражение (19), находим, что $C_1 = 0$. Таким образом, для окружного перемещения приходим к выражению:

$$v(r, \theta) = \frac{\sin(2\theta)}{E \cdot r^3} \left(\begin{array}{l} 2A \cdot r^6 (3 + \mu) + \\ + 2B \cdot r^4 (1 + \mu) + \\ + C \cdot (1 + \mu) - 2D \cdot r^2 (1 - \mu) \end{array} \right). \quad (21)$$

Выражения (16) и (21) дают решение задачи о перемещениях круглой пластинки с отверстием, растягиваемой на внешнем контуре гармонической нагрузкой.

Подставляя коэффициенты для A, B, C, D из (3) в (16), и проделав элементарные преобразования, получим окончательную формулу радиальных перемещений свободной пластинки с круглым отверстием, растягиваемой по наружному контуру гармонической силой с амплитудой q_0 :

$$u(r, \theta) = \frac{2 \cdot q_0 \cos(2\theta)}{E \cdot (1 - \alpha^2)^3} \left(\begin{array}{l} -\frac{r^3}{3a^2} (1 + 3\alpha^2) \cdot \mu + \frac{r}{2} (1 + \alpha^2 + 2\alpha^4) \cdot (1 + \mu) + \\ + \frac{b^2}{r} (2 + \alpha^2 + \alpha^4) - \frac{b^4}{6r^3} (3 + \alpha^2) \cdot (1 + \mu) \end{array} \right). \quad (22)$$

Из формулы (22) определим амплитуду радиального перемещения на внутренней кромке:

$$u_{\text{вн. max}} = u(b, 0) = 4 \cdot b \cdot \frac{q_0}{E} \frac{\left(1 + \frac{2}{3}\alpha^2 + \alpha^4\right)}{\left(1 - \alpha^2\right)^3}. \quad (23)$$

Радиальное биение Δ режущей кромки определяется как разность максимального и минимального расстояний точек кромки до оси. Для неравномерно растянутого диска радиальное биение определяется выражением (23). Действительно

$$\Delta = D_{\text{max}} - D_{\text{min}} = (u'_{\text{вн}} + u_{\text{вн. max}}) - u'_{\text{вн}} = u_{\text{вн. max}}, \quad (24)$$

где $u'_{\text{вн}}$ - радиальное перемещение кромки, вызванное постоянной составляющей растягивающего натяжения.

ГОСТ 26004-83 накладывает определенные ограничения, как на величину относительного увеличения внутреннего диаметра, так и на величину радиального биения: $\frac{u'_{\text{вн}}}{b} \leq 0.008$; $\Delta \leq 0.05 \text{ мм}$.

Перемещение на внутренней кромке $u'_{\text{вн}}$ от постоянной внешней нагрузки нетрудно получить из решения Ламе [5,6] приняв $r = b$:

$$u'_{\text{вн}} = \frac{q}{E} \frac{2 \cdot b}{(1 - \alpha^2)} \quad (25)$$

Марка стали, из которой изготовлен корпус, согласно ГОСТ 26004-83, - это сталь 12Х18Н9 со статическим временным сопротивлением на разрыв $\sigma_B = 1700 \text{ МПа}$ и модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Тогда требование $u'_{\text{вн}}/b \leq 0.008$ совпадает с тем условием, когда величина окружных напряжений σ'_{θ} на внутренней кромке не должна превышать 90% предела прочности стали σ_B .

Действительно, согласно решению Ламе [5,6] для кольца при его равномерном растяжении, на внутренней режущей кромке ($r = b$) окружные напряжения достигают величины:

$$\sigma'_{\theta. \text{вн}} = \frac{2q}{1 - \alpha^2}. \quad (26)$$

Подставляя (18) в (17) и принимая $\sigma'_{\theta,вн} = 0,9 \cdot \sigma_B$, для величины $u'_{вн}/b$ получим:

$$\frac{u'_{вн}}{b} = \frac{\sigma'_{\theta,вн}}{E} = \frac{0,9 \cdot \sigma_B}{E} = 0,008. \quad (27)$$

Требую выполнения равенства $\frac{u'_{вн}}{b} = 0,008$ в выражении (17), для внешней постоянной нагрузки q получаем условие:

$$q = 0,004(1 - \alpha^2)E. \quad (27)$$

Удовлетворяя неравенству $u_{вн,макс} \leq 0,05 \text{ мм}$ в выражении (23), получаем еще одно условие – теперь для амплитуды q_0 неравномерной нагрузки:

$$q_0 \leq \frac{0,05}{4b} \cdot \frac{(1 - \alpha^2)^3}{\left(1 + \frac{2}{3}\alpha^2 + \alpha^4\right)} E. \quad (28)$$

Поделив неравенство (29) на равенство (28), найдем максимально допустимое значение относительной неравномерности растягивающего усилия:

$$\frac{q_0}{q} \leq \left[\frac{q_0}{q} \right] = \frac{3}{b} \cdot \frac{(1 - \alpha^2)^2}{\left(1 + \frac{2}{3}\alpha^2 + \alpha^4\right)}. \quad (30)$$

где значение размера b берется в миллиметрах.

Результаты исследований

В результате исследования деформаций отрезных кругов найдены перемещения внутреннего контура отрезного круга (23). Из требований к отрезным кругам получена формула (30) для определения допускаемой неравномерности натяжения.

Найдем для примера допускаемую неравномерность натяжения для отрезного круга марки АКВР 597×235 с параметрами $\alpha = 0.39$ и $b = 117.5 \text{ мм}$. Согласно (30) максимально допустимое значение относительной неравномерности натяжения равно $[q_0/q] = 0.016$. То есть, допускаемая неравномерность натяжения составит всего 1.6 %.

Выводы

Найдено решение плоской задачи упругости для кольцевой пластинки при её неравномерном натяжении по внешнему контуру. Показано, что даже при небольшой неравномерности натяжения (менее 2%), радиальное биение превышает нормы, установленные ГОСТ 26004-83.

Это приводит к необходимости измерения и учета неравномерности при натяжении отрезных кругов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерошин С.С. Исследование технологических факторов процесса алмазной резки слитков полупроводниковых материалов на пластины: дис. ... канд. техн. наук. М., 1975. 195 с.
2. Патратьев А.Г. Исследование процесса разрезания слитков германия и кремния алмазными дисками с внутренней режущей кромкой в полупроводниковом производстве: дис. ... канд. техн. наук. М., 1967. 208 с.
3. Таращанский М.Т. Повышение точности резки полупроводниковых монокристаллов за счет уменьшения неравномерности натяжения корпуса отрезного круга: дис. ...канд. техн. наук. Луганск, 2006. 201 с.
4. Аветисов Р.А. Плоское напряженное состояние кругов АКВР при неравномерном натяжении // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2016. № 1. С.193 - 200.
5. Тимошенко С.П. Гудьер Дж. Теория упругости, М.: Наука, 1975. 576 с.
6. Писаренко Г.С. и др. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988 г. 736 с.

Avetisov R.A. Displacement field of diamond cutting discs with uneven tension

We solve the plane problem of elasticity theory for cut-off discs, which are non-uniform tension. As a theoretical model accepted isotropic circular plate, that is loaded on the outer boundary of a distributed force. Problem of elasticity theory for the stress has been resolved earlier in a previous article the author. Using the results of the preceding Article and the methods of elasticity theory were found displacement field of the ring. According to GOST standards for admission form cutting blades, it was found an analytical expression permissible value of uneven tension. The result of the conclusion that even if the uneven tension value of 2% deviation from the shape of the cutting wheel may exceed a predetermined value GOST, which leads to the need to measure and control the uneven tension cut-off wheels.

Keywords: cutting disc, cutting single crystals, uneven tension, ring plate, the Lamé problem.

Аветисов Рубен Александрович – ассистент кафедры микро- и наноэлектроники ЛНУ им. В. Даля. Научные интересы: теория автоматического управления, теория упругости.

e-mail: shemotechnik@rambler.ru

Ruben Avetisov – assistant professor at the department of micro- and nanoelectronics, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interest: control theory, theory of elasticity.

*Статья поступила
13 февраля 2017 г.
© Аветисов Р.А., 2017*

УДК 622.693.4

**Коваленко А.А., Гусенцова Я.А., Чубарова И.А.,
Андрійчук Н. Д., Пилавов М.В.**

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Kovalenko A.A, Gusentsova J.A, Chubarova I.A.,
Andriychuk N.D, Pilavov M.V.**

BOUNDARY CONDITIONS IN THE MATHEMATICAL MODEL OF THE PUMPING UNIT OF HYDRAULIC EQUIPMENT

Разработана обобщенная математическая модель насосной установки гидравлического оборудования с учетом граничных условий в конечных сечениях. При численных расчетах учтены волновые явления, которые осуществляются введением дифференциальных уравнений в частных производных, соответствующих сохранению энергии и массы жидкости в трубопроводе. Показано, что изменения давления в нагнетательной магистрали поршневого насоса гидравлического оборудования определяется в основном кинематикой привода. Проведен анализ погрешностей в определении показателей работы системы.

Ключевые слова: гидравлические машины, гидравлическое оборудование, математическое моделирование, нагнетательная магистраль, дифференциальное уравнение, частные производные.

Введение

Поршневые насосы являются наиболее распространенным типом насосов, используемых в настоящее время в промышленности, прессовых установках, машинах обработки давлением и т.д. Основными достоинствами применения поршневых насосов являются:

- высокая точность подачи перекачиваемой жидкости;
- высокий КПД;
- низкая зависимость производительности насоса при увеличении напора;
- отсутствие снижения КПД при сверхмалых расходах;
- компактность;

— простота устройства и эксплуатации;

Недостатками применения поршневых насосов являются:

— неравномерность подачи перекачиваемой жидкости;

— невозможность перекачивания больших объемов жидкости;

Исходя из этого, определелись основные области применения поршневых насосов:

— создание высоких давлений в прессовых установках, машинах для обработки давлением, литейном производстве;

— устройства точного дозирования рабочей жидкости.

Изучению рабочих процессов гидравлических машин с помощью математических моделей посвящены ряд работ [1-3], в которых не учтены волновые явления всасывающей и нагнетательной магистралей. При моделировании гидравлических систем, включающих в себя насосную установку и трубопроводы, такой подход может привести к заметным погрешностям в определении показателей работы системы.

Целью работы является моделирование насосной установки в виде отдельных математических моделей всасывающей магистрали, непосредственно насоса, нагнетательной магистрали, стыковка которых должна осуществляться с помощью граничных условий в конечных сечениях.

Методика исследования

Учет волновых явлений осуществляется введением в математическую модель гидравлической системы дифференциальных уравнений в частных производных, соответствующих сохранению энергии и массы жидкости в трубопроводе [3].

Моделируемый поршневой насос, схема которого представлена на рис. 1, представляет собой двухцилиндровую гидравлическую машину двустороннего действия. Каждый из цилиндров 1 и 2 образует штоковую и бесштоковую рабочие камеры, которые имеют всасывающие 3 и нагнетательные 4 тарельчатые клапаны. Всасывающий коллектор насоса 5 соединен с всасывающей магистралью 6. При работе поршневого насоса с подпором, на входе во всасывающую магистраль устанавливается центробежный, насос 7. Для слива лишней жидкости конструктивно предусматривается байпасная линия 8 с дросселем.

Нагнетательный коллектор 9 насоса соединен с нагнетательной магистралью 10, в которой установлен дроссель нагрузки 11. В линиях всасывания и нагнетания для уменьшения неравномерности давления предусмотрены пневмокомпенсаторы.

Математическая модель рабочего процесса поршневого насоса состоит из системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих работу клапанных устройств, поршневых камер, реологиче-

ских свойств перекачиваемой жидкости [4] с учетом изменяющихся во времени (под действием давления) величин объемного модуля упругости, плотности, газосодержания рабочей жидкости, и системы дифференциальных уравнений в частных производных течения жидкости в гидравлических линиях всасывающей и нагнетательной магистралей.

Математическую модель рабочего процесса поршневого насоса целесообразно представить в виде отдельных математических моделей всасывающей магистрали, непосредственно насоса, нагнетательной магистрали, стыковка которых должна осуществляться с помощью граничных условий в конечных сечениях (рис. 1, точки А, В, Д, К).

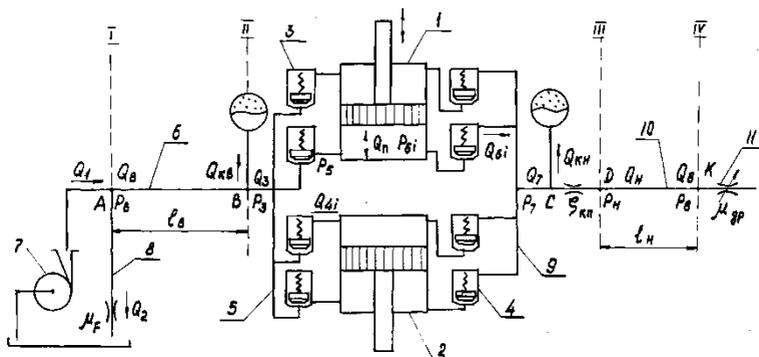


Рис. 1. Расчетная схема поршневого насоса

Граничное условие в точке А записывается на основе уравнения неразрывности потока. Пренебрегая сжимаемостью, расход жидкости в начальном сечении, что вполне допустимо, так как давление на выходе подпорного насоса 7 не превышает 0.6 МПа:

$$Q_B = Q_{II} - Q_{СЛ}, \quad (1)$$

$$Q_{СЛ} = \mu_F F_b \sqrt{3P_b / \rho}, \quad (2)$$

где $Q_{СЛ}$ - расход через байпасную линию с дросселем;

Q_{II} - подача, обусловленная схемным подключением гидравлических устройств к всасывающей магистрали;

ρ - плотность рабочей жидкости;

μ_F, F_b - коэффициент расхода и площадь проходного сечения дросселя в байпасной линии;

P_b - давление в начальном сечении всасывающей магистрали.

Если на входе всасывающего трубопровода установлен подпорный центробежный насос, граничное условие запишется в виде:

$$Q_B = C_1 + \sqrt{C_2 + C_3 P_b / \rho g} - S_{\mu F} F_b \sqrt{3 P_b / \rho}, \quad (3)$$

где C_1, C_2, C_3 - коэффициенты аппроксимации характеристики подпорного центробежного насоса [5].

Если система снабжена пневмокомпенсатором, что является типичным при использовании объемных насосов, то, считая процесс сжатия газа в пневмокомпенсаторе с начальным объёмом W_{KB} и давлением P_{KB} зарядки адиабатным, запишем второе граничное условие для давлений P_{BX} в конечном сечении всасывающей магистрали:

$$\frac{dP_{BX}}{dt} = \frac{(Q_{BK} - Q_{BX})n}{W_{KB} P_{KB}^{1/n} P_{BX}^{-(1+n)/n}} + W_B / E, \quad (4)$$

где Q_{BK} - расход в конечном сечении всасывающего трубопровода;

Q_{BX} - расход на входе в насосную установку;

W_B - объём всасывающего коллектора насосной установки;

n - показатель политропы.

Граничное условие в точке Д определяется расходом Q_H в нагнетательной линии:

$$Q_H = F \sqrt{\frac{2(P_{\text{вых}} - P_H)}{\rho \zeta}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{вых}}$ - давления на выходе из насосной установки и в начале нагнетательной линии;

F - площадь поперечного сечения трубопровода;

ζ - коэффициент сопротивления дросселя у пневмокомпенсатора.

Изменение давления $P_{\text{вых}}$ определяется разностью расходов на выходе из насосной установки $Q_{\text{вых}}$ и расхода через дроссель Q_H с учетом расхода через пневмокомпенсатор с начальным объёмом W_{KH} и давлением зарядки P_{KH} :

$$\frac{dP}{dt} = \frac{(Q - Q_H)n}{W P P + W / E}, \quad (6)$$

где W_H - объём нагнетательного коллектора насосной установки.

Граничным условием для конечного сечения нагнетательной магистрали (точка K) является уравнение, определяющее давление $P_{нк}$ в зависимости от расхода Q_{op} через нагрузочный дроссель с площадью проходного сечения f коэффициентом расхода μ_{op} и давлением за дросселем P_0 :

$$P = \frac{\rho Q}{2\mu f} + P. \quad (7)$$

Граничные условия, приведенные выше, совместно с дифференциальными уравнениями всасывающей магистрали, рабочего процесса насосной установки и нагнетательной магистрали образуют общую математическую модель насосной установки в системе гидротранспорта.

Выводы

Характер изменения давления в нагнетательной магистрали определяется в основном кинематикой привода. При небольших для гидравлических систем длинах заметно влияние отраженных волн. Неравномерность давления по длине трубопровода интенсивно уменьшается, с увеличением длины нагнетательного трубопровода коэффициент неравномерности давления на выходе насоса понижается, что вызвано демпфирующими свойствами трубопровода. Непосредственно на показатели работы насоса всасывающая и нагнетательная магистраль влияет слабо.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Б.П., Зайцев А.А. Математическая модель аксиально-поршневого регулируемого гидромотора с наклонным блоком // Известия вузов. Машиностроение. 1987. №2. С. 50 - 55.
2. Дядичев К.М., Коваленко А.А., Косенко-Белинский Ю.А., Нгуен Кхак Тхань. Математическое моделирование рабочего процесса поршневого насоса // Конструирование и пр-во трансп. машин. 1985. Вып. 17. С. 69 - 72.
3. Гликман Б.Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях, М.: Машиностроение, 1979. 256 с.
4. Сорока С.И. Реология жидкости, Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2014. 64 с.
5. Коваленко А.А. Гидравлические и аэродинамические машины, Издательств ДонГАСА, 2000. 77 с.

Kovalenko A.A, Gusentsova J.A, Chubarova I.A., Andriychuk N.D, Pilavov M.V. Boundary Conditions in the Mathematical Model of the Pumping Unit Pressure Processing Machine

The generalized mathematical model of the pumping unit of hydraulic equipment with accounting the given boundary conditions in finite cross-sections was delivered. The numerical calculations take into account the wave phenomena, which are realized by introduction of differential equations in partial derivatives, and corresponding equations of conservation of energy and mass of fluid in the pipeline were recorded. It is shown that the pressure changes in the discharge line of the hydraulic piston pump pressure processing machine is mainly determined of the drive kinematics.

The analysis of errors in determining of the system performance were fulfilled.

Keywords: hydraulic machines, hydraulic equipment, mathematical simulation, discharge line, differential equation, partial derivatives.

Коваленко Алим Алексеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры гидрогазодинамики Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения, процессы тепло- и массообмена.

e-mail: azazello102@gmail.com

Гусенцова Яна Алимовна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой технологии и организации строительного производства Луганского национального аграрного университета, г. Луганск. Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения, моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий и зданий, вопросы регулирования процессов тепло- и массообмена.

e-mail: gusentsova@gmail.com

Чубарова Ирина Анатольевна – аспирант кафедры гидрогазодинамики Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения.

e-mail: ira33385@mail.ru

Андрійчук Николай Данилович – доктор технических наук, профессор Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения, моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий.

e-mail: nikolai.andriichuk@mail.ru

Пилавов Манолис Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения. Моделирование процессов тепло- и массообмена.

e-mail: manolis.pilavov@mail.ru

Kovalenko Alim – Ph.D., Professor of Fluid Dynamics Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk: Scientific interests: mathematical modeling of hydro-

mechanical processes in hydraulic actuators of different function, processes warm and a mass exchange.

Gusentsova Yana – Doctor of Technical Sciences, professor, Chief of the department technology and organization of building production of Lugansk National Agrarian University, c. Lugansk. Scientific interests: mathematical modeling of hydromechanical processes in hydraulic actuators of different function, modeling and calculation of ventilating systems of the industrial enterprises and buildings, questions of regulation of processes warm and a mass exchange .

Chubarova Irina – a Postgraduate Student of the Department Fluid Dynamics Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: mathematical modeling of hydromechanical processes in hydraulic actuators of different function.

Andriychuk Nickholay – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: mathematical modeling of hydromechanical processes in hydraulic actuators of different function, modeling and calculation of ventilating systems of the industrial enterprises.

Pilavov Manolis – Ph.D, Associate professor of the department ventilation, Heat and Water Supply Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: mathematical modeling of hydromechanical processes in hydraulic actuators of different function. Modeling of processes warm and mass exchange.

*Статья поступила
15 февраля 2017 г.*

© Коваленко А.А., Гусенцова Я.А., Чубарова И.А. 2017

УДК 621.01: 62-883

Брешев В.Е.

АСПЕКТЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРИВОДОВ БЕСКОНТАКТНОГО ТИПА

Breshev V.E.

STRUCTURAL SYNTHESIS OF ENERGY SAVING NON-CONTACT DRIVES ASPECTS

Предложен новый подход к проектированию приводов бесконтактного типа для машин различного назначения, основанный на алгоритме структурного синтеза. На примере динамических насосов и станков резки монокристаллов обосновано наличие типовых структурных элементов, сформулированы их признаки, требования к порядку взаимодействия и месту в структурной схеме приводов. Показан обобщенный алгоритм структурного синтеза бесконтактных приводов с вращательным, поступательным или пространственным движением рабочих органов, повышающий эффективность поиска технических решений и процесса проектирования в целом.

Ключевые слова: бесконтактный привод, рабочие органы, алгоритм, структурный синтез.

Введение

Одним из эффективных путей решения комплексной задачи совершенствования машин является использования бесконтактных прямых приводов рабочих органов (РО) машин. Исключение твердотельного механического контакта делает приводы не только более энергоэффективными, но и ресурсосберегающими. Снижение потерь на трение и износа поверхностей сопровождается уменьшением общего количества деталей, массы движущихся узлов и всего привода, снижением себестоимости, повышением производительности и надежности машин.

В машиностроении прямые приводы находят все более широкое применение. Внедрение новых технических решений, использование автоматизированных систем управления позволили современным прямым приводам, во многих случаях, заменить приводы традиционных конструкций – с механическими передачами и опорами. В современном пря-

мом приводе достигнуто многократное увеличение крутящего момента (до 15 000 Нм) и усилий при поступательном движении (до 10 000 Н), а также высокие окружные скорости – до 50 м/с в силовых и 300 м/с в высокоскоростных приводах, устойчивость движения и микрометрическая (до 1...3 мкм) точность позиционирования РО [1, 2].

Цель работы является исследование основных аспектов структурного синтеза бесконтактных приводов РО для машин различного назначения. Теоретически обосновать наличие типовых структурных и конструктивных элементов, определить их признаки, конструктивно-технологические особенности и место в структурной схеме привода, разработать обобщенный алгоритм его структурного синтеза.

Постановка задачи

При внешней простоте бесконтактного привода, его подвижный элемент – РО – многофункционален. Например, в станке резки монокристаллов он одновременно является режущим инструментом, вторичным элементом электрической машины (двигателя), ротором газодинамической опоры, импеллером [3]. При этом силовое взаимодействие в приводе происходит без твердотельного механического контакта и, часто, на высоких скоростях относительного движения, а силовой поток идет по наиболее короткому пути [4, 5]. Такая сложность и многофакторность условий, реализуемых при проектировании бесконтактного привода, требует определения общих принципов построения его структуры, разработки обобщенного алгоритма структурного синтеза приводов для машин различного назначения.

Результаты исследования

Определим основные принципы построения структуры бесконтактного привода, состав и условия взаимодействия элементов его структуры при функционировании. Будем исходить из принципиальных отличий, которые имеет бесконтактный привод в сравнении с приводами, использующими механическую связь для приведения в движение и фиксации в пространстве (удержании на требуемой траектории) РО.

1. Отличительной особенностью бесконтактного привода является отсутствие механической связи РО с неподвижной частью привода. В рабочем пространстве привода, где размещается РО, формируется поле потенциальных сил различной природы, которые приводят его в движение и удерживают в пространстве. Таким образом, между статической частью привода и движущимся РО существует упругая силовая связь, которую можно рассматривать как некоторый виртуальный упругий объект. Эта связь бесконтактно выполняет двуединую задачу – приводит в движение и удерживает в пространстве подвижный узел – РО.

2. Движение РО создается действием на него движущих сил (для поступательного движения) или крутящего момента от движущих сил (для вращательного). Устойчивость положения подвижного элемента обеспечивается составляющей главного вектора этих сил, которая представляет собой восстанавливающую упругую силу (ВУС). Она, совместно с демпфирующими силами сопротивления среды, обеспечивает устойчивость движущегося РО при действии на него технологических сил, случайных или систематических внешних возмущений. Фактически ВУС определяет и жесткость бесконтактной опоры РО в приводе.

Обобщенная структурная схема бесконтактного прямого привода поступательного движения показана на рис. 1.

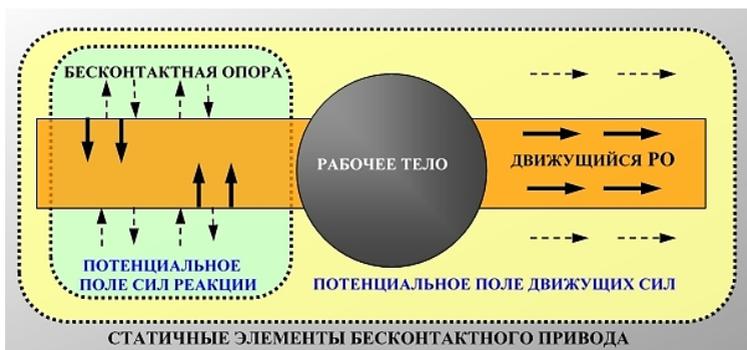


Рис. 1. Структурная схема бесконтактного привода РО машины

3. Бесконтактный привод работает в условиях отсутствия механического контакта движущегося РО с неподвижными деталями привода и машины. Конструктивно данное положение требует обеспечения в рабочем пространстве зазоров, достаточных для надежного разделения РО с неподвижными элементами привода жидкой или газообразной средой.

4. Полезная работа выполняется в процессе контакта РО с рабочим телом (рис. 1.). Это означает, что в бесконтактном приводе должны быть созданы условия для подведения рабочего тела к движущемуся РО и отведения от него, не нарушая устойчивости движения. В случае динамических насосов, центробежных компрессоров и турбодетандеров рабочим телом является жидкость или газ, которые подводятся вдоль оси вращения рабочего колеса с противоположных сторон. Это создает приблизительно симметричную и уравнивающуюся нагрузку на РО. Структурный прототип РО (центробежного колеса) бесконтактного привода для динамического насоса показан на рис. 2.

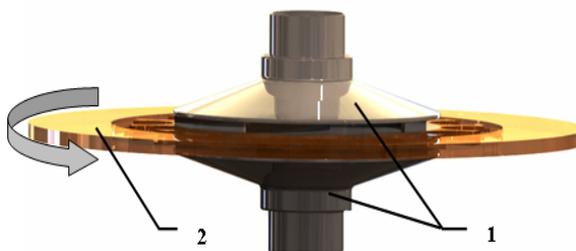


Рис. 2. Структурный прототип РО центробежного насоса

Подведение жидкости осуществляется вдоль оси вращения двояного рабочего колеса **1** центробежного насоса, а соединенное с ним спицами медное кольцо **2** создает крутящий момент и УВС (электродинамической и гидродинамической природы), которая удерживает РО в требуемом положении. Отводится жидкость по периферии РО. Использование симметричной конструкции рабочего колеса с двусторонним осевым входом жидкости позволяет уравновесить осевые силы и обеспечить его «левитацию» в потоке перекачиваемой жидкости.

5. Силы, которые создают движение и удерживают РО, могут иметь гидро-, аеро-, или электродинамическую природу, но обязательно распределены в рабочем пространстве привода особым образом для обеспечения гарантированных зазоров между движущими и неподвижными узлами. В станках резки движущими являются силы электродинамической природы. Рабочими органами являются алмазные круги с внутренней режущей кромкой. Монокристалл (рабочее тело) также подается по центру, но при резании смещается к периферии (рис. 3.).

6. Приложение движущих сил к РО в условиях отсутствия твердотельного механического контакта позволяет исключить из конструкции бесконтактных приводов валы на подшипниках, а это существенно упрощает структуру и конструкцию привода, уменьшает массу и габариты. Отсутствие механической передачи сил дает возможность отделить РО, в данном случае рабочее колесо насоса, от неподвижной части машины сплошной герметичной стенкой. Выполнение полезной работы в изолированной от остальной машины среде дает существенные преимущества в надежности и безопасности для динамических насосов. В [3] описана конструкция и принцип действия такого центробежно-вихревого насоса с бесконтактным приводом рабочего колеса (рис. 4.).

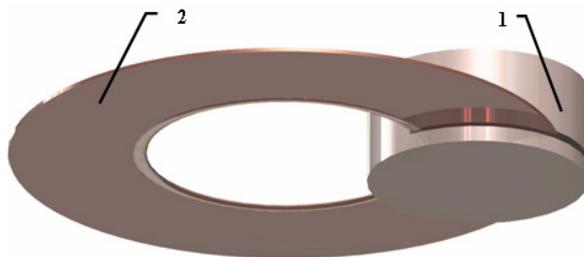


Рис. 3. Резка монокристалла 1 алмазным кругом 2 с внутренней режущей кромкой

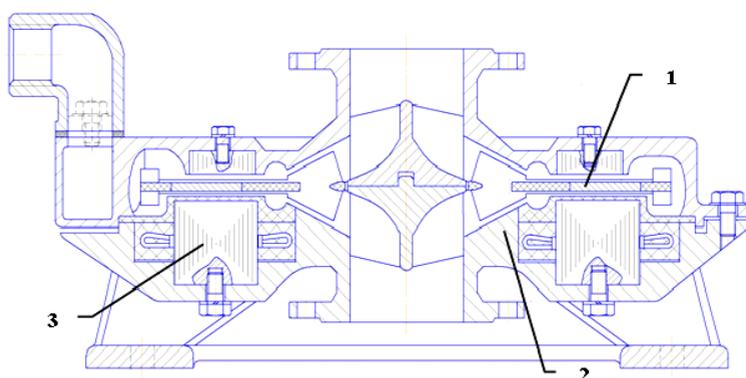
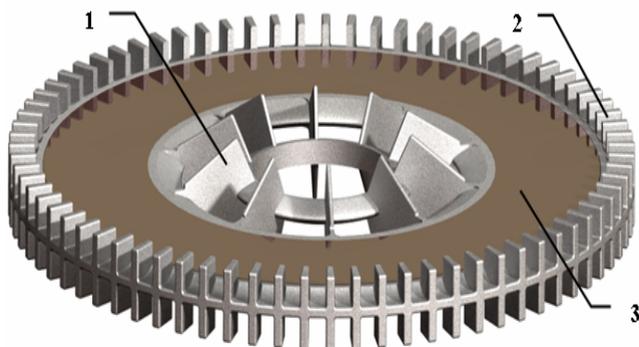


Рис. 4. Центробежно-вихревой насос с бесконтактным поводом рабочего колеса

Насос имеет высокие показатели герметичности, надежности и безопасности, потому что не содержит вала с подшипниками и уплотнений между движущимися поверхностями. Его рабочее колесо 1 приводится во вращение без механической связи с корпусом 2 и источником поля электродинамических движущих сил 3, при вращении оно всплывает в потоке перекачиваемой жидкости.

7. РО в бесконтактном приводе выполняет двойную функцию – создает и воспринимает движущие силы с УВС, а также выполняет полезную работу при взаимодействии с рабочим телом. Поэтому и структурно



РО состоит также из двух частей. Условно, в соответствии с выполняемыми функциями, их можно назвать силовой и технологической структурными частями. Данное разделение на структурные части покажем на примере колеса центробежно-вихревого насоса (см. рис. 4.), трехмерная модель которого представлена на рис. 5.

Рис. 5. Рабочее колесо центробежно-вихревого насоса

Его технологическая часть составлена из двух гидравлических ступеней – центробежной **1**, расположенной с внутренней стороны, и вихревой – **2**, расположенной по внешнему кольцу. Силовая структурная часть рабочего колеса представлена медным кольцом **3** между ними.

8. Движущие силы и ВУС не передаются механически, а формируются на РО при нахождении его в потенциальном силовом поле электромагнитной или иной природы. Распределение в рабочем пространстве бесконтактного привода движущих сил определяет закон движения РО, мощность на нем и устойчивость движения при функционировании.

Основываясь на изложенных выше принципах функционирования и особенностях конструкции бесконтактных приводов, определим обобщенный алгоритм их структурного синтеза. Он применим для приводов и машин различного назначения – вентиляторов, динамических насосов, станков резки монокристаллов, турбодетандеров и др. [3]. В работе [5], на его основе, показан синтез бесконтактного высокоскоростного пневмошпинделя на конических аэростатических опорах. Алгоритм поиска вариантов структуры базируется на сформулированных в техническом задании основных технических характеристиках разрабатываемого привода, заданном характере движения РО, намеченных путях получения новых технико-технологических качеств привода. После выбора канонической формы подвижного элемента, которым является рабочий орган машины,

определяются структура его технологической части, а затем силовой части и структура распределения потенциальных движущих сил с ВУС, которые должны обеспечить устойчивое движения РО при выполнении полезной работы (рис. 6.).

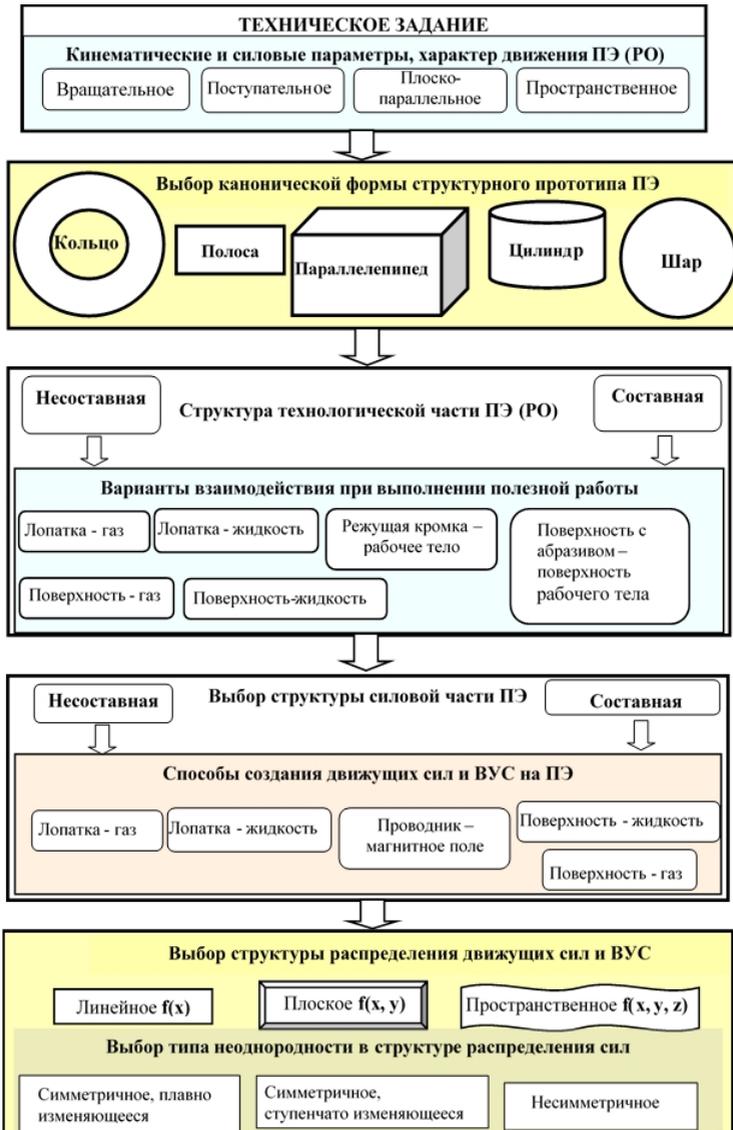


Рис. 6. Обобщенный алгоритм структурного синтеза бесконтактного привода

Выводы

Раскрыты аспекты нового подхода к проектированию ресурсосберегающих бесконтактных приводов для машин различного назначения – насосов, станков резки монокристаллов, компрессоров и др., который базируется на обобщенном алгоритме структурного синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. INA – Drives & Mechatronics GmbH & Co.ohg [Электронный ресурс] / предприятие Schaeffler Gruppe Industrie. Режим доступа: <http://www.schaefflerrussland.ru/>.

2. Космынин А.В. Петров М.Р., Шпиндели на газовых сопротивлениях – перспективный путь развития высокоскоростной обработки металлов // Современные проблемы науки и образования. 2006. №6. С. 47-48.

3. Брешев В.Е. Развитие теории и методов проектирования приводов бесконтактного типа с комбинированным и пассивным обеспечением устойчивости: монография. Изд-во Луганского университета им. В. Даля, 2015. 261 с.

4. Орлов П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие в 3 кн. / под ред. П.Н. Учаева. – 3-е изд. М.: Машиностроение, 1988. Кн.1. 559 с.

5. Брешев В.Е. Разработка пневмошпинделя на регулируемых конических аэростатических опорах различной геометрии // Вестник Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля. 2013. № 15(204). Ч.3. С. 229–232.

Breshev V. E. New approach to creating non-contact drives for working bodies of machines of different purpose based on structural synthesis was suggested. The example of dynamic pumps and single-crystal cutting machine grounded the existence of typical structural elements, also its signs as well as order demands interaction and place in the block diagram of drives were stated. Generalized algorithm of structural synthesis for non-contacts drives with rotary, progressive and spatial motion of working bodies, enhancing technical solutions efficiency of search and overall design process was shown.

Keywords: non-contact drive, working bodies, algorithm, structural synthesis.

Брешев Владимир Евгеньевич. – кандидат технических наук, доцент Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: машиноведение, бесконтактные приводы машин.

e-mail: veb_lug@mail.ru

Breshev Vladimir – candidate of technical sciences, associate professor of Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: machine science, non-contacts drives.

*Статья поступила
6 февраля 2017 г.
© Брешев В.Е., 2017*

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 621.389 (539.231)

Савицкий И.В., Войтенко В.А.

**СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ,
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ
ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК**

Savitsky I.V., Voytenko V.A.

**METHOD OF OBTAINING THE CURRENT-VOLTAGE
CHARACTERISTICS OF THE THIN MONOCRYSTALLINE,
POLYCRYSTALLINE AND AMORPHOUS CONDUCTIVE
FILMS**

Предложен способ и устройство для получения вольтамперных характеристик тонких проводящих пленок. Выполнено моделирование электрической схемы в среде Multisim. Создано программное обеспечение для микроконтроллера и планшетного компьютера, обеспечивающее автоматизацию цикла измерений, калибровки, обработки данных, сохранения данных и их отображения на экране планшетного компьютера. Изготовлен измерительный комплекс и проведены его испытания и калибровки с применением эталонных образцов с известными характеристиками.

Ключевые слова: тонкая проводящая пленка, вольтамперная характеристика, измерительный комплекс, планшетный компьютер.

Введение

При исследовании свойств тонких проводящих пленок как хорошо известных, так и новых, перспективных материалов, часто требуется контроль их вольтамперных характеристик [1-3]. Необходимость такого контроля при изготовлении тонких пленок связана с тем, что даже незначительные изменения технологического процесса могут привести к изменению электрофизических свойств получаемых пленок. Поскольку специализированных измерительных приборов для таких измерений промышленностью не выпускается, а существующие характеристики громоздки и дорогостоящи, актуальной является научно-техническая задача разра-

ботки аппаратно-программного измерительного комплекса для автоматизированного снятия вольтамперных характеристик тонких проводящих пленок на основе планшетного компьютера и смартфона.

Исследователями электрофизических свойств материалов в основном используются стандартные измерительные приборы, такие как источники постоянного тока и цифровые вольтметры. При этом процесс снятия вольтамперной характеристики тонкой пленки достаточно длителен и неточен, что связано с контактными явлениями в процессе измерений, изменением температуры образца и существенной для таких измерений погрешностью измерительного прибора [2,3]. В некоторых случаях для снятия вольтамперных характеристик тонких пленок используются автоматизированные характериографы, предназначенные для снятия вольтамперных характеристик полупроводниковых приборов [4]. Однако такие приборы весьма громоздки и имеют высокую стоимость. Несмотря на то, что современные характериографы могут быть подключены к персональному компьютеру и таким образом могут быть включены в измерительный комплекс с возможностью сохранения данных, такие комплексы практически не встречаются в исследовательской практике.

Целью исследований является разработка способа и сравнительно простого и дешевого измерительного комплекса для снятия вольтамперных характеристик тонких пленок на основе универсального вычислительного устройства, такого как стационарная ЭВМ, ноутбук, планшетный компьютер, смартфон.

Методика исследований

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: выбран способ снятия вольтамперных характеристик; разработана функциональная блок-схема измерительного комплекса; разработана принципиальная электрическая схема измерительной части комплекса и микропроцессорной части; разработаны алгоритмы цикла измерений, передачи и обработки данных; созданы программы на языке высокого уровня (C++, Java) под операционные системы Android и Windows; изготовлена электронная часть комплекса, проведены его испытания и калибровки.

Для снятия вольтамперных характеристик тонких проводящих пленок могут быть использованы два способа. Первый, наиболее широко применяемый способ, основан на изменении по известному закону напряжения на исследуемом образце с одновременным измерением тока через образец. Второй, редко применяемый способ, основан на изменении по известному закону тока через образец с одновременным измерением падения напряжения на образце. В последнем случае для измерения напряжения не требуется наличия дополнительных элементов, что упрощает электрическую схему и повышает точность измерений, а также поз-

воляет снимать вольтамперную характеристику проводящей пленки с нуля. Это важно, потому что особенности вольтамперных характеристик пленок могут проявляться при очень малых значениях тока через пленку-образец. Схематически проще осуществить изменение тока через образец с нуля до некоторого максимально значения. Использование источника тока с изменяющимся по экспоненциальному закону током удобно для применения операционного усилителя в качестве усилителя напряжения на образце. Измерительный комплекс для снятия вольтамперных характеристик тонких пленок построен согласно функциональной блок-схеме (рис. 1).

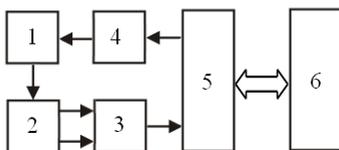


Рис. 1. Функциональная блок-схема измерительного комплекса: 1 – источник экспоненциально нарастающего тока; 2 – исследуемая пленка-образец; 3 – измерительный усилитель; 4 – электронный ключ; 5 – микроконтроллер; 6 – планшетный компьютер или смартфон

Согласно функциональной блок-схеме (рис. 1) разработана принципиальная электрическая схема измерительной части комплекса и проведено ее имитационное моделирование в среде Multisim. Результаты моделирования подтвердили правильность выбранных схемных решений и выбранного способа снятия вольтамперных характеристик тонких проводящих пленок, а также правильность выбора операционного усилителя LM 358 для усиления напряжения на образце. Для выполнения автоматизации процесса снятия вольтамперной характеристики и передачи результатов в планшетный компьютер был выбран микроконтроллер ATmega 8, имеющий необходимый объем программной памяти и требуемые функциональные блоки.

Согласно функциональной блок-схеме измерительного комплекса (рис. 1) по запросу планшетного компьютера 6 микроконтроллер 5 иницирует цикл измерений. Для этого при помощи электронного ключа 4 источник экспоненциально нарастающего тока 1 начинает увеличивать с нуля ток через пленку-образец 2. Одновременно с увеличением тока падение напряжения на образце усиливается операционным усилителем 3, с выхода которого электрический сигнал поступает на вход десятиразрядного аналого-цифрового преобразователя, входящего в состав микроконтроллера ATmega 8 в качестве функционального блока. Возможно проведение нескольких циклов измерений подряд с целью усреднения

результатов. Один цикл измерений включает в себя 500 последовательных измерений с интервалом в 0,1 секунды. Первое измерение проводится при нулевом значении тока через образец, а последнее при максимальном токе, который устанавливается с учетом омического сопротивления образца, зависящего от материала и толщины пленки.

По линейному участку вольтамперной характеристики для заранее исследованных материалов и размеров образцов рассчитываются омическое сопротивление пленки и ее толщина. Контроль толщины пленки, сопротивления и вольтамперной характеристики осуществляется непосредственно в процессе получения пленки вакуумным термическим напылением. При достижении заданных характеристик комплекс сигнализирует о необходимости закрытия заслонки с целью прекращения процесса вакуумного напыления или для смены образца.

Внешний вид электронной части измерительного комплекса показан на рис. 2.

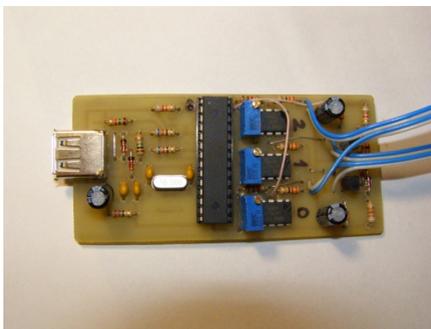


Рис. 2. Печатная плата измерительного комплекса

Прототип собран с использованием стандартных электронных комплектующих для удобства проверки и доработки. Однако использование радиоэлементов в корпусах smd или в бескорпусном исполнении позволит уменьшить размеры, вес и стоимость измерительной части комплекса в 5-7 раз, что в 1000 раз дешевле, легче по весу и меньше по габаритам по сравнению со стандартным характериографом, рыночная стоимость которого составляет около 150000 руб.

Результаты исследований

Калибровка разработанного измерительного комплекса проводилась при помощи высокоточных сопротивлений, а также объемных и пленочных образцов с известными вольтамперными характеристиками. Погрешность измерений зависела от омического сопротивления образцов. Для

образцов с сопротивлением до 400 Ом погрешность измерений составляла 1-2%, для образцов с сопротивлением более 1 кОм – до 3%. Увеличение погрешности измерений с ростом сопротивления образцов связано с тем, что источник экспоненциально нарастающего тока незначительно уменьшает величину тока при работе с высокоомными образцами. Поэтому, для повышения точности измерений и расширения диапазона сопротивлений, с которыми может работать измерительный комплекс, предусмотрена корректировка диапазона изменения экспоненциально нарастающего тока в зависимости от диапазона сопротивлений образцов. Для этого достаточно изменить сопротивление резистора, входящего в состав источника экспоненциально нарастающего тока. Высокая повторяемость результатов повторных измерений позволяет путем усреднения результатов серии повторных измерений снизить погрешность дополнительно на 0,5% при 5 повторных измерениях. Дальнейшее увеличение числа повторных измерений не способствует снижению погрешности измерений.

Для одинаковых типоразмеров можно по сопротивлению образца определить толщину пленки в диапазоне толщин от 3...50 мкм с точностью 0,5 мкм что быстрее и проще, чем использовать метод эллипсометрии, если не требуется большая точность. Геометрия образца и омическое сопротивление пленки при этом должны удовлетворять указанным выше требованиям.

Испытания измерительного комплекса совместно с планшетным компьютером, ноутбуком и персональной ЭВМ показали возможность его использования в лабораторных условиях и в условиях производства. Предварительные исследования тонких, не более 1 мкм, оптически прозрачных пленок на основе халькогенидов и халькогенидных стекол, имеющих аморфную структуру, полученных путем термического испарения в вакууме и путем ионно-плазменного распыления на соответствующих вакуумных постах, позволили получить их ампер-вольтные характеристики (рис. 3). Использование экспоненциально нарастающего тока через исследуемые образцы пленок позволило получить так называемые S-образные зависимости напряжения на образце от величины протекающего тока.

На графической зависимости (рис. 3, а) наблюдается участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением (0,1...0,38 мА), на рис. 3, б наблюдаются два участка с практически неизменной проводимостью, причем один из них – с отрицательной дифференциальной проводимостью. Такие свойства тонких пленок перспективны для создания радиационно стойких электронных компонентов, работающих в диапазоне температур от -180 до 180°C, который существенно шире, чем рабочий диапазон полупроводниковых приборов на основе кремния. Также на основе пленок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, в сочетании с пленками из диэлектриков и металлов, могут быть разработаны пер-

спективные приборы, работающие на туннельном эффекте, в которых электроны преодолевают тонкий, около 50нм, слой диэлектрика. Такие структуры, в сочетании с вакуумом, могут быть использованы в качестве

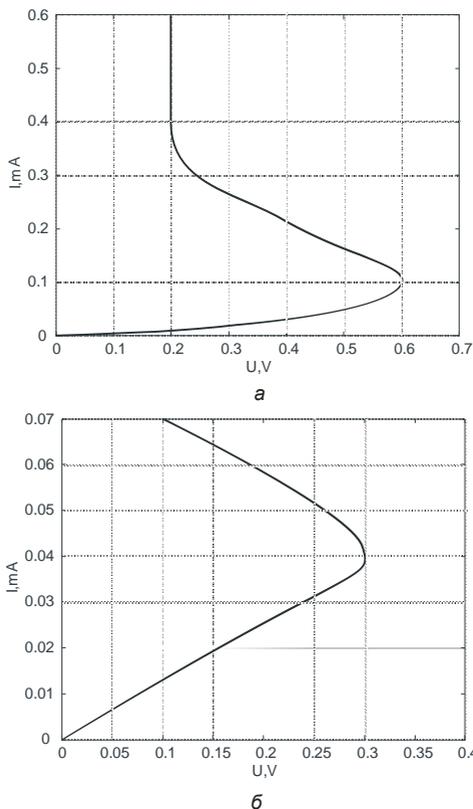


Рис. 3. Ампер-вольтные характеристики тонких аморфных пленок халькогенидов

холодных катодов с большими эмиссионными токами, что перспективно для построения телевизионных панелей и микровакуумной электроники высокой радиационной стойкости для применения в автоматике реакторов и системах управления космическими аппаратами. Способствовать продолжению исследований в этом направлении будет разработанный измерительный комплекс.

Выводы

1. Предложенный способ использования экспоненциально нарастающего тока через пленку-образец для снятия его вольтамперной характе-

ристики практически реализован на базе разработанного измерительного комплекса.

2. Разработанный измерительный комплекс позволяет снимать вольт-амперные характеристики проводящих пленок в диапазоне толщин от 3 до 50 мкм и диапазоне сопротивлений до 10кОм.

3. Аппаратно-программная реализация измерительного комплекса допускает его работу совместно со смартфоном, планшетным компьютером, ноутбуком и персональной ЭВМ.

4. Ожидаемая точность измерений 1-3% может быть улучшена на 0,5% при усреднении результатов не менее пяти повторных циклов измерений. Измерение вольт-амперной характеристики, омического сопротивления и толщины пленки может происходить как после, так и в процессе ее вакуумного напыления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хубатхузин А.А., Абдуллин И.Ш., Христолюбова В.И. Особенности измерения физико-механических свойств нанопокровтий // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №2. Т.17. С. 39-42.

2. Годжаев Э.М., Улькар А.С., Кулиева С.О. Вольт-амперная характеристика InGaTe_2 // Известия Томского политехнического университета. 2015. №5. Т.326. С. 11-18.

3. Русских Е.А., Рембеза С.И., Рембеза Е.С. Измерения вольт-амперных характеристик тестовых структур на основе тонких пленок $\text{SnO}_2 + 1\% \text{ Si}$ // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. №10-1. Т.8. С. 67-72.

4. Хорошко В.В., Цырельчук И.Н., Гременок В.Ф. Солнечные элементы с $\text{Cu}_x\text{In}_x\text{Zn}_{2-2x}\text{Se}_2$ поглощающим слоем // Проблемы физики, математики и техники. 2015. Вып. 4(25). С. 41-44.

Savitsky I.V, Voytenko V.A. Method of obtaining the current-voltage characteristics of the thin monocrystalline, polycrystalline and amorphous conductive films.

Proposed the method and the device for obtaining the current-voltage characteristics of the thin monocrystalline, polycrystalline and amorphous conductive films. Proposed the schematic diagram of the electronic measurement of the complex for the study of the current-voltage characteristics of the thin conductive films. Done the modeling of the electrical circuit in the Multisim environment. Created the software for the microcontroller and the tablet computer that provides automated measurement cycle, calibration data, store data and display them on screen tablet computer. Made the measuring system and conducted its testing and calibration using standard samples with known characteristics. We discuss some of the results of measuring complex.

Keywords: thin conductive film, current-voltage characteristic, measurement system, tablet computer.

Савицкий Иван Викторович – преподаватель-стажёр кафедры микро- и наноэлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: получение и исследование материалов.

e-mail: ivan-savitskiy@mail.ru

Войтенко Владимир Афанасьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: разработка новых методов и приборов исследования материалов и технологических процессов.

e-mail: ylvoytenko@gmail.com

Savitsky Ivan – trainee teacher of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: obtaining and study materials.

Voytenko Vladimir – Ph.D. (Eng), Docent of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: developing of new methods and devices for the study of materials and processes.

Статья поступила

13 февраля 2017 г.

© Савицкий И.В., Войтенко В.А., 2017

УДК 621.389

Войтенко В.А., Войтенко Г.О.

ПОРТАТИВНЫЙ ОЗОНОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА

Voytenko V.A., Voytenko G.O.

PORTABLE OZONOMETER FOR MEASUREMENTS OF THE CONCENTRATIONS OF OZONE

Обсуждается проблема создания дешевого портативного озонометра на базе планшетного компьютера, предназначенного для измерений атмосферного озона. Предложено электронное измерительное устройство, в состав которого входит оптическая головка с набором светофильтров и экспериментальный полупроводниковый приемник большой площади, слепой в видимой области спектра. Устройство является приставкой к планшетному компьютеру с типовыми техническими характеристиками. Показана возможность использования разработанного электронного озонометра для мониторинга вариаций концентрации озона.

Ключевые слова: портативный озонометр, планшетный компьютер, электронное измерительное устройство, светофильтры, полупроводниковые фотодиоды.

Введение

Методы прямого измерения концентрации атмосферного озона не нашли широкого применения, поэтому концентрацию озона измеряют косвенно, путем расчетов. Для этого используют линии поглощения озона в оптическом излучении Солнца. Могут использоваться одновременно или по очереди от одной до трех линий поглощения озона. После измерения величины поглощения озона на разных длинах волн путем расчетов определяется концентрация атмосферного озона [1,2]. До настоящего времени используется отечественный озонометр М124, который морально и технически устарел и фактически не подлежит существенной модернизации. Импортные аналоги имеют высокую стоимость, поэтому не могут быть закуплены в достаточном количестве. Однако, динамически развивается в основном электронная часть озонометров, оставляя без особых изменений оптическую часть. Таким образом, на базе отечественной оптики может быть создан портативный озонометр – приставка к планшетному

компьютеру, что является наиболее гибким и перспективным решением на данный момент, способным решить актуальную научно-техническую задачу обеспечения измерений атмосферного озона дешевыми отечественными озонόμεтрами.

В настоящее время функционирует в штатном режиме международная научно-исследовательская сеть мониторинга атмосферы [3]. Исследования базируются на космических аппаратах, находящихся на околоземной орбите. Данные спутников содержат значительную информацию об оптических свойствах атмосферы Земли, содержании в атмосфере аэрозолей природного и техногенного происхождения, водяного пара, углекислого газа, метана, других газов и озона. Космические измерения имеют глобальный характер, то есть охватывают всю поверхность земного шара с разрешением до одного километра. Несмотря на важность такого глобального мониторинга, его точность ниже точности наземных измерений. К тому же, измерения из космоса требуют постоянных калибровок по наземным данным. Сеть наземных мониторинговых станций оснащена в основном роботизированными солнечными фотометрами SIMEL318, которые также измеряют концентрацию озона в толще атмосферы. Данные приборы производятся компанией SIMEL (Франция). Также для подобных целей сеть оснащена и портативными приборами для измерений в полевых условиях, в труднодоступных местах, морях и океанах, в Арктике и Антарктике. Это приборы SIMEL317 (Франция) и MICROTOSPII (США). На протяжении последних 50 лет эти страны являются лидерами в производстве оптических приборов для целей мониторинга атмосферы Земли, поэтому они имеют самые длинные непрерывные ряды данных измерений оптических плотностей атмосферы по всему миру [4].

Для преодоления отставания отечественной науки в мониторинге концентрации атмосферного озона, вариаций концентрации которого связаны как с природными явлениями, так и с техногенными факторами, необходимо оснащение измерений концентрации атмосферного озона современными озонόμεтрами отечественного производства [5]. Перспективной является как модернизация старых озонόμεтров серии M124 для продолжения существующих рядов данных, так и применение новых разработок, включая озонόμεтры – приставки к планшетным ПК.

Целью работы является разработка электронного озонόμεтра на базе планшетного компьютера, предназначенного для оснащения измерений концентрации атмосферного озона.

Методика исследования

В портативных озонόμεтрах применяются интерференционные светофильтры, в которых тонкие оптические пленки сочетаются с цветными

оптическим стеклами. Такие фильтры обеспечивают узкую полосу пропускания в пределах 5...10 нм. Для определения оптических толщин озона в атмосфере Земли выбирают полосы длин волн, в которых поглощение другими газами и водяным паром либо отсутствует, либо минимально. Это очень узкие полосы, поэтому для измерения величин поглощения оптического излучения Солнца атмосферным озоном наилучшим образом подходят узкополосные интерференционные фильтры. Однако даже в этом случае невозможно исключить влияние поглощения других газов и аэрозолей, входящих в состав атмосферы, если использовать только одну полосу длин волн для проведения измерений. Поэтому в большинстве случаев используют две полосы длин волн для измерения оптических толщин озона. Далее путем расчетов устраняется влияние других газов и аэрозолей, связанное с поглощением ими ультрафиолетового излучения в пределах полос, на которых проводились измерения. Иногда используется третий светофильтр с широкой полосой пропускания, перекрывающей обе узкие полосы. По поглощению ультрафиолета в пределах этой полосы вводится дополнительная поправка в результаты расчетов оптической толщины озона, либо принимается решение о том, что данное измерение не является адекватным и должно быть исключено из рядов данных.

Интерференционные светофильтры еще удобны тем, что они легко согласуются с большинством полупроводниковых измерительных фотодиодов на основе монокристаллического кремния. Эти фотодиоды чувствительны в широком диапазоне длин волн от ультрафиолета до инфракрасного излучения. Мировым лидером в производстве измерительных фотодиодов является фирма Hamamatsu (Япония). Узкополосные интерференционные фильтры имеют только одну узкую полосу пропускания, поэтому в других диапазонах практически не пропускают оптического излучения. Их недостатком является высокая стоимость, порядка 500\$. Светофильтры на основе цветных стекол могут также иметь узкую полосу пропускания в ультрафиолетовом диапазоне длин волн. Но они прозрачны в видимом и инфракрасном диапазонах. Поэтому узкополосные фильтры в области ультрафиолетового диапазона длин волн только на основе цветных стекол неприменимы с полупроводниковыми фотоприемниками на основе кремния. Для этого ранее использовались вакуумные фотоприемники на основе внешнего фотоэффекта, некоторые из них нечувствительны в видимой и инфракрасной областях спектра. Красная граница внешнего фотоэффекта таких фотоприемников находится в области длинноволнового ультрафиолета. Фильтры на основе цветных стекол дешевле более чем в 10 раз, чем интерференционные фильтры, комбинированные с цветными стеклами. Однако вакуумные фотоприемники отечественного производства достаточно дороги и главное, имеют большие габариты и достаточно сложную электронную периферию. Фирма Hamamatsu выпускает контактные и сравнительно дешевые вакуумные фотоприемники,

слепые в видимой области спектра. Однако их использование усложняет электронную часть озонометра.

В данной работе успешно решается задача разработки малогабаритного портативного и дешевого озонометра для стационарных и полевых измерений, предназначенного для совместной работы с типовым планшетным компьютером или смартфоном. Предполагается, что питание озонометра будет осуществляться через USB интерфейс от планшетного компьютера или смартфона. Таким образом, озонометр должен иметь минимальное энергопотребление при минимально возможных габаритах и весе, причем вес озонометра сопоставим с весом, например, смартфона. Анализ возможных функциональных электронных и оптических схем построения прибора показал, что применение узкополосных интерференционных светофильтров совместно с кремниевыми фотодиодами существенно удорожит его конструкцию. Применение дешевых светофильтров на основе цветных оптических стекол совместно с вакуумными фотоприемниками усложнит электронную часть прибора и увеличит его вес и габариты. Компромисс найден путем использования экспериментальных фотодиодов, слепых в видимой и инфракрасной областях спектра, созданных в НПО «Квант» на основе новых полупроводниковых материалов. В этом случае удастся обеспечить малую стоимость озонометра в сочетании с малым энергопотреблением, малыми размерами и весом устройства.

Результаты исследований

Функциональная блок-схема разработанного электронного озонометра (рис. 1) состоит из узкополосных фильтров 1 и 2 на основе цветных стекол, соответственно, первого и второго канала измерений; полупроводниковых фотодиодов 3 и 4, слепых в видимой и инфракрасной областях спектра; усилителей 5 и 6 с управляемым коэффициентом усиления; микроконтроллера 7 и планшетного компьютера 8. Работа устройства осуществляется путем взаимодействия микроконтроллера 7 и планшетного компьютера 8 при помощи специального программного обеспечения. Измерения выполняются в двух режимах. В первом режиме регистрируется величина оптических потоков в двух оптических полосах поглощения озона непосредственно при регистрации прямого солнечного излучения. В этом случае оптическая ось озонометра направлена на Солнце.

Во втором режиме измеряется поток рассеянного атмосферой Земли ультрафиолета. В этом случае оптическая ось озонометра направлена в зенит. Учитывая, что поток рассеянного ультрафиолета в десятки раз меньше, чем в направлении на Солнце, коэффициенты усиления усилителей 5 и 6 (рис. 1) переключаются микроконтроллером 7 по команде планшетного компьютера 8.

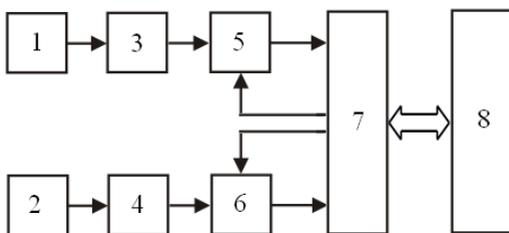


Рис. 1. Функциональная блок-схема электронного озонметра: 1,2 – узкополосные фильтры; 3,4 – полупроводниковые фотодиоды; 5,6 – усилители с управляемым коэффициентом усиления; 7 – микроконтроллер; 8 – планшетный компьютер

Согласно предложенной функциональной блок-схеме был изготовлен прототип электронного озонметра (рис. 2). Прототип изготовлен с использованием стандартных радиодеталей низкой стоимости. Применение радиодеталей в SMD исполнении позволит снизить стоимость прототипа еще на 20%, а вес и габариты уменьшить в 3 раза. Однако на стадии доводки и испытаний прототипа применение радиокомпонентов в SMD исполнении усложняет доработку конструкции и оправдано для применения в окончательном варианте электронного устройства.

Калибровка разработанного озонметра осуществлялась путем сравнения результатов измерения оптических толщин с данными синхронных измерений, полученных при помощи фотометра-озонметра MICROTOP-II (рис. 3).

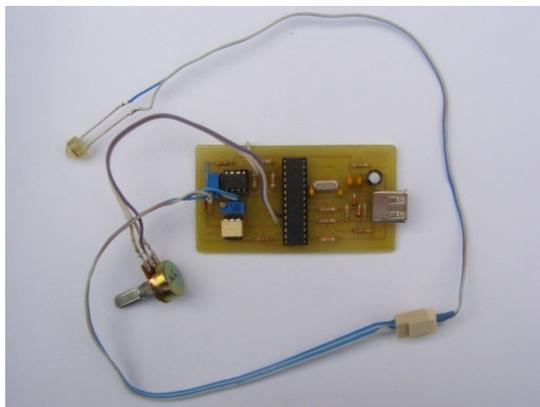


Рис. 2. Прототип электронного озонметра



Рис. 3. Фотометр-озонметр MICROTOPSII

Результаты калибровки показали, что рассогласование между данными при измерениях в направлении на Солнце составляет около 3%. Калибровка разработанного озонметра в направлении оптических осей в зенит осуществлялась при помощи отечественного озонметра M124, так как MICROTOPSII в таком режиме не проводит измерения оптических толщин.

Результаты сравнения данных синхронных измерений оптических толщин при помощи разработанного прибора и озонметра M124 показали рассогласование данных в среднем в пределах 5%. Также были проведены испытания разработанного электронного устройства в термостате в диапазоне температур от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

В качестве источника оптического излучения использовалась лампа накаливания в колбе из кварцевого стекла с яркостной температурой 6000K. Испытания показали высокую стабильность показаний разработанного прибора. При этом измеренные при разных температурах значения потока оптического излучения эталонной лампы накаливания отличались менее чем на 2%. Для улучшения данного показателя было решено ввести в конструкцию озонметра терморезистор для компенсации температурного дрейфа усилителей и дрейфа чувствительности полупроводниковых фотодиодов. В результате прототип портативного озонметра продемонстрировал рассогласование с эталонным прибором до 4%, соответствующее большинству зарубежных озонметров, что связано с современным уровнем развития электроники и ее элементной базы.

Выводы

1. Оснащение измерений атмосферного озона современными дешевыми отечественными озонметрами является актуальным и требует либо модернизации существующих, либо разработки новых приборов.

2. Анализ возможных вариантов построения озонметров показал, что оптимальным является использование полупроводниковых фотодиодов, слепых в видимой области спектра, совместно с дешевыми светофильтрами на основе цветных оптических стекол.

3. Результаты испытаний и калибровки разработанного прототипа озонметра показали его преимущества и возможную конкурентоспособность по сравнению с существующими аналогами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., et al, AERONET – A Federal Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization // Remote Sens. Environ. 1998. 66: 1 16.

2. Русина Е.Н., Шаламянский А.М., Решетников А.И. Мониторинг атмосферного аэрозоля, озона и парниковых газов // Современные исследования Главной геофизической обсерватории. 2001. № 2. С. 229-252.

3. Орозобаков Т.О., Кисляков А.Г., Орехов Ю.И., Орозобаков А.Т. Мониторинг озонного слоя Земли в миллиметровом диапазоне длин волн в Центрально-азиатском регионе // Известия НАН КР. 2008. №1. С. 44-46.

4. Morys, M., Mims III, F. M., Hagerup, S., Anderson, S. E., Backer, A., Kia, J. and Walkup, T. Design, calibration and performance of Microtops II hand-held ozone monitor and sun photometer. J. Geophys. Res., 2001, 106. P.14,573 – 14,582.

5. Пивоваров В.Г., Горбунов Р.В., Сальников А.И. О необходимости создания системы мониторинга приземного озона в Крыму // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2015. №3. С. 69-77.

Voytenko V.A., Voytenko G.O. Portable ozonometer for measurements of the concentrations of ozone.

Considered the methods of measuring the concentration of atmospheric ozone with the absorption lines of the optical solar radiation by ozone. Discussed the advantages and disadvantages of domestic and imported equipment for the measurement of ozone. Attention is paid to the peculiarities of the use of interference filters, which provide a narrow bandwidth. Discussed the problem of creating a low-cost portable ozonometer based tablet computer designed for field measurements of atmospheric ozone at ground level. Proposed electronic measuring device which includes an optical head with a set of filters and pilot large area semiconductor receiver, a blind in the visible region of the spectrum. The device is the attachment to your tablet computer with standard specifications. The possibility of using electronic ozonometer developed for monitoring variations in the concentration of ozone at ground level was shown.

Keywords: *portable ozonometer, tablet computers, electronic measuring apparatus, filters, semiconductor photodiodes.*

Войтенко Владимир Афанасьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: разработка новых методов и приборов исследования материалов и технологических процессов.

e-mail: vlvoitenko@gmail.com

Войтенко Галина Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: исследование электрофизических свойств перспективных материалов и приборы контроля природной среды.

e-mail: vlvoitenko@gmail.com

Voytenko Vladimir – Ph.D. (Eng), Docent of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, s. Lugansk. Scientific interest: developing of new methods and devices for the study of materials and processes.

Voytenko Galina – Ph.D. (Eng), Docent of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, s. Lugansk. Scientific interest: study the electrical properties of advanced materials and environment monitoring devices.

Статья поступила

13 февраля 2017 г.

© *Войтенко В.А., Войтенко Г.О., 2017*

УДК 621.389

Войтенко Г.О.

РАЗРАБОТКА ФОТОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЕЙ

Voytenko G.O.

DEVELOPMENT OF PHOTOMETER FOR MEASUREMENTS OF THE CONCENTRATIONS OF AEROSOL

Обсуждается проблема мониторинга состава атмосферы и обеспечения измерений концентрации атмосферных аэрозолей фотометрами отечественного производства. Определены основные недостатки известных фотометров. Предложена конструкция усовершенствованного фотометра, использующего функциональные возможности планшетного компьютера. Выполнена калибровка разработанного солнечного фотометра. Показана возможность значительного уменьшения габаритов и стоимости фотометра по сравнению с зарубежными и отечественными аналогами.

Ключевые слова: портативный фотометр, роботизированный фотометр, планшетный компьютер, фотометрическая приставка.

Введение

Для измерений концентрации атмосферных аэрозолей наиболее широко применяются портативные фотометры MICROTOPSI и MICROTOP-SII [1]. Процесс ориентации оптических осей прибора осуществляется оператором вручную, по специальному экрану из матового стекла. Это часто приводит к большим погрешностям наведения и как следствие плохой повторяемости результатов, несмотря на высокую чувствительность фотометров. Указанные фотометры имеют значительные габариты и вес, а также используют в своей работе достаточно дорогие батареи электропитания, имеющие небольшой срок службы – около одного месяца. Высокая стоимость таких фотометров и необходимость ежегодной поверки их в зарубежных специализированных лабораториях является еще одним важным ограничением для использования данных оптических приборов в нашей стране.

Большинство фотометрических измерений состава атмосферы проводится с околоземной орбиты при помощи научно-исследовательских

космических аппаратов [2]. Большинство космических аппаратов для этих целей запущены международным аэрокосмическим агентством с привлечением научных организаций. Евросоюза Мониторинг атмосферы Земли из космоса носит глобальный характер, а также обладает очень высоким на данный момент пространственным разрешением. По его результатам получают сетки поверхности атмосферы с разрешением десять и один километр. Таким образом, все значительные источники загрязнений атмосферы у поверхности Земли не остаются незамеченными, будь то пылевые бури или выбросы промышленных предприятий. Однако данные даже самых точных измерительных приборов требуют постоянной калибровки. Калибровать фотометры, установленные на космических аппаратах, возможно только по наземным фотометрам, калибровка которых легко осуществима с периодичностью в один год в специализированных оптических лабораториях или на базе предприятия-изготовителя. Для осуществления калибровки фотометров, установленных на космических аппаратах, была создана специальная наземная сеть станций AERONET [3].

Для проведения наземных измерений концентрации атмосферных аэрозолей используются приборы двух типов: ручные портативные и роботизированные автоматические. Роботизированные фотометры SIMEL318 (Франция) используют для длительных стационарных измерений как в городской местности, так и в труднодоступных и малонаселенных местах. Роботизированный фотометр содержит солнечную батарею, которая обеспечивает его работоспособность в непрерывном режиме. Передача данных осуществляется при помощи специального ретранслятора на метеорологические спутники периодичностью в одни сутки. Фотометр SIMEL318 очень надежный и высокоточный прибор. Его стоимость в зависимости от комплектации составляет от 35000 до 65000 евро. Высокая стоимость роботизированного фотометра не позволяет использовать его для постоянного мониторинга.

Используя портативные переносные фотометры MICROTOSPI и MICROTOSPII, исследователи совершают наземные и морские экспедиции, в которых с определенной периодичностью в известных координатах осуществляют измерения концентрации атмосферных аэрозолей. Стоимость портативных фотометров также достаточно велика, от 8000 до 10000 долларов. Однако ежегодные проверки этих приборов обходятся дороже их стоимости. Поэтому в последние годы создаются отечественные, более дешевые приборы [3-5].

Появление на рынке доступных по цене планшетных компьютеров и смартфонов открывает новые возможности в усовершенствовании фотометров с применением данных устройств. Разработка на их основе отечественных фотометров с улучшенными измерительными и другими техническими характеристиками, а также интегрированных посредством доступа в Интернет в единую фотометрическую сеть с единой системой обра-

ботки и представления данных является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является разработка портативного фотометра на базе планшетного компьютера для обеспечения измерений концентрации атмосферных аэрозолей.

Методика исследования

Первые попытки создания отечественных портативных фотометров осуществлялись в 2009г. в рамках гранта USCRDF Global Award UKG2-2969-KV-09, направленного на наземную поддержку AERONET проводимого мониторинга атмосферы Земли. В г. Луганске и Луганской области проводились измерения концентрации атмосферных аэрозолей при помощи портативных фотометров-озонметров MICROTOSPI и MICROTOSPII. Также были проведены несколько серий исследований как в стационарных, так и в полевых условиях при помощи роботизированного фотометра-поляриметра SIMEL318. Приборы были временно предоставлены лабораторией оптики LOA (Лилль, Франция), которая курировала данные измерения. Получив таким образом уникальную возможность проведения калибровки собственных разработок фотометров, были разработаны, изготовлены и испытаны полноценные аналоги данных приборов (рис. 1).

Аналог портативного фотометра имел такие же габариты, как и MICROTOSPII, однако был в два раза легче, имел те же измерительные характеристики, а также более современный USB порт для работы с ЭВМ. Вторая модель улучшенного аналога имела встроенный модуль GPS, который автоматически определял широту, долготу, высоту над уровнем моря и время по UT для текущего измерения. Прототип выполнял серии измерений, из которых автоматически выбирал наиболее достоверные данные исходя из точности направления на Солнце оптических осей. Прибор, в отличие от MICROTOSPII, работал от аккумуляторных батарей, батареек, а также электросети, бортовой сети автомобиля, солнечной батареи. Несмотря на это, прибор имел ряд недостатков: необходимость передачи накопленных данных в ЭВМ, наличие аккумуляторных батарей, значительных габаритов и несовершенной оптической системы наведения, как и MICROTOSPII. На тот момент только последний недостаток был частично устранен благодаря динамическому выводу непрерывного потока результатов измерений на жидкокристаллический экран прибора для более точного наведения. Появление доступных планшетных компьютеров позволило устранить все указанные недостатки.



Рис. 1. Калибровка разработанного солнечного фотометра

Портативный фотометр состоит из оптической и электронной частей. Оптическая часть не может быть качественно изменена, поэтому усовершенствованию подлежит только электронная часть прибора. MICROTOP-SII и его отечественный аналог содержат батареи питания, контроллер питания, часы точного времени, память большого объема, жидкокристаллический экран, клавиатуру и другие функциональные блоки. Современный планшетный компьютер или смартфон имеют в своем составе все указанные функциональные блоки. Таким образом, на его основе легко может быть разработан фотометр, способный не только выполнять необходимые функции, но и быть легким и удобным в работе, автоматически определять время и место нахождения, отправлять данные через Интернет на сервер фотометрической сети. Для этого к планшетному компьютеру достаточно изготовить небольшую измерительную приставку, которая бы крепилась с обратной стороны к корпусу планшетного компьютера. Такая приставка должна содержать оптическую часть прибора, фотоприемники, предварительные усилители и микроконтроллер, подключенный к планшетному компьютеру или смартфону посредством USB порта. Специальное программное обеспечение позволит по изображению на жидкокристаллическом экране планшета осуществлять точное наведение прибора, провести измерения, необходимые расчеты, сформировать данные, занести их в базу данных в памяти планшетного компьютера и отправить эти данные через Интернет на сервер фотометрической сети.

Результаты исследований

Функциональная схема разработанного устройства (рис. 2) состоит из интерференционных светофильтров 1, кремниевых фотодиодов 2,

предварительных усилителей 3, аналогового коммутатора 4, аналого-цифрового преобразователя 5, микроконтроллера 6, планшетного компьютера или смартфона 7.

Испытания разработанного фотометра проводились совместно с роботизированным фотометром. Так одновременно проводились измерения в ручном режиме на разработанном приборе с измерениями, проводимыми роботом. Причем, конструкция оптической части роботизированного фотометра была аналогичной конструкции портативного прибора. Это позволило провести сравнение оптических частей и результатов измерений обоих приборов.

В результате совместных испытаний фотометров было установлено, что отличие оптических частей приборов не превышает в среднем для четырех каналов 2%, а отличие результатов измерений, сделанных обоими приборами с одинаковой оптической частью, составило в среднем для четырех каналов менее 0,5%.

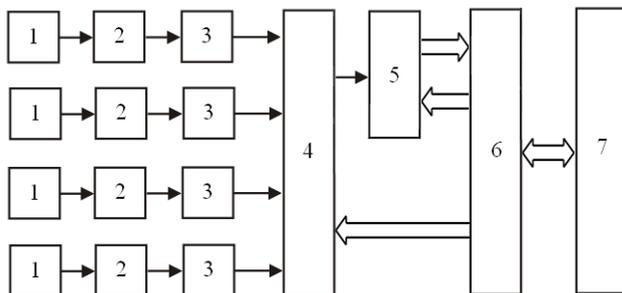


Рис. 2. Функциональная блок-схема солнечного фотометра на базе планшетного компьютера: 1 – интерференционные светофильтры; 2 – кремниевые фотодиоды; 3 – предварительные усилители; 4 – аналоговый коммутатор; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – микроконтроллер; 7 – планшетный компьютер

Таким образом, разработанная фотометрическая приставка к планшетному компьютеру имеет точность и повторяемость измерений, подобную дорогостоящему роботизированному фотометру SIMEL318.

В результате проведенных испытаний и калибровок разработанного фотометра было установлено, что в случае использования планшетного компьютера с экраном 7 дюймов ширина планшета позволяет нарастить число измерительных каналов до 8, а использование 16-дюймового планшета – до 16 измерительных каналов, что сопоставимо с измерительными возможностями роботизированного фотометра SIMEL318 и в четыре раза выше возможностей MICROTOPSH. Электронная часть прибора и программное обеспечение не потребуют существенных изменений. Таким

образом, данная разработка превосходит существующие разработки зарубежных фирм, имея в десятки раз более низкую стоимость и являясь более удобной и надежной в работе.

Выводы

1. Разработанный на базе планшетного компьютера фотометр является конкурентоспособным прибором, не уступая по точности и удобству в эксплуатации гораздо более дорогостоящим зарубежным аналогам.

2. Предлагаемый прототип фотометра для измерений концентрации атмосферных аэрозолей может составить основу для оснащения отечественной фотометрической сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Milinevsky G.P., Danylevsky V.O., Grytsai A.V. Recent developments of atmospheric research in Ukraine. [Электронный ресурс] // Advances in Astronomy and Space Physics. 2012. V.2. P. 114-120. URL: <http://ysc.kiev.ua/aasp/>

2. Stevens B. Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6 // Journal of advances in modeling earth systems. 2015. Vol.5. P. 146–172.

3. Войтенко Г.О. Розробка конструкції портативного роботизованого сонячного фотометра // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. 2012. №13(184). Ч.2. С. 105-110.

4. Войтенко Г.О. Розробка конструкції робота для наведення на Сонце оптичних приладів // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. 2013. №4(193). Ч.2. С. 25-28.

5. Успенский А.А., Махоткин А.Н., Вольберг Н.Ш., Степаков А.В. Исследование атмосферного аэрозоля с помощью аэталометра АЕ-33 // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2016. Вып. 583. С.209-226.

Voytenko G.O. Development of photometer for measurements of the concentrations of aerosol.

Discussed the problem of monitoring the composition of atmosphere. Considered the features of the use of portable and stationary photometers, their maintenance and calibration. Describe studies that were carried out in Lugansk and Lugansk region in stationary and field conditions to measure the atmospheric optical thickness using portable photometers-ozonometers MICROTOSPI, MICROTOSPII and using robotic photometer-polarimeter SIMEL318. Discussed the problem of providing studies atmospheric aerosols with photometers domestic production. Improved the design of photometer that uses the functionality of a tablet computer. Showed the possibility of a significant reduction in size and cost of the photometer compared with foreign and domestic counterparts.

Keywords: *portable photometer, robotic photometer, tablet computer, photometric consoles.*

Войтенко Галина Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Вла-

димира Даля, г. Луганск. Научные интересы: исследование электрофизических свойств перспективных материалов и приборы контроля природной среды.
e-mail: vlvoiytenko@gmail.com

Voytenko Galina – Ph.D. (Eng), Docent of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, s. Lugansk. Scientific interest: study the electrical properties of advanced materials and environment monitoring devices.

*Статья поступила
13 февраля 2017 г.
© Войтенко Г.О., 2017*

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 519.21

Дубасов В.М., Могильная Е.П., Шетилова А.А.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ОТЖИГА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ЛИТОГО ВАЛКА ИСПОЛНЕНИЯ СШХН-48

Dubasov V.M., Mogilnaja H.P., Shetilova H.A.

INFLUENCE OF MODE OF ANNEALING ON MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE CAST ROLLER EXECUTIONS OF CSHXN-48

Рассмотрены изменения структуры и свойств литого валка исполнения СШХН-48 в процессе релаксационного отжига. Установлено влияние скорости охлаждения на величину температурного градиента. Показаны микроструктуры рабочего слоя и шеек валков, а также механические свойства материала валка в отожженном состоянии.

Ключевые слова: валки, температура, скорость охлаждения, напряжения, структура, свойства, отжиг, графит, механические свойства.

Введение

Известно, что для снижения остаточных напряжений валков из ЧШГ типов СШН, СШХН и СШХНМ, оптимальной температурой отжига является 640 – 650 °С, при которой твердость материала не снижается, прочностные свойства металла в месте сопряжения бочки с шейкой возрастают до 10 – 13%, а внутренние напряжения снижаются на 90 – 92% [1-3].

Сокращение длительности термической обработки валка способствует уменьшению глубины мягкого обезуглероженного слоя, что особенно важно для шеек валков.

В результате анализа различных условий осуществления отжига установлено, что при загрузке отливки в холодную или предварительно разогретую печь до температуры 400-450°С, при последующем темпе разогрева печи от 50 до 350°С/ч, скорость нагрева отливки изменяется от 30-40 до 200°С/ч. При этом распределение температуры в сечении отливки подчиняется линейной зависимости, при которой, как известно термические напряжения не должны возникать.

Максимальный градиент температур между поверхностью и центром отливки при ее нагреве составляет 25°С и соответствует диапазону температур 300-350°С, когда прочность материала еще достаточно высока. Возможная величина термических напряжений при данном градиенте, рассчитанная по формуле (1) не будет превышать 40 Н/мм², что составляет всего 7–10 % прочности материала исследуемых чугунных валков:

$$\sigma_{\max} = \frac{\alpha E(t_y - t_n)}{2(I - \mu)}, \quad (1)$$

где α – коэффициент термического расширения материала валка, исполнения СШХН, °С⁻¹ ($\alpha=11,10^{-6}$);

E – модуль нормальной упругости данного материала, Н/мм² ($E=20000$);;

μ – коэффициент Пуассона ($\mu=0,3$);

t_y и t_n – температура центра и поверхности изделия, °С [4].

Для предотвращения образования напряжений в процессе охлаждения важно обеспечить минимальный перепад температуры по сечению и линейный характер ее изменения при снижении температуры.

Установлено, что с повышением скорости охлаждения в 5 раз, до 50-80°С/час, величина температурного градиента между центром и поверхностью отливки не превышает 15°С при температуре около 550 °С, и непрерывно уменьшаясь с понижением температуры, исчезает полностью при достижении температуры 300-280°С. При дальнейшем охлаждении градиент не возникает. Поэтому напряжения, соответствующие максимальному градиенту 15°С, в процессе длительного охлаждения будут снижены в несколько раз. Так при 500°С за 1 час внутренние напряжения снижаются в среднем на 70 %, при 400°С – на 50°С и, после завершения термообработки результирующая величина внутренних напряжений не будет превышать 50 Н/мм², что практически не будет влиять на ресурс работоспособности изделия [4].

Целью работы является изучение изменений структуры и свойств литого валка исполнения СШХН-48 в процессе релаксационного отжига.

Методика исследования

Из практики производства валков следует, что в процессе осуществления релаксационного отжига чугунных валков, оптимальной скоростью при нагреве является 100°С/ч, а при охлаждении – 80 °С/ч [3].

На основе вышеуказанных данных отжиг проводился при температуре 640°С.

Загрузку образцов для отжига производили в предварительно разогретую печь до температур 200-400°C. Повышение температуры печи осуществляли со скоростью 100 °С/ч.

После первоначального снижения температура в печи достигла требуемой величины $640 \pm 10^\circ\text{C}$ за 4-5 часов.

Охлаждение образцов в печи осуществлялось до температуры 200 °С, при которой, как указано выше, температурный градиент отсутствует. Скорость охлаждения составляла от 50 до 80°C/ч. Дальнейшее охлаждение образцов осуществлялось на воздухе (рис. 1).

Общее время отжига, с учетом времени охлаждения вне печи до нормальной температуры, составило 20-24 часа.

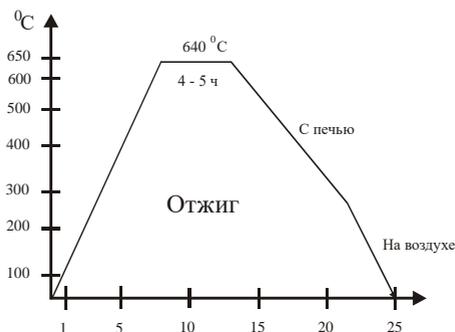


Рис. 1 Режим низкотемпературного отжига

При осуществлении отжига по рекомендуемым параметрам, твердость рабочего слоя и шейки вала в результате частичного обезуглероживания снизилось до 7 – 15% на глубину не более 1 – 1,5 мм. На большей глубине твердость не изменяется и равна исходной величине.

После отжига структура не претерпевает существенных изменений.

Результаты исследования

Пробы, по которым определялись свойства, и строение были взяты из литого вала из ЧШГ исполнения СШХН-48, согласно схеме отбора проб для исследования. Исходная твердость тангенциальных и осевых образцов одинакова и составляет: вдоль бочки 285 НВ, на шейке 269 НВ, а вместе сопряжения бочки с шейкой твердость осевых и радиальных образцов составляет 265 НВ.

Микроструктура рабочего слоя и шеек вала представляет собой конгломерат фаз крупно - и среднепластинчатого перлита, графита и цементита с участием сетевого ледебурита (рис. 2). В структуре рабочего слоя цементита до 19% в виде изолированных включений, ледебурита до

2% и графита в виде глобулей (Гф13), $\Gamma_{\text{раз}} 45$ около 5%. От поверхности к центру валка количество графита монотонно возрастает до 12%, форма ухудшается до Гф9, размеры увеличиваются до $\Gamma_{\text{раз}} 90$. Количество цемента уменьшается до 7% [4,5].

Структура шеек соответствует структуре металла центральной части бочки валка.

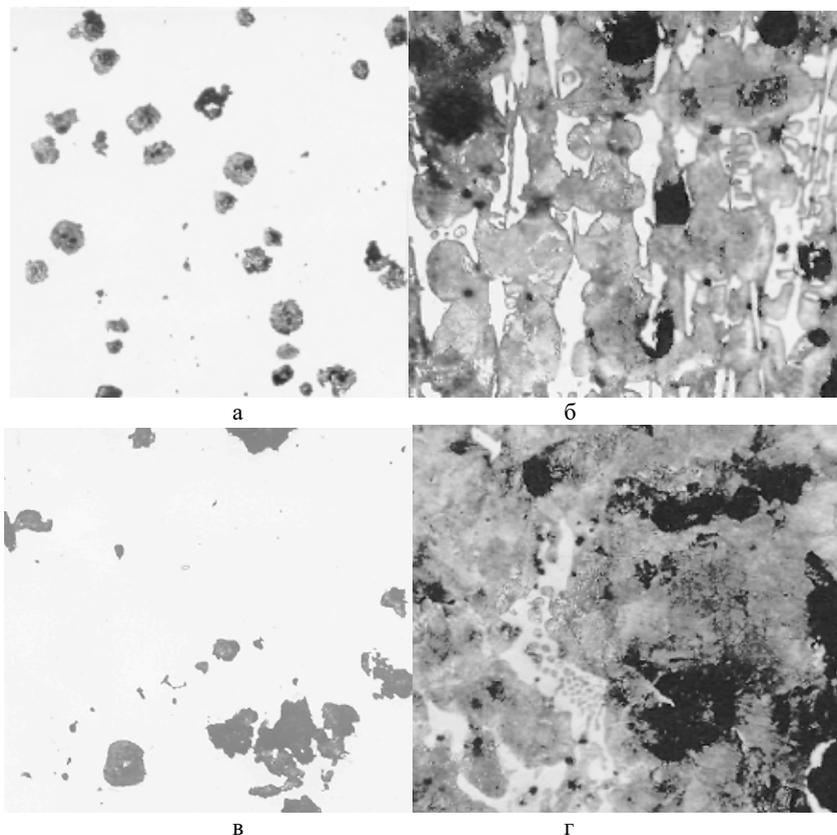


Рис. 2 Микроструктура рабочего слоя (а, б) и шеек (в, г) до (а, в) и после травления (б, г) литых валков; $\times 100$

Механические свойства на растяжение, изгиб и ударную вязкость отливок из чугуна приведены в таблице. Результаты испытаний показывают, что прочность тангенциальных образцов выше осевых.

Т а б л и ц а

**Механически свойства материала валка исполнения СШХН-48 в
отожженном состоянии (640 °С)**

Элемент валка и направление вырезки образцов	Свойства валка			
	σ_b , Н/мм ²	σ_t , Н/мм ²	КСУ, Дж/см ²	НВ
Бочка* образцы тангенциальные	420	540	80	290
осевые	375	510	80	285
Шейка образцы тангенциальные	415	580	80	270
осевые	370	550	80	269
Место сопряжения бочки с шейкой	440	650	70	265
осевые				
радиальные	400	655	80	270

*Свойства даны на глубине 10 – 15 мм от поверхности.

Выводы

Показано, что свойства, определенные на тангенциальных образцах в исходном и термообработанном состояниях валка в среднем на 10% выше, чем на осевых.

Прочностные характеристики материала рабочего слоя и шейки валка после отжига остаются практически на прежнем уровне или незначительно повышаются, но величина повышения, как правило, не превышает 5%. Наиболее благоприятное влияние снижения напряжений проявляется на свойствах материала, определенных в месте сопряжения бочки с шейкой, где наиболее часто происходят поломки валков. Прирост свойств в этом месте составляет 10 – 12%.

С увеличением глубины рабочего слоя спад прочности составляет 2 – 3% на каждые 10 мм сечения, от поверхности к центру шейки снижение не превышает 4 – 5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.: Машиностроение, 1976. 556 с.
2. Бобро Ю. Г. Легированные чугуны. М.: Металлургия, 1976. 286 с.
3. Бунин К. П., Таран Ю. Н. Строение чугуна. М.: Металлургия, 1972. 160 с.
4. Скобло Т. С., Воронцов Н. М., Рудюк С. И./ Под. ред. Скобло Т. С. М.: Металлургия, 1994. 336 с.
5. Будагьянц Н. А., Карсский В. Е. Литые прокатные валки. М.: Металлургия, 1983. 175 с.

Dubasov V.M., Mogilnaja H.P., Shetilova H. A. Influence of mode of annealing on mechanical properties and structure of the cast roller executions of CSHXN-48

The change of structure and properties of the cast roller of execution of CSHXN is considered-48 in the process of the relaxation annealing. Influence of cooling speed is set on the size of temperature gradient. Shown microstructure of working layer and necks of rollers. And mechanical properties of material of roller in an anneal state.

Keywords: *felling, temperature, speed of cooling, tension, structure, properties, annealing, graphite, mechanical properties.*

Дубасов Василий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: совершенствование технологических процессов в металлургии.

e-mail: dubasov1955@mail.ru

Могильная Елена Петровна - кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: аналитические вопросы в металлургии.

e-mail: mep0210@yandex.ua

Шетилова Анна Александровна - студентка Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: прикладные вопросы в металлургии.

e-mail: kaf_mater@mail.ru.

Dubasov Vasily - candidate of technical sciences, associate professor Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: improvement of technological processes in metallurgy.

Mogilnaya Elena - candidate of technical sciences, associate professor Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: analytical questions in metallurgy.

Shetilova Anna - student of Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: applied questions in metallurgy.

*Статья поступила
6 февраля 2017 г.*

© Дубасов В.М., Могильная Е.П., Шетилова А.А., 2017

УДК 621.763 (621.389)

Войтенко В.В., Соколов И.А., Савицкий И.В.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПУТЕМ
ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ**

Voytenko V.V., Sokolov I.A., Savitsky I.V.

**INVESTIGATION OF THE PROCESS POLYMERIZATION OF
COMPOSITE MATERIAL BY MEASUREMENT OF ITS
DIELECTRIC PERMITTIVITY**

Обоснована возможность измерения диэлектрической проницаемости композиционного материала на основе полимеров по величине волнового сопротивления, резонансной частоты и добротности микрополоскового резонатора. Предложен способ контроля процесса полимеризации композиционного материала, заполняющего объем микрополоскового резонатора. Предложено электронное устройство для контроля процесса полимеризации композиционного материала в процессе изготовления. Обсуждаются результаты исследований процесса полимеризации композиционных материалов на основе эпоксидных смол.

Ключевые слова: микрополосковый резонатор, композиционный материал, диэлектрическая проницаемость, волновое сопротивление, электронное устройство.

Введение

В последние годы все более необходимым становится контроль процесса полимеризации композиционных материалов непосредственно при их производстве с целью обеспечения высокой стабильности физико-технических свойств выпускаемых изделий [1,2]. Для этих целей исследуются возможности разных методов неразрушающего контроля, включая и микроволновые методы [3]. Часто применяется использование образцов композитных материалов, проходящих все стадии технологического процесса вместе с основным материалом, такие как термическое воздействие, создание избыточного давления или разрежения, механическая прессовка. Контроль таких образцов может осуществляться как непосредственно в процессе обработки, так и в конце процесса производства. В первом слу-

чае в образец встраиваются различные датчики, например, тензорезисторы, которые контролируют физико-технические характеристики композиционного материала [4]. Во втором случае датчики могут быть наклеены на поверхность изделия для контроля изделия в процессе испытаний. Осуществление контроля физико-технических характеристик композиционного материала в процессе производства представляет наибольший интерес для лучшей повторяемости свойств изделий. Поэтому разработка способа и устройства для контроля физико-технических характеристик композиционных материалов и изделий на их основе непосредственно в процессе производства является актуальной научно-технической задачей. Для решения этой задачи необходимо выяснить, какие из параметров композита можно контролировать в процессе его изготовления; осуществить поиск способа контроля этих параметров; разработать измерительное устройство, и с его помощью провести исследования процесса полимеризации композиционных материалов.

Целью работы является исследование процесса полимеризации композиционного материала на основе эпоксидных смол по изменению его диэлектрической проницаемости при помощи электронного устройства на основе микрополоскового резонатора.

Методика исследования

Анализ существующих способов контроля процесса полимеризации композиционных материалов показывает, что для решения поставленной задачи может быть использован способ, основанный на заполнении микрополоскового резонатора исследуемым составом, в процессе полимеризации которого волновое сопротивление, резонансная частота и добротность колебательной системы будут изменяться с изменением диэлектрической проницаемости полимера. Так волновое сопротивление микрополоскового резонатора, для которого ширина микрополосковой линии равна толщине слоя композиционного материала между микрополосковой линией (МПЛ) и экраном [5]:

$$z_0 = 19\pi\varepsilon_l^{-1/2} \ln(4h/d), \quad (1)$$

где h – толщина слоя композиционного материала между МПЛ и экраном; $d = 1,5\pi W + 2\pi t$, где W – ширина МПЛ резонатора; t – толщина МПЛ; ε_l – пересчитанная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_l = \pi\varepsilon + 2\pi$, где ε – диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего резонатор.

Собственная частота электромагнитных колебаний в микрополосковом резонаторе зависит от диэлектрической проницаемости заполняющего его полимера и может быть описана выражением:

$$f = v_{\phi} / l, \quad (2)$$

где l – длина микрополоскового резонатора; v_{ϕ} – фазовая скорость электромагнитных волн в веществе, заполняющем полость резонатора.

$$v_{\phi} = 0,33 \cdot 10^{13} \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость.

$$\varepsilon_{\text{эф}} = 0,5(\varepsilon + 1) + 0,5(\varepsilon - 1)(1 + 10h/W)^{-1/2}. \quad (4)$$

Добротность микрополоскового резонатора также зависит от диэлектрической проницаемости заполняющего его полимера. Так потери в МПЛ состоят из потерь в диэлектрике $\alpha_{\text{д}}$, потерь в проводнике $\alpha_{\text{п}}$ и потерь на излучение $\alpha_{\text{и}}$:

$$\alpha = \alpha_{\text{д}} + \alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{и}}. \quad (5)$$

Потери на излучение уменьшаются с ростом диэлектрической проницаемости полимера. В диапазоне частот работы МПЛ менее 1ГГц потерями в диэлектрике и проводнике можно пренебречь. Поэтому изменение диэлектрической проницаемости исследуемого материала в процессе полимеризации будет основным фактором изменения потерь в МПЛ резонаторе.

Добротность МПЛ четвертьволнового резонатора

$$Q = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}} W z_0 \sqrt{f \sigma}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{эф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость полимера; W – ширина МПЛ; z_0 – волновое сопротивление МПЛ; f – резонансная частота четвертьволнового МПЛ резонатора; σ – удельная линейная проводимость материала, из которого изготовлена МПЛ. Удельная линейная

проводимость МПЛ зависит не только от материала, из которого изготовлена МПЛ, но и от величины резонансной частоты, которая определяет глубину скин-слоя в проводнике.

Из выражений (1) – (6) следует, что основные параметры МПЛ четвертьволнового резонатора зависят от диэлектрической проницаемости ϵ заполняющего его композиционного материала на основе полимеров. Таким образом, применение четвертьволнового МПЛ резонатора, заполненного исследуемым в процессе полимеризации композиционным материалом, позволит осуществлять контроль диэлектрической проницаемости материала и связанных с ней плотности и степени полимеризации.

Результаты исследований

Для проведения исследований процесса полимеризации было разработано электронное устройство на основе четвертьволнового МПЛ резонатора, функциональная блок-схема которого представлена на рис. 1. В состав устройства входит оригинальная часть и стандартные электронные измерительные приборы.

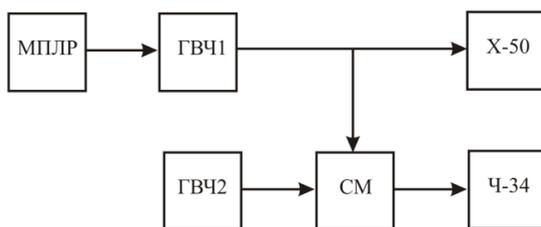


Рис. 1. Функциональная блок-схема электронного устройства для исследования полимеризации композиционных материалов: МПЛР – четвертьволновой МПЛ резонатор; ГВЧ1 – генератор высокой частоты с МПЛР в качестве частотозадающей цепи; Х-50 – характеристикограф; ГВЧ2 – генератор опорной частоты; СМ – частотный смеситель; Ч-34 – универсальный частотомер

Для композиционного материала на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-16 со стекловолоконным наполнителем установлено, что с ростом диэлектрической проницаемости композита волновое сопротивление четвертьволнового МПЛ резонатора уменьшается практически по линейному закону; частота четвертьволнового МПЛ резонатора, заполненного исследуемым композитом, увеличивается линейно с ростом диэлектрической проницаемости; наблюдается линейный рост добротности четвертьволнового МПЛ резонатора при росте диэлектрической проницаемости заполняющей его среды.

На рис. 2 приведена временная зависимость степени полимеризации композиционного материала на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-

16 с 58% стекловолоконного наполнителя, полученная для процесса, протекающего при температуре 118°C . Рост степени полимеризации сопровождается увеличением диэлектрической проницаемости композиционного материала (рис. 3).

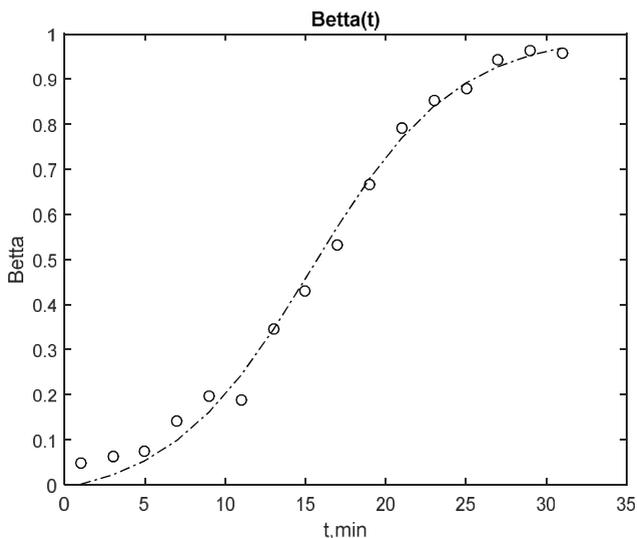


Рис. 2. Временная зависимость степени полимеризации композиционного материала на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-16 с 58% стекловолоконного наполнителя, $T = 118^{\circ}\text{C}$

На рис. 4, 5 приведены зависимости степени полимеризации эпоксидного композита от измеряемой величины волнового сопротивления и резонансной частоты четвертьволнового МПЛ резонатора, заполненного исследуемым материалом.

Из графиков (рис. 4, 5) следует, что процесс полимеризации сопровождается уменьшением волнового сопротивления и увеличением резонансной частоты, а также добротности четвертьволнового МПЛ резонатора. Данные, полученные по композитам на основе эпоксидных смол ЭД-16 и ЭД-20 с различными диэлектрическим сыпучими и волокнистыми наполнителями, позволяют выявить похожие закономерности.

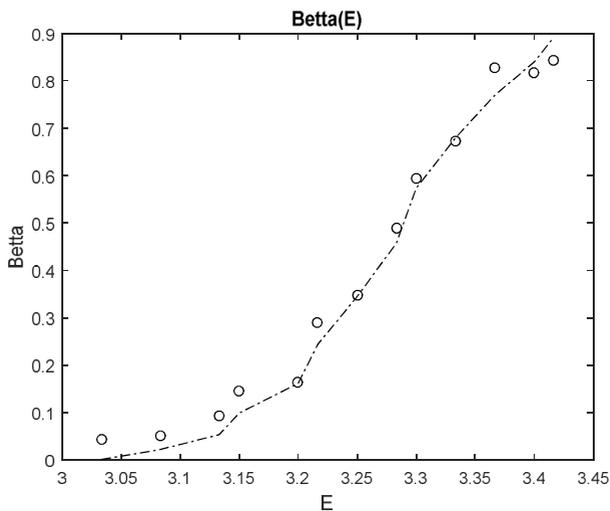


Рис. 3. Зависимость степени полимеризации от диэлектрической проницаемости композиционного материала на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-16 с 58% стекловолоконного наполнителя

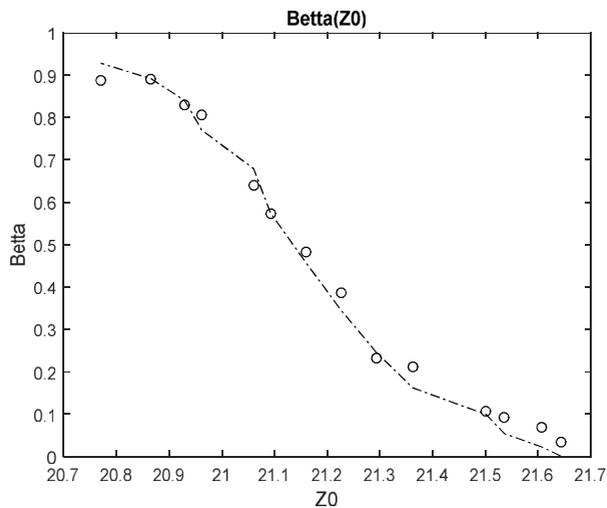


Рис. 4. Зависимость степени полимеризации эпоксидного композита от волнового сопротивления четвертьволнового МПЛ резонатора

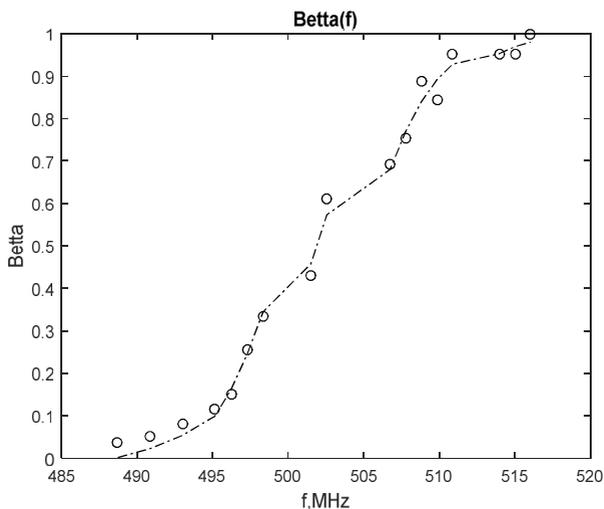


Рис. 5. Зависимость степени полимеризации эпоксидного композита от резонансной частоты четвертьволнового МПЛ резонатора

Выводы

1. Предлагаемое электронное устройство для контроля степени полимеризации и связанных с ней прочности и твердости композиционных материалов на основе эпоксидных смол с диэлектрическим порошковым или волокнистым наполнителем позволяет осуществлять контроль основных параметров изделий из композитов в процессе их изготовления.

2. Установлено, что с ростом степени полимеризации исследованных композиционных материалов, заполняющих четвертьволновой МПЛ резонатор, используемый в качестве измерительной ячейки, линейно уменьшается волновое сопротивление МПЛ резонатора и возрастают его резонансная частота и добротность. Полученные закономерности позволяют, проводя измерения указанных параметров определять степень полимеризации композита и связанные с ней прочность и твердость.

3. Погрешность измерений степени полимеризации композита по частоте резонанса четвертьволнового МПЛ резонатора как измерительной ячейки, а также его добротности, находится в пределах 5...10%, а погрешность измерений степени полимеризации композита по величине волнового сопротивления не превышает 15%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доценко О.А., Суслиев В.И., Кузнецов В.Л. Микроволновые характеристики композиционных радиоматериалов на основе полимера и углеродных структур // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). С. 36–40.
2. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
3. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
4. Тензометрия в транспортном машиностроении: монография / Под ред. А.Н. Серьезнова, Л.Н. Степановой. Новосибирск: Наука, 2014. 271 с.
5. Шаров Г.А. Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств. М.: НТИ «Горячая линия», 2016. 470 с.

Voytenko V.V., Sokolov I.A., Savitsky I.V. Investigation of the process polymerization of composite material by measurement of its dielectric permittivity.

Discussed the problem of implementation of the control of physical and technical characteristics of the composite material during manufacture, testing and operation. Describes analytical relationships between the parameters of the microstrip line and the composite material filling volume quarter-wave resonator. Justified the possibility of measuring the dielectric permittivity of a composite material based on polymers of the magnitude of the wave impedance, resonant frequency and dielectric loss of the microstrip resonator. Offered the method for controlling the polymerization process of the composite material filling the volume of the microstrip resonator. Electronic device is proposed for controlling the polymerization process of the composite material during manufacture. We discuss the results of studies of the process of polymerization of composite materials based on epoxy resins.

Keywords: *microstrip resonator, composite material, dielectric permittivity, wave resistance, electronic device.*

Войтенко Валерий Владимирович – студент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: композиционные материалы.
e-mail: vlvoytenko@gmail.com

Соколов Игорь Аркадьевич – старший преподаватель кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: оборудование для получения и исследования материалов.
e-mail: micro.nano.electronics@gmail.com

Савицкий Иван Викторович – преподаватель-стажёр кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: получение и исследование материалов.
e-mail: ivan-savitskiy@mail.ru

Voytenko Valery – student of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vla-

dimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: composite materials.

Sokolov Igor – senator teacher of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: equipment for obtaining and study materials.

Savitsky Ivan – trainee teacher of the Micro- and Nanoelectronics Department, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: obtaining and study materials.

Статья поступила

13 февраля 2017 г.

© Войтенко В.В., Соколов И.А., Савицкий И.В., 2017

УДК 546.86/.87:548.55

Луцкий Д.В., Волошин А.Д.

ИЗМЕРЕНИЕ Э.Д.С. ХОЛЛА И РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ И ПОДВИЖНОСТИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МОНОКРИСТАЛЛАХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ Sb-Bi

Lutskiy D.V., Voloshin A.D.

THE HALL VOLTAGE MEASUREMENT AND CALCULATE THE CONCENTRATION AND MOBILITY OF CHARGE CARRIERS IN SINGLE CRYSTALS OF SOLID SOLUTIONS SB-BI

Методом Чохральского без подпитки твердой фазой выращены монокристаллы твердых растворов Sb-Bi с содержанием висмута до 18 ат. %. Выращивание кристаллов данных сплавов осуществляли на затравочный монокристалл с содержанием висмута 2 ат.%, в котором плоскость (111) была параллельно направлению вытягивания. Для проведения измерений были вырезаны образцы из монокристаллов в форме прямоугольного параллелепипеда, которые затем шлифовали и полировали. В образцах монокристаллов измерена э.д.с. Холла и определены концентрация и подвижность носителей заряда.

Ключевые слова: монокристалл, твердые растворы, сурьма, висмут, концентрация, подвижность.

Введение

Монокристаллы сплавов Sb-Bi могут быть использованы для создания приборов микроэлектроники благодаря особенностям их электрофизических свойств и изменению параметров кристаллической решетки в зависимости от их состава. Перспективными направлениями практического использования является применение их в качестве материала для создания фотоэлектрических приемников, микропроцессоров, оптических квантовых генераторов в длинноволновой области ИК-излучений, а также для изготовления монохроматоров рентгеновского излучения [1, 2, 3]. Применение данных материалов в новых технологиях требует тщательного исследования их электрофизических свойств.

Целью работы является исследование концентрации и подвижности носителей заряда в кристаллах твердых растворов Sb-Bi с содержанием висмута до 18 ат.% выращенных методом Чохральского без подпитки твердой фазой.

Методика исследования

Выращивание монокристаллов твердых растворов Sb-Bi осуществляли на затравочный монокристалл сплава Sb-Bi с содержанием висмута 2 ат.%, в котором плоскость (111) была параллельно направлению вытягивания. Частота вращения кристалла составляла 10 об/мин. Тигель с расплавом массой 60 г в процессе вытягивания не вращался. В процессе роста кристаллов твердых растворов сурьма-висмут градиент температуры в твердой фазе создавали с помощью охлаждения штока, в котором закреплялся затравочный монокристалл. Скорость вытягивания кристалла изменяли от 0,005 до 0,05 мм/мин. В качестве исходных материалов использовали сурьму и висмут чистоты 6N. Выращивание монокристаллов сплавов осуществляли в среде аргона высокой чистоты при избыточном его давлении до 0,4 атм.

Образцы, в которых проводили измерения, вырезали из монокристаллов на электроискровом станке в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $2 \times 3 \times 13$ мм таким образом, чтобы длинная грань для исследования была параллельна плоскости (111). Поверхности образцов вначале шлифовали с помощью суспензии абразивного порошка Al_2O_3 зернистостью 40-50 мкм, а затем полировали на замше, смоченной водным раствором абразива Cr_2O_3 . Содержание висмута в образцах измеряли на отполированной поверхности электронно-зондовым микроанализом с помощью электронного микроскопа JSM-820. Измерение вышеперечисленных параметров проводили при комнатной температуре. Для исследования были использованы образцы из монокристаллов сурьмы и сплавов сурьмы с концентрацией висмута 3, 10, 18 ат.%.

Концентрацию носителей заряда в кристаллах сплавов Sb-Bi определяли из расчета значений коэффициента Холла [4,5]. Определение коэффициента Холла включало в себя измерение: четырех величин холловской разности потенциалов, протекающего через образец тока, магнитной индукции и геометрического размера образца d в направлении магнитного поля (рис. 1).

Отношение длины образца a к его ширине b может оказывать существенное влияние на величину U_x . Поэтому для получения достоверного результата применяли достаточно длинные образцы $a/b \gg 1$. Измерение концентрации носителей заряда проводили в постоянном магнитном поле с индукцией 0,18 Тл. Электрическое поле в образце монокристалла создавали при помощи источника постоянного тока, имеющего высокое выходное сопротивление. Токковые медные контакты припаивались к торцам образца. Измерение э.д.с. Холла проводили с помощью микровольметра

В7-21А. Точность измерения данных гарантировалась последовательным проведением четырех измерительных операций: при прямом и обратном направлениях тока через образец, и двух противоположных направлениях

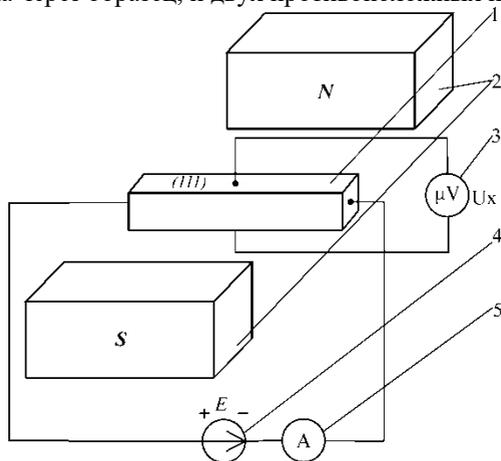


Рис. 1. Схема измерения подвижности носителей в кристалле:
1 – исследуемый кристалл сплава Sb-Bi; 2 – постоянный магнит; 3 – микро-
вольтметр В7-21А; 4 – источник тока; 5 – амперметр

магнитного поля. На основе полученного усредненного значения холловского напряжения U_x определяли коэффициент Холла R , равный [4]:

$$R = 10^8 \cdot \frac{d \cdot U_x}{I \cdot B}, \quad (1)$$

где U_x – э.д.с. Холла, В;

d – размер образца вдоль магнитного поля, см;

I – ток, проходящий через образец, А;

B – магнитная индукция, Тл.

Концентрацию носителей заряда определяли согласно выражению [4]:

$$n = -1 / eR, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, равный $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Расчет подвижности носителей заряда можно определить согласно выражению [4]:

$$\mu_n = \frac{1}{e \cdot n \cdot \rho}, \quad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление образца, измерялось ранее [5]. Относительная погрешность измеряемых величин концентрации носителей заряда $\frac{\Delta n}{n}$ и удельного электросопротивления $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ составляла $\pm 3\%$. Вычисление относительной ошибки измерения подвижности носителей заряда проводили по соотношению [6]:

$$\left(\frac{\Delta \mu_n}{\mu_n} \right)^2 = \left(\frac{\Delta n}{n} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^2. \quad (4)$$

Проведенные вычисления показали, что относительная ошибка определения подвижности носителей заряда не превышает $\pm 4\%$.

Результаты исследований

Геометрические размеры и параметры образцов для расчета электрофизических свойств приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры образцов монокристаллов сплавов Sb-Bi

№ п/п	Образец	C_{Bi}^S , ат. %	Размеры образца (a × b × c), мм	Параметр			
				ϖ , см	S, мм ²	U_x , мкВ	ρ , 10 ⁻⁶ Ом·м
1.	Sb	0	2,1 × 3,0 × 13,8	3,0	6,3	130	(0,6±0,02)
2.	СВ-3Д	3	2,26 × 1,88 × 8,3	1,88	4,25	266	(0,95±0,03)
3.	СВ-11Д	10	1,76 × 1,9 × 8,1	1,9	3,34	467	(1,3±0,05)
4.	СВ-52Д	18	1,18 × 1,87 × 5,9	1,87	2,28	575	(1,1±0,04)

В таблице 2 приведена зависимость концентрации и подвижности носителей заряда от концентрации висмута в образцах монокристаллов сплавов Sb-Bi.

Т а б л и ц а 2

Концентрация и подвижность носителей заряда монокристаллов сурьмы и сплавов сурьмы с содержанием висмута 3, 10 и 18 ат. %

№, п/п	Образец	C_{Bi}^S , ат. %	n , 10 ¹⁸ см ⁻³	μ , 10 ⁴ см ² /(В·с)
1.	Sb	0	(4,7±0,1)	(2,3±0,1)
2.	СВ-3Д	3	(6,0±0,2)	(1,12±0,05)
3.	СВ-11Д	10	(4,2±0,1)	(1,14±0,05)
4.	СВ-52Д	18	(5,1±0,2)	(1,2±0,05)

Выводы

1. В выращенных монокристаллах твердых растворов Sb-Bi, полученных без подпитки расплава с содержанием висмута до 18 ат.% исследована концентрация и подвижность носителей заряда в зависимости от концентрации в них висмута.

2. Значения концентрации носителей заряда монокристалла Sb составляет $4,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а монокристаллов сплавов Sb-Bi уменьшаются от $6 \cdot 10^{18}$ до $4,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ с увеличением содержания висмута. Такое отличие концентрации носителей заряда, возможно, является результатом различных условий выращивания и совершенства структуры монокристаллов.

3. Наибольшее значение подвижности носителей заряда $2,3 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ имеет монокристалл Sb. В монокристаллах сплавов Sb с Bi величина подвижности носителей заряда в 2 раза меньше чем в сурьме и отличается не более 10 % для разных составов сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hsieh D., Qian D., Wray L., Xia Y., Hor Y.S., Cava R.J., Hasan M.Z. A topological dirac insulator in a quantum spin hall phase // Nature. 2008. V. 452. P. 970 - 975.
2. Иванова Л.Д., Гранаткина Ю.В., Иванова Л.Д., Выращивание монокристаллов сурьмы методом Чохральского // 11 Национальна конференция по росту кристаллов. Москва, Россия, 14-17 ноября 2004 г.
3. Schuster M., Göbel H., Parallel-beam coupling into channel-cut monochromators using curved graded multilayers // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V.28. P. 270 - 275.
4. Павлов Л.П. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов, М.: Высш. шк., 1975. - 206 с.
5. Луцкий Д.В. Исследование удельного электросопротивления монокристаллов сплавов Sb-Bi выращенных методом Чохральского // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. Сб. научн. тр. Луганск: изд-во ЛГУ им. В.Даля, № (1), 2016. С.188 - 192.
6. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений, Л.: Наука, 1967. - 88 с.

Lutskiy D.V., Voloshin A.D. The Hall voltage measurement and calculate the concentration and mobility of charge carriers in single crystals of solid solutions Sb-Bi

Sb-Bi alloy single crystals were grown by Czochralski method with the orientation of a (111) plane parallel to growth axis. Sb single crystal seed was used for growing Sb-Bi alloy single crystals with Bi up to 2 at%. The pulling rate was decreased from 0,1 to 0,01 mm/min for the growth of the homogeneous Sb-Bi solid solution single crystals with Bi composition up to 18 at%.

To study electron concentration and mobility of charge carriers in the grown crystals, samples oriented parallel to the pulling direction were cut from them. The sample surface was ground using an Al₂O₃ abrasive with a grain size of 40–50 μm and then polished on chamois leather, wetted with an aqueous suspension of Cr₂O₃ abrasive with a grain size as small as 5 μm.

The electron concentration in the single crystals changed from $4,2 \cdot 10^{18}$ to $6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and the electron mobility from $1,22 \cdot 10^4$ to $1,12 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{V s}$ with the increase of Bi composition up to 18 at%.

Keywords: single crystal, solid solution, antimony, bismuth, concentration, mobility.

Луцкий Денис Валерьевич – к.т.н., доц. кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета им. В. Даля, г. Луганск. Научные интересы: выращивание полупроводниковых монокристаллов и исследование их электрофизических свойств.

e-mail: dluts@rambler.ru

Волошин Андрей Дмитриевич – студент кафедры микро- и нанoeлектроники Луганского национального университета им. В. Даля, г. Луганск.

e-mail: oyshen77794@gmail.com

Lutskiy Denis - candidate of engineering sciences, associate professor at the department of micro- and nanoelectronics, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: growing semiconductor single crystals and investigation of the electro-physical properties.

Voloshin Andrei – student at the department of micro- and nanoelectronics, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk.

*Статья поступила
6 февраля 2017 г.*

© Луцкий Д.В. Волошин А.Д., 2017

УДК 621.742

Рябичева Л.А., Нагорный Е.В., Рябов И.А.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРОЦЕССЫ ДИФФУЗИИ В ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ

Ryabicheva L.A., Nagorniy E.V., Ryabov I.A.

INFLUENCE OF SPEED DEFORMATION ON PROCESSES OF DIFFUSION IN POWDER MATERIALS

Рассмотрено влияние скорости деформации на диффузионные процессы, происходящие в двухкомпонентном порошkovом материале при различных температурах. Для изучения концентрации компонентов в диффузионной зоне порошковых частиц использован растровый электронный микроскоп. Установлено, что с увеличением температуры и скорости деформации концентрация меди в частице титана и титана в частице меди увеличивается с разной интенсивностью. Показано, что с ростом скорости деформации происходит отклонение от линейного закона концентрации компонентов в соответствующих частицах. При низких скоростях деформации это объясняется возникновением вакансий на границах частиц при движении и взаимодействии дислокаций, которые могут возникать в результате миграции дислокационных порогов и оседать на стоках дислокаций. При высоких скоростях деформации основной вклад в массоперенос вносят межузельные атомы. Подвижность межузельных атомов значительно выше подвижности вакансий, т.к. энергия активации перемещения первых очень мала.

Ключевые слова: диффузия, порошковый материал, сжатие, температура, скорость деформации, глубина диффузионной зоны, вакансии, межузельные атомы.

Введение

Для разработки новых порошковых материалов и прогнозирования их эксплуатационных характеристик необходимы сведения о происходящих в них диффузионных процессах твердых фаз различных компонентов. Известно, что в первую очередь процессы растворения и диффузии определяются взаимодействием атомов диффундирующих компонентов с дефектами кристаллической решетки твердого тела и подвижностью этих дефектов (вакансий, межузельных атомов, дислокаций и т.п.) [1]. Одна-

ко скорость диффузионных перемещении атомов зависит не только от внутренних, структурных факторов, но и от внешних воздействий: термических, химических, радиационных, механических и др. Поэтому изучение процессов самодиффузии и диффузии компонентов в порошковых материалах в процессе их деформации несомненно представляет собой актуальную задачу. В настоящее время известно достаточно большое количество работ, в которых обнаружено влияние механических воздействий на процессы самодиффузии в твёрдых телах. Показано, что пластические деформации увеличивают коэффициент самодиффузии на порядок величины [2]. Упругие деформации несколько уменьшают коэффициент самодиффузии в некоторых металлах [3].

Целью работы является анализ экспериментальных данных, полученных при оценке глубины диффузионного слоя, полученного при деформировании сжатием медно-титанового порошкового материала при различных температурах и скоростях деформации.

Методика эксперимента

Экспериментальные исследования выполнены на образцах, изготовленных из механической смеси порошка меди ПМС-1 и порошка титана ВТ1-0. Массовая доля титана составляла 0,5%, исходная пористость 5%. После двустороннего прессования образцы спекали по ступенчатому режиму в среде генераторного газа в течение 3 ч. Деформирование образцов выполняли по схеме одноосного сжатия на испытательной машине ZD-4 при температурах 100, 400 и 600°C и скоростях деформации 0,1 с⁻¹, 0,01 с⁻¹ и 0,001 с⁻¹ до степени деформации 50%.

Для изучения диффузионной зоны, формирующейся при спекании и в процессе деформации порошковых материалов, микроструктуру образцов изучали на растровом электронном микроскопе РЭММА-102, оснащённом рентгеновским микроанализатором, что позволило определить химический состав и распределение концентрации компонентов в диффузионной зоне.

Результаты эксперимента

При спекании медных порошковых образцов при температуре 910°C происходят процессы статического возврата и рекристаллизации. При этом осуществляются диффузионные процессы за счет перестройки дефектов кристаллической решетки. Известно, что прирост величин коэффициента самодиффузии при спекании в ГЦК решетке значительно больше, чем в металлах с ОЦК решеткой. После спекания концентрация меди в частицах титана изменяется от 51,5% на поверхности частицы до 22% на расстоянии 10 мкм от границы. Концентрация титана в частице меди из-

меняется от 0,77 на расстоянии 5 мкм от поверхности частицы до 2,5% на расстоянии от 15 мкм от поверхности частицы [4].

Особенности диффузии в порошковых материалах как при спекании, так и при деформировании связаны с наличием фазы пор, которая препятствует переносу вещества [5].

Известно, что пластические деформации увеличивают коэффициент диффузии на порядок величины [6], что способствует увеличению массопереноса. Упругие деформации сжатия несколько уменьшают коэффициент самодиффузии в некоторых металлах [7]. Эти эффекты объясняются генерацией вакансий и междоузельных атомов при нагружении. Для литейных материалов установлено, что в пределах скоростей деформации от $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ до $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ наблюдается линейная зависимость между коэффициентом самодиффузии и скоростью деформации. Однако дальнейшее увеличение скорости деформации до $5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ приводит к нарушению линейной зависимости коэффициента самодиффузии от скорости деформации, и при скорости деформации более $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ наблюдается уменьшение диффузионной подвижности атомов [8]. При больших скоростях деформации (порядка $1 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$) в условиях импульсного нагружения величина коэффициентов самодиффузии на много порядков превосходят коэффициенты самодиффузии, полученные в стационарных изотермических условиях.

Зависимость между скоростью деформации и ускорением диффузионной подвижности атомов носит нелинейный характер и записывается выражением:

$$D_{\sigma} = D_0 \left(1 + \frac{B}{\dot{\epsilon}} \right),$$

где D_{σ} , D_0 - коэффициенты диффузии и самодиффузии, соответственно;

B - деформационный фактор;

$\dot{\epsilon}$ - скорость деформации;

p - показатель степени.

Зависимость коэффициента диффузии от скорости деформации носит сложный характер. При малых скоростях деформации происходит увеличение коэффициента самодиффузии, что вызвано накоплением дефектов кристаллической решётки в процессе деформации. С увеличением скорости деформации протекание динамической рекристаллизации приводит к уменьшению количества дефектов в кристаллической решётке за счет процессов массопереноса не границах частиц и зерен. Со временем скорость диффузии замедляется.

При деформировании пористых порошковых материалов возможны различные механизмы влияния силы нагружения на диффузию компонентов. Пластическая деформация приводит к генерации вакансий и междоузельных атомов, что приводит к увеличению вероятности диффузионного скачка в вакантное место. Диффузия по границам зёрен и границам частиц может существенно влиять на изменение коэффициента диффузии, обеспечивая интенсификацию диффузии в процессе деформирования. Скорость диффузии экспоненциально возрастает с величиной нагрузки.

На рис. 1 показана зависимость концентрации меди в частице титана и титана в частице меди при скорости деформации $0,1 \text{ c}^{-1}$. С ростом температуры деформирования (степень деформации 50%) концентрации компонентов в порошковых частицах увеличиваются. При этом, также, как и при спекании, концентрация титана в частице меди больше и достигает 70% при температуре 600°C на поверхности частицы, в то время как на расстоянии 5 мкм от поверхности частицы титана концентрация меди при температуре 600°C составляет всего 4%. Если сравнить данные, представленные в работе [3], то в принципе зависимости, полученные при более низких скоростях деформации аналогичные.

Очевидно, механизм процессов диффузии при пластической деформации порошкового материала одинаков и заключается в накопление дефектов кристаллической решетки в плотноупакованных структурах, имеющих дополнительно фазу пор.

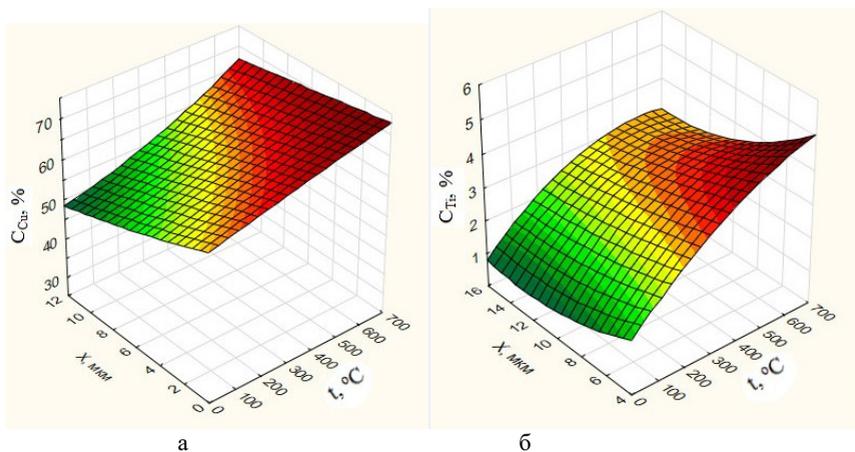


Рис.1. Влияние температуры деформирования на концентрацию меди в частице титана – а и титана в частице меди - б при скорости деформации $0,1 \text{ c}^{-1}$

На рис. 2 показан рост концентрации компонентов в частицах порошкового материала с увеличением скорости деформации. Если в литых

металлах сохраняется линейный характер скорости диффузии при скоростях деформации 10^{-2} с^{-1} , то в пористых порошковых материалах скорость диффузии принимает нелинейный характер при более низких скоростях деформации. Очевидно, это связано с тем, что поровая структура способствует не только массопереносу, но и теплопереносу, что проявляется в интенсификации процессов динамической рекристаллизации [9]. Вновь образующееся рекристаллизованное зерно на границах частиц растет за счет перемещения вакансий и междоузельных атомов.

При малых скоростях деформации коэффициент диффузии возрастает пропорционально скорости. При больших скоростях наблюдается отклонение от линейного закона. Полученные результаты могут быть объяснены исходя из предположений о возникновении вакансий при движении и взаимодействии дислокаций. Избыточные по сравнению с равновесными вакансии могут возникать в результате миграции дислокационных порогов и оседать на стоках дислокаций [10]. При этом массоперенос осуществляется в направлении противоположном направлению движения вакансий (рис. 2).

При высоких скоростях деформации основной вклад в массоперенос вносят междоузельные атомы. Подвижность междоузельных атомов значительно выше подвижности вакансий, т.к. энергия активации перемещения первых очень мала. Возникают междоузельные атомы, по-видимому, при движении на границах частиц винтовых дислокаций со ступеньками, либо смещённых дислокаций с винтовой компонентой, на которой имеется ступенька. При этом одним из основных параметров, определяющих вид генерируемых точечных дефектов и их концентрацию, является скорость движения дислокаций со ступеньками, которая зависит главным образом от напряжений, возникающих в порошkovом материале при деформации. Междоузельные атомы в большинстве металлов имеют обычно значительно большую (в 5-10 раз) энергию образования, чем вакансии. Поэтому при небольших приложенных напряжениях винтовые дислокации со ступеньками движутся в основном за счёт поглощения вакансий, а не за счет создания междоузельных атомов, и лишь при увеличении напряжения до значения выше некоторого критического превалирующими становится образование междоузельных атомов [11].

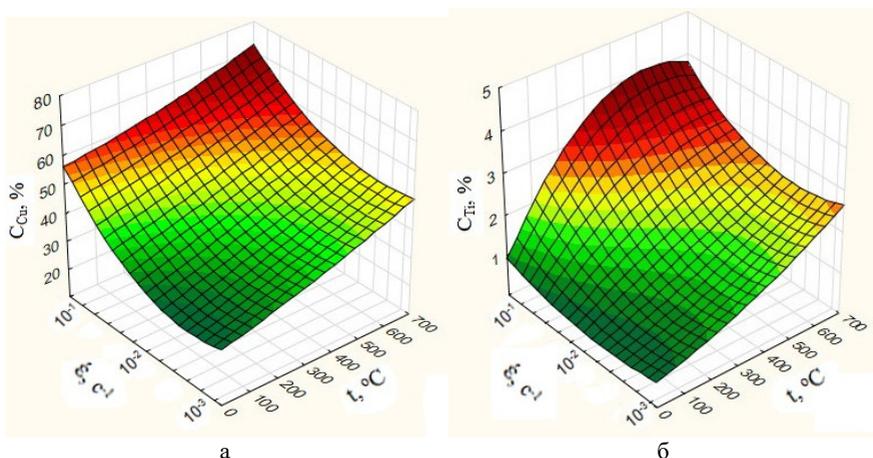


Рис. 2. Влияние скорости деформации на концентрацию меди в частице титана – а и титана в частице меди - б при различных температурах

Выводы

На основании экспериментальных данных изучено влияние скорости деформации на диффузионные процессы, происходящие в двухкомпонентном порошковом материале. Получены данные по распределению компонентов порошкового медно-титанового материала по глубине диффузионного слоя при различных температурах и скоростях деформации.

Установлено, что с увеличением температуры и скорости деформации концентрация меди в частице титана и титана в частице меди увеличивается с разной интенсивностью.

Показано, что с ростом скорости деформации происходит отклонение от линейного закона концентрации компонентов в соответствующих частицах.

При низких скоростях деформации это объясняется возникновением вакансий на границах частиц при движении и взаимодействии дислокаций, которые могут возникать в результате миграции дислокационных порогов и оседать на стоках дислокаций.

При высоких скоростях деформации основной вклад в массоперенос вносят межузельные атомы. Подвижность межузельных атомов значительно выше подвижности вакансий, т.к. энергия активации перемещения первых очень мала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Onaka S., Kato M. Unified Analysis for Various Diffusion-controlled Deformation and Fracture Processes // ISIJ International. 1991. Vol. 31. №4. P. 331-341.
2. Шатт В. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы [пер. с нем.] / М.: Металлургия, 1983. 520 с.
3. Рябичева Л.А., Жарский Н.И., Рябов И.А. Математическая модель взаимной диффузии в порошковом материале // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. Сб. науч. трудов. 2016. №2 (17). С.24-33.
4. Влияние пористости на взаимную диффузию в порошковых материалах / В.Н. Андиферов [и др.]. // Порошковая металлургия. 1987. №4. С. 42-45.
5. Гегузин Я.Е., Богданов В.В., Парицкая Л.Н. Направленный диффузионный массоперенос в пористых структурах // Порошковая металлургия. 1989. №9. С. 27-32.
6. Бокштейн С.З. Диффузия в твердых телах. М.: Металлургия, 1966. 196 с.
7. Парицкая Л.Н. Диффузионные процессы в дисперсных системах. Обзор // Порошковая металлургия. 1990. №11. С. 44-58.
8. Ларииков Л.Н., Макара А.М., Назарук А.Т., Фельченко В.М. // ФиХОМ. 1974. №4. С. 113.
9. Рябичева Л.А. Гапонова О.П. Взаимосвязь параметров пластического деформирования и структурообразования в порошковых пористых телах // Обработка материалов давлением. Сб. науч. трудов. Краматорск, 2009. № 1 (20). С. 193-198.
10. Клепинина И.А. Моделирование диффузионного процесса в бинарных сплавах на заключительной стадии гомогенизации // Известия ТулГУ. Сер. Физика, 2006. №6. С. 121-122.
11. Хирт Д., Лоте И. Теория дислокаций // М.: Атомиздат, 1972. 455 с.

Ryabicheva L.A., Nagorniy E.V., Ryabov I.A. The influence of deformation speed on diffusion processes in powder materials.

The influence of deformation speed on diffusion processes in two-component powder material at various temperatures has been considered. The scanning electron microscope used for studying the concentration of components into the diffusion zone of powder particles. It has established that copper concentration in a titanium particle and titanium concentration in a copper particle increases with different intensity while increasing of temperature and deformation speed. A deviation from the linear law of components concentration in corresponding particles has shown clearly at deformation speed growing. It has explained by the emergence of vacancies borders of particles at dislocations movement and interaction resulting from migration of dislocations' thresholds and settles on drains of dislocations at low deformation speeds. The interstitial atoms made the main impact to mass transfer at high deformation speeds. The mobility of interstitial atoms is much higher than the mobility of vacancies since activation energy of their movement is of very small value.

Keywords: *diffusion, powder material, compression, temperature, deformation speed, diffusion zone depth, vacancy, interstitial atoms.*

Рябичева Людмила Александровна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: процессы, происходящие в порошковых материалах при пластическом деформировании.
e-mail: ryabic@gmail.com

Нагорный Евгений Валериевич – ассистент кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: структура и свойства порошковых материалов при пластическом деформировании.
e-mail: nev1231g@gmail.com

Рябов Илья Александрович – магистр кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: структура порошковых материалов.
e-mail: kaf_mater@mail.ru

Ryabicheva Lyudmula – D.Sc (Eng), Associate Professor, Head of the department of Materials science and Constructions, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interest: the processes happening in powder materials at plastic deformation.

Nahorniy Evgeny – assistant of the department of Materials science and Constructions, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interest: structure and properties of powder materials.

Ryabov Iliya – magistr of the department of Materials science and Constructions, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interest: structure of powder materials.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 693.542.4

Дубасов В.М., Дубасов А.В., Радченко С.Е.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИТЫХ И САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Dubasov V. M., Dubasov And. V., Radchenko S. E.

ANALYSIS OF THE USE OF THE CAST AND SELF-COMPACTING CONCRETE IN CONSTRUCTION

Проведен анализ использования новых на данном этапе развития - самоуплотняющихся бетонных смесей, за рубежом и в России. В статье представлено сравнение самоуплотняющихся бетонных смесей с литыми бетонными смесями, которые могут быть схожи с самоуплотняющимися, и сделан вывод о пересечении области использования смесей с возможной заменой самоуплотняющихся смесей литыми, как наиболее экономичными.

Рассмотрены влияние воздухововлекающей поверхностно-активной добавки на характеристики бетонной смеси (подвижность, связность, воздух вовлечение).

Ключевые слова: добавка, литая бетонная смесь; самоуплотняющаяся бетонная смесь, суперпластификатор, воздухововлекающая безвибрационная технология укладки, густоармированные конструкции.

Введение

Понятие “литые бетонные смеси” (ЛБС) появилось в начале 70-80-х годов, когда стали применяться сначала пластифицирующие, а потом и суперпластифицирующие химические добавки, воздействующие на цемент и позволяющие резко разжижать бетонную смесь до литой консистенции. Такие смеси нашли свое применение в густоармированных, тонкостенных и в труднодоступных элементах конструкций [1, 2]. А с использованием бетононасосов, получила свое развитие бетононасосная технология бетонирования, частности напорная [3, 4].

В конце 80-х годов, благодаря исследованиям японского ученого Х. Окамуры, в технологии приготовления бетонных смесей выделилось направление - самоуплотняющиеся бетонные смеси (СУБС). Такой бетон отличается от обычного по составу, так и по свойствам. Отличие состоит в соотношении материалов и в использовании специальных эффективных

добавок минерального и химического происхождения, за счет которых можно получить бетоны текучей консистенции, а после твердения повышенной прочности. К недостаткам можно отнести большую стоимость и малую пока изученность влияния гиперпластификаторов на цемент после отвердевания бетона с течением продолжительного времени эксплуатации.

В Японии около 50% новых железобетонных конструкций изготавливается из СУБС. В Европе на долю СУБС приходится 7-10% объема производимого бетона. В России данная технология слабо распространена, хотя и здесь имеются примеры успешной ее реализации [5, 6]. В последние десятилетия в России были построены такие уникальные сооружения как: монолитный ростверк пилона М-7 Русского моста во Владивостоке, фундамент под высотный многофункциональный комплекс “Лахта-центр”, бетонирование опытных блоков Саяно-Шушенской и Бурейской ГЭС, здание реактора ЛАЭС-2, кольцевые коридоры реактора НВАЭС и др.

Целью работы является развитие научных представлений в области разработки и применения литых и самоуплотняющихся бетонных смесей при строительстве зданий и сооружений, за счет исследования свойств удобоукладываемости и сопоставления технологических свойств, литых и самоуплотняющихся бетонных смесей.

Методика исследования

В соответствии ГОСТ [7] бетонные смеси подразделяются на марки по удобоукладываемости. В большинстве случаев, специалисты, к литым бетонным смесям относят бетонные смеси с распылом конуса с маркой P5 и более и ОК=24 см и более П5.

Экспериментальная часть исследований проводилась в лаборатории кафедры “Строительство уникальных зданий и сооружений” Санкт-Петербургского политехнического университет Петра Великого.

При добавлении комплексных химических добавок, которые включают суперпластификатор, могут быть получены (без увеличения расхода цемента) нерасслаивающиеся литые бетонные смеси, приближающиеся по пластическим свойствам к самоуплотняющимся, но менее дорогие [8, 9]. Такие смеси рекомендуется укладывать с помощью напорной технологии бетонирования, в стесненных условиях, а также при бетонировании тонкостенных и густоармированных конструкций. Укладка таких смесей может позволить значительно уменьшить затраты труда, повысить производительность и на этой основе получить экономический эффект при одновременном повышении качества строительства и улучшения условий труда.

Для регулирования свойств бетонной смеси и бетона применяются химические добавки, как по отдельности, так и совместно, получая при этом высокоэффективные бетоны. Применение комплекса химических добавок позволит контролировать несколько параметров материала, подавлять побочные эффекты.

Влияние воздухововлекающей поверхностно-активной добавки на характеристики бетонной смеси (подвижность, связность, воздухововлечение) исследовалось при трех расходах цемента ЦЕМ I 42,5Н (280, 340 и 400 кг/м³) и трех дозировках добавки суперпластификатора марки С-3: 0,4; 0,6 и 0,8 %. Добавки вводились в бетонную смесь совместно вместе с водой затворения. Содержание добавок указано в процентах от массы цемента в расчете на сухое вещество добавки. Подвижность бетонной смеси характеризовалась осадкой нормального конуса и диаметром его расплыва. Водоотделение и раствооротделение определяли по стандартной методике [10], а воздухововлечение замерялось прибором С196 производства Matest и проверялось расчетным способом (рис.1).



*а) С-3=0,8%+ЛХД=0,05%
ОК=23 см; D=57 см*



*б) С-3=0,8%+ЛХД=0,1%;
ОК=18,5 см; D=39 см*



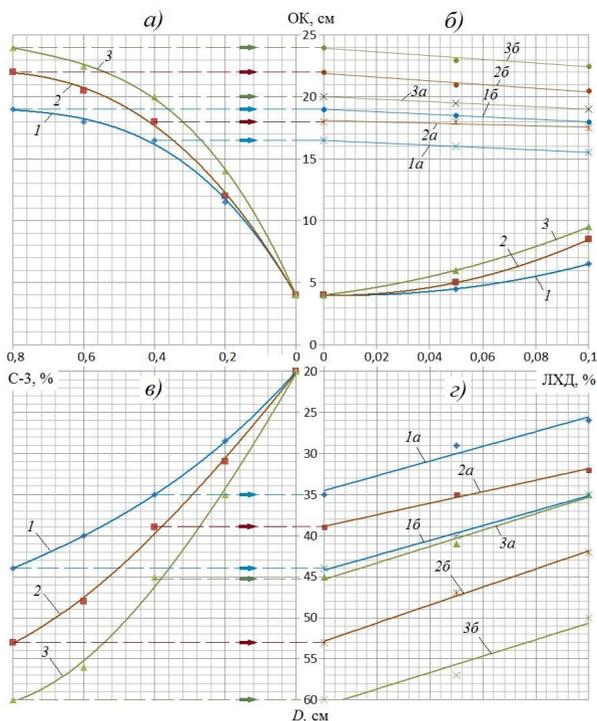
*в) С-3=0,8%+ЛХД=0,05%
ОК=22,5 см; D=50 см*



*г) С-3=0,8%+ЛХД=0,1%
ОК=18 см; D=37 см*

Рис. 1. Влияние воздухововлекающей ЛХД в комплексе с суперпластификатором С-3=0,8 % на характер пластификации бетонной смеси с расходом цемента 400 (а и б) и 280 (в и г)кг/м³

По полученным данным построены графики (рис. 2) влияние содержания добавки ЛХД в комплексе с суперпластификатором С-3 на изменение осадки конуса (ОК) и диаметра расплыва конуса (D)



1,2,3 – бетонная смесь с расходами цемента, соответственно, 280,340 и 400 кг/м³;
а – 0,4% С-3+ЛХД; б – 0,8% С-3+ЛХД

Рис. 2. Влияние содержания добавки ЛХД в комплексе с суперпластификатором С-3 на изменение осадки конуса (ОК) и диаметра расплыва конуса (D)

На номограмме (рис. 2) в левой верхней четверти «а» показано влияние добавки суперпластификатора на основе лигносульфоната нафталина (марки С-3) в различной дозировке от 0 до 0,8%, на осадку конуса, а в четверти «в» - на расплыв конуса; в верхней правой четверти «б» номограммы поверхностно-активной добавки (марки ЛХД). Наклонные линии в верхней части четверти «б» показывают, как изменяется ОК при добавлении добавки марки ЛХД к добавке марки С-3, при дозировке последней 0,4 (кривые 1а, 2а и 3а) и 0,8 % (кривые 1б, 2б и 3б). Аналогичные графики в четверти «г» относятся к расплыву конуса (D).

Из номограммы (рис. 2) видно, что при испытании добавок по отдельности обе они оказали пластифицирующее действие на бетонную

смесь с ОК=4 см, но в разной степени. При этом эффективность обеих добавок возрастала с увеличением расхода цемента.

При расходе цемента 340 кг/м³ и содержании добавки марки С-3 0,8 % ОК увеличилась с 4 до 22 см.

Добавка марки ЛХД, введенная к той же исходной смеси в количестве 0,1 %, повысила ОК до 8,5 см. При введении добавки марки ЛХД совместно с добавкой марки С-3 подвижность бетонной смеси снижается. При этом способ оценки подвижности по осадке конуса оказался менее чувствительным к влиянию добавки марки ЛХД – осадка конуса снизилась незначительно - на 0,5-1,5 см, что составляет 5-6 %. Более чувствительным способом является измерение расплыва конуса. При введении 0,1 % добавки марки ЛХД диаметр расплыва конуса уменьшается в среднем на 18-22 %. Независимо от содержания синергия добавок марок С-3 + ЛХД в отношении пластификации бетонной смеси оказалась отрицательной.

В то же время добавка марки ЛХД способствовала значительному воздухоовлечению и снижению водоотделения и раствооротделения бетонной смеси.

Как видно из рис. 1 и 2 по своим характеристикам бетонные смеси с добавкой С-3=0,8%+ЛХД=0,05% имеют литую консистенцию, а с воздухоовлекающей добавкой становятся более связными и не расслаивающимися. Они практически приближаются к самоуплотняющимся смесям и поэтому часть составов можно использовать в этом качестве, как наиболее экономичные перед самоуплотняющимися.

Самоуплотняющаяся бетонная смесь (рис. 3) – это бетонная смесь, которая без воздействия внешних сил уплотнения (вибрирования) и самостоятельно под воздействием собственного веса течет, освобождается от воздуха и заполняет пространство между опалубкой сооружения и арматурными стержнями. В немецком языке самоуплотняющийся бетон получил сокращённое название SVB (selbstverdichtender Beton), в английском – SCC (self-compacting concrete), во французском – BAP (Béton autoplaçant) [11,12].



Рис. 3. Самоуплотняющаяся бетонная смесь

В 1988 году впервые был представлен прототип самоуплотняющегося бетона. Такие бетонные смеси получили название “High Performance Concrete”.

В 1989 году профессором Отсиным бетон “High Performance Concrete” был определен как бетон с высокой прочностью из-за низкого водоцементного соотношения. С этих пор, термин “High Performance Concrete” используется во всем мире для обозначения высокой прочности бетона. Однако, совсем недавно термин бетона был изменен на “Self-compacting High Performance Concrete”.

В начале 2000-х интерес в Западной Европе, так в институте города Аахен (Германия) профессор В. Брамесхубер изучал свойства самоуплотняющегося бетона. Проведенные им исследования показали какими свойствами обладал самоуплотняющийся бетон по сравнению с обычным бетоном.

Материал получил название «Dyckerhoff Liquidur» и стал активно распространяться по строительным площадкам Европы вследствие своих уникальных свойств.

В 2002 году компания EFNARC опубликовала документ “Specification & Guidelines for Self-Compacting concrete” – (с англ. Спецификация и Руководство по самоуплотняющемуся бетону), который содержал в себе всю необходимую информацию о бетоне для производителей, строителей и проектировщиков.

В 2004 году пять европейских организаций: BIBM, SEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC создали ученую группу, чтобы оценить накопленный опыт применения самоуплотняющегося бетона и подготовить новый документ, который охватывал бы все аспекты самоуплотняющегося бетона. В этом документе “The European Guidelines for Self-Compacting Concrete” (с англ. Европейское руководство по самоуплотняющемуся бетону) были приведены согласованные спецификации бетонных смесей для производства СУБС, методы их испытания, информацию о материалах [10]. В таблице приведена классификация СУБС.

В настоящее время изучение самоуплотняющихся бетонных смесей и методов их диагностики активно продолжается. Исследования проводятся в Техническом Университете города Берлин на строительном факультете под руководством профессора Б. Хиллемайера и доктора Ж. Бухенау. В России применение самоуплотняющегося бетона только получает своё развитие, однако на протяжении последнего десятилетия рядом строительных организаций предприняты успешные попытки применения самоуплотняющегося бетона в гражданском строительстве [8]. Но в виду отсутствия Российской нормативной базы по самоуплотняющимся бетонам пользуются нормативными документами иностранного происхождения.

Классификация бетонных смесей

Название бетонной смеси	Обозначение	Характеристика	Значение величины
1	2	3	4
Высокоподвижная	SF 1	Распływ конуса	550 – 650 мм
	SF 2		660 – 750 мм
	SF 3		760 – 850 мм
Вязкая	VS1/VF1	Вязкость	8 сек.
	VS2/VF2		9-25 сек.
Легкоформируемая	PA1	-	Зависит от частоты армирования сооружения
	PA2		
Устойчивая к расслоению	SR1	Расслаиваемость	< 20%
	SR2		< 15%

В целом, можно отметить, что применение СУБ должно быть экономически оправданно, так как такой бетон имеет свою специфику. В первую очередь должны учитываться параметры сложности и ответственности конструкций, так как самоуплотняющийся бетон – это высокомарочный бетон по прочности (100 и более МПа) и долговечности (морозостойкости до F600). Подразумеваются и повышенные требования к конструкции опалубки, которая должна быть прочной и герметичной, чтобы выдержать гидростатическое давление бетонной смеси.

Материалы, которые используются для приготовления СУБС, в целом, не имеют каких-либо отличий от материалов, используемых в приготовлении традиционных бетонов [11]. Отличается только их соотношение, а также использование специальных эффективных добавок.

Основные исходные материалы для подбора состава СУБС:

- цемент;
- крупный и мелкий заполнитель;
- минеральный наполнитель;
- добавки.

Рассмотрим каждый компонент в отдельности и проследим, как они влияют на бетонную смесь в целом.

Как и в традиционном бетоне основным вяжущим в самоуплотняющихся бетонах является – портландцемент. Это вяжущее имеет сложную минеральную структуру, состоящую из окислов кальция, кремния, алюминия и железа. Иногда используется сульфатостойкий цемент. Следует также отметить, что выбор цемента зависит в первую очередь от назначе-

ния конструкции, которое должно быть указано в техническом задании от заказчика.

Для получения СУБС постоянного качества следует особенно тщательно и непрерывно контролировать и учитывать гранулометрический состав крупного и мелкого заполнителей [11]. В отличие от обычного бетона, СУБС более чувствителен к колебаниям рецептуры, самое большое влияние на него оказывает содержание влаги, как в окружающей среде, так и заполнителей [6]. Крупный и мелкий заполнитель следует хранить в крытых складах, что позволит контролировать влажность и как следствие – водоцементное соотношение. Также при проектировании состава нужно учитывать и форму заполнителя. Окатанная форма заполнителя позволяет уменьшить вероятность упорядоченности заполнителя и тем самым увеличивается расплыв конуса.

В качестве крупного заполнителя рекомендуется применять щебень фракций 5-20, 5-10 из метаморфических горных пород. Крупность заполнителя выбирается из условий: шаг арматуры, размещение арматуры, геометрические формы конструкции. Мелкий заполнитель назначают часто в виде кварцевого песка с модулем крупности 1,7 – 2,5.

В составе бетонов минеральный наполнитель (крупность $< 0,125$ мм) может проявлять себя как инертный материал (известняк, доломит, пылевидный кварц и др.) либо как компонент, обладающий скрытой гидравлической активностью (туф, трепел, опока, микрокремнеземы и др.).

Для регулирования свойств самоуплотняющейся бетонной смеси наибольшее применение нашли химические пластифицирующие добавки, а именно, гиперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилата. Эти добавки обеспечивают стабильность и жизнеспособность бетонной смеси самоуплотняющихся бетонов. Продолжительность пластифицирующего действия поликарбоксилатов в три-четыре раза больше по сравнению с сульфомеланиновыми, сульфонафталиновыми формальдегидами или лигносульфонатами.

Но у добавок на основе поликарбоксилата есть и свои недостатки:

- проблема совместимости с видом цемента.

Поликарбоксилат несовместим с химическим составом портландцемента. Именно поэтому заводам-производителям приходится заменять портландцемент на другой вид цемента, что может вести за собой срывы сроков в поставке сырья хорошего качества.

- поликарбоксилат чувствителен к низким температурам, что особенно актуально для климатических условий в России [12].

- лишнее вовлечение воздуха, что может влиять на прочность бетона.

- особые условия хранения – нельзя допускать высокую влажность и температуру.

- высокая стоимость добавок на основе поликарбоксилата.

Добавки, включая воздухововлекающие, ускоряющие и замедляющие твердение бетона, могут использоваться также, как и в обычном бетоне, с учетом рекомендаций производителя добавок по их применению и способу введения [11].

Рецептура самоуплотняющейся бетонной смеси отличается от состава обычной бетонной смеси. Принципиально другой подход к соотношению и гранулометрии заполнителей (расход щебня не превышает расход песка, рассев заполнителей, по возможности, приближается к идеальной кривой за счет обогащения нескольких фракций). Обязательное присутствие в смеси наполнителей (как правило, это известковый порошок) и повышенном расходе цемента. Тип и дозировка пластифицирующей добавки (как правило, это гиперпластификатор, доза которого на порядок превосходит стандартный расход для обычного бетона).

Выводы

Проведен аналитический обзор зарубежной и российской литературы по теме свойств и особенностей самоуплотняющегося бетона.

Высокая стоимость самоуплотняющихся бетонных смесей, с одной стороны, предполагает их использование только для получения высокопрочных бетонов с высокими и ультравысокими эксплуатационными свойствами, например, для высотных и большепролетных зданий и сооружений, а с другой стороны, побуждает к разработке мероприятий по снижению их себестоимости для расширения области возможного применения. Поскольку СУБС это высокопрочные бетоны, то можно экономить на уменьшении конструктивных размеров элементов конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Телешев В. И., Ватин Н. И., Марчук А. Н., Комаринский М. В. Производство гидротехнических работ. Часть 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы. М.: Изд-во АСВ, 2012. 488 с.
2. Комаринский М. В., Червова Н. А. Транспорт бетонной смеси при строительстве уникальных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №1(28). С. 6-31.
3. Комаринский М. В. Производительность поршневого бетононасоса // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №6(11). С. 43-49.
4. Телешев В. И., Комаринский М. В., Данилов В. М., Рьжов В. А. Исследования и опыт применения бетононасосного транспорта на строительстве Шульбинской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1990. №10. С. 38-43.
5. Несветаев Г. В. Технология самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. №3. С. 24-29.
6. Войлоков И. А. Самоуплотняющиеся бетоны. Новый этап развития бетоноведения // Бетоны. 2008. № 4. С. 5-8.
7. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2011. 22 с.

8. Ватин Н. И., Барабанщиков Ю. Г., Комаринский М. В., Смирнов С. И. Модификация литой бетонной смеси воздухововлекающей добавкой // Инженерно-строительный журнал. 2015. N4(56). С.3-11.

9. Галузин В. М., Комаринский М. В., Телешев В. И. Выбор машин и оборудования для производства бетонных работ. Учебное пособие. Санкт-Петербург, 1995. 55 с.

10. Болотских О. Н. Самоуплотняющийся бетон и его диагностика // Технологии бетонов. 2008. № 10. С. 28-31.

11. Словьянчик А. Р., Пуляев И. С., Нагорный Д. Е. Применение самоуплотняющихся бетонов в транспортном строительстве // Бетон и Железобетон. 2012. №1.

12. Мозгалев К.М., Головнев С.Г., Мозгалева Д.А. Эффективность применения самоуплотняющихся бетонов при возведении монолитных зданий в зимних условиях // Технология и организация строительного производства. 2014. №1. С. 33-37.

Dubasov V. M., Dubasov And. V., Radchenko S. E. Analisis of the use of cast and self-compacting concrete in construction.

The analysis of the use is conducted new on this stage of development - self the made more compact concrete, abroad and in Russia. In the article, comparing self of the made more compact concrete is presented to the cast concrete mixtures that can be similar with self made more compact, and drawn conclusion about crossing of area of the use of mixtures with possible replacement self the made more compact mixtures cast, as most economical.

Considered influence of air of involving superficially - active addition on descriptions of concrete mixture (mobility, connectedness, air involving).

Keywords: *addition, cast concrete mixture; self the made more compact concrete, super plasticizer, air - involving without oscillation technology of piling, thickly reinforced constructions.*

Дубасов Василий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: совершенствование технологии получения новых типов самоуплотняющихся бетонов с высокими и ультравысокими эксплуатационными свойствами.

e-mail: dubasov1955@mail.ru.

Дубасов Андрей Васильевич. – ассистент кафедры транспортных систем Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: аналитические вопросы в бетоноведении.

e-mail: dubasov1955@mail.ru.

Радченко Сергей Евгеньевич – студент Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: прикладные вопросы в бетоноведении.

e-mail: kaf_mater@mail.ru.

Dubasov Vasiliy - candidate of technical sciences, associate professor Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: improvement of technology receiving new types of the self-condensed concrete with high and ultrahigh operational properties.

Dubasov Andrey - assistant of departments of transport systems Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: analytical questions in concrete maintaining.

Radchenko Sergey - student of Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: applied a question in concrete maintaining.

*Статья поступила
6 февраля 2017 г.*

© Дубасов В.М., Дубасов А.В., Радченко С.Е., 2017

УДК 621

Гусенцова Я.А., Приколотина К.К.

**РЕГУЛЯТОРЫ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

Gusentsova J.A., Prikolotina K.K.

**FUZZY LOGIC TEMPERATURE CONTROLLERS
FOR THE SYSTEMS OF HEAT GENERATION
INSTALLATION**

Показаны преимущества регуляторов на базе элементов нечеткой логики, определена их область применения. Отмечено, что основная функция, возлагаемая на нечеткий регулятор - формирование корректирующих поправок к коэффициентам K_1 , K_2 и K_3 ПИД- регулятора в зависимости от текущих координат системы. В этом случае ПИД- регулятор с корректирующим нечетким контроллером представляет собой нелинейную систему. Приведена схема фазорегулятора и показана процедура выбора оптимальных поправочных коэффициентов. Отмечено, что при сохранении длительности переходного процесса величина перерегулирования температуры, как одного из критериев качества регулирования, может быть уменьшена на 25%.

Ключевые слова: регулятор, нечеткая логика, поправочные коэффициенты, теплогенерирующая установка, оптимизация

Введение

Опыт эксплуатации котельных установок показал, что автоматизация объектов теплоснабжения на всех стадиях от производства теплоты до его потребления является действенным средством повышения экономичности этого процесса. Одним из нерешенных вопросов при этом является вопрос о выборе типа регулятора [1, 2].

Экспериментальные и теоретические исследования динамических характеристик промышленных теплогенерирующих объектов показали существенную их нелинейность. В этом случае применение линейных регуляторов не позволяет получить оптимальные динамические характеристики системы, и для решения этой задачи требуются регуляторы с пе-

ременными настройками, переменной структурой или регуляторы, построенные на основе элементов нечеткой логики [3, 6].

Передаточные функции объектов регулирования (котельных установок различной мощности) при нагрузке и разгрузке имеют одинаковую структуру, но различные постоянные времени. В связи с этим, используемый регулятор должен иметь различные коэффициенты настроек в зависимости от знака изменения регулируемого параметра (температуры теплоносителя) и его производной, для того, чтобы обеспечить оптимальные характеристики переходного процесса (время и перерегулирование) [4,5].

Целью работы является анализ работы регуляторов нечеткой логики в системах регулирования температуры.

Постановка задачи

Регуляторы нечеткой логики - наиболее важное приложение теории нечетких множеств. Их функционирование немного отличается от работы обычных регуляторов; для описания системы используются знания экспертов вместо дифференциальных уравнений. Эти знания могут быть выражены естественным образом с помощью лингвистических переменных, которые описываются нечеткими множествами.

Использование нечеткого управления рекомендуется:

- для очень сложных процессов, когда не существует простой математической модели;
- для нелинейных процессов высоких порядков;
- если должна производиться обработка (лингвистически сформулированных) экспертных знаний.

На рис. 1 показаны зоны наиболее эффективного применения различных методов управления, построенные на основе экспертных оценок. Как видно, системы регулирования температуры теплоносителя теплогенерирующих установок занимают промежуточное положение между классическим и нечетким управлением. В настоящее время в этой области, как правило, используются классические системы управления.

Алгоритм управления, основанный на нечеткой логике, включает преобразование входных переменных фазорегулятора в его выходные переменные с помощью следующих взаимосвязанных процедур.

Преобразование нечетких множеств входных физических переменных фазорегулятора, получаемых от измерительных датчиков с объекта управления, в безразмерные относительные переменные (под фазорегулятором будем понимать регулятор на основе элементов нечеткой логики);

Обработка логических высказываний относительно безразмерных входных и выходных переменных фазорегулятора;

Преобразование выходных безразмерных относительных переменных фазорегулятора в физические управляющие переменные.



Рис. 1. Зоны наиболее эффективного применения различных методов управления

Методы исследования

Для выполнения этих процедур используется интервьюирование опытного оператора, либо фиксирование решений (как в случае создания регулятора для теплогенерирующей установки, когда оптимальные настройки регулятора определены для нагрузки объекта и его разгрузки), принимаемых оператором в различных ситуациях, либо, наконец, желательная траектория управления, полученная из каких-либо соображений. Траектория управления определяет формальный закон регулирования, который в свою очередь зависит динамических от свойств объекта.

Основная функция, возлагаемая на нечеткий регулятор - формирование корректирующих поправок к коэффициентам K_1 , K_2 и K_3 ПИД-регулятора в зависимости от текущих координат системы. В этом случае ПИД-регулятор с корректирующим нечетким контроллером представляет собой нелинейную систему. Разработка нечеткого контроллера сводится к решению нескольких задач:

- выбору входных лингвистических переменных на основе анализа поведения замкнутой системы в рассчитанном ранее оптимальном режиме;

- назначению для каждой из лингвистических переменных набора лингвистических значений (термов);

- выбору для каждого из термов аппроксимирующего нечеткого множества;

- созданию базы правил контроллера на основе анализа совокупности значений "входные переменные - управление", полученной для оптимального режима;

- принятию адекватного проблеме механизма нечеткого вывода и выбору эффективного метода преобразования полученного нечеткого управления в "четкий" выходной сигнал.

Процедура обработки входной (четкой) информации в контроллере вкратце может быть описана следующим образом:

- текущие значения входных переменных преобразуются в лингвистические (фазифицируются); - на основании полученных лингвистических значений и с использованием базы правил контроллера производится нечеткий логический вывод, в результате которого вычисляются лингвистические значения выходных переменных; - заключительным этапом обработки является вычисление "четких" значений управляющих параметров (дефазификация).

Для решения рассматриваемой задачи необходима нечеткая система управления с несколькими входами и тремя выходами. Функциональная схема системы управления с использованием динамически корректируемого ПИД-регулятора приведена на рис. 2.

Каждый нечеткий контроллер, вырабатывающий поправки к соответствующим коэффициентам регулятора в реальном масштабе времени, реализует закон управления.

Поправки к соответствующим коэффициентам регулятора должны обеспечивать оптимальный процесс с определенной точки зрения – максимальная ширина пропускания частотного сигнала, минимальное время переходного процесса, минимальная среднеквадратичная ошибка регулирования и т.д.

Стратегии оптимизационного исследования состоит в следующем. Прежде всего, необходимо сформулировать оптимизационную задачу и подготовить ее к решению, выбрать подходящий алгоритм, выбрать или написать эффективную программную реализацию этого алгоритма, провести ряд оптимизационных расчетов, включающих различные корректировки задачи и алгоритма, и, наконец, получив надежное решение, проинтерпретировать его в терминах реальной системы и использовать на практике.

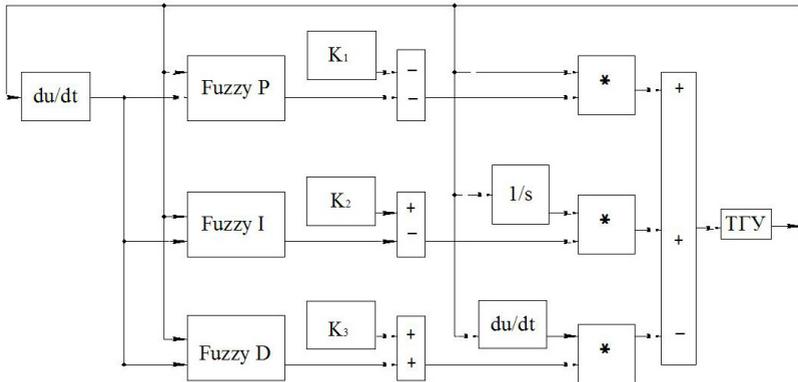


Рис. 2. Схема фазорегулятора

Учитывая, что почти во всех технических приложениях оптимизационные алгоритмы используются в виде уже готовой программы, при проведении оптимизационного исследования больше всего времени занимает правильная постановка задачи, подготовка ее к решению и предварительные расчеты для выявления ошибок и отладки программ.

Как указано выше, задача, к которой можно применить оптимизационные методы, должна включать критерий эффективности, ряд независимых переменных, а также ограничения в виде равенств и неравенств, которые и образуют модель рассматриваемой системы. Описание и построение модели реальной системы — важнейший этап оптимизационного исследования, так как он определяет практическую ценность получаемого решения и возможность его реализации.

Процесс оптимизации с использованием модели можно рассматривать как метод отыскания оптимального решения для реальной системы без непосредственного экспериментирования с самой системой.

Распространенным методом оптимизации является метод «сравнительной точки». Суть метода состоит в том, что лицо, принимающее решение (эксперт), задает в пространстве целей желаемое решение в виде совокупности численных значений всех частных критериев. Этот вектор и является сравнительной точкой. С его помощью формируется обобщенная целевая функция. Такой подход представлен на рис 3.

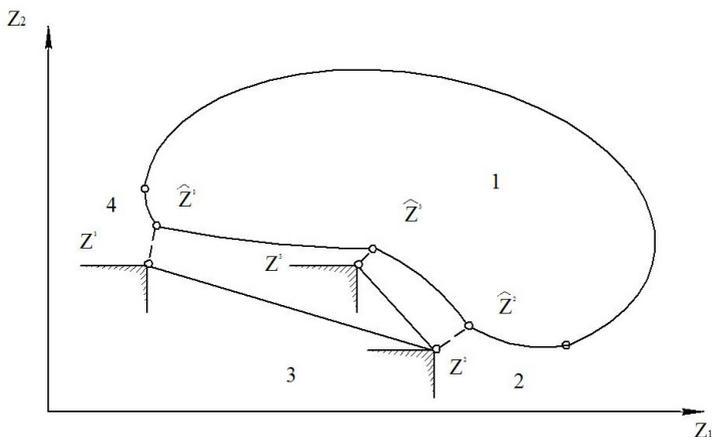


Рис. 3. Реализация метода сравнительной точности (1-множество эффективных решений; 2-оболочка множества эффективных решений; 3-пространство целей; 4-решения в «сравнительных» точках)

В режиме диалога эксперт задает «сравнительные точки» $\{\bar{z}^1, \bar{z}^2, \dots\}$. На ЭВМ каждый раз решается задача минимизации целевой функции, при этом находятся точки эффективного множества решений $\{\bar{z}^1, \bar{z}^2, \dots\}$ и вычисляется оценка расстояния между соответствующими точками \bar{z}^i и \hat{z}^i . Эксперт, имея представления о целях оптимизации, задает координаты сравнительных точек и оценивает эффективные решения. Тем самым, в процессе оптимизации может использовать свой личный опыт, интуицию, творческие идеи.

Определим в общих словах области применения нечеткого управления. Использование нечеткого управления рекомендуется:

- для очень сложных процессов, когда не существует простой математической модели;
- для нелинейных процессов высоких порядков;
- если должна производиться обработка (лингвистически сформулированных) экспертных знаний.

Алгоритм управления, основанный на нечеткой логике, включает преобразование входных переменных фазорегулятора в его выходные переменные с помощью следующих взаимосвязанных процедур:

1. Преобразование нечетких множеств входных физических переменных фазорегулятора, получаемых от измерительных датчиков с объекта управления, в безразмерные относительные переменные (под фазорегулятором будем понимать регулятор на основе элементов нечеткой логики);

2. Обработка логических высказываний относительно безразмерных входных и выходных переменных фазорегулятора;

3. Преобразование выходных безразмерных относительных переменных фазорегулятора в физические управляющие переменные.

Для выполнения этих процедур используется интервьюирование опытного оператора, либо фиксирование решений (как в случае создания регулятора для теплогенерирующей установки, когда оптимальные настройки регулятора определены для нагрузки объекта и его разгрузки), принимаемых оператором в различных ситуациях, либо, наконец, желательная траектория управления, полученная из каких-либо соображений.

Приведенная процедура апробирована при определении характеристик котельной установки КСВА (рис. 4).

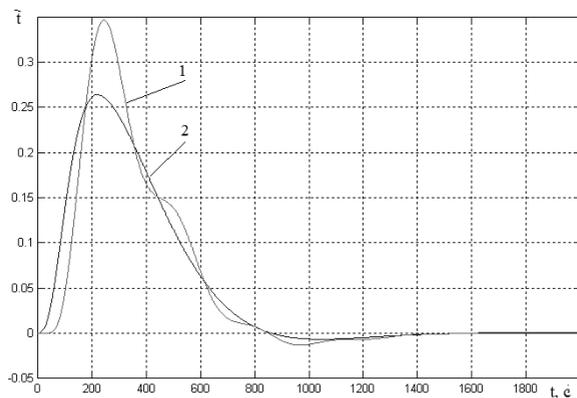


Рис. 4. Реакция теплогенерирующего объекта на импульсное воздействие с использованием фазорегулятора (кривая 2) и без (кривая 1)

Вывод

Расчеты показали, что при сохранении длительности переходного процесса величина перерегулирования уменьшилась на 25%. Полученные данные могут быть использованы в качестве параметра оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Банди Б. Методы оптимизации / Б. Банди. М.: Радио связь, 1988. 128 с.
2. Гусенцова Я. А. Эффективность регуляторов в системах воздушного отопления и вентиляции [Электронный ресурс] / Я. А. Гусенцова, А. В. Лукьянов // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2009. – №4. – Режим доступа: <http://nbuv.gov.ua/e-journals/Vsunud/2009-4E/09gyaov.htm>

3. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.

4. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: В 2-х кн. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. М.: Мир, 1986.

5. Kovalenko, A., Baranich, J., Andrichuk, N. "Dynamic Characteristics of Fuzzy Logical Pneumatic Elements", Transaction of Ghulam Ishaq Khan Institute of Engineering Science and Technology, Vol. 1, No. 1, January 2004.

6. Novak, V.: Fuzzy sets and their applications, Bristol, 1989, pp. 113-115.

Gusentsova Y., Prikolotina K. Fuzzy Logic Temperature Controllers For The Systems Of Heat Generation Installation

The advantages of regulators on the basis of fuzzy logic elements, determined their scope of application. were shown. It is noted that the main functions assigned to the fuzzy controller - the formation of corrective amendments to the coefficients K1, K2 and K3 PID controller depending on the current coordinate system. In this case, the PID controller with a correction fuzzy controller is a nonlinear system. It is also showed fuzzy controller scheme and procedure of selection the optimal correction coefficients. It is noted that if the duration of the transient temperature overshoot value as a criterion for regulation of quality can be reduced by 25%.

Keywords: control, fuzzy logic, correction factors, heat generating plant optimization.

Гусенцова Яна Алимовна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой технологии и организации строительного производства Луганского национального аграрного университета, г. Луганск. Научные интересы: математическое моделирование гидромеханических процессов в гидроприводах различного назначения, моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий и зданий, вопросы регулирования процессов тепло- и массообмена.
e-mail: gusentsova@gmail.com

Приколотина Карина Константиновна – аспирантка кафедры технологии и организации строительного производства Луганского национального аграрного университета, г. Луганск. Научные интересы: моделирование и расчет вентиляционных систем промышленных предприятий и зданий, вопросы регулирования процессов тепло- и массообмена.
e-mail: karina_0101@mail.ru

Gusentsova Yana – Doctor of Technical Sciences, professor, Chief of the department technology and organization of building production of Lugansk National Agrarian University, c. Lugansk. Scientific interests: mathematical simulation of hydrodynamic processes in hydraulic drives for various purposes, modeling and calculation of ventilation systems for industrial plants and buildings, the regulation of processes of heat and mass exchange.

Prikolotina Karina - Postgraduate student of the department of technology and organization of building production of Lugansk National Agrarian University, c. Lugansk.

Scientific interests: modeling and calculation of ventilation systems of industrial enterprises and buildings, regulation of heat and mass exchange.

Статья поступила

12 февраля 2017 г.

© Гусенцова Я.А. Приколотина К.К., 2017

**БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ЧЕЛОВЕКА. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

УДК 629.4

Малов В.А., Медяник В.А., Житная С.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПОРТНОГО ТЕПЛОВОЗА ТЭ114И (DEM 2800)

Malov V.A., Medyanik V.A., Zhytnaya S.V.

STUDY OF ACOUSTIC PERFORMANCE EXPORT LOCOMOTIVE ТЭ114И (DEM 2800)

Изложены результаты исследования акустических характеристик тепловоза в сфере требований безопасности и охраны труда, которые обусловлены конструктивными особенностями тепловоза. Представлены результаты экспериментальных измерений акустических характеристик тепловоза в части показателей шума в кабинах машиниста, внешнего шума, создаваемого движущимся тепловозом, звука и частот основного тона звуковых сигнальных устройств. Определены и оценены количественные показатели шума. Выявлено, что уровни звукового давления на всех октавных частотах не превышают допустимых значений.

Ключевые слова: тепловоз, уровни звукового давления в октавных полосах частот, общий уровень звука, частота основного тона.

Введение

Среди требований, предъявляемых в современном локомотивостроении, большое внимание уделяется акустическим показателям тепловоза [1, 2]. Данные показатели обусловлены задачами безопасности и охраны труда [3].

Целью работы является проведение исследований акустических характеристик тепловоза ТЭ114И (DEM 2800) при его работе, обусловленных конструктивными особенностями тепловоза.

Объект исследований

Тепловоз ТЭ114И (DEM 2800) как источник шума. Тепловоз магистральный односекционный двухкабинный, предназначен для грузопассажирской службы в климатических условиях стран с тропическим климатом и высокой запыленностью воздуха. Тепловоз имеет электрическую передачу переменного-постоянного тока. Мощность тепловоза-1800 кВт,

конструкционная скорость движения-140 км/ч. Экипаж тепловоза имеет двухступенчатое рессорное подвешивание. В кабинах машиниста установлены системы обеспечения микроклимата (кондиционеры).

Для защиты локомотивной бригады предусмотрены конструктивные меры: глушитель шума дизельного двигателя, перегородка между машинным отделением и кабиной машиниста, звукоизоляция кабины машиниста.

Методика исследований

Оценка акустических характеристик тепловоза проводится по следующим показателям:

- уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц и общий уровень звука (в дБА) в кабинах машиниста;

- уровень внешнего шума (в дБА), создаваемый движущимся тепловозом;

- уровни звукового давления (в дБ_{лин}) и частоты основного тона звуковых сигнальных устройств.

Исследования проводились в соответствии с ГОСТ 12.2.056-81, в части касающейся конструкции и состояния пути на испытательном участке, режима работы и технического состояния тепловоза и расположения микрофона при проведении измерений.

Проведение измерений

Комплекс аппаратуры для проведения измерений уровней звукового давления включает: микрофон, шумомер и калибратор.

Измерения проводят поэтапно. Перед каждым этапом измерений проводят подготовку и калибровку измерительной аппаратуры.

Расположение микрофона следующее:

- при измерении уровней звукового давления в октавных полосах частот и общего уровня звука в кабине машиниста в соответствии с методикой микрофон устанавливается в центре кабины машиниста, на высоте 1,6 м от уровня пола, главная ось которого направляется вниз;

- при измерении уровня внешнего шума, создаваемого движущимся тепловозом микрофон устанавливается перпендикулярно оси пути, на расстоянии 25 м от оси пути;

- при измерении уровней звукового давления звуковых сигнальных устройств микрофон устанавливается на расстоянии 5 м от переднего торца раструба тифона по его продольной оси.

Режим работы тепловоза при движении следующий: скорость движения – 2/3 конструкционной 93,3 км/ч при мощности 2/3 номинальной – XII позиция контроллера машиниста; при измерении уровней звукового

давления и частоты основного тона звуковых сигнальных устройств тепловозов находится на стоянке, дизель генератор работает на холостом ходу.

При движении все вспомогательные агрегаты тепловоза (кондиционер, тормозной компрессор, мотор-вентиляторы) были включены.

Тепловоз выезжает на испытательный участок и по достижению необходимой скорости и всех вышеперечисленных условий проводятся измерения.

Количество измерений каждого показателя – не менее трех.

Обработка результатов измерений

Результаты измерений обрабатывались в лабораторных условиях. При этом в каждой октавной полосе частот и общих уровней звука величин определялось среднее арифметическое значение.

Средние арифметические значения в каждой октавной полосе частот и общего уровня звука величин сравнивались с допускаемыми по нормативной документации [1, 2].

Анализ результатов измерений

Результаты измерений уровней звукового давления в октавных полосах частот и общего уровня звука в кабинах машиниста приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Уровни звукового давления в октавных полосах частот и общий уровень звука в кабинах тепловоза

Объект испытаний	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц									Общий уровень звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Кабина А	95	92	84	76	74	70	60	56	54	75
Кабина Б	93	94	86	78	76	71	64	62	56	78

Уровень внешнего шума, создаваемый движущимся тепловозом на звеньевом пути составил 87 дБА.

Уровни звукового давления и частоты основного тона звуковых сигнальных устройств приведены в табл. 2.

Уровни звукового давления (УЗД, дБ_{лин}) и частоты основного тона (Гц) звуковых сигнальных устройств

Место измерения	Объект измерений	Определяемые параметры	Измеренные величины	Нормативное значение
Кабина А	Тифон низкого тона	УЗД	124	120±5
		Частота	380	360-380
	Тифон высокого тона	УЗД	124,5	120±5
		Частота	670	645-675
Кабина Б	Тифон низкого тона	УЗД	124,5	120±5
		Частота	370	360-380
	Тифон высокого тона	УЗД	124	120±5
		Частота	665	645-675

Выводы

Исследования акустических показателей экспортного тепловоза ТЭ114И (ДЕМ 2800) показали следующее:

1. Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц и общий уровень звука (в дБА) в кабинах машиниста не превышают нормативных значений по ГОСТ 12.1.003-83;

2. Уровень внешнего шума (в дБА), создаваемый движущимся тепловозом не превышает нормативных значений по ГОСТ 12.2.056-81;

3. Уровни звукового давления (в дБ_{лин}) и частоты основного тона звуковых сигнальных устройств соответствуют нормативным требованиям по ГОСТ 12.2.056-81.

Полученные величины уровней звукового давления определяются:

4. В кабине машиниста – работой дизельного двигателя (процессами впуска-выпуска), взаимодействием колеса и рельса при движении тепловоза, работой тормозного компрессора и мотор-вентиляторов, а также в значительной степени работой кондиционера;

5. Внешнего шума – работой дизельного двигателя, взаимодействием колеса и рельса при движении тепловоза, работой мотор-вентиляторов холодильной камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.2.056-81.Электровозы и тепловозы колеи 1520 мм. Требования безопасности. М.: 1981. 27 с.
2. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. М.: 1983. 13 с.
3. Касьянов М.А., Малов В.А., Пительгузов М.А. Зниження шумового навантаження на обслуговуючий персонал і пасажирів дизель- і електропоїздів: Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту. ім. В. Даля, 2008. 160 с.

Malov V.A., Medyanik V.A., Zhytnaya S.V. Study of acoustic performace export locomotive ТЭ114И (DEM 2800)

The paper concerns the study of acoustic characteristics of the locomotive in the field of safety and labor protection which are caused by design features of a locomotive are stated. The purpose of work is carrying out researches of acoustic characteristics of locomotive ТЭ114И (DEM 2800) at its work, caused by design features of a locomotive. The results of experimental research on identifying and assessing the acoustic characteristics of the locomotive in terms of noise indicators in the cab, the external noise generated by a moving locomotive, sound and frequency of the pitch audible warning devices. The results of mathematical processing of experimental data. Identified and quantified indicators. It is revealed that levels of sound pressure on all octava frequencies do not exceed admissible values. The level of external noise created by a moving locomotive does not exceed standard values in accordance with GOST 12.2.056-81. Levels of sound pressure and frequency of the main tone of sound signaling devices correspond to standard requirements in accordance with GOST 12.2.056-81.

Keywords: locomotive, sound pressure levels in octave bands overall sound level, pitch frequency.

Малов Вячеслав Анатольевич – кандидат технических наук, начальник отдела ПАО «Лугансктепловоз». Научные интересы: охрана труда в машиностроении.
e-mail: malov.lt@gmail.com

Медяник Виктор Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой охраны труда и БЖД Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: управление охраной труда на предприятиях региона.
e-mail: ot.bgd.dahl@yandex.ru

Житная Светлана Валерьевна – старший преподаватель кафедры охраны труда и БЖД Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: улучшение условий труда на машиностроительных предприятиях региона.
ot.bgd.dahl@yandex.ru

Malov Vjatcheslav – candidate of technical sciences, head of the personnel department of PJSC "Luganskteplovoz". Scientific interests: labor protection in mechanical engineering.

e-mail: malov.ltz@gmail.com

Medianik Victor – candidate of technical Sciences, Professor, head of Department "Occupational health and safety" Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Research interests: management of labor protection at the enterprises of the region.

e-mail: ot.bgd.dahl@yandex.ru

Zhytnaya Svetlana – senior lecturer of the Department "Occupational health and safety" Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Research interests: improvement of working conditions at the machine-building enterprises of the region.

e-mail: ot.bgd.dahl@yandex.ru

Статья поступила

5 февраля 2017 г.

©Малов В.А., Медяник В.А., Житная С.В.

УДК 629.1

Сало В.И., Пронина Ю.Г.

АНАЛИЗ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРО- И ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ

Salo V.I., Pronina Y.G.

ANALYSIS OF REGULATORY DOCUMENTS IN THE FIELD OF ELECTRICAL AND FIRE SAFETY

Проведено исследование действующей нормативной и законодательной базы Евросоюза (ЕС), Украины и ЛНР относительно электро- и пожаробезопасности на производстве. Так как в настоящее время увеличивается число травмирующихся вследствие устаревшего оборудования, недостаточного финансирования мероприятий по охране труда, недостатка средств индивидуальной и коллективной защиты и многих других причин, необходимо на предприятиях всех форм собственности вводить и обеспечивать функционирование СУОТ, а также перенимать положительный опыт других государств в этой сфере.

Ключевые слова: травматизм, несчастный случай, электробезопасность, пожарная безопасность, система управления охраной труда (СУОТ), законодательство в сфере охраны труда, стандарт OHSAS 18001:2007.

Введение

В современных условиях рыночных отношений функционирует большое количество организаций, учреждений, предприятий, где работодатели полностью несут ответственность за создание безопасных и здоровых условий труда, обучение работников безопасным методам труда, предупреждение случаев травматизма, профзаболеваний, аварий и пожаров. Статистика свидетельствует, что смертность от несчастных случаев на производстве занимает третье место после сердечно-сосудистых и онкозаболеваний в трудоспособном возрасте. Травматизм наносит значительный моральный и материальный ущерб, поэтому безопасности труда уделяется особое внимание [1].

За последние 25 лет независимости Украины уровень производственного травматизма значительно выше, чем во многих других странах, поэтому необходимо применять принципы системного подхода к законодательной базе в области охраны труда. В 1976 г. кафедрой охраны труда Национального университета "Львовская политехника" и проф. Г.Г. Гоги-

ташвили впервые разработана и теоретически обоснована система управления безопасностью труда на базе созданных стандартов предприятия по безопасности труда. Первый шаг в этом направлении Украина сделала в 1992 г., утвердив Верховной Радой (ВР) Закон "Об охране труда"[2] с целью обеспечения функционирования Системы управления охраной труда (СУОТ) на предприятиях всех форм собственности, а в Луганской Народной Республике (ЛНР) это прописано в Трудовом кодексе [3].

Провозгласив курс на интеграцию в ЕС, Украина гармонизирует стандарты, как в сфере финансово-экономической деятельности, качества продукции, экологии, так и в сфере безопасности труда [1]. Согласно ст. 9 Конституции Украины [4], действующие международные договоры, согласие на обязательность которых дано ВР, являются частью национального законодательства Украины. Если международным договором или международным соглашением, в которых принимает участие Украина, введены иные правила, чем те, которые содержит законодательство Украины о труде, то применяются правила международного договора или международного соглашения (ст. 1-8 КЗоТ [5]). Трудовым кодексом ЛНР закреплено действие законодательной базы Украины, если нормативные документы не отменены или не заменены на действующие. Таким образом, в Кодексе нашего государства и в КЗоТ Украины закреплён принцип приоритета международно-правовых норм перед нормами национального законодательства.

Анализ состояния вопроса

Анализ абсолютных показателей отчетных данных органов Госгорпромнадзора Украины о состоянии безопасности труда на производстве показал, что в 2013 г. по сравнению с 2012 г. количество травмированных на производстве уменьшилось почти на 13%, а количество пострадавших со смертельным исходом уменьшилось на 14% [6]. Одной из причин снижения травматизма является экономическая ситуация в стране, которая привела к сокращению производства и уменьшению количества людей, занятых в нем. В таблице приведено состояние производственного травматизма за последние 4 месяца 2014 г. и за весь 2013 г.

Т а б л и ц а

Состояние производственного травматизма

Область надзора	4 месяца 2014 г.	4 месяца 2013 г.	2013 г.
	Всего	Всего	Всего
Энергетика	7	6	171

Отсюда видно, что в энергетике достаточно большое количество травмированных, и за последние 4 месяца это число даже увеличилось.

Электробезопасность – это система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества [7].

Число травм, вызванных воздействием электрического тока, исходя из анализа производственного травматизма, является незначительной и составляет около 1%. Однако из общего количества несчастных случаев со смертельным исходом доля электротравм составляет 20-40% и занимает ведущее место. Наибольшее количество случаев происходит при эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В, что связано с их распространением и относительной доступностью практически для участников производственного процесса. Напротив случаи электротравматизма при эксплуатации электроустановок напряжением свыше 1000 В редкие, что обусловлено незначительным их распространением и обслуживанием такого оборудования высококвалифицированным персоналом [8].

Поэтому, электробезопасность, как в быту, так и на производстве, является одним из основных направлений охраны труда. Основной проблемой сферы остается моральная устарелость нормативно-правовой и нормативно-технической базы регулирования отношений в сфере охраны труда, поскольку большинство актов нормативно-технического характера остаются действующими еще со времен СССР.

Целью работы является исследование действующей нормативной и правовой базы в сфере охраны труда (электро- и пожаробезопасности) в ЛНР, Украине и ЕС.

Результаты исследований

Взрывы и пожары на производстве являются особо опасными авариями, которые приводят не только к большим разрушениям и повреждению оборудования и производственных объектов, но и часто к поражению и гибели производственного персонала. В значительной степени источниками взрывов и пожаров являются оборудование и машины, особенно электрическое оборудование, электрифицированные машины и кабели. При их функционировании возможно: появление искр и возникновение электрической дуги, опасный нагрев поверхностей, фрикционное искрение, а также разряд статического электричества, который появляется при применении полимерных материалов в оборудовании и изделиях [9].

Электромагнитная энергия является основой функционирования как традиционных производственных технологий и механизмов, так и самых современных технических направлений и средств, таких как микропроцессорная и компьютерная техника. В тоже время электромагнитные процессы являются очень пожароопасными, о чем свидетельствует тенденция роста количества пожаров от электрического тока по сравнению с их об-

щим количеством. Поэтому предотвращение пожаров в производственной и бытовой сферах является одним из направлений обеспечения пожарной безопасности объектов. Это достигается также и через недопущение возникновения в горючей среде источников зажигания (ИЗ), согласно стандарта [10].

Известно, что электроустановки – это оборудование, в котором потенциально всегда возможно возникновение ИЗ электромагнитной природы. Поэтому одним из путей недопущения возникновения в горючей среде ИЗ электромагнитной природы является использование электрооборудования, которое соответствует окружающей среде. Следовательно, все помещения, в зависимости от наличия в них агрессивной для электрооборудования среды (влаги, пыли, повышенной температуры, химических соединений и т.п.), подразделяются на различные классы. Кроме того, все производственные помещения и открытые (внешние) установки, в зависимости от степени пожаро- или взрывоопасности окружающей среды по отношению к электрооборудованию делятся на разные зоны. Оболочка электрооборудования или специальные устройства, защищающие ее токонесущие части, способны предотвратить контакт между потенциальными ИЗ в электрооборудовании и внешней пожаро- или взрывоопасной средой, в которой находится это оборудование.

Исходя из изложенного следует, что знание такой классификации (окружающей среды и электрооборудования) позволяет уверенно и квалифицированно подходить к обеспечению пожарной безопасности электрооборудования при его проектировании, создании и эксплуатации в той или иной среде. Взрывопожароопасные производства проектируются и эксплуатируются с учетом ряда средств и мероприятий по обеспечению безопасности, но как показывает практика, при нарушении технологических процессов, авариях с оборудованием, дефектах эксплуатации эта опасность возрастает.

Законодательная база в отношении электро- и пожаробезопасности: 1) Закон Украины «О пожарной безопасности» [11]; 2) ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей; 3) ГОСТ 12.1.084-85. Пожарная безопасность; 4) ГОСТ 12.2.007-75. Изделия электротехнические; 5) ГОСТ 14254-96. Изделия электротехнические. Оболочки. Степени защиты. Обозначения; 6) Правила устройства электроустановок (ПУЭ).

На территории ЛНР действуют нормативные правовые акты по охране труда (НПАОП), согласно государственного реестра нормативно-правовых актов по вопросам охраны труда, утвержденного приказом Госгорпромнадзора Украины от 21.07.2015 № 41.

Правила устройства электроустановок (ПУЭ) – нормативный документ, описывающий устройство, принцип построения, требования к отдельным системам, их элементам и узлам электроустановок. Это один из

основных документов при проектировании элементов электрических сетей [12]. В течение более чем 50 лет ПУЭ регулярно пересматривались и дополнялись. Эту необходимость диктовал прогресс техники и технологий и повышение требований к безопасности и надежности электроустановок. Модифицированные ПУЭ выпускались в виде новых последовательных изданий. В данный момент в разных странах СНГ действующими являются различные редакции ПУЭ бывшего Советского Союза, так в России это 7 издание 2003 г., а в Беларуси – 6. В ЛНР, как и в Украине актуальным изданием ПУЭ является версия, выпущенная в 2011-2012 гг. с изменениями и дополнениями. В основе лежат Правила, выпущенные в СССР в 1986 г. ПУЭ действует на новые и переоборудованные электроустановки напряжением до 500 кВ, в них включаются и специальные электрические установки.

В Европе в 1999 г. был принят международный стандарт OHSAS 18001 «Система управления охраны здоровья и безопасности труда» [13]. Он ориентирован на создание такой СУОТ, которая в виде подсистемы могла бы быть объединена с другими подсистемами (качества, охраны среды) в рамках единой интегрированной системы управления предприятием (организацией). Это дает возможность проверить функционирование СУОТ на предприятии сторонними сертифицированными фирмами. На сегодняшний день OHSAS является единственным международным стандартом в сфере охраны труда, который "работает" на минимизацию рисков на всех производственных участках, и нет другого такого документа, который мог бы убедить потенциального иностранного инвестора, что на предприятии все в порядке с профессиональной безопасностью и нет рисков возникновения производственных аварий [1].

В Украине в 2006 г. утверждены "Рекомендации относительно построения СУОТ на производстве", в которых учтены требования OHSAS 18001:1999 по разработке политики предприятия в сфере охраны труда, проведения аудитов, анализа и предупреждения возможных угроз жизни и здоровью работников, разработка и внедрение дальнейших мероприятий по уменьшению рисков и т.п. Для более эффективного предупреждения травматизма и сертификации предприятия международной фирмой, например Det Narske Veritas, целесообразно до составления карт условий труда, необходимых для аттестации рабочих мест, составить карты идентификации оценки профессионального риска на рабочем месте, своевременно их обновлять при появлении новых рисков и использовать во время инструктажа на рабочем месте. Для получения международного сертификата на соответствие СУОТ предприятия требованиям OHSAS надо дать доказательные ответы на все вопросы контрольной карты [6]. В любой организации, на каждом предприятии должен быть человек, ответственный за охрану труда и здоровье персонала. Его обязанности очень четко определены законодательством. В первоочередную задачу такого специа-

листа входит следить за безопасностью рабочей среды для сотрудников, заниматься улучшением этой среды, с целью снижения существующих рисков и повышения сознательности сотрудников.

На всей территории ЕС действует Директива об электробезопасности [14], которая была утверждена в 1973 г. с целью гармонизации законов стран ЕС в отношении электрооборудования. Директива 2006/95/ЕС (Directive LVD – Директива низкого напряжения) по электробезопасности относится ко всему электрооборудованию, предназначенному для реализации или использования в странах ЕС при номинальном напряжении от 50 до 1000 V для переменного тока и от 75 до 1500 V постоянного тока [15]. Эта директива не относится к электрооборудованию, которое используется во взрывоопасной среде (ATEX), к медицинскому электрооборудованию, в том числе рентгеновскому, к различным электрическим деталям и узлам лифтов, электросчетчиков, различным измерителям электрического поля и специальному оборудованию, которое используется на железной дороге, судах и в авиации. Относительно указанной продукции действуют Директивы ЕС, применяемые именно к этой продукции.

Директива низкого напряжения относится к потребительским товарам, к различным электрическим приборам, ручным электрическим инструментам, осветительным приборам различного назначения, электрическому установочному оборудованию, удлинителям и соединителям приборов, кабельным системам и пр. Также она относится к конкретному электрическому оборудованию и электроприборам, к приборам, которые могут монтироваться в другом оборудовании и устройствах, но соответствие безопасности зависит от конкретного электрического устройства. Составные части электрических приборов и оборудования отдельно не проходят процедуру сертификации на электробезопасность и не подлежат отдельной маркировке знаком CE (CE Mark), испытаниям подвергается изделие в целом.

Директива по электробезопасности применяется довольно часто к продукции, которая подпадает не только под Директиву по машинам и оборудованию, но и под другие Директивы ЕС, такие как Директива 89/106/ЕЕС – строительные изделия, Директива 92/42/ЕЕС, Директива 2009/42/ЕС и другие.

Выводы

В результате выполненного исследования была рассмотрена нормативно-правовая база ЕС, Украины и ЛНР по электро- и пожарной безопасности. Для сравнения были использованы некоторые материалы из Европейской Директивы, действующей на территории ЕС. Необходимо на предприятиях всех форм собственности вводить и обеспечивать функционирование СУОТ из-за возросшего уровня травматизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гогіташвілі Г. Г., Карчевські С.Т., Лапін В.М.. Управління охороною праці та ризиком за міжнародними стандартами: навч. пос. К.: Знання, 2007. 367 с.
2. Закон України «Об охране труда» от 21.11.2002 г. №229-IV.
3. Трудовой Кодекс ЛНР от 30.04.2015 г. №23-П.
4. Конституция Украины от 28.06.1996 г. № 254к/96-ВР // Ведомости Верховного Совета Украины. – 1996. – № 9.
5. Кодекс законів про працю України № 322-VIII від 10.12.1971 р.
6. Официальный сайт Госгорпромнадзора Украины – URL: <http://gnmc.kiev.ua/>
7. Лут М.Т., Коробський В.В., Наливайко В.А., Радько І.П. Експлуатація енергетичного обладнання, К.: 2005. 175 с.
8. Інформаційний бюлетень з охорони праці №1 (71), 2014.
9. Ткачук С.П., Ткачук С.П., Колосюк В.П., Ихно С.А. Взрывопожаробезопасность горного оборудования, К.: Основа, 2000. 694 с.
10. ГОСТ 12.1.004-91 "Пожарная безопасность". Дата введения 1 июля 1992 г. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 126 с.
11. Закон України “Про пожежну безпеку”. Вид. 17. XII. 1993 р. Законодавство України про охорону праці. Збірник нормативних документів, т.3 –Київ: Основа, 1995. – С. 220-240.
12. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – К.: Минтопливэнерго, 2010. – 776 с.
13. OHSAS 18001:2007 / Тылиндус А.П. – 2008. – 27 с.
14. Rodger Gensel. EMC Testing/ Immunity Testing for the CE//www.conformity.com/artman/publish/printer_166.shtml.
15. Don Tuite. Conforming with Worldwide Safety and EMC/EMI Standards//<http://powerelectronics.com>.

Salo V.I., Pronina Y.G. Analysis of regulatory documents in the field of electrical and fire safety

The article analyzes the current normative and legislative base of the European Union, Ukraine and LPR electrical and fire safety in the workplace. As at present, an increasing number travmiruyushchey in consequence of outdated equipment, insufficient financing of actions for labour protection, lack of means of individual and collective protection, and many other reasons, it is necessary for the enterprises of all patterns of ownership to establish and ensure the functioning of the OSH management system and to adopt the positive experience of other States in this area. As a result of performed analyses the objective of the study the current normative and legal base in the sphere of occupational safety (electrical and fire safety) to LPR, Ukraine and the European Union.

Keywords: *injuries, accidents, electrical safety, fire safety, management system of occupational safety (OSH) legislation in the field of occupational safety, the OHSAS 18001:2007.*

Сало Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры охраны труда и БЖД Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: безопасность труда и риски в производственном процессе.

e-mail: bgd.ot.dahl@yandex.ru

Пронина Юлия Геннадиевна – ассистент кафедры охраны труда и БЖД Луганского национального университета имени Владимира Даля, г. Луганск. Научные интересы: безопасность труда в производственном процессе.

e-mail: pjg82@mail.ru

Salo Vladimir – candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of occupational safety and BDZ, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: safety and risks in production process.

Pronina Yulia – assistant, Department of occupational safety and BDZ, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interest: safety in the production process.

Статья поступила

25 февраля.2017 г.

© Сало В.И., Пронина Ю.Г., 2017

УДК 536.253

Друзь О.Н.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТОЛБА ДЫМА ПРИ ДУГОВЫХ СПОСОБАХ СВАРКИ

Druz O.N.

MATHEMATICAL MODELLING OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE COLUMN OF THE SMOKE AT ARC WAYS OF WELDING

Обоснована необходимость математического моделирования геометрических параметров столба дыма при дуговых способах сварки. Показано, что сварочный аэрозоль, содержащийся в столбе дыма, является основной причиной профессиональных заболеваний сварщиков. Для практических целей принят ряд допущений о том, что сварочный факел представляет собой свободный конвективный поток в виде конуса от точечного источника тепла. Определены основные геометрические параметры конвективного потока, которые зависят от режима дуговой сварки. Указаны направления дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Ключевые слова: сварка, конвекция, столб дыма, геометрические параметры, моделирование.

Введение

При дуговых способах сварки возникает вредный фактор – сварочный аэрозоль (СА). Воздействие СА приводит к возникновению профессиональных заболеваний, среди которых 80 % представляют бронхолегочные – пневмокониоз, который выявляется у сварщиков, проработавших в сварочных цехах более 15 лет, и хронический бронхит, возникающий уже через 5 лет работы в профессии сварщика. Кроме того, влияние СА на органы дыхания может повышать риск развития онкологических заболеваний (рака). Средний стаж работы по специальности у сварщиков, получивших инвалидность по профзаболеванию, согласно данным клиники Института медицины труда составляет около 18 лет, в том числе у сварщиков, занятых ручной дуговой сваркой, – 21 год, у работающих на полуавтоматах – 14 лет [1, 2].

Источником СА является столб дыма (сварочный факел), который представляет собой конвективный поток, образующийся от теплоты дуги и нагретой детали [3]. Следовательно, возникает необходимость математического моделирования геометрических параметров столба дыма при дуговых способах сварки, что позволит выбрать необходимое расстояние до вытяжных устройств, для обеспечения безопасных условий работы сварщика (отсутствия СА в зоне дыхания).

Целью работы является определение основных математических зависимостей (моделирование) геометрических параметров столба дыма при дуговых способах сварки.

Методика исследования (математическая модель)

В первом приближении определим геометрические параметры столба сварочного дыма, как конвективного потока. Рассмотрим идеальные условия: сварка (наплавка валика) осуществляется штучным электродом на горизонтальной поверхности (массивное металлическое изделие), т.е. источник тепла точечный; какие-либо другие воздушные потоки отсутствуют – сварка в спокойной воздушной атмосфере; атмосфера, в которой распространяется сварочный дым, ничем не ограничена.

Закономерности распространения конвективных потоков в воздухе изучались в работах [3-9], анализ данных работ позволяет математически смоделировать геометрические параметры схемы развития конвективной струи над источником тепла. Представим пространственную модель сварочного факела в виде конуса (рис. 1).

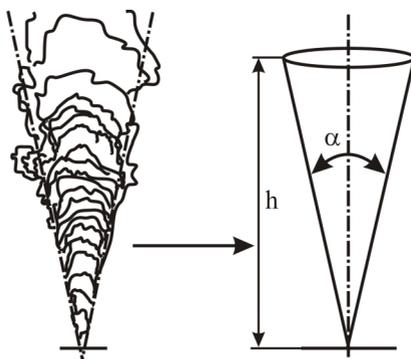


Рис. 1. Переход от контура сварочного факела к его пространственной модели в виде конуса

Характерной особенностью для конвективных струй является внешнее расширение струи на $\alpha=22\dots24^\circ$. Высота сварочного факела по данным [9] может достигать $h=5000$ (мм).

Конус (модель сварочного факела) условно делят на три зоны (рис. 2).

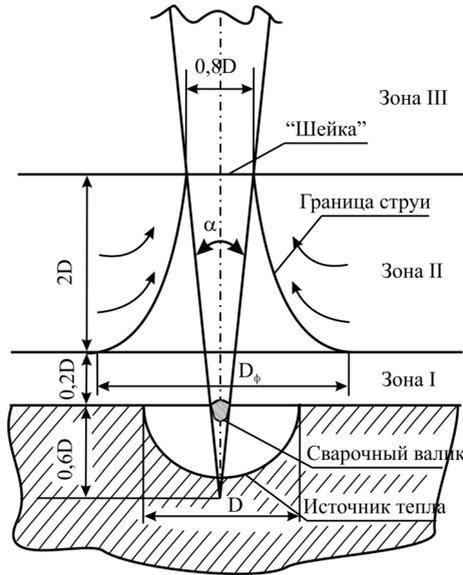


Рис. 2. Схема развития конвективной струи над источником тепла (сварочным валиком)

Первая зона расположена непосредственно у нагретой поверхности – это пограничный участок, состоящий из ламинарного подслоя, расположенного непосредственно у нагретой пластины, и основного пограничного слоя. Высота этой зоны составляет приблизительно $0,2D$ (D – диаметр источника тепла).

Например, в соответствии с теорией тепловых расчетов Рыкалина Н.Н. при режимах сварки $I_{св}=200$ (А), $U_d=20$ (В), $V_{св}=7$ (м/ч), диаметр источника тепла составит $D\approx 120$ мм. Следовательно, высота зоны I составит 24 мм.

D_ϕ – диаметр сварочного факела в разгонном участке, может быть определен по формуле [9]:

$$D_\phi = 0,081g I_{св}, \quad (м). \quad (1)$$

Подставив численные значения в формулу (1) получим $D_{\phi}=0,154$ (м)=154 (мм).

Вторая зона – участок разгона струи, где наблюдается некоторое сужение струи в результате слияния отдельных струек и их ускоренного движения. Высота участка достигает $2D$, т.е. около 240 (мм).

Третья зона называется основным участком. Она характеризуется сформировавшимися профилями скоростей и температур, ее высота может достигать 5000 мм.

Результаты исследований

Математическая модель геометрических параметров столба дыма при дуговых способах сварки требует экспериментальной проверки и при необходимости введения корректировочных значений.

Анализ стандартных рабочих мест дуговой сварки в положении сидя и стоя, при использовании стандартных сварочных столов, показал, что для сварщика ростом 1800 мм его голова находится соответственно на высоте 550 мм и 660 мм. Из чего следует, что до достижения сварочным факелом этих высот он должен быть отклонен от своей вертикальной оси вытяжным устройством и выведен за пределы зоны дыхания сварщика. Для этой цели наиболее эффективно применяются воронкообразные местные отсосы. Однако на практике часто работа таких отсосов является неудовлетворительной из-за неправильного выбора расстояния до места сварки, недостаточной ее производительности, наличия сквозняков и других воздушных потоков. Также известно, что повышенная скорость воздуха при сварке может стать причиной дефектов – пор, поэтому сварщики с малым стажем стараются местную вытяжку располагать на значительном расстоянии от места сварки. Для повышения эффективности работы воронкообразных отсосов необходимо изучить взаимодействие всасывающей струи со сварочным факелом, разработать методику определения оптимального расположения воронки от места сварки, при этом учесть граничное условие, что при высоких скоростях воздуха в сварном шве могут образоваться поры.

Выводы

1. Сварочный аэрозоль, содержащийся в сварочном факеле, является одной из причин профессиональных заболеваний сварщиков.
2. Получена математическая модель геометрических параметров конвективного потока, которые зависят от режима дуговой сварки.
3. Математическая модель геометрических параметров столба дыма при дуговых способах сварки требует экспериментальной проверки.
4. Перспективным направлением повышения эффективности работы воронкообразных отсосов является изучение взаимодействия всасывающей струи со сварочным факелом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришагин В.М. Сварочный аэрозоль: образование, исследование, локализация, применение: монография. Юргинский технологический институт. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 213 с.
2. Левченко О.Г. Охорона праці у зварювальному виробництві : навч. посібн. для студентів зварювальних спеціальностей. К. : Основа, 2010. 240 с.
3. Посохин В.Н., Зиганшин А.М. Численное моделирование конвективных течений над протяженными теплоисточниками // Известия КГСАУ. 2005. №1(3). С. 136-140.
4. Вульфсон А.Н., Бородин О.О. Автомодельные режимы распространения нестационарной высокотемпературной конвективной струи в адиабатической атмосфере // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, №2. С. 81-87.
5. Килин П.И., Рогова Т.Н. Расчет и устройство вытяжных зонтов. Уч. пособ. Екатеринбург: УрГУПС, 2005. 72 с.
6. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции: Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1979. 295 с.
7. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
8. Гримитлин М.И. Вентиляция и отопление цехов судостроительных заводов. Изд. 2-е, перераб. и дополн. Л.: Судостроение, 1978. 239 с.
9. Писаренко В.Л., Рогинский М.Л. Вентиляция рабочих мест в сварочном производстве. М.: Машиностроение, 1981. 120 с.

Druz O.N. Mathematical modeling of geometrical parameters of the column of the smoke at arc ways of welding

Need of mathematical modeling of geometrical parameters of a column of a smoke is proved at arc ways of welding. It is shown that the welding aerosol containing in a column of a smoke, is the main reason for occupational diseases of welders. The purpose of work is determination of the main mathematical dependences (modeling) of geometrical parameters of a column of a smoke at arc ways of welding. A number of assumptions that the welding torch represents a free convective stream in the form of a cone from a dot source of heat is for practical purposes accepted. The key geometrical parameters of a convective stream which depend on a mode of arc welding are defined. The directions of further pilot and theoretical studies are specified. The mathematical model of geometrical parameters of a column of a smoke at arc ways of welding demands experimental check. The perspective direction of increase of overall performance of funneled suctions is studying of interaction of a soaking-up stream with a welding torch.

Keywords: *welding, convection, smoke column, geometrical parameters, modeling.*

Друзь Олег Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: улучшение условий труда при сварочных и родственных операциях.

e-mail: druz238@gmail.com

Druz Oleg - candidate of Technical Sciences, assistant professor, associate professor Labor protection and health and safety, Vladimir Dahl Lugansk National University, c. Lugansk. Scientific interests: improvement of working conditions at welding and related operations.

Статья поступила

16 февраля 2017 г.

© Друзь О.Н., 2017

ТРЕБОВАНИЯ

к оформлению статей для публикации в сборнике «**Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении**»

К публикации принимаются статьи объемом **4-8 полных страниц**, материалы которых соответствуют **только научному направлению сборника**.

Срок подачи материалов – ежегодно до 1 марта, до 1 июня, до 1 сентября, до 1 декабря.

Научные статьи в 1-ом экземпляре, напечатанные на лазерном (струйном) принтере, с подписями всех авторов, актами экспертизы, рецензиями и обязательно на электронном носителе информации (компакт-диск CD-R или DVD-R) передаются в адрес редакции сборника: кафедра «Материаловедение и строительство», Луганский национальный университет имени Владимира Даля, кв. Молодежный 20А, г. Луганск, 91034, а также электронной почтой по адресу: **resource.saving@gmail.com**.

Название файла статьи: <фамилия автора, город> (Петров_Донецк.doc).

Структура статьи должна иметь следующие элементы

На первой странице в первой строке набирается УДК, без абзацного отступа. (выравнивание по левому краю). Шрифт Times New Roman, размер 11 пт, стиль обычный.

Фамилии, инициалы авторов на языке текста статьи (русском, украинском или английском) размещаются через интервал после УДК (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полужирный**, выравнивание - по левому краю).

Название статьи на языке текста набирается прописными буквами через интервал после фамилий и инициалов авторов **без переносов** (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полужирный**, выравнивание - по центру).

Фамилии, инициалы авторов на английском языке размещаются через интервал **после названия статьи на языке текста** (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полужирный**, выравнивание - по левому краю).

Название статьи на английском языке набирается прописными буквами через интервал **без переносов** (шрифт Times New Roman, размер - 11 пт, стиль - **полужирный**, выравнивание - по центру).

Аннотация на языке статьи не менее 8 строк размещается через интервал **после названия статьи на английском языке**, шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - обычный, выравнивание - по ширине.

Ключевые слова на языке статьи (не более 7 слов) размещаются через интервал после аннотации (шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - обычный, выравнивание - по ширине).

Текст статьи размещается через интервал: шрифт Times New Roman, абзацный отступ - 0,75 см, размер - 10 пт; стиль - обычный, выравнивание - по ширине **с переносами**. Заголовок каждого параграфа помещаются с новой строки через интервал после предыдущего параграфа, абзацный отступ - 0,75 см, шрифт Times New Roman, размер - 10 пт, стиль - **полужирный**.

1. **Введение** - постановка проблемы, задачи в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами, анализ последних публикаций (не менее 3-х статей).

2. **Цель** формулировка цели статьи (отдельный абзац с новой строки – «Целью работы является...»).

3. **Методика исследования (или Математическая модель)**

4. **Результаты исследований.**

5. **Выводы.**

6. **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** размещается в конце статьи через интервал после текста перед аннотациями и набирается прописными буквами (шрифт Times New Roman, размер - 10 пт, стиль - **полуужирный**, выравнивание - по центру). Список литературных источников выполняется шрифтом Times New Roman; размер - 9 пт; стиль - обычный. Оформление ссылок на цитируемые источники должно соответствовать Государственному стандарту России. Библиографическое описание приводится на языке оригинала согласно **ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка»**.

7. **Фамилии, инициалы авторов, название статьи и аннотация на английском языке** объемом не менее 12 строк размещается через 1 интервал после списка литературы и включает следующие аспекты содержания статьи: предмет, тему, цель работы, метод или методологию исследования, важнейшие результаты, научная новизна, практическая ценность, область применения результатов (шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - курсив, выравнивание - по ширине).

Ключевые слова на английском языке (до 7 слов) размещаются через интервал после аннотации (шрифт Times New Roman, размер - 9 пт, стиль - курсив, выравнивание - по ширине).

8. **Сведения об авторах** приводятся через интервал от аннотаций: фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы, адрес электронной почты (шрифт Times New Roman; размер - 9 пт; стиль - обычный).

Сведения об авторах также приводятся полностью *на английском языке*.

Текст статьи размещается на белой бумаге формата А5 (148x210 мм), ориентация – книжная со следующими полями: верхнее - 17 мм, нижнее -23 мм, левое – 17 мм, правое – 23 мм. От края до верхнего колонтитула - 0 мм, до нижнего колонтитула - 16 мм, межстрочный интервал - 1,0. Текст статьи оформляется в редакторе **Microsoft Word 2003**.

Страницы не нумеровать.

Формулы и символы набираются только в редакторе формул **Microsoft Equation 2.0/3.0** со следующими параметрами: стиль - математический; размеры шрифта: обычный - 10 пт; крупный индекс - 9 пт; мелкий индекс - 7 пт; крупный символ - 12 пт; мелкий символ - 8 пт. Нумерация формул - в круглых скобках с выравниванием по правому краю границ текста.

Рисунки и таблицы монтируются непосредственно в тексте с отбеганием сверху и снизу и помещаются в последовательности, в которой приводятся ссылки на них в статье. Подрисовочный текст, номера, названия и содержимое таблиц выполняются шрифтом Times New Roman; размер - 9 пт; стиль - обычный; интервал - 1,0.

Статьи, **не соответствующие научному направлению сборника или требованиям к оформлению статей**, редакцией не принимаются к публикации и назад не возвращаются.

Сообщить телефон автора для переписки.

Актуальная версия требований к оформлению статей находится на сайте сборника: <http://resourcesaving.wix.com/sbornik>

Научное издание

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА
И ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Сборник научных трудов
№1 (18) 2017

Ответственный за выпуск	<i>Л.А. Рябичева</i>
Литературный редактор	<i>Л.А. Рябичева</i>
Оригинал-макет	<i>Е.А. Гриниченко</i>

Подписано к печати 29.03.2017
Формат 60 x 84 /16. Бумага офс. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Услов.печ. листов 8,95. Обл.-изд. л.10.
Тираж 100 экз. Изд.. № 0032. Заказ №_____. Цена договорная.

Издательство
Луганского национального университета
имени Владимира Даля

Адрес издательства: 91034, г. Луганск, кв. Молодёжный, 20а,

Телефон: +38 (0642) 41-34-12. **Факс:** +38 (0642) 41-31-60.

E-mail: izdat.lguv.dal@gmail.com

<http://dahluniver.ru/>

<http://resourcesaving.wix.com/sbornik>