

Редакционный совет

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф., председатель
Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф., зам. председателя
Борзенков М.И. канд. техн. наук, доц., секретарь
Астафичев П.А. д-р юрид. наук, проф.
Иванова Т.Н. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф.
Константинов И.С. д-р техн. наук, проф.
Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.
Попова Л.В. д-р экон. наук, проф.
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф.

Редакция

Главный редактор
Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации

Заместители главного редактора
Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.
Киричек А.В. д-р техн. наук, проф.
Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Члены редколлегии

Бабичев А.П. д-р техн. наук, проф.
Вдовин С.И. д-р техн. наук, проф.
Дмитриев А.М. д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН
Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф.
Зубарев Ю.М. д-р техн. наук, проф.
Зубчанинов В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Иванов Б.Р. д-р техн. наук, проф.
Колесников К.С. д-р техн. наук, проф., академик РАН
Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф.
Малинин В.Г. д-р физ.-мат. наук, проф.
Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф.
Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф.
Панин В.Е. д-р техн. наук, проф., академик РАН
Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф.
Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф.

Ответственный за выпуск
Григорьева О.Ю.

Адрес редакции

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-47351 от 03 ноября 2011 года

Подписной индекс **29504**
по объединенному каталогу «Пресса России»

© Госуниверситет – УНПК, 2011

Содержание

Естественные науки

<i>Малинин В.Г., Малинина Н.А., Малинин Г.В., Перельгин А.И.</i> Исследование влияния вида напряженного состояния на эффект памяти формы методами структурно-аналитической мезомеханики.....	3
<i>Измеров М.А., Тихомиров В.П., Лавит И.М.</i> Герметичность металл - металлических соединений как порог протекания через фрактальную пористую среду.....	9
<i>Малинин В.Г., Малинина Н.А., Малинин Г.В., Перельгин А.И.</i> Метод прогноза эффекта пластичности превращения при сложном напряженном состоянии на основе развития структурно-аналитической мезомеханики.....	18
<i>Морев П.Г., Капырин К.И., Фёдоров Т.В., Борзенков М.И.</i> Численное моделирование механического контакта в плоских задачах локального деформирования.....	24

Моделирование технологических процессов

<i>Фоминова О.В., Белозёрова Е.Б., Чернышев В.И., Кеглин Б.Г.</i> Моделирование работы виброизолятора с демпфером прерывистого действия.....	30
<i>Г.В. Барсуков, А.А. Александров, В.С. Шоркин</i> Моделирование числа зерен двухкомпонентной технологической среды, участвующих в резании на единичной площадке контакта гидроработной струи с заготовкой.....	37
<i>Марков А.В., Юленец Ю.П.</i> Математическая модель высокочастотной сварки пластмасс в неоднородном электрическом поле.....	44
<i>Ивахнюк Г.К., Давыдов Е.И., Лямаев Б.Ф.</i> Устройство и математическая модель вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой для очистки сточных вод.....	50

Конструирование, расчеты, материалы

<i>Варламов А.В.</i> Ориентировочный расчет силы схватывания отдельных частиц и слоев фиксированной массы сыпучего материала в бункере для выбора силы сводообрушающего механизма.....	55
--	----

Машиностроительные технологии и инструменты

<i>Еремин В.Н., Осадчий В.Я.</i> Разработка технологии контролируемой прокатки труб на пилгримовом стане..	63
<i>Борзенков М.И., Трубицин А.Ф., Мышечкин А.А.</i> Исследование факторов, определяющих предельную степень осадки калиброванного проката.....	68
<i>Коптев А.И., Кузюкин А.В.</i> Режимы электроэрозионной и комбинированной обработки электродом-проволокой.....	74
<i>Маликов А.А., Григорьев И.В., Ямников А.С.</i> Механизация пригоночных работ при сборочных операциях.....	84
<i>Фёдоров В.А., Трофимов В.В.</i> Комбинированная обработка микроотверстий в твёрдых сплавах.....	89
<i>Харламов Г.А., Шоркин В.С., Тарапанов А.С., Брусос С.И.</i> Описание кинематики процесса точения на основе теории формообразования, допускающей изменение конфигурации режущего лезвия.....	96

Машины, аппараты, технологии легкой и пищевой промышленности

<i>Быков С.А.</i> Системный анализ и оптимизация структуры потоков фаз в экстракторах непрерывного действия	105
<i>Лысенко Я.А., Кузнецов С.А.</i> Способ обработки белья в вертикальном барабане-активаторе.....	110

Приборостроение и биотехнические системы

<i>Шкатов П.Н., Колосков Д.В.</i> Математическое моделирование взаимодействия вихревого преобразователя с дефектами в тепловых канавках роторов паровых турбин.....	116
<i>Ершов А.Б., Хорольский В.Я., Ефанов А.В.</i> Способы снижения методической погрешности вычисления функции «МЕАМ» для непериодических электрических процессов в осциллографах серии TPS2000 фирмы ТЕКТРОНИХ.....	120
<i>Рыболовлев Д.А.</i> Математическая модель системы передачи информации, учитывающая взаимное влияние электропроводных линий связи.....	126
<i>Смерек В.А., Зольников В.К., Ачкасов А.В.</i> Архитектура, структура и методы защиты от сбоев радиационного характера для восьми разрядного микроконтроллера.....	136

Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

<i>Пилипенко О.В., Архипов О.П., Иващук О.А., Косыкин А.В., Савина О.А., Загрядский В.И.</i> Структура автоматизированной системы управления «умным городом» с высоким уровнем безопасности и качества жизни.....	142
<i>Сычев К.С.</i> Унификация условий контроля природных органических соединений в режиме обращенно-фазовой жидкостной хроматографии. Часть 2. Антоцианы, гликозиды родиолы розовой, алкалоиды чистотела.....	148
<i>Петров С.П., Суздальцев А.И.</i> Контроль эффективности когенерационных систем теплоснабжения с пиковыми теплоисточниками.....	153
<i>Дидин Г.А.</i> Вихревая дефектоскопия дисков авиационных двигателей.....	158
<i>Уткин Г.И.</i> Экспериментальная установка для исследования надёжности разъемных электрических соединителей.....	163
<i>Моисеев С.А.</i> Анализ процесса образования суммарной погрешности прогнозирования технического состояния радиоэлектронных изделий.....	169



The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year

№ 2 (292) 2012

January - February

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

The founder – The Federal State Higher Education Professional Institution
«State University – Education-Scientific-Production Complex»
(State University – ESPC)

Editorial council

Golenkov V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof., president*

Radchenko S.Y. *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*

Borzenkov M.I. *Candidate Sc. Tech., Assistant Prof., secretary*

Astafichev P.A. *Doc. Sc. Law., Prof.*

Ivanova T.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Kirichek A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Kolchunov V.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Konstantinov I.S. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Novikov A.N. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Popova L.V. *Doc. Sc. Ec., Prof.*

Stepanov Y.S. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Editorial Committee

Editor-in-chief

Stepanov Y.S. *Doc. Sc. Tech., Prof., honored worker of science of Russian Federation*

Editor-in-chief Assistants

Gordon V.A. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Kirichek A.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Podmasteryev K.V. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Member of editorial board

Babichev A.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Vdovin S.I. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Dmitriev A.M. *Doc. Sc. Tech., Prof., Corresponding Member of RAS*

Emelyanov S.G. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Zubarev Y.M. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Subchaninov V.G. *Doc. Sc. Ph.-Math, Prof.*

Ivanov B.R. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Kolesnikov K.S. *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*

Malinin V.G. *Doc. Sc. Ph.-Math., Prof.*

Mulyukin O.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Osadchy V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Panin V.E. *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*

Raspopov V.Ya. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Smolenzov V.P. *Doc. Sc. Tech., Prof.*

Responsible for edition

Grigorieva O.Yu.

Address

302020 Orel,
Naugorskoe Chossee, 29
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,
41-98-21
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-47351 from 03.11.2011

Index on the catalogue of the «**Pressa Rossii**» **29504**

© State University – ESPC, 2011

Contents

Natural science

Malinin V.G., Malinina N.A., Malinin G.V., Pereygin A.I. Research of influence of stress state on the shape memory effect by methods of structural-analytical mesomechanics.....	3
Izmerov M.A., Tikhomirov V.P., Lavit I.M. Tightness metal – metal connections as the course threshold through fraktalny porous environment.....	9
Malinin V.G., Malinina N.A., Malinin G.V., Pereygin A.I. Method of forecasting the conversion plasticity effect in complex stress state on the basis of structural-analytical mesomechanics.....	18
Morev P.G., Kapirin K.I., Fedorov T.V., Borzenkov M.I. Numerical modeling of mechanical contact in local deforming plane problems.....	24

Process modeling

Fominova O.V., Belozherova E.B., Chernichev V.I., Keglin B.G. The construction of the work of the vibro-insulator with the damper of interrupted action.....	30
Barsukov G.V., Aleksandrov A.A., Shorkin V.S. Simulation of grain number of two-component environmental technology involved in cutting per unit area contact waterjet jets with harvesting.....	37
Markov A.V., Yulenets Yu.P. Mathematical model of welding process of plastics in non homogeneous high frequency electric field.....	44
Ivachnyk G.K., Davydov E.I., Lyamaev B.F. The device and mathematical model of the vertical sediment bowl with the spirally-wound nozzle for wastewater treatment.....	50

Construction, calculation, material

Varlamov A.V. Rough calculation of strength of skhvatyvaniy of separate particles and layers of the fixed weight of the loose material in the bunker for the force choice svodoobrushayushchego of the mechanism.....	55
---	----

Machine building technology and toolware

Ererin V.N., Osadchy V.YA. Development of technology of controllable rolling of pipes on pilgrimovom the camp.....	63
Borzenkov M.I., Trubicin A.P.H., Myshechkin A.A. Study of the factors determining the maximum degree of rainfall calibrated rolled.....	68
Koptev A.I., Kuzovkin A.V. Modes of the electroerosive and combined processing by the electrode-wire.....	74
Malikov A.A., Grigorov Y.W., Yamnikov A.S. Mechanization of fitting operations at assembly processes.....	84
Fedorov V.A., Trofimov V.V. The combined processing of microapertures in firm alloys.....	89
Shorkin V.S., Kharlamov G.A., Tarapanov A.S., Brusov S.I. The description of turning kinematics on the basis of theory supposing change of the configuration of the cutting edge.....	96

Machine, apparatus, technology light and food industry

Bykov S.A. Systems analysis and optimization of phase fluxes structure in the extractors of uninterrupted operation.....	105
Lysenko Y.A., Kuznetsov S.A. The way of handling linen in vertical drum-activator.....	110

Instrument making and biotechnological system

Shkatov P.N., Koloskov D.V. Mathematical modelling of interaction eddy current probe with defects in thermal flutes of rotors of steam turbines.....	116
Ershov A.B., Khorolskiy V.Y., Yefanov A.V. Ways of decrease in the methodical error «MEAM» function evaluations for acyclic electric processes in series oscillographs tektronix firm TPS2000.....	120
Rybolovlev D.A. Mathematical model of communication system taking into account the crosstalk among electricity-conductive lines.....	126
Smerek V.A., Zolnikov V.K., Achkasov A.V. Architecture, structure and ways of protection from the rad types of faults of 8-bit microcontroller.....	136

Tests, control, diagnostics and quality control

Pilipenko O.V., Arhipov O.P., Ivashchuk O.A., Koskin A.V., Savin O.A., Zagryadtsky V.I. Automated control system structure «clever city» with high level of safety and qualities of life.....	142
Sychoy C.S. Unifying the condition for liquid chromatographic separation and screening control of natural organic compounds in rp mode.....	148
Petrov S.P., Suzdal'tsev A.I. Efficiency control kogeneratsionnykh of heat supply systems with peak heatsources	153
Didin G.A. Eddy current defectoscopy of disks of aviation engines.....	158
Utkin G.I. Experimental setup for researches the reliability of electrical connectors.....	163
Moiseev S.A. Analysis of the process of formation of total inaccuracy of the technical condition of radioelectronic products forecasting.....	169

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 539.4

В.Г. МАЛИНИН, Н.А. МАЛИНИНА, Г.В. МАЛИНИН, А.И. ПЕРЕЛЫГИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
НА ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ МЕТОДАМИ СТРУКТУРНО-
АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ**

В данной работе впервые выполнены комплексные экспериментальные исследования по влиянию вида напряженного состояния на формирование эффекта памяти формы (ЭПФ) в сплаве Cu-12\%Al-4\%Mn , которые позволили развить методы структурно-аналитической мезомеханики и предложить эффективную методику прогноза кинетики ЭПФ при произвольном напряженном состоянии. Ценность экспериментальных исследований заключается в использовании тонкостенных цилиндрических оболочек позволяющих создавать контролируемое равномерное температурное поле и однородное напряженное состояние.

Ключевые слова: структурно-аналитическая мезомеханика; эффект памяти формы; обратимые мартенситные превращения; сложное напряженное состояние.

Анализируя существующие механизмы неупругой деформации в материалах, которые ответственны за возникновение термомеханического гистерезиса [1], можно отметить, что кроме дислокационно-диффузионного механизма деформации и канала механического двойникования имеются другие физические варианты реализации деформации неупругого характера, связанные, прежде всего с протеканием в твердом теле различных фазовых реакций. Характерной особенностью обозначенных механизмов является полная обратимость деформации, т.е. создание ее при прямом фазовом переходе и ликвидация при обратном, что проявляется как эффект памяти формы (ЭПФ).

В рассматриваемых материалах при термоциклировании под напряжением через интервал температур фазовых превращений формируется ярко выраженный обратимый термомеханический гистерезис. Анализ указанного явления для простых напряженных состояний типа чистого растяжения и чистого сдвига выполнен в рамках структурно-аналитической теории прочности [1].

Эффект памяти формы проявляется во многих сплавах, в том числе материалах промышленного назначения, их физическая природа достаточно хорошо изучена. Экспериментально установлено, что данное явление может быть связано с мартенситными реакциями первого рода. Такие превращения наблюдаются, например, в сплавах титан-никель, медь-алюминий-марганец и во многих других. В работе [1] показано, что названные эффекты находят естественное математическое отражение в структурно-аналитической концепции пластичности. Однако, подробных конкретных расчетов и сопоставления с обширными экспериментальными данными по влиянию вида напряженного состояния по этой методологии для мартенситных превращений первого рода выполнено не было.

В настоящей статье методы структурно-аналитической мезомеханики [1, 2] развиваются с целью моделирования свойств обратного мартенситного превращения в макроскопически изотропных кристаллах. Используется концентрационная гипотеза возникновения взрывного характера прямого и обратного мартенситного превращения во всех структурных элементах, представленных в ориентационном пространстве при условии образования критического зародыша новой фазы. Критерий формирования критического зародыша формулируется на макромасштабном уровне в терминах эффективной температуры и эффективных напряжений [1, 2]. Постулируется и экспериментально обосновывается обобщенный принцип Клаузиуса-Клапейрона на макромасштабном уровне, который учитывает различный характер химических реакций при прямом и обратном мартенситных превращениях в зависимости от исходного фазового состава. Известно, что прямое превращение аустенита в мартен-

сит (А→М) происходит с выделением, внутренними источниками, тепла, т.е. имеет место экзотермическая реакция, а при обратном мартенситном превращении М→А происходит поглощение тепла в локальных структурных элементах где инициируется обратная реакция.

Предполагается, что на структурном уровне возникают самоаккомодированные группы мартенситных кристаллов и пластичность прямого мартенситного превращения определяется возмущающим действием девиатора локальных напряжений τ'_{ik} [1].

При описании эффекта памяти формы принимается гипотеза, согласно которой кинетика возврата деформации на этапе нагревания через температурный интервал обратного мартенситного превращения, происходит по механизму движения структурных элементов деформации «точно назад» [1].

Постановка задачи расчета прямого и обратного мартенситного превращения предполагает, что математический объект нагрет выше температуры конца обратного мартенситного превращения A_k , нагружен произвольным тензором напряженности σ_{ik} , после чего произведено его охлаждение до температуры конца прямого мартенситного превращения M_k и нагрев до конца температуры конца обратной реакции A_k . Дилатационным эффектом превращения пренебрегали. С учетом принятых гипотез, в соответствии с логикой [1] получены следующие определяющие соотношения:

I. Структурный уровень:

$$\dot{\Phi} = -\dot{T}^* H(T^* - M_k) H(A_k - T^*) \left\{ \begin{aligned} & H(-\dot{T}^*) H[M_H - \Phi(M_H - M_k) - T^*] M_H - M_k)^{-1} + \\ & + H(\dot{T}^*) H[T^* + \Phi(A_k - A_H) - A_k] A_k - A_H)^{-1} \end{aligned} \right\};$$

$$\dot{\beta}_{ik} = B_{\phi} \dot{\Phi} \tau'_{ik} H(-\dot{T}^*) + \beta_{ik} \frac{\dot{\Phi}}{\Phi} H(\dot{T}^*);$$

$$\tau_{ik} = \alpha_{pi} \alpha_{qk} \sigma_{pq}.$$

II. Макромасштабный уровень:

$$\dot{T}^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} D_i \dot{\sigma}_i,$$

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{D_{ik} D_{ik}}, \sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma'_{ik} \sigma'_{ik};$$

$$\varepsilon_{ik}^{n\phi} = \frac{1}{4\pi^2 \Delta} \int_{\{S\}} dS \int_{\{\Omega\}} \alpha_{ip} \alpha_{kq} \beta_{pq} d^3 \Omega.$$

Система определяющих соотношений (1) содержит: Φ – количество мартенситной фазы; $H(x)$ – функция Хэвисайда; точка означает производную по времени; M_k, M_H, A_H, A_k – характеристические температуры превращения [1]; $B_{\phi} = 0,0367 e^{-0,005\sigma_i}$; τ'_{ik}, σ'_{ik} – девиаторы напряжений в локальном и лабораторном базисах; β_{ik} и $\varepsilon_{ik}^{n\phi}$ – деформации, инициируемые обратимым мартенситным превращением в локальном и лабораторном базисах; $\{\Omega\}$ – ориентационное пространство, задающее взаимную ориентацию локального и лабораторного базисов [1]; α_{ik} – направляющие косинусы, переводящие локальный базис в лабораторный; $\{S\}$ – статистические переменные, характеризующие структурную неоднородность ширины гистерезиса фазового превращения; T – температура; T_0 – температура термодинамического равновесия; q_0 – тепловой эффект реакции; D_{ik} – дисторсия превращения в локальном базисе; Δ – ширина гистерезиса фазового превращения.

Предполагалось, что началу обратного фазового перехода предшествовала сообщенная материалу предварительная деформация, характеризуемая тензором ε_{ik}^0 за счет активного нагружения мартенсита или в результате пластичности прямого мартенситного превращения,

которую математический объект устойчиво сохранял при температуре $T < M_k - \Delta/2$. По мере нагрева эта деформация возвращалась, что и было классифицировано как эффект памяти формы.

Вычисления, на деталях которых мы не останавливаемся из-за их громоздкости, позволили получить следующее общее выражение для компонент восстанавливающей деформации представленное тензором $\varepsilon_{ik}^{n\phi}$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ik}^{n\phi} = \varepsilon_{ik}^0 \cdot H(A_K - A_H - \Delta) \cdot \left\{ \frac{1}{\Delta} \left(A_H - T + k\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right) + \frac{1}{2\Delta(A_K - A_H)} \right\} \times \\ \times \left[(A_K - A_H)^2 - \left(A_K - T + k\sigma_i - \frac{\Delta}{2} \right) \right] \cdot H \left(T - k\sigma_i - A_H + \frac{\Delta}{2} \right) \cdot H \left(A_H - T + k\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right) + \\ + \frac{1}{(A_K - A_H)} (A_K - T + k\sigma_i) \cdot H \left(T - k\sigma_i - A_H - \frac{\Delta}{2} \right) \times \\ \times H(A_K - T + k\sigma_i) + \frac{1}{2\Delta(A_K - A_H)} \left(A_K - T + k\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right)^2 H \left(T - k\sigma_i - A_K + \frac{\Delta}{2} \right) H(A_K - T + k\sigma_i) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\kappa = \frac{T_0}{q_0} D_i$.

Формула (2) справедлива для материалов с узким гистерезисом фазового превращения, когда $\Delta = A_K - M_H < A_K - A_H$, что соответствует сплаву Cu-12%Al-4%Mn. Данная формула, приводит к довольно простой и согласующейся с опытом кинетике восстановления деформации при нагреве. Она содержит в средней части температурного интервала формовосстановления линейный относительно температуры фазового перехода участок. В начале и в конце графика возврата деформации наблюдаются квадратичные отрезки с положительной и отрицательной кривизной, соответственно.

В частности опыты, выполненные на тонкостенных трубчатых образцах из сплава Cu-12%Al-4%Mn для различных напряженных состояний, включающих программу из пятнадцати схем нагружения, были описаны с хорошим соответствием теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (точки) результатов (рис. 1). Отклонение теоретических данных по отношению к экспериментальным не превышает разброса наблюдаемого в опытах. Необходимо отметить, что для калибровки параметров модели достаточно выполнить опыт при одном напряженном состоянии, например при чистом сдвиге. Методика и результаты экспериментальных исследований (рисунок 1), а также принятые обозначения подробно описаны в [3].

Таким образом, методы структурно-аналитической мезомеханики естественно описывают эффект памяти формы при сложном напряженном состоянии в условиях $\sigma_i = \text{const}$, что обеспечивает возможность его расчета в рамках инженерных задач механики материалов.

На рисунке 1,а представлена схема программы экспериментального и теоретического исследований эффекта памяти формы. Используются координаты – интенсивность касательного напряжения ($\sqrt{3} \tau$) и интенсивность нормального напряжения (σ). Окружности характеризуют координаты точек различных напряженных состояний с одинаковой интенсивностью напряжений σ_i . Рассмотрены три уровня $\sigma_i = 31; 62; 93$; МПа.

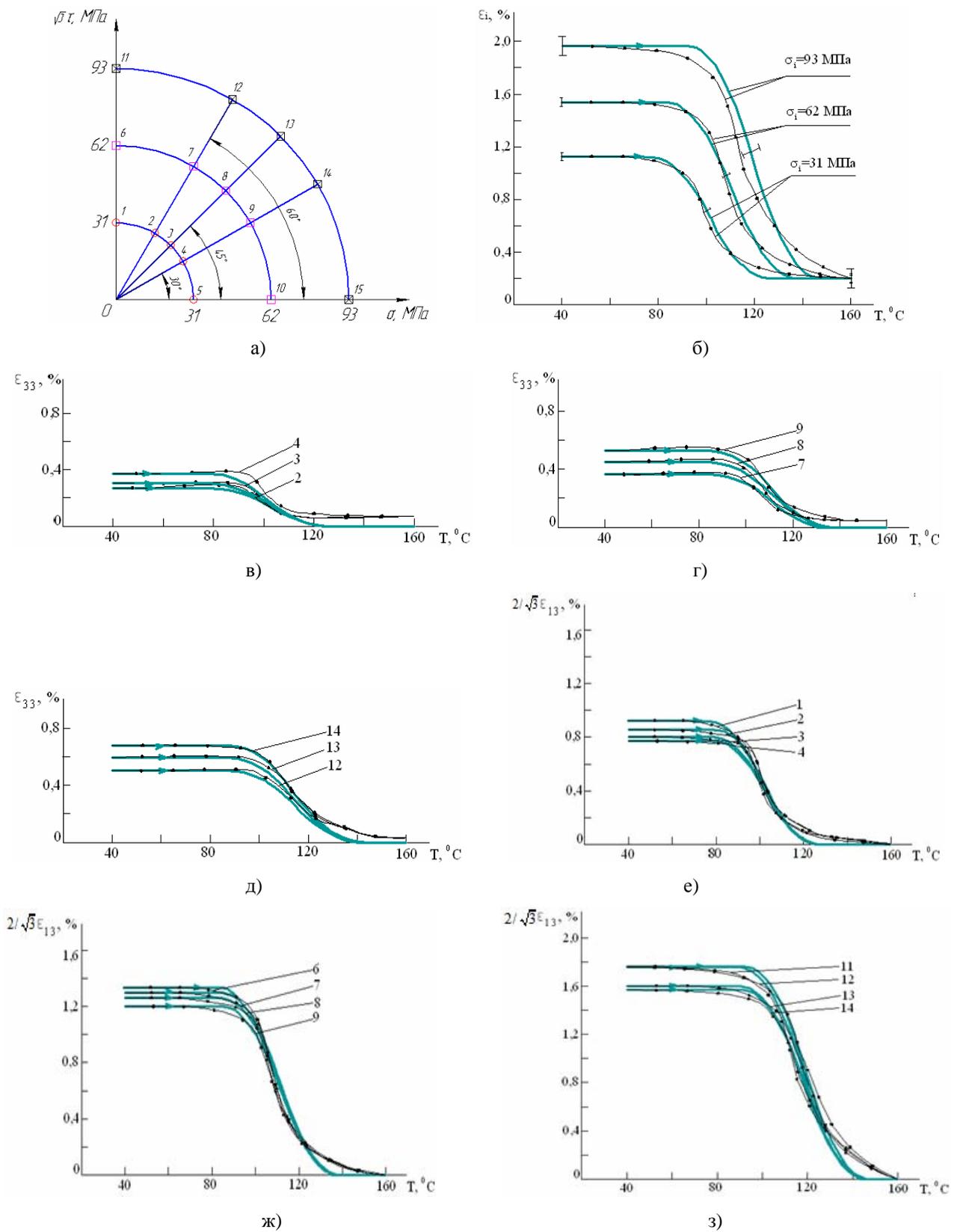


Рисунок 1 – Схема программы испытаний (а)

1 – $\sigma = 0$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 31$ МПа; 2 – $\sigma = 15$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 27$ МПа; 3 – $\sigma = 22$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 22$ МПа; 4 – $\sigma = 27$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 15$ МПа; 5 – $\sigma = 31$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 0$ МПа; 6 – $\sigma = 0$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 31$ МПа; 7 – $\sigma = 31$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 54$ МПа; 8 – $\sigma = 44$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 44$ МПа; 9 – $\sigma = 54$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 31$ МПа; 10 – $\sigma = 62$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 0$ МПа; 11 – $\sigma = 0$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 93$ МПа; 12 – $\sigma = 46$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 81$ МПа; 13 – $\sigma = 66$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 66$ МПа; 14 – $\sigma = 81$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 46$ МПа; 15 – $\sigma = 93$ МПа, $\sqrt{3}\tau = 0$ МПа
и графики кинетики эффекта памяти формы по компонентам ϵ_i (б); ϵ_{33} (в, з, д); $2\epsilon_{13}/\sqrt{3}$ (е, ж, з).

На рисунке 1,б представлены графики эффекта памяти формы в координатах: интенсивность деформаций ε_i – температура T . Рисунки 1, в, г, д иллюстрируют кинетику формирования эффекта памяти формы относительной линейной компоненты тензора деформации ε_{33} для различных видов напряженного состояния. Графики, изображенные на рисунке 1, е, ж, з иллюстрируют ЭПФ в координатах интенсивность сдвиговой компоненты тензора деформации $\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{13}$ от температуры (T). Цифры на рисунке 1, а характеризуют соответствующий вид напряженного состояния.

Анализируя полученные теоретические и экспериментальные результаты можно отметить, что предложенный вариант теории позволяет применять эффективные и простые методы расчета нетривиальных деформационных свойств памяти формы и термомеханического гистерезиса в условиях сложного напряженного состояния для выполнения расчетов инженерных конструкций из материалов с ЭПФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинин, В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности [Текст] / Малинин В.Г., Лихачев В.А. – СПб.: Наука, 1993. – 471с.
2. Малинина, Н.А. Мезомеханика сред с мартенситным превращением [Текст] / Малинина Н.А., Малинин Г.В. // Научное издание. Успехи строительной механики и теории сооружений. Сборник научных статей к 75-летию со дня рождения В.В.Петрова – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 163-173.
3. Малинин, В.Г. Влияние вида напряженного состояния на эффекты памяти формы и пластичности превращения в сплаве Cu-12%Al-4%Mn [Текст] / Малинин В.Г., Перельгин А.И., Савельев А.А. // Сб. научных и научно-методических докладов международной научно-практической конференции препод., сотр., аспирантов – Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009, –Т.2 – С. 250-254.

Малинин Владислав Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 41-98-13

E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Малинина Надежда Аркадьевна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 41-98-13

E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Малинин Георгий Владиславович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 41-98-13

E-mail: malinin2002@yandex.ru

Перельгин Алексей Иванович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Ассистент кафедры «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 89066603481

E-mail: perelygin_alex@bk.ru

RESEARCH OF INFLUENCE OF STRESS STATE ON THE SHAPE MEMORY EFFECT BY METHODS OF STRUCTURAL-ANALYTICAL MESOMECHANICS

In this work first performed comprehensive experimental researches on the influence of the stress state on the formation of the shape memory effect (SME) in the alloy Cu-12%Al-4%Mn, are allowed to develop methods of structural-analytical mesomechanics and offer an effective method of forecasting of the kinetics of SME for an arbitrary state of stress. The value of experimental researches is the use of thin-walled cylindrical shells allows creating a controlled uniform temperature field and a uniform stress state.

Keywords: structural-analytical mesomechanics; shape memory effect; reversible martensitic conversions; complex stress state.

BIBLIOGRAPHY

1. Malinin, V.G. Strukturno-analiticheskaja teorija prochnosti [Tekst] / Malinin V.G., Lihachev V.A. – SPb.: Nauka, 1993. – 471s.
2. Malinina, N.A. Mezomehanika sred s martensitnym prevrascenijem [Tekst] / Malinina N.A., Malinin G.V. // Nauchnoe izdanie. Uspehi stroitel'noj mehaniki i teorii sooruzhenij. Sbornik nauchnyh statej k 75-letiju so dnja rozhdenija V.V.Petrova – Saratov: SGTU, 2010. – S. 163-173.
3. Malinin, V.G. Vlijanie vida naprjazhennogo sostojanija na jeffekty pamjati formy i plastichnosti prevrascenija v splave Cu-12%Al-4%Mn [Tekst] / Malinin V.G., Perelygin A.I., Savel'ev A.A. // Sb. nauchnyh i nauchno-metodicheskikh dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii prepod., sotr., aspirantov – Staryj Oskol: STI NITU MISiS, 2009, –T.2 – S. 250-254.

Malinin Vladislav Georgiyevich

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
professor of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 41-98-13
E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Malinina Nadejda Arkadyevna

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
professor of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 41-98-13
E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Malinin George Vladislavovich

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
assistant professor of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 41-98-13
E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Perelygin Alexey Ivanovich

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
assistant of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 89066603481
E-mail: perelygin_alex@bk.ru

УДК 621.891

М.А. ИЗМЕРОВ, В.П. ТИХОМИРОВ, И.М. ЛАВИТ

ГЕРМЕТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛ - МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ КАК ПОРОГ ПРОТЕКАНИЯ ЧЕРЕЗ ФРАКТАЛЬНУЮ ПОРИСТУЮ СРЕДУ

В работе с новых позиций рассматривается уравнение Дарси с учётом фрактальной размерности сопряжённых поверхностей. Дано сравнение эксперимента и расчёта герметичности металл-металлического соединения, а также с помощью компьютерного моделирования дается уточненная оценка реального пути протекания (бесконечного кластера) в виде объединения пор, по которым происходит утечка уплотняемой среды.

Ключевые слова: протекание, фрактальная размерность, герметичность, фрактальные поверхности, моделирование контакта поверхностей.

Задача обеспечения герметичности металл-металлических соединений на этапе проектирования представляет собой серьёзную проблему для инженеров. Её решение позволит повысить долговечность соединений, снизить затраты на ремонт и обслуживание, сократить сроки проектирования машин и уменьшить вредное влияние на окружающую среду различных токсичных технических жидкостей и газов.

Уравнение Дарси, предложенное в 1854 году французским инженером-гидравликом, получило широкое распространение и позволяло определять с некоторой степенью точности расход вязкой жидкости через стык шероховатых поверхностей.

Уравнение линейной фильтрации Дарси, основанное на известных экспериментальных физических представлениях, можно записать так [1]

$$w = - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\Phi}{\eta},$$

где w – удельный расход, отнесенный к единице площади,

$\partial p / \partial x$ – градиент давления в направлении течения,

Φ – проницаемость,

η – динамическая вязкость.

Знак минус указывает, что течение направлено против градиента давления. Приведенная эмпирическая формула Дарси становится неприменимой, если скорость истечения велика (число Рейнольдса $Re > 10$) и если размер пор приближается к длине свободного пробега молекул жидкости (или газа).

В основе подхода к оценке герметичности соединения положим следующие предположения: уплотняемая среда имеет возможность осуществлять движение в стыке металл-металлического соединения по многочисленным извилистым каналам между сообщающимися порами.

Уравнение А. Дарси определяет расход (утечку) вязкой жидкости через зазор между шероховатыми инженерными поверхностями

$$Q = \frac{\Delta p}{\eta \cdot l} \frac{\pi H d_1 \Phi}{4}.$$

Здесь Δp – перепад давления; H – толщина пористого слоя под нагрузкой; d_1 и l – размеры соединения; Φ – коэффициент проницаемости; η – динамическая вязкость уплотняемой жидкости.

В соответствии с теорией Козени-Кармана коэффициент проницаемости равен [7]

$$\Phi = \frac{U \cdot m^3}{K_\phi \cdot K_U \cdot \Sigma^2},$$

где U – константа Кармана (в инженерных расчетах $U = 0,2 \dots 0,22$);

m – пористость стыка;

K_ϕ – коэффициент, зависящий от формы каналов;

K_u – коэффициент извилистости каналов;

Σ – удельная смачиваемая поверхность, определяемая отношением внутренней поверхности пор к объему металла в пористом слое.

Коэффициент извилистости K_u изменяется в диапазоне от 2 до 10 [6]. Такой большой разброс связан с особенностями структуры пористой среды. Вот почему при оценке параметров фильтрации большое внимание следует уделять количественным показателям пористой среды.

Пористость m определяется как

$$m = \frac{V_{пор}}{V_{cm}}$$

где $V_{пор}$ – объем пор, равный объёму зазора в стыке;

V_{cm} – общий объём стыка.

Объём зазора в стыке рассчитывается по формуле

$$V_z = V_{cm} - V_M,$$

где V_M – объём материала в стыке, равный объёму неровностей, лежащих между базовыми поверхностями контактирующих тел

$$V_M = (K_{p1} + K_{p2}) \cdot A_0 \cdot H,$$

где $K_{p1,2}$ – коэффициент заполнения профиля соответствующих поверхностей с учётом шероховатости, волнистости и макроотклонений;

A_0 – номинальная площадь контакта.

В общем виде V_M равен

$$V_M = A_0 \cdot H \cdot K_{pcm},$$

где K_{pcm} – коэффициент заполнения стыка.

Так как общий объём стыка контактирующих поверхностей равен

$$V_{cm} = A_0 \cdot H,$$

то пористость стыка определится как

$$m = 1 - K_{pcm}.$$

Коэффициент заполнения стыка равен

$$K_{pcm} = \frac{W_{max1} \cdot K_{p1w} + W_{max2} \cdot K_{p2w} + R_{max1} \cdot K_{p1} + R_{max2} \cdot K_{p2}}{W_{max1} + W_{max2} + R_{max1} + R_{max2}},$$

где W_{max1}, W_{max2} – максимальная высота волнистости контактирующих поверхностей;

R_{max1}, R_{max2} – максимальная высота шероховатости контактирующих поверхностей;

K_{p1w}, K_{p2w} – коэффициенты заполнения профилей волнистостью;

K_{p1}, K_{p2} – коэффициенты заполнения профилей шероховатостью.

Пористость стыка с учетом общей деформации и предыдущих выражений определяется выражением

$$m = \frac{W_{p1} + W_{p2} + R_{p1} + R_{p2} - Y}{H - Y}.$$

Здесь Y – общая упругопластическая деформация стыка.

Удельная смачиваемая поверхность равна [8]

$$\Sigma = \frac{A_{cm}}{V_{cm}},$$

где $A_{cm} = 2 \cdot (K_u \cdot A_a - A_r)$ – свободная внутренняя поверхность межконтактного пространства;

A_a – номинальная площадь контакта;

A_r – фактическая площадь контакта;

K_n – коэффициент, учитывающий отличие реальной площади контактирования от номинальной площади контакта.

Величину K_n можно оценить по формуле [9]

$$K_n = \sqrt{1 + \operatorname{tg} \beta},$$

где β – средний угол наклона боковых поверхностей микровыступов.

Тогда

$$\Sigma = \frac{2 \cdot (K_n - \eta)}{H - Y}$$

где η – относительная площадь фактического контакта.

Коэффициент K_ϕ для каналов с прямоугольной, эллипсоидной, ромбической формой поперечного сечения с увеличением соотношения размеров сечения стремится к 3. Поскольку при контактировании шероховатых поверхностей образуются микроканалы с минимальными соотношениями размеров сечения макроканалов $Sm/(2 \cdot R_{max}) = 5 \div 50$, коэффициент формы можно принять равным 3 [10].

Толщина пористого слоя может быть определена из выражения

$$H = h + R_{v1} + R_{v2},$$

где h – расстояние между средними плоскостями шероховатых поверхностей,

R_v – глубина впадины.

На рисунке 1 показан профиль сечения поперечного зазора уплотнительного устройства (материал сопрягаемых поверхностей – латунь ЛС63).



Рисунок 1 – Профиль поперечного сечения зазора металл-металлического соединения (межконтактный зазор выделен черным цветом)

Для уплотнительного устройства с наружным диаметром фланца $d_2 = 2R_2 = 160$ мм, внутренним диаметром $d_1 = 2R_1 = 140$ мм. исследование на герметичность при давлении жидкости (внутреннее давление составляло 5 МПа), имеющей динамическую вязкость $\eta = 30$ мПа·с, дало результаты, представленные на рисунке 2.

Как видно из рисунка, экспериментальные данные несколько отличаются от данных, полученных по уравнению Дарси. Задача, как наилучшим образом описать просачивание уплотняемой жидкости или газа в пористой среде, представляет интерес в разных областях знания, в том числе и при проектировании металл-металлических герметичных устройств. Интерес также представляет существующее расхождение результатов, полученных экспериментально с теоретическими количественными оценками. Это связано, с большим разбросом и недостаточной обоснованностью назначения и выбора значений факторов, входящих в уравнение Дарси. Вот почему при проектировании конкретного герметизирующего устройства конструктор и технолог часто не имеют достоверных данных, чтобы на начальном этапе создания этого устройства обеспечить его работоспособное состояние. Так, коэффициент из-

вилистости канала протекания, состоящего из цепочки связанных между собой пор, по литературным данным изменяется от 2 до 10. Не совсем обоснован выбор коэффициента формы канала протекания и т.д.

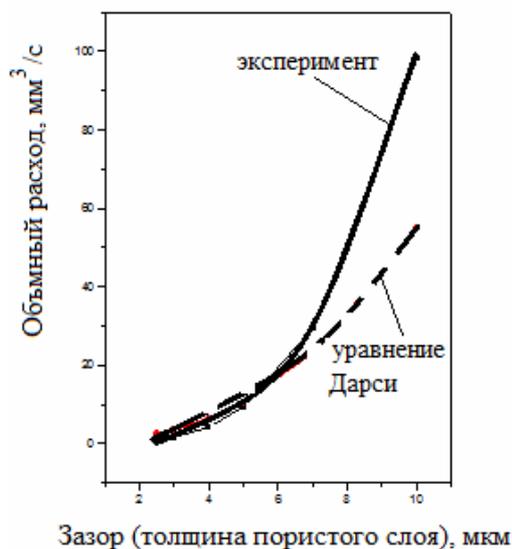


Рисунок 2 – Зависимость объемного расхода от зазора

Наличие базы данных моделей типичных инженерных поверхностей после того или иного вида обработки позволяет провести компьютерное моделирование стыка и оценить порог герметичности с учетом направления следов обработки соприкасающихся поверхностей.

Для фрактальной пористой среды (Пуазейль) расход может быть записан в виде

$$q \propto \frac{r^4}{l\eta} \Delta p \propto \Phi \Delta p.$$

Здесь r – радиус поры; l – длина поры; η – динамическая вязкость; Δp – перепад давления (напор).

Представляя фрактальную пористую среду в виде набора пор, имеющих определенную плотность распределения их размеров, полагаем, что радиус поры примерно равен ее длине ($r \approx l$).

Обозначим проницаемость и порог проницаемости соответственно через Φ и Φ_c (наименьшее значение проницаемости в бесконечном кластере пор). Вероятность протекания через пору – $W(\Phi)$.

Тогда порог протекания (концентрация пор, приводящая к формированию цепочки связанных между собой пор, через которую происходит утечка) определяется формулой

$$p_c = \int_{\Phi_c}^{\infty} W(\Phi) d\Phi.$$

Плотность распределения пор [11] по радиусам r представим в виде

$$W(r) = (3 - D) \frac{r^{2-D}}{r_{max}^{2-D}}$$

Здесь D – фрактальная размерность ($1 < D < 2$); r_{max} – радиус наибольшей поры.

Представление пористой среды в виде набора пор сферической формы является частным случаем набора вытянутых пор (в виде цилиндрических трубок). Пусть трубки имеют радиус r и длину $C \cdot r$. Тогда объем трубки равен $V = \pi r^2 C \cdot r = C \pi r^3$. Для пор сферической формы объем $V = (4/3) \pi r^3$.

В этой модели [12] плотность распределения пор определяется зависимостью

$$W(r) = (3 - D) \frac{r^{-1-D}}{C \cdot \pi \cdot r_{\max}^{3-D}}$$

Вероятность нахождения трубки радиуса r равна

$$W(r)dr \propto r^{-1-D}$$

или

$$W(r)dr = (3 - D) \frac{r^{-1-D}}{C \cdot \pi \cdot r_{\max}^{3-D}} dr.$$

Пористость определим из соотношения

$$m = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} W(r) \cdot V dr = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (3 - D) \frac{r^{-1-D}}{C \cdot \pi \cdot r_{\max}^{3-D}} C \cdot \pi \cdot r^3 dr.$$

Интегрируя это выражение, найдем

$$m = 1 - \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}} \right)^{3-D}$$

Связь между пористостью и фрактальной размерностью определяется выражением

$$D = 3 - \frac{\lg(1 - m)}{\lg(r_{\min}/r_{\max})} \quad (1)$$

Обычно при определении пористости учитывают только связанные между собой поры и не учитывают изолированные поры, не участвующие в перемещении уплотняемой среды внутри пористой среды.

Используя фрактальные представления, используемые в работах [3, 5], пористость может быть определена из соотношения:

$$m = 1 - b^{i(D-E)}$$

где b, i – коэффициенты; D – фрактальная размерность профиля зазора ($1 < D < 2$); E – эвклидова размерность ($E=2$).

Фрактальная размерность в этом случае будет равна

$$D = \frac{\lg(1 - m)}{i \cdot \lg b} + E \quad (2)$$

В соответствии с $2-D$ перколяционной моделью, рассматривающей протекание по узлам (порам) на квадратной решетке, просачивание наступает тогда, когда цепочка пор достигает противоположной стороны по наименьшему пути. Расположение пор (белые клетки на рис. 3 и 4) формируется с помощью распределения Бернулли. Остальные черные клетки указывают на отсутствие пор и невозможность протекания через них.



Рисунок 3 – Заполнение квадратной решетки порами (белые квадраты)
Концентрация пор $p=0,21$



Рисунок 4 – Заполнение квадратной решетки порами (белые квадраты)
Концентрация пор $p=0,73$

Проведенные многими исследователями численные эксперименты показали, что протекание наступает при концентрации пор (отношение числа пор к общему числу клеток, равному, например 70×70), оцениваемой величиной

$$p_c = \frac{n_{пор}}{n_o}$$

Здесь $n_{пор}$ – количество пор; n_o – общее число клеток квадратной решетки.

Анализ рисунков 3 и 4 показывает, что при малой концентрации пор, не достигшей порогового значения, протекание невозможно, а при превышении порогового значения наблюдается протекание.

Пороговое значение концентрации:

- для 2- D перколяционной модели $p_c=0,5927$;
- для 3- D модели концентрация пор $p_c=0,3116$.

Однако эти теоретические модели не рассматривают анизотропию или негомогенность пористой структуры и пористость разного масштаба измерения.

3- D модель требует сравнения с реальными процессами протекания (фильтрации) в пористой среде (через межконтактный зазор инженерных металл-металлических поверхностей). Фрактальные представления о пористой среде позволяют дать более точные количественные оценки параметров, входящих в исходное уравнение А. Дарси.

Согласно абстрактным 2- D и 3- D моделям предполагается, что пористость численно равна критическому значению концентрации пор, при которой осуществляется переход от состояния герметичности к протеканию $m=p_c$.

Так, для 2- D модели при $b=3$; $i=1$ фрактальная размерность пористого слоя при $m=0,5927$ определяется по формуле

$$D = \frac{\lg(1-m)}{i \lg b} + E = \frac{\lg(1-0,5927)}{1 \cdot \lg 3} + 2 = 1,182.$$

Для 3- D модели при $b=3$; $i=1$ фрактальная размерность пористого слоя при $m=0,3116$ равна

$$D = \frac{\lg(1-m)}{i \lg b} + E = \frac{\lg(1-0,3116)}{1 \cdot \lg 3} + 3 = 2,662.$$

Сравним полученную оценку фрактальной размерности с расчетом по формуле (1). При отношении $r_{max}/r_{min}=3$ и $m=0,3116$ найдем $D=2,66$.

При малых значениях соотношения $(r_{min} / r_{max})^{3-D}$, где $r_{min}=r_c$ – критическая величина радиуса поры, ниже которой просачивание невозможно, справедливо выражение

$$\left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}}\right)^{3-D} = 1 - m.$$

Тогда отношение r_c / r_{\max} имеет вид

$$\frac{r_c}{r_{\max}} = (1 - m)^{1/(3-D)}.$$

Отношение r_c / r_{\max} зависит от пористости и фрактальной размерности (критическое значение радиуса изменяется в пределах [12] от $r_c = r_{\max}/5$ до $r_c = r_{\max}/2$). Отметим, что минимальный радиус поры, через которую еще возможно просачивание, является для рассматриваемого конкретного случая постоянной величиной. Минимальный (критический) радиус поры, в свою очередь, зависит от многих факторов: вязкости, числа Рейнольдса, наличия граничного слоя прилипших к стенкам поры молекул уплотняемой среды и др.

В ряде случаев удастся установить связь между пористостью и фрактальной размерностью, которую можно записать в первом приближении в виде как

$$m = 3 - D, \quad 2 < D < 3.$$

Зависимость отношения r_{\min}/r_{\max} от фрактальной размерности D представлена на рисунке 5.

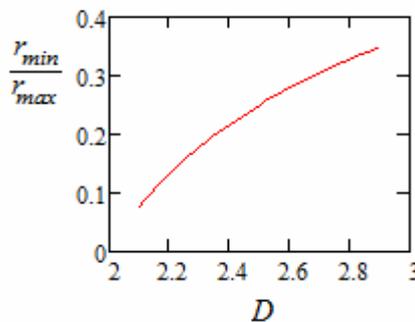


Рисунок 5 – Зависимость отношения r_{\min} / r_{\max} от фрактальной размерности D

Полученные данные о фрактальной размерности можно считать предварительными. Окончательную оценку фрактальной размерности и пористости (межконтактного зазора) дадим с помощью компьютерного моделирования.

Для анализа профиля зазоров при контакте двух шероховатых поверхностей использовалось разработанное нами программное обеспечение. Картина распределения пор, пятен касания и каналов представлена на рисунке 6. Эта картина меняется при увеличении сближения. В этом случае площадь, занятая металлическими контактами растет.

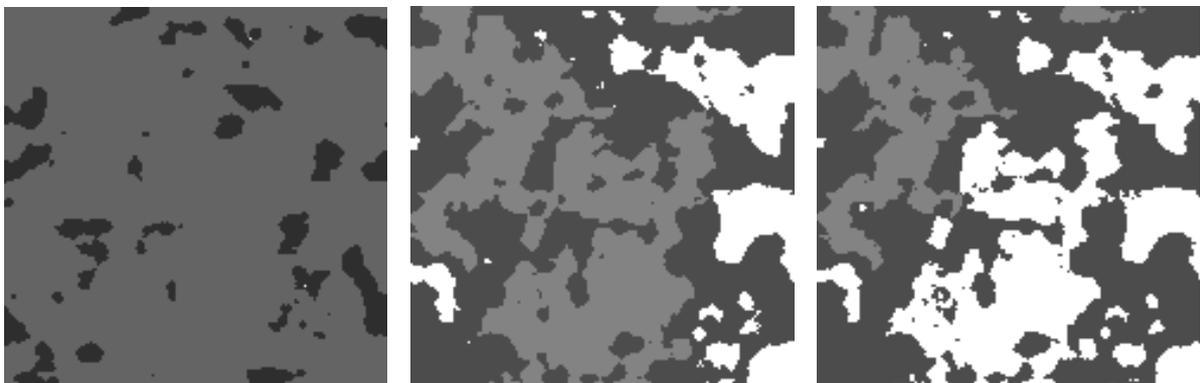


Рисунок 6 – Картина зазора между шероховатыми поверхностями при различном сближении (7 мкм, 20 мкм и 27 мкм соответственно; светлые пятна – поры, темные – площадки металлического контакта, серые – капилляры)

Таким образом, существующие модели протекания (фильтрационная – Дарси, капиллярная – Гагена-Пуазейля, щелевая) содержат для согласования с экспериментальными данными ряд коэффициентов, которые в ряде случаев либо трудно определить, либо принимаемые в расчетах значения недостаточно обоснованы.

Нами предложена фрактальная модель, позволяющая оценить протекание (просачивание) через соединение инженерных поверхностей. Модель рассматривает просачивание через фрактальную пористую среду, которая в самом общем виде представляет собой выделенный герметизирующий объем, содержащий систему пор, имеющих определенное распределение размеров этих пор и их концентрацию. Важными параметрами являются фрактальная размерность пористой среды и концентрация, при которой формируется бесконечный кластер – цепочка пор, по которой происходит утечка. При этом важно выделить критический размер поры, размеры которой делают невозможным протекание через эту пору.

Фрактальная модель позволяет рассматривать пористость на разных масштабных уровнях. Так, для стыка мультифрактальных поверхностей пористость равна сумме, определяющей раздельно особенности пористого слоя на разных уровнях

$$m = m_s + m_t,$$

где

$$m_s = \frac{3 - D_s}{r_{s \max}} \left[\int_{r_{s \min}}^{r_{s \max}} r_s^{2 - D_s} \right]; \quad m_t = \frac{3 - D_t}{r_{t \max}} \left[\int_{r_{t \min}}^{r_{t \max}} r_t^{2 - D_t} \right].$$

Дополнительным условием подобного разделения является следующее утверждение: Радиус самой наименьшей «структурной» поры (индекс S) всегда больше радиуса самой большой «текстурной» поры (индекс t).

Для определения пористости необходимо определить фрактальные размерности этих особенностей пористой среды.

Таким образом, предложенная фрактальная модель в определенной степени объединяет фильтрационную и капиллярную модели, при этом капилляр представляет собой пору, имеющую равные размеры радиуса и длины или пору цилиндрической формы, у которой длина существенно больше радиуса. Точные значения порога протекания и необходимые закономерности, оценивающие утечку через пористую среду, рассматриваются с помощью компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камерон, А. Теория смазки в инженерном деле/ Пер. с англ.–М.: Машгиз, 1962.–296 с.
2. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей.–М.: Машиностроение, 1987.–208 с.
3. Федер, Е. Фракталы/ Пер. с англ. –М.: Мир, 1991.–254 с.
4. Суслов, А.Г. Экспериментально–статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин/А.Г. Суслов, О.А. Горленко.–М.: Машиностроение–1, 2003.–303 с.
5. Sukop, M.C. Percolation Thresholds in 2-Dimensional Prefractal Models of Porous Media/ M.C. Sukop, G.-J. Van Dijk, E. Perfect, W.K.P. Loon// Transport in Porous Media: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 2002.–48. -P. 187–208.
6. Прокопович, И.В. Определение вероятности образования транзитной графитовой поры в структуре серого чугуна/И.В. Прокопович, Ф.М. Грайжевский//Труды Одес.политехн. ун-та.-Одесса, 1997.-Вып. 1.-С. 25-26.
7. Коллинз, Р. Течение жидкостей через пористые материалы. – М.: Мир, 1964. – 350 с.
8. Дерягин, Б.В. Измерение удельной поверхности пористых и дисперсных тел по сопротивлению течения разряженных газов// Докл. АН СССР, 1946.-Т.53.-С. 627 - 630.
9. Дёмкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин/Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.
10. Пранч, А.С. Механизм возникновения и разрушения сцеплений между контактирующими металлическими телами при совместном действии нормальной нагрузки и сдвига/ Автореф. канд. дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. Институт механики. – Рига, АН Латвийской ССР, 1969. – 28 с.
11. Hunt, A. Percolation Theory for Flow in Porous Media/A. Hunt, R. Ewing.-Springer, Berlin Heidelberg, 2009.-306 p.
12. Hunt, A.G. Effects of Bubbles on the Hydraulic Conductivity of Porous Materials. Theoretical Results/ A. G. Hunt, M. Manga// Transport in Porous Media, 2003.-V. 52.-P. 51–65.

Измеров Михаил Александрович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: maik51@yandex.ru

Тихомиров Виктор Петрович

Брянский государственный технический университет, г. Брянск

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Детали машин»

E-mail: dm-bgtu@yandex.ru

Лавит Игорь Михайлович

Тульский государственный университет, кафедра математического моделирования

300012, Тула, просп. Ленина, 92.

тел.: +7-953-4-22-22-81

E-mail: IgorLavit@yandex.ru

M.A. IZMEROV, V.P. TIKHOMIROV, I.M. LAVIT

TIGHTNESS METAL – METAL CONNECTIONS AS THE COURSE THRESHOLD THROUGH FRAKTALNY POROUS ENVIRONMENT

In this paper, we consider new positions Darcy's equation taking into account the fractal dimension of the mating surfaces, a comparison of experimental and calculated metal-metal sealing compounds, as well as by computer simulation provides more precise assessment of the real way of course (an infinite cluster) as the union then, on which there is leak sealing medium.

Keywords: percolation, fractal dimension, sealing, surface fractal, modeling of contact surfaces.

1. Kameron, A. Teorija smazki v inzhenernom dele/ Per. s angl.–M.: Mashgiz, 1962.–296 s.
2. Suslov, A.G. Tehnologicheskoe obespechenie parametrov sostojaniya poverhnostnogo sloja detalej.–M.: Mashinostroenie, 1987.–208 s.
3. Feder, E. Fraktaly/ Per. s angl. –M.: Mir, 1991.–254 s.
4. Suslov, A.G. Jeksperimental'no–statisticheskij metod obespechenija kachestva poverhnosti detalej mashin/A.G. Suslov, O.A. Gorlenko.–M.: Mashinostroenie–1, 2003.–303 s.
5. Sukop, M.C. Percolation Thresholds in 2-Dimensional Prefractal Models of Porous Media/ M.C. Sukop, G.-J. Van Dijk, E. Perfect, W.K.P. Loon// Transport in Porous Media: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 2002.–48. -P. 187–208.
6. Prokopovich, I.V. Opredelenie verojatnosti obrazovaniya tranzitnoj grafitovoj pory v strukture serogo chuguna/I.V. Prokopovich, F.M. Grajzhevskij//Trudy Odes.politehn. un-ta.-Odessa, 1997.-Vyp. 1.-S. 25-26.
7. Kollinz, R. Techenie zhidkostej cherez poristye :materialy. – M.: Mir, 1964. – 350 s.
8. Derjagin, B.V. Izmerenie udel'noj poverhnosti poristyh i dispersnyh tel po soprotivleniju teche-nija razrzhazhennyh gazov// Dokl. AN SSSR, 1946.-T.53.-S. 627 - 630.
9. Djomkin, N.B. Kachestvo poverhnosti i kontakt detalej mashin/N.B. Demkin, Je.V. Ryzhov. - M.: Mashinostroenie, 1981. - 244 s.
10. Pranch, A.S. .Mehanizm vzniknovenija i razrushenija scepnenij mezhdru kontaktirujuwimi metallischeskimi telami npi sovmestnom dejstvii normal'noj nagruzki i sdviga/ Avtoref. kand. diss. na soiskanie uch. st. kand. tehn. nauk. Institut mehaniki. – Riga, AN Latvijskoj SSR, 1969. – 28 s.
11. Hunt, A. Percolation Theory for Flow in Porous Media/A. Hunt, R. Ewing.-Springer, Berlin Heidelberg, 2009.-306 p.

Izmerov Mikhail Aleksandrovich

Bryansk state technical university, Bryansk

Candidate of Technical Sciences, assistant professor

E-mail: maik51@yandex.ru

Tikhomirov Victor Petrovitch

Bryansk state technical university, Bryansk

Doctor of Engineering, professor, department chair of «Detail of cars»

E-mail: dm-bgtu@yandex.ru

Lavit Igor Mihailovich

Tula state university, Department of Mathematic Modeling

300012, Tula, prospect Lenina, 92.

Tel.: +7-953-422-22-81

E-mail: IgorLavit@yandex.ru

В.Г. МАЛИНИН, Н.А. МАЛИНИНА, Г.В. МАЛИНИН, А.И. ПЕРЕЛЫГИН

МЕТОД ПРОГНОЗА ЭФФЕКТА ПЛАСТИЧНОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ НА ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ СТРУКТУРНО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ МЕЗОМЕХАНИКИ

В данной работе, развивая методы структурно-аналитической мезомеханики и используя результаты экспериментальных исследований эффекта пластичности превращения на тонкостенных трубчатых образцах из сплава Cu-12%Al-4%Mn, впервые предложен эффективный метод прогноза деформационных свойств пластичности превращения при сложном напряженном состоянии.

Ключевые слова: структурно-аналитическая мезомеханика; пластичность превращения; термоциклирование; сложное напряженное состояние.

Эффект пластичности превращения может быть связан с фазовыми реакциями различной природы – с обратимыми превращениями первого или второго рода, диффузионными превращениями и др. Физическая модель пластичности превращения для мартенситных реакций первого рода и анализ в рамках структурно-аналитической мезомеханики выполнен в [1, 2].

Функционально-механические свойства материалов, обладающих эффектами памяти формы (ЭПФ) в условиях сложного напряженного состояния, отличаются нетривиальными особенностями [1]. Но до настоящего времени выполнены лишь единичные экспериментальные исследования [1,3] в которых этой проблеме уделяли внимание. В то же время экспериментальные и теоретические исследования закономерностей формирования деформационных свойств в условиях непрерывного изменяющейся структуры при вариации вида напряженного состояния важны как с научной, так и с практической точек зрения.

В настоящей статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований механического поведения сплава Cu-12%Al-4%Mn (по массе) при комбинированном нагружении касательными и нормальными напряжениями тонкостенных цилиндрических оболочек в условиях охлаждения через интервал прямого мартенситного превращения.

В качестве объекта исследования использовались образцы, которые были предварительно термообработаны и имели размеры, приведенные в [3]. Термообработанный материал имел следующие характеристики температур превращения $M_k = 64^{\circ}\text{C}$, $M_n = 90^{\circ}\text{C}$, $A_n = 86^{\circ}\text{C}$, $A_k = 111^{\circ}\text{C}$. В процессе опытов тонкостенные цилиндрические образцы нагревали в свободном состоянии до температуры 160°C , затем нагружали заданной комбинацией касательного $\sqrt{3}\tau$ и нормального напряжения σ выдерживали две минуты и производили охлаждение через интервал температур фазовых превращений при постоянных значениях приложенных напряжений. Производили 2÷3 цикла изменения температуры, добиваясь стабилизации термомеханического гистерезиса.

Схема, иллюстрирующая программу испытания, представлена на рисунке 1,а. Было выполнено пятнадцать опытов, которые отмечены соответствующими точками на схеме в пространстве напряжений $\sqrt{3}\tau$ - σ (рис. 1,а). Последовательность проведения опытов соответствует порядковому номеру точек на рисунке 1,а. Кольцевые линии на рисунке 1,а характеризуют три уровня изолиний постоянной интенсивности напряжений $\sigma_i = 31; 62, 93$ МПа.

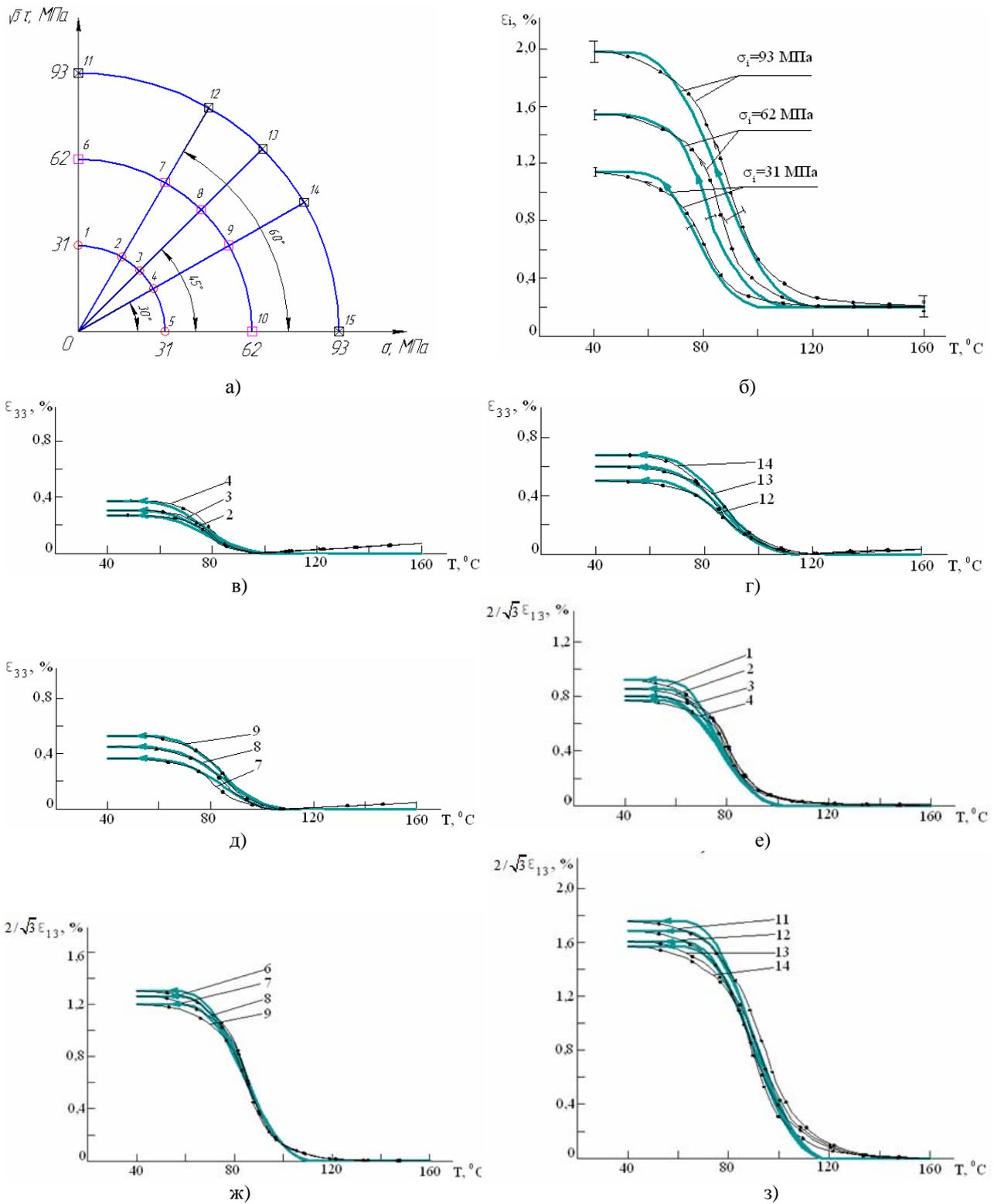


Рисунок 1 – Схема программы испытаний (а)

1 – $\sigma=0$ МПа, $\sqrt{3}\tau=31$ МПа; 2 – $\sigma=15$ МПа, $\sqrt{3}\tau=27$ МПа; 3 – $\sigma=22$ МПа, $\sqrt{3}\tau=22$ МПа;
 4 – $\sigma=27$ МПа, $\sqrt{3}\tau=15$ МПа; 5 – $\sigma=31$ МПа, $\sqrt{3}\tau=0$ МПа; 6 – $\sigma=0$ МПа, $\sqrt{3}\tau=31$ МПа;
 7 – $\sigma=31$ МПа, $\sqrt{3}\tau=54$ МПа; 8 – $\sigma=44$ МПа, $\sqrt{3}\tau=44$ МПа; 9 – $\sigma=54$ МПа, $\sqrt{3}\tau=31$ МПа;
 10 – $\sigma=62$ МПа, $\sqrt{3}\tau=0$ МПа; 11 – $\sigma=0$ МПа, $\sqrt{3}\tau=93$ МПа; 12 – $\sigma=46$ МПа,
 $\sqrt{3}\tau=81$ МПа; 13 – $\sigma=66$ МПа, $\sqrt{3}\tau=66$ МПа; 14 – $\sigma=81$ МПа, $\sqrt{3}\tau=46$ МПа;
 15 – $\sigma=93$ МПа, $\sqrt{3}\tau=0$ МПа

и графики кинетики эффекта пластичности превращения по компонентам

ϵ_i (б); ϵ_{33} (в, г, д); $2/\sqrt{3}\epsilon_{13}$ (е, ж, з).

На рисунках 1,б-з в виде точек представлены экспериментальные графики иллюстрирующие кинетику изменения эффекта пластичности превращения при охлаждении через интервал температур прямого мартенситного превращения при различных видах напряженного состояния. Графики, представленные на рисунке 1,б, изображают изменение интенсивности деформаций ε_i при охлаждении через температурный интервал прямой мартенситной реакции, на рисунке 1,в-д приведены аналогичные зависимости относительной линейной деформации ε_{33} , а на рисунке 1,е-з компоненты сдвиговой деформации $2\varepsilon_{13}/\sqrt{3}$.

Выполненные экспериментальные исследования позволили сформулировать гипотезы и создать эффективный метод расчета эффекта пластичности превращения при сложном напряженном состоянии.

1. Формулировка гипотез. Эффекты пластичности превращения и памяти формы могут быть связаны с фазовыми реакциями различной природы – с обратимыми превращениями первого или второго рода. Вместе с тем, возможно проявление смешанных реакций. Физическая модель обратимых мартенситных реакций первого рода рассмотрена в [1], а анализ в рамках структурно-аналитической мезомеханики выполнен в [2].

В настоящей статье развиваются методы структурно-аналитической мезомеханики для материалов с ЭПФ, в которых проявляется ярко выраженный синергетический эффект, характеризующийся возникновением самоаккомодированных групп мартенситных кристаллов, образующих в процессе инициирования мартенситных реакций протяженные домены, ориентированные в сторону действующих эффективных напряжений τ'_{ik} . Анализ данных физических опытов [1], а также результаты выполненных экспериментальных исследований, позволяют сформулировать гипотезы для моделирования эффектов пластичности превращения исходных макроскопически изотропных поликристаллах. Коротко рассмотрим основные положения используемых гипотез. Принимается концентрационная гипотеза возникновения взрывного характера мартенситного превращения во всех структурных элементах ориентационного пространства при условии образования критического зародыша новой фазы. Критерий формирования критического зародыша формулируется на макромасштабном уровне в терминах эффективной температуры и эффективных напряжений. Постулируется и экспериментально обосновывается обобщенный принцип Клаузиуса-Клапейрона на макромасштабном уровне, который учитывает различный характер химических реакций при прямом и обратном мартенситных превращений в зависимости от исходного фазового состава.

Предполагается, что на структурном уровне возникают самоаккомодированные группы мартенситных кристаллов и пластичность прямого мартенситного превращения определяется возмущающим действием деватора локальных напряжений τ'_{ik} [1].

Принимается гипотеза изотропного континуума на макромасштабном уровне и квазиконтинуума на структурном уровне. Анизотропия мартенситных кристаллов отражается за счет учета структурно-статических свойств фазовых превращений.

2. Формулировка математической модели. Постановка задачи расчета пластичности превращения предполагает, что математический объект нагрет выше температуры конца обратного мартенситного превращения A_K , нагружен произвольным тензором напряжения σ_{ik} , после чего произведено его охлаждение до температуры конца прямого мартенситного превращения M_K . Дилатационным эффектом превращения пренебрегли. С учетом принятых гипотез, в соответствии с логикой [1] получены следующие определяющие соотношения:

III. Структурный уровень:

$$\dot{\Phi} = -\dot{T}^* H(T^* - M_K) H(A_K - T^*) \left\{ \begin{array}{l} H(-\dot{T}^*) H \left[M_H - \Phi(M_H - M_K) - T^* \right] (M_H - M_K)^{-1} + \\ + H(\dot{T}^*) H \left[T^* + \Phi(A_K - A_H) - A_K \right] (A_K - A_H)^{-1} \end{array} \right\};$$

$$\dot{\beta}_{ik} = B_{\Phi} \dot{\Phi} \tau'_{ik} H(-\dot{T}^*) + \beta_{ik} \frac{\dot{\Phi}}{\Phi} H(\dot{T}^*);$$

$$\tau_{ik} = \alpha_{pi} \alpha_{qk} \sigma_{pq}.$$

IV. Макромасштабный уровень:

$$\dot{T}^* = \dot{T} - \frac{T_0}{q_0} D_i \dot{\sigma}_i,$$

$$D_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{D_{ik} D_{ik}}, \sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma'_{ik} \sigma'_{ik};$$

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{4\pi^2 \Delta} \int_{\{S\}} dS \int_{\{\Omega\}} \alpha_{ip} \alpha_{kq} \beta_{pq} d^3 \Omega.$$

Здесь Φ – количество мартенситной фазы; $H(x)$ – функция Хэвисайда; точка означает производную по времени; $M_\kappa, M_n, A_n, A_\kappa$ – характеристические температуры превращения [1]; $B_\phi = 0,0367 e^{-0,005\sigma_i}$; τ'_{ik}, σ'_{ik} – девиаторы напряжений в локальном и лабораторном базисах; β_{ik} и ε_{ik} – деформации, инициируемые прямым мартенситным превращением в локальном и лабораторном базисах; $\{\Omega\}$ – ориентационное пространство, задающее взаимную ориентацию локального и лабораторного базисов [1]; α_{ik} – направляющие косинусы, переводящие локальный базис в лабораторный; $\{S\}$ – статистические переменные, характеризующие структурную неоднородность ширины гистерезиса фазового превращения; T – температура; T_0 – температура термодинамического равновесия; q_0 – тепловой эффект реакции; D_{ik} – дисторсия превращения в локальном базисе; Δ – ширина гистерезиса фазового превращения.

При таких допущениях была получена следующая формула для расчета деформации пластичности превращения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ik} = B_\phi \sigma'_{ik} & \left\{ \frac{1}{2\Delta(M_n - M_\kappa)} \left(M_n - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2} \right)^2 H(M_n - M_\kappa - \Delta) * \right. \\ & * H\left(T - \kappa\sigma_i - M_n - \frac{\Delta}{2}\right) * H\left(M_n - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2}\right) + \\ & + \frac{1}{(M_n - M_\kappa)} (M_n - T + \kappa\sigma_i) H(M_n - M_\kappa - \Delta) H\left(T - \kappa\sigma_i - M_\kappa - \frac{\Delta}{2}\right) * \\ & * H\left(M_n - T + \kappa\sigma_i - \frac{\Delta}{2}\right) + \\ & + \frac{1}{\Delta} \left[M_\kappa - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2} + \frac{1}{2(M_n - M_\kappa)} \left\langle (M_n - M_\kappa)^2 + \left(M_n - T + \kappa\sigma_i - \frac{\Delta}{2}\right)^2 \right\rangle \right] * \\ & * H(M_n - M_\kappa - \Delta) H\left(T - \kappa\sigma_i - M_\kappa + \frac{\Delta}{2}\right) H\left(M_\kappa - T + \kappa\sigma_i + \frac{\Delta}{2}\right) \left. \right\}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Здесь } \kappa = \frac{T_0}{q_0} D_i.$$

Формула (1), как показывает анализ, весьма удовлетворительно описывает кинетику накопления деформации на этапе охлаждения. В частности опыты, выполненные на тонкостенных трубчатых образцах из сплава Cu-12%Al-4%Mn для различных напряженных состояний, включающих программу из пятнадцати схем нагружения, были описаны с хорошим соответствием теоретических (сплошные линии) и экспериментальных (точки) результатов (рисунок 1). Отклонение теоретических данных по отношению к экспериментальным не превышает разброса наблюдаемого в опытах. Необходимо отметить, что для калибровки параметров модели достаточно выполнить опыт при одном напряженном состоянии, например

при чистом сдвиге. Методика и результаты экспериментальных исследований (рис. 1) подробно описана в [3].

Таким образом, предложенный метод прогноза ЭПФ на основе развития [1] и сформулированных гипотез позволяет развивать достаточно эффективные и простые методы расчета нетривиальных деформационных свойств пластичности превращения при сложном напряженном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинин, В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности [Текст] / Малинин В.Г., Лихачев В.А. – СПб.: Наука, 1993. – 471с.
2. Малинина, Н.А. Мезомеханика сред с мартенситным превращением [Текст] / Малинина Н.А., Малинин Г.В. // Научное издание. Успехи строительной механики и теории сооружений. Сборник научных статей к 75-летию со дня рождения В.В.Петрова – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 163-173.
3. Малинин, В.Г. Влияние вида напряженного состояния на эффекты памяти формы и пластичности превращения в сплаве Cu-12%Al-4%Mn [Текст] / Малинин В.Г., Перельгин А.И., Савельев А.А. // Сб. научных и научно-методических докладов международной научно-практической конференции препод., сотр., аспирантов – Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС, 2009, –Т.2 – С. 250-254.

Малинин Владислав Георгиевич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 41-98-13

E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Малинина Надежда Аркадьевна

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 41-98-13

E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Малинин Георгий Владиславович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 41-98-13

E-mail: malinin2002@yandex.ru

Перельгин Алексей Иванович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК»

Ассистент кафедры «Динамика и прочность машин»

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

Телефон: 89066603481

E-mail: perelygin_alex@bk.ru

V.G. MALININ, N.A. MALININA, G.V. MALININ, A.I. PERELYGIN

METHOD OF FORECASTING THE CONVERSION PLASTICITY EFFECT IN COMPLEX STRESS STATE ON THE BASIS OF STRUCTURAL-ANALYTICAL ME- SOMECHANICS

In this paper, developing the methods of structural-analytical mesomechanics and using the results of experimental researches of the conversion plasticity effect on thin-walled tubular specimens of alloy Cu-12%Al-4%Mn, first proposed an effective method of forecasting the deformation properties of the conversion plasticity under complex stress state.

Keywords: *structural-analytical mesomechanics; conversion plasticity; thermocycling; complex stress state.*

BIBLIOGRAPHY

1. Malinin, V.G. Strukturno-analiticheskaja teorija prochnosti [Tekst] / Malinin V.G., Lihachev V.A. – SPb.: Nauka, 1993. – 471s.
2. Malinina, N.A. Mezomehanika sred s martensitnym prevrascenijem [Tekst] / Malinina N.A., Malinin G.V. // Nauchnoe izdanie. Uspehi stroitel'noj mehaniki i teorii sooruzhenij. Sbornik nauchnyh statej k 75-letiju so dnja rozhdenija V.V.Petrova – Saratov: SGTU, 2010. – S. 163-173.
3. Malinin, V.G. Vlijanie vida naprjazhennogo sostojanija na jeffekty pamjati formy i plastichnosti prevrascenija v splave Cu-12%Al-4%Mn [Tekst] / Malinin V.G., Pereygin A.I., Savel'ev A.A. // Sb. nauchnyh i nauchno-metodicheskikh dokladov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii prepod., sotr., aspirantov – Staryj Oskol: STI NITU MISiS, 2009, –T.2 – S. 250-254.

Malinin Vladislav Georgiyevich

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
professor of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 41-98-13
E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Malinina Nadejda Arkadyevna

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
professor of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 41-98-13
E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Malinin George Vladislavovich

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
assistant professor of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 41-98-13
E-mail: malinin.mvg@yandex.ru

Pereygin Alexey Ivanovich

FSBEI OF HVT «State University - ESPC»
assistant of the department “Dynamics and strength of material”
29, Naugorskoye Shosse, Orel 302020 Russia
Tel: 89066603481
E-mail: pereygin_alex@bk.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО КОНТАКТА В ПЛОСКИХ ЗАДАЧАХ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Приводятся некоторые результаты численного решения трёх контактных задач, связанных с технологией локального деформирования. Изучается возможность данной технологии формировать микроструктуру детали.

Ключевые слова: локальное деформирование, контактная задача, контактное давление, микроструктура.

Локальное деформирование (ЛД) является перспективным направлением развития технологий ОМД. Воздействие относительно небольших сил, прикладываемых к рабочим инструментам машины или оснастки, позволяет достигать большой деформации заготовки. В течение ряда лет подобные технологии (валковая штамповка, упрочняющая обкатка) разрабатываются на кафедре АВТОПЛАСТ в «Госуниверситет – УНПК» (Орёл ГТУ) [1,2]. Сейчас перед нашими разработчиками стоит задача не только придать изготавливаемой детали необходимую геометрию, но и сформировать её микроструктуру с известными параметрами. В этой связи процесс ЛД представляется перспективным, поскольку обладает рядом положительных качеств, одним из которых, с точки зрения получения требуемой микроструктуры, является возможность создания большого градиента напряжения вблизи контактной зоны. Большой градиент индуцирует моментные напряжения на мезоуровне, которые, в свою очередь, активизируют ротационные моды пластической деформации [3] (заметим, что высокая активность ротационных мод не обязательно влечёт большую макродеформацию). Эти моды существенно меняют структуру и свойства материала. В частности, они ответственны за фрагментацию зёрен поликристалла. Очевидно, что наиболее значительные изменения микроструктуры претерпевает тонкий приконтактный слой, поэтому при разработке технологий ЛД желательно пользоваться методами расчёта, обеспечивающими высокую точность именно в этом слое. Поскольку точное решение возможно лишь в исключительных случаях (задача Герца), приходится обращаться к численным методам.

Далее приводятся три численных примера. Анализ их решения преследует две цели: во-первых, изучить условия формирования микроструктуры в приконтактной области; во-вторых, сравнить возможности пакета ШТАМП [4,5], разработанного на кафедре АВТОПЛАСТ, и коммерческого пакета DEFORM. План статьи следующий: сначала приводятся численные примеры, затем делается их анализ, и, наконец, предлагаются выводы, подтверждающие целесообразность применения методов ЛД для решения поставленной задачи.

Пример 1. Кольцо переменной толщины с внешним радиусом $3 \cdot 10^{-2}$ м и внутренним $2.5 \cdot 10^{-2}$ м, с центрами окружностей C_1 и C_2 , отстоящими друг от друга на 10^{-3} м, обкатывается 4 роликами по симметричной относительно прямой C_1C_2 схеме (рис. 1). Обратим внимание, что C_1 и C_2 – начальные положения центров внешней и внутренней границ кольца, а в дальнейшем кольцо будет деформироваться. Центр O_1 одного ролика поворачивается вокруг C_1 по закону:

$$\varphi_1(t) = 59^\circ + 11^\circ t \text{ при } 0 \leq t \leq 1,$$

где t – параметр нагружения, оставаясь на не-

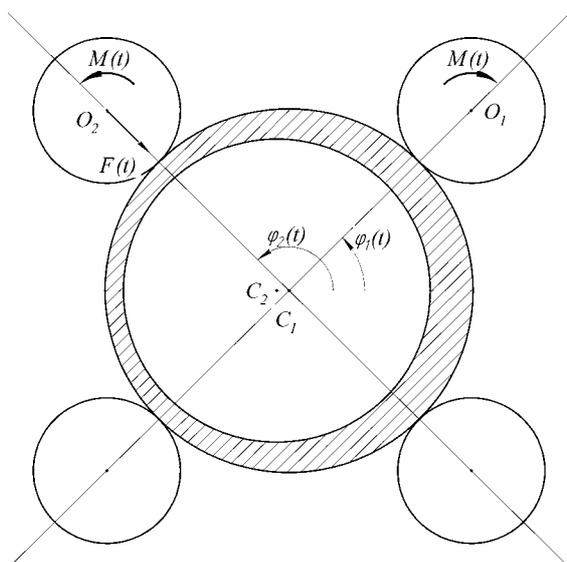


Рисунок 1 – Схема нагружения в примере 1

изменном расстоянии от C_1 . Центр O_2 другого ролика поворачивается вокруг C_1 по закону:

$$\varphi_2(t) = 121^\circ - 11^\circ t \text{ при } 0 \leq t \leq 1,$$

причём углы φ_1, φ_2 отсчитываются против часовой стрелки от направления C_2C_1 . Ко второму ролику прикладывается направленная к C_1 прижимающая погонная сила, изменяющаяся по закону:

$$F(t) = \begin{cases} 4F_0t(1-t) & \text{при } 0 \leq t \leq 0.5 \\ F_0 & \text{при } 0.5 < t \leq 1 \end{cases},$$

где $F_0 = 1.18 \cdot 10^5$ Н/м. Кроме того, к роликам с центрами O_1 и O_2 прикладываются одинаковые по величине и противоположные по направлению тормозные погонные моменты относительно центров роликов, изменяющиеся по закону:

$$M(t) = \begin{cases} 4M_0t(1-t) & \text{при } 0 \leq t \leq 0.5 \\ M_0 & \text{при } 0.5 < t \leq 1 \end{cases},$$

где $M_0 = 3.15 \cdot 10^2$ Н·м/м. Оставшиеся два ролика движутся и нагружаются симметрично первым двум. Точкам заготовки на оси симметрии C_1C_2 запрещается перемещаться в вертикальном направлении и разрешается в горизонтальном. Остальные условия задачи следующие: модуль сдвига $G = 2.7 \cdot 10^{10}$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu = 0.32$, трение подчиняется закону Кулона с коэффициентом $\mu = 0.2$, пластическое поведение материала считается изотропным с линейным упрочнением; начальный предел текучести $1.93 \cdot 10^8$ Н/м², модуль упрочнения $9.62 \cdot 10^8$ Н/м². Деформация считается плоской.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчёта в пакете ШТАМП: поле скорости проскальзывания в зоне контакта первого ролика (одна точка соответствует одному узлу конечноэлементной сетки) и нормальное контактное давление $p = \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}$ (одна точка соответствует одному конечному элементу), где \mathbf{n} и $\boldsymbol{\sigma}$ – единичный вектор нормали и тензор истинного напряжения Коши соответственно.

Во всех рассмотренных примерах криволинейная координата L привязана к поверхности ролика. Поскольку роль времени играет безразмерный параметр нагружения t , здесь и далее размерность скорости выражена не в м/с, а в м.

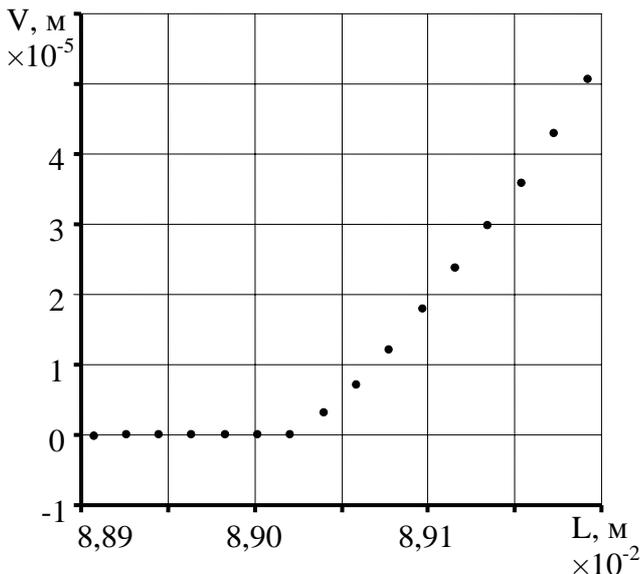


Рисунок 2 – Скорость проскальзывания в примере 1

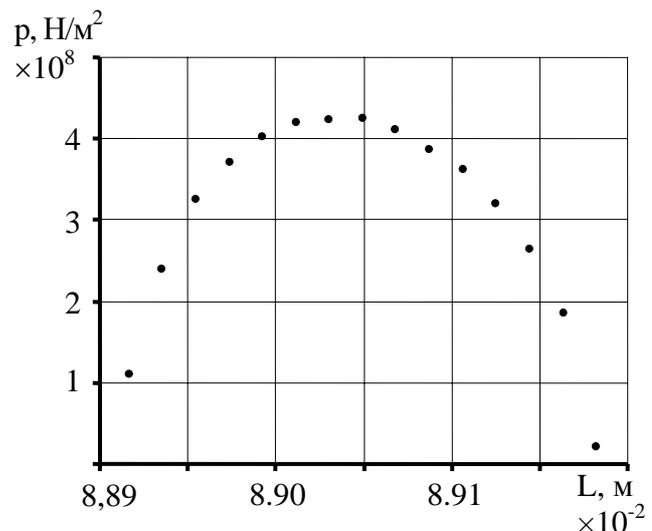


Рисунок 3 – Контактное давление в примере 1

Пример 2. Заготовка в виде сектора кольца с внешним радиусом $3 \cdot 10^{-2}$ м, внутренним радиусом $2.5 \cdot 10^{-2}$ м и углом $\pi/8$ закреплена по внутренней дуге AB и обкатывается по внеш-

ней дуге CD роликом радиуса $1.5 \cdot 10^{-2}$ м с центром O (рис.4). На рисунке показано исходное положение. При этом центр ролика равномерно поворачивается по часовой стрелке на угол $\pi/16$ вокруг центра сектора; к ролику прикладывается линейно возрастающая от нуля сила прижима, направленная к центру сектора, а также линейно возрастающий от нуля тормозной момент, действующий относительно центра O . Деформация считается плоской. Максимальное погонное значение прижимающей силы $7.5 \cdot 10^5$ Н/м, максимальное погонное значение тормозного момента $2 \cdot 10^3$ Н·м/м. Остальные условия задачи взяты из первого примера.

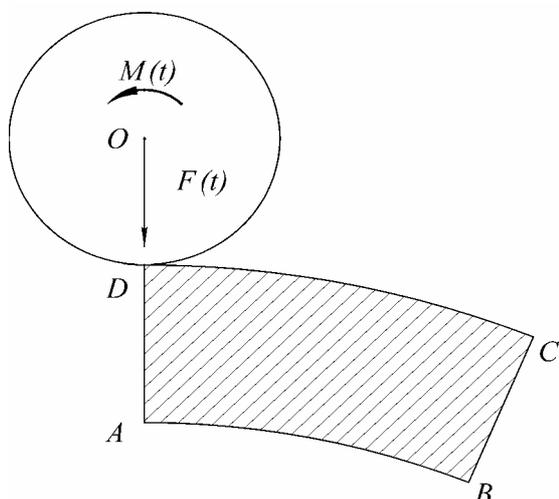


Рисунок 4 – Схема нагружения в примере 2

Расчетная схема показана на рисунке 7. Диаметр $D_2=1.7 \cdot 10^{-2}$ м соответствует переходу от равномерной сетки конечных элементов к неравномерной, сгущающейся к поверхности. Материалом для исследований служил сплав на основе свинца, сурьмы и висмута со следующими свойствами: $G=7.8 \cdot 10^9$ Н/м², $\nu=0.09$, $\mu=0.33$. Кривая упрочнения строилась по 10 экспериментальным точкам вида $(\bar{\varepsilon}; \bar{\sigma})$, где $\bar{\varepsilon}$ – параметр Одквиста, $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжения [Н/м²]: $(0; 3.6 \cdot 10^7)$, $(6 \cdot 10^{-3}; 4.0 \cdot 10^7)$, $(9 \cdot 10^{-3}; 4.3 \cdot 10^7)$, $(1.6 \cdot 10^{-2}; 4.6 \cdot 10^7)$, $(3.6 \cdot 10^{-2}; 5.4 \cdot 10^7)$, $(6.3 \cdot 10^{-2}; 6.1 \cdot 10^7)$, $(0.12; 6.8 \cdot 10^7)$, $(0.14; 7.0 \cdot 10^7)$, $(0.20; 7.4 \cdot 10^7)$, $(1.0; 7.5 \cdot 10^7)$.

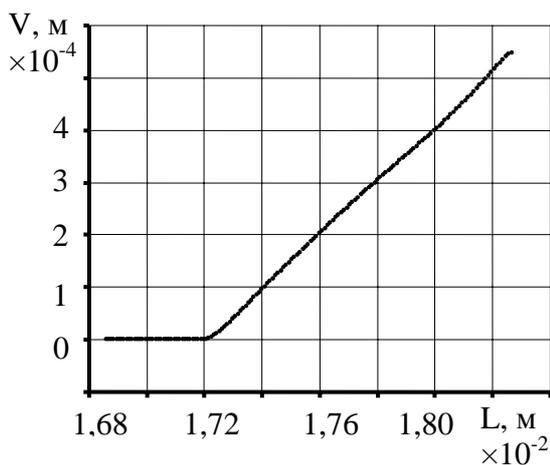


Рисунок 5 – Скорость проскальзывания в примере 2

На рисунках 5 и 6 представлены результаты расчёта (те же, что и в предыдущем примере) пакетами ШТАМП и DEFORM. Т.к. постпроцессор DEFORM не позволяет получить поле скорости проскальзывания напрямую, то соответствующий график в статье отсутствует.

Пример 3. Заготовка в виде цилиндра диаметром $D_1=2.5 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $1.0 \cdot 10^{-2}$ м обкатывается в 3-х роликовой матрице (диаметр роликов $15.5 \cdot 10^{-2}$ м). Заготовка свободно располагается в матрице и поворачивается под действием сил трения по контактной поверхности за счёт вращения роликов, которое задавалось через угол поворота $\varphi=10^\circ$ относительно собственной оси (угол поворота заготовки при этом составил около 60°). Решалась плосконапряжённая задача.

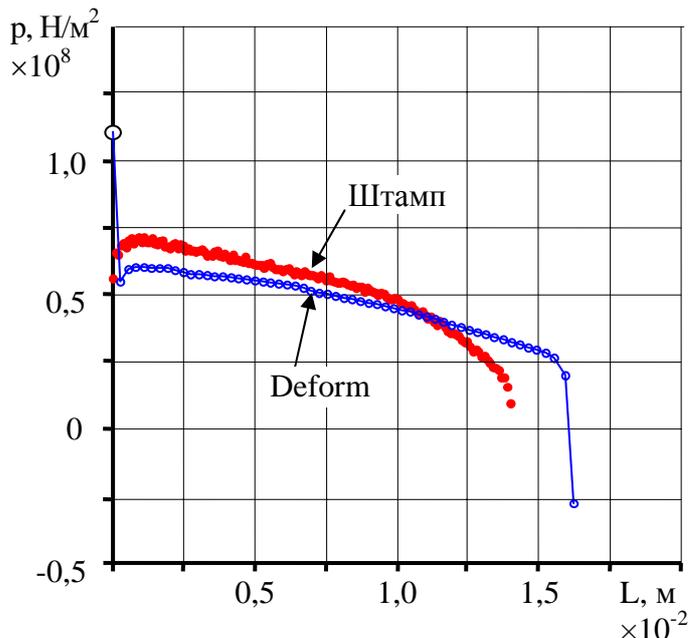


Рисунок 6 – Контактное давление в примере 2

Схема нагружения была следующей. На первом шаге осуществлялось внедрение роликов в заготовку на глубину $4 \cdot 10^{-4}$ м, характеризующую абсолютную деформацию в ради-

альном направлении и определяющую относительное обжатие заготовки ϵ_r . На втором шаге расчета проводилось собственно моделирование обкатки как качение роликов по поверхности заготовки при $\epsilon_r = \text{const}$. На рисунке 8 показано нормальное контактное давление в серединах сторон конечных элементов, находящихся в зоне контакта. Скорость проскальзывания в данном примере не вычислялась.

Перейдем к анализу представленных результатов. Прежде всего, заметим, что графики, полученные с помощью пакета ШТАМП, не подвергались какой-либо математической обработке, и, тем не менее, точки довольно хорошо ложатся на некие гладкие кривые, что говорит об удовлетворительной степени пространственно-временной дискретизации. Максимальное значение контактного давления в несколько раз превышает начальный предел текучести (в 2.5 раза в примерах 1,3 и в 3.5 раза в примере 2), что свидетельствует о сильном всестороннем сжатии, которое повышает ресурс пластичности и приводит к залечиванию дефектов. Увеличение прижимающей силы в примере 2 почти в 7 раз по сравнению с примером 1 вызывает лишь 40% рост максимального контактного давления. Приложение тормозного момента вызывает смещение положения максимума контактного давления в сторону входящего края контактной зоны, а в примере 2 максимум располагается почти на краю. Несмотря на различный характер нагружения в примерах 1 и 2, поле скорости проскальзывания представляет собой почти линейную функцию координаты. Как следует, из рисунков 2 и 5, за входным краем контактной поверхности в примерах 1 и 2 располагается зона прилипания.

Во всех трёх примерах прослеживается скачок напряжения на краю контактной зоны. Как следует из примера 2, величину этого скачка можно увеличить, если сместить максимум контактного давления к краю контактной зоны посредством приложения тормозного момента.

Мы уже отмечали, что большой градиент напряжения вызывает вращательные моменты на мезоуровне и активизирует поворотные моды деформации. Крайне важно обратить внимание на тот факт, что в примере 2 зоны большого градиента напряжения (или градиента контактного давления) и высокого контактного давления пространственно совмещены, как и в процессе равноканального углового прессования. Это существенно повышает качество обрабатываемой детали, поскольку препятствует образованию трещин при одновременной активизации ротационных мод пластичности.

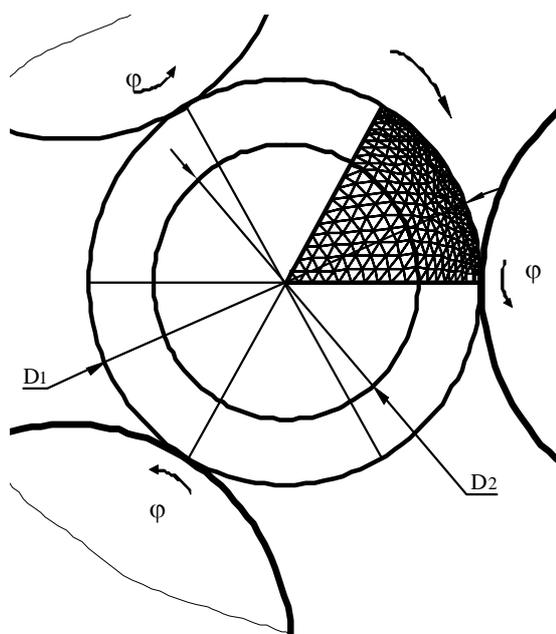


Рисунок 7 – Расчетная схема в примере 3

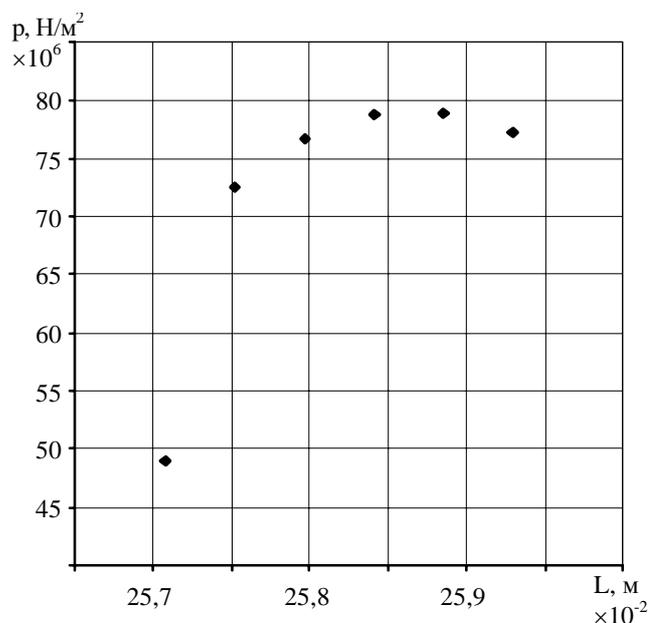


Рисунок 8 – Нормальное контактное давление в серединах сторон конечных элементов, находящихся в зоне контакта в примере 3

Сравнение расчётов пакетами ШТАМП и DEFORM (рис.6) показало удовлетворительное соответствие результатов, за исключением краёв контактной зоны, где DEFORM по-

казал неестественные всплески контактного давления. В экспериментах по прямому измерению контактного давления при прокатке подобные всплески также не обнаружены [6,7].

Выводы. Посредством легко контролируемых параметров процесса (схемы нагружения, силы прижима, тормозного момента) можно влиять на эпюры контактного давления и скорости проскальзывания (с последней связаны, в частности, тепловые эффекты), а тем самым – на условия формирования микроструктуры и поверхности детали. Сравнение результатов расчётов со ШТАМП и DEFORM показало их удовлетворительное соответствие. Вместе с тем DEFORM лишён некоторых возможностей, которые предоставляет ШТАМП (в частности, возможности расчёта скорости проскальзывания).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голенков, В.А. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко – М.: Машиностроение, 1997. – 226 с.: ил.
2. Голенков, В.А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением [Текст] / В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, С.Ю. Радченко и др. – М.: Машиностроение, 2004. – 476 с.: ил.
3. Колбасников, Н.Г. Теория обработки металлов давлением: физические основы прочности и пластичности металлов [Текст] / Санкт-Петербург: Издательство СПб ГПУ, 2004. – 268 с.: ил.
4. П.Г. Вариант метода конечных элементов для контактных задач с трением [Текст]// Известия РАН, сер. Механика твёрдого тела. 2007, №4, С. 168-182.
5. P.G. Morev A variational statement of quasistatic “rigid-deformable” contact problems at large strain involving generalized forces and friction [Текст]// Acta Mechanica. 2011, v. 222, p. 115-130.
6. F.A. Al-Salehi, T.C. Firbank, P.R. Lancaster An Experimental Determination for the Roll Pressure Distributions in Cold Rolling [Текст]// International Journal of Mechanical Sciences. 1973, v. 15, p. 693.
7. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением [Текст] / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.: ил.

Морев Павел Геннадьевич

Государственный университет – УНПК, г. Орёл

Кандидат физико-математических наук, науч. сотр. лаб. новых материалов

302020 г. Орёл Наугорское шоссе, 29

Тел. 8 (4862) 41-98-78

E-mail: paulorel@mail.ru

Капырин Константин Игоревич

Государственный университет – УНПК, г. Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»

302020 г. Орёл Наугорское шоссе, 29

Тел. 8 (4862) 41-98-78

E-mail: kostya2257@inbox.ru

Фёдоров Тимофей Васильевич

Государственный университет – УНПК, г. Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»

302020 г. Орёл Наугорское шоссе, 29

Тел. 8 (4862) 41-98-78

E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

Борзенков Михаил Иванович

Государственный университет – УНПК, г. Орёл

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»

302020 г. Орёл Наугорское шоссе, 29

Тел. 8 (4862) 43-48-90

E-mail: bim@ostu.ru

P.G. MOREV, K.I. KAPIRIN, T.V. FEDOROV, M.I. BORZENKOV

NUMERICAL MODELING OF MECHANICAL CONTACT IN LOCAL DEFORMING PLANE PROBLEMS

Certain results on numerical solution of three contact problems, associated with a local deforming technology, are represented. The possibility of that technology to form an in-process part's microstructure is studied.

Keywords: local deformation, contact problem, contact pressure, microstructure.

BIBLIOGRAPHY

1. Golenkov, V.A. Tehnologicheskie processy obrabotki metallov davleniem s lokal'nym nagruzheniem zago-tovki [Tekst] / V.A. Golenkov, S.Ju. Radchenko – M.: Mashinostroenie, 1997. – 226 s.: il.
2. Golenkov, V.A. Special'nye tehnologicheskie processy i oborudovanie obrabotki davleniem [Tekst] / V.A. Golenkov, A.M. Dmitriev, S.Ju. Radchenko i dr. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 476 s.: il.
3. Kolbasnikov, N.G. Teorija obrabotki metallov davleniem: fizicheskie osnovy prochnosti i plastich-nosti me-tallov [Tekst] / Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo SPb GPU, 2004. – 268 c.: il.
4. P.G. Variant metoda konechnyh jelementov dlja kontaktnyh zadach s treniem [Tekst]// Izvestija RAN, ser. Me-hanika tvjordogo tela. 2007, №4, S. 168-182.
5. P.G. Morev A variational statement of quasistatic “rigid-deformable” contact problems at large strain involving ge-neralized forces and friction [Tekst]// Acta Mechanica. 2011, v. 222, p. 115-130.
6. F.A. Al-Salehi, T.C. Firbank, P.R. Lancaster An Experimental Determination for the Roll Pressure Distributions in Cold Rolling [Tekst]// International Journal of Mechanical Sciences. 1973, v. 15, p. 693.
7. Grudev, A.P. Trenie i smazki pri obrabotke metallov davleniem [Tekst]/ A.P. Grudev, Ju.V. Zil'-berg, V.T. Tilik – M.: Metallurgija, 1982. – 312 s.: il.

Morev Pavel Gennadievich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Candidate of physico-mathematical sciences, research worker of new materials laboratory
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-41-98-78
E-mail: paulorel@mail.ru

Kapyrin Konstantin Igorevich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Candidate of technical sciences, associate professor, chair “Autoplast”
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-41-98-78
E-mail: kostya2257@inbox.ru

Fedorov Timofey Vasilievich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Candidate of technical sciences, associate professor, chair “Autoplast”
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-41-98-78
E-mail: timofeyfedorov@rambler.ru

Borzenkov Mihail Ivanovich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Candidate of technical sciences, associate professor, chair “Autoplast”
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-43-48-90
E-mail: bim@ostu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 62-752.2:519.87

О.В. ФОМИНОВА, Е.Б. БЕЛОЗЁРОВА, В.И. ЧЕРНЫШЕВ, Б.Г. КЕГЛИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВИБРОИЗОЛЯТОРА С ДЕМПФЕРОМ ПРЕРЫВИСТОГО ДЕЙСТВИЯ

Исследуются динамические свойства виброизолятора с демпфером прерывистого действия. Показано, что формирование диссипативной силы как субоптимального компенсационного воздействия позволяет существенно уменьшить интенсивность динамических реакций и длительность переходных процессов по сравнению с пассивным аналогом.

Ключевые слова: виброизолятор; демпфер прерывистого действия; субоптимальное компенсационное воздействие.

Запишем уравнение движения, характеризующее колебания виброизолятора с демпфером прерывистого действия, опираясь на его расчетную схему, представленную на рисунке 1:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = P_0 \cos(\omega \cdot t) + Q. \quad (1)$$

Слагаемое $Q = b(t) \cdot \dot{x}$ в правой части уравнения (1) является субоптимальным компенсационным воздействием, которое реализуется демпфером прерывистого действия [1,2].

В развернутом виде имеет:

$$Q = \lambda \cdot c \cdot x \cdot \text{if}(x \cdot \dot{x} < 0, 1, 0), \quad (2)$$

где λ – коэффициент, характеризующий прогнозируемые (усреднение в рабочем диапазоне частот) динамические свойства демпфера прерывистого действия.

Как видно, на интервалах движения, где демпфер включен в работу, диссипативная сила изменяется пропорционально смещению виброактивного объекта $Q = \lambda \cdot c \cdot x$.

Используя соотношения $\tau = \omega \cdot t$, $\eta = \omega \cdot k^{-1}$, $ed = b \cdot (m \cdot k)^{-1}$, где $k^2 = 2 \cdot c \cdot m^{-1}$, преобразуем уравнение (1) к безразмерному виду

$$\ddot{\xi} + B1 \cdot \dot{\xi} + A1 \cdot \xi = A1 \cdot \cos(\tau) + DU \cdot \tilde{Q} \cdot \xi. \quad (3)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\xi = \frac{c}{P_0} x, \quad \dot{\xi} = \frac{c}{P_0 \omega} \dot{x}, \quad \ddot{\xi} = \frac{c}{P_0 \omega^2} \ddot{x} \text{ – безразмерные переменные, определяющие смещение, скорость и ускорение виброактивного объекта;}$$

$$A1 = \frac{0,5}{\eta^2}, \quad B1 = \frac{ed}{\eta}, \quad DU = \frac{0,5 \cdot \lambda}{\eta^2} \text{ – безразмерные параметры;}$$

$\tilde{Q} = \text{if}(\xi \cdot \dot{\xi} < 0, 1, 0)$ – информационная составляющая компенсационного воздействия.

Представим также в безразмерной форме выражение (2) для нахождения субоптимального компенсационного воздействия и расчетную формулу для нахождения динамической реакции $R(t) = -cx - b\dot{x} + Q$.

Соответственно, имеем:

$$Qd = \lambda \cdot \xi \cdot \text{if}[\xi \cdot \dot{\xi} < 0, 1, 0] = \lambda \cdot \tilde{Q} \cdot \xi, \quad (4)$$

$$Rd = -\xi - 2 \cdot ed \cdot \eta^{-1} \cdot \dot{\xi} + \lambda \cdot \tilde{Q} \cdot \xi. \quad (5)$$

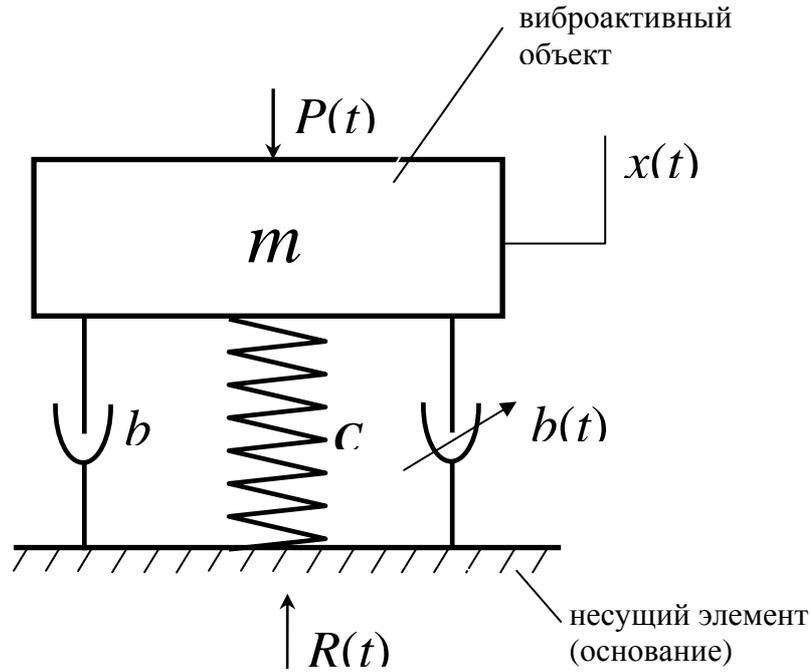


Рисунок 1 – Расчетная схема виброизолятора с демпфером прерывистого действия
 b – вязкое сопротивление пассивного демпфера (фоновое сопротивление среды);

$$b(t) = \frac{\lambda \cdot c \cdot x}{\dot{x}} \text{ if } (x \cdot \dot{x} < 0, 1, 0) \text{ – вязкое сопротивление демпфера прерывистого действия}$$

Для нахождения коэффициента динамичности (в случае стационарных процессов) можно воспользоваться соотношением:

$$Kd = 0,5 \cdot |\max(Rd) - \min(Rd)|. \quad (6)$$

Выборочные результаты моделирования установившихся режимов колебаний виброактивного объекта представлены в таблице 1 и на рисунках 2, 3, 4.

В рассматриваемом диапазоне частот $0,8 \leq \eta \leq 2$ значения коэффициента динамичности (6) виброизолятора приблизительно в полтора (1,596) раза меньше значений коэффициента динамичности пассивного виброизолятора. При этом субоптимальный процесс прерывистого демпфирования наиболее эффективен в области резонансных частот. Здесь отличие значений коэффициентов динамичности пассивной и исследуемой систем виброизоляции варьируется от 1,6 (когда $\varepsilon d = 0,5$) до 3 (когда $\varepsilon d = 0,2$).

Отметим, что с увеличением вязкого сопротивления εd значения коэффициента динамичности в области низких частот уменьшается, приближаясь к единице, а в области высоких частот увеличивается, оставаясь при этом меньше соответствующих значений коэффициента динамичности пассивной системы виброизоляции.

Из сопоставления фазовых координат на рисунке 2 в случаях, когда $\eta = 1$ и $\eta = 1,4$, следует, что колебательные процессы идентичны – резонансных явлений не проявляется. По всей видимости, это связано с принудительным включением ($us_i \neq 0$) в работу и выключением ($us_i = 0$) из работы демпфера соответственно при смене знака скорости и смещения виброактивного объекта.

Таблица 1 – Коэффициенты динамичности при установившихся режимах колебаний виброактивного объекта ($\lambda = 1,4$)

$\varepsilon d \backslash \eta$	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2
0,2	$\frac{2,179}{1,064}$	$\frac{2,693}{0,894}$	$\frac{1,703}{0,723}$	$\frac{1,031}{0,581}$	$\frac{0,704}{0,475}$	$\frac{0,524}{0,391}$	$\frac{0,413}{0,33}$
0,3	$\frac{1,848}{1,03}$	$\frac{1,943}{0,889}$	$\frac{1,46}{0,749}$	$\frac{1,023}{0,622}$	$\frac{0,757}{0,526}$	$\frac{0,592}{0,45}$	$\frac{0,484}{0,392}$
0,4	$\frac{1,617}{1,019}$	$\frac{1,601}{0,891}$	$\frac{1,312}{0,776}$	$\frac{1,018}{0,67}$	$\frac{0,805}{0,583}$	$\frac{0,658}{0,512}$	$\frac{0,555}{0,455}$
0,5	$\frac{1,459}{1,015}$	$\frac{1,414}{0,902}$	$\frac{1,222}{0,802}$	$\frac{1,013}{0,714}$	$\frac{0,844}{0,635}$	$\frac{0,716}{0,57}$	$\frac{0,62}{0,514}$

Примечание: в числителе приведены значения коэффициентов динамичности пассивного виброизолятора, а в знаменателе – исследуемого виброизолятора.

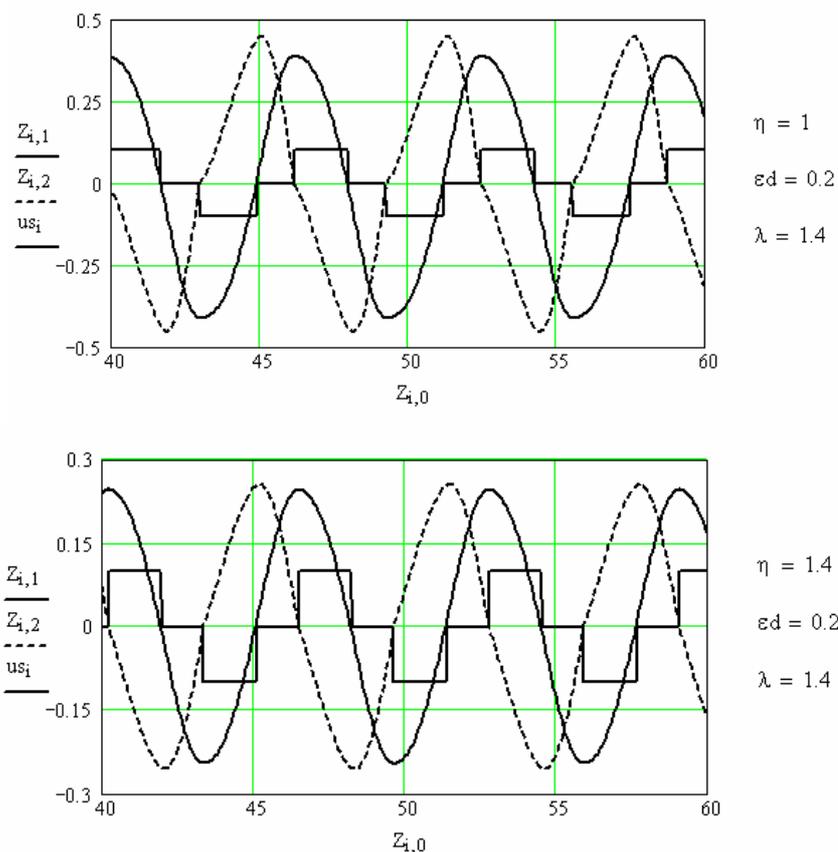


Рисунок 2 – Графики фазовых координат $Z_{i,1} \Rightarrow x(t)$, $Z_{i,2} \Rightarrow \dot{x}(t)$ и знаковой функции субоптимального компенсационного воздействия $u_{s_i} = \text{sign}[Q(t)]$

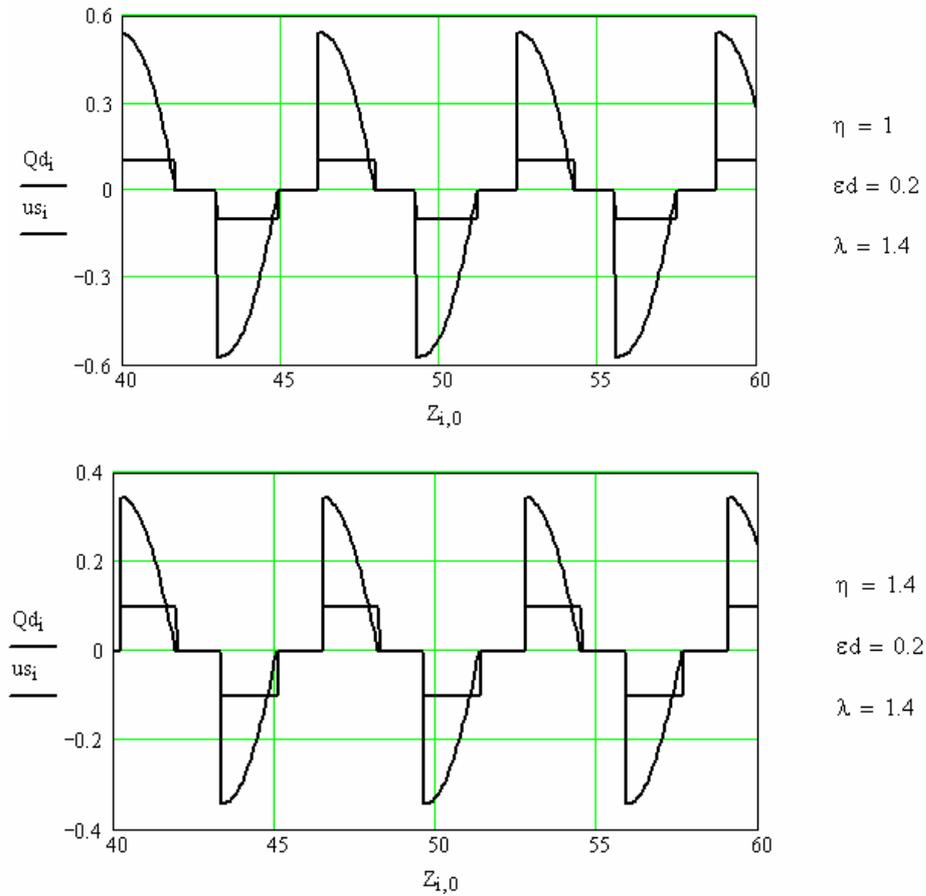


Рисунок 3 – Графики субоптимального компенсационного воздействия $Qd_i = Q(t)$ и его знаковой функции $us_i = \text{sign}[Q(t)]$

Субоптимальное компенсационное воздействие (см. рис. 3) на интервалах, где демпфер включен в работу, изменяется пропорционально перемещению виброактивного объекта, т.е. по закону, близкому к закону изменения функции косинуса. Причем в моменты включения демпфера в работу субоптимальное компенсационное воздействие принимает максимальное по модулю значение $\lambda \cdot c \cdot |x|_{\max}$, а в моменты выключения демпфера из работы – нулевое значение.

Следует заметить, что при очередном включении демпфера в работу знак компенсационного воздействия изменяется с плюса на минус или с минуса на плюс, т.е. каждый раз принимает противоположный знак.

Графики динамических реакций являются кусочно-нелинейными функциями с разрывами первого рода (см. рис. 4). Скачки (разрывы) динамических реакций происходят в моменты включения демпфера в работу, причем они кососимметричны относительно среднего значения динамических реакций.

На интервалах, где демпфер включен в работу и выключен из работы, график динамической реакции имеет характерные дугообразные формы с ярко выраженными экстремумами.

Экстремальные «пиковые» значения на интервалах, где демпфер выключен из работы, на порядок превышают (приблизительно в два раза) максимальные по абсолютной величине значения динамических реакций на интервалах, где демпфер включен в работу.

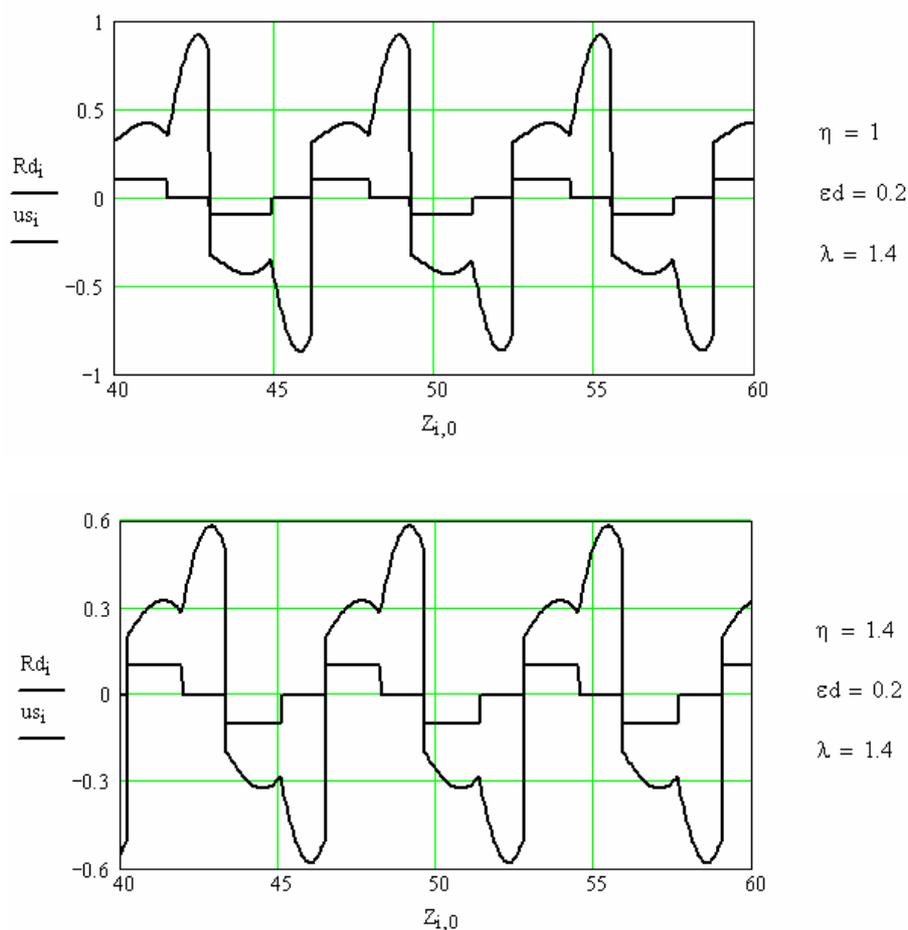


Рисунок 4 – Графики динамической реакции $Rd_i = (Q - R)/P_0$

и знаковой функции субоптимального компенсационного воздействия $us_i = \text{sign}[Q(t)]$

По всей видимости, для того чтобы уменьшить «пиковые» значения динамических реакций, необходимо увеличить длительность включения демпфера в работу, т.е. определить «задержку» со знаком плюс.

Выборочные результаты моделирования переходных режимов колебаний виброактивного объекта представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели качества переходных процессов: пиковые значения и длительность (время)

η	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\max Rd _n$	2,2	2,6	1,8	1,3	1,0	0,88	0,8
$\max Rd _y$	1,4	1,3	1,1	1,0	0,9	0,83	0,75
t_n	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08
t_y	0,11	0,08	0,07	0,064	0,056	0,052	0,044

Примечание: $\max |Rd|_n$, t_n – параметры пассивной системы; $\max |Rd|_y$, t_y – параметры исследуемой системы; результаты приведены для случая, когда $\epsilon d = 0,2$.

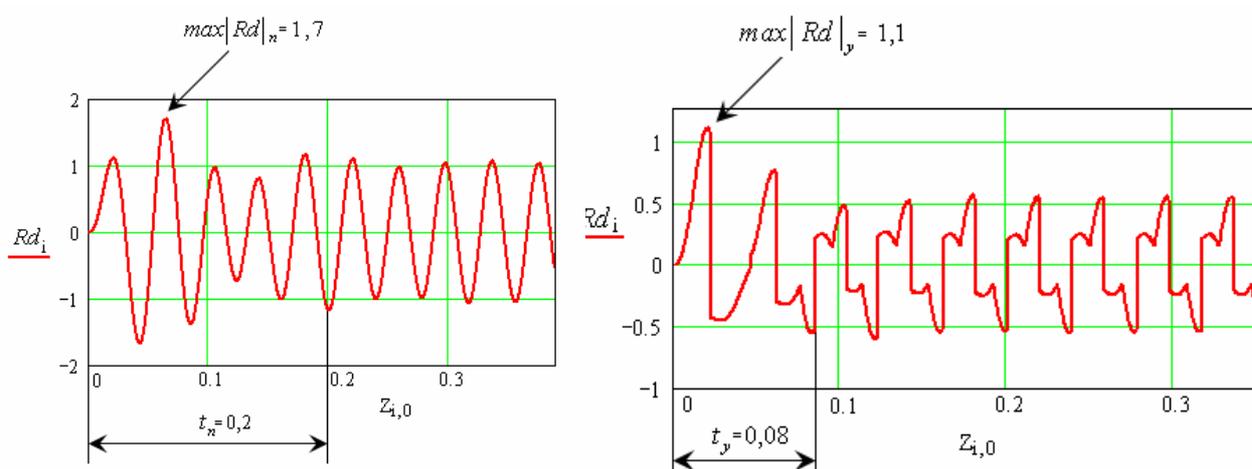


Рисунок 5 – Графики динамических реакций – переходные и установившиеся режимы
 $\eta = 1,4$; $\varepsilon d = 0,1$; $\lambda = 1,4$

Из приведенных в таблице 2 данных следует, что виброизолятор с демпфером прерывистого действия повышает качество переходных процессов. Наблюдается существенное уменьшение «пиковых» значений динамических реакций и длительности переходных процессов.

В области низких частот, где $0,8 \leq \eta \leq 1,2$, и высоких частот, где $1,4 \leq \eta \leq 2$, «пиковые» значения динамических реакций уменьшаются в среднем в 1,7 раз и в 1,1 раза соответственно.

Что касается длительности переходных процессов, то вне зависимости от частоты, имеем $t_y < t_n$. Причем временной интервал в среднем уменьшается в 1,87 раз.

В качестве иллюстрации переходных процессов на рисунке 5 приведены характерные графики динамических реакций, которые подтверждают сделанный ранее вывод об эффективности использования виброизолятора с демпфером прерывистого действия по сравнению с аналогом пассивного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомина, О.В. Постановка задачи оптимальной виброизоляции / О.В. Фомина, Е.Б. Белозерова // Материалы II Международной дистанционной научно-технической конференции «Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения». – Орел: Госуниверситет–УНПК, 2011. – с. 147–148.
2. Фомина, О.В. Прерывистое демпфирование в системах виброзащиты: основы теории, приложения / Под общей редакцией Ю.С. Степанова. – М.: Машиностроение–1, 2005. – 256 с.

Фомина Ольга Владимировна

Государственный университет – УНПК, г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
 Тел. 8 (4862) 41-98-72
 E-mail: termeh@ostu.ru

Белозёрова Елизавета Борисовна

Государственный университет – УНПК, г. Орел
 Соискатель кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
 Тел. 8 (4862) 41-98-49
 E-mail: gavrilo_bgu@mail.ru

Чернышев Владимир Иванович

Государственный университет – УНПК, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин»
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29
Тел. 8 (4862) 41-98-49
E-mail: malinin@ostu.ru

Кеглин Борис Григорьевич

Брянский государственный технический университет, г. Брянск
Доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин»
241035, г. Брянск, бул.50-летия Октября, 7
Тел. (4832) 512519
E-mail: keglin@mail.ru

O.V. FOMINOVA, E.B. BELOZEROVA, V.I. CHERNICHEV, B.G. KEGLIN

**THE CONSTRUCTION OF THE WORK OF THE VIBRO-INSULATOR
WITH THE DAMPER OF INTERRUPTED ACTION**

The dynamical properties of the vibro-insulator with the damper of interrupted action is studied. There is shown that the forming of dissipative force as suboptimum balance influence allow to reduce the degree of dynamical reaction and duration of passing processes with the comparison of passive analog.

Keywords: *vibro-insulator; damper of interrupted action; suboptimum balance influence.*

BIBLIOGRAPHY

1. Fominova, O.V. Postanovka zadachi optimalnoy vibroizolyizii / O.V. Fominova, E.B. Belozerova // Materiali II Mezdunarodnoi distanzionnoi nauchno-texnichskoi konferenzii «Aktualnie problemi dinamiki i prochnosti materialov i konstrukzii: modeli, metodi, resheniy». – Орел: Gosuniversitet–UNPK, 2011. – s. 147–148.
2. Fominova, O.V. Prerivistoe dempfirovanie v sistemax vibrozaziti: osnovi teorii, prilozhenii / Pod obzei redakciei U.S. Stepanova. – M.: Machinostroenie–1, 2005. – 256 s.

Fominova Olga Vladimirovna

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Candidate of technical sciences, associate professor, chair “Theoretical and applied mechanics”
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-41-98-72
E-mail: termeh@ostu.ru

Belozyorova Elizaveta Borisovna

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Degree-seeking student, chair “Theoretical and applied mechanics”
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-41-98-49
E-mail: gavriloVA_bgu@mail.ru

Chernyshov Vladimir Ivanovich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Doctor of technical sciences, professor, chair “Dynamics and strength machine”
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-41-98-49
E-mail: malinin@ostu.ru

Keglin Boris Grigorievich

Bryansk state technical University, str. Bryansk
Doctor of technical Sciences, Professor of the Department "Dynamics and strength of machines"
241035, str. Bryansk, 50-letiya Oktyabrya Blvd., 7
Tel. (4832) 512519
E-mail: keglin@mail.ru

УДК 621.924

Г.В. БАРСУКОВ, А.А. АЛЕКСАНДРОВ, В.С. ШОРКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛА ЗЕРЕН ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, УЧАСТВУЮЩИХ В РЕЗАНИИ НА ЕДИНИЧНОЙ ПЛОЩАДКЕ КОНТАКТА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ С ЗАГОТОВКОЙ

Авторами статьи предлагается математическая модель для расчета количества абразивных зерен, участвующих в резании для случая применения при гидроабразивном резании двухкомпонентной абразивной технологической смеси.

Ключевые слова: абразив, гидроабразивное резание, смесь абразивов

Одним из путей повышения эффективности гидроабразивного резания является подбор смеси абразива, позволяющий снизить себестоимость процесса с достижением требуемых параметров качества.

Обычно в качестве абразива используется гранат, оливин, корунд. Известно, что эффективность резания гидроабразивной струей увеличивается с ростом твердости абразивных частиц по отношению к твердости разрезаемого материала.

Использование сверхтвёрдого абразива типа электрокорунда и карбида кремния оказалось непрактичным, потому что они оказывают влияние на быстрый износ сопла. Даже, когда сопло изготовлено из сверхтвёрдого материала на основе соединений карбида, срок ее службы составляет несколько минут.

Исходя из этого, используют другой сверхтвёрдый абразив - гранат, позволяющий резать металлы и многие другие, твердые или хрупкие материалы. Гранат имеет приемлемую твердость для резания большинства металлов и причиняет меньший износ соплу по сравнению с электрокорундом и карбидом кремния. Однако, использование граната для гидроабразивного резания связано с финансовыми затратами, потому что это - относительно редкий минерал, а процесс его очистки дорогостоящий.

Поэтому возникает потребность в разработке для гидроабразивного резания новых вариантов абразивных технологических сред, сопоставимых гранату, но менее дорогостоящих, что позволит расширить область применения данного процесса.

Целью работы является подбор смеси абразивных материалов для гидроабразивной резания, которая способна эффективно обрабатывать материал, с более низкими экономическими затратами, что позволяет расширить область применения обработки гидроабразивной струей.

Другой целью исследования, является обеспечение гидроабразивного резания смеси, специально разработанными для конкретных технологических условий, чтобы эффективно обрабатывать заданный материал заготовки.

Кроме того, целью данной работы является использование в гидроабразивной смеси достаточно мягких компонентов, которые позволят использовать сопло изготовленного из менее дорогих материалов.

Формируем абразивную смесь, имеющую два компонента. Абразивные материалы данной смеси включают первый компонент - частицы со средней твердостью 5 – 6 по шкале Мооса (таблица 1), второй дополнительный компонент - частицы, имеющие твердость 9 по шкале Мооса.

Первый компонент абразивной смеси обладает средней плотностью и твердостью (пироксены, оливины), т.к. он по сравнению с гранатом недорог.

Первый компонент предназначен для резания материалов из металла, т.к. он способствует улучшению процесса резания благодаря острым углам частиц, влекущих удаление большего количества материала. Благодаря кристаллической структуре частицы меньше истираются и ломаются, что обеспечивает более гладкую поверхность резания материала.

Таблица 1 – Свойства абразивных материалов

Материал	Твердость, По шкале Мооса	Плотность, г/см ³	Микротвёрдость, ГПа	Насыпная способность, г/см ³	Температура устойчивости, °С
Гранат	6,5...7,5	3,5...4,4	13,7...16,7	2,0...2,1	1200...1320
Пироксен	5,0...6,0	3,2...3,6	12,6...16	1,6...1,9	1300...1700
Корунд	9,0	3,90...4,12	17,7...23,5	1,54...1,85	1700...1800

Второй компонент абразивной смеси включает материал, имеющий твердость 9 по шкале Мооса и используется для резания твердых и толстых металлов или керамики. Из-за абразивного износа сопла желательнее использовать минимальное количество второго компонента. Установлено, что использование эффективное количество первого компонента способно снизить нежелательное воздействие второго. Для второго компонента используем природный материал - корунд.

Выбор размера частиц абразивной смеси зависит от давления гидроабразивной струи, в меньшей степени от расхода абразива и типа разрезаемого материала. Так как частицы больших размеров более эффективно удаляют материал и их выбор при резании предпочтителен. Частицы меньшего размера эффективны для полирования поверхности резания во время обработки.

Влияние технологических факторов гидроабразивного резания на производительность можно объяснить изменением числа абразивных зерен двухкомпонентной технологической среды, участвующих в процессе резания. Количество единичных актов контактного взаимодействия абразива с поверхностью детали обусловлено соотношением масс компонентов смеси, расходом абразива в единицу времени через сопло, скоростью истечения струи, диаметром сопла и скоростью его подачи относительно обрабатываемого материала. Так, чем больше давление истечения струи и меньше подача сопла, тем большее число зерен участвует в работе, что, в конечном счете, приводит к уменьшению шероховатости.

Количество актов контактного взаимодействия абразивного зерна с материалом является последовательностью независимых испытаний. Примем, что наступлением элементарного события A является контакт абразивного зерна с материалом. Очевидно, что в последовательных испытаниях интересующее нас событие A может, как наступить, так и не наступить.

Отнесем наступление события A к единице, а не наступление к нулю. Тогда элементарным событием для n абразивных зерен будет последовательность из n нулей и единиц.

Тогда множество всех элементарных событий при n абразивных зернах состоит 2^n элементов.

Введем вероятностную меру на множестве элементарных событий. Вероятность наступления события A , при падении k -го абразивного зерна, равна p , а его не наступление $q = 1 - p$. По схеме Бернулли, при падении абразивных зерен с разными номерами, наступление или не наступление события A независимы.

Откуда, в силу теоремы умножения вероятностей, вероятность того, что событие A наступит при прохождении m определенных абразивных зерен (например, при прохождении зерен с номерами s_1, s_2, \dots, s_m), а при остальных $n - m$ не наступит, равна (рисунок 1):

$$P = p^m q^{n-m} . \tag{1}$$

Эта вероятность не зависит от очередности взаимодействия абразивных частиц с номерами s_1, s_2, \dots, s_m .

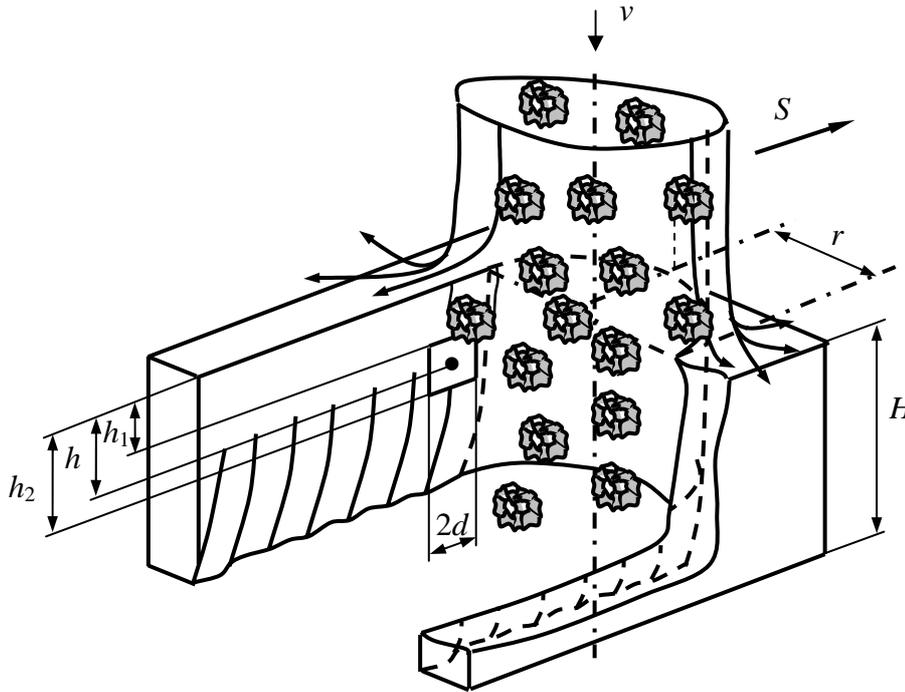


Рисунок 1 – Схема к определению числа абразивных зерен, участвующих в процессе формирования поверхности детали

Определим вероятность того, что из общего числа абразивных зерен в струе n , в формировании состояния поверхностного слоя детали участвуют m зерен ($0 \leq m \leq n$),

По теореме сложения искомая вероятность равна сумме вычисленных вероятностей по зависимости (1) для всех возможных m контактов абразива с поверхностью материала и $n - m$ не появления этого события среди общего количества абразива в струе n .

Число таких контактов можно определить из теории сочетаний:

$$\tilde{N}_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (2)$$

Откуда с учетом (1), искомая вероятность равна:

$$D_n(m) = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} \quad (3)$$

Вероятность участия в формировании состояния поверхности k -го абразивного зерна p определим как геометрическую вероятность попадания абразива на выделенную на поверхности реза площадку ($h_1 - h_2$) (рис. 1).

Для определения искомой вероятности предположим следующее.

Распределение вероятностей расположения абразивного зерна на уровне h , где h – непрерывная случайная величина, $0 \leq h \leq H$, H – толщина обрабатываемого материала, подчиняется экспоненциальному закону:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda h} \quad (4)$$

где λ – постоянная положительная величина.

Выделим на боковой поверхности реза на уровне h , квадратную поверхность со сторонами $2d$, заключенную между двумя сечениями на уровне h_1 и h_2 (рис. 1):

$$h_1 = h - d \quad (5)$$

$$h_2 = h + d \quad (6)$$

где d – диаметр зерна.

Вероятность попадания абразивного зерна на периферии струи между сечениями h_1 и h_2 :

$$P_{2d} = P(h_1 < h < h_2) = e^{-\lambda h_1} - e^{-\lambda h_2} = 2e^{-\lambda h} \frac{e^{\lambda d} - e^{-\lambda d}}{2} \cong 2(\lambda d - \lambda^2 h d) \quad (7)$$

откуда получим уравнение для определения параметра λ :

$$\lambda^2 - \lambda/h + P_{2d}/2hd = 0. \quad (8)$$

Из этого уравнения получим:

$$\lambda = \frac{1}{2h} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2hP_{2d}}{d}} \right), \quad (9)$$

откуда будем иметь условие ограничения для величины вероятности P_{2d} :

$$P_{2d} < \frac{d}{2h}. \quad (10)$$

Для вычисления параметра λ по формуле (9), следует определить вероятность P_{2d} , исходя из того, что абразивные зерна, расположенные в периферии гидроабразивной струи, имеют неправильную форму. Вследствие этого, в качестве d следует иметь в виду его среднее значение \bar{d} , для группы периферийных абразивных зерен в течение промежутка времени Δt (при $\Delta t \rightarrow 0$).

Тогда, на уровне $h = \frac{H}{2}$ выражение (9) будет иметь вид:

$$\lambda = \frac{1}{I} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{HP_{2\bar{d}}}{\bar{d}}} \right), \quad (11)$$

где H – толщина обрабатываемого материала;

$P_{2\bar{d}}$ – вероятность попадания абразивного зерна, усредненного по форме, на периферию струи между сечениями h_1 и h_2 .

Выражение (11) учитывает размеры абразивной частицы, а именно вероятность ее попадания на поверхность шириной $2d$, хотя в большинстве вероятных моделей абразивная частица трактуется как материальная точка.

Зависимостью (2) удобно пользоваться при небольшой концентрации абразива в струе или малом времени взаимодействия струи с материалом. При больших значениях n и малых m вычисление числа абразивных зерен по формуле (13), формирующих параметры состояния поверхностного слоя при гидроабразивном резании $D_n(m)$, превращается в технически сложную задачу.

Поэтому применим локальную предельную теорему Маувра-Лапласа. Если из общего числа абразива n вероятность попадания абразивной частицы на поверхность контакта периферии струи с материалом постоянна и равна p , то вероятность $D_n(m)$ того, что в формировании поверхностного слоя детали после гидроабразивного резания участвует m абразивных зерен, удовлетворяет следующему соотношению:

$$\sqrt{npq} P_n(m) : \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2} \longrightarrow 1 \quad (14)$$

равномерно для всех m , для которых:

$$x = \frac{m - np}{\sqrt{npq}}, \quad (15) \text{находится в каком-либо конечном}$$

интервале.

Тогда для нашего примера необходимо вначале вычислить значение по формуле (15), затем определить табличное значение $\varphi(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\delta^2}$ и вероятность участия абразивного зерна в формировании состояния поверхности при гидроабразивном резании.

Установлено, что количество абразивных частиц, воздействующих на микрообъемы материала, уменьшается в радиальном к подаче направлении и определяется несколько концентрацией абразива в струе, сколько скоростью подачи струи, что не учитывается известными зависимостями [1].

Объем снимаемой стружки единичным абразивным зерном определим по формуле, полученной в работе [2] (рис. 2):

$$U = \frac{d^2}{4} \int_L^0 \left(\frac{\pi}{180} \arcsin \frac{2\sqrt{d(\eta - H_0) - (\eta - H_0)^2}}{d} - \frac{2\sqrt{d(\eta - H_0) - (\eta - H_0)^2}}{d} \right) \times \sqrt{1 - \left(\frac{2\sqrt{d(\eta - H_0) - (\eta - H_0)^2}}{d} \right)^2} dx. \quad (16)$$

где d – диаметр зерна;

η – проекция осевой составляющей скорости, $\eta = V \sin \alpha$; $H_0 = \eta - \Delta$;

L – длина царапины от выступов микрорельефа зерна;

$\Delta = f(V, d, \alpha, \beta, \mu)$ – глубина врезания зерна в поверхность [2].

Объем разрушенного материала в единицу времени можно выразить как

$$V = btS\dot{I}, \quad (17)$$

где S – скорость подачи сопла;

b – ширина реза;

t – время воздействия на участок материала.

Откуда число абразивных зерен, обеспечивающих резание материала:

$$m = \frac{V}{U}. \quad (18)$$

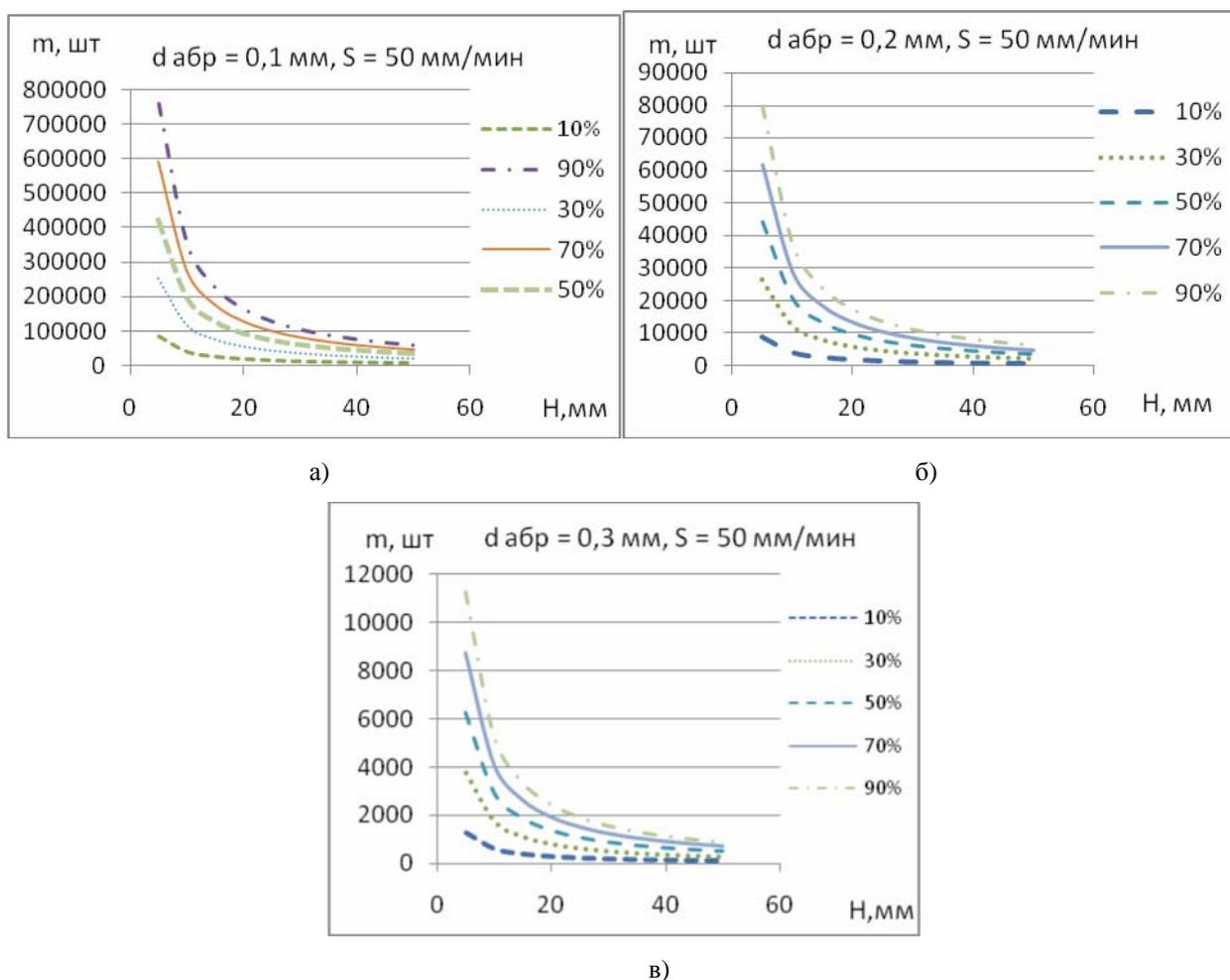


Рисунок 2 – Количество периферийных абразивных зёрен на площадке $2d \times 2d$, мм
 а) диаметр абразива 0,1 мм, б) диаметр абразива 0,2 мм, в) диаметр абразива 0,3 мм

За время резания t в направлении подачи сопла S число абразивных частиц, воздействующих на материал в периферийной области реза, будет меньше, чем действующих за то же время в центре зоны реза, т.е. количество воздействий, уменьшается в радиальном к подаче направлении.

На рисунке 2 приведены зависимости количества зерен двухкомпонентной технологической среды, участвующих в резании на единичной площадке контакта гидроабразивной струи с заготовкой, расположенной на глубине h от технологических параметров резания и содержания масс компонентов.

Таким образом, анализируя полученные зависимости, видно, что для обеспечения производительности гидроабразивного резания при использовании в двухкомпонентной технологической среде основной компонент со средней твердостью необходимо использовать в качестве второго компонента абразивные материалы со сверхвысокой твердостью, способные унести большой объем обрабатываемого материала.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков, Г.В. Управление качеством и дискретное регулирование технологической системы гидрорезания [Текст] / Г.В. Барсуков // Справочник. Инженерный журнал. - 2004. - № 7. - С. 53 - 57.
2. Барсуков, Г.В. Определение производительности гидроабразивного резания с учетом характеристик абразивного зерна [Текст] / Г.В. Барсуков, А.В. Михеев // Справочник. Инженерный журнал. - 2008. - № 1. С. 9 - 14.

Барсуков Геннадий Валерьевич

Госуниверситет - УНПК, г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры ТМиКТИ
Тел. (4862) 419818
E-mail: awj@list.ru

Александров Артем Александрович

Госуниверситет - УНПК, г. Орел
Аспирант кафедры ТМиКТИ
Тел. (4862) 419818
E-mail: upk@ostu.ru

Шоркин Владимир Сергеевич

Госуниверситет - УНПК, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика»
Тел. (4862) 419844
E-mail: vsorkin@yandex.ru

G.V. BARSUKOV, A.A. ALEKSANDROV, V.S.SHORKIN

SIMULATION OF GRAIN NUMBER OF TWO-COMPONENT ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY INVOLVED IN CUTTING PER UNIT AREA CONTACT WATERJET JETS WITH HARVESTING

The authors proposed a mathematical model to calculate the number of abrasive grains participating in the case of cutting with a two-abrasive cutting hydroabrasive technological mix.

Keywords: *abrasive, abrasive waterjet, a mixture of abrasives*

BIBLIOGRAPHY

1. Barsukov, G.V. Upravlenie kachestvom i diskretnoe regulirovanie tehnologicheskoy sistemy gidrorezaniya [Tekst] / G.V. Barsukov // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. - 2004. - № 7. - S. 53 - 57.

2. Barsukov, G.V. Opredelenie proizvoditel'nosti gidroabrazivnogo rezanija s uchetom karakteristik abrazivnogo zerna [Tekst] / G.V. Barsukov, A.V. Miheev // Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. - 2008. - № 1. S. 9 – 14.

Barsukov Gennady Valerievich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel

Doctor of technical sciences, professor, chair “Manufacturing engineering and design and technological informatics”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-98-18

E-mail: awj@list.ru

Aleksandrov Artem Aleksandrovich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel

Post-graduate student, chair “Manufacturing engineering and design and technological informatics”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-98-18

E-mail: upk@ostu.ru

Shorkin Vladimir Sergeevich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel

Doctor of technical sciences, professor, head of chair “Physics”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-98-44

E-mail: vsorkin@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ ПЛАСТМАСС В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Рассмотрены математическая модель и метод расчета процесса высокочастотной сварки пластмасс в электродной системе с неоднородным распределением электрического поля. Метод предусматривает определение мгновенной удельной мощности внутренних источников тепла через емкость и напряжение на рабочем конденсаторе, не полностью заполненном свариваемым материалом. Приведён пример расчета температурного поля в материале в процессе высокочастотной сварки изделия сложной формы.

Ключевые слова: математическая модель, высокочастотная сварка, пластмассы, электродная система, неоднородное электрическое поле, метод расчёта режима.

Высокочастотная (ВЧ) сварка пластмасс позволяет получить прочные сварные соединения, близкие по прочности к целому материалу. Основное преимущество метода заключается в быстром и локальном (в зоне свариваемого шва) прогреве соединяемых поверхностей без проплавления всего объема материала. Однако, для достижения такого результата требуется точное задание режимных параметров процесса – напряженности электрического поля или напряжения на рабочем конденсаторе и временной продолжительности сварки. Решение этой задачи осложнено отсутствием технических средств контроля температуры в области сварного соединения.

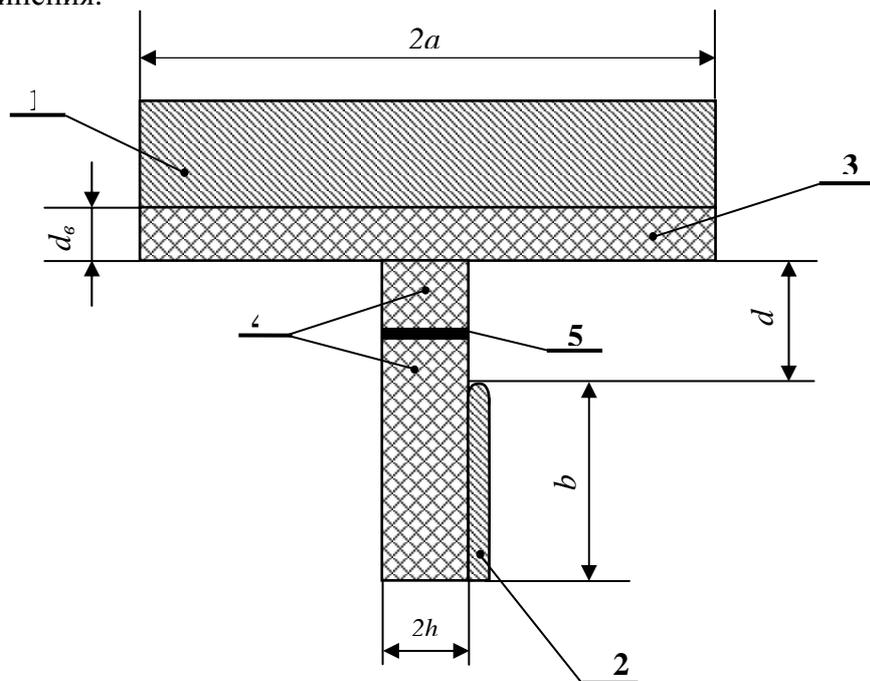


Рисунок 1 – Высокочастотная сварка пластмасс в рабочем конденсаторе с неоднородным распределением электрического поля

1 – плоский электрод; 2 – электрод-ребро; 3 – изоляционный вкладыш (d_v – толщина вкладыша); 4 – свариваемые детали ($2h$ – толщина детали); 5 – шов

Экспериментальные методы определения режима ВЧ-сварки хотя весьма трудоемки, но недостаточно точны. Методы расчета режимных параметров процесса разработаны для случая соединения деталей простой формы, сварка которых осуществляется в электрическом поле электродов плоскопараллельного рабочего конденсатора [1, 2]. Между тем в производственной практике все более широкое распространение находят изделия сложной формы, для сварки которых требуется применение электродных систем с неоднородным распределением электрического поля. В настоящей работе рассматривается задача расчета режима сварки пластмасс в неоднородном электрическом поле (на примере электродной системы вида «тонкое ребро против изолированной плоскости») – рисунок 1.

Представим сварочную технологическую оснастку в виде многослойной пластины «металл (высокопотенциальный электрод) – изолятор – свариваемый термопласт – металл

(заземленный электрод)» и будем решать несимметричную тепловую задачу о нагреве термопласта в такой конструкции за счет его собственных диэлектрических потерь.

Распределение температуры в каждом слое описывается уравнением нестационарной теплопроводности с внутренними источниками тепла:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_{pi}(T_i)} \cdot \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{p_i(T_i)}{c_{pi}(T_i) \rho_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 4) \quad (1)$$

с начальным условием

$$T = T_n \quad \text{при} \quad \tau = 0 \quad 0 \leq x \leq x_4. \quad (2)$$

Здесь T , T_n – соответственно локальная и начальная температура; x – текущая координата; x_i – координата границы слоя; λ , c_p , ρ – соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала слоя; i – номер слоя: 1 – металл, 2 – изолятор, 3 – термопласт, 4 – металл.

На внешних границах электродов теплообмен с окружающей средой пренебрежимо мал:

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_4}{\partial x} \right|_{x=x_4} = 0. \quad (3)$$

На границах слоев имеет место равенство температур и тепловых потоков (граничные условия четвертого рода):

$$T_i = T_{i+1} \quad \text{при} \quad x = x_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \quad \text{при} \quad x = x_i \quad (i = 1, 2, 3). \quad (5)$$

Удельная мощность p_i отлична от нуля только для третьего слоя (свариваемого термопласта):

$$p_1 = p_2 = p_4 = 0; \quad (6)$$

$$p_3(x) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'_3(T) \operatorname{tg} \delta_3(T) E^2(x), \quad (x_2 \leq x \leq x_3), \quad (7)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха);

$\varepsilon'_3 = \varepsilon'$, $\operatorname{tg} \delta_3 = \operatorname{tg} \delta$ – соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь термопласта;

E – локальная напряженность электрического поля в термопласте;

f – частота ЭМ-поля.

Для решения задачи (1) – (7) требуется знать локальную напряженность электрического поля в термопласте, расчет распределения которой в заданной электродной системе (рисунок 1) представляет большие трудности. Поэтому воспользуемся следующим приближенным подходом.

При условии полного заполнения рабочего конденсатора мощность, выделяющуюся в термопласте за счет его собственных диэлектрических потерь, можно рассчитать по формуле:

$$P_3 = 2\pi f C_{p1} \operatorname{tg} \delta U_p^2, \quad (8)$$

а удельная мощность соответственно равна:

$$p_3 = \frac{P_3}{V_T}, \quad (9)$$

где C_{p1} – емкость рабочего конденсатора с материалом;

U_p – напряжение на рабочем конденсаторе;

V_T – объем термопласта в рабочем конденсаторе C_{p1} .

В рассматриваемом случае рабочий конденсатор заполнен материалом не полностью. Очевидно, что его емкость складывается из двух составляющих: емкости части рабочего конденсатора, полностью заполненной материалом C'_{p1} , и емкости части пустого рабочего конденсатора, которая остается свободной от материала в процессе сварки C''_{p10} . Соответственно эквивалентная электрическая схема сварочной технологической оснастки (рис. 2) представляет собой цепочку из трех конденсаторов – конденсатора C_B , образованного диэлектрическим вкладышем, и последовательно подключенной к нему цепи из двух параллельно соединенных конденсаторов C'_{p1} и C''_{p10} .

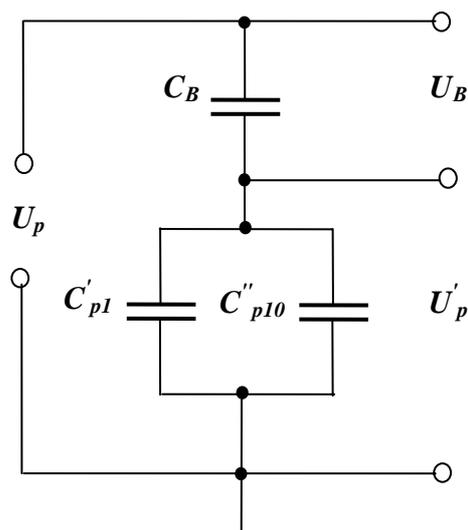


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема рабочего конденсатора с неоднородным распределением электрического поля

C_B – емкость диэлектрического вкладыша; C_{p1} – емкость части рабочего конденсатора, полностью заполненной материалом; C_{p10} – емкость части пустого рабочего конденсатора, свободной от материала в процессе сварки

Для схемы на рисунке 2 справедливы следующие соотношения:

$$U_p = U_B + U'_p ; \quad C_{p1} = C'_{p1} + C''_{p10} ;$$

$$U'_p C_{p1} = U_B C_B \quad \text{при} \quad \text{tg} \delta \leq 0,3 ,$$

откуда

$$U'_p = \frac{U_p C_B}{C_{p1} + C_B} . \tag{10}$$

Емкость пустого рабочего конденсатора (без материала) в системе электродов «тонкое ребро против изолированной плоскости» может быть рассчитана по известной формуле [3]:

$$C_{p10} = \begin{cases} \varepsilon_0 \frac{4}{\pi} \ln\left(\frac{4}{m}\right) l , & \text{если } 0 < m < 0,3 , \\ 2\varepsilon_0 (2,035 - 1,45m) l , & \text{если } 0,3 \leq m \leq 0,9 , \end{cases} \tag{11}$$

Здесь

$$m = \frac{\frac{a}{d} + \sqrt{\left[1 + \left(\frac{b}{d}\right)\right]^2 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}}{\left(1 + \frac{b}{d}\right) \left[\frac{a}{d} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{d}\right)^2}\right]} ,$$

где $2a$ – ширина плоского электрода;

b – высота электрода – ребра;

d – межэлектродное расстояние;

l – длина сварного шва.

Уточнить расчет по формуле (11) можно путем непосредственных измерений емкости, например, с помощью универсального измерительного моста Е7-4.

Общая емкость рабочего конденсатора C_{p1} , не полностью заполненного материалом (с деталями свариваемого изделия, установленными с технологическую оснастку), изменяется в цикле сварки, так как зависит от диэлектрической проницаемости ε' термопласта, являющейся функцией от температуры. Поэтому сначала находится (также путем измерений) значение емкости C_{p1} при фиксированной температуре $T = 20^\circ\text{C}$.

Выведем выражение для емкости C_{p1} в цикле сварки.

Обозначим емкость части пустого рабочего конденсатора, которая в процессе сварки будет занята материалом, как C'_{p10} . Тогда, очевидно, емкость части пустого рабочего конденсатора, которая остается незанятой материалом в процессе сварки, будет равна

$$C''_{p10} = C_{p10} - C'_{p10}.$$

Рассмотрим далее разность емкостей:

$$C_{p1} - C_{p10} = (C'_{p1} + C''_{p10}) - (C'_{p10} + C''_{p10}) = \varepsilon' C'_{p10} - C'_{p10} = (\varepsilon' - 1) C'_{p10}.$$

Из последнего равенства получается выражение для емкости C'_{p10} :

$$C'_{p10} = \frac{C_{p1} - C_{p10}}{\varepsilon' - 1}.$$

Выражение для общей емкости рабочего конденсатора C_{p1} как функции от температуры имеет вид:

$$C_{p1}(T_{cp}) = C'_{p1}(T_{cp}) + C''_{p10} = \varepsilon'(T_{cp}) C'_{p10} + C''_{p10}, \quad (12)$$

где T_{cp} – средняя температура термопласта.

Соотношение (12) дает возможность вычислять по формуле (10) мгновенное напряжение U'_p и, соответственно, по формуле (9) – мгновенную удельную мощность в термопласте в цикле сварки в заданной конструкции электродной системы. Задачей расчета является определение временной продолжительности сварки $\tau_{св}$ – времени достижения в сварном шве температуры текучести термопласта ($T_3 | x = x_s = T_{тек}$; здесь $T_{тек}$ – температура текучести, x_s – координата сварного шва) при известных входных параметрах процесса – напряжении U_p и температуре T_n .

Задача (1) – (6), (9), (10), (12) решалась численно методом конечных разностей [4].

На рисунке 3 приведена полученная в результате расчета по формуле (17) зависимость $C_{p1}(T_{cp})$ для случая сварки деталей из полиамида – 610. На рисунке 4 представлено рассчитанное по математической модели (1) – (6), (9), (10), (12) распределение температуры в термопласте по координате x в процессе ВЧ-сварки деталей в технологической оснастке с электродной системой заданного вида. Мощность P_3 вычислялась по формуле (8), в которую вместо C_{p1} подставляли найденное в соответствии с рассмотренной методикой значение C'_{p1} .

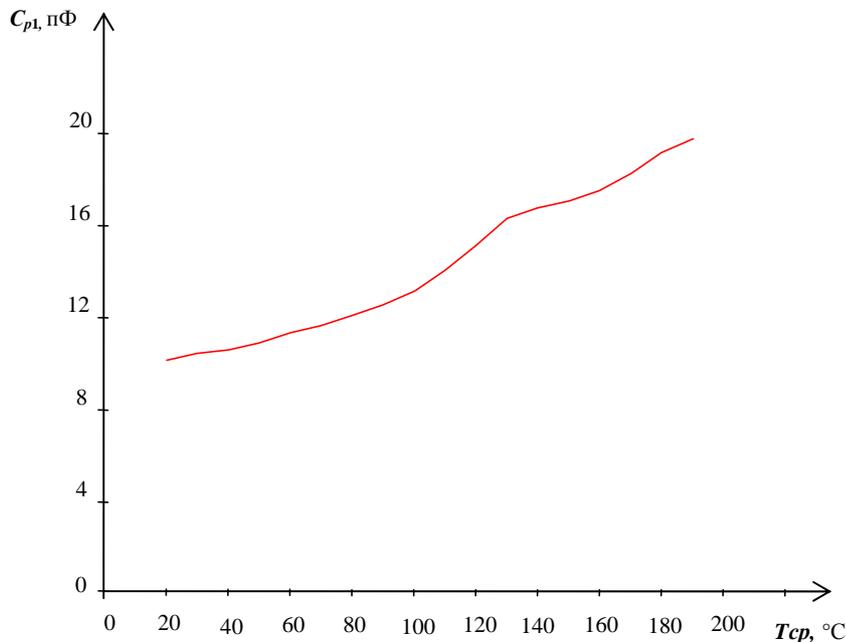


Рисунок 3 – Зависимость общей емкости рабочего конденсатора от температуры в процессе ВЧ-сварки деталей из полиамида – 610 в технологической оснастке с рабочим конденсатором вида «тонкое ребро против изолированной плоскости»
 $2a = 10 \text{ мм}; b = 6 \text{ мм}; d = 4 \text{ мм}; l = 293 \text{ мм}; 2h = 2 \text{ мм}; d_g = 2,5 \text{ мм}; f = 27,12 \text{ МГц};$
 $U_p = 1350 \text{ В}; c_{св} = 10,3 \text{ с}; p = 10,9 \quad 59,3 \text{ МВт/м}^3$

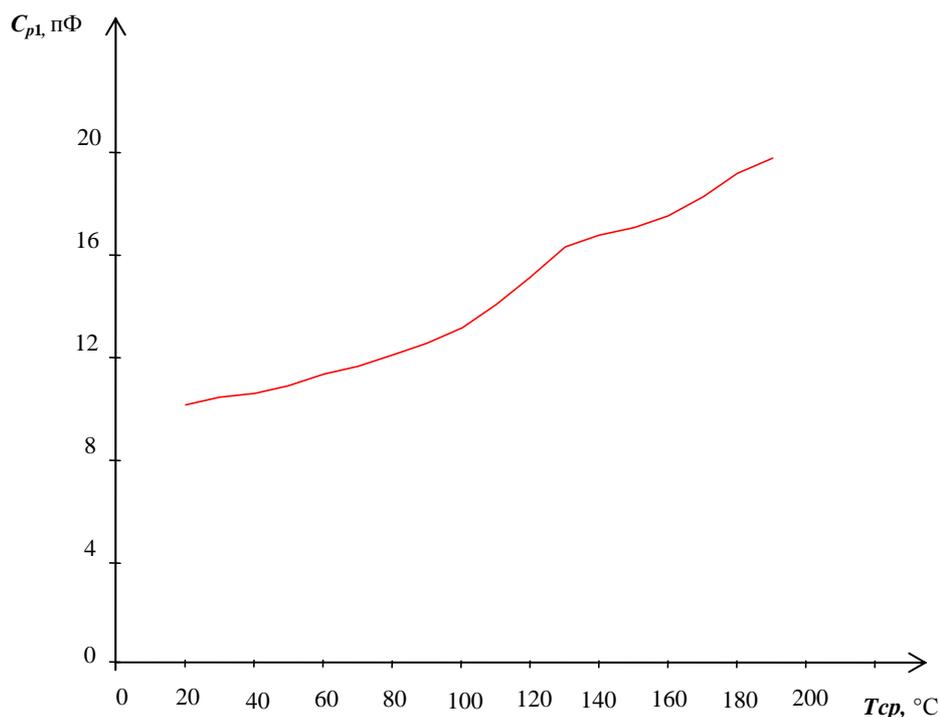


Рисунок 4 – Распределение температуры в термопласте в процессе ВЧ-сварки деталей из полиамида – 610 в технологической оснастке с рабочим конденсатором вида «тонкое ребро против изолированной плоскости»

(материал электродов – латунь, материал изоляционного вкладыша – микалекс):

$T_n = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_{тек} = 225 \text{ } ^\circ\text{C}$; $2a = 10 \text{ мм}$; $b = 6 \text{ мм}$; $d = 4 \text{ мм}$; $l = 293 \text{ мм}$;

$2h = 2 \text{ мм}$; $d_г = 2,5 \text{ мм}$; $f = 27,12 \text{ МГц}$; $U_p = 1350 \text{ В}$; $c_св = 10,3 \text{ с}$; $p = 10,9 \text{ } 59,3 \text{ МВт/м}^3$

Экспериментальная проверка показала, что режимы сварки, заданные на основе рассмотренного метода расчета, обеспечивают высокое качество продукции – герметичность готового изделия, механическую прочность соединения, близкую к целому материалу.

Рассмотренный метод позволяет рассчитывать режимы высокочастотной сварки пластмасс в электродной системе произвольной конструкции, в том числе с неоднородным распределением электрического поля. Особенностью метода является вычисление мгновенной удельной мощности, выделяющейся в термопласте за счет диэлектрических потерь, через напряжение и емкость на рабочем конденсаторе с учетом зависимости последней от степени его заполнения свариваемым материалом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорова, И.Г. Высокочастотная сварка пластмасс / И.Г. Федорова, Ф.В. Безменов. – Л.: Машиностроение, 1990. – 80 с.
2. Волков, С.С. Сварка и склеивание полимерных материалов / С.С. Волков. – М.: Химия, 2001. – 376 с.
3. Иоссель, Ю.Я. Расчет электрической емкости / Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 288 с.
4. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

Марков Андрей Викторович

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
 доктор технических наук, доцент, профессор кафедры процессов и аппаратов
 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26,
 телефон: +7 9211808268
 E-mail: markov-av@yandex.ru

Юленец Юрий Павлович

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник
190013, Санкт-Петербург, Московский пр., 26,
телефоны: (812)316-47-14 (раб.), (812)701-94-23 (дом.), +7 9111427172 (моб.).
E-mail: prapp@lti-gti.ru

A.V. MARKOV, Yu.P. YULENETS

**MATHEMATICAL MODEL OF WELDING PROCESS OF PLASTICS IN
NON HOMOGENEOUS HIGH FREQUENCY ELECTRIC FIELD**

A mathematical model and rating for high-frequency welding of plastic parts in engineering facilities including working condenser with non homogeneous electric field distribution is suggested. A method proposed provides the calculation of instant specific power via the capacitance and voltage of working condenser with regard to the latter is filled in with material incompletely. Welding time determination computing procedure is offered; it includes thermoplastic temperature field distribution in engineering facilities of assigned value.

Keywords: *mathematical model, high-frequency welding, plastics, engineering facilities, electrode system, non homogeneous electric field distribution, welding time computing procedure.*

BIBLIOGRAPHY

1. Fedorova, I.G. Vysokochastotnaja svarka plastmass / I.G. Fedorova, F.V. Bezmenov. – L.: Mashinostroenie, 1990. – 80 s.
2. Volkov, S.S. Svarka i skleivanie polimernyh materialov / S.S. Volkov. – M.: Himija, 2001. – 376 s.
3. Iossel', Ju.Ja. Raschet jelektricheskoy emkosti / Ju.Ja. Iossel', Je.S. Kochanov, M.G. Strunskij. – L.: Jenergoatomizdat, 1981. – 288 s.
4. Samarskij, A.A. Teorija raznostnyh shem / A.A. Samarskij. – M.: Nauka, 1977. – 656 s.

Markov Andrey Viktorovich

Saint-Petersburg state technological institute (technical university)
Doctor of technical sciences, associate professor, professor, chair “Processes and devices”
190013, Saint-Petersburg, Moskovsky prospect, 26
Tel. 8-921-180-82-68
E-mail: markov-av@yandex.ru

Yulinec Yury Pavlovich

Saint-Petersburg state technological institute (technical university)
Doctor of technical sciences, professor, leading research worker
190013, Saint-Petersburg, Moskovsky prospect, 26
Tel. 812-316-47-14
E-mail: prapp@lti-gti.ru

УДК: 51-7; 628.1

Г.К. ИВАХНЮК, Е.И. ДАВЫДОВ, Б.Ф. ЛЯМАЕВ

УСТРОЙСТВО И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА СО СПИРАЛЬНО-НАВИТОЙ НАСАДКОЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

В статье рассмотрена новая конструкция вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой. Разработана математическая модель осаждения взвешенных веществ в отстойнике. Изложена методика его расчета.

Ключевые слова: отстойник, очистка сточных вод, математическая модель.

В практике водоподготовки природных и очистки сточных вод получили распространение вертикальные отстойники. Преимущество этих отстойников в простоте устройства и эксплуатации. Недостатком их является большая глубина, что значительно удорожает их строительную стоимость, и низкий эффект осветления. Обычно он не превышает 30%, в то время как в горизонтальных и радиальных отстойниках эффективность очистки достигает 50-60%. [1,2] В связи с этим особую значимость приобретают задачи интенсификации работы первичных отстойников и сокращения занимаемых ими площадей. Поэтому научные исследования были направлены на разработку новой конструкции вертикального отстойника и методики его расчета.

Создана конструкция и устройство вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой, новизна которого подтверждена патентом [3].

Данный отстойник представляет собой резервуар с днищем в виде усеченного конуса и спирально-навитой насадкой, установленной в этом резервуаре на рисунке 1 представлена схема.

Очищаемая вода подается по центральной трубе, проходит через щелевое отверстие и далее поступает в канал спирально-навитой насадки. Канал насадки является устройством, увеличивающим путь движения очищаемой воды, следовательно, увеличивается время отстоя обрабатываемой жидкости в отстойнике. Насадка так же служит для увеличения площади соприкосновения очищаемой жидкости с ее стенкой. Необходимо отметить, что в данном отстойнике, как и в других типах отстойников, основной движущей силой процесса осветления является сила тяжести, под действием которой происходит осаждение взвеси. Выпавшая взвесь на стенке насадки, либо в канале поступает в нижнюю часть отстойника, откуда периодически удаляется, а очищенная вода отводится из верхней части отстойника.

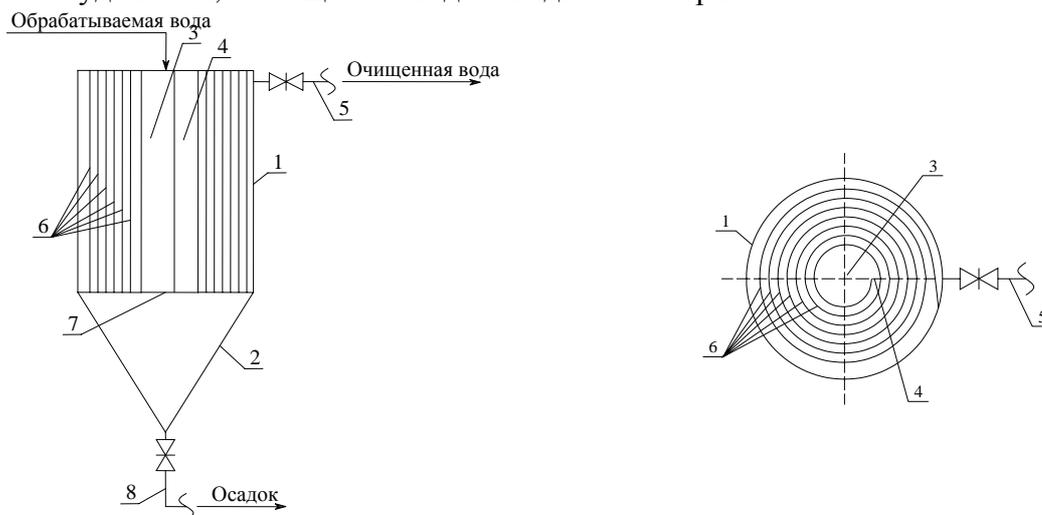


Рисунок 1 – Схема вертикального отстойника со спирально-навитой насадкой

1-вертикальный цилиндрический корпус; 2-конусное днище; 3-центральная труба;
4-щелевое отверстие; 5-трубопровод очищенной воды; 6-спирально-навитая насадка;
7-заглушка; 8- трубопровод для удаления осадка

Методика расчета данного отстойника заключается в определении его конструктивных размеров. При расчете данного отстойника нами разработана математическая модель, которая описывает процесс осаждения взвеси в отстойнике со спирально-навитой насадкой. С целью создания такой модели рассмотрим канал спирально-навитой насадки отстойника на рисунке 2.

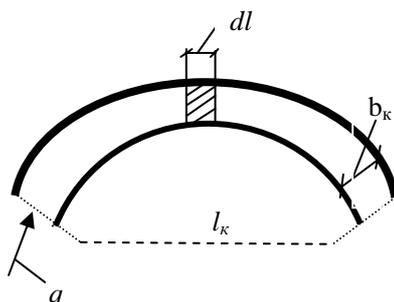


Рисунок 2 – Канал спирально-навитой насадки отстойника

На произвольно выбранном участке по длине канала l_k выделим элементарный участок dl .

Запишем уравнение для изменения массового расхода взвеси, в элементарном участке

$$dG = Ub_k(C - C_{np})dl \quad (1)$$

где G – массовый расход взвеси;

U – коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность частиц);

b_k – ширина канала спирально-навитой насадки отстойника;

C – концентрация взвеси в элементарном объеме;

C_{np} – предельная концентрация взвеси (концентрация не оседающих примесей).

Одновременно с уравнением (1) для изменения массового расхода взвеси, поступающей с обрабатываемой водой, является справедливым выражение.

$$dG = -qdC \quad (2)$$

где q – расход обрабатываемой воды.

Зависимости (1) и (2) дают возможность получить дифференциальное уравнение, описывающее процесс осаждения взвеси в данном отстойнике.

$$-qdC = Ub_k(C - C_{np})dl \quad (3)$$

Решение уравнения (3) при граничных условиях $l = 0, C = C_{np}$, позволяет получить зависимость для определения концентрации взвеси на выходе из отстойника (в очищенной воде)

$$C = C_{np} + (C_o - C_{np}) \cdot e^{-\frac{U \cdot b_k \cdot l_k}{q}} \quad (4)$$

Если выразить скорость движения обрабатываемой воды V в канале спирально-навитой насадки отстойника формулой

$$V = \frac{q}{b_k \cdot H_k} \quad (5)$$

где H_k – высота канала спирально-навитой насадки, то получим.

$$C = C_{np} + (C_o - C_{np})e^{-\frac{U \cdot l_k}{H_k \cdot V}} \quad (6)$$

Результаты исследований кинетики осаждения принято представлять в виде зависимости эффекта осветления \mathcal{E} от изменения концентрации. Эффект осветления определяется по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{C_o - C}{C_o} \quad (7)$$

С учетом этого формулы (4 и б) преобразуем к виду:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left(1 - e^{-\frac{U \cdot l_k \cdot b_k}{q}} \right) \quad (8)$$

или

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left(1 - e^{-\frac{U \cdot l_k}{H \cdot V}} \right) \quad (9)$$

где \mathcal{E}_{np} – предельный эффект осветления определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{np} = \frac{C_o - C_{np}}{C_o}$$

При выводе соотношений (4), (6) и (8 - 9) никаких ограничений на условие осаждения взвеси не накладываются.

Таким образом, полученная зависимость (9) используется для расчета данного отстойника

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{np} \left(1 - e^{-\frac{U \cdot l_k}{H \cdot V}} \right)$$

где \mathcal{E} – требуемый эффект осветления, доли единиц;

U – коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ, м/с, задерживаемых в отстойнике;

l_k – длина канала спирально-навитой насадки, м;

H – высота цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

V – скорость движения очищаемой воды, в канале спирально-навитой насадки отстойника, принимаем согласно [4] как для горизонтального отстойника $(5 - 10) \cdot 10^{-3}$ м/с ;

\mathcal{E}_{np} – предельный эффект осветления, доли единиц.

В зависимости (9) коэффициент скорости осаждения (гидравлическая крупность) взвешенных веществ U , мм/с, определяется по формуле

$$U = \frac{1000 \cdot H}{t_{set} \left(\frac{H}{h_1} \right)^{n_2}} \quad (10)$$

где H – высота цилиндрической части отстойника, в которую вставлена спирально-навитая насадка, м, принимаемая на основе возможных глубин типовых вертикальных отстойников $H = 2,7-3,8$ м;

t_{set} – продолжительность отстаивания, сек., соответствующая заданному эффекту осветления и полученная в лабораторном цилиндре в слое h_1 , определяется по таблице 30 [4];

h_1 – глубина воды при отстаивании в покое (высота слоя воды в лабораторном цилиндре), принимаемая равной 0,5м; n_2 – показатель степени, зависящий от способности взвешенных веществ к агломерации, принимаемый по черт.2 [4].

Далее из формулы (9) определяется длина канала l_k , м, спирально-навитой насадки, которая должна обеспечивать требуемый эффект осветления очищаемой воды в отстойнике

$$l_k = - \frac{\ln \left(1 - \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{np}} \right) \cdot H \cdot V}{U} \quad (11)$$

Необходимая площадь живого сечения F , м², цилиндрической части определяется по выражению

$$F = \frac{\pi(D_{om}^2 - d_{u.m.}^2)}{4} \quad (12)$$

где D_{om} – диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой, м;

$d_{ц.м}$ – диаметр центральной трубы, м, к которой прикреплена спирально-навитая насадка.

Следует заметить, что площадь живого сечения F , $м^2$, цилиндрической части отстойника со спирально-навитой насадкой есть произведение длины канала на ширину канала насадки

$$F = b_k \cdot l_k \quad (13)$$

где b_k – ширина канала спирально-навитой насадки отстойника, принимается конструктивно.

Подставив зависимость (13) в (12) можно определить диаметр отстойника со спирально-навитой насадкой D_{om} , м.

$$D_{om} = \sqrt{\frac{4 \cdot l_k \cdot b_k}{\pi} + d_{ц.м}^2} \quad (14)$$

Диаметр центральной трубы $d_{ц.м}$, м, определяется по формуле

$$d_{ц.м} = \sqrt{\frac{q_{set}}{2,82 \cdot v_{ц.м}}} \quad (15)$$

где q_{set} – расчетный максимальный часовой расход сточных вод, $м^3/ч$;

$v_{ц.м}$ – скорость движения воды в центральной трубе, принимаем 30 мм/с , согласно [2].

Количество витков спирально-навитой насадки n определяется по формуле

$$n = \frac{D_{om} - d_{ц.м}}{2 \cdot b_k} \quad (16)$$

Высота конусной части отстойника H_k , м, при угле наклона ее стен к горизонту 50° определяется по формуле

$$H_k = \frac{D_{om}}{2} \cdot \text{tg} 50^\circ \quad (17)$$

Делая вывод о новой конструкции отстойника можно сказать следующее, спирально-навитая насадка существенно увеличивает эффект осветления по сравнению с обычным вертикальным отстойником. Использование насадки при проектировании новых отстойников или реконструкции существующих позволит, снизить капитальные затраты на строительство, так как существенно уменьшаются объемы проектируемого отстойника и увеличить эффективность очистки бытовых сточных вод на 15-20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, Н.Ф. Канализация / Н.Ф. Федоров, С.М. Шифрин. – М.: Изд. «Высшая школа», 1968. – 592 с.
2. Яковлев, С.В. Механическая очистка сточных вод / С.В. Яковлев, В.И. Калицун. – М.: Стройиздат, 1972. – 200 с.
3. Отстойный резервуар: пат. 2182508 Рос. Федерация: МПК В01D21/02 / Болдырев В.В., Давыдов Е.И.
4. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения, - М., 1986

Ивахнюк Григорий Константинович

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет) СПбГТИ (ТУ)
заведующий кафедрой инженерной защиты ОС, доктор химических наук, профессор
E-mail: fireside@inbox.ru

Давыдов Е.И.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет) СПбГТИ (ТУ)
соискатель кафедры инженерной защиты ОС
E-mail: davydov.1967@mail.ru

Лямаев Борис Федорович

СПб Военного инженерно-технического университета
доктор технических наук, профессор
E-mail: blymaev@mail.ru

G.K. IVACHNYK, E.I. DAVYDOV, B.F. LYAMAEV

THE DEVICE AND MATHEMATICAL MODEL OF THE VERTICAL SEDIMENT BOWL WITH THE SPIRALLY-WOUND NOZZLE FOR WASTEWATER TREATMENT

In article are considered a new design of a vertical sediment bowl with the spirally-wound nozzle. The mathematical model of sedimentation of the weighed substances in a sediment bowl is developed. The technique of its calculation is stated.

Keywords: vertical sediment bowl, wastewater treatment, mathematical model.

BIBLIOGRAPHY

1. Fedorov, N.F. Kanalizacija / N.F. Fedorov, S.M. Shifrin. – M.: Izd. «Vysshaja shkola», 1968. – 592 s.
2. Jakovlev, S.V. Mehanicheskaja ochildka stochnyh vod / S.V. Jakovlev, V.I. Kalicun. – M.: Strojizdat, 1972. – 200 s.
3. Odstojnyj rezervuar: pat. 2182508 Ros. Federacija: MPK B01D21/02 / Boldyrev V.V., Davydov E.I.
4. SNiP 2.04.03-85 Kanalizacija. Naruzhnye seti i sooruzhenija,- M., 1986

Ivahnjuk Grigory Konstantinovich

Saint-Petersburg state technological institute (technical university)

Doctor of chemical sciences, professor, head of chair “Engineering safety OS”

E-mail: fireside@inbox.ru

Davydov E.I.

Saint-Petersburg state technological institute (technical university)

Degree-seeking student, chair “Engineering safety OS”

E-mail: davydov.1967@mail.ru

Lyamaev Boris Fedorovich

Saint-Petersburg military engineering and technical university

Doctor of technical sciences, professor

E-mail: blymaev@mail.ru

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ, МАТЕРИАЛЫ

УДК 624.953

А.В. ВАРЛАМОВ

ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ СИЛЫ СХВАТЫВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И СЛОЕВ ФИКСИРОВАННОЙ МАССЫ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА В БУНКЕРЕ ДЛЯ ВЫБОРА СИЛЫ СВОДООБРУШАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА

Систематизированы исходные параметры и расчетные соотношения в разработанной автором четырехпараметрической модели гравитационного истечения сыпучего материала из бункера, позволяющие оценить силу схватывания отдельных частиц и слоев сыпучего материала фиксированной массы в возникшем сводеобразовании для рационального назначения силы рабочего органа сводообрушающего механизма из условия минимизации энергозатрат при эксплуатации бункера. Результаты выполненного исследования представляют практический интерес для проектировщиков бункеров хранения и выпуска сыпучих материалов и обслуживающего их технического персонала.

Ключевые слова: бункер; сыпучий материал; привод; контактное давление; время эксплуатации; температура; перепад температур; уплотняемость; энергия активации; сила схватывания; гравитационная нагрузка; усилие рабочего органа сводообрушающего механизма.

ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И СООТНОШЕНИЯ (по данным работ [1-3])

1. Исходное контактное давление в массиве сыпучего материала (СМ) массой M на момент заполнения бункера; $p_{ko} [H / m^2]$:

$$p_{ko} = \frac{M \cdot g}{S_{np}}, \quad (1)$$

где M [кг] – масса СМ в бункере; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; S_{np} – см. рисунок 1.

2. Текущее контактное давление СМ массой M , изменяемое в соответствии со временем τ эксплуатации бункера; $p_k [H / m^2]$:

$$p_k = p_{ko} \cdot e^{w\tau}, \quad (2)$$

где p_{ko} – см. (1).

w – см. далее;

$$\tau = \frac{t_{\text{ЭКСП}}}{t_0} \text{ [с]}, \text{ здесь } t_0 \text{ - регламен-}$$

тируемое ГОСТ, ОСТ или другим нормативным документом время допустимого нахождения СМ в бункере до начала выпуска, $t_{\text{ЭКСП}}$ – фактическое время нахождения СМ в бункере до начала выпуска СМ.

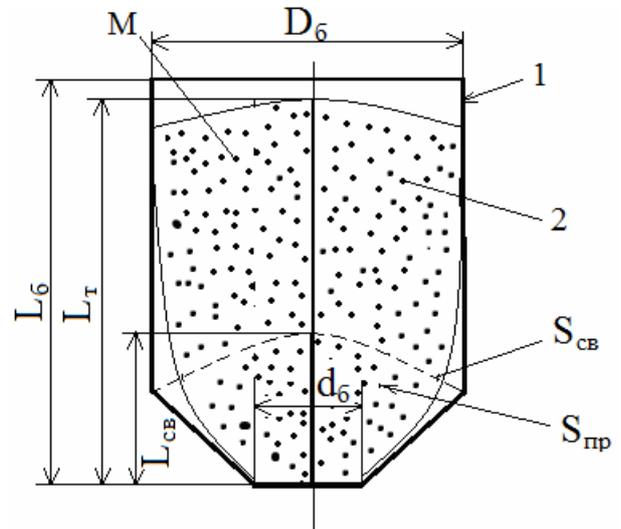


Рисунок 1 – Расчетная схема бункера с эквивалентными параметрами

1 – бункер; 2 – сыпучий материал массой M ; S_{np} – приведенная площадь поверхности распределения СМ в бункере [m^2]; $S_{св}$ – площадь поверхности свода СМ со стороны выпускного отверстия бункера [m^2]; $L_б$, $D_б$, $d_б$ – эквивалентные размеры бункера; $L_{св}$ – характерная высота свода СМ; $L_т$ – текущая высота СМ в бункере.

3. Коэффициент схватывания (константа скорости слипания или старения), характеризующий уменьшением упругих свойств отдельных частиц или слоев в массиве СМ; w :

$$w = k_M \cdot e^{\frac{U_a}{k_0 T}}, \quad (3)$$

где $e = 2,71$ (число Эйлера);

$k_M = 1,0 \dots 3,0$ – масштабный коэффициент составляющих СМ частиц в гранулированном или пылеобразном состоянии, - для гранулированного СМ его значение лежит в пределах $1,0 \dots 1,2$; для пылеобразного СМ – в пределах $2,5 \dots 3,0$;

U_a - энергия активации слипания частиц и слоев СМ [ккал/моль], - для гранул на базе полимерных материалов эта энергия равна $0,5 \dots 5$ ккал/моль, для гранул на базе синтетических каучуков порядка $14 \dots 20$ ккал/моль;

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} - \text{осредненная температура окружающей бункер атмосферной среды [К],}$$

здесь T_1, T_2 - соответственно, максимальная и минимальная температура окружающей среды в период эксплуатации бункера;

k_0 - см. далее.

4. Обобщенный коэффициент работы, совершаемой при самоуплотнении частиц и слоев сыпучего материала; k_0 :

Исходное выражение для k_0 :

$$k_0 = \frac{S_{ce}}{S_{np}} \cdot \frac{0,6 \cdot A}{\Delta T} \cdot \frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}}, \quad (4)$$

где $y = \rho_{HP} / \rho_{HY}$ - уплотняемость СМ; здесь ρ_{HP}, ρ_{HY} - насыпная плотность СМ, соответственно в рыхлом и уплотненном состояниях [кг/м³];

S_{ce}, S_{np} - см. рисунок 1;

$\Delta T = T_1 - T_2$, - перепад температуры окружающей среды при эксплуатации бункера [К];

$\varphi_{max}, \varphi_{min}$ - соответственно, величины максимальной и минимальной относительной влажности окружающей атмосферной среды при граничных значениях (T_1, T_2) температурного диапазона эксплуатации бункера с сыпучим материалом [%];

A [Дж] – работа, затрачиваемая на самоуплотнение частиц и слоев массива СМ массой M [кг] на величину Δy под действием гравитационной нагрузки F_G [Н] при заданном перепаде ΔT [К] температуры окружающей атмосферной среды при эксплуатации бункера.

Исходные выражения для A :

$$A = F_G \cdot \Delta y,$$

где $F_G = M^* \cdot g$; $M^* = \frac{L_{ce}}{L_T} \cdot M$; $\Delta y = (L_T - y \cdot L_T)$;

L_{CB}, L_B - см. рисунок 1;

y - см. далее

Конечное выражение для A :

$$A = \frac{L_{ce}}{L_T} \cdot M \cdot g (L_T - y \cdot L_T). \quad (5)$$

Конечное выражение для k_0 с учетом (5):

$$k_0 = \frac{S_{ce}}{S_{np}} \cdot \frac{0,6 \cdot \frac{L_{ce}}{L_T} \cdot M \cdot g (L_T - y \cdot L_T)}{\Delta T} \cdot \frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}}. \quad (6)$$

5. Обобщенная сила схватывания отдельных соприкасающихся частиц и слоев фиксированной массы сыпучего материала; F_w [Н]:

$$F_w = p_k \cdot S_{св}, \tag{7}$$

где $p_k, S_{св}$ - см. (2) и рисунок 1.

В работах [1-3] автором освещена разработанная четырехпараметрическая модель гравитационного истечения сыпучего материала, оценена роль деструктивных факторов, способствующих возникновению сводообразования СМ, и охарактеризованы предложенные эмпирические зависимости (1)-(7) по расчету ориентировочных значений отдельных составляющих параметров соотношения для расчета величины обобщенной силы схватывания F_w отдельных соприкасающихся частиц и слоев фиксированной массы сыпучего материала.

Целью настоящей работы является количественная оценка составляющих параметров величины силы F_w и исследование характера ее изменения в зависимости от условий эксплуатации бункера с конкретными эксплуатационными данными и конкретным сыпучим материалом для рационального выбора силы рабочего органа сводообрушающего механизма с минимизацией энергозатрат на разрушение сводообразований.

Соотношения (1) – (7) позволяют записать конечное выражение для силы F_w :

$$F_w = p_k \cdot S_{св} = p_{k0} \cdot e^{w\tau} \cdot S_{св} = M \cdot g \cdot \frac{S_{св}}{S_{нр}} \cdot e^{\left(k_m \cdot e^{\frac{U_a}{k_0 \cdot T}} \right) \cdot \tau} \tag{8}$$

ИЛИ

$$F_w = M \cdot g \cdot \frac{S_{св}}{S_{нр}} \cdot e^{k_m e^{\left[\frac{U_a}{\frac{S_{св}}{S_{нр}} \left[\frac{0,6 \cdot (L_{св} / L_T) M \cdot g (L_T - y \cdot L_T)}{\Delta T} \right] \frac{\varphi_{\min} \cdot T}{\varphi_{\max}}} \right] \cdot \tau}} \tag{9}$$

При последующем расчете текущих значений составляющих членов выражений (8) или (9) и собственно текущего значения силы F_w используем геометрические размеры реального бункера с эпюрой распределения полей давления конкретного сыпучего материала (рис. 1), а также ряд справочных данных из литературных источников, сведенных в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные данные к расчету обобщенной силы схватывания F_w

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
1	2	3	4	5
1	Рабочая среда – комбикорм гранулиро-ванный по ГОСТ.204-71 с размерами сферооб-разных гранул 10...15 мм.			
2	Исходная масса СМ в бункере (до первого вы-пуска СМ из бункера)	M	кг	5000
3	Насыпная плотность СМ в рыхлом состоянии	$\rho_{i\delta}$	$\frac{кг}{м^3}$	800
4	Насыпная плотность СМ в уплотненном состоянии	$\rho_{i\phi}$	$\frac{кг}{м^3}$	1000
5	Уплотняемость СМ	y	-	0,8
6	Масштабный коэффициент составляющих СМ частиц	k_m	-	3,0
7	Энергия активации слипания частиц и слоев СМ	U_a	$\frac{ккал}{моль}$	0,5

1	2	3	4	5
8	Параметры сводообразования:			
	- текущая высота СМ в бункере (до первого выпуска СМ из бункера $L_T = L_{\delta}$)	L_T	м	15
	- отношение площади поверхности свода СМ со стороны выпускного отверстия бункера к приведенной площади поверхности распределения СМ в бункере	$\frac{S_{ce}}{S_{np}}$	-	0,025
	- отношение характерного размера свода СМ к текущей высоте СМ в бункере	$\frac{L_{ce}}{L_T}$	-	0,1
	Характерные размеры бункера:			
	- высота	L_{δ}	м	15
	- наружный диаметр	D_{δ}	м	3
	- диаметр выпускного отверстия	d_{δ}	м	0,5
9	Эксплуатационные показатели бункера:			
	- осредненная температура окружающей бункер атмосферной среды	T	К	328
	- температурный перепад окружающей бункер атмосферной среды	ΔT	К	100
	Отношение величин минимальной и максимальной относительной влажности окружающей бункер атмосферной среды при граничных значениях температурного диапазона эксплуатации бункера	$\frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}}$	-	0,95
	- отношение фактического времени нахождения СМ в бункере до начала выпуска СМ к регламентируемому времени допустимого нахождения СМ в бункере до начала выпуска	τ	-	1,0
	Ускорение свободного падения	g	м/с ²	9,81
11	Число Эйлера	e	-	2,71

Использование данных таблицы 1 позволяет получить из (6) текущее значение обобщенного коэффициента работы k_0 :

$$k_0 = 0,025 \frac{0,6 \cdot 0,1 \cdot 5000 \cdot 9,81 \cdot (15 - 0,8 \cdot 15)}{100} \cdot 0,95 \left[\frac{Дж}{К} \right] \approx 2,95 \left[\frac{Дж}{К} \right].$$

Из оценки членов последнего выражения следует, что основополагающим фактором, обуславливающим рост коэффициента k_0 , является увеличение величины фиксированной массы M сыпучего материала, сопровождаемое ростом величин параметров $\frac{L_{св}}{L_T}$ и $\frac{S_{св}}{S_{пр}}$.

Уменьшение k_0 происходит при уменьшении величины y и при увеличении величины параметра ΔT , а также при уменьшении величины параметра $\frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}}$, обусловленным изменением параметра ΔT .

Подстановка найденного текущего значения коэффициента k_0 и ряда данных из таблицы 1 в выражение (8) позволяет найти текущее значение силы схватывания F_w :

$$F_w = 5000 \cdot 9,81 \cdot 0,025 \cdot 2,71^{3 \cdot 2,71 \left(\frac{0,5}{2,95 \cdot 328} \right)^1} [H] = 24440 [H].$$

Из вышеизложенного следует, что для текущего состояния реального бункера с конкретным типом СМ массой 5000 кг гравитационная (весовая) нагрузка F_G составляет 49050 Н ($5000 \text{ кг} \cdot 9,81 \text{ м/с}^2$), а сопутствующая ей сила схватывания равна 24440 Н. Отсюда следует, что в первом приближении их взаимосвязь представлена в виде:

$$F_w \approx 0,5 F_G. \tag{10}$$

Анализ выражения (9) показывает, что на величину силы F_w влияют 8 параметров, из них 3 взаимосвязанных через массу M сыпучего материала в бункере (рисунок 2): $\frac{S_{св}}{S_{пр}}$, $\frac{L_{св}}{L_T}$ и 5 независимых: M , T , ΔT , $\frac{\varphi_{\min}}{\varphi_{\max}}$, τ , непосредственно влияющих на величину параметра F_w .

Из рассмотрения исключены параметры U_a , k_m и y , которые являются постоянными величинами для каждого в отдельности взятого типа сыпучего материала.

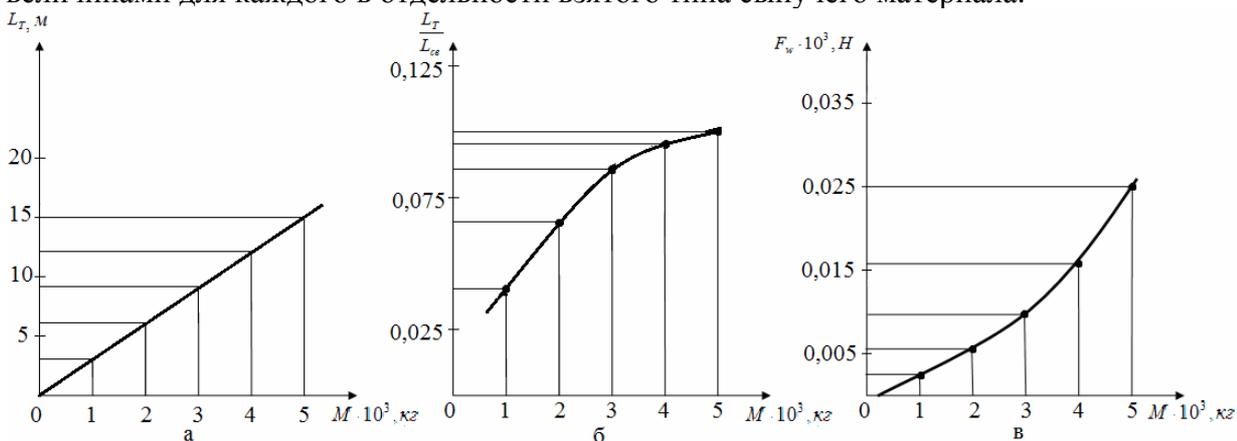


Рисунок 2 – Синтерполированные с учетом данных метода экспертных оценок характеристики взаимосвязанных параметров реального бункера с конкретным типом СМ (таблица 1)

a – зависимость $L_T = f(M)$; b – зависимость $\frac{L_{св}}{L_T} = f(M)$; v – зависимость $\frac{S_{св}}{S_{пр}} = f(M)$

Для оценки влияния выделенных 5 независимых параметров на величину силы F_w воспользуемся классическим планом вычислительного эксперимента, при котором все независимые, кроме одной, фиксировали (принимались постоянными), а варьируемая величина подвергалась изменению в пределах варьирования эксплуатационных показателей бункера с СМ (в натурном эксперименте такое изменение, проводят, как правило, в рамках рандомизации, - изменения случайным образом на базе таблицы случайных чисел) – рисунок 3.

На практике до настоящего времени рассчитываются лишь исходные параметры бункера с СМ, то есть действительные до момента начала выпуска СМ из бункера в приемную емкость мобильного транспортного средства. Причем, эти параметры, как правило, не отражают реальную картину поведения оцененных выше 8 параметров и степень их влияния на величину силы схватывания F_w в возникшем сводообразовании сыпучего материала с исходной массой M .

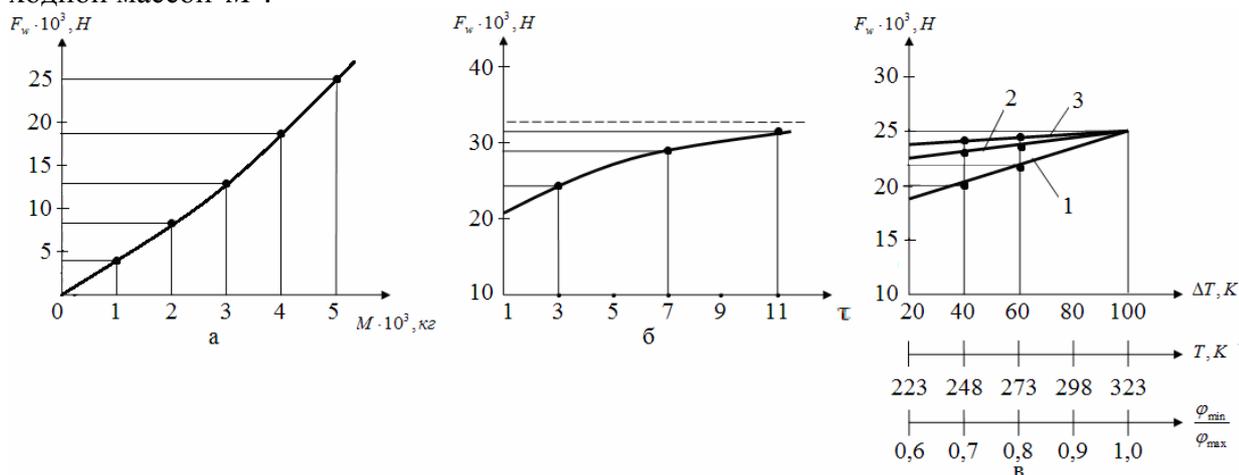


Рисунок 3 – Синтерполированные с учетом данных метода экспертных оценок характеристики независимых параметров реального бункера с конкретным типом СМ (таблица 1).

а – зависимость $F_w = f(M)$; б – зависимость $F_w = f(\tau)$; в – зависимости 1) $F_w = f(\Delta T)$;

$$2) F_w = f(T) \text{ и } 3) F_w = f\left(\frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}}\right)$$

В действительности же величина $M = var$, так как при эксплуатации бункера, содержащего первоначальную массу M сыпучего материала, осуществляется n -выпусков СМ равными массами m_i до полного опорожнения бункера, то есть справедливо:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i . \quad (11)$$

Из (11) следует, что с каждым выпуском очередной порции СМ массой m_i происходит уменьшение первоначальной массы M , а, следовательно, в соответствии с выражением (10) происходит уменьшение гравитационной силы F_G , обуславливающей количественное изменение ранее оцененных независимых и взаимосвязанных с массой M параметров, совокупность которых предопределяет условия возникновения сводообразования в новой фиксированной массе сыпучего материала ($M = \sum_{i=1}^n m_i$).

Вышеизложенное предопределяет целесообразность оценки количественного изменения данных параметров для рационального выбора силы рабочего органа сводообрушающего механизма для реальных условий эксплуатации типовых конструкций бункера с конкретным типом сыпучего материала при минимизации энергозатрат на разрушение сводообразований.

С учетом представленных выше положений выбор силы F_{po} , развиваемого рабочим органом сводообрушающего механизма, может быть произведен из совместного решения соотношений:

$$F_{po} > F_w \frac{\sum_{i=1}^m S_{po}}{S_{ce}}, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m S_{po} = k_{об} S_{ce}, \quad (13)$$

где S_{po} – площадь режущей поверхности рабочего органа сводообрушающего механизма, вводимой в контакт со сводообразованием СМ;

m – число потребных рабочих ходов рабочего органа сводообрушающего механизма для разрушения сводообразования СМ;

$k_{об}$ – коэффициент обрушения свода, определяющий часть площади свода S_{ce} , при разрушении которой происходит саморазрушение всего свода.

Из практики эксплуатации оцениваемого в настоящей работе бункера с СМ следует:

$$\left. \begin{aligned} k_{об} &= 0,2 \\ m &= 5 \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

С учетом (14) выражения (12) – (13) приобретают вид:

$$(15)$$

На практике усилие F_{po} принимают, как правило, на 10 ... 20% большим произведения $0,04F_w$, и если это увеличение взять равным 15%, то выражение (15) трансформируется в равенство:

$$F_{po} > 0,04F_w. \quad (16)$$

Выражение (16) с учетом (8) и (6) представимо в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_{po} &= 0,046 \cdot M \cdot g \cdot \frac{S_{ce}}{S_{np}} \cdot e^{(k_w \cdot e^{k_0 \cdot T}) \cdot \tau} \\ k_0 &= \frac{S_{ce}}{S_{np}} \cdot \frac{0,6 \cdot \frac{L_{ce}}{L_T} \cdot M \cdot g (L_T - y \cdot L_T)}{\Delta T} \cdot \frac{\varphi_{min}}{\varphi_{max}} \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Использование выражения (17) для определения величины силы F_{po} рабочего органа сводообрушающего механизма при решении дифференциального уравнения его движения позволяет подобрать для этого механизма конкретный тип привода с необходимыми энергетическими характеристиками (крутящий момент, потребляемая мощность и др.), обеспечивающими качественное разрушение сводообразования СМ с минимальными энергетическими затратами.

ВЫВОДЫ

1. Систематизированы исходные параметры и соотношения в разработанной автором четырехпараметрической модели гравитационного истечения сыпучего материала из бункера с выявлением деструктивных факторов, предопределяющих возможность возникновения в бункере сводообразований под действием силы схватывания отдельных частиц и слоев в фиксированной массе сыпучего материала.

2. Представлены результаты качественной и количественной оценок составляющих параметров силы схватывания частиц и слоев сыпучего материала в сводообразовании и характера изменения этой силы в зависимости от условий эксплуатации.

3. Предложено соотношение для рационального выбора величины силы рабочего органа сводообрушающего механизма для реальных условий эксплуатации типовых конструкций бункера с конкретным типом сыпучего материала при минимизации энергозатрат на разрушение сводообразований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламов, А.В. Конструкция и динамика механизмов предупреждения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов: монография [Текст] / А.В. Варламов – Самара: СНЦ РАН, 2010. – 231 с.:ил.
2. Варламов, А.В. Четырехпараметрическая динамическая модель твердой породы и сводообразования сыпучего материала при дроблении ударно-скалывающим исполнительным механизмом [Текст] / Л.С. Ушаков, А.В. Варламов, О.П. Мулюкин и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Том 13, №4(42). – Самара: СНЦ РАН, 2011. – С.225 – 230.
3. Варламов, А.В. Разработка обобщенной математической модели динамической системы «бункерное устройство с сыпучим материалом – сводообразование – механизм разрушения сводообразования» [Текст] / А.В. Варламов, О.П. Мулюкин // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. – Выпуск 3(13). – Самара: СамГУПС, 2011. – С.86-90.

Варламов Александр Васильевич

Самарский государственный университет путей сообщения

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы»

443066, Самара, 1-ый Безымянный пер., 19

Тел.: 8-963-916-06-34

E-mail: om46@mail.ru

A.V. VARLAMOV

ROUGH CALCULATION OF STRENGTH OF SKHVATYVANY OF SEPARATE PARTICLES AND LAYERS OF THE FIXED WEIGHT OF THE LOOSE MATERIAL IN THE BUNKER FOR THE FORCE CHOICE SVODOOBRUSHAYUSHCHEGO OF THE MECHANISM

Initial parameters and settlement ratios in the four-parametrical model of the gravitational expiration of a loose material developed by the author from the bunker, allowing to estimate force of a skhvatyvaniye of separate particles and layers of a loose material of the fixed weight in the arisen svodoobrazovaniye for rational purpose of strength of the worker of body of the svodoobrushayushchy mechanism from a condition of minimization of energy consumption are systematized at bunker operation. Results of the executed research represent practical interest for designers of bunkers of storage and release of loose materials and technicians serving them.

Keywords: bunker; loose material; drive; contact pressure; operation time; temperature; difference of temperatures; compactibility; energy of activation; force of a skhvatyvaniye; gravitational loading; effort of working body of the svodoobrushayushchy mechanism.

BIBLIOGRAPHY

1. Varlamov, A.V. Konstrukcija i dinamika mehanizmov preduprezhdenija i ustraneniya svodoobrazovanij v bunkerah hranenija i vypuska sypuchih materialov: monografija [Tekst] / A.V. Varlamov – Samara: SNC RAN, 2010. – 231 s.:il.
2. Varlamov, A.V. Chetyrehparametricheskaja dinamičeskaja model' tverdoj porody i svodoobrazovanija sypuchego materiala pri droblenii udarno-skalyvajuwim ispolnitel'nym mehanizmom [Tekst] / L.S. Ushakov, A.V. Varlamov, O.P. Muljukin i dr. // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – Tom 13, №4(42). – Samara: SNC RAN, 2011. – S.225 – 230.
3. Varlamov, A.V. Razrabotka obobwennoj matematicheskoj modeli dinamičeskoj sistemy «bunkernoe ustrojstvo s sypuchim materialom – svodoobrazovanie – mehanizm razrusheniya svodoobrazovanija» [Tekst] / A.V. Varlamov, O.P. Muljukin // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobwenija. – Vy-pusk 3(13). – Samara: SamGUPS, 2011. – S.86-90.

Varlamov Aleksandr Vasilievich

Samara state university of communication lines

Candidate of technical sciences, associated professor, Department “Railway stations and junctions”

443066, Samara, 1-y Bezymjanny per., 19

Tel.: 8-963-916-06-34

E-mail: om46@mail.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.774.36

В.Н. ЕРЕМИН, В.Я. ОСАДЧИЙ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ПИЛИГРИМОВОМ СТАНЕ

Впервые разработана и применена технология контролируемой прокатки труб на пилигримовом стане. На основе данных физического моделирования выбраны рациональные режимы прокатки на пилигримовом стане и микролегирования стали, обеспечивающие получение после прокатки величины ударной вязкости близкой к значениям, получаемым при нормализации после нагрева в печи.

Ключевые слова: пилигримовая прокатка труб, контролируемая прокатка, микролегирование.

Как составная часть технологического процесса производства труб, широкое распространение получила нормализация низколегированных нефтепроводных и котельных труб. Благодаря получению мелкозернистой структуры, после такой обработки становится возможным обеспечить повышенную ударную вязкость стали при том же уровне прочностных свойств по сравнению с не нормализованным состоянием. Ряд нормативных документов допускают проведение нормализации с прокатного нагрева, определяя её как процесс горячей деформации, завершающийся при температуре не ниже температуры нормализации с отдельного нагрева [1], [2] и [3]. В таблице 1 приведены сведения о величине ударной вязкости металла труб, изготовленных трубопрокатной установкой (ТПУ) с пилигримовым станом различным образом. Из них видно, что прокатки на пилигримовом стане при температуре выше температуры проведения нормализации не достаточно для обеспечения требуемых значений ударной вязкости металла труб.

Таблица 1 – Ударная вязкость металла труб из стали марки 09Г2С, прокатанных на пилигримовом стане

Вариант изготовления	Ударная вязкость, МДж/м ²					
	по Менаже (КСУ)				по Шарпи (КСV)	
	при -40 °С		при -60 °С		при -60 °С	
	среднее значение	диапазон	среднее значение	диапазон	среднее значение	диапазон
Прокатка при температуре выше температуры нормализации	2,1	1,8÷2,4	0,4	0,3÷1,6	0,15	0,19÷0,29
Нормализация после нагрева в печи	2,6	2,0÷3,2	2,6	0,2÷3,0	0,98	0,15÷1,96
Требуемые значения ударной вязкости	не менее 0,3		не менее 0,3		не менее 0,3	

На трубопрокатных установках многих типов для получения требуемых значений ударной вязкости используют различные варианты контролируемой прокатки [4], [5] и [6]. Например, для измельчения зерна многими производителями труб применяется прокатка в

редукционном стане с деформацией не менее 15 % при температурах от 850 до 900 °С в сочетании с охлаждением на воздухе или водой.

На трубопрокатных установках с пилигримовым станом контролируемую прокатку используют на завершающих этапах обработки, а непосредственно на пилигримовом стане она не применяется. Большинство трубопрокатных установок с пилигримовым станом, например ТПУ 8-16" Челябинского трубопрокатного завода (ЧТПЗ), имеют печь для проведения нормализации, устанавливаемую между пилигримовым и калибровочным станом [7]. Но такие особенности горячей пилигримовой прокатки, как большая величина общей деформации и дробность деформации, позволяющие использовать заготовку с четко выраженной литой структурой, указывают на перспективность исследования возможности применения контролируемой прокатки на пилигримовом стане.

На ЧТПЗ была проведена работа по изучению возможности использования контролируемой прокатки во время деформации на пилигримовом стане. Измерения температуры, проведенные на пилигримовом стане ЧТПЗ, показали, что прокатка на пилигримовом стане обычно ведется при температуре более 900 °С. При аналогичных величинах температуры прокатки изготавливают трубы и на пилигримовых станах других производителей [8]. Следовательно, для применения ранее описанного варианта контролируемой прокатки, заключающегося в деформации при температуре 850 до 900 °С требуется уменьшение температуры нагрева заготовки или уменьшения температуры гильзы перед пилигримовым станом, за счет принудительной выдержки перед станом (подстуживание).

Учитывая, что температура гильзы за время транспортировки до стана практически не изменяется, то снижение температуры нагрева существенно скажется на пластичности стали и может привести к разрушению заготовки при прошивке. Возможность применения подстуживания гильзы проверяли при прокатке труб 273x10 мм из стали марки 09Г2С (размер гильз 450x80 мм). Гильзы дополнительно выдерживали перед пилигримовым станом в течение от 1 до 4 минут. Снижение температуры прокатки не превысило 40 °С, то есть было незначительно. При выдержке перед пилигримовым станом 3 и 4 минуты трубы тяжело снимались с дорна. В микроструктуре труб, прокатанных из наблюдались участки крупного зерна 6-5 балла и видманштетта 2 балла. Таким образом, технология прокатки включающая подстуживание гильз до 900-950°С не гарантирует стабильного получения мелкого зерна (8-9 балла). С другой стороны, подстуживание до более низких температур отрицательно скажется на производительности стана и возрастет вероятность «затяжки» дорен.

Еще одним способом повышения ударной вязкости является финишная обработка при 900-1050 °С [9]. В этом случае уменьшение размеров зёрен феррита достигается за счет рекристаллизации аустенита после деформации. Возможность применения этого способа прокатки определяли методом физического моделирования процесса горячей пилигримовой прокатки труб 325x20 мм из стали 17Г1С на пластометре [10]. Исследованные варианты прокатки отличались температурой деформации, величиной подачи гильзы в пилигримовый стан (дробностью деформации) и микролегированием стали.

Эксперименты, проведенные на пластометре показали, что определенное сочетание величины подачи гильзы и микролегирования стали позволяет получать мелкозернистую

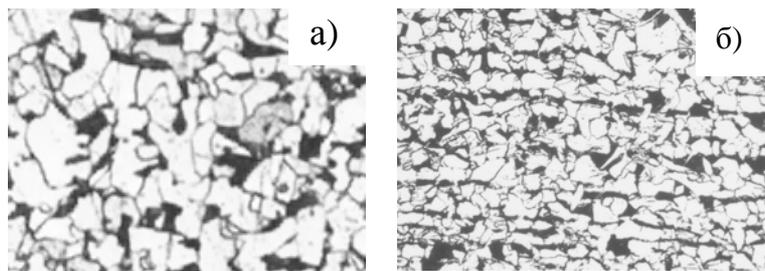


Рисунок 1 – Микроструктура в средней части труб 325x20 из стали 17Г1С

а) действующая технология (величина подачи 30 мм и сталь без микролегирования); б) опытная технология (величина подачи 20 мм и сталь микролегированная V и Nb)

микроструктуру во всем диапазоне температур прокатки на пилигримовом стане. Опытные прокатки на ТПУ 8-16" ЧТПЗ труб размером 325x20 мм из стали марки 17Г1С продемонстрировали аналогичные результаты. На рисунке 1 показана микроструктура металла из середины труб, прокатанных по различным вариантам технологии. Полученные отличия в размере зёрен фер-

рита объясняются большей на 50-160 °С температурой прокатки по сравнению с концами трубы, где для обоих вариантов технологии получена одинаковая микроструктура.

Так же было установлено, что изменение величины подачи гильзы приводит к изменению температуры конца прокатки и микроструктуры металла труб.

В таблице 2 приведены результаты испытаний на ударный изгиб образцов от труб размером 273x10 мм из стали марки 09Г2С после прокатки по двум опытными вариантами технологии прокатки, отличающимся от действующей технологии величиной подачи гильзы и использованием стали микролегированной титаном и алюминием.

Таблица 2 – Механические свойства труб 273x9 мм из стали марки 09Г2С

Вариант прокатки	Величина подачи гильзы, мм	Ударная вязкость, МДж/м ²					
		по Менаже (КСУ)				по Шарпи (КСV)	
		при -40 °С		при -60 °С		при -60 °С	
		среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон
Опытная технология №1	15÷20	2,3	1,8÷3,4	2,0	1,9÷2,3	0,15	0,02÷0,39
Опытная технология №2 (сталь микролегированная 0,02 %Ti и 0,035 %Al)	15÷20	2,5	1,9÷3,4	2,2	2,0÷2,4	0,73	0,15÷1,47
Примечание: действующая технология предусматривает прокатку с величиной подачи гильзы от 20 до 25 мм.							

Из таблицы 2 видно, что снижение подачи на 5 мм и микролегирование стали увеличивает величину и уменьшает разброс значений ударной вязкости. Механические свойства металла труб из стали микролегированной титаном и алюминием не уступают свойствам, полученным после проведения термообработки. На рисунке 2 показаны фото микроструктуры металла труб, прокатанных по различным режимам.

При прокатке труб по опытной технологии №1 величина зерна несколько больше, чем по действующей технологии. Но несмотря на это, величина ударной вязкости металла труб после прокатки по опытной технологии №1 больше чем после прокатки по действующей технологии. В микроструктуре труб, прокатанных по действующей технологии, наблюдается бейнит. Наличие хрупкой фазы привело к уменьшению величины ударной вязкости.

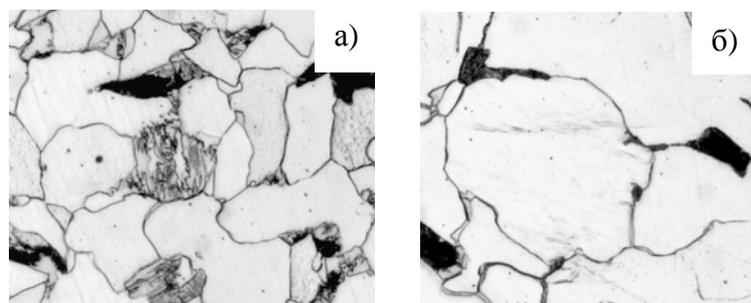


Рисунок 2 – Микроструктура металла труб 273x10 из стали марки 09Г2С (x500)

а) действующая технология (величина подачи гильзы от 20 до 25 мм); б) опытная технология (величина подачи гильзы от 15 до 20 мм)

Его образование связано с скоростью охлаждения труб после прокатки. Для охлаждения пильгервалков используется вода, её попадание на трубы с толщиной стенки от 8 до 15 мм увеличивает скорость охлаждения трубы. Во время нахождения металла в конусе деформации, охлаждение водой незначительно сказывается на скорости охлаждения, из-за большой толщины стенки. К моменту выхода металла из конуса деформации, когда получено сечение готовой трубы, воздействие воды на скорость охлаждения максимально. Уменьшение величины подачи привело к увеличению времени нахождения металла в конусе деформации и, как следствие, к уменьшению температуры конца прокатки с 900÷960 °С до 850÷915 °С. Для стали 09Г2С температура начала фазового превращения приблизительно равна 850 °С. Сле-

довательно, попадание воды на трубу начало влиять на скорость охлаждения металла уже в момент частичного выделения феррита. Об этом свидетельствует уменьшение количества хрупких составляющих в микроструктуре и расположение перлита между зёрнами феррита.

По данным измерения температуры гильз и температуры труб после прокатки получена зависимость температуры конца прокатки от величины подачи гильзы и толщины стенки трубы:

$$T = T_0 - \left(-0.2093 \cdot m^2 + 6.1475 \cdot m + 25.633 \right) \cdot \ln(S) + 0.6081 \cdot m^2 - 15.715 \cdot m - 195.41, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

где T_0 – температура гильзы, $^\circ\text{C}$;

m – величина подачи гильзы, мм;

S – толщина стенки трубы, мм.

Зависимость (1) может быть использована для оценки степени достижения температуры начала ферритного превращения при прокатке труб диаметром от 273 до 426 мм с толщиной стенки от 8 до 25 мм и величине подачи гильзы от 15 до 30 мм. Ошибка расчета температуры конца прокатки по формуле (1), не превышает 15 %.

На основании выполненных исследований применительно к ТПУ 8-16" с пилигримовым станом ЧТПЗ разработана технология прокатки труб диаметром от 273 до 426 мм с толщиной стенки от 8 до 25 мм из стали марок 09Г2С и 17Г1С, позволяющая получать после прокатки на пилигримовом стане механические свойства близкие по ряду показателей к результатам, получаемым после нормализации с отдельного нагрева. Были регламентированы величина максимальной подачи гильзы и микролегирование стали, что увеличило долю труб сдаваемых без дополнительной термообработки с 20 до 50 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSI/API спецификация 5L. Техусловия для труб для трубопроводов. – введ. 2008 – 01 – 10.
2. EN 10210. Технические условия поставки. Горячедеформированные полые профили для конструкций из углеродистых конструкционных сталей и мелкозернистых конструкционных сталей. – введ. 2006 – 01 – 04.
3. ТУ 14-ЗР-55-2001. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – введ. 2001 – 21 – 09.
4. Пат.2110588 Российская федерация, МПК C21D9/08,8/10. Способ изготовления труб / Бодров Ю.В. и др.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Синарский трубный завод", Предприятие "Белозерное". – 97103282/02; заявл. 12.03.97; опубл. 10.05.98.
5. Янковский, В.М. Освоение промышленной линии термомеханического упрочнения труб на Азербайджанском трубопрокатном заводе / В.М. Янковский, Р.Е. Мустафаев, Е.А. Соломадина и др. // Черная металлургия: Бюл. НТИ. – 1990. – № 4. – С. 58 – 60.
6. Янковский, В.М. Упрочняющая термическая и термомеханическая обработка труб / В.М. Янковский, Е.А. Соломадина, А.А. Кривошеева и др. // Черная металлургия: Бюл. НТИ. – 1985., №16. – С. 11-28.
7. Heriberto Posdena, Miguel A. Pagani, Guillermo Fitzsimons Application of microalloyed steels to the production of seamless line pipe and OCTG. – Beijing China., 1985. – P. 493-506. – (Proceeding/International Conference on HSLA Steels '85)
8. Фартушный, Р.Н. Исследование и совершенствование процессов производства нефтяных труб диаметром 73-219 мм на трубопрокатных агрегатах с пилигримовым станом с целью улучшения их качества: автореф. дис. канд. тех. наук / Р.Н. Фартушный. – М., 2008. – 22 с.
9. Tadeusz Siwecki Modeling of microstructure evolution durin recrystallization controlled rolling// ISIJ International. – 1992., Vol. 32, No.3. – P. 368-376.
10. Еремин, В.Н. Изучение возможности реализации рекристаллизационной контролируемой прокатки на пилигримовом стане / В.Н. Еремин, В.Я. Осадчий // Производство проката. – 2011. – №10. – С. 29-32.

Еремин Виктор Николаевич

ОАО «Челябинский трубопрокатный завод», г. Челябинск
инженер-технолог технологического отдела
E-mail: Viktor.Eremin@chelpipe.ru

Осадчий Владимир Яковлевич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики»
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные технологии обработки давлением»
Тел. 89165901997

V.N. EREMIN, V.YA. OSADCHY

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF CONTROLLABLE ROLLING OF PIPES ON PILGRIMOVOM THE CAMP

The controlled rolling technology of pipes on pilger mill have been first time developed and applied. On the basis of physical modeling were chosen the rational modes of rolling on pilger mill and micro alloying of steel to obtaining impact value similar obtained after normalization from additional heating in furnace.

Keywords: rolling of pipes on pilger mill, controlled rolling, micro alloying

BIBLIOGRAPHY

1. ANSI/ARI спецификация 5L. Tehuslovija dlja trub dlja truboprovodov. – vved. 2008 – 01 – 10.
2. EN 10210. Tehnicheskie uslovija postavki. Gorjachedeformirovannye polye profili dlja konstrukcij iz uglerodistyh konstrukcionnyh stalej i melkozernistyh konstrukcionnyh stalej. – vved. 2006 – 01 – 04.
3. TU 14-3R-55-2001. Truby stal'nye besshovnye dlja parovyh kotlov i truboprovodov. – vved. 2001 – 21 – 09.
4. Pat.2110588 Rossijskaja federacija, MPK S21D9/08,8/10. Sposob izgotovlenija trub / Bodrov Ju.V. i dr.; zajavitel' i patentoobladatel' Otkrytoe akcionernoje obwestvo "Sinarskij trubnyj zavod", Predprijatje "Belozernoje". – 97103282/02; zajavl. 12.03.97; opubl. 10.05.98.
5. Jankovskij, V.M. Osvoenie promyshlennoj linii termomehanicheskogo uprochnenija trub na Azerbajdzhanskom truboprokatnom zavode / V.M. Jankovskij, R.E. Mustafaev, E.A. Solomadina i dr. // Chernaja metal-lurgija: Bjul. NTI. – 1990. – № 4. – S. 58 – 60.
6. Jankovskij, V.M. Uprochnjajuwaja termicheskaja i termomehanicheskaja obrabotka trub / V.M. Jankovskij, E.A. Solomadina, A.A. Krivosheeva i dr. // Chernaja metallurgija: Bjul. NTI. – 1985., №16. – S. 11-28.
7. Heriberto Posdena, Miguel A. Pagani, Guillermo Fitzsimons Application of microalloyed steels to the production of seamless line pipe and OCTG. – Beijing China., 1985. – R. 493-506. – (Proceeding/International Conference on HSLA Steels '85)
8. Fartushnyj, R.N. Issledovanie i sovershenstvovanie processov proizvodstva neftjanyh trub dia-metrom 73-219 mm na truboprokatnyh agregatah s pilgrimovym stanom s cel'ju uluchshenija ih kachestva: avtoref. dis. kand. teh. nauk / R.N. Fartushnyj. – M., 2008. – 22 s.
9. Tadeusz Siwecki Modeling of microstructure evolution durin recrystallization controlled rolling// ISIJ International. – 1992., Vol. 32, No.3. – P. 368-376.
10. Eremin, V.N. Izuchenie vozmozhnosti realizacii rekristallizacionnoj kontroliruemoj prokatki na pilgrimovom stane / V.N. Eremin, V.Ja. Osadchij // Proizvodstvo prokata. – 2011. – №10. – S. 29-32.

Eremin Viktor Nikolaevich

OAO "Chelyabinsk Tube Rolling Plant", Chelyabinsk
Engineer-technologist of technological department
E-mail: Viktor.Eremin@chelpipe.ru

Osadchy Vladimir Yakovlevich

Moscow state university of instrument engineering and informatics
Doctor of chemical sciences, professor, head of chair «Information technologies of processing by pressure»
Tel. 89165901997

УДК 621.7 (075)

М.И. БОРЗЕНКОВ, А.Ф. ТРУБИЦИН, А.А. МЫШЕЧКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРЕДЕЛЬНУЮ СТЕПЕНЬ ОСАДКИ КАЛИБРОВАННОГО ПРОКАТА

В данной статье излагаются результаты экспериментальных исследований по оценке влияния поверхностных дефектов, химического состава и структуры калиброванного проката на предельную степень осадки. Исследовали прокат низко- и среднеуглеродистых марок стали: 10, 10КП, 20, 20КП, 35. Установлено, что 44,5 % дефектов составляют волосовины и трещины глубиной от 0,04 мм до 0,50 мм; 30,5 % - неметаллические включения с выходом на поверхность и 25 % - плены и закаты глубиной от 0,07 мм до 3,08 мм. Определена допустимая глубина поверхностных дефектов. Наилучшими данными обладают заготовки, полученные из непрерывнолитого металла. Влияние микроструктуры материала на предельную степень осадки выражается в следующем: сфероидизация перлита повышает критическую степень осадки среднеуглеродистых сталей на 5...10 %; рост зерна перлита способствует снижению прочности и повышению критической степени осадки.

Ключевые слова: калиброванный прокат, низко- и среднеуглеродистые стали, степень осадки, поверхностные дефекты.

В связи с увеличением промышленного производства растет спрос на крепежные и другие изделия повышенной прочности и сложности, изготавливаемые холодной штамповкой – высадкой из калиброванного проката.

Значительные степени деформации, характерные для изготовления изделий методом холодной объемной штамповки и высадки, обуславливают жесткие требования к металлу – высокую пластичность, практическое отсутствие дефектов поверхности, плотную бездефектную макроструктуру.

Пригодность металлопроката к холодной высадке в большей степени зависит от количества дефектов, их вида и глубины залегания. К поверхностным дефектам заготовки для холодной высадки относятся: волосовины, трещины, закаты, неметаллические включения.

Для исследования данного вопроса были исследованы образцы из 102 партий калиброванного проката, предназначенных для изготовления крепежных изделий на холодновысадочных автоматах Орловского сталепрокатного завода.

Испытания проводились путем заранее подготовленных образцов с соотношением длины и диаметра как 2:1 (рис. 1). В процессе работы не ставилась задача осуществить исследования на специально подготовленных плавках. Проверялись пластические возможности материала на рядовых плавках текущего производства. Для испытаний были выбраны низко- и среднеуглеродистые марки стали 10, 10КП, 20, 20КП, 35 диаметром от 7,0 до 30,0 мм.

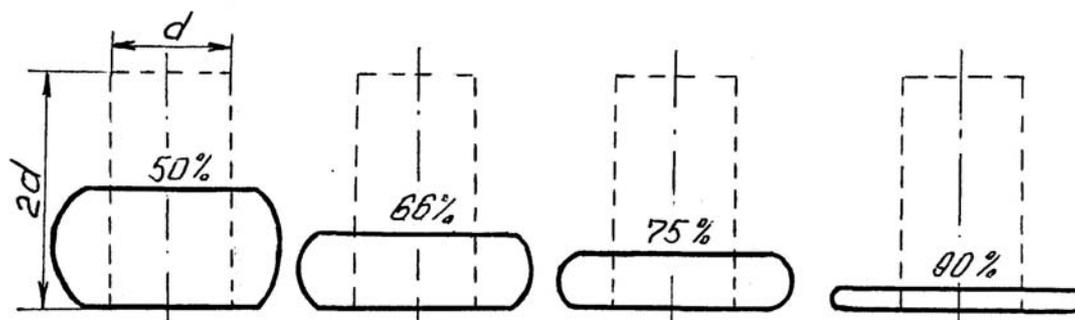


Рисунок 1 – Ступенчатая осадка образцов

Перед осадкой на подготовленном образце делали поперечный шлиф и под микроскопом определяли вид дефекта и глубину его залегания. Осадку проводили ступенчато до раз-

рушения образца. Повторный просмотр разрушенного образца под микроскопом позволял установить, от какого именно дефекта происходило разрушение.

В результате обобщения просмотренных (отшлифованных) образцов до осадки было выявлено, что до 44,5 % дефектов составляют волосовины и трещины с глубиной залегания от 0,04 до 0,5 мм, до 30,5 % дефектов – неметаллические включения с выходом на поверхность и до 25% - плены и закаты с глубиной залегания от 0,07 до 3,08 мм.

Таким образом, до 75 % образующихся поверхностных дефектов следует отнести на счет сталеплавильного производства, то есть выплавки и разливки – это волосовины и неметаллические включения и до 25 % дефектов (плены и закаты) – к нарушению технологии прокатки, начиная со слитка и кончая прокаткой на готовый размер.

Графическое представление глубины залегания дефектов от критической степени осадки [1] имеет экспоненциальный вид и с ее помощью можно определить зону допустимой глубины дефектов.

Полное удаление поверхностных дефектов на больших объемах металла при современной технологии его изготовления оказывается или невозможным или же экономически неоправданным. Поэтому была определена допустимая глубина залегания дефектов на поверхности горячекатаного и калиброванного проката.

Радикальным средством устранения поверхностных дефектов является механическая обработка (зачистка наждачными кругами) заготовки в процессе получения подката, однако данная технология требует значительных дополнительных затрат. Более перспективным методом повышения качества поверхности представляется обеспечение плотной неоднородной структуры металла на стадии выплавки и разливки. Тогда будут исключены неметаллические включения, а благодаря плотной структуре уменьшится образование дефектов при прокатке.

В качестве объекта исследования была использована продукция Белорусского металлургического завода и комбината «Криворожсталь», поступающая на Орловский сталепрокатный завод. В этих производствах изготавливались непрерывнолитые заготовки, которые прокатывались на заготовочных проволочносортных станах и подвергались последующей калибровке на требуемый размер. При исследовании свойств белорусского проката было проверено на холодную осадку 13 плавков из стали марок 10 и 35. Не выдержали испытания на осадку по группе 75 только 4 плавки.

Применяемый термин «группа осадки 75» означает, что материал выдерживает без разрушения уменьшение высоты при осадке образца не менее, чем на 75 %.

Образцы, изготовленные из металла этих плавков, в термообработанном состоянии обеспечили осадку без разрушения свыше 80 %. На отдельных плавках, особенно из стали 10, образцы без термообработки выдержали осадку до 87 % без разрушения. Таким образом, из 13 проверенных плавков 12, то есть (92%) обеспечили осадку в холодном состоянии до 75 % и выше.

Из 44 проверенных плавков завода «Криворожсталь» 4 из 5 плавков из группы 50 выдержали осадку по группе 66, а осадку по группе 75 – 3 плавки.

Из 39 плавки, поступивших на Орловский сталепрокатный завод согласно сертификатам с осадкой по группе 66, - 4 плавки при контрольной проверке не выдержали осадку по группе 66, из остальных плавков, которые выдержали осадку по группе 66, плавки с осадкой по группе 75 составили 79,5 %. Из общего количества проверенных плавков 70 % плавков выдержали осадку по группе 75. Отдельные плавки выдержали осадку до 85 %.

Качественные характеристики готового калиброванного проката в значительной степени зависят от химического состава стали, способа ее разлива и режимов термической обработки.

Были проанализированы 63 плавки из стали марок 10, 20, 35 и 45. Установлено, что содержание серы в белорусском металле находится в пределах 0,07 – 0,024 %, содержание фосфора составило 0,005 – 0,016 %. Суммарное содержание серы и фосфора в белорусской стали в 1, 37 раза ниже, чем в аналогичных марках стали криворожского производства, что улучшает деформируемость стали в холодном состоянии.

Усадочная рыхлость, пузыри, трещины, шлаковые включения и флокены – вот неполный набор дефектов, которые не допускаются в стали для холодной высадки. Входной контроль не выявил данных дефектов в подкате Белорусского метзавода.

Для получения более полных количественных данных зависимости критической степени осадки от степени сфероидизации структуры были проведены исследования на базе производства Орловского сталепрокатного завода. Первые трещины на стали 35, подвергнутой закалке и последующему отпуску в течении 3-4-х часов, появлялись после 83-85% осадки. После изотермического отжига критическая степень осадки составляла 87 %. Снижение степени сфероидизации со 100 % до 60-70 % уменьшает ее с 87 % до 79-82 %.

Для стали 20, подвергнутой закалке и последующему отпуску, критическая степень осадки наступает после 88 %.

Увеличение степени сфероидизации с 60 до 80 % повышает критическую степень осадки с 83 до 86 %.

Комплексное исследование влияния микроструктуры стали на критическую степень осадки проводилось на четырех марках: 10КП, 20, 35 и 40Х. Кроме показателя сфероидизации структуры фиксировали величину аустенитного и действительного зерна. Для обеспечения определенных микроструктур эти стали подвергались различным видам термообработки.

Результаты испытаний показали, что для низкоуглеродистых марок стали (10КП, 20) степень сфероидизации не оказывает существенного влияния на пластические свойства, особенно на критическую степень осадки.

При сфероидизации зернистого перлита на 50-60 % низкоуглеродистые марки стали достигают максимальных пластических свойств: относительное удлинение стали 10КП составляет 44-46 %, сужение – 76 %, а стали 20 соответственно – 42 % и 68 %. Критическая степень осадки на проверенных образцах почти не зависит от степени сфероидизации.

Полученные результаты подтверждаются исследованиями других авторов, которые отмечают, что для сталей с низким содержанием углерода сфероидизация практически неэффективна и положительное влияние ее возрастает с ростом содержания углерода.

Для стали марки 35 сфероидизация структуры зернистого перлита снижает прочностные свойства и твердость на 20-25 % и повышает пластические свойства: удлинение – на 45 % и сужение – на 11 %. Критическая степень осадки при этом изменяется существенно, с 82 до 91 %.

Еще большее влияние сфероидизация оказывает на пластические свойства стали марки 40Х. Термообработка исходной сорбитообразной структуры на зернистый перлит понижает прочность и твердость стали на 30 – 40 % и повышает относительное сужение на 34 – 100 %. Однако, критическая степень осадки при этом изменяется незначительно.

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод: чем больше содержание углерода в стали, тем более выражено положительное влияние сфероидизации на механические свойства.

Немаловажное влияние на прочностные и пластические характеристики стали оказывает величина аустенитного зерна, которая в соответствии с требованиями не должна превышать 5 – го номера.

Проведенные исследования показали (см.табл. 1), что увеличение аустенитного зерна приводит к снижению прочностных характеристик как низкоуглеродистых (10КП, 20), так и среднеуглеродистых марок стали. Что касается относительного удлинения, то у низкоуглеродистых сталей оно остается без изменения, а у стали 40Х даже снижается и только у стали 35 установлено некоторое повышение пластичности. Зависимость относительного сужения от величины аустенитного зерна не проявляется существенным образом.

Таблица 1 – Влияние величины аустенитного зерна на механические свойства стали

Величина аустенитного зерна, балл	Механические свойства				Критическая степень осадки, %
	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	НВ	
СТАЛЬ 10КП					
7	400	40	70	116	89
6-7	380	44	70	96	87
6	370	42	72	99	86
5-6	360	42	74	100	87
4-5	340	42	72	99	86
3-4	320	41	74	96	86
СТАЛЬ 20					
6-7	410	42	65	121	84
5-6	400	38	66	116	85
4-5	390	43	66	121	85
3-4	370	52	66	111	84
3-4	342	53	66	111	84
СТАЛЬ 35					
5-6	425	36	69	121	86
5-6	405	36	72	111	86
4-5	390	30	72	121	89
4-5	370	28	73	103	89
3-4	365	38	73	111	88
СТАЛЬ 40X					
6-7	565	24	67	141	80
5-6	558	24	68	129	80
5	561	24	67	126	81
4-5	475	23	69	118	82

Для низкоуглеродистых марок стали критическая степень осадки с ростом зерна остается на том же уровне или же несколько падает, как, например, для стали 10КП. В то же время для стали 35 и 40X отмечено незначительное повышение критической степени осадки.

Немаловажное влияние на пластические свойства стали оказывает величина самого зерна перлита в сфероидизированной структуре. Исследования проводились для стали 35. Образцы подвергались предварительно закалке, а затем сфероидизации при 700⁰ С в течение 2-12 часов.

Рост зерна способствует снижению прочностных свойств стали в 1,2 – 1,3 раза и повышению пластических свойств в 1,2 раза. Повышается также критическая степень осадки образцов с 84 до 89%.

ВЫВОДЫ

1. Из общего числа поверхностных дефектов на критическую степень осадки при холодной высадке влияют следующие характерные виды:

- волосовины и трещины с глубиной залегания до 0,5 мм – 44,5 %;
- неметаллические включения с выходом на поверхность – 30,5 %;
- плены и закаты с глубиной залегания до 3 мм – 25 %.

2. Предельная глубина залегания дефектов для стали с осадкой по группе 75 составляет:

- волосовин и трещин – 0,04...0,08 мм;
- плен и закатов – 0,07...0,17 мм;
- не металлических включений – 0,09...0,16 мм.

3. На значительную часть поверхностных дефектов (75%) – волосовины, трещины и неметаллические включения основное воздействие оказывают способы выплавки и разлива стали; наиболее перспективным средством уменьшения количества указанных дефектов и их размеров является замена исходного слитка непрерывнолитой заготовкой.

4. Исследование свойств подката, полученного из непрерывнолитых заготовок стали марок 10, 20, 35, 45 показали лучшее качество подката по сравнению с другими традиционными технологиями его изготовления.

5. Влияние микроструктуры на пластические и прочностные свойства стали выражается в следующем:

– степень сфероидизации перлита играет существенную роль для среднеуглеродистых марок стали, за счет ее увеличения критическая степень осадки стали 35 может быть увеличена на 5...8 %, тогда как для стали 20 эта величина не превышает 3 %;

– величина аустенитного зерна существенно влияет только на прочностные характеристики стали всех марок;

– рост зерна перлита способствует снижению прочности и повышению пластичности (для стали 35 соответственно в 1,25 и в 1,2 раза).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борзенков, М.И. Исследование влияния качественных характеристик горячекатаного и калиброванного проката на способность металла к холодному выдавливанию и высадке крепежных изделий / М.И. Борзенков, И.М. Шумилин, В.Я. Осадчий, А.А. Мышечкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 11. – С. 12 – 14.

2. Борзенков, М.И. Выбор покрытий для защиты поверхности металла от обезуглероживания при нагреве стали / М.И. Борзенков, А.Ф. Трубицин // Гидродинамическая теория смазки – 120 лет: материалы международного научно-практического симпозиума – Орел: ОрелГТУ. – 2006. – С. 370 – 373.

3. Борзенков, М.И. Совершенствование технологии производства заготовок для изделий, получаемых холодной высадкой / М.И. Борзенков, А.Ф. Трубицин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №3 (281). – С. 61-64.

Борзенков Михаил Иванович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет - УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»
302020 г. Орел Наугорское шоссе, 29.
Тел. 8 (4862) 43-48-90
E-mail: bim@ostu.ru

Трубицин Александр Филиппович

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет - УНПК», г. Орел
Кандидат технических наук, профессор
302020 г. Орел Наугорское шоссе, 29.
Тел. 8 (4862) 43-48-90
E-mail: bim@ostu.ru

Мышечкин Алексей Александрович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Кандидат технических наук, доцент кафедры «ТИ-2»
107076, Стрoмынка, 20
Тел. 8 (495) 946-11-14

M.I. BORZENKOV, A.PH. TRUBICIN, A.A. MYSHECHKIN

STUDY OF THE FACTORS DETERMINING THE MAXIMUM DEGREE OF RAINFALL CALIBRATED ROLLED

This article presents the results of experimental research on the assessment of the impact of surface defects, chemical composition and structure of calibrated rolled steel for maximum degree of rainfall. Investigated low - and medium-carbon steel grades: 10, 10KП, 20, 20KП, 35.

Found that 44.5% of defects are volo-совины and cracks depth from 0,04 mm to 0.50 mm; 30,5% - non-metallic inclusions with the release to the surface and 25% - captivities and sunsets depth from 0.07 mm up to 3,08 mm. Determined allowable depth of surface defects. The best data have work-piece, received from непрерывнолитого metal. The influence of the microstructure of the material on the pre-upper limit of the degree of rainfall is expressed in the following: spheroidizing of perlite increases the critical degree of rainfall medium-carbon steels in 5...10%; growth of grain perlite contributes to the decrease in the strength and increase the critical degree of rainfall.

Keywords: calibrated hire, low - and среднеуглеродистые steel, the degree of rainfall, surface defects.

BIBLIOGRAPHY

1. Borzenkov, M.I. Issledovanie vlijaniya kachestvennyh harakteristik gorjachekatanogo i kalibrovan-nogo prokata na sposobnost' metalla k holodnomu vydavlivaniyu i vysadke krepezhnyh izdelij / M.I. Borzenkov, I.M. Shumilin, V.Ja. Osadchij, A.A. Myshechkin // Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. – 1966. – № 11. – S. 12 – 14.
2. Borzenkov, M.I. Vybor pokrytij dlja zavity poverhnosti metalla ot obezuglerozhivaniya pri na-greve stali / M.I. Borzenkov, A.F. Trubicin // Gidrodinamicheskaja teorija smazki – 120 let: materialy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma – Orel: OrelGTU. – 2006. – S. 370 – 373.
3. Borzenkov, M.I. Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva zagotovok dlja izdelij, poluchaemyh holodnoj vysadkoj / M.I. Borzenkov, A.F. Trubicin // Fugdamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – №3 (281). – S. 61-64.

Borzenkov Mihail Ivanovich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Candidate of technical sciences, associate professor, chair “Autoplast”
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-43-48-90
E-mail: bim@ostu.ru

Trubicin Aleksandr Philippovich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Candidate of technical sciences, professor
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 8-4862-43-48-90
E-mail: bim@ostu.ru

Myshechkin Aleksey Aleksandrovich

Moscow state university of instrument engineering and informatics
Candidate of technical sciences, associate professor, chair “TI-2”
107076, Moscow, Stromynka, 20
Tel. 8-495-946-11-14

А.И. КОПТЕВ, А.В. КУЗОВКИН

РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДОМ-ПРОВОЛОКОЙ

В работе рассмотрено проектирование технологических режимов и технологий, обеспечивающих получение требуемой точности профиля на примере изготовления режущих частей зуборезного инструмента и зубчатых колес из сталей и твердых сплавов.

Ключевые слова: технологические режимы, зуборезный инструмент, зубчатые колеса.

В условиях гибкоструктурного производства требуется универсальный инструмент, позволяющий обрабатывать детали различного профиля путем программирования подачи оборудования. Одним из таких инструментов является непрофилированный проволоочный электрод, применяемый на электроэрозионных станках, которые в шестидесятые годы прошлого века были созданы в России, долгое время выпускались станкостроительными заводами страны, а в настоящее время производятся в основном фирмами Швейцарии, Японии, Испании, Германии.

Точность получения деталей на этом виде оборудования во многом зависит от характеристик электрода-инструмента, определяющих выбор или расчет технологических режимов. Здесь на точность контура, получаемого при разделении материалов, значительное влияние оказывает выбор проволоки и ее износ за счет электроэрозионной составляющей процесса. Большинство оборудования с непрофилированным электродом использует в качестве инструмента латунную проволоку диаметром от 0,1 до 0,3 мм, которая в процессе работы изнашивается и приобретает каплевидную форму (рис. 1).

На большинстве зарубежных станков используется, наряду с однослойной [1], многослойная проволока [2], где в качестве покрытия применяют цинк, кадмий и другие термоактивные материалы, способные за счет кумулятивного эффекта до 10 раз ускорять процесс обработки на электроэрозионном и комбинированном оборудовании. При этом (рис. 1) происходит износ проволоки в направлении рабочей подачи и с боковых сторон. Изменение размеров H_1 и k_2 (рис. 1) не сказывается на точности детали, а боковой износ вызывает снижение ширины прорезаемого паза и погрешность обработки (δ).

Для однослойной проволоки можно принять

$$\delta_1 = \frac{d_{np} - H_1}{2} + S_1, \quad (1)$$

где d_{np} – исходный диаметр электрода-проволоки;

H_1 – размер сечения проволоки и выхода из зоны обработки;

S_1 – межэлектродный зазор, по [1] для однослойной проволоки диаметром 0,1 - 0,3 мм, его расчетная величина составляет 0,013 - 0,015 мм для стальных и 0,015 - 0,018 мм для твердосплавных деталей.

Для диапазона толщин до 40 мм в [1] приведены эмпирические зависимости для расчета боковых межэлектродных зазоров при обработке сталей (2) и твердых сплавов (3)

$$S_1 = K_1 C_1^{1/4} U_1^{2/3} (1 + 0,014 H_3) \quad (2)$$

$$S_1 = K_2 C_2^{1/4} U_2^{2/3} (1 + 0,014 H_3) \quad (3)$$

Здесь численные коэффициенты: $K_1 = 0,535$; $K_2 = 0,62$; C – емкость конденсаторов при RC-схеме генератора; U – напряжение на электродах (для электроэрозионных станков $U = 90 - 120$ В, при комбинированной эрозионно-химической обработке - 60 - 80 В); H_3 – толщина заготовки.

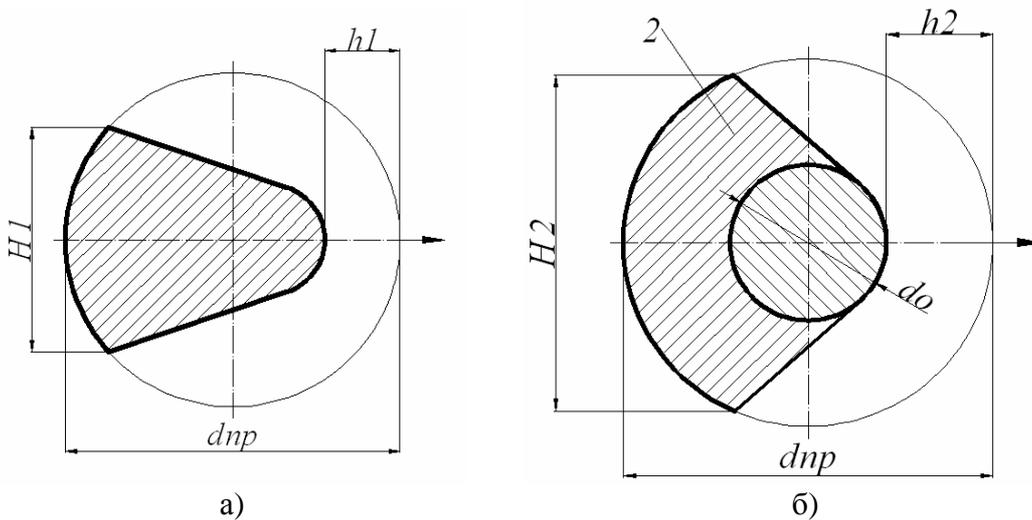


Рисунок 1 – Сечение проволочного электрода-инструмента на выходе из зоны обработки
 а) электрод без покрытия, б) двухслойный электрод;
 1 - силовая проволока, 2 - термоактивное покрытие; стрелками показано направление рабочей подачи электрода-инструмента

От формы сечения электрода-проволоки зависит точность разделения материала, что следует учитывать в технологическом процессе при расчете траектории перемещения инструмента.

Однослойной проволокой обрабатывают детали из стали и твердых сплавов. В последнем случае погрешность (δ_2) можно рассчитать по зависимости, аналогичной (1).

В случае многослойной проволоки на металлическую (обычно латунную) основу 1 (рис. 1, б) наносят один (2 на рис. 1, б) или несколько слоев других материалов. В России известен метод нанесения одного слоя из цинка (рис. 1, б), обладающего способностью быстро загораться в зоне эрозионного импульса и создавать кумулятивный эффект, расплавляющий и удаляющий значительную часть материала заготовки в зоне обработки. Это может объяснить увеличение интенсивности процесса, хотя по [2] при использовании двухслойного инструмента повышается высота микронеровностей в зоне разделения заготовки. В [2] показано, что даже при использовании проволоки с цинковым покрытием можно добиться приемлемой чистоты поверхности с сохранением высокой скорости разрезания сплавов.

Погрешность обработки двухслойной проволокой может быть оценена по зависимости (4)

$$\delta_2 = \frac{d_{np} - H_2}{2} + S_2, \quad (4)$$

где H_2 в первом приближении можно принять равной диаметру d_0 силовой проволоки, а $S_2=S_1$

Тогда

$$\delta_2 = \frac{d_{np} - d_0}{2} + S_1, \quad (5)$$

Для протекания стабильного электроэрозионного или комбинированного процесса необходимо, чтобы по всей высоте заготовки на силовой проволоке 1 (рис. 1) оставалось покрытие 2, которое может устраниваться за счет износа не ранее, чем проволока выйдет из зоны обработки, как это показано на рисунке 1, б. Поэтому скорость перемотки многослойной проволоки, как правило выше, чем однослойной и рассчитывается (в зависимости от материала заготовки, ее толщины и слоя покрытия) с учетом полного удаления покрытия 2 на рисунке 1, б.

При расчете режимов обработки целесообразно применять диаметр проволоки после обработки заготовки эквивалентным ($d_{экв}$) параметру для круглого сечения, имеющего площадь сечения изношенной проволоки, приведенной на рисунке 1.

По [1] проволока может быть нагартованной (твердой, упругой) или мягкой (например, после отжига в защитной среде). В зависимости от этого для стабильного протекания процесса обработки в процессе перемотки проволоку следует растягивать с силой P_1 , достаточной для ее выпрямления и устойчивости под действием импульсов разрядов в рабочей зоне.

Для твердой однослойной проволоки

$$P_1 = P_{11} + P_{12} + P_{13}, \quad (6)$$

где P_{11} – сила натяжения проволоки, компенсирующая ее массу, трение, случайные факторы;

P_{12} – сила, нейтрализующая упругие составляющие, вызывающие изгиб, закрутку проволоки в состоянии хранения;

P_{13} – сила, необходимая для противодействия потере прямолинейности инструмента под действием разрядов высокой энергии с учетом возможности появления множества импульсов, создающих силы в различных направлениях за время каждого колебания струны.

В случае мягкой проволоки (применяется весьма редко) сила P_{12} может не учитываться и формула (6) примет вид

$$P_1 = P_{11} + P_{13}. \quad (7)$$

Расчеты по зависимостям (6) и (7) позволили установить силу, используемую для натяжения проволоки в начале обработки (рис. 2). Как видно из этого рисунка расчетные результаты достаточно точно (расхождение 6 - 10 %) совпадают с экспериментальными данными.

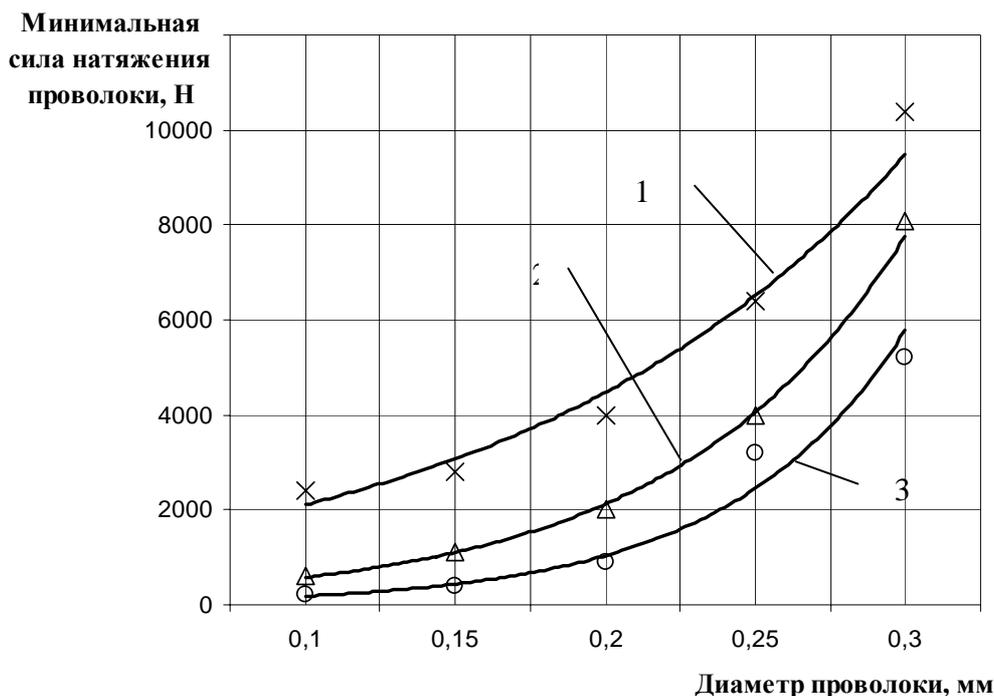


Рисунок 2 – Расчетные и экспериментальные данные о минимальном натяжении латунной проволоки-электрода различного диаметра
 1 - проволока с покрытием цинком (толщина покрытия 0,04 - 0,06 мм);
 2 - однослойная твердая проволока; 3 - однослойная мягкая проволока

Предельное сечение твердой проволоки из известного материала может быть оценено через площадь сечения силовой части, достаточной для противодействия обрыву. Для однослойной проволоки площадь сечения после износа (F_{ko}) составляет

$$F_{ko} = \frac{P_1}{k_o \cdot \sigma_g}, \quad (8)$$

где σ_g – предел прочности материала проволоки на растяжение;

k_o – коэффициент запаса прочности материала (неоднородность свойств, местные концентраторы напряжений и др.); коэффициент k_o имеет значение 0,8 - 0,9.

Отсюда эквивалентный диаметр ($d_{э\kappa\upsilon}$) на выходе из зоны обработки

$$d_{э\kappa\upsilon} = 2 \sqrt{\frac{P_1}{\pi \cdot k_o \cdot \sigma_\epsilon}} \quad (9)$$

Для двухслойного инструмента можно принять

$$F_{\kappa\delta} = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4} + d_o \cdot h_2.$$

При этом увеличенная площадь сечения (рис. 1, б) за счет части покрытия дает повышенный запас прочности (величина $k_o = 0,9 - 1,0$).

Если принять, что силовое натяжение проволоки определяется только ее диаметром (d_o), то

$$d_o = \frac{-\sigma_\epsilon + 2\sqrt{\sigma_\epsilon^2 k_o^2 + 4P_1 \sigma_\epsilon k_o (\pi - 1)}}{4(\pi - 1)\sigma_\epsilon}. \quad (10)$$

Износ проволоки можно установить через относительный расход (при известной толщине заготовки) (рис. 3). Здесь экспериментальные значения для однослойной проволоки при обработке твердых сплавов (кривые 1 и 2) имеют значительные расхождения (до 1,5 раз), что может быть объяснено неоднородностью структуры и высокой температурой плавления металллокерамических сплавов. Для такого случая имеет смысл воспользоваться экспериментальными данными, т.к. запас прочности инструмента (k_o в выражении (8)) не превышает 20%. В остальных случаях (рис. 3) можно использовать расчетные значения для оценки износа (γ , %). Тогда в первом приближении для однослойной проволоки величина сужения на сторону (Δl_1) при одинаковых межэлектродных зазорах

$$\Delta l_1 = \frac{d_{np} - d_{э\kappa\upsilon}}{2}. \quad (13)$$

В случае двухслойного инструмента

$$\Delta l_2 = \frac{d_{np} - d_{э\kappa\upsilon}}{2}. \quad (14)$$

При известной высоте (H_3) разделяемой заготовки скорость износа однослойной (индекс 1) и многослойной (индекс 2) на электрода-проволоки на сторону по [1] составит

$$Q_1 = \frac{1}{2} \gamma_1 \cdot k_{31} \cdot I_{\kappa 31} \cdot U_1 \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{1}{2} \gamma_2 \cdot k_{32} \cdot I_{\kappa 32} \cdot U_2 \quad (16)$$

где k_3 – коэффициент, учитывает свойства обрабатываемого материала, толщину заготовки, вид электрода-проволоки (рис. 4);

Q_1, Q_2 – соответственно площадь износа однослойной и многослойной проволоки;

$J_{\kappa 3}$ – ток короткого замыкания;

U – напряжение на электродах ($U_1 \approx U_2 = U$).

Рекомендации по выбору $J_{\kappa 3}$ и U приведены в [1, 2].

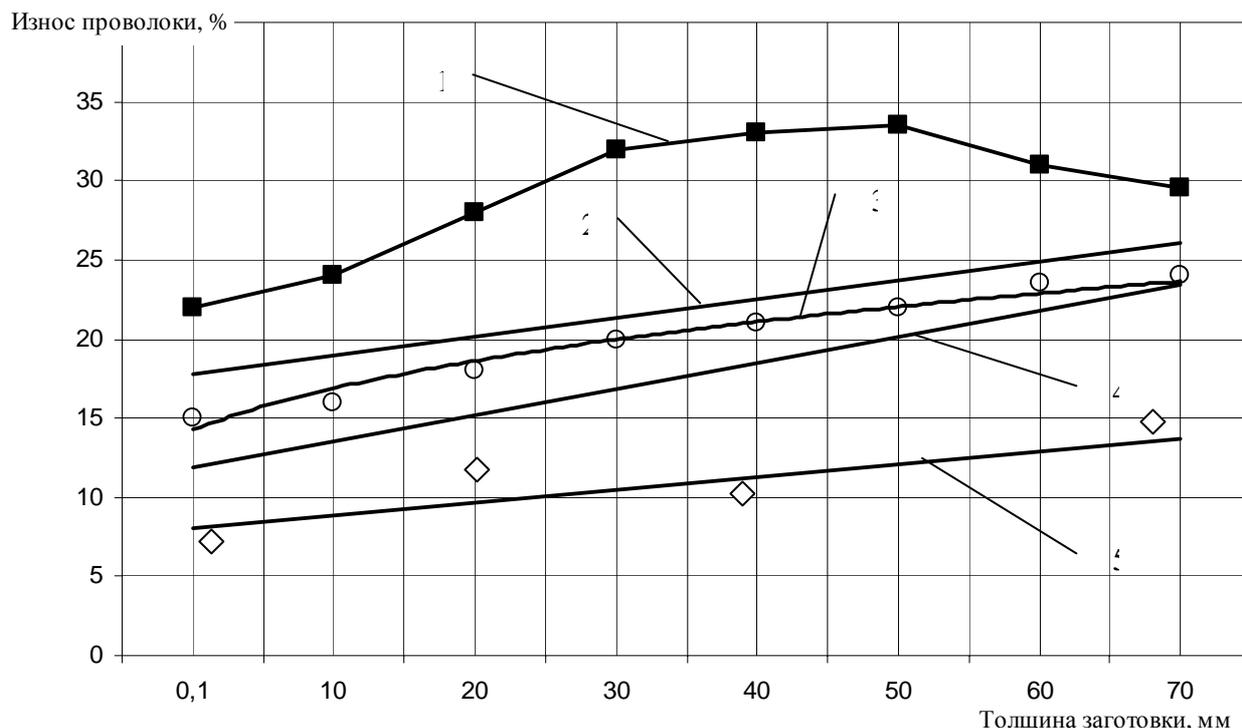


Рисунок 3 – Износ (отношение количества удаленного материала с электрода-проволоки к массе снятого с заготовки материала) инструмента от толщины разделяемой заготовки
 1 - экспериментальные показатели для твердого сплава; 2 - расчетные значения для твердого сплава;
 3 - экспериментальные показатели для инструментальной стали; 4 - расчетные значения при разделении заготовок из инструментальных сталей (1,2,3,4 - однослойный электрод-инструмент);
 5 - расчетные и экспериментальные (◊) значения для электрода-проволоки с $d_{np}=0,3$ мм; $d_o=0,2$ мм при двухслойной проволоке с покрытием цинком

Скорость продольного линейного усредненного износа проволоки относительно боковой поверхности реза при выходе из заготовки соответственно составляет

$$V_{n1} = \frac{\gamma_1 \cdot k_{з1} \cdot J_{кз1} \cdot U}{d_{np} - h_1}; \quad (17)$$

$$V_{n2} = \frac{\gamma_2 \cdot k_{з2} \cdot J_{кз2} \cdot U}{d_{np} - h_2}, \quad (18)$$

где $h_1 = d_{np} - d_{экс}$ и $h_2 = d_{np} - d_o$. Тогда:

$$V_{n1} = \frac{\gamma_1 \cdot k_{з1} \cdot J_{кз1} \cdot U}{d_{np} - d_{экс}} \quad (19)$$

$$V_{n2} = \frac{\gamma_2 \cdot k_{з2} \cdot J_{кз2} \cdot U}{d_{np} - d_o} \quad (20)$$

Время (τ), в течение которого происходит износ боковой поверхности проволоки на величину Δl_1 и Δl_2 (соответственно для однослойной и двухслойной проволоки)

$$\tau_1 = \frac{\Delta l_1}{V_{n1}} = \frac{(d_{np} - d_{экс})^2}{2(\gamma_1 k_{з1} \cdot J_{кз1} \cdot U)} \quad (21)$$

$$\tau_2 = \frac{\Delta l_2}{V_{n2}} = \frac{(d_{np} - d_o)^2}{2(\gamma_2 k_{з2} \cdot J_{кз2} \cdot U)} \quad (22)$$

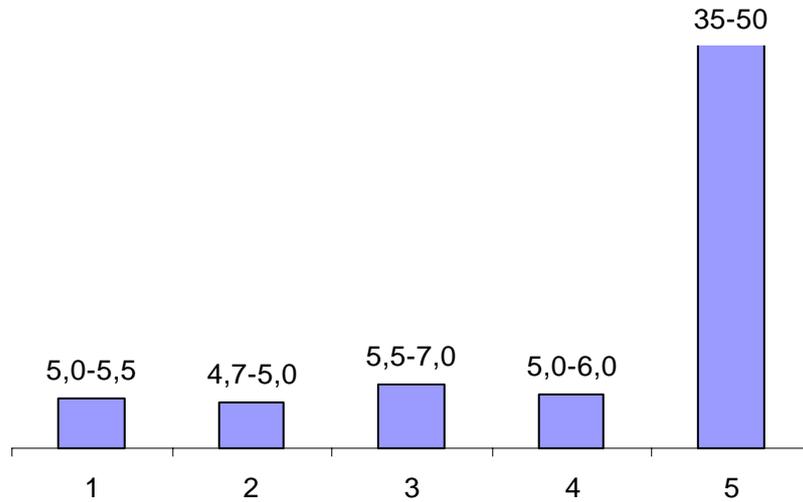


Рисунок 4 – К выбору коэффициента $k_3 \cdot 10^4$ (мм²/сек ВА)

1-4 - обработка однослойным электродом-проволокой; 5 - обработка двухслойным электродом-проволокой; 1- твердые сплавы вольфрамокобальтовой группы; 2- твердые сплавы титанокобальтовой группы; 3 - инструментальные стали; 4 - конструкционные стали; 5 - жаропрочные сплавы

За время τ_1 и τ_2 каждое сечение проволоки должно пройти расстояние, равное высоте заготовки H_3 . Тогда скорость перемотки проволоки

$$V_{np1} = \frac{H_3}{\tau_1} = \frac{2H_3(\gamma_1 k_{з1} \cdot J_{kз1} \cdot U)}{(d_{np} - d_{экв})^2} \quad (23)$$

$$V_{np2} = \frac{H_3}{\tau_2} = \frac{2H_3(\gamma_2 k_{з2} \cdot J_{kз2} \cdot U)}{(d_{np} - d_o)^2} \quad (24)$$

Расчеты, выполненные по зависимостям (23) и (24), достаточно точно (в пределах 5-10%) подтверждаются экспериментальными данными (рис. 5). Приведенные на рисунке 5 сведения позволяют выбрать наиболее экономичный режим расходования проволоки, особенно многослойной которая, в основном, закупается за рубежом, и ее стоимость на порядок выше отечественной однослойной такого же диаметра.

Как видно из зависимостей (23) и (24) с увеличением толщины заготовки минимальная скорость перемотки проволоки возрастает пропорционально изменению толщины H_3 (рис. 6).

Точность полученных деталей зависит от отклонений профиля обрабатываемой поверхности от чертежного размера, изменения точности сечений по высоте разрезаемой заготовки, возможностей сопряжения участков контура требуемым радиусом.

Для стабильного протекания процесса обработки требуется иметь постоянный диаметр проволоки (допуск на диаметр не более ± 5 мкм). При использовании отечественного инструмента приходится устанавливать на станках калибрующие фильеры, что вызывает необходимость увеличения минимальной скорости перемотки проволоки до величины, обеспечивающей ее прочность на разрыв (как правило, рост скорости не превышает 20% от величины, приведенной на рис. 5). Тогда погрешность профиля детали за счет изменения диаметра проволоки не проявляется, хотя потребуются дополнительные затраты на инструмент.

Снижение величины H_1 или H_2 (рис. 1) вызывает появление уклона боковых стенок паза, что может выйти за пределы допуска на изменение размера по высоте детали. Так для мелкозубчатых колес с эвольвентным профилем кинематическая точность ограничена допуском (в зависимости от степени точности колес) от 3 до 10 мкм. В зависимости от высоты детали, в первом приближении оцениваемой толщиной заготовки H_3 (рис. 6), отклонение по ширине паза на сторону (Δl_1 или Δl_2) может достигать 0,15-0,2 мм, что без учета угла уклона α (рис. 6) не позволяет получить качественные зубчатые колеса. Еще более же-

сткие требования предъявляются к зуборезному инструменту (например, мелко модульным долбякам), где допуски на размеры значительно ниже величин Δl_1 (Δl_2) на рисунке 6 и требуется последующая обработка, вызывающая дополнительные затраты и сложности с поддержанием точности профиля (особенно для твердосплавного инструмента).

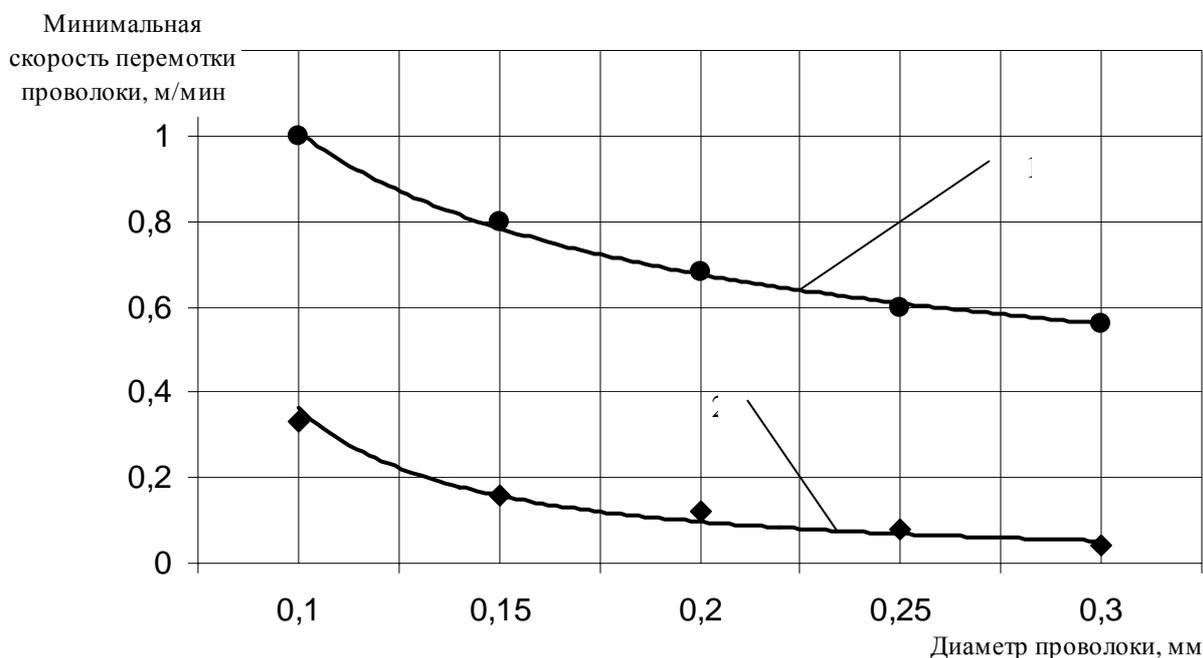


Рисунок 5 – Минимальная скорость перематывания латунной проволоки-электрода
 (материал заготовки - твердый сплав, толщина заготовки 40 мм, проволока твердая)
 1 - двухслойная проволока с цинковым покрытием толщиной до 50% диаметра проволоки;
 2 - однослойная проволока

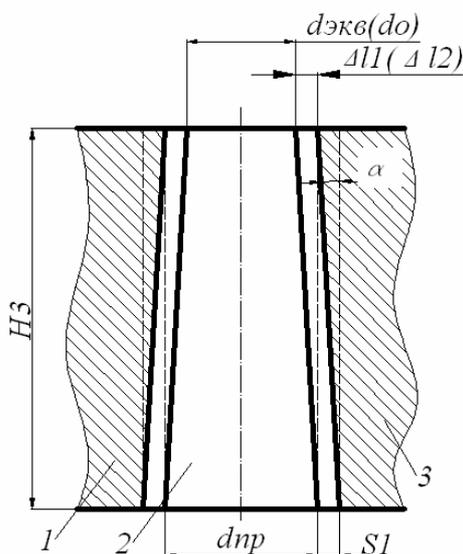


Рисунок 6 – К расчету углового положения боковой поверхности разделенной заготовки
 1 - отход материала; 2 - сечение проволоки-электрода перпендикулярно поверхности разделения заготовки;
 3 - деталь; (пунктиром показаны контуры электрода-проволоки и зоны разделения материала без учета износа инструмента)

На погрешность эвольвенты зубчатых профилей оказывает влияние нестабильность электрических параметров режима электроэрозионной или комбинированной обработки. Так колебания напряжения сети по [1] вызывают дополнительную погрешность до $\pm 50\%$ от номинала за счет изменения величины зазоров (S_1). Обычно общая погрешность обработки эвольвентного профиля твердосплавных и стальных зубчатых колес не выходит за границы

$\pm 6-7$ мкм. Для устранения влияния электрических режимов на точность обработки станки нового поколения оснащаются стабилизаторами тока и напряжения.

В имеющихся станках для обработки проволочным электродом, как правило, имеется координата, изменяющая наклон стенок паза по высоте заготовок (на рис. 6 угол α). При известных Δl_1 (Δl_2) (см. зависимости 13 и 14) можно рассчитать угол α .

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta l_1(\Delta l_2)}{H_3} \quad (25)$$

Величина α составляет для однослойной проволоки от 1'15" до 1'30" (для твердосплавных заготовок) и до 2 угловых градусов для сталей. Для двухслойной проволоки угол уклона возрастает на 15-20%.

При обработке сложных профилей деталей требуется обеспечить сопряжение поверхностей требуемым радиусом. Величина радиуса зависит от начального диаметра проволоки и размеров ее скругления со стороны подачи инструмента (рис. 1). На рисунке 7 показан наименьший радиус скругления прямого угла на выходе проволоки из детали при минимальной площади ее сечения, оцениваемой прочностью на растяжение изношенного инструмента (находится через $d_{экр}$ (формула 9) и d_o (выражение 10)). Для двухслойной проволоки (рис. 7, кривая 1) минимальный радиус скругления определяется диаметром d_o и величиной боковых зазоров (S_1 на рисунке 6).

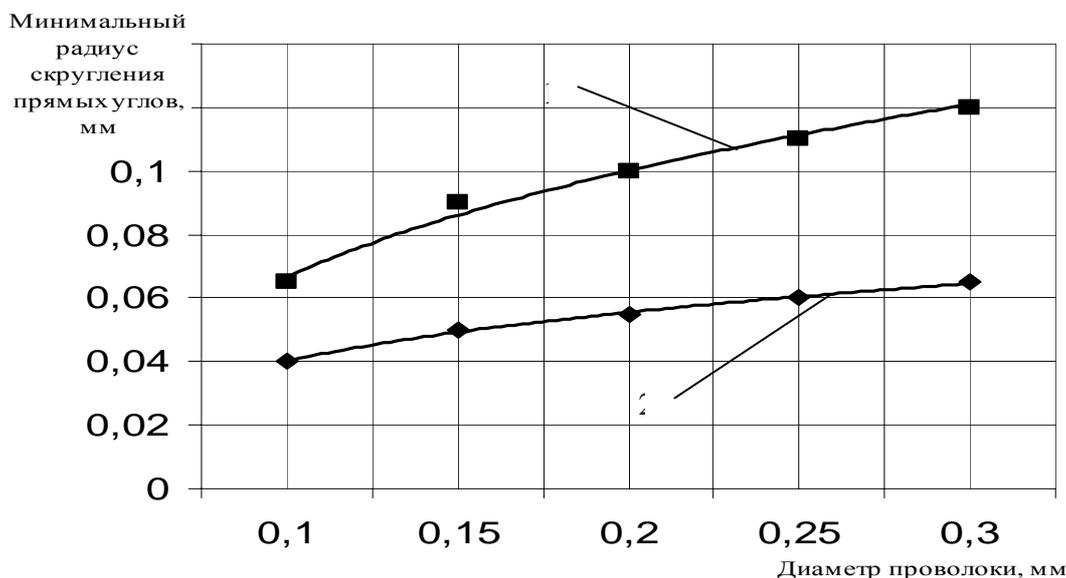


Рисунок 7 – Минимальный радиус скругления при сопряжении внутренних углов латунной проволокой на выходе из зоны обработки

1 - двухслойная проволока с покрытием; 2 - однослойная проволока

При изготовлении профилей наукоемких изделий наибольшую сложность представляет получение мелкозубчатых колес и инструмента (долбяков) для их обработки (в том числе из твердого сплава).

При соблюдении предложенных технологических режимов и методов повышения точности профиля можно обеспечить точность профиля в пределах ± 3 мкм (при высоте заготовки до 50 мм), что реально для современного автоматизированного оборудования, имеющего достижимую точность в указанных пределах.

При проектировании технологического процесса следует учитывать технологические показатели процесса:

погрешность

- обработка однослойной проволокой - от ± 3 мкм;
- двухслойной и многослойной проволокой - от ± 5 мкм;

шероховатость R_a , мкм

- твердосплавных заготовок - 0,32-0,63;

- конструкционных сталей -0,63-1,25;
- расход материала инструмента в % от объема снятого металла - 10-30.

Исследования, приведенные в [1 и 2] показали, что даже твердосплавный инструмент с эвольвентным рабочим профилем, полученным проволочным электродом, не требует дополнительной механической обработки (притирки, чистового шлифования и др.) с целью повышения его эксплуатационных характеристик и через короткое время работы имеет шероховатость в 2 раза ниже исходной не вызывая при этом дополнительных погрешностей.

Технологические возможности рассматриваемого процесса значительно лучше, чем у базовых вариантов механической обработки. Что особенно заметно проявляется при изготовлении зуборезных твердосплавных инструментов. Кроме того, обработка не профилированным проволочным электродом может выполняться в промышленной воде, где за счет появления электрохимической составляющей комбинированного процесса значительно интенсифицируется удаление припуска, особенно углеродистых инструментальных сталей.

ВЫВОДЫ

1. Впервые обоснована возможность окончательной чистовой обработки эвольвентных профилей из сталей и твердых сплавов непрофилированным проволочным электродом-инструментом без его покрытия или с нанесенным слоем термоактивного материала.

2. Рассмотрены предельные значения технологических режимов, обеспечивающие получение качественных деталей, в том числе с эвольвентным профилем, при минимизации затрат на инструмент, оборудование и оплату труда.

3. Показаны перспективы реализации рассматриваемого метода в условиях гибкоструктурного производства при использовании автоматизированных средств технологической подготовки производства.

4. Уменьшение (в ряде случаев исключение) потребности в быстроизнашивающемся абразивном инструменте для чистовой обработки эвольвентных профилей устраняет загрязненность окружающей среды абразивной пылью и улучшает условия работы исполнителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев, В.П. Изготовление инструмента непрофилированным электродом / В.П. Смоленцев. – Машиностроение. – 1967. – 160 с.
2. Коденцев, С.Н. Механизм протекания процесса эрозионно-термической обработки деталей / С.Н. Коденцев // Нетрадиционные методы обработки: сб. научных трудов. М: Машиностроение. – 2009. – вып.9. – С. 130-138.

Кузовкин Алексей Викторович

Воронежский государственный технический университет
Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской Академии космонавтики,
зав. кафедрой «Графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне»
Тел.: 8 (473) 254-57-84
E-mail: akuzovkin@mail.ru

Коптев Александр Иванович

Воронежский государственный технический университет
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Тел.: 8 (473) 254-57-84
E-mail: akuzovkin@mail.ru

A.I. KOPTEV, A.V. KUZOVKIN

MODES OF THE ELECTROEROSIVE AND COMBINED PROCESSING BY THE ELECTRODE-WIRE

In work designing of technological modes and the technologies providing reception of demanded accuracy of a cross-section on an example of manufacturing of cutting parts зуборезного of the tool and tooth gears from steels and firm alloys is considered

Keywords: *technological modes, зуборезный the tool, tooth gears.*

BIBLIOGRAPHY

1. Smolencev, V.P. Izgotovlenie instrumenta neprofilirovannym jelektrodom / V.P. Smolencev. – Mashinostroenie. – 1967. – 160 s.
2. Kodencev, S.N. Mehanizm protekaniya processa jerozionno-termicheskoy obrabotki detalej / S.N. Kodencev // Netradicionnye metody obrabotki: sb.nauchnyh trudov. M: Mashinostroenie. – 2009. – vyp.9. – S. 130-138.

Kuzovkin Aleksey Viktorovich

Voronezh state technical university

Doctor of technical sciences, professor, corresponding member of Russian Academy of cosmonautics

Head of chair “Graphics, design and information technologies in industrial design”

Tel. 8-473-254-57-84

E-mail: akuzovkin@mail.ru

Koptev Aleksandr Ivanovich

Voronezh state technical university

Post-graduate student, chair “Mechanical-engineering technology”

Tel. 8-473-254-57-84

E-mail: akuzovkin@mail.ru

УДК 621.7.57

А.А. МАЛИКОВ, И.В. ГРИГОРОВ, А.С. ЯМНИКОВ

МЕХАНИЗАЦИЯ ПРИГОНОЧНЫХ РАБОТ ПРИ СБОРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

В статье приводится пример замены ручной пригонки ударного устройства строительного-монтажного пистолета на механизированную. Отмечается, что при правильно спроектированной технологической оснастке и верно рассчитанных размерных цепях производительность повышается вдвое.

Ключевые слова: сборка, пригонка, механизация, ударное устройство, трудоемкость.

Качество машин, а, следовательно, их конкурентоспособность значительно зависят от качества сборки. Качество машин характеризуется системой показателей и регламентируется системой стандартов (ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ 23660-79, ГОСТ 14.203-83, РД 50-635-87). К ним относятся эксплуатационные показатели (технический уровень машины, ее надежность, эргономическая характеристика), экономические показатели (капиталовложения в производство и эксплуатацию машины, себестоимость изготовления машины).

Одним из важнейших показателей качества, обеспечение которого зависит от технологии изготовления машины, является точность ее изготовления. На соответствие этого показателя служебному назначению машины следует обратить внимание в первую очередь.

Сборочные процессы имеют большое значение в работе машиностроительного предприятия. Трудоемкость узловой и общей сборок составляет в среднем около 30 % всей трудоемкости изготовления машин. В массовом и крупносерийном производствах эта доля меньше, а в индивидуальном и мелкосерийном, где выполняется большой объем пригоночных работ, трудоемкость сборки достигает нередко 45...50 %.

За последние годы относительная трудоемкость сборочных процессов неуклонно растет в связи с тем, что способы получения заготовок и механической обработки совершенствуются более быстрыми темпами. Весьма высокая себестоимость сборочных работ обусловлена преобладанием на сборке ручного труда и использованием рабочей силы высокой квалификации. В сборочном производстве применение средств механизации пока намного меньше, чем на других этапах изготовления машин, а применение автоматизации составляет лишь около 6 % сборочных операций.

При сборке изделий (узлов), имеющих несколько выходных характеристик, применяют пригоночные работы, выполняемые слесарями-сборщиками высокой квалификации. Сборочные операции с ручными пригоночными работами трудоемки, так как требуемая точность выходных характеристик достигается в процессе многократных последовательных пробных съемов компенсационного слоя. После съема каждого пробного слоя производится сборка, узла для промера контрольных размеров. Промежуточные сборки-разборки узла являются основной причиной длительного выполнения сборочной операции. Пригоняемые детали имеют повышенную твердость (HRC 46...48), так как после пригонки термообработка не допускается во избежание потери достигнутой точности вследствие температурных деформаций детали. Обработка деталей повышенной твердости напильником требует больших физических усилий от слесаря. Кроме того, сборочные операции с ручными пригоночными работами невозможно точно пронормировать, так как длительность каждого рабочего приема зависит от субъективных особенностей слесаря-сборщика.

Применение поточной сборки связано с выполнением определенных требований, которые не ограничиваются устройством конвейера или поточной сборочной линии, а распространяются на все предшествующие этапы производственного процесса. На линии поточной сборки не должны иметь место пригоночные работы. Если пригонка технологически неизбежна,

на, то она выносится в механические цехи, а детали после пригонки в спаренном виде поступают на сборку.

Станочный съём компенсационного слоя производится за один проход режущего инструмента в противоположность ручной пригонке, которая выполняется за несколько приемов, разделенных сборками и разборками узла для проверки контрольных размеров. Станочный съём компенсационного слоя предусматривает лишь одно предварительное измерение фактических размеров части деталей сборочного комплекта, необходимых для наладки станочной установки. Таким образом, переход к станочному съёму компенсационного слоя позволяет регламентировать все элементы сборочной операции и дает точное и обоснованное нормирование трудозатрат. В результате использования станочного съёма компенсационного слоя за один проход режущего инструмента, исключая промежуточные сборки и разборки узла, значительно повышается производительность сборочной операции. Ранее подобные вопросы были рассмотрены в работах кафедры технологии машиностроения ТулГУ [1,2,3,4]. Задачи обеспечения точности сборки наиболее грамотно могут быть решены лишь на основе размерного анализа. С помощью размерного анализа можно выявить, степень рациональности методов достижения точности, заложенных в конструкцию машины.

Рассмотрим целесообразность замены ручных пригоночных работ станочным съёмом компенсационного слоя на примере сборки ударного устройства строительного монтажного пистолета ПЦ-52-1.

Согласно техническим условиям сборки узла (рис. 1) курок 3 при повороте относительно оси пальца 2 должен выходить за внутреннюю полость коробки 1 на размер $A_{\Delta} = 1,3_{-0,2}$ мм, являющийся замыкающим в размерной цепи:

$$A_{\Delta} = A_1 - A_2 + B_1 - B_2.$$

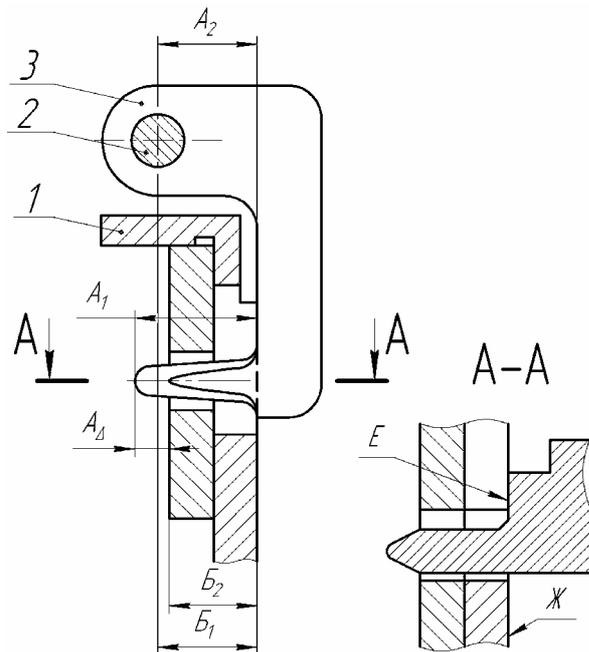


Рисунок 1 - Схема ударного механизма

Зазор между курком 3 и пальцем 2 вследствие малости во внимание не принимается. Средний допуск составляющих размеров для удовлетворения исходного условия

$$TA_{cp} = \frac{TA_{\Delta}}{4} = 0,05.$$

Практически этого трудно достичь, поэтому требуемая точность замыкающего размера достигается в результате припиловки поверхности E курка 3, соприкасающейся с поверхностью Ж коробки 2. Технические условия сборки требуют, чтобы прилегание контакти-

рующих поверхностей происходило не менее чем на 60 % площади их возможного соприкосновения. Это требование является второй выходной характеристикой собираемого узла. Одновременное достижение двух точностных характеристик увеличивает трудоемкость сборки.

В действующем производстве требуемые нормы размерной и контактной точности достигаются ручной припиловкой поверхности *E* курка 3.

На рисунке 2 приведена схема позиции для съема компенсационного слоя с курка, являющегося деталью - компенсатором.

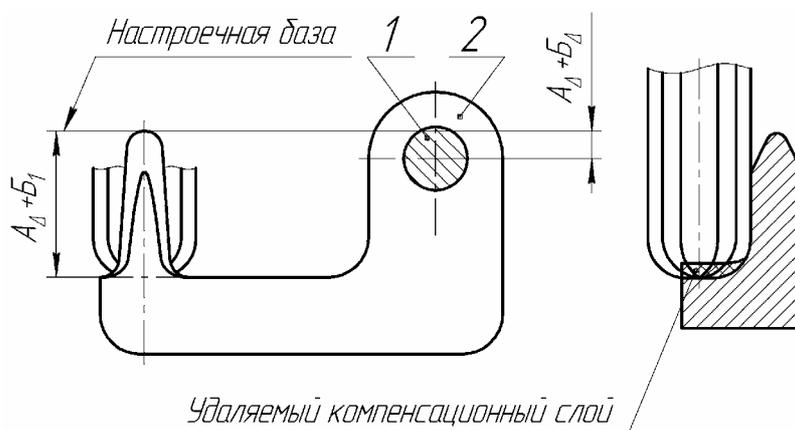


Рисунок 2 - Схема позиции механизированной пригонки

В качестве настроечной базы использована измерительная база собираемого узла. Уровень настройки режущего инструмента определяется как сумма замыкающего размера A_{Δ} и измеренной толщины коробки 2 - размера B_2 .

Положение установочного пальца 1 относительно настроечной базы определяется из размерной схемы узла суммой

$$A_{\Delta} + B_{\Delta},$$

где $B_{\Delta} = B_2 - B_1$;

B_1 - фактическая (измеренная) величина конструктивного размера (высоты) коробки 1 (см. рис. 1).

Таким образом, для наладки станочной установки требуется измерение двух фактических значений конструктивных параметров.

Эти элементы сборочной операции конкретны по характеру действий исполнителя работы и могут точно нормироваться. Станочный съем компенсационного слоя по приведенной схеме обеспечивает надежное прилегание обработанной поверхности к поверхности смежной детали.

Преимущество станочного съема компенсационного слоя перед ручной пригонкой в организационном плане становится очевидным при сопоставлении структуры и длительности элементов сборочной операции, выполняемой по сравниваемым вариантам.

При ручном съеме компенсационного слоя сборочная операция имеет следующую структуру:

1) предварительная оборка узла и ориентировочное определение величины компенсации (0,3 мин);

2) установка курка в тисках и первое опилование компенсационного слоя на 80 - 90 % от его объема (0,2 мин);

3) сборка узла, измерение замыкающего размера A_{Δ} , проверка (по копоту) относительной площади контакта поверхностей *E* и *Ж* и разборка узла (0,4 мин);

4) не менее чем двукратное повторение позиции 2 и 3, так как даже самые опытные слесари-сборщики достигают требуемой точности сборки после съема третьего пробного слоя металла. (1 мин);

5) окончательная сборка и контроль выходных характеристик узла (0,3 мин).

Общая длительность сборочной операции $T_{\Sigma p} = 2,2$ мин. При станочном съеме компенсационного слоя структура сборочной операции имеет следующий вид:

1) определение специальными измерителями конструктивных параметров узла, необходимых для настройки элементов станочной установки (0,2 мин);

2) настройка станочной установки и полный съём компенсационного слоя (0,7 мин);

3) сборка узла и контроль выходных характеристик узла (0,3 мин).

Общая длительность сборочной операции $T_{\Sigma ст} = 1,2$ мин.

Длительности элементов сборочной операции для анализа её структуры определены при хронометражных наблюдениях. Из сопоставления структур сравниваемых вариантов сборочной операции видно, что станочный съём компенсационного слоя обеспечивает почти двукратное повышение производительности труда при исключении ручных работ.

Кроме прочего, станочный съём компенсационного слоя позволяет организовать точную сборку, поскольку штучное время стабилизировано, а это, в свою очередь, дает организационные преимущества. Однако, станочный съём компенсационного слоя требует создания специальной технологической оснастки и передачи собираемого комплекта на механический участок. В конечном итоге, организатор производства вместе с технологом должны принять решение о типе пригонки с учетом серийности выпуска изделий и трудоемкости пригонки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Условие точного нормирования сборочных операций/ Н.Н. Шемарин, А.Ю. Мигай, А.П. Никифоров и др. / Исследования в области технологии машиностроения. Механическая обработка и сборка: Сб. научных трудов. Тула: ТПИ, 1984. - 191 с. С. 50-54.

2. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов/ А.С. Ямников, Ю.Н. Федоров, Г.М.Шейнин и др.; под ред. А.С. Ямникова. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. - 269 с.

3. Технология машиностроения. Специальная часть: учебник /М.Н. Бобков, Г.В. Гусев, А.Ю. Илюхин и др.; под ред. А.А. Маликова и А.С. Ямникова - Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. - 388 с.

4. Технология сборки машин: учебное пособие / Маликов А.А., Мигай А.Ю., Ямников А.С./под ред. А.А. Маликова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. - 127 с.

Маликов Андрей Андреевич

Тульский государственный университет, г. Тула

Доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Технология машиностроения»

Тел. (84872) 33-23-10

E-mail: andrej-malikov@yandex.ru

Григорьев Игорь Владимирович

Тульский государственный университет, г. Тула

соискатель кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (84872) 33-23-10

E-mail: tms@tsu.tula.ru

Ямников Александр Сергеевич

Тульский государственный университет, г. Тула

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Тел. (84872) 33-23-10

E-mail: Yamnikovas@mail.ru

A.A. MALIKOV, Y.W. GRIGOROV, A.S. YAMNIKOV

MECHANIZATION OF FITTING OPERATIONS AT ASSEMBLY PROCESSES

In a article the example of substitution of manual adjustment of the impact device of a construction pistol on the mechanised is reduced. It is marked that at correctly designed industrial equipment and truly calculated dimensional circuits capacity is doubled.

Keywords: assembly, adjustment, mechanisation, the impact device, labour input.

BIBLIOGRAPHY

1. A condition of exact rationing of assembly operations / of N. Shemarin, A. Migaj, A. Nikiforov, etc. / Probes in the field of technique of machine industry. Machining job and assembly: Сб. Proceedings. Tula: TPI, 1984. P. 50-54.
2. The fundamentals of technique of machine industry: the textbook for high schools / A. Yamnikov, U. Feodorov, G. Shejnin, etc.; under the editorship of A. Yamnikov. - Tula: Publishing house TulGU, 2006. - 269 p.
3. Technique of machine industry. A special part: the textbook / M. Bobkov, G. Gusev, A. Ilyukhin, etc.; under the editorship of A. Malikov and A. Yamnikov - Tula: Publishing house TulGU, 2010. - 388 p.
4. Technique of assembly of cars: the manual / A. Malikov, A. Migaj, A. Yamnikov /under the editorship of A. Malikov. Tula: Publishing house TulGU, 2011. - 127 p.

Malikov Andrey Andreevich

Tula state university, Tula

Doctor of technical science, head of department "Machine building technology"

Tel.: (84872) 33-23-10

E-mail: andrej-malikov@yandex.ru.

Grigorov Igor Wladimirovich

Tula state university, Tula

Postgraduate of department "Machine building technology"

Tel.: (84872) 33-23-10

E-mail tms@tsu.tula.ru

Yamnikov Aleksandr Sergeevich

Tula state university, Tula

Doctor of technical science, professor of department "Machine building technology"

Tel.: (84872) 33-23-10

E-mail: Yamnikovas@mail.ru

УДК 621.9.047.7

В.А. ФЁДОРОВ, В.В. ТРОФИМОВ

КОМБИНИРОВАННАЯ ОБРАБОТКА МИКРООТВЕРСТИЙ В ТВЁРДЫХ СПЛАВАХ

Микроотверстия являются элементами конструкций инструментов. Их получение представляет ряд сложностей. Технологическое армирование – новый метод обработки деталей из твёрдых сплавов. Он позволяет формировать микроканалы в порошковых материалах.

Ключевые слова: микроотверстия, твёрдые сплавы.

В машиностроении широко используются пористые детали-фильтры, служащие для доставки рабочих сред, хладагентов, лубрикаторов, топлива. Важным эксплуатационным показателем работоспособности таких узлов является пористость.

Полученные детали не обладают стабильно воспроизводимыми эксплуатационными свойствами. Это связано с несовершенством технологических процессов изготовления фильтров. Оно заключается в том, что при спекании удаляются частицы разрыхлителя, в роли которого используется парафин, двууглекислый аммоний, хлорное железо и другие материалы. Их выгорание обуславливает неупорядоченное образование пор, часть которых относятся к внутренним, не имеющим выхода на поверхность, а часть являются глухими – непроходимыми.

Эти каналы не участвуют в доставке жидкости в технологические зоны. Существующие методы оценки не позволяют адекватно прогнозировать свойства сквозных микрополостей, через которые поступает жидкость, что приводит к трудностям при проектировании и изготовлении узлов машин.

Возникает технологическая проблема, связанная с получением заданных характеристик изделий. Сложность заключается как в образовании миниатюрного канала значительной его протяжённости, так и в обеспечении механических свойствах порошковых материалов.

Анализ существующих технологических процессов показывает, что обработка резанием микроотверстий затруднена. Нетрадиционные методы формообразования по экспертным оценкам имеют ряд ограничений связанных с малой производительностью.

Использование технологического армирования [4] даёт возможность образовать поры с гарантированного диаметра и формы упорядоченным распределением по объёму изделия. Этот способ заключается в электрохимическом удалении вставок из сформированной заготовки. Недостатками этого технологического процесса является малое количество полученных каналов на единицу площади и их значительный размер, что сказывается на снижении пропускной способности – производительности и тонкости очистки.

При этом наблюдение за процессом формообразования затруднено. Судить о динамике выноса материала можно только по косвенным признакам, например по величине технологического тока и продолжительности воздействия.

Таким образом, требуется всесторонний анализ проблемы, включающий в себя рассмотрение вопросов получения заданных эксплуатационных характеристик типовых деталей, повышения производительности, создания математической модели с целью определения оптимальных технологических режимов и разработке контрольных операций. Заявленная задача относится перспективному направлению – микрообработке, которая интенсивно развивается в промышленно развитых странах. Как показывает опыт, она решается комплексно. Таким образом, следует рассмотреть последовательность изготовления, начиная с получения исходных материалов и заготовок.

Детали, содержащие микроканалы можно разделить на две группы: фильтры и предназначенные для доставки различных сред в рабочую зону, требуемые свойства могут достигаться снижением живого сечения канала вследствие седиментации фильтруемыми частицами или регулирования расхода жидкости за счёт гидродинамического сопротивления полостей сложной формы. Таким образом, в зависимости от назначения изделий могут использоваться отверстия в виде спирали, дуги и другие. С учётом возможных вариаций формы акту-

альными являются их геометрические размеры 100 – 1000 мкм, при соотношении L/D 100 – 200 и более.

Перспективным материалом для их изготовления является твёрдый сплав. Его применение даёт возможность использовать детали с порами в конструкциях режущего и деформирующего инструмента. В данном случае монолитные устройства не являются оптимальными, что связано с малыми размерами спекаемых изделий. Традиционно в инструменте размещаются вставки, закрепленные механически или пайкой.

При реализации способа обработки, основанного на технологическом армировании на стадии формирования порошковой композиции в заготовку внедряются удаляемые вставки, в последствии растворяемые с использованием электрохимических процессов. Производительность формообразования лимитируется накоплением продуктов анодного растворения в технологической зоне - канале.

В качестве интенсифицирующего воздействия используются ультразвуковые колебания. В условиях развитой кавитации у торца заготовки возникает звукокапиллярный эффект позволяющий производить доставку рабочей среды в протяжённый микроканал. Выбирая режимы работы технологической установки, добиваются, чтобы матрица из твёрдого сплава экранировалась пассивационными плёнками, что обеспечивает избирательность технологического воздействия [5].

Производительность формообразования может быть увеличена периодичностью воздействия упругих колебаний [6]. При этом, улучшается промывка межэлектродного зазора, которая производится в периоды между импульсами технологического тока.

Большую производительность обеспечивает обмена электролита при непрерывном воздействии ультразвука с перерывами в подаче технологического тока [3]. Перспективным путём решения данной проблемы является использование профилированного вращающегося катода-инструмента. Схема установки изображена на рисунке 1.

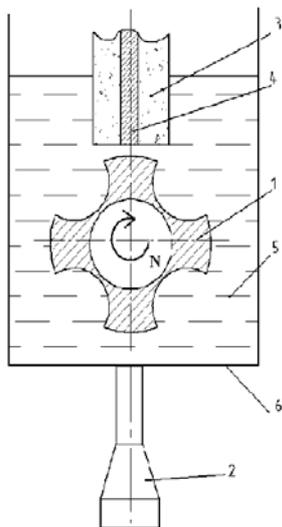


Рисунок 1 – Схема обработки с применением профилированного катода
 1-катод-инструмент; 2-ультразвуковой преобразователь; 3-матрица; 4-технологическая арматура; 5-электролит; 6-электролизёр

Ниже описаны рекомендации по проектированию технологических процессов. В качестве исходных компонентов при производстве однокарбидных твёрдых сплавов применяют оксиды вольфрама и кобальта.

Оксид вольфрама WO_3 получают прокаливанием технической вольфрамовой кислоты или паравольфрамата аммония. При этом получают частицы в диапазоне размеров от десятых долей микрометров до 10 – 15 микрометров. Исходный полуфабрикат – окись кобальта изготавливают прокаливанием оксолата – щавелево – кислой соли.

Следующим этапом является производство карбида вольфрама. Первоначально восстанавливают его оксид в атмосфере водорода. Полученный материал обладает большей пластичностью по сравнению с полученным углеродным восстановлением.

Технологический процесс получения деталей с микроотверстиями включает в себя электрохимическое селективное растворение технологической арматуры. В результате травлению подвергается внедрённая арматура. При этом основной материал защищается оксидной плёнкой, которая образуется при соответствующей разности потенциалов на электродах.

Обрабатываемость матрицы из твёрдого сплава зависит от количества дефектов кристаллической решётки выходящих на поверхность зёрен материала и площади поверхности кристаллов. Предпочтительно применение крупнозернистых порошков фазовые компоненты, которых имеют суммарную малую площадь поверхности.

Для их получения применяют прокаливание в один этап при повышенных температурах порядка 1200° С оксида вольфрама. При этом образуется смесь зёрен различных фракций:

- 25% - от 1 до 4 мкм.
- 10% - от 4 до 12 мкм.

10% - от 13 до 40 мкм.
остальные менее 1 мкм.

Восстановление кобальта производится в муфельной печи в атмосфере водорода при температуре 500 – 700° С в течение 4 – 5 часов. Полученные брикеты растирают и просеивают до получения частиц размерами 1- 5 мкм.

Получение карбида вольфрама заключается в науглероживания предварительно восстановленного порошка. Для этого его смешивают с сажей и смешивают в течение нескольких часов с применением стальных шаров.

Карбидизацию проводят в электропечах с продувкой водорода через печное пространство. При температуре 1300° С на поверхности зерна возникает фаза WC, которая диффундирует в внутрь с образованием W₂C.

Вследствие изменения структуры кристаллической решётки происходит уменьшение величины крупных фракций, что обуславливается растрескиванием зерна. Негативным фактором является наличие примесей магния, кальция, кремния. Повышение температуры прокаливания вызывает интенсивное удаление примесей из полуфабриката. Это увеличивает зернистость до 4 – 12 мкм., что в последствии благоприятно скажется при избирательном травлении.

Таким образом, предпочтительная температура при фазовых изменениях составляет 1800 - 1850° С или 2000 - 2200° С. Полученные брикеты карбида вольфрама дробят и размалывают в шаровых мельницах.

Существенное влияние на физические свойства оказывает процесс соединения исходных компонентов. Наибольшее распространение получило механическое смешивание. Для этого применяется совместный размол карбида вольфрама и металлического кобальта. Процесс сопровождается нежелательным измельчением зёрен исходных материалов входом дефектов кристаллов на поверхность.

Другой способ более предпочтителен. При его реализации используются химические реакции. Раствором солей кобальта заливают порошок карбида вольфрама. Затем производят выпаривание растворителя и прокаливание в водородной атмосфере.

Несмотря на усложнение технологического процесса, имеется ряд преимуществ заключающихся в том, что исходные материалы сохраняют свою структуру и не подвергаются механическому воздействию, сохраняя пластичность и соответственно способность к локализации при электрохимической обработке.

Важным этапом изготовления изделий с применением технологического армирования является размещение удаляемых вставок в теле матрицы. Сложность представляет локализация технологической арматуры при формовке заготовки.

По результатам экспертных заключений наиболее приемлемыми оказалось два способа формирования исходных деталей. Первый – шликерное литьё, которое производится без механического воздействия. При этом, возможна установка пространственно сложных конструкций арматуры. Недостатком в этом случае является повышенная пористость изделия, что не всегда приемлемо при изготовлении формообразующего инструмента.

Второй способ – прокатка, осуществляется с использование механического воздействия, что приводит к активации поверхности зёрен карбида и снижению избирательности анодного растворения. Тем не менее, таким образом, получают относительно простые по форме полуфабрикаты с удовлетворительными физико-механическими свойствами. При этом технологический процесс формирования может производиться непрерывно. Схема подготовки исходного полуфабриката приведена на рисунке 2.

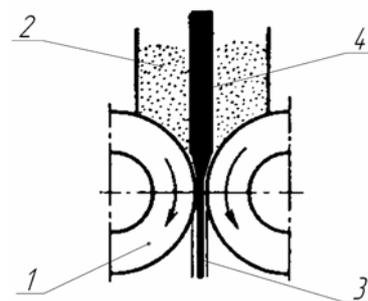


Рисунок 2 – Схема прокатки технологически армированной многослойной заготовки

1 - вальцы; 2-бункер с порошковой композицией 1; 3-полуфабрикат; 4-технологически армированная вставка

Как видно, что этот технологический процесс позволяет создавать многослойные конструкции. Поэтому предлагается процедуру внедрения технологической арматуры произво-

дить в два этапа. В начале исходная нихромовая проволока подвергается предварительной обработке: калибруется в волоках и для снятия внутренних напряжений отжигается, проходит очистку и правится.

После чего уложенную арматуру подвергают прокатке при температуре 40 - 50° С, в результате которой получают армированную ленту. В исходную смесь карбида вольфрама и кобальта добавляют избыточное количество пластификатора – 20 – 30%. В качестве его используется парафин. Такой состав исходных компонентов позволяет надёжно фиксировать вставки при дальнейших манипуляциях.

Полученные ленты укладывают слоями необходимой толщины и производят окончательную прокатку в горячем состоянии, в результате которой «сэндвич» запрессовывается между слоями основного материала. Разделение модулей предпочтительно производить на выходе алмазным диском с внутренней режущей кромкой, который применяются при разрезании кристаллов миросхем в радиоэлектронной промышленности. Такой инструмент обеспечивает малые силы резания и минимизирует смещение технологической арматуры и её распушку.

Прокатка часто совмещается со спеканием, что в данном случае нецелесообразно, так как коэффициенты температурного расширения материалов арматуры и матрицы значительно отличаются, что приводит к неизбежному браку, выражающемуся в растрескивании модуля из твёрдого сплава. Таким образом, температурному воздействию предшествует электрохимическая обработка.

Предварительно заготовка подвергается визуальному контролю. При этом выявляются дефекты в виде выкрашиваний, трещин и другие. Защищаются торцевые поверхности. Одна из них покрывается флюсом и облуживается мягким припоем. После чего к ней присоединяется токоподвод.

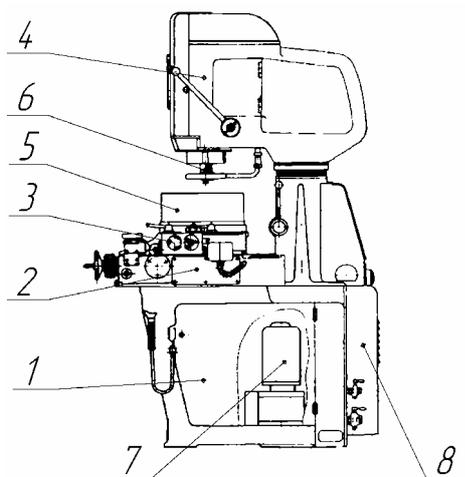


Рисунок 3 – Станок для комбинированной обработки

1-станина; 2-поперечный стол;
3-продольный стол; 4-бабка;
5- электролизёр;

6-магнотриксционный преобразователь; 7-помпа подачи рабочей среды;
8-электрооборудование

Модуль защищается изолирующим покрытием. После сушки слой, нанесённый на свободный торец, удаляется. После чего заготовки соединяются в пакет и скрепляются хомутиком. Полученную сборку устанавливают на паллету и закрепляют в рабочей зоне станка.

В качестве основного технологического оборудования применяется станок модели 4477 для комбинированной обработки. Общий вид изображён на рисунке 3.

Станок предназначен для прошивки отверстий с использованием ультразвуковых колебаний и применением свободного абразива и размерной электрохимической обработки. Компоновка станка включает источники питания и ультразвуковой преобразователь, установленный на вертикальной головке имеющей прецизионный привод.

Для выполнения поставленных задач требуется модернизировать технологическое оборудование. Ультразвуковой активатор вводится в электрохимическую ванну и там размещается вращающийся катод – инструмент.

Режимы: начальное значение плотности тока, напряжение, интенсивность и частоту ультразвуковых колебаний назначают в соответствии с рекомендациями полученными аналитически. Расчёты выполняются с использованием оригинальной программы. Она позволяет получать численные решения уравнений теплопереноса методом конечных разностей.

В результате получают поверхность в координатах «глубина канала» - «время формообразования» - «плотность технологического тока». На рисунке 4 изображено решение уравнения.

Полученное решение малоинформативно и неприемлемо для практического применения. Поэтому по контрольным точкам соответствующим фиксированным отношениям «глубина – время» строится кривая. Затем производится её экспериментальное подтверждение, используя регрессивный анализ, находится аналитическая зависимость (1) вида:

$$J = C \cdot e^{-At} \quad (1)$$

где J – плотность технологического тока;
 C – эмпирический коэффициент;
 A – эмпирический показатель степени;
 t – время.

Пример изображён на рисунке 5.

По завершении формообразования удаляют изоляционный слой и отделяют токоподвод. Полученные изделия перед спеканием подвергаются промывке и сушке. Очистку производят в ультразвуковой ванне в течение 20 – 30 минут в дистиллированной воде. Окончательно изделия промывают в среде из легкоиспаряющейся жидкости, например, смеси эфира и этилового спирта. Удаление остатков промывочных сред осуществляют в сушильном шкафу при температуре 40 - 50° С в течение 6 – 8 часов.

Спекание производится в один этап. Заготовки укладывают в «лодочки» с разделением смесью порошков оксида алюминия с графитом. Верхнюю засыпку делают толщиной 10 мм.

Сверху полуфабрикаты прикрывают графитовой пластиной и придавливают грузом, чтобы избежать деформации модулей. Продолжительность спекания 0,5 – 2,0 часа в зависимости от размера в среде водорода.

Температура 1480° С принимается несколько повышенной, так, как на некоторых стадиях подготовки исходных материалов приняты меры по снижению активности поверхности порошков, что снижает их способность образовывать соединения.

Технологический процесс спекания завершается очисткой изделий. После чего они передаются на контроль. Традиционно определяются механические характеристики: твердость, временное сопротивление при поперечном изгибе. Они связаны с состоянием внутренней структуры. Важной характеристикой определяющей свойства твёрдого сплава является пористость.

Её выявляют осмотром образцов подготовленных для металлографических исследований при увеличении 50 – 100 раз. Количественные величины выявляются путём сравнения с изображения с эталонными фотографиями. Для исследования пористости имеются иные методы: определение плотности, измерения электрического сопротивления или магнито – индуктивным способом.

При исследовании модулей предназначенных для фильтрации или доставки рабочей среды значение имеют геометрические параметры – диаметр канала, точность формы, пространственное расположение. Существует способ, при котором выявляется топология внутренней структуры. Он заключается в исследовании последовательно удаляемых слоёв материала. Однако, производительность контрольных операций при этом мала и изделие при этом разрушается. Кроме того, сложно установить связь между линейными размерами и

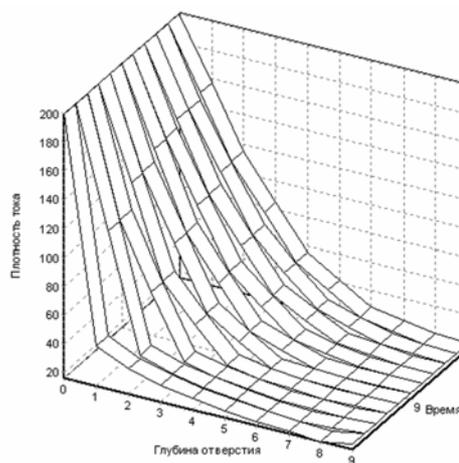


Рисунок 4 – Решение дифференциального уравнения

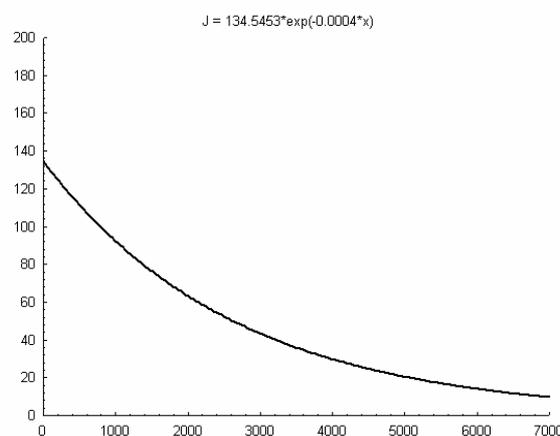


Рисунок 5 – Аналитическая зависимость «Плотность тока – время»

производительностью и эффективностью. Поэтому предлагается, контролируя непосредственно эти характеристики. Схема установки приведена на рисунке 6.

Существует формула расчёта проходных сечений (2):

$$Q = \mu F \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2)} \quad (2)$$

где Q – расход жидкости;
 μ – коэффициент расхода;
 F – площадь поперечного сечения;
 g – ускорение свободного падения;
 γ – удельный вес жидкости;
 p_1 и p_2 – давления на входе и выходе их канала соответственно.
 При сравнении образца с эталоном составляется отношение (2):

$$\frac{Q_u}{Q_{э}} = \frac{\mu_u F_u \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p}}{\mu_{э} F_{э} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p}} \quad (3)$$

где Q_u – расход жидкости при использовании испытуемого образца;

$Q_{э}$ – расход жидкости при использовании эталонного образца.

$$\Delta = \frac{\mu_u F_u}{\mu_{э} F_{э}} \quad (4)$$

Тогда,

Полученное отношение (4) отражает зависимость между общей площадью каналов эталонного изделия и полученных в результате обработки, поскольку множители пропорциональны расходу жидкости через канал. Составив таблицы объёмов жидкости для эталонов с различными параметрами канала, возможно, производить их сравнения объёмами жидкости пропущенной через полученные модули. За предельно допустимый уровень принимается значение 0,95.

Полученные практические результаты требуют их широкого применения на производстве. Препятствием служит сложность воспроизведения технологии. Решить проблему можно, не только используя технические решения, но и организационные методы, в частности использованием семейства стандартов ИСО 9000. Комплексный подход к качеству продукции позволяет создать на предприятии руководящие материалы по подготовке производства, приёмке исходного сырья и полуфабрикатов, организации контроля и взаимодействия с заказчиком. Таким образом, перспективным направлением работ над совершенствованием технологического процесса является информационная поддержка.

Также существует ряд направлений, которые могут существенно расширить область применения рассматриваемой технологии. Детали из твёрдых сплавов являются частным случаем. В машиностроении широко применяются порошковые изделия из чёрных и цветных металлов. Ограничением в данном случае служит необходимость селективного травления исходных деталей с внедрённой арматурой. Оптимальный подбор пар «матрица - технологическая арматура» и режимов формообразования позволяет получать широкий спектр изделий с новыми свойствами. Например, порошковая композиция помимо удаляемых вставок может быть армирована силовыми элементами – проволокой или углеродными волокнами. После электрохимической обработки и последующего спекания получается материал высокой прочности и маслоёмкой поверхностью, который может быть использован при изготовлении тяжело нагруженных трущихся деталей.

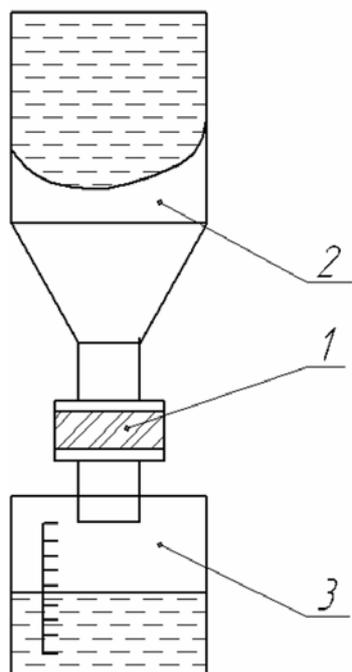


Рисунок 6 – Схема установки для контроля качества обработки
 1-испытуемый образец; 2 –подающая ёмкость; 3-мерная ёмкость

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы. Под ред. В. Шатта. Пер. с нем. М., «Металлургия», 1983. 520 с.
2. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы/Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов, О. В. Байбаков, Ю. Л. Кирилловский.-2-е изд., перераб.-М.:Машиностроение , 1982.-423 с.
3. Трофимов, В.В. Математическая модель комбинированной обработки микроотверстий / В. В. Трофимов В. А. Фёдоров // Вестник Воронежского Государственного Технического Университета, т. 5, №10. – Воронеж.: ВГТУ, 2009.
4. Трофимов, В.В. Комбинированная обработка глубоких каналов в армируемых материалах: автореф. дис. на соиск. учён. степ. д-ра техн. наук / Трофимов Владимир Владимирович. – Воронеж.: ВГТУ, 1998. – 32 с.
5. РФ А. С. 22007321, МКИ В 23 Н 5/06, 3/00. Способ комбинированной обработки поверхностей в армируемых токопроводящих материалах/ В. Т. В. Трофимов, В. В. Трофимов, Ю. В. Трофимов, Опубликовано 27. 06. 2003.Бюл. № 18.
6. SU А. С. 944850, МПК В 23 Р 1/00. Способ электрохимической обработки импульсами технологического тока/ В. П. Смоленцев, Т. П. Литвин, В. А. Перов, А. В. Попов, В. М. Антипов. Заявлено 20.05.80. № 2929828/25-08, Опубликовано 23. 07. 82 .Бюл. № 27

Федоров Владимир Андрианович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж
Аспирант, преподаватель
тел. 8-960-137-90-67

Трофимов Владимир Владимирович

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж
Доктор технических наук, профессор
тел. 251-65-64

V.A. FEDOROV, V.V.TROFIMOV

THE COMBINED PROCESSING OF MICROAPERTURES IN FIRM ALLOYS

Micro apertures make use of design of tools. They make show range of difficulties. Technological armor-new method work of parts from hard alloy. This method allows make micro channel in cermets materials.

Keywords: *micro apertures, hard alloy.*

BIBLIOGRAPHY

1. Poroshkovaja metallurgija. Spechennye i kompozicionnye materialy. Pod red. V. Shatta. Per. s nem. M., «Metallurgija», 1983. 520 s.
2. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody/T. M. Bashta, S. S. Rudnev, B. B. Nekrasov, O. V. Bajba-kov, Ju. L. Kirrilovsij.-2-e izd., pererab.-M.:Mashinostroenie , 1982.-423 s.
3. Trofimov, V.V. Matematicheskaja model' kombinirovannoj obrabotki mikrootverstij / V. V. Tro-fimov V. A. Fjodorov // Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta, t. 5, №10. – Vo-ronezh.: VGTU, 2009.
4. Trofimov, V.V. Kombinirovannaja obrabotka glubokih kanalov v armiruemyh materialah: avtoref. dis. na soisk. uchjon. step. d-ra tehn. nauk / Trofimov Vladimir Vladimirovich. – Voronezh.: VGTU, 1998. – 32 s.
5. RF А. S. 22007321, МКИ V 23 N 5/06, 3/00. Sposob kombinirovannoj obrabotki poverhnostej v armirue-myh tokoprovodjajvih materialah/ V. T. V. Trofimov, V. V. Trofimov, Ju. V. Trofimov, Opublikovano 27. 06. 2003.Bjul. № 18.
6. SU А. S. 944850, МПК V 23 R 1/00. Sposob jelektrohimicheskoj obrabotki impul'sami tehnologi-cheskogo toka/ V. P. Smolencev, T. P. Litvin, V. A. Perov, A. V. Popov, V. M. Antipov. Zajavleno 20.05.80. № 2929828/25-08, Opublikovano 23. 07. 82 .Bjul. № 27

Theodorov Wladimir Andrianovitch

Voronezh State Technical University, Voronezh citi
Graduate, Teacher
tel. 8-960-137-90-67

Trofimov Wladimir Wladimirovitch

Voronezh State Technical University, Voronezh citi
Doctor of technical sciences, Professor
tel. 251-65-64

Г.А. ХАРЛАМОВ, В.С. ШОРКИН, А.С. ТАРАПАНОВ, С.И. БРУСОВ

ОПИСАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ, ДОПУСКАЮЩЕЙ ИЗМЕНЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ РЕЖУЩЕГО ЛЕЗВИЯ

В статье представлено математическое описание кинематики процесса точения на основе теоретической базы методики описания многообразия методов лезвийной обработки множеством движений режущего лезвия, включающих главное движение, движения подачи и свободное изменение конфигурации режущего лезвия в процессе резания.

Ключевые слова: лезвийная обработка, конфигурация лезвия, свободное изменение конфигурации.

Развитие теории исследования и проектирования процессов формообразования деталей при лезвийной обработке, основанной на представлении всего многообразия методов множеством движений режущего лезвия, включающих главное движение, движения подачи и изменение конфигурации режущего лезвия, позволяющей всесторонне описать и проанализировать процесс обработки и выбрать оптимальное сочетание параметров детали, параметров технологического процесса и параметров обрабатывающего инструмента в соответствии с заданным критерием оптимизации [1].

При точении схема обработки выглядит следующим образом (рис. 1):

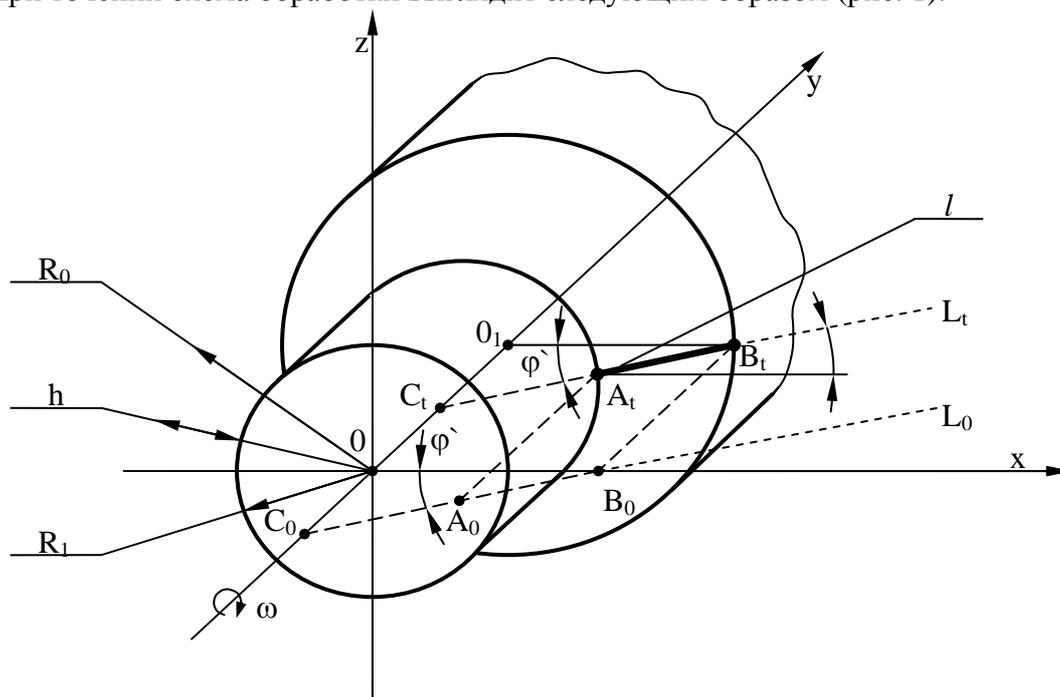


Рисунок 1 – Схема обработки при точении

Цилиндрическая заготовка имеет начальный радиус R_0 . Радиус детали равен R_1

$$R_1 = R_0 - h. \quad (1)$$

Предполагается, что конечный радиус можно получить за один проход резца. Значит t_0 – толщина срезаемого за этот проход слоя металла. Передний торец заготовки – плоскость, перпендикулярная ее оси. Режущая кромка резца – прямая линия $A_t B_t$ – это момент времени

t . А в момент $t=0$ – это прямая A_0B_0 . В этот момент лезвие в точке B_0 прижато к торцу заготовки. $A_tB_t, (A_0B_0)$ – это отрезок прямой $L_t (L_0)$, длина которого

$$l = \frac{h}{\cos \varphi'}, \quad \varphi' = 90^\circ - \varphi, \quad (2)$$

где φ' – это угол, который образует прямая L_t с перпендикуляром к оси заготовки.

φ – главный угол в плане.

Считается, что с течением времени линия L_t остается прямой, при этом ни угол φ' , ни длина l не меняются. Линия L_t в любой момент времени пересекается с осью заготовки. Заготовка вращается с постоянной скоростью ω (n – число оборотов в единицу времени):

$$\omega = 2\pi n. \quad (3)$$

Резец движется с постоянной скоростью u вдоль оси заготовки.

Перейдем к математическому описанию процесса точения. Для этого, прежде всего, необходимо выбрать неподвижную координатную систему. Рассуждения, предложенные в [2], предполагают неподвижность обрабатываемой детали. Учитывая это, будем считать, что система координат $Oxuz$ «жестко» связана с заготовкой. Точка O находится на переднем торце, в его центре. Ось Oy направлена вдоль оси заготовки. Ось Ox – перпендикулярна к ней причем так, что лезвие A_0B_0 и вся линия L_0 , отрезком которой A_0B_0 является, в начальный момент времени находятся в одной плоскости-плоскости Oxy .

Подобный выбор той системы, которую считаем неподвижной, означает, что далее мы будем рассматривать движение резца относительно заготовки. Как видно, это движение является винтовым. Резец вращается вокруг оси Oy с постоянной скоростью:

$$\vec{\omega} = -\vec{j}\omega \quad (4)$$

и движется поступательно также с постоянной скоростью:

$$\vec{u} = \vec{j}u. \quad (5)$$

Векторы $\vec{\omega}$ и \vec{u} – параллельны друг другу. Поэтому поверхность, образованная линией L_t в процессе ее движения является геликоидом. В число определяющих характер процесса резания основных параметров входят:

- 1) $\vec{r} = \vec{r}_0(s)$ – уравнение режущего лезвия в начальный момент времени;
- 2) $\vec{\omega}(0, t)$ – угловая скорость вращения элемента лезвия при $s=0$ – одного из его краев;
- 3) $\vec{V}(0, t)$ – скорость движения того же края лезвия в любой момент времени;
- 4) $\vec{f}(s, t) = \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t}$ – скорость изменения формы лезвия в любой момент времени.

Процесс точения характеризуется тем, что:

- 1) в начальный момент времени $t=0$ лезвие таково, что его кромка – это участок прямой линии. Значит, в начальный момент времени кривизна $k(s)=0$ и кручение $\chi(s)=0$;
- 2) величина и направление вектора угловой скорости $\vec{\omega}(0, t)$ с течением времени остаются неизменными;
- 3) величина и направление вектора \vec{u} подачи с течением времени не изменяются;
- 4) в процессе резания лезвие сохраняет свою жесткость. Значит или кривизна $k(s)$ или кручение $\chi(s)$ с течением времени не изменяются, поэтому в нашем случае

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} = \vec{0}. \quad (6)$$

Рассматриваемый пример довольно прост. Поэтому, учитывая жесткость инструмента, постоянство векторов $\vec{\omega}$ и \vec{u} сразу же можно сказать, чему будет равна и куда направлена скорость точек режущей кромки по отношению к обрабатываемой поверхности.

Сначала, учитывая сделанное выше описание геометрии и процесса резания, построим конкретный вид зависимости $\vec{r} = \vec{r}_0(s)$. Прямая линия L_0 отсекает на осях Ox и Oy (с учетом знаков) отрезки OB_0 и OC_0 соответственно. Длина OB_0 – это начальный радиус заготовки: $OB_0 = R_0$. Длина OC_0 – это $OB_0 \cdot \operatorname{tg}\varphi' = R_0 \cdot \operatorname{tg}\varphi'$.

Из аналитической геометрии известно уравнение прямой линии на плоскости «в отрезках»:

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 1. \quad (7)$$

В нашем случае:

$$a = +OB_0; b = -OC_0 \text{ или } a = R_0; b = -R_0 \operatorname{tg}\varphi'. \quad (8)$$

Если точке B_0 соответствует $x = R_0 - t_0$, то для отрезка A_0B_0 прямой L_0 уравнение (7) принимает вид:

$$\frac{x}{R_0} - \frac{y}{R_0 \operatorname{tg}\varphi'} = 1; R_0 - h \leq x \leq R_0. \quad (9)$$

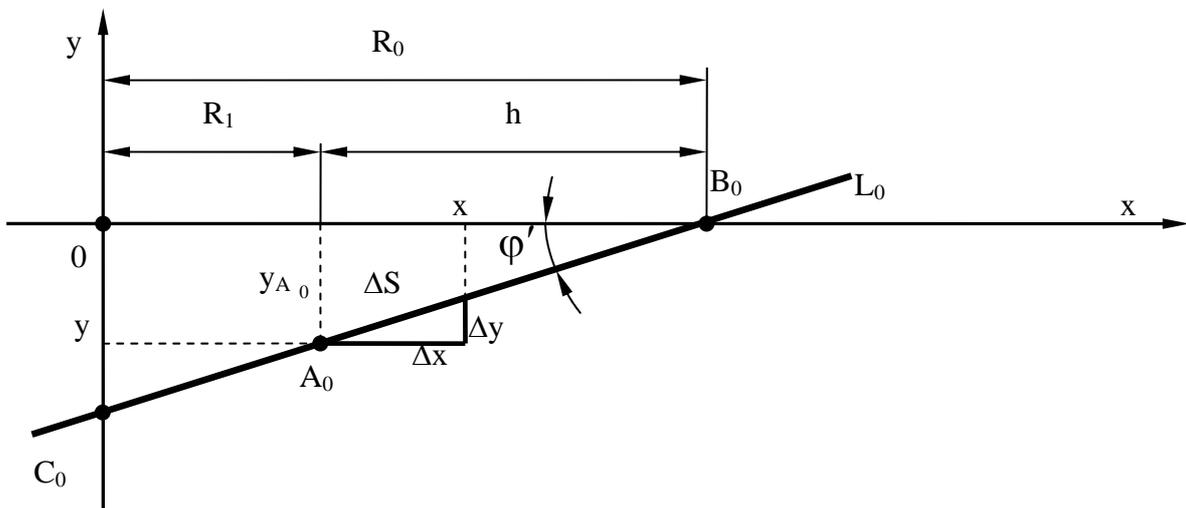


Рисунок 2 – Определение элементов режущего лезвия

$$\Delta s = s_M - s_{A_0} = s - s_{A_0} = s - 0 = s$$

Из рисунка 2 видно, что $\Delta x = x_M - x_{A_0} = x - R_1$.

$$\Delta y = y_M - y_{A_0} = y - t_0 \operatorname{tg}\varphi'$$

С учетом этого, можно получить $x = R_1 + s \cos \varphi' \quad 0 \leq s \leq \frac{t_0}{\cos \varphi'}$ и

$$y = s \sin \varphi' - t_0 \operatorname{tg}\varphi'$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_0(s) &= (R_1 + s \cos \varphi')\vec{i} + (s \sin \varphi' - ht \operatorname{tg}\varphi')\vec{j} + 0 \cdot \vec{k} = \\ &= (R_1 + s \cos \varphi'); s \sin \varphi' - ht \operatorname{tg}\varphi'; 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Далее вычисляем другие геометрические характеристики лезвия в начальный момент:

$$a) \vec{\tau}_0 = \frac{\partial \vec{r}_0}{\partial s} = \vec{i} \frac{\partial x_0}{\partial s} + \vec{j} \frac{\partial y_0}{\partial s} + \vec{k} \frac{\partial z_0}{\partial s} = \vec{i} \cos \varphi' + \vec{j} \sin \varphi' + 0 \cdot \vec{k} \quad (11)$$

– это вектор, направленный вдоль L_0 от точки A_0 в точку B_0 ;

б) кривизна и кручение линии L_0 равны нулю. Поэтому направлениями $\vec{v}_0, \vec{\beta}_0$ являются неопределенными. Выберем их удобным для себя способом: направим вектор \vec{v}_0 перпендикулярно $\vec{\tau}_0$, сохраняя его в плоскости xOy , внутрь заготовки. Тогда вектор $\vec{\beta}_0 = \vec{\tau}_0 \times \vec{v}_0$ окажется направленным по направлению вращательного движения лезвия вокруг заготовки:

$$\vec{\beta}_0 = \vec{k}, \text{ тогда } \vec{v}_0 = \vec{\beta}_0 \times \vec{\tau}_0 = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 0 & 0 & 1 \\ \cos\varphi' & \sin\varphi' & 0 \end{vmatrix} = -\vec{i} \sin\varphi' + \vec{j} \cos\varphi'; \quad (12)$$

в) Ввиду того, что $k(s) = 0; \chi(s) = 0$, то вектор Дарбу

$$\vec{\Omega} = \vec{\tau}_0 \chi(s) + \vec{\beta}_0 k(s) = \vec{0}. \quad (13)$$

Используя исходное описание процесса, определим векторы $\vec{\omega}(0; t)$ и $\vec{V}(0; t)$ для любого момента времени в начальной точке лезвия $A_t : s = 0$ в $\vec{\tau}_0, \vec{v}_0, \vec{\beta}_0$.

Вектор $\vec{\omega}(0, 0)$ определяется достаточно просто. Согласно условию он равен:

$$\vec{\omega}(0, 0) = -\vec{j}\omega. \quad (14)$$

Для определения $\omega_{0\tau}, \omega_{0v}, \omega_{0\beta}$ выразим \vec{j} через $\vec{\tau}_0, \vec{v}_0, \vec{\beta}_0$. Так как

$$\vec{i} = \frac{\vec{\tau}_0}{\cos\varphi'} - \vec{j} \frac{\sin\varphi'}{\cos\varphi'}; \vec{v}_0 = -\vec{\tau}_0 \cdot \frac{\sin\varphi'}{\cos\varphi'} + \vec{j} \frac{\sin^2\varphi'}{\cos\varphi'} + \vec{j} \cos\varphi' = -\vec{\tau}_0 \frac{\sin\varphi'}{\cos\varphi'} + \vec{j} \frac{1}{\cos\varphi'},$$

то $\vec{j} = \vec{\tau}_0 \sin\varphi' + \vec{v}_0 \cos\varphi'$ и $\vec{\omega}(0, 0) = \vec{\tau}_0(\omega \sin\varphi') + \vec{v}_0(-\omega \cos\varphi') = \omega_0(0)$.

$$\text{Значит: } \omega_{0\tau} = \omega \sin\varphi'; \omega_{0v} = -\omega \cos\varphi'; \omega_{0\beta} = 0. \quad (15)$$

Рассуждая аналогично, определяем вектор \vec{V} :

$$\vec{V} = u\vec{j} + \omega R_1 \vec{k} = (u \sin\varphi')\vec{\tau}_0 + (u \cos\varphi')\vec{v}_0 + (\omega R_1)\vec{\beta}_0. \quad (16)$$

Информация о том, чему равен вектор угловой скорости при $s = 0$, является основной для определения распределения этого вектора по всей длине лезвия. Для этого используется уравнение:

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial s} - \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} = \vec{\omega} \times \vec{\Omega}, \quad (17)$$

в котором в начальный момент $t = 0$ известна $\vec{\Omega}$ – вычислена по распределению $\vec{r}_0(s)$ и $\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t}$. В нашем случае: $\vec{\Omega} = \vec{0}; \frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} = 0$.

В результате оказывается, что в начальный момент $t = 0$ выполняется равенство:

$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial s} = 0 \quad \text{или} \quad \vec{\omega} = \text{const} \quad (18)$$

вдоль всего лезвия (это ожидалось, поскольку лезвие – жесткая прямая линия).

Распределение компонент V_τ, V_v, V_β вектора скорости вдоль лезвия:

$$\vec{V} = V_\tau \vec{\tau} + V_v \vec{v} + V_\beta \vec{\beta}. \quad (19)$$

В этом равенстве в каждый момент времени t , в том числе и в момент $t = 0$, от продольной координаты s зависят как координаты V_τ, V_v, V_β , так и сами базисные векторы $\vec{\tau}, \vec{v}, \vec{\beta}$:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial s} = \vec{V} \times \vec{\Omega} + \vec{\omega} \times \vec{\tau}. \quad (20)$$

Следует отметить, что в случае, когда лезвие – прямая линия, не меняющая своей формы с течением времени, то векторы $\vec{\tau}$, \vec{v} , $\vec{\beta}$ в каждый фиксированный момент времени при каждом фиксированном s меняют свою ориентацию – вращаются вместе с лезвием.

Компоненты вектора \vec{V} V_τ , V_v , V_β определяется на основании уравнения (20). Его матричная формула имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial s} \begin{bmatrix} V_\tau \\ V_v \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k(s) & 0 \\ -k(s) & 0 & \chi(s) \\ 0 & -\chi(s) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\tau \\ V_v \\ V_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_\beta \\ -\omega_v \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Решается оно с помощью квадратной матрицы

$$X(s) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

которая при $s = 0$ обращается в единичную матрицу.

Матрицант $X(s)$ является решением уравнения:

$$\frac{\partial X}{\partial s} = A \cdot X, \quad (23)$$

где $A = \begin{bmatrix} 0 & k(s) & 0 \\ -k(s) & 0 & \chi(s) \\ 0 & -\chi(s) & 0 \end{bmatrix}.$ (24)

Если элементы матрицы A – постоянные числа, то решение уравнения (23) преобразуется в формулу

$$X = e^{A \cdot s} = 1 + A \cdot s + \frac{1}{2!} A^2 s^2 + \frac{1}{3!} A^3 s^3 + \dots. \quad (25)$$

В нашем случае все элементы матрицы A равны нулю.

Тогда $X = e^{0 \cdot s} = 1 + 0 \cdot s + 0^2 \cdot s^2 + \dots = 1, \quad X(s) = 1.$

После того, как матрицант найден, решение для \vec{V}

$$\begin{aligned} \vec{V} = \begin{bmatrix} V_\tau \\ V_v \\ V_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} V_{0\tau} \\ V_{0v} \\ V_{0\beta} \end{bmatrix} + \int_0^s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_\beta \\ -\omega_v \end{bmatrix} ds \right) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} u \sin \varphi' \\ u \cos \varphi' \\ \omega R_1 \end{bmatrix} + \int_0^s \begin{bmatrix} 1 \cdot 0 + 0 \cdot \omega_\beta + 0 \cdot (-\omega_v) \\ 0 \cdot 0 + 1 \cdot \omega_\beta + 0 \cdot (-\omega_v) \\ 0 \cdot 0 + 0 \cdot \omega_\beta + 1 \cdot (-\omega_v) \end{bmatrix} ds \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} u \sin \varphi' + 0 \\ u \cos \varphi' + 0 \\ \omega R_1 + \omega s \cos \varphi' \end{bmatrix} \right) = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \sin \varphi' \\ u \cos \varphi' \\ \omega(R + s \cos \varphi') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \cdot (u \sin \varphi') + 0 \cdot u \cos \varphi' + 0 \cdot \omega(R_1 + s \cos \varphi') \\ 0 \cdot (u \sin \varphi') + 1 \cdot u \cos \varphi' + 0 \cdot \omega(R_1 + s \cos \varphi') \\ 0(u \sin \varphi') + 0 \cdot u \cos \varphi' + 1 \cdot \omega(R_1 + s \cos \varphi') \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Таким образом получаем, что

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} V_\tau \\ V_v \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \sin \varphi' \\ u \cos \varphi' \\ \omega(R_1 + s \cos \varphi') \end{bmatrix}.$$

На основании этого можно записать, что истинный вектор скоростей точек лезвия:

$$V_\tau = u \sin \varphi'; \quad V_v = u \cos \varphi'; \quad V_\beta = \omega(R_1 + s \cos \varphi'). \quad (26)$$

или в базисе $\vec{\tau}, \vec{v}, \vec{\beta}$:

$$\vec{V} = \vec{\tau}(u \sin \varphi') + \vec{v}(u \cos \varphi') + \vec{\beta}[\omega(R_1 + S \cos \varphi')]. \quad (27)$$

Это выражение справедливо лишь в начальный момент времени, когда вращение и движение началось, но еще ничего не успело сдвинуться с места.

Следующая стадия расчета – это определение радиус- векторов точек лезвия через время h_t от начала движения. Для этого надо построить представление вектора \vec{V} уже не в базисе $\vec{\tau}, \vec{v}, \vec{\beta}$, а в базисе $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$. Для этого в выражение (27) подставляем ранее найденные выражения (16):

$$\begin{aligned} \vec{V} &= (\vec{i} \cos \varphi' + \vec{j} \sin \varphi')(u \sin \varphi') + (-\vec{i} \sin \varphi' + \vec{j} \cos \varphi')(u \cos \varphi') + \vec{k}[\omega(R_1 + s \cos \varphi')] = \\ &= iu \cos \varphi' \cdot \sin \varphi' + ju \sin^2 \varphi' - \vec{i}u \sin \varphi' \cos \varphi' + \vec{j}u \cos^2 \varphi' + \vec{k}[\omega(R_1 + s \cos \varphi')] = \\ &= 0 \cdot \vec{i} + u \cdot \vec{j} + [\omega(R_1 + s \cos \varphi')]\vec{k} \quad \text{или} \quad V_x = 0; V_y = u; V_z = \omega(R_1 + s \cos \varphi'). \end{aligned}$$

То есть движение продольной подачи со скоростью u начинается и осуществляется вдоль оси заготовки, а движение вращения, если ее остановить осуществляется против часовой стрелки и начинается в направлении, перпендикулярном плоскости xOy .

К моменту времени h_t радиус-векторы точек лезвия займут положения, определяемые формулами: $\vec{r}_1(s) = \vec{r}(s, h_t) = \vec{r}_0(s) + \vec{V} \cdot h_t$.

Подставляя сюда соответствующие выражения, можно получить:

$$\begin{aligned} x_1(s) &= R_1 + s \cos \varphi' + 0 \cdot h_t = R_1 + s \cos \varphi' \\ y_1(s) &= s \sin \varphi' - t_0 \operatorname{tg} \varphi' + u \cdot h_t \\ z_1(s) &= 0 + \omega(R_1 + s \cos \varphi') \cdot h_t \end{aligned}$$

Отсюда видно, что в момент времени $t = h_t$ лезвие по отношению к обрабатываемой детали займет положение

$$\vec{r}_1(s) = (R_1 + s \cos \varphi')\vec{i} + (s \sin \varphi' - t_0 \operatorname{tg} \varphi' + u \cdot h_t)\vec{j} + \omega(R_1 + s \cos \varphi') \cdot h_t \vec{k}.$$

Далее проделываем те же вычисления для следующего положения лезвия:

1) Вычисляем кривизну $k(s)$

$$k(s) = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 x}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 y}{\partial s}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial s}\right)^2} = 0;$$

2) Вычисляем кручение $\chi(s) = 0$;

3) Строим векторы трехгранника Френе:

$$\begin{aligned} \vec{\tau} = \vec{\tau}_1 &= \frac{\partial \vec{r}_1}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} (R_1 + s \cos \varphi')\vec{i} + \frac{\partial}{\partial s} (s \sin \varphi' - t_0 \operatorname{tg} \varphi' + u h_t)\vec{j} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial s} [\omega(R_1 + s \cos \varphi') h_t]\vec{k} = \vec{i} \cos \varphi' + \vec{j} \sin \varphi' + \vec{k}(\omega \cos \varphi' h_t) \end{aligned}$$

Обратим внимание на тот факт, что в соответствии со сделанными вычислениями оказалось:

$$|\vec{\tau}| = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2} = \sqrt{1 + \omega^2 h_t^2 \cos^2 \varphi'} \cong 1 + \frac{\omega^2 h_t^2 \cos^2 \varphi'}{2} \neq 1.$$

Второе слагаемое представляет собой величину второго порядка малости по отношению к h_t . Появление малой ошибки вычислений связано с заменой точной операции интегрирования

$$\int_0^{h_t} \vec{V}(s, t) dt \quad \text{на приближенную:} \quad \int_0^{h_t} \vec{V}(s, t) dt \cong \vec{V}(s, 0) \cdot h_t.$$

В точности равенство справедливо лишь тогда, когда вектор скорости $\vec{V}(s,t)$ не зависит от времени t (как, например, при строгании). В нашем случае, для любого фиксированного s его поступательная u и вращательная $\omega(R_1 + s \cos \varphi')$ составляющие остаются неизменными, но направление непрерывно меняется и бесконечно малое приращение аргумента $\Delta t \rightarrow 0$ заменялось его конечным, хотя и очень малым приближением $\Delta t = h_t$.

Избежать подобной ошибки можно, если интегрирование или дифференцирование производить не приближенно, когда бесконечно малые приращения функций или аргументов заменяются конечными разностями этих величин, а точно, что, с другой стороны, не всегда удается или не всегда удобно.

В рассматриваемом примере возможность точной реализации процессов интегрирования при поиске функций $\vec{r}(s,t)$ и $\vec{\tau}(s,t)$ не только в начальный и первый моменты времени, но и в любые другие, существует. Рассмотрим ее. В соответствии с определением:

$$\vec{r}(s,t) = \vec{r}_0(s) + \int_0^t \vec{V}(s,t) dt.$$

Видно, что эта формула предполагает знание в любой момент времени t скорости движения любой точки s лезвия:

$$\frac{\partial \vec{\tau}}{\partial t} = \vec{\omega} \times \vec{\tau}, \quad \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \vec{\omega} \times \vec{v}, \quad \frac{\partial \beta}{\partial t} = \vec{\omega} \times \vec{\beta}$$

или $\frac{\partial r_x}{\partial t} = -\omega \tau_z, \quad \frac{\partial \tau_y}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \tau_z}{\partial t} = \omega \tau_x, \quad \tau_y = C = \text{const}.$

Решая, получим: $\frac{\partial^2 \tau_x}{\partial t^2} = \omega \frac{\partial \tau_z}{\partial t} = -\omega^2 \tau_x.$

Отсюда $\tau_x = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t.$

Тогда $\tau_z = \frac{1}{\omega} \frac{\partial \tau_x}{\partial t} = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t$ при $t=0$;

$\tau_x = \cos \varphi'; \quad \tau_z = 0; \quad \tau_y = \sin \varphi'$ отсюда $C = \sin \varphi', \quad C_1 = 0, \quad C_2 = \cos \varphi'.$

Тогда в любой момент времени оказывается:

$$\vec{\tau} = \vec{i}(\cos \varphi' \cos \omega t) + \vec{j}(\sin \varphi') + \vec{k}(\cos \varphi' \sin \omega t). \tag{28}$$

Это выражение отличается от ранее полученного приближенного. Сопоставим их, а именно, полученное ранее $\vec{\tau}_1$ найдем из (28). Учтем, что для малого значения $\Delta t = h_t$:

$$\vec{\tau}(t + \Delta t) \cong \vec{\tau}(t) + \left. \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial t} \right|_{\Delta t=0} \Delta t,$$

$$t = 0, \Delta t = h_t, \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial t} = \vec{i}(\omega \cos \varphi' \sin \omega t) + \vec{j} \cdot 0 + \vec{k}(\omega \cos \varphi' \cdot \cos \omega t).$$

В результате: $\vec{\tau}_1 = \vec{i} \cos \varphi' + \vec{j} \sin \varphi' + \vec{k}(\omega h_t \cos \varphi')$ – совпадает с ранее полученным, что доказывает его правильность.

Аналогично вектору $\vec{\tau}(s,t)$ можно построить выражения и для $\vec{\beta}(s,t), \vec{v}(s,t)$:

$$v_x = C_1 \sin \omega t + C_2 \cos \omega t; \quad v_y = C; \quad v_z = -C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t.$$

при $t=0 - C_2 = -\sin \varphi'; \quad v_y = \cos \varphi'; \quad C_1 = 0.$

$$\vec{v} = \vec{i}(-\sin \varphi' \cdot \cos \omega t) + \vec{j}(\cos \varphi') + \vec{k}(-\sin \varphi' \cdot \sin \omega t).$$

$$\beta_x = C_1 \sin t + C_2 \cos \omega t; \quad \beta_y = C = \text{const}; \quad \beta_z = -C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t;$$

при $t = 0; \quad \beta_x = 0; \quad \beta_y = 0; \quad \beta_z = 1.$

Значит: $C = 0; \quad C_2 = 0; \quad C_1 = -1$ и $\vec{\beta} = \vec{i}(\sin \omega t) + \vec{k}(\cos \omega t).$

Таким образом, получено:

$$\begin{aligned}\vec{\tau} &= \vec{i}(\cos \varphi' \cos \omega t) + \vec{j}(\sin \varphi') + \vec{k}(\cos \varphi' \sin \omega t); \\ \vec{v} &= \vec{i}(-\sin \varphi' \cos \omega t) + \vec{j}(\cos \varphi') + \vec{k}(-\sin \varphi' \sin \omega t); \\ \vec{\beta} &= \vec{i}(-\sin \omega t) + \vec{k}(\cos \omega t).\end{aligned}$$

Ранее для вектора \vec{V} в базисе $(\vec{\tau}, \vec{v}, \vec{\beta})$ получено выражение (27). Оно справедливо для любого момента времени. Из него следует, что проекции вектора \vec{V} на направления $(\vec{\tau}, \vec{v}, \vec{\beta})$ с течением времени не меняются. Сейчас получено, что от времени зависят только $\vec{\tau}, \vec{v}, \vec{\beta}$. Подставляя их выражения в (27), получим представление вектора скорости в базисе $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$. Оно имеет вид:

$$\begin{aligned}\vec{V} &= \vec{\tau}(u \sin \varphi') + \vec{v}(u \cos \varphi') + \vec{\beta}[\omega(R_1 + s \cos \varphi')] = \\ &= [\vec{i}(\cos \varphi' \cos \omega t) + \vec{j}(\sin \varphi') + \vec{k}(\cos \varphi' \sin \omega t)](u \sin \varphi') + \\ &+ [\vec{i}(-\sin \varphi' \cos \omega t) + \vec{j}(\cos \varphi') + \vec{k}(-\sin \varphi' \sin \omega t)](u \cos \varphi') + \\ &+ [\vec{i}(-\sin \omega t) + \vec{k}(\cos \omega t)]\omega(R_1 + s \cos \varphi')\end{aligned}$$

Раскрывая скобки и перегруппировывая члены, получим:

$$\begin{aligned}\vec{V} &= \vec{i}[u(\cos \varphi' \cdot \sin \varphi' \cdot \cos \omega t - \sin \varphi' \cdot \cos \varphi' \cdot \cos \omega t) - \omega(R_1 + s \cos \varphi') \sin \omega t] + \\ &+ \vec{j}[u \sin^2 \varphi' + u \cos^2 \varphi'] + \\ &+ \vec{k}[u(\cos \varphi' \sin \varphi' \sin \omega t - \sin \varphi' \cos \varphi' \sin \omega t) + \omega(R_1 + s \cos \varphi') \cos \omega t]\end{aligned}$$

И окончательно:

$$\vec{V}(s, t) = \vec{i}[-\omega(R_1 + s \cos \varphi') \sin \omega t] + \vec{j} \cdot u + \vec{k}[\omega(R_1 + s \cos \varphi') \cos \omega t].$$

После этого можно построить функцию $\vec{r}(s, t)$, характеризующую положение в любой момент времени t любой точки s лезвия относительно выбранной координатной системы:

$$\begin{aligned}\vec{r}(s, t) &= \vec{i}(R_1 + s \cos \varphi') + \vec{j}(s \sin \varphi' - t_0 t g \varphi') + 0 \cdot \vec{k} + \\ &+ \vec{i}[(R_1 + s \cos \varphi')(\cos \omega t - 1)] + \vec{j}(ut) + \vec{k}[(R_1 + s \cos \varphi') \sin \omega t] \\ \text{или } \vec{r}(s, t) &= \vec{i}(R_1 + s \cos \varphi') \cos \omega t + \vec{j}(ut) + \vec{k}[(R_1 + s \cos \varphi') \sin \omega t].\end{aligned}$$

Изложенный анализ с одной стороны, поможет лучше понять суть метода математического анализа кинематики движения режущего лезвия, а с другой – поможет осознать теоретические возможности совершенствования существующих методов лезвийной обработки.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламов, Г.А. Теория проектирования процессов лезвийной обработки / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов. – М.: Машиностроение, 2003. – 252 с: ил.
2. Харламов, Г.А. Математические основы виртуального представления и анализа процессов лезвийной обработки / Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов, В.С. Шоркин // Издательство «Машиностроение». Справочник. Инженерный журнал №2. – №3. – 2003.

Шоркин Владимир Сергеевич

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика»
телефон: (4862) 419889;
E-mail: vshorkin@yandex.ru

Харламов Геннадий Андреевич

Госуниверситет – УНПК, г. Орел
д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»
телефон: (4862)541503

Тарапанов Александр Сергеевич

Госуниверситет – УПНК, г. Орел

д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

телефон: (4862)541503

Брусов Сергей Иванович

Госуниверситет – УПНК, г. Орел

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика»

телефон: (4862)541503

E-mail: bsi16177@gmail.com

V.S. SHORKIN, G.A. KHARLAMOV, A.S. TARAPANOV, S.I. BRUSOV

**THE DESCRIPTION OF TURNING KINEMATICS ON THE BASIS OF
THEORY SUPPOSING CHANGE OF THE CONFIGURATION
OF THE CUTTING EDGE**

In article the mathematical description of turning kinematics on the of theoretical base of a technique of the description of variety of machining methods by set of movements of the cutting edge including the tool movement, movements of detail and free change of a configuration of a cutting edge in the course of cutting is presented.

Keywords: cutting machining, cutting edge configuration, free change configuration.

BIBLIOGRAPHY

1. Harlamov, G.A. Teorija proektirovanija processov lezviynoj obrabotki / G.A. Harlamov, A.S. Tara-panov. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 252 s: il.

2. Harlamov, G.A. Matematicheskie osnovy virtual'nogo predstavlenija i analiza processov lezviy-noj obrabotki / G.A. Harlamov, A.S. Tarapanov, V.S. Shorkin // Izdatel'stvo «Mashinostroenie». Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal №2. – №3. – 2003.

Shorkin Vladimir Sergeevich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel

Doctor of technical sciences, professor, head of chair “Physics”

302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29

Tel. 8-4862-41-98-44

E-mail: vsorkin@yandex.ru

Harlamov Gennady Andreevich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel

Doctor of technical sciences, professor, chair “Mechanical-engineering technology and design technology informatics”

Tel. 8-4862-54-15-03

Tarapanov Aleksandr Sergeevich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel

Doctor of technical sciences, professor, “Mechanical-engineering technology and design technology informatics”

Tel. 8-4862-54-15-03

Brusov Sergey Ivanovich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel

Candidate of technical sciences, associate professor, head of chair “Mechanical-engineering technology and design technology informatics”

Tel. 8-4862-54-15-03

E-mail: bsil6177@gmail.com

МАШИНЫ, АППАРАТЫ, ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКОЙ И ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 663.938.8

С.А. БЫКОВ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ ФАЗ В ЭКСТРАКТОРАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Представлена модель оптимизации потоков фаз в экстракторах непрерывного действия, позволяющая интенсифицировать процесс массоотдачи. Предложены конструктивные решения в области перемещения твердой фазы в экстракторах с вакуумным приводом и соответствующая математическая модель этого решения.

Ключевые слова: модель оптимизации потоков фаз, процесс массоотдачи, экстракторы с вакуумным приводом.

При экстрагировании различных измельченных растительных материалов в экстракторах непрерывного действия необходимо создавать максимальный контакт поверхности частиц твердой фазы с жидким экстрагентом, при этом сохраняя их равномерное противоточное перемещение.

В настоящее время во всех конструкциях экстракторов применяются различные транспортирующие устройства для перемещения твердой фазы, которые, в некоторой степени, способствуют разрыхлению слоя экстрагируемого материала и увеличению контакта между поверхностью твердой фазы и жидкостью, но одновременно нарушают противоток твердой фазы по отношению к жидкому экстрагенту, что отрицательно сказывается на эффективности процесса экстракции.

На рисунке 1 показан график рассеивания экстрагируемого материала в различных типах экстракторов, исследуемого при помощи трассеров, которые загружаются в экстрактор вместе с экстрагируемым материалом. Зная продолжительность выхода трассера из экстрактора и время истинного экстрагирования \mathfrak{Z} , соответствующего максимальному выходу трассера, определяют величину рассеивания. Величина рассеивания в процентах составляет $E = (\mathfrak{Z} - \mathfrak{Z}_n) / \mathfrak{Z} * 100\%$.

Например, для типовых экстракторов, применяемых в сахарной промышленности, величина рассеивания, кривая 5 графика рисунка 1, составляет $E = (140 - 75) / 78 * 100\%$, а для экстрактора с вакуумным перемещением материала, в котором трассер выходит одновременно полностью с отработанным материалом и время его выхода соответствует времени экстрагирования, величина рассеивания равна нулю.

Различное время нахождения частиц экстрагируемого материала в экстракторе приводит к неполному извлечению целевого компонента из частиц вышедших раньше из экстрактора, а из частиц материала, находящегося более длительное время, извлекаются вещества ухудшающие качество экстрагента.

Для интенсификации процесса массообмена и оптимизации структуры потоков фаз в экстракторах непрерывного действия применяют авторскую модель U-образной опытной установки для экстрагирования измельченного растительного сырья во взвешенном состоянии. В этой установке содержимое перемещается при помощи механического или вакуумного приводов, за одно включение привода на расстояние dL .

На рисунке 2 представлены данные извлечения целевого компонента из твердой фазы и содержание его в жидкой фазе при одинаковых условиях процесса в шнековых экстракторах с периодическим перемешиванием материала.

Индексы обозначающие сплошные кривые – $C^0_{н, т}$, $C^0_{к, т}$ и $C^0_{н, ж}$, $C^0_{к, ж}$ - относятся к изменению целевого компонента в твердой и жидкой фазах при экстрагировании сырья в экстракторах с вакуумным перемещением твердой фазы, а индексы - $C^x_{н, т}$, $C^x_{к, т}$ и $C^x_{н, ж}$, $C^x_{к, ж}$ – в экстракторах с перемещением твердой фазы шнеково-лопастным транспортирующими устройствами.

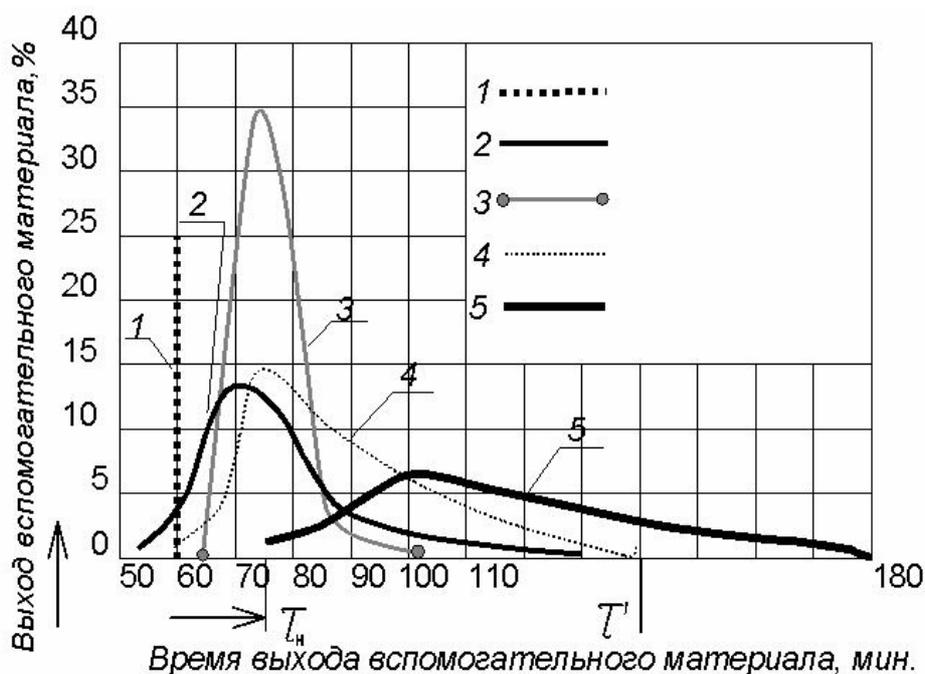


Рисунок 1 – Кривые выхода трассера в различных конструкциях экстракторов

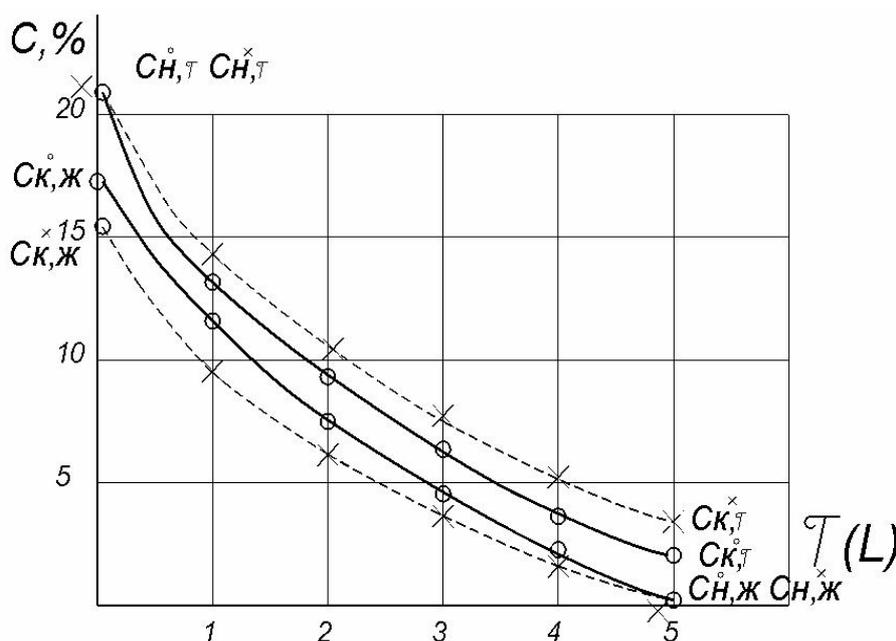


Рисунок 2 – Динамика извлечения экстрактивных веществ из измельченного топиамбура в шнеково-лопастных экстракторах и с вакуумным приводом

Из рисунка 2 видно, что извлечение целевого компонента из измельченного материала $C_{к,т}^x - C_{к,т}^0$ в экстракторах с вакуумным перемещением материала больше на 2 – 2,5 % по сравнению с экстракторами со шнековыми транспортирующими устройствами.

Происходит это в силу следующих причин. Перемещение твердой и жидкой фаз в экстракторах с вакуумным приводом осуществляется при скорости 0,3 – 0,4 м/с на расстояние dL за каждое включение привода. Количество включений привода за время экстрагирования Z бывает различным, оно зависит от качества сырья и технологического режима работы экстрактора. Такое периодическое перемещение содержимого экстрактора позволяет поддерживать твердую фазу в экстракторе во взвешенном состоянии и в начальный момент каждого перемещения, когда скорость жидкости значительно опережает скорость твердой фа-

зы, разрушает пограничный слой жидкой пленки на частицах твердой фазы, что благоприятно сказывается на увеличении коэффициента массоотдачи B , и следовательно и на общий процесс массообмена в экстракторе.

На основе опытов установлено, что гидродинамическое сопротивление измельченного сырья (клюквы) не зависит от степени его измельчения при одной и той же удельной нагрузке q , а зависит от скорости экстрагента в порах слоя материала. При скоростях жидкой фазы, в пределах 0,5 – 1,0 мм/с, режим течения жидкой фазы в слое материала является ламинарным, а с повышением скорости изменяется, и гидродинамическое сопротивление слоя возрастает.

Такое явление, видимо, объясняется тем, что при указанных скоростях перемещение жидкой фазы по отношению к твердой происходит «пропитка» слоя жидкостью и лобовое сопротивление частиц материала и силы трения о боковую поверхность их настолько незначительны, что не оказывают влияния на гидродинамическое сопротивление. Эти выводы имеют большое практическое значение при определении производительности экстракционных аппаратов и их конструировании.

Выше было сказано о применении пульсаций экстрагента по отношению к твердой фазе с целью интенсификации процесса экстрагирования. Для этого применяют насосы и другие устройства, которые производят перемещение экстрагента по отношению к твердой фазе на определенных участках экстрактора или во всем слое твердой фазы.

Недостаток этого метода заключается в том, что такая циркуляция приводит к перемешиванию экстракта на отдельных участках экстрактора и этим самым снижает движущую силу процесса и требует дополнительного расхода энергии.

Преимущество же такого принципа работы экстракторов заключается в увеличении извлечения экстрактивных веществ из твердой фазы $C_{к,т}^0 - C_{к,т}^x$, примерно на 2%. На такую же величину повышается содержание СВ. в полученном экстракте.

Увеличение извлечения целевого компонента из сырья при помощи пульсирующего метода перемещения всей массы в экстракторе улучшает процесс за счет равномерного перемещения твердой и жидкой фаз и увеличения коэффициента массоотдачи B , на который существенно влияет разрушение пограничной пленки на поверхности твердых частиц материала.

Кроме извлечения дополнительных СВ. из растительного сырья, что приносит большие выгоды производству аппараты с пульсирующим перемещением материала, тратят на много меньше энергии на привод аппарата по сравнению с другими конструкциями экстракторов. Дело в том, что движущей силой перемещения содержимого аппарата является разность давлений в первой колонне, куда поступает материал для экстрагирования, и остаточным давлением во второй колонне, откуда удаляется, отработавший, материал. Обычно эта разность давлений составляет значительную величину.

На рисунке 3 представлены механический и вакуумный приводы для перемещения массы, находящейся в экстракторе.

Общее усилие перемещения массы составляет:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

где F_1 – усилие необходимое для перемещение столба материала и жидкости, находящейся во второй колонне выше уровня $B - B$ и составит

$$F_1 = (p_1 h_1 + p_{ж} h_2) S \text{ кг} (H) \quad (2)$$

где $p_1 p_{ж}$ – объемная масса твердой и жидкой фаз, Н/М³/ кг/М³;

$h_1 h_2$ – высота столбов твердой и жидкой фаз, М;

S – площадь сечения экстрактора, М².

Усилие F_2 является усилием, зависящим от ускорения перемещения массы в экстракторе, и определяется согласно уравнению:

$$F_2 = m w'' \text{ кг} (H) \quad (3)$$

где m – масса твердой и жидкой фаз в экстракторе, кг;

w'' – ускорение перемещаемой массы, м/с².

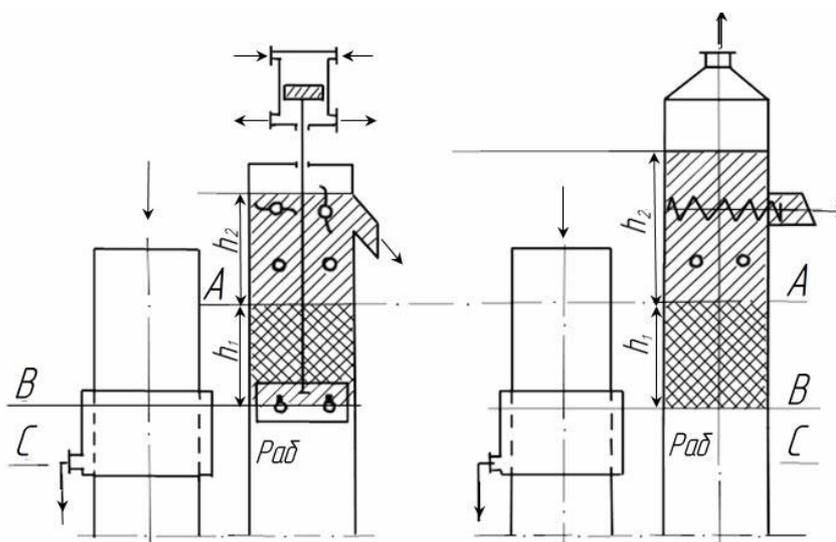


Рисунок 3 – К расчету усилий для перемещения твердой фазы в экстракторах с вакуумным и механическим приводом

Усиление F_3 учитывает сопротивление перемещаемой массы в экстракторе, определяется согласно выражения:

$$F_3 = a \frac{4}{D} p V_{\text{ср.}}^2 / g \text{ кг (H)} \quad (4)$$

где a – коэффициент трения в отдельных узлах экстрактора;

L – длина отдельных узлов, м;

D – диаметр экстрактора, м;

p – объемная масса содержимого в экстракторе, Н/м³/кг/м³;

g – ускорение сил тяжести, м/с².

По формулам 2, 3, 4, для нормального режима работы экстракторов, можно определить общее усилие F для перемещения содержимого в экстракторе, а затем и мощность привода.

Для упрощения расчетов была принята следующая методика. Так как для перемещения массы в экстракторе существенную роль играет перепад давления в колоннах, то необходимо определить разность давлений. Для этой цели в сечении В – В выгрузочных колонн были установлены дифференциальные манометры и определялось остаточное давление в период перемещения содержимого в экстракторе. Опыты проводились для различных материалов с различной степенью измельчения, при скорости перемещения массы в модели или промышленной установке 0,3 – 0,4 м/с, обеспечивающей равномерное перемещение фаз.

Перепад давления, отнесенный к одному метру длины или высоты слоя материала в модели или промышленном аппарате, является удельным сопротивлением $d P_y$ и составляет от 0,05 до 0,12 кг/см². Меньшее удельное сопротивление составляет для плодово-ягодного сырья, частицы которого бесформенны и имеют малую жесткость, а большее удельное сопротивление принимается при расчетах приводов экстракторов, в которых экстрагируются материалы, имеющие определенную форму и большую жесткость, как, например свекловичная стружка, облепиховый жом, лакричный корень, виноградная выжимка.

Следовательно, для определения усилия необходимо для определения перемещения массы в аппаратах с механическим или вакуумным приводом можно пользоваться выражениями:

$$F = d P_y L S 10^4 + (p_m h_m + p_{ж} h_{ж}) S \text{ кг}, \quad (5)$$

$$\text{или } F = d P_y L S 10^4 + (p_m h_m + p_{ж} h_{ж}) S 9,8 \text{ мПа} \quad (6)$$

где dP – удельное сопротивление слоя, кг/см² на 1 м слоя;

L – высота или длина слоя материала, м;

S – площадь сечения экстрактора, м²;

$P_m p_{ж}$ – объемная масса твердой и жидкой фаз, кг/м³;

$H_m h_{ж}$ – высота слоя материала и жидкой фаз, м.

Представленная модель оптимизации потоков фаз в экстракторах непрерывного действия позволяет интенсифицировать процесс массоотдачи, а конструктивные решения в области перемещения твердой фазы в экстракторах с вакуумным приводом и соответствующая математическая модель этого решения позволяют вести процесс с различными смесями измельченных растительных материалов.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии - ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (г. Орел, Госуниверситет - УНПК, 5 - 8 июня 2012 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысянский, В.М. Экстракторы в пищевой промышленности / Лысянский В.М., Гребенюк С.М. – М.: Агропромиздат, 1987, - 180с.
2. Гребенюк, С.М. Технологическое оборудование сахарных заводов / С.М. Гребенюк. – 2-е издание. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 520с.
3. Быков, С.А. Математическая модель расчёта совместного гидролиза измельченного кофе и кофейной оболочки / С.А. Быков // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях: Сб. трудов Вып. 11– Воронеж: Издательство «Научная книга», 2006. – С. 76-78.
4. Быков, С.А. Математические методы и алгоритмы оценки качества продукции, процессов, услуг в экономических и технологических системах / С.А. Быков, С.М. Гребенюк, Ю.М. Плаксин // Информатика: концепции, современное состояние, перспективы развития: Материалы межвузовской научно-практической конференции. – Елец: ЕГУ им. И. А. Бунина, 2005.- С. 194-197.

Быков Сергей Анатольевич

ГОУ ВПО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина», г. Елец

Кандидат технических наук

Доцент кафедры «Автоматизированные системы управления и математическое обеспечение»

E-mail: bykov_sergei_67@mail.ru

S.A. BYKOV

SYSTEMS ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF PHASE FLUXES STRUCTURE IN THE EXTRACTORS OF UNINTERRUPTED OPERATION

The author presents the model of phase fluxes optimization in the extractors of uninterrupted operation which enables to intensify the process of mass return. He offers the constructive solutions in the sphere of solid phase transfer in the extractors with a vacuum drive and the corresponding mathematical model of this solution.

Keywords: *the model of phase fluxes optimization, the process of mass return, the extractors with a vacuum drive.*

BIBLIOGRAPHY

1. Lysjanskij, V.M. Jekstraktory v piwevoj promyshlennosti / Lysjanskij V.M., Grebenjuk S.M. – M.: Agropromizdat, 1987, - 180s.
2. Grebenjuk, S.M. Tehnologicheskoe oborudovanie saharnych zavodov / S.M. Grebenjuk. – 2-e izdanie. – M.: Legkaja i piwevaja promyshlennost', 1983. – 520s.
3. Bykov, S.A. Matematicheskaja model' raschjota sovmestnogo gidroliza izmel'chjonnogo kofe i kofejnoj obolochki / S.A. Bykov // Sovremennye problemy in-formatizacii v tehnikе i tehnologijah: Sb. trudov Vyp. 11–Vo–ronezh: Izdatel'stvo «Nauchnaja kniga», 2006. – S. 76-78.
4. Bykov, S.A. Matematicheskie metody i algoritmy ocenki kachestva produkcii, processov, uslug v jekonomicheskix i tehnologicheskix sistemah / S.A. Bykov, S.M. Grebenjuk, Ju.M. Plaksin // Informatika: kon-cepicii, so–vremennoe sostojanie, perspe–ktivny razvitija: Materialy mezhvuzovskoj nauchno-prak–ticheskoj konfe-rencii. – Elec: EGU im. I. A. Bunina, 2005.- S. 194-197.

Bykov Sergey Anatolievich

Eleck state university under the name of I.A.Bunin

Candidate of technical sciences

Associate professor of chair “Automated control systems and mathematical support”

E-mail: bykov_sergey_67@mail.ru

Я.А. ЛЫСЕНКО, С.А. КУЗНЕЦОВ

СПОСОБ ОБРАБОТКИ БЕЛЬЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ БАРАБАНЕ-АКТИВАТОРЕ

Рассмотрены современные способы активации белья. Предложен новый способ обработки белья в вертикальном стиральном барабане, который позволяет сочетать преимущество активаторных и барабанных стиральных машин.

Ключевые слова: способ стирки, активация, отжим, вертикальный барабан.

В настоящее время выпускается огромное количество стиральных машин, которые используют давно известные способы активации обрабатываемого белья. Многообразие современной стиральной техники достигается только за счет изменения дизайна и внедрение в стиральную машину не всегда нужных дополнительных функций. Это значит, что способы стирки белья не менялись уже не один десяток лет; как и прежде, белье обрабатывается либо в горизонтальном перфорированном реверсивно вращающемся стиральном барабане, либо в баке, в донной или боковой части которого располагается вращающийся оребренный диск (активатор).

Барабанные стиральные машины используют способ перемешивания (перелопачивания) мокрого белья внутри горизонтального барабана, который в процессе стирки вращается в режиме реверса со скоростью 50-60 об/мин, а отжим осуществляется центрифугированием со скоростью 300-800 об/мин [1].

Главное преимущество таких стиральных машин состоит в том, что весь технологический процесс обработки белья осуществляется в одном барабане и может быть автоматизирован; кроме того, способ активации, который используется в барабанных стиральных машинах, позволяет обработать белье с наименьшим износом. Тем не менее, такие стиральные машины характеризуются высоким энергопотреблением и низкой производительностью, связанными в первую очередь с малопродуктивным способом стирки с прерывистой организацией техпроцесса обработки белья, которая ведет к тому, что привод реверсивно вращающегося барабана работает постоянно в пусковом режиме.

Кроме того, работа таких стиральных машин сопровождается повышенным шумом и виброактивностью, причиной которых является неравномерное распределения белья в стиральном барабане. Практически все стиральные машины барабанного типа снабжены многокилограммовыми противовесами, демпферами, и упругими элементами, в результате чего вес конструкции возрастает в несколько раз.

Активаторные стиральные машины [2, 3] обрабатывают белье примерно в три раза быстрее при помощи активатора, который попеременно вращает воду с бельем то в одну, то в другую сторону, при этом водные потоки сталкиваются и, проникая через волокна, эффективно отстирывают грязь. Активатор у таких стиральных машин может быть в форме шнека (американский тип), (рис. 1), или в форме пропеллера (азиатский тип), (рис.2).

Стиральные машины, использующие данный способ активации отличаются:

- высокой производительностью;
- экономичностью (минимум воды и порошка): возможностью стирки в «одной» воде сначала белого, потом цветного, а напоследок черного белья;
- возможностью использования в сложных бытовых условиях – там, где отсутствует водопровод;
- меньшим уровнем шума и вибраций, поскольку центрифугирование осуществляется в вертикальном барабане.

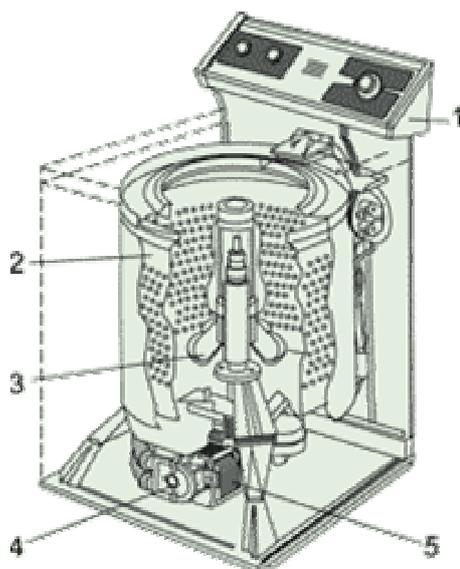


Рисунок 1 – Активаторная стиральная машина (американского типа)
 1 – панель управления, 2 – барабан, 3 – активатор, 4 – сливной насос, 5 – электродвигатель

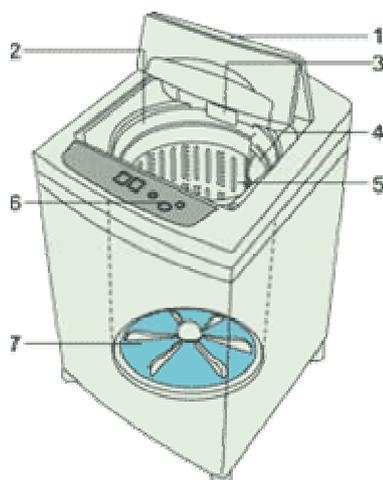


Рисунок 2 – Активаторная стиральная машина (азиатского типа)
 1 – верхняя крышка, 2 – отделение для отбеливателя, 3 – отделение для стирального порошка,
 4 – фильтр-уловитель, 5 – барабан, 6 – панель управления, 7 – активатор

Тем не менее, стиральные машины, которые используют данный тип активации, обладают рядом существенных недостатков, один из которых – это значительный износ обрабатываемого белья, поскольку активатор имеет ребрение на своей внешней поверхности и вращается с достаточно высокой скоростью (200-250 об/мин). Кроме того, для активаторных стиральных машин требуется дополнительное устройство, которое осуществляло бы отжим, поэтому данный тип активации достаточно трудно поддается автоматизации, но производители таких стиральных машин-автоматов решают данную проблему путем интегрирования активатора и вертикального перфорированного барабана, который осуществляет отжим центрифугированием. Данная проблема имеет два способа решения: либо используется два двигателя, один из которых приводит в движение активатор, другой центрифугу, либо один двигатель и редуктор, который попеременно вращает активатор и центрифугу. Оба эти способа утяжеляют и усложняют конструкцию стиральной машины.

Идея использования вертикального барабана в качестве активатора не нова – в том или ином виде разработка таких стиральных машин шла параллельно с разработкой машин с горизонтальным барабаном, но по разным причинам им проигрывала [4]. В частности, гори-

горизонтальный барабан позволяет реализовать дополнительную, но достаточно привлекательную функцию «легкой глажки», недоступную для вертикального барабана. Тем не менее, непреодолимое ограничение производительности при обработке белья в горизонтальном барабане заставляет конструкторов и ученых искать пути разумной интенсификации процесса стирки без снижения степени его автоматизации. Социальные предпосылки интенсификации активации в основном сводятся к двум: во-первых, расширяется использование более прочных синтетических тканей, во-вторых, моральное старение текстильных изделий все чаще наступает раньше их физического износа, что связано с повышением благосостояния населения. На первый план выходят другие ориентиры: экономия электроэнергии, времени, водопотребления и снижение шумности процесса.

Предлагается способ стирки и устройство (рис.3), которое сочетает в себе преимущества барабанных и активаторных стиральных машин, исключая их недостатки [5, 6]. В данном способе стирки активация и отжим белья осуществляется в вертикальном перфорированном стиральном барабане, вращающемся в баке, который заполняется стиральным раствором (при стирке) или водой (при полоскании).

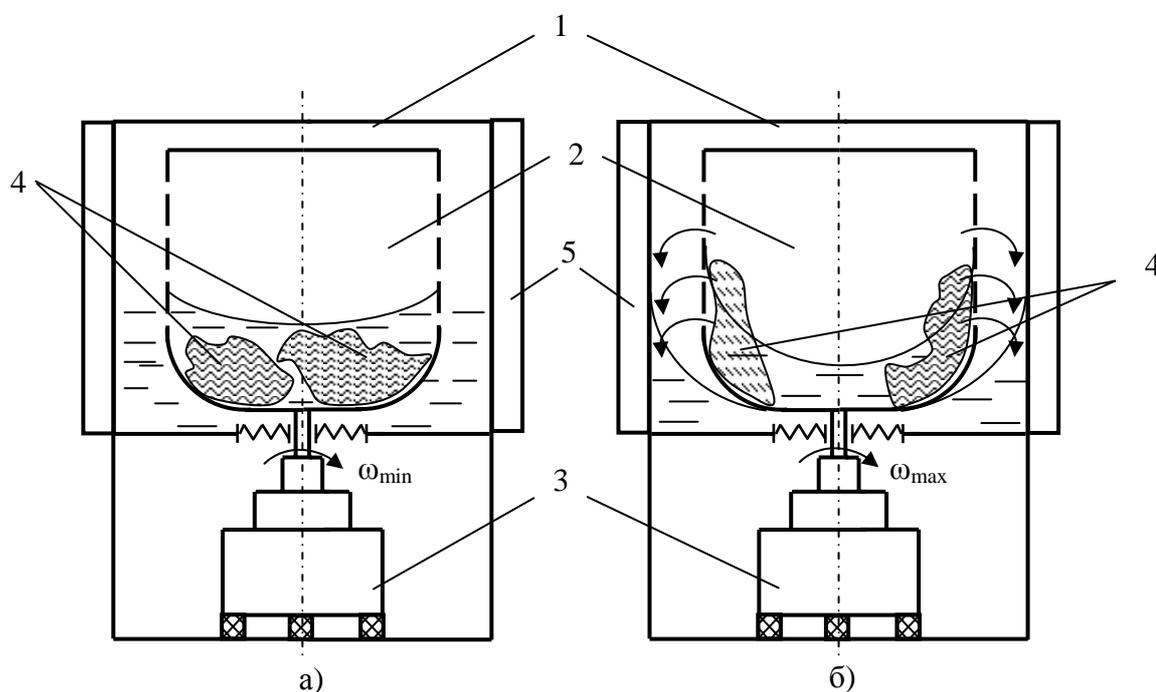


Рисунок 4 – Способ стирки в стиральной машине с вертикальным барабаном-активатором
 1 – бак; 2 – стиральный барабан; 3 – электродвигатель; 4 – белье; 5 – накопительная емкость

Угловая скорость стирального барабана при стирке циклически изменяется в заданных пределах. При понижении угловой скорости вращения ω_{min} стирального барабана происходит впитывание бельем стирального раствора (рис.4 а), а при повышении угловой скорости ω_{max} белье под действием центробежной силы прижимается к стенкам стирального барабана и поднимается вдоль линии образующей стирального барабана; в этот момент происходит незначительный отжим белья (рис.4 б).

Принцип стирки, то есть воздействия на белье, сочетает в себе «эффект губки» с перемешиванием и фильтрованием, поскольку при ω_{min} минимальных оборотах стиральный раствор из бака поступает в барабан через перфорации и белье впитывает раствор, а при ω_{max} максимальной угловой скорости вращения раствор под действием центробежной силы частично удаляется из белья.

Угловая скорость вращения барабана [7] определяются из соотношения:

$$\Phi = \frac{F_u}{P_T} = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot R}{m \cdot g} = \frac{\omega^2 \cdot R}{g}$$

где Φ – фактор разделения (безразмерная величина);

$F_{ц} = m \cdot \omega^2 \cdot R$ – центробежная сила (ω – угловая скорость, R – радиус барабана, m – масса тела);

P_T – сила тяжести

откуда

$$\omega = \sqrt{\frac{\Phi \cdot g}{r}}.$$

При $\Phi = 1$ белье начинает прижиматься к стенкам барабана, поэтому значения фактора разделения Φ на операциях стирки и полоскания принимается равным 0,7 – 0,8 [7].

Минимальная угловая скорость вращения барабана при стирке принимается:

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{0,8 \cdot g}{r}} \text{ рад/с.}$$

Максимальная частота вращения барабана при стирке определяются также величиной фактора разделения Φ , который должен превышать 1, чтобы изделия прижимались к стенкам барабана, принимая форму тора [7].

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{1,3 \cdot g}{r}} \text{ рад/с}$$

Дополнительным условием является соблюдение условия виброустойчивости: $\omega \leq 0,7 \cdot \omega_{кр}$ [8].

При отжиме угловая скорость вращения должна быть выбрана таким образом, чтобы удовлетворялось условие виброустойчивости: $\omega > 1,3 \cdot \omega_{кр}$ [8]. Фактор разделения при центробежном отжиме находится в пределах 50 – 270:

$$\omega_{отж} \geq \sqrt{\frac{50 \cdot g}{r}}.$$

Количество разгонов и замедлений стирального барабана (циклов стирки) зависит от степени загрязнения и типа обрабатываемого белья и находится в пределах 10 – 15 циклов.

Данный способ стирки позволяет исключить полные остановки привода в процессе активации белья, а также режим реверса, без которого невозможна активация в барабанных стиральных машинах (европейского типа). Иными словами, этот способ позволяет не только автоматизировать весь технологический процесс обработки белья, но и сделать его непрерывным, поскольку привод в процессе работы стиральной машины вращается без остановок в одном и том же направлении. А это позволяет снизить энергопотребление за счет того, что в процессе стирки исключена полная остановка стирального барабана, а, значит, и инерционные потери. Кроме того, сам способ воздействия на белье предполагает большую интенсивность, чем в обычных стиральных машинах с горизонтальным барабаном. Повышение же производительности, то есть сокращение длительности цикла обработки белья, достигается за счет повышения интенсивности активации, применения непрерывной организации технологического процесса и использования накопительной емкости, наличие которой позволяет параллельно выполнять несколько операций в рабочем цикле. Например: пока осуществляется операция стирки белья, параллельно происходит наполнение накопительной емкости водой из системы.

Регулировка максимальной и минимальной угловой скорости вращения стирального барабана при стирке может осуществляться несколькими способами. Во-первых, с помощью электронной системы управления, которая подает сигнал на электродвигатель, чтобы тот вращался либо с ω_{\max} , либо с ω_{\min} [9]. Во-вторых, при мягкой характеристике электродвигателя регулировка может быть осуществлена за счет изменения уровня стирального раствора в баке [10]. Поскольку начало резонансной зоны зависит и от массы белья и от случайного расположения центра его масс, возможен также и третий способ регулировки угловых скоростей, который позволяет осуществлять оперативную индикацию начала зоны резонанса [11]

для своевременного снижения угловой скорости вращения барабана при стирке и для задействования одного из способов преодоления резонанса при отжиме.

Наличие вертикального барабана позволяет в процессе отжима решить проблему перехода через зону резонанса, которая по-прежнему остается актуальной для барабанных стиральных машин (европейского типа). Как показывает практика, переход через зону резонанса стиральными машинами активаторного типа, у которых отжим осуществляется в вертикальной центрифуге, происходит с меньшим шумом и виброактивностью, чем у стиральных машин с горизонтальным барабаном. Кроме того, стиральные машины с вертикальным центрифугированием не снабжаются противовесами, демпферами и упругими элементами, как стиральные машины с горизонтальным центрифугированием, что делает первые более предпочтительными с точки зрения транспортировки, поскольку их вес на порядок ниже. При вертикальном расположении стирального барабана сила тяжести стирального барабана с бельем и раствором действует вдоль оси вращения и перпендикулярна плоскости колебаний, и поэтому не оказывает на данную плоскость существенного влияния. Когда же стиральный барабан расположен горизонтально, сила тяжести оказывает самое непосредственное влияние на плоскость колебаний, поскольку совпадает с ней и перпендикулярна оси вращения барабана.

Предложенный способ стирки интегрировал в себе наиболее популярные способы активации белья. Стирка, полоскание и отжим, как и в барабанных стиральных машинах (европейского типа) осуществляется в одном и том же рабочем органе (стиральном барабане), это упрощает конструкцию и делает возможной автоматизацию техпроцесса обработки белья. Вертикальное расположение барабана позволяет применить более интенсивный способ активации, предполагающий более высокую угловую скорость его вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скоробогатов, Н.А. Современные стиральные машины и моющие средства / Н.А. Скоробогатов. – СПб.: БХВ-Петербург, Арлит, 2001. – 240 с.
2. Коляда, В.В. Все о стиральных машинах / В.В. Коляда // Наука и жизнь. Ирвис, 2005. – № 9. – С. 37-43.
3. Коляда, В.В. Планета стиральных машин / В.В. Коляда // Потребительский компас. Ирвис, 2005. – №1. – С. 16-22.
4. А.с. RU №1684373. МПК D06F23/04. Стиральная машина / Харитонов П.Д. Заявлено 01.09.89; опубл. 15.10.1991, Бюл. №38.
5. Пат. 2230842 Российской Федерации, МПК D 06 F 23/04. Стиральная машина / Кузнецов С.А.; Алевин С.Н.; Лысенко Я.А.; заявитель и патентообладатель Южно-Российский университет экономики и сервиса.– 2002135535; заявл. 26.12.2002; опубл. 20.06.2004, Бюл. № 17.
6. Пат. №2418117 Российская Федерация, С1, МПК 7 D 06 F 23/04. Способ жидкостной обработки белья в стиральных машинах / Кузнецов С.А.; Лысенко Я.А.; Леухов А.А.; заявитель и патентообладатель Южно-Российский университет экономики и сервиса. – 2009149162/05 заявл. 28.12.2009; опубл. 10.05.2011 Бюл №13.
7. Лебеде, В. С. Технологические процессы машин и аппаратов в производствах бытового обслуживания: учеб. для вузов / В.С. Лебедев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – 336 с.
8. Михалев, М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи: учеб. пособие для студентов вузов / М.Ф. Михалев, Н.П. Третьяков, А.И. Михалева. – Л.: Машиностроение, 1984. – 301 с.: ил.
9. Лысенко, Я.А. Стиральная машина с непрерывной организацией техпроцесса / Я.А. Лысенко // Вісник східноукраїнського національного університету імені В. Даля. - №2 (132)– Луганськ, 2009. – С. 223 - 227.
10. Лысенко, Я.А. Способ снижения виброактивности барабана стиральной машины / Я.А. Лысенко, С.А. Кузнецов // Актуальные проблемы техники и технологии: сб. науч. трудов / редкол.: Н.Н. Прокопенко [и др.]; ГОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса». – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2010. С 20-21.
11. Пат. 2230842 Российской Федерации, МПК G 01 M 1/00. Способ оперативной индикации начала резонанса роторных систем / Кузнецов С.А.; Лысенко Я.А.; Старченко И.Е. заявитель и патентообладатель Южно-Российский университет экономики и сервиса.– 2010105491/28; заявл. 15.02.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.

Лысенко Ярослав Алексеевич

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты, Ростовская область
Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»
E-mail: yaroslav.lsnk@mail.ru

Кузнецов Сергей Анатольевич

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты, Ростовская область
Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика и конструирование машин»
E-mail: Lima.57@mail.ru

Y.A. LYSENKO, S.A. KUZNETSOV

THE WAY OF HANDLING LINEN IN VERTICAL DRUM-ACTIVATOR

The modern methods of activation underwear. A new method of processing laundry detergent in a vertical drum, that combines the advantage of activator and drum washing machines.

Keywords: *the method of washing, activation, extraction, vertical drum.*

BIBLIOGRAPHY

1. Skorobogatov, N.A. Sovremennye stiral'nye mashiny i mojuvie sredstva / N.A. Skorobogatov. – SPb.: BHV-Peterburg, Arlit, 2001. – 240 s.
2. Koljada, V.V. Vse o stiral'nyh mashinah / V.V. Koljada // Nauka i zhizn'. Irvis, 2005. – № 9. – S. 37-43.
3. Koljada, V.V. Planeta stiral'nyh mashin / V.V. Koljada // Potrebiteľ'skij kompas. Irvis, 2005. – №1. – S. 16-22.
4. A.s. RU №1684373. MPK D06F23/04. Stiral'naja mashina / Haritonov P.D. Zajavleno 01.09.89; opubl. 15.10.1991, Bjul. №38.
5. Pat. 2230842 Rossijskoj Federacii, MPK D 06 F 23/04. Stiral'naja mashina / Kuznecov S.A.; Ale-hin S.N.; Lysenko Ja.A.; zajavitel' i patentoobladatel' Juzhno-Rossijskij universitet jekonomiki i servisa.– 2002135535; zajavl. 26.12.2002; opubl. 20.06.2004, Bjul. № 17.
6. Pat. №2418117 Rossijskaja Federacija, S1, MPK 7 D 06 F 23/04. Sposob zhidkostnoj obrabotki be-l'ja v stiral'nyh mashinah / Kuznecov S.A.; Lysenko Ja.A.; Leuhov A.A.; zajavitel' i patentoobladatel' Juzhno-Rossijskij universitet jekonomiki i servisa. – 2009149162/05 zajavl. 28.12.2009; opubl. 10.05.2011 Bjul №13.
7. Lebede, V. S. Tehnologicheskie processy mashin i apparatov v proizvodstvah bytovogo obsluzhiva-nija: ucheb. dlja vuzov / V.S. Lebedev. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Legprombytizdat, 1991. – 336 s.
8. Mihalev, M.F. Raschet i konstruirovanie mashin i apparatov himicheskikh proizvodstv: Primery i zadachi: ucheb. posobie dlja studentov vtuzov / M.F. Mihalev, N.P. Tret'jakov, A.I. Mihaleva. – L.: Mashino-stroenie, 1984. – 301 s.: il.
9. Lysenko, Ja.A. Stiral'naja mashina s nepreryvnoj organizaciej tehprocessa / Ja.A. Lysenko // Visnik shidnoukrainskogo nacional'nogo universitetu imeni V. Dalja. - №2 (132)– Lugans'k, 2009. – S. 223 - 227.
10. Lysenko, Ja.A. Sposob snizhenija vibroaktivnosti barabana stiral'noj mashiny / Ja.A. Lysenko, S.A. Kuznecov // Aktual'nye problemy tehniki i tehnologii: sb. nauch. trudov / redkol.: N.N. Prokopenko [i dr.]; GOU VPO «Juzhno-Ros. gos. un-t jekonomiki i servisa». – Shahty: GOU VPO «JuRGUJeS», 2010. S 20-21.
11. Pat. 2230842 Rossijskoj Federacii, MPK G 01 M 1/00. Sposob operativnoj indikacii nachala rezonansa ro-tornyh sistem / Kuznecov S.A.; Lysenko Ja.A.; Starchenko I.E. zajavitel' i patentoobladatel' Juzhno-Rossijskij universitet jekonomiki i servisa.– 2010105491/28; zajavl. 15.02.2010; opubl. 10.08.2011, Bjul. № 22.

Lysenko Yaroslav Alekseevich

South Russia state University of Economics and Services, Shahty, Rostov region,
candidate of technical science, older lecturer of faculty «Applied mechanics and designing of machines»
E-mail: yaroslav.lsnk@mail.ru

Kuznetsov Sergey Anatolyevich

South Russia state University of Economics and Services, Shahty, Rostov region,
doctor of technical science, the professor of faculty «Applied mechanics and designing of machines»
E-mail: Lima.57@mail.ru

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 620.179.14

П.Н. ШКАТОВ, Д.В. КОЛОСКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ДЕФЕКТАМИ В ТЕПЛОВЫХ КАНАВКАХ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН

Статья посвящена математическому моделированию специализированного вихретокового преобразователя для дефектоскопии тепловых канавок роторов паровых турбин. Полученные результаты позволили исследовать основные закономерности при дефектоскопии тепловых канавок и разработать эффективный способ отстройки от влияния мешающих факторов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, вихретоковый преобразователь, дефектоскопия, тепловая канавка.

Процесс разработки средств вихретокового контроля объектов сложной формы весьма трудоемок, так как требует применения специализированных вихретоковых преобразователей (ВТП), согласованных с формой сканируемой поверхности. Один из эффективных способов исследования различных вариантов выполнения специализированных ВТП – математическое моделирование на основе метода конечных элементов (МКЭ). Данная статья посвящена математическому моделированию взаимодействия специализированного ВТП типа ВТПУЗ×8 с дефектами в тепловых канавках роторов паровых турбин. Тепловая канавка ротора имеет вид U-образного паза (рис. 1) глубиной 8 мм и шириной 3 мм. Наиболее вероятно появление трещин в дне тепловой канавки [1]. В процессе эксплуатации ее поверхность покрывается твердыми отложениями, удалить которые достаточно сложно.

Для решения задачи контроля тепловых канавок исследовалась возможность применения различных типов ВТП. Наиболее удачной оказалась конструкция трансформаторного ВТП с возбуждающей катушкой на П-образном сердечнике и измерительными катушками, расположенными между его полюсами. Как будет показано ниже, это позволило выявлять опасные дефекты с отстройкой от влияния сильно влияющих мешающих факторов: вариации угла наклона и рабочего зазора. Вариации угла наклона и рабочего зазора связаны с наличием в канавке твердых отложений, не удаленных после ее механической зачистки.

На рисунках 2-3 приведена геометрическая расчетная модель в продольном и поперечном сечениях.

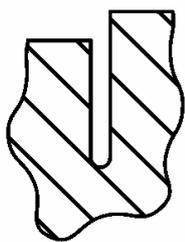


Рисунок 1 – Поперечное сечение тепловой канавки ротора

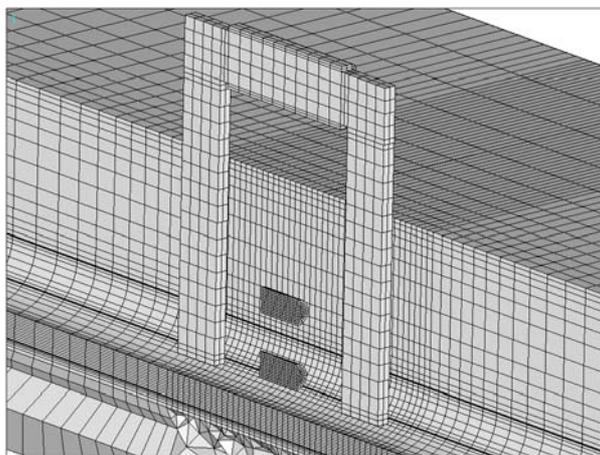


Рисунок 2 – Продольное сечение геометрической расчетной модели

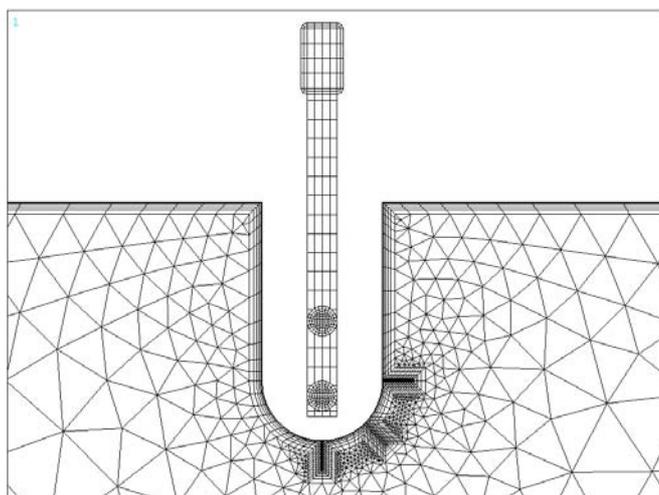


Рисунок 3 – Поперечное сечение геометрической расчетной модели

Исследования проводились методом конечных элементов с помощью программного пакета ANSYS. В процессе расчетов вычислялись комплексы гармонических напряжений \underline{U} , наводимые в измерительной катушке исследуемого вихретокового преобразователя ВТП при различных условиях:

- напряжение холостого хода \underline{U}_0 , наводимое без взаимодействия ВТП с контролируемым объектом;
- напряжение \underline{U}_{MC} , наводимое на бездефектном участке при симметричном расположении ВТП в канавке;
- напряжение \underline{U}_{MP} , наводимое на бездефектном участке при прекосе ВТП в канавке;
- напряжение \underline{U}_{MZ} , наводимое на бездефектном участке при изменении рабочего зазора ВТП в канавке;
- напряжение \underline{U}_{DC} , наводимое на дефектном участке при симметричном расположении ВТП в канавке;
- напряжение \underline{U}_{DP} , наводимое на дефектном участке при прекосе ВТП в канавке;
- напряжение \underline{U}_{DZ} , наводимое на дефектном участке при изменении рабочего зазора ВТП в канавке.

Исследуемые дефекты имели вид длинной трещины с различным угловым расположением в полукруглом дне канавки, а именно, 0° , 45° и 90° .

В процессе моделирования исследовались изменения напряжения \underline{U} , возникающие под влиянием дефекта, перекоса ВТП и изменения рабочего зазора, т.е. при воздействии контролируемого и мешающих параметров.

Соответствующие величины $\Delta \underline{U}_d = \underline{U}_{DMC} - \underline{U}_{MC}$, $\Delta \underline{U}_z = \underline{U}_{MZ} - \underline{U}_{CM}$ и $\Delta \underline{U}_p = \underline{U}_{PM} - \underline{U}_{CM}$ для обобщения получаемых результатов нормировались по модулю напряжения холостого хода U_0 . Результаты расчетов приведены на рисунках 4–6.

На рисунке 4 приведены зависимости амплитуды приращения относительного напряжения $\Delta \underline{U}_d^*$, вносимого дефектами разной глубины h с различным угловым положением φ в дне канавки от их глубины при рабочей частоте $f = 30$ кГц. Из приведенных зависимостей следует, что смещение углового положения φ дефекта от нижней точки дна канавки приводит к уменьшению сигнала ВТП до 25 % при смещении дефекта по углу на 90° . Степень влияния углового положения дефекта на изменение регистрируемого сигнала при вариации рабочей частоты от 5 кГц до 50 кГц изменяется несущественно. Анализ рассчитанных годографов $\Delta \underline{U}_d^*$ показал, что фаза векторов вносимого напряжения не зависит от углового положения дефекта.

На рисунке 5 показаны годографы приращений относительного напряжения $\Delta \underline{U}_d^*$, $\Delta \underline{U}_0^*$ и $\Delta \underline{U}_z^*$ под воздействием дефектов разной глубины h , перекоса на угол α и изменения рабочего зазора z , соответственно.

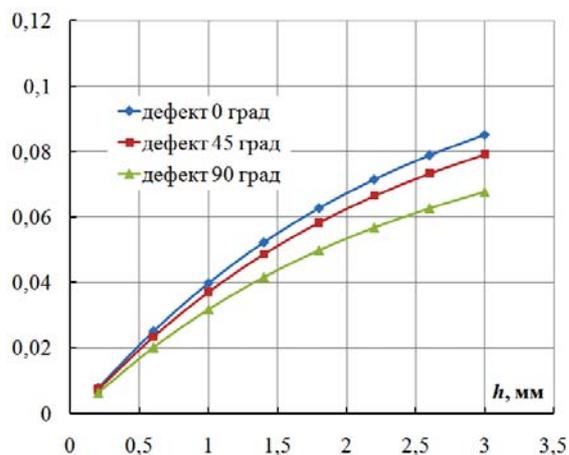


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды приращения относительного напряжения $\Delta \underline{U}_o^*$, вносимого дефектами разной глубины h с различным угловым положением φ в дне канавке от их глубины

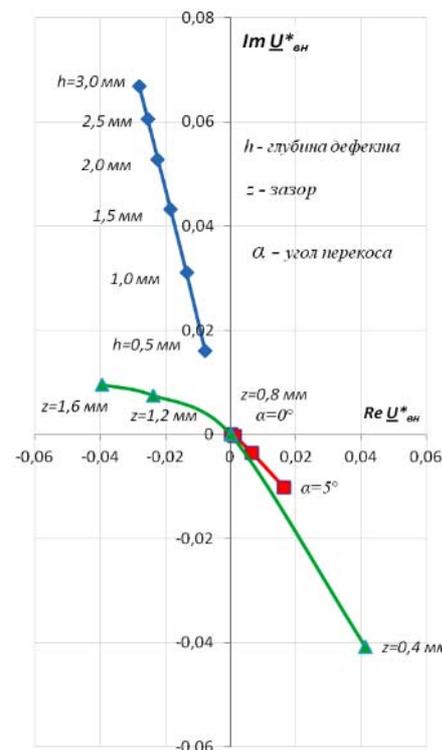


Рисунок 5 – Годографы приращений $\underline{U}_{вн}^*$ при изменении глубины дефекта h , рабочего зазора z и угла перекоса α . Возбуждающая обмотка сверху
Компенсация на зазоре 0,8 мм, рабочая частота $f = 15$ кГц

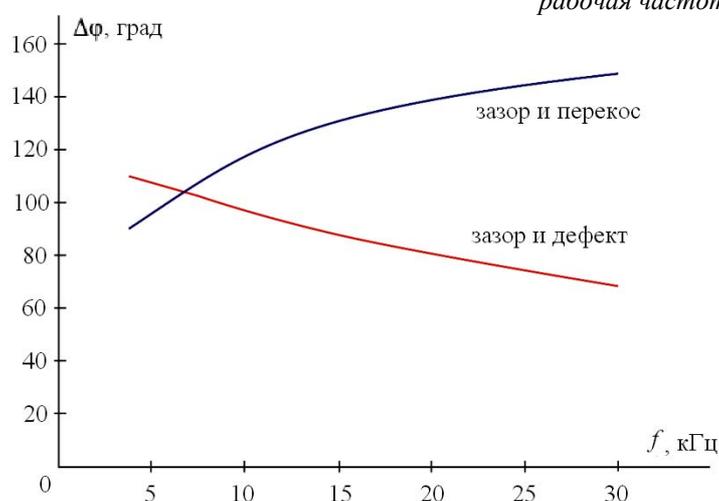


Рисунок 6 – Зависимость от частоты f сдвига фаз при воздействии дефекта и изменениях рабочего зазора, а также сдвига фаз при воздействии дефекта и угла перекоса

Выполненные расчеты и проведенные экспериментальные исследования показывают, что при возможных перекосах ВТП фаза возникающих приращений напряжения $\Delta \underline{U}_п$ также неизменна. Амплитуда $\Delta \underline{U}_п$ зависит от угла перекоса α по закону, близкому к экспоненте. При этом перекосы с углом $\alpha < 6^\circ$ не оказывают существенного влияния на регистрируемые сигналы, так как эквивалентны воздействию дефекта глубиной менее 0,2 мм. Фаза приращения $\underline{U}_{вн}^*$ при увеличении и уменьшении зазора относительно величины $z_{ном} = 0,8$ мм имеет излом. Однако в пределах вариации зазора z в рабочем диапазоне $z = 0,8 \dots 1,2$ мм изменения фазы приращения $\underline{U}_{вн}^*$ незначительны. Отмеченные закономерности наблюдаются в широком диапазоне изменения рабочей частоты. Вместе с тем фазовый сдвиг между векторами

приращений вносимого напряжения ΔU_d^* , ΔU_p^* и ΔU_z^* существенно зависит как от рабочей частоты, так и от электромагнитных свойств металла ротора.

Для одновременной отстройки от возможных в процессе контроля изменений рабочего зазора и перекосов следует стремиться к коллинеарности векторов вносимых ими напряжений $-\Delta U_{п1}^*$ (зазор) и $\Delta U_{п2}^*$ (перекос). При этом сдвиги фаз между векторами $\Delta U_{п1}^*$ и ΔU_d^* , а также $\Delta U_{п1}^*$ и ΔU_d^* должны быть близки к 90° . Приведенный на рисунке 6 для стали 34ХМА график показывает, что путем вариации рабочей частоты удается выполнить условие коллинеарности $\Delta U_{п1}^*$ и $\Delta U_{п2}^*$ при наличии фазового сдвига между каждым из мешающих факторов и полезным сигналом не менее 70° . Это позволяет одновременно отстроиться от обоих мешающих факторов амплитудно-фазовым способом при несущественном ослаблении полезного сигнала. Аналогичные зависимости получены и для других марок стали, используемых для изготовления роторов.

Установленные на основе математического моделирования закономерности подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями. Разработана и внедрена методика контроля, учитывающая установленные закономерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резинских, В.Ф. Увеличение ресурса длительно работающих паровых турбин [Текст] / В.Ф. Резинских, В.И. Гладштейн, Г.Д. Авруцкий. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 296 с.

Шкатов Петр Николаевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Доктор технических наук, профессор, директор НУЦ «КАСКАД» МГУПИ
Тел. (499) 268-76-94 факс. (495) 964-91-50
E-mail: petr_shkatov@mail.ru

Колосков Дмитрий Владимирович

Московский государственный университет приборостроения и информатики, г. Москва
Аспирант
E-mail: Koloskovdv@bk.ru

P.N. SHKATOV, D.V. KOLOSKOV

MATHEMATICAL MODELLING OF INTERACTION EDDY CURRENT PROBE WITH DEFECTS IN THERMAL FLUTES OF ROTORS OF STEAM TURBINES

In article results of researches of the eddy current probe for non destructive testing rotors turbines are resulted. Recommendations for choice rational parameters eddy current the probe are made. Dependences of its target signal on parameters of defect and influence of stirring factors are received.

Keywords: eddy current a method, a thermal flute, a rotor, the steam turbine, defect.

BIBLIOGRAPHY

1. Rezinskih, V.F. Uvelichenie resursa dlitel'no rabotajuvih parovyh turbin [Tekst] / V.F. Rezin-skih, V.I. Gladshitejn, G.D. Avruckij. – М.: Izdatel'skij dom MJeI, 2007. – 296 s.

Shkatov Petr Nikolaevich

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow
Doctor of technical science, professor, director of the NCA "CASCADE"
Tel. (499) 268-76-94 fax (495) 964-91-50
E-mail: petr_shkatov@mail.ru

Koloskov Dmitriy Vladimirovich

The Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow
The post-graduate student
E-mail: Koloskovdv@bk.ru

А.Б. ЕРШОВ, В.Я. ХОРОЛЬСКИЙ, А.В. ЕФАНОВ

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФУНКЦИИ «МЕАМ» ДЛЯ НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОСЦИЛЛОГРАФАХ СЕРИИ TPS2000 ФИРМЫ TEKTRONIX

В статье изложены способы снижения методической погрешности определения среднего значения напряжения одиночного импульса в цифровых запоминающих осциллографах серии TPS2000, вычисляемого в режиме автоматических измерений (функция «Meat»). Рассмотрены: визуально-аналитический способ; способ использования интерфейсных функций осциллографа и программных методов расчета средних значений импульсов. Указана возможность и даны пояснения процедуры использования способа программной обработки двоичных данных.

Ключевые слова: осциллографы серии TPS2000, среднее значение напряжения одиночного импульса, функция «Meat».

Цифровые запоминающие осциллографы серии TPS2000 фирмы Tektronix обеспечивают решение многих инженерных и исследовательских задач современной практики проектирования и эксплуатации систем, использующих быстротекущие электрические процессы. Высокая частота выборок (до 2 Гвыб/с) и большая скорость сбора данных (до 180 осциллограмм в секунду), различные режимы сбора данных (выборка, пиковое детектирование, усреднение), множество сервисных функций и удобный интерфейс пользователя сделали осциллографы серии TPS 2000 весьма популярными в кругу инженеров-эксплуатационщиков.

Блок-схема различных сервисных функций осциллографов серии TPS2000 и их взаимосвязи друг с другом показаны на структурной схеме, приведенной на рисунке 1 [1].

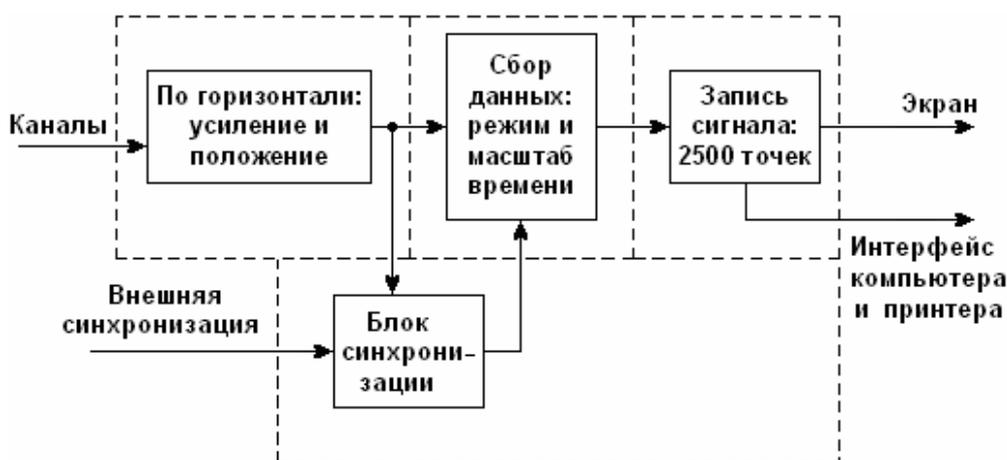


Рисунок 1 – Блок-схема сервисных функций осциллографов серии TPS2000 фирмы Tektronix и их связей

Осциллографы данной серии работают в режимах записи сигналов и их измерений.

При записи сигнала (сборе данных) осциллограф преобразует сигнал в цифровую форму и отображает его значение на экране. Режим сбора данных определяет способ преобразования сигнала в цифровую форму, а параметр масштаба времени влияет на временной интервал и уровень детализации записываемого сигнала.

В режиме выборки для воссоздания сигнала осциллограф производит выборку отсчетов через одинаковые интервалы времени. Данный режим в большинстве случаев позволяет

точно отобразить сигнал, однако не дает возможности отследить быстрые флуктуации сигнала, которые могут попадать в диапазон между точками регистрации отсчетов. Это может привести к искажению, а также к частичной потере коротких импульсных составляющих сигнала.

В подобных случаях рекомендуется использовать режим пикового детектирования, в котором осциллограф производит поиск максимальных и минимальных значений входного сигнала на каждом интервале между точками регистрации, и эти значения используются для отображения сигнала на экране. Таким образом, режим пикового детектирования позволяет регистрировать и отображать короткие импульсы, которые могут быть утеряны в режиме выборки, однако при пиковом детектировании может значительно повышаться уровень шума.

В режиме усреднения осциллограф производит запись нескольких периодов сигнала с последующим усреднением полученных данных и отображением усредненных результатов.

Данный режим рекомендуется использовать для снижения уровня шума.

Для априорной численной оценки целесообразности применения того или иного режима записи сигнала можно воспользоваться частотой выборки сигнала записи, определяемой длительностью регистрируемого сигнала и соответствующим масштабом временной развертки. Например, для осциллографа TPS2024 частота выборок составляет 2 Гвыб/с, а максимальная длина записи достигает 2500 выборок. Для регистрации сигнала с длительностью до 100 мкс необходимо использовать масштаб временной развертки M 10.0 μ s, при установке которого частота выборки сигнала записи $f_{сз}$ составляет

$$f_{сз} = \frac{2500}{100 \cdot 10^{-6}} = 25 \text{ Мвыб/с}.$$

При данной частоте выборки и записи минимальная длительность гарантированно регистрируемой флуктуации сигнала δt_c составляет

$$\delta t_c = \frac{2}{25 \cdot 10^6} = 80 \text{ нс}.$$

Осциллографы серии TPS2000 обеспечивают режим автоматических измерений. С помощью меню *MEASURE* (Измерения) можно одновременно выполнить до пяти автоматических измерений, в том числе измерение среднеарифметического значения амплитуды по всему сигналу (функция «*Meam*» – среднее) и измерение среднеквадратического значения амплитуды первого периода сигнала. Для повышения точности измерений используются данные в точках дискретизации сигнала с применением координатной сетки и курсоров.

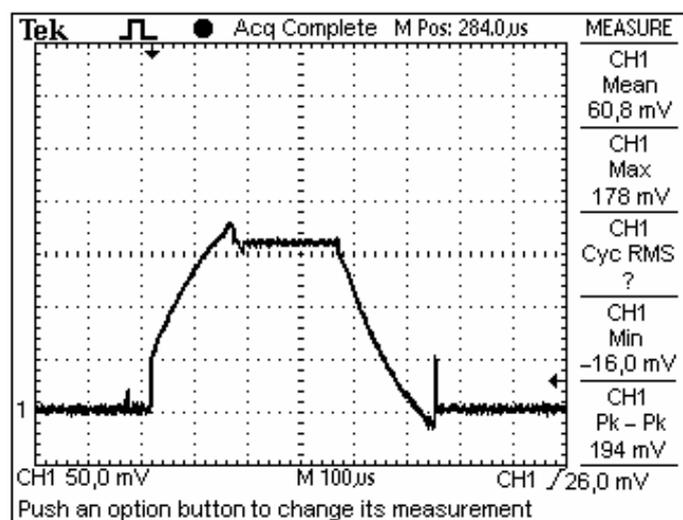


Рисунок 2 – Осциллограмма одиночного импульса с изображением значений результатов автоматических измерений функции «*Meam*»

Результаты автоматических измерений отображаются в полях области экранных сообщений. Значения этих полей обновляются при регистрации осциллографом новых данных.

При записи результатов автоматических измерений значения функции «Meam» осциллограф производит автоматические вычисления данной функции по всему зарегистрированному сигналу (рис. 2). Вследствие этого возникает большая методическая погрешность измерений. Для минимизации данной погрешности необходимо посредством изменения масштаба временной развертки совместить точки начала и окончания импульсного процесса с первой и последней выборками записываемого сигнала. Однако их полное совмещение вследствие дискретности установки масштаба временной развертки практически невозможно, поэтому в ряде случаев величина погрешности может достигать десятков процентов.

При общетеоретическом подходе величина погрешности определяется базовым выражением для среднего значения периодического сигнала [2]:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt . \quad (1)$$

Для непериодического сигнала выражение (1) преобразуется к виду

$$U_{\text{н\delta}} = \frac{1}{\tau_{\text{е}}} \int_{t_1}^{t_2} u(t) dt , \quad (2)$$

где $\tau_{\text{е}}$ – длительность импульса;

t_1, t_2 – моменты начала и окончания импульсного процесса.

Выражение (2) для выборочных значений импульсного процесса запишется в виде:

$$U_{\text{н\delta}} = \frac{1}{\tau_{\text{е}}} \sum_{i=t_1}^{i=t_2} u_i(t) , \quad (3)$$

где u_i – выборочные значения напряжения импульса в точках дискретизации.

Из выражения (3) видно, что величина методической погрешности зависит от формы импульса и определяется величиной множителя, стоящего перед знаком суммы.

Для ликвидации вышеуказанной методической погрешности необходимо производить суммирование выборочных значений не по всему зарегистрированному сигналу, а только по сигналу импульса. Следует также отметить, что фирма производитель осциллографов данной серии никаких пояснений по данным обстоятельствам не дает, кроме того, никаким образом не указывает на существование данных обстоятельств.

Из представленных разъяснений также следует, что существует несколько вариантов учета данной погрешности. Наиболее простым является визуально-аналитический способ. Сущность данного способа сводится к тому, что по записанной осциллограмме импульсного процесса определяется количество выборочных значений, приходящихся непосредственно на импульсный процесс $n_{\text{и}}$, а затем по формуле

$$U_{\text{ср}} = \frac{n_{\text{и}} \cdot u_{\text{meam}}}{2500} , \quad (4)$$

где u_{meam} – результат автоматических измерений функции «Meam», по которому определяется действительное значение среднего напряжения импульса. Однако данный способ не может обеспечить достаточно высокую точность.

Более высокую точность обеспечивает применение интерфейсных функций осциллографа и программных методов расчета средних значений импульса. При использовании данного способа с помощью интерфейсных функций осциллографа данные выборочных значений зарегистрированного сигнала передаются в какую-либо программу для их последующей обработки. Наиболее удобной для данных целей оказалась программа *Microsoft Excel*.

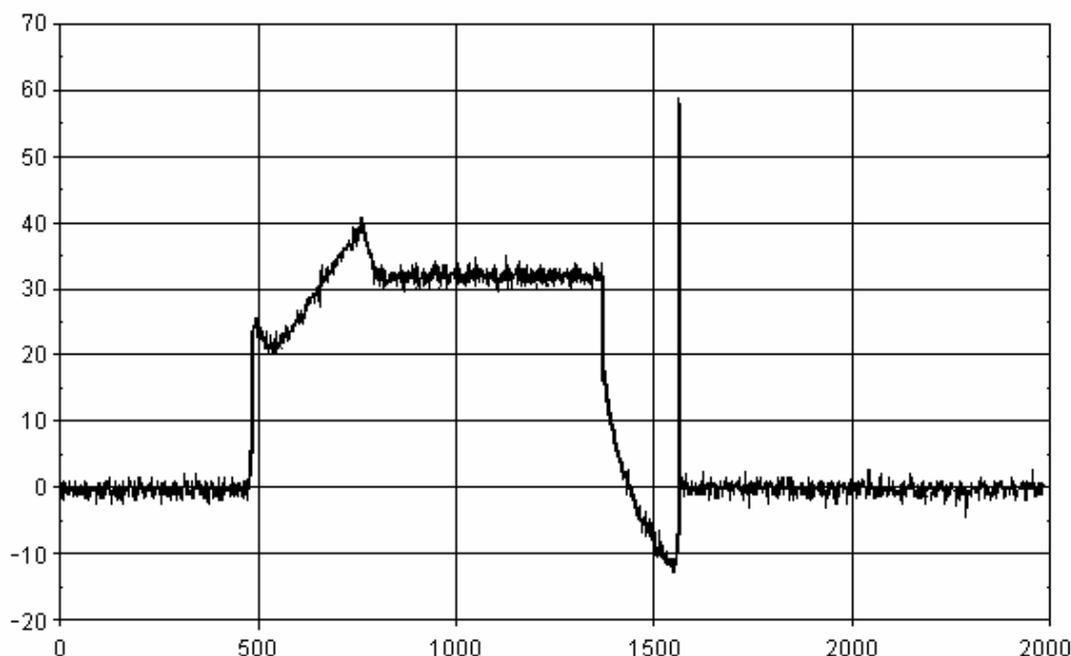


Рисунок 3 – Коррекция методической погрешности вычисления функции «Meat» для одиночного импульса напряжения с использованием программы Microsoft Excel

Суть обработки данных по внешней программе состоит в определении тем или иным способом дискретных отсчетов зарегистрированного сигнала, соответствующих началу и окончанию импульсного процесса, выделении этих данных и их последующей обработке в соответствии с выражением (3). Результаты такой обработки приведены для наглядности в графической форме (рис. 3). Для практики крайне важным обстоятельством данной процедуры является учет формы представления данных, а также то, что пока формат данных не будет изменен, то он сохраняется даже при нажатии кнопки *DEFAULT SETUP* (настройки по умолчанию). Форматы данных в осциллографах серии TPS2000 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Форматы данных осциллографов серии TPS2000

Формат файла	Расширение	Описание
<i>BMP</i>	<i>BMP</i>	Используется по умолчанию. В основе этого формата лежит алгоритм сжатия без потерь. Формат совместим с большинством текстовых редакторов и электронных таблиц.
<i>PCX</i>	<i>PCX</i>	Формат, используемый в графическом редакторе Paintbrush (<i>MS-DOS</i>)
<i>TIFF</i>	<i>TIF</i>	Формат <i>Tagged Image File Format</i>
<i>RLE</i>	<i>RLE</i>	Формат с кодированием <i>Run-Length Encoding</i>
<i>EPSIMAGE</i>	<i>EPS</i>	Формат <i>Postscript</i>

Обмен данными между осциллографом и компьютером может производиться по имеющимся в осциллографах серии TPS2000 интерфейсам типов *RS-232* и *Centronics*.

Для передачи данных с осциллографа на компьютер применяется приложение *Open Choice Desktop*, поставляемое вместе с осциллографом. Если такое приложение не работает, то необходимо протестировать интерфейс *RS-232*. Может также потребоваться программа эмуляции терминала, позволяющая пользователю просматривать передаваемые символы.

Чтобы строки не перекрывались при просмотре, следует включить режим повтора (*echo*) и разрешить использование символа возврата каретки (*CRLF*).

Кроме того, существует возможность использования самого эффективного (но наиболее сложного) способа программной обработки данных, представленных в двоичной форме.

Чтобы использовать порт *RS-232* для передачи двоичных данных необходимо применять режим аппаратной сигнализации (*RTS/CTS*). При аппаратной сигнализации сохранность данных гарантируется. При этом все восемь бит передаваемых двоичных данных содержат значимые сведения. Чтобы убедиться, что все восемь бит получены или переданы, следует настроить внешнее устройство интерфейса *RS-232* для получения восьмибитовых символов (установить равной восьми битам длину слова для интерфейса *RS-232*). Для проверки состояния отправленных команд необходимо ввести запрос "*STB?*" и просматривать строку ответа [3].

Когда осциллограф фиксирует сигнал прерывания, проходящий через порт *RS-232*, то на экране появляется команда *DCL* (длиной в три знака), за которой следует символ конца строки. При этом фактически действия осциллографа совпадают с действиями при получении команды *<DCL>* (очистить устройство) порта *GPIB*, при использовании которой очищается содержимое буферов ввода и вывода и ожидается следующая команда. Сигналы прерывания не изменяют настройку параметров осциллографа и не прерывают функционирование передней панели или выполнение функций, не связанных с процессом программирования.

В заключение отметим, что изложенные способы коррекции погрешностей при оценке параметров одиночных импульсов внедрены и используются в разработанной авторами испытательной установке, применяемой для контроля параметров мощных силовых диодов в ОАО "Оptron-Ставрополь". Эта испытательная установка позволяет формировать импульсы ударного тока с управляемой амплитудой до 2 кА и обладает техническими характеристиками, обеспечивающими контроль выполнения самых жестких требований к приборам, предназначенным для работы в условиях космического пространства и низкотемпературных областях верхних слоев земной атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tektronix, Inc. 14200 SW Karl Braun Drive P.O. Box 500 Beaverton, OR 97077 USA. Цифровой запоминающий осциллограф серии TPS 2000. Руководство по эксплуатации. – 67 с.
2. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан : В 2-х т. Т. 1. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 536 с.
3. Tektronix, Inc. 14200 SW Karl Braun Drive P.O. Box 500 Beaverton, OR 97077 USA. Руководство по программированию цифровых осциллографов серии TDS200, TDS1000, TDS2000, TPS2000 (071-1075-XX).

Ершов Андрей Борисович

Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь
Доцент кафедры электроснабжения и эксплуатации электрооборудования, кандидат технических наук
Тел. (8652) 72-93-03, +7 (918) 750-54-01
E-mail: 7112828@rambler.ru

Хорольский Владимир Яковлевич

Невинномысский технологический институт Северо-Кавказского государственного технического университета, г. Невинномысск
Профессор кафедры информационных систем электропривода и автоматики, доктор технических наук, профессор
Тел. (8652) 23-25-52

Ефанов Алексей Валерьевич

Невинномысский технологический институт Северо-Кавказского государственного технического университета, г. Невинномысск
Заведующий кафедрой информационных систем электропривода и автоматики, кандидат технических наук, доцент
Тел. (86554) 7-03-84,
E-mail: kea@nti.ncstu.ru

A.B. ERSHOV, V.Y. KHOROLSKIY, A.V. YEFANOV

WAYS OF DECREASE IN THE METHODOLOGICAL ERROR «MEAM» FUNCTION EVALUATIONS FOR ACYCLIC ELECTRIC PROCESSES IN SERIES OSCILLOGRAPHS TEKTRONIX FIRM TPS2000

In article ways of liquidation of a methodical error of size of average value of pressure of a single impulse in digital remembering oscillographs of series TPS2000, defined in a mode of automatic measurements (function "Meam") are stated. Are considered: visually analytical way; a way of use of the interface functions of an oscillograph and program methods of calculation of average values of an impulse. Possibility is specified and some explanatory's of procedure of use of a way of program processing of the binary data are given.

Keywords: *oscillographs of series TPS2000, average value of pressure of a single impulse, function "Meam".*

Ershov Andrey Borisovich

Stavropol State Agrarian University, Stavropol

Candidate of technical science, associate professor of department "Electrical Supply and Electric Equipment Operation"

Tel. (8652) 72-93-03, +7 (918) 750-54-01

E-mail: 7112828@rambler.ru

Khorolskiy Vladimir Yakovlevich

Nevinnomyssk Technological Institute of the North Caucasus

State Technical University, Nevinnomyssk

Professor of department "Information systems, electric drive and automation",

Doctor of Engineering, professor

Tel. 8-(8652) 23-25-52

Yefanov Aleksey Valeryevich

Nevinnomyssk Technological Institute of the North Caucasus

State Technical University, Nevinnomyssk

Head of department "Information systems, electric drive and automation",

Candidate of technical science, associate professor

Tel. 8-(86554) 7-03-84

E-mail: kea@nti.ncstu.ru

Д.А. РЫБОЛОВЛЕВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

В статье рассматривается модель системы передачи информации, использующая несколько электропроводных линий связи и учитывающая явления взаимного влияния между ними. Предлагается решение задачи формирования базисных функций на входе и выходе линий связи смоделированной системы, позволяющее повысить скорость передачи информации и/или её достоверность.

Ключевые слова: математическая модель, система связи со многими несущими, цифровая абонентская линия, многопарное связывание, базисная функция.

ВВЕДЕНИЕ

Один из известных подходов к синтезу частотно-эффективной системы связи при наличии искажений в канале связи заключается в разделении имеющейся в распоряжении полосы частот на определенное число подканалов так, что скорость передачи в подканале была пропорциональна соответствующим значениям отношения сигнал/помеха и вероятности ошибки [1, 2]. Системы связи, построенные по указанному принципу, в зарубежной литературе принято называть "*multicarrier modulation systems*", а в отечественной – "системами связи со многими несущими".

Перспективным представляется вопрос повышения скорости передачи информации и/или ее достоверности в системах связи со многими несущими частотами за счет объединения нескольких физических линий связи. В реальных системах передачи, основанных на современных технологиях цифровых абонентских линий, предусматривается возможность многопарного связывания нескольких линий в единый канал связи (*ADSL, VDSL, SHDSL* и др.) повышенной пропускной способности.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

В случае, когда для образования канала связи между поставщиком услуг и абонентом (концентратором) используют две и более витых пары (режим многопарного связывания), на основании известной обобщенной модели системы передачи информации (СПИ) [1] целесообразно выделить модель дискретного канала связи, включающую блоки модулятора, непрерывного канала и демодулятора (рис. 1).

При этом под функцией $h_{i,m}(\tau, t)$, $m = \overline{1, N}$, $i = \overline{1, N}$, понимается реакция цепи, образованной проводниками m -й линии, на поданное в i -ю линию связи воздействие в виде дельта-функции (импульсная характеристика i -й линейной системы m -й линии). Согласно рисунку 1, сигнал на выходе m -й линии связи $x'_m(\tau)$ содержит информационную часть, соответствующую информационному сигналу на входе m -й линии $x_m(t)$, прошедшему через m -ю линейную систему m -й линии с импульсной характеристикой $h_{m,m}(\tau, t)$. Кроме того, на данный сигнал на выходе помимо аддитивного белого гауссовского шума $n_m(\tau)$ оказывают влияние сигналы на входе i -х линий $x_i(t)$, $i = \overline{1, N}$, $i \neq m$, прошедшие через m -е линейные системы соответствующих линий с импульсными характеристиками $h_{i,m}(\tau, t)$.

Таким образом, характеристики $h_{m,m}(\tau, t)$, стоящие на главной диагонали матрицы импульсных характеристик моделируемого канала, соответствуют передаче "полезных" сигналов, а элементы вне главной диагонали $h_{i,m}(\tau, t)$, $i = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, N}$, $i \neq m$, по сути, задействованы только при передаче переходных помех.

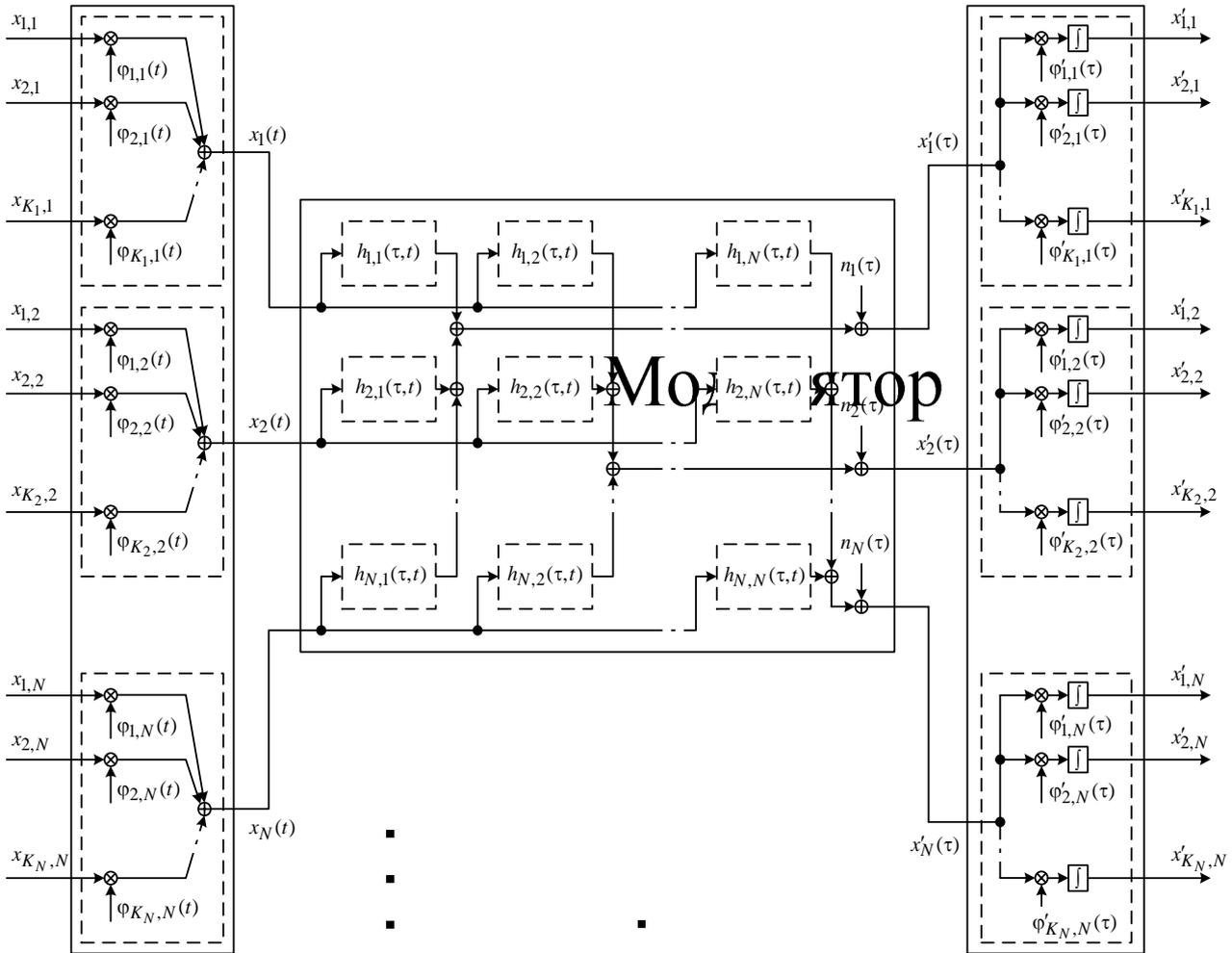


Рисунок 1 – Модель дискретного канала связи

Сигнал на входе m -й линии представляется обобщенным рядом Фурье [3]:

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^{K_m} x_{i,m} \cdot \varphi_{i,m}(t), \quad m = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где K_m – число подканалов в m -й линии;

$x_{i,m}$ – (i, m) координата точки сигнального созвездия, поступающего на вход модулятора;

$\varphi_{i,m}(t)$ – i -я базисная функция (несущее колебание) на входе m -й линии.

В ходе дальнейших рассуждений термин "базисная функция" используется как синоним понятия несущего сигнала.

Коэффициенты разложения $x'_{i,m}$ на выходе дискретного канала связи (координаты точки сигнального созвездия) определяются как скалярное произведение сигнала $x'_m(\tau)$ на выходе m -й линии и соответствующей базисной функции $\varphi'_{i,m}(\tau)$ (сигналы рассматриваются как векторы в бесконечномерном пространстве непрерывных действительных функций [4]):

$$x'_{i,m} = \int_{\tau} x'_m(\tau) \cdot \varphi'_{i,m}(\tau) d\tau, \quad m = \overline{1, N}, \quad i = \overline{1, K_m}. \quad (2)$$

В электропроводных каналах связи одним из основных видов помех являются перекрестные наводки [4]. Различают два перехода электромагнитной энергии: на ближний и дальний концы линии связи [5]. Далее влияние переходных помех на ближний конец не учи-

тывается, поскольку рассматриваются однонаправленные СПИ, использующие известные методы разделения передачи восходящего и нисходящего потоков [6, 7].

С целью учета взаимного влияния отдельных пар друг на друга в многопарном кабеле связи сигнал на выходе m -й линии канала целесообразно представить в виде [7]:

$$x'_m(\tau) = \sum_{n=1}^N \int x_n(t) h_{n,m}(\tau, t) dt + n_m(\tau). \quad (3)$$

Коэффициенты разложения $x'_{i,m}$ на выходе дискретного канала после подстановки выражений (3) и (1) в (2) определяются следующим образом:

$$x'_{i,m} = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} x_{k,n} \int \int \varphi'_{i,m}(\tau) \cdot h_{n,m}(\tau, t) \cdot \varphi_{k,n}(t) dt d\tau + \int \varphi'_{i,m}(\tau) \cdot n_m(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Для удобства вводятся обозначения:

– скалярного произведения функций $x(t)$ и $y(t)$ из бесконечномерного пространства непрерывных действительных функций [8]:

$$(x, y) = \int_t x(t) y(t) dt, \quad (5)$$

– оператора Фредгольма [9]:

$$h\varphi = \int_t \varphi(t) h(\tau, t) dt, \quad (6)$$

$$h^* \varphi = \int_\tau \varphi(t) h(\tau, t) d\tau, \quad (7)$$

где $\varphi(t)$ и $h(\tau, t)$ – функции из бесконечномерного пространства непрерывных действительных функций.

Перегруппировка слагаемых в выражении (4) и введение дополнительных обозначений приводят к следующему:

$$x'_{i,m} = x'_{i,m}{}^S + x'_{i,m}{}^O + x'_{i,m}{}^n, \quad (8)$$

$$x'_{i,m}{}^S = x_{i,m}(\varphi'_{i,m}, h_{m,m}\varphi_{i,m}), \quad (9)$$

$$x'_{i,m}{}^O = \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i: n=m}}^{K_n} x_{k,n}(\varphi'_{i,m}, h_{n,m}\varphi_{k,n}), \quad (10)$$

$$x'_{i,m}{}^n = (\varphi'_{i,m}, n_m). \quad (11)$$

где $x'_{i,m}{}^S$ – составляющая информационного сигнала;

$x'_{i,m}{}^O$ – составляющая переходных помех;

$x'_{i,m}{}^n$ – шумовая составляющая.

Таким образом, коэффициенты разложения $x'_{i,m}$ определяются суммой трех составляющих, соответствующих слагаемым в (8): информационного сигнала, переходных помех и аддитивного белого гауссовского шума.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ

Помехоустойчивость системы передачи информации, использующей непрерывные по уровню сигналы, принято оценивать отношением средних мощностей (энергий) полезного сигнала и помехи (отношение сигнал/помеха, ОСП) поскольку оно монотонно связано с вероятностью правильного приема [4].

Учет вероятностного характера сигналов на входе приводит к необходимости статистического усреднения коэффициентов разложения $x'_{i,m}$ [10], в результате чего средняя мощность сигнала на выходе демодулятора i -го подканала m -й линии связи определяется следующим образом:

$$S'_{i,m}(\varphi, \varphi') = M \left\{ x'^2_{i,m} \right\}, \quad (12)$$

где $M \{x\}$ – математическое ожидание случайной величины x .

Подстановка (8) в (12) позволяет получить:

$$S'_{i,m}(\varphi, \varphi') = M \left\{ x'^2_{i,m}{}^s + x'^2_{i,m}{}^o + x'^2_{i,m}{}^n + 2x'^s_{i,m}x'^o_{i,m} + 2x'^s_{i,m}x'^n_{i,m} + 2x'^o_{i,m}x'^n_{i,m} \right\}. \quad (13)$$

Математическое ожидание суммы случайных величин равно сумме их математических ожиданий [11], поэтому выражение (13) записывается в виде:

$$S'_{i,m}(\varphi, \varphi') = M \left\{ x'^2_{i,m}{}^s \right\} + M \left\{ x'^2_{i,m}{}^o \right\} + M \left\{ x'^2_{i,m}{}^n \right\} + 2M \left\{ x'^s_{i,m}x'^o_{i,m} \right\} + 2M \left\{ x'^s_{i,m}x'^n_{i,m} \right\} + 2M \left\{ x'^o_{i,m}x'^n_{i,m} \right\} \quad (14)$$

Можно показать, что случайные величины составляющих информационного сигнала, переходных помех и шума являются независимыми и центрированными, а их корреляции равны нулю [12]. Тогда справедливо равенство:

$$S'_{i,m}(\varphi, \varphi') = M \left\{ x'^2_{i,m}{}^s \right\} + M \left\{ x'^2_{i,m}{}^o \right\} + M \left\{ x'^2_{i,m}{}^n \right\}. \quad (15)$$

Таким образом, средняя мощность сигнала на выходе демодулятора i -го подканала m -й линии определяется суммой соответствующих средних мощностей информационного сигнала, переходных помех и аддитивного белого гауссовского шума.

При условии нормировки базисных функций на выходе и учете свойства стационарности шума последнее слагаемое в выражении (15) – средняя мощность шумовой составляющей – представляется в виде:

$$M \left\{ x'^2_{i,m}{}^n \right\} = \sigma_m^2, \quad (16)$$

где σ_m^2 – дисперсия шума в m -й линии.

Поскольку в i -м подканале m -й линии полезным является только соответствующий информационный сигнал, а сумма переходных помех и аддитивного шума представляет собой сигнал помехи, то на основании (15) и (16) ОСП задается выражением:

$$\frac{S_{i,m}(\varphi, \varphi')}{P_{i,m}(\varphi, \varphi')} = \frac{M \left\{ x'^2_{i,m}{}^s \right\}}{M \left\{ x'^2_{i,m}{}^o \right\} + \sigma_m^2}, \quad (17)$$

где $S_{i,m}(\varphi, \varphi')$ – средняя мощность полезного сигнала в i -м подканале m -й линии;

$P_{i,m}(\varphi, \varphi')$ – средняя мощность помехи в i -м подканале m -й линии.

Под помехой в этом случае понимается сумма перекрестных помех и аддитивного шума.

После подстановки (9), (10) и (11) в (17) и использования свойства математического ожидания произведения случайной величины и детерминированной функций ОСП задается выражением:

$$\frac{S_{i,m}(\varphi, \varphi')}{P_{i,m}(\varphi, \varphi')} = \frac{M \{x_{i,m}^2\} (\varphi'_{i,m}, h_{m,m} \varphi_{i,m})^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i: n=m}}^{K_n} M \{x_{k,n}^2\} (\varphi'_{i,m}, h_{n,m} \varphi_{k,n})^2 + \sigma_m^2}. \quad (18)$$

Представленный показатель качества по отношению сигнал/помеха однозначно определяется заданными импульсными характеристиками линий, статистическими свойствами информационного сигнала, действующими шумами и выбором систем базисных функций на входе и выходе. В зависимости от вида базисных функций, по сути являющихся несущими колебаниями модулятора/демодулятора, непрерывный канал с бесконечным числом измерений преобразуется в дискретный, размерность которого ограничена конечной величиной [13]. При этом импульсные характеристики линий, статистические свойства сигналов на входе и действующие шумы в канале считаются заданными, и в ходе решения оптимизационной задачи формирования систем базисных функций не изменяются.

При оптимизации системы базисных функций нецелесообразно использовать только один критерий максимума отношения сигнал/помеха для конкретного подканала, поскольку в этом случае показатели качества для других подканалов не будут учитываться. Поэтому необходимо использовать обобщенный показатель качества, представляющий собой минимальное значение отношения сигнал/помеха среди всех подканалов.

Таким образом, задача определения оптимальной системы базисных функций формулируется в следующем виде:

$$\min_{i,m} \frac{S_{i,m}(\varphi, \varphi')}{P_{i,m}(\varphi, \varphi')} \rightarrow \max_{\varphi, \varphi'}, \quad (19)$$

при ограничениях

$$(\varphi_{i,m}, \varphi_{i,m}) = 1, \quad (20)$$

$$(\varphi'_{i,m}, \varphi'_{i,m}) = 1, \quad i = \overline{1, K_m}, \quad m = \overline{1, N}. \quad (21)$$

Ограничения (20) и (21) являются условиями нормировки, определяются моделью дискретного канала связи и стремлением к снижению энергетических затрат при передаче информационных сигналов.

Поставленная задача относится к задачам отыскания максимина с распадающимися переменными и может быть записана как задача математического программирования с конечным числом ограничений [14].

Для сведения задачи поиска максимина к задаче на максимум вводится вспомогательная переменная:

$$u = \min_{i,m} \frac{S_{i,m}(\varphi, \varphi')}{P_{i,m}(\varphi, \varphi')}. \quad (22)$$

Тогда в соответствии с [14] задача поиска максимина (19) эквивалентна по решению следующей задаче на максимум:

$$u \rightarrow \max_{\varphi, \varphi'}, \quad (23)$$

при ограничениях (20), (21) и выполнении условия

$$\frac{S_{i,m}(\varphi, \varphi')}{P_{i,m}(\varphi, \varphi')} - u \geq 0, \quad i = \overline{1, K_m}, \quad m = \overline{1, N}. \quad (24)$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Поставленная задача имеет линейный целевой функционал и нелинейные ограничения в виде неравенств и равенств. Анализ источников по решению подобных задач [14, 15,

16, 17] показал, что наиболее целесообразным методом решения поставленной оптимизационной задачи является обобщенный метод множителей Лагранжа.

Идея метода состоит в том, что если точка безусловного оптимума функционала не удовлетворяет всем ограничениям задачи, то оптимальное решение задачи с ограничениями должно достигаться в граничной точке области допустимых решений. Следовательно, одно или несколько ограничений (24) должны выполняться как равенства [16].

На первом шаге обобщенного метода множителей Лагранжа решается задача без учета ограничений (24). Для изучения экстремальных свойств функционала u используется математический аппарат дифференциального и вариационного исчисления [8, 17].

Функционал Лагранжа при неактивных ограничениях (24) имеет вид:

$$L(u, \varphi, \varphi', b, c)_{i,m} = u + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} b_{k,n} [(\varphi_{k,n}, \varphi_{k,n}) - 1] + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} c_{k,n} [(\varphi'_{k,n}, \varphi'_{k,n}) - 1] \quad (25)$$

где $b_{k,n}, c_{k,n}, k = \overline{1, K_n}, n = \overline{1, N}$, – множители Лагранжа.

Для сокращения записей функционал Лагранжа обозначается одним символом L с заданными индексами, при этом опускается указание аргументов.

Первая частная производная от функционала (25) по переменной u равна единице:

$$\frac{d}{du} L_{i,m} = 1. \quad (26)$$

Из (26) следует, что при отсутствии ограничений в виде неравенств (24) функционал Лагранжа (25) не имеет экстремальных точек, а оптимальным решением задачи (23) является точка в плюс бесконечности. Найденное решение не удовлетворяет ограничению (24), поскольку отношение сигнал/помеха обращается в плюс бесконечность. Знаменатель дроби (18) отличен от нуля, поскольку учитываются существующие в канале шумы, числитель не равен плюс бесконечности по причине наличия условия нормировки базисных функций и требования ограниченности импульсной характеристики физически реализуемых линейных систем. Следовательно, точка в плюс бесконечности не удовлетворяет условию (24) и не является допустимым решением задачи.

Поскольку на первом шаге обобщенного метода множителей Лагранжа не удается отыскать допустимое решение, ограничения (24) не являются избыточными. Осуществляется переход на второй шаг – активизируется одно из ограничений (24).

Для удобства вводится обозначение:

$$M_{i,m} = M \{x_{i,m}^2\}. \quad (27)$$

Функционал Лагранжа на втором шаге (одно активное ограничение) имеет вид:

$$L_{i,m} = u + a_{i,m} \left[\frac{M_{i,m} (\varphi'_{i,m}, h_{m,m} \varphi_{i,m})^2}{\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i:n=m}}^{K_n} M_{k,n} (\varphi'_{i,m}, h_{n,m} \varphi_{k,n})^2 + \sigma_m^2} - u \right] + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} b_{k,n} [(\varphi_{k,n}, \varphi_{k,n}) - 1] + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^{K_n} c_{k,n} [(\varphi'_{k,n}, \varphi'_{k,n}) - 1] \quad (28)$$

где $a_{i,m}, i = \overline{1, K_m}, m = \overline{1, N}$ – множители Лагранжа.

Для нахождения стационарных точек, в которых выполняется необходимое условие экстремума функционала (28), необходимо выразить первую частную производную функционала по переменной u , а также первые вариации по всем функциям, входящим в запись функционала (28), и приравнять полученные выражения нулю. Тогда с учетом того, что ва-

риации $\delta\varphi_{i,m}$, $\delta\varphi_{k,n}$ и $\delta\varphi'_{i,m}$ могут быть любыми функциями в исследуемом классе, справедливы следующие равенства:

$$2M_{i,m}(\varphi'_{i,m}, h_{m,m}\varphi_{i,m})h_{m,m}^*\varphi'_{i,m} = -b_{i,m} \left[\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i: n=m}}^{K_n} M_{k,n}(\varphi'_{i,m}, h_{n,m}\varphi_{k,n})^2 + \sigma_m^2 \right] \varphi_{i,m}(t), \quad (29)$$

$$M_{i,m}M_{k,n}(\varphi'_{i,m}, h_{m,m}\varphi_{i,m})^2(\varphi'_{i,m}, h_{n,m}\varphi_{k,n})h_{n,m}^*\varphi'_{i,m} = b_{k,n} \left[\sum_{n_1=1}^N \sum_{\substack{k_1=1 \\ k_1 \neq i: n_1=m}}^{K_{n_1}} M_{k_1,n_1}(\varphi'_{i,m}, h_{n_1,m}\varphi_{k_1,n_1})^2 + \sigma_m^2 \right] \varphi_{k,n}, \quad (30)$$

$$M_{i,m}(\varphi'_{i,m}, h_{m,m}\varphi_{i,m})h_{m,m}\varphi_{i,m} \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i: n=m}}^{K_n} M_{k,n}(\varphi'_{i,m}, h_{n,m}\varphi_{k,n})^2 + \sigma_m^2}{M_{i,m}(\varphi'_{i,m}, h_{m,m}\varphi_{i,m})^2 \left[\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i: n=m}}^{K_n} M_{k,n}(\varphi'_{i,m}, h_{n,m}\varphi_{k,n})h_{n,m}\varphi_{k,n} \right]} = -c_{i,m}\varphi'_{i,m}, \quad (31)$$

$$\left[\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i: n=m}}^{K_n} M_{k,n}(\varphi'_{i,m}, h_{n,m}\varphi_{k,n})^2 + \sigma_m^2 \right]^2 = -c_{k,n}(\delta\varphi'_{k,n}, \varphi'_{k,n}) = 0. \quad (32)$$

Анализ уравнения для первой вариации по функции $\varphi'_{k,n}(\tau)$ (32) показывает, что $c_{k,n} = 0$, поскольку из равенства нулю скалярного произведения $(\delta\varphi'_{k,n}, \varphi'_{k,n})$ следует равенство $\varphi'_{k,n}(\tau) = 0$ при условии любой допустимой вариации $\delta\varphi'_{k,n}(\tau)$ [18], что противоречит условиям нормировки базисных функций на выходе (21). Равенство нулю множителей Лагранжа $c_{k,n}$ свидетельствует о том, что соответствующие ограничения (21) не влияют на значение целевого функционала решаемой оптимизационной задачи (23) [16].

Можно показать, что из выражений (29), (30) и (31) следуют равенства (для сокращения записей опускается указание аргументов базисных функций):

$$h_{m,m}^*\varphi'_{i,m} = (\varphi'_{i,m}, h_{m,m}\varphi_{i,m}) \varphi_{i,m}, \quad (33)$$

$$h_{n,m}^*\varphi'_{i,m} = (\varphi'_{i,m}, h_{n,m}\varphi_{k,n}) \varphi_{k,n}, \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
 & h_{m,m} \varphi_{i,m} \left[\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i:n=m}}^{K_n} M_{k,n} (\varphi'_{i,m}, h_{n,m} \varphi_{k,n})^2 + \sigma_m^2 \right] - \\
 & - (\varphi'_{i,m}, h_{m,m} \varphi_{i,m}) \left[\sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i:n=m}}^{K_n} M_{k,n} (\varphi'_{i,m}, h_{n,m} \varphi_{k,n}) h_{n,m} \varphi_{k,n} \right] = \\
 & = (\varphi'_{i,m}, h_{m,m} \varphi_{i,m}) \sigma_m^2 \varphi'_{i,m}.
 \end{aligned} \tag{35}$$

Анализ уравнений (33) и (34) показывает, что базисные функции на входе определяются как интегралы свертки соответствующих импульсных характеристик и базисных функций на выходе [6].

После выражения базисных функций на входе из (33) и (34) и подстановки в (35) имеет место равенство:

$$\frac{1}{\lambda_{i,m} \sigma_m^2} h_{m,m} h_{m,m}^* \varphi'_{i,m} - \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i:n=m}}^{K_n} \frac{M_{k,n}}{\sigma_m^2} h_{n,m} h_{n,m}^* \varphi'_{i,m} = \varphi'_{i,m}, \tag{36}$$

где $\lambda_{i,m} = \frac{S_{i,m}(\varphi, \varphi')}{M_{i,m} P_{i,m}(\varphi, \varphi')}$ – параметр.

Также можно показать, что из (33), (34) и (35) следует уравнение:

$$\frac{1}{\lambda_{i,m} \sigma_m^2} h_{m,m}^* h_{m,m} \varphi_{i,m} - \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i:n=m}}^{K_n} \frac{M_{k,n}}{\sigma_m^2} h_{n,m} h_{n,m}^* \varphi_{i,m} = \varphi_{i,m}. \tag{37}$$

ВЫВОДЫ

Решение интегральных уравнений (36) и (37) позволяет определить системы базисных функций на входе и выходе и представляет собой локальный оптимум задачи (23) при ограничениях (20), (21) и одном активизированном ограничении (24) [16].

Нахождение глобального оптимума в случае двух и/или более активизированных ограничений (24) в аналитическом виде является трудно разрешимой задачей, поэтому выбор базисных функций в соответствии с (36) и (37) является одним из допустимых решений. Рациональность полученного решения подтверждается и в том случае, когда ожидаемое увеличение значения целевого функционала (22) при большем количестве учитываемых ограничений (24) оказывается несущественным.

В рамках рассмотрения предложенной математической модели системы передачи информации полученное решение задачи формирования базисных функций (23) в соответствии с выбранным критерием при условии выполнения введенных ограничений (20), (21) и (24) позволяет увеличить скорость передаваемой информации и повысить ее достоверность в системах связи, одновременно использующих несколько линий. Следует учитывать, что неизбежный рост вычислительной сложности алгоритмов решения поставленной задачи, связанный с необходимостью учета в моделях систем передачи информации явлений взаимного влияния линий связи друг на друга, обусловит необходимость дополнительных ресурсных затрат в виде повышенных требований к производительности аппаратных средств реализации разработанных алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокис, Д. Цифровая связь [Текст] / Д. Прокис; пер. с англ. : под ред. Д.Д. Кловского . – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. Golden, P. Fundamentals of DSL Technology [Text] / P. Golden, H. Dedieu, K.S. Jacobsen. – New York: Auerbach Publications, 2006. – 454 p.
3. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника [Текст] / В.И. Тихонов. – М. : Сов. радио, 1966. – 681 с.
4. Зюко, А.Г. Теория электрической связи [Текст] : учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров : под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 1999. – 432 с.
5. Парфенов, Ю.А. "Последняя миля" на медных кабелях [Текст] / Ю.А. Парфенов, Д.Г. Мирошников. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 221 с.
6. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] / Б. Скляр. – изд. 2-е испр.: пер. с англ. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
7. Ginis, G. Vektored Transmission for Digital Subscriber Line Systems [Text] / G. Ginis, J. Cioffi // IEEE Journal on selected areas in communications. – 2001. – Vol. 20. – №. 5. – pp. 1085 – 1104.
8. Васильева, А.Б. Дифференциальные и интегральные уравнения, вариационное исчисление в примерах и задачах [Текст] / А.Б. Васильева, Г.Н. Медведев, Н.А. Тихонов, Т.А. Уразгильдина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
9. Васильева, А.Б. Интегральные уравнения [Текст] / А.Б. Васильева, Н.А. Тихонов. – 2-е изд., стереот. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 160 с.
10. Давенпорт, В.Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов [Текст] / В.Б. Давенпорт, В.Л. Рут. – М.: Издательство иностранной литературы, 1960. – 468 с.
11. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] : учеб. пособие для вузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд., стереот. – М. : Высш. шк., 2000. – 480 с.
12. Френкс, Л. Теория сигналов [Текст] / Л. Френкс; пер. с англ. : под ред. Д.Е. Вакмана. – М. : Советское радио, 1974. – 344 с.
13. Галлагер, Р. Теория информации и надежная связь [Текст] / Р. Галлагер; пер. с англ : под ред. М.С. Пинскера и Б.С. Цыбакова. – М. : Советское радио, 1974. – 720 с.
14. Федоров, В.В. Численные методы максимина [Текст] / В.В. Федоров. – М. : Наука, 1979. – 280 с.
15. Аттетков, А.В. Методы оптимизации [Текст] : учеб. для вузов / А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин : под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 2-е изд., стереот. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 440 с.
16. Таха, Х.А. Введение в исследование операций [Текст] / Х.А. Таха. – 6-е изд. – М. : Издательский дом "Вильямс", 2001. – 912 с.
17. Штагер, В.В. Цифровые системы связи. Теория расчет и оптимизация [Текст] / В.В. Штагер. – М. : Радио и связь, 1993. – 312 с.
18. Ванько, В.И. Вариационное исчисление и оптимальное управление [Текст] : учеб. для вузов / В.И. Ванько, О.В. Ермошина, Г.Н. Кувыркин : под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 3-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 488 с.

Рыболовлев Дмитрий Александрович
Академия ФСО России, г. Орел
Адьюнкт
E-mail: dmitrij-rybolovlev@yandex.ru

D.A. RYBOLOVLEV

**MATHEMATICAL MODEL OF COMMUNICATION SYSTEM
TAKING INTO ACCOUNT THE CROSSTALK AMONG
ELECTRICITY-CONDUCTIVE LINES**

Mathematical model of communication system via electricity cable taking into account the crosstalk is considered. The decision of basis function forming problem is presented. It holds the promise to increase achievable data rates and/or communication reliability.

Keywords: *mathematical model, multicarrier modulation system, digital subscriber line, multi-pair bonding, basis function.*

BIBLIOGRAPHY

1. Prokis, D. TSifrovaya svyaz' [Tekst] / D. Prokis; per. s angl. : pod red. D.D. Klovskogo . – М. : Radio i svyaz', 2000. – 800 s.

2. Golden, P. Fundamentals of DSL Technology [Text] / P. Golden, H. Dedieu, K.S. Jacobsen. – New York: Auerbach Publications, 2006. – 454 p.
3. Tikhonov, V.I. Statisticheskaya radiotekhnika [Tekst] / V.I. Tikhonov. – M. : Sov. radio, 1966. – 681 s.
4. Zyuko, A.G. Teoriya ehlektricheskoy svyazi [Tekst] : uchebnik dlya vuzov / A.G. Zyuko, D.D. Klovskiy, V.I. Korzhik, M.V. Nazarov : pod red. D.D. Klovskogo. – M. : Radio i svyaz', 1999. – 432 s.
5. Parfenov, YU.A. "Poslednyaya milya" na mednykh kabelyakh [Tekst] / YU.A. Parfenov, D.G. Miroshnikov. – M. : EHko-Trendz, 2001. – 221 s.
6. Sklyar, B. TSifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye [Tekst] / B. Sklyar. – izd. 2-e ispr.: per. s angl. – M. : Vil'yams, 2003. – 1104 s.
7. Ginis, G. Vectored Transmission for Digital Subscriber Line Systems [Text] / G. Ginis, J. Cioffi // IEEE Journal on selected areas in communications. – 2001. – Vol. 20. – №. 5. – pp. 1085 – 1104.
8. Vasil'eva, A.B. Differentsial'nye i integral'nye uravneniya, variatsionnoye ischislenie v primerakh i zadachakh [Tekst] / A.B. Vasil'eva, G.N. Medvedev, N.A. Tikhonov, T.A. Urazgil'dina. – M. : FIZMATLIT, 2003. – 432 s.
9. Vasil'eva, A.B. Integral'nye uravneniya [Tekst] / A.B. Vasil'eva, N.A. Tikhonov. – 2-e izd., stereot. – M. : FIZMATLIT, 2002. – 160 s.
10. Davenport, V.B. Vvedeniye v teoriyu sluchajnykh signalov i shumov [Tekst] / V.B. Davenport, V.L. Rut. – M.: Izdatel'stvo inostrannoj literatury, 1960. – 468 s.
11. Venttsel', E.S. Teoriya veroyatnostej i ee inzhenernye prilozheniya [Tekst] : ucheb. posobie dlya vtuzov / E.S. Venttsel', L.A.Ovcharov. – 2-e izd., stereot. – M. : Vyssh. shk., 2000. – 480 s.
12. Frenks, L. Teoriya signalov [Tekst] / L. Frenks; per. s angl. : pod red. D.E. Vakmana. – M. : Sovetskoe radio, 1974. – 344 s.
13. Gallager, R. Teoriya informatsii i nadezhnaya svyaz' [Tekst] / R. Gallager; per. s angl : pod red. M.S. Pinskera i B.S. TSybakova. – M. : Sovetskoe radio, 1974. – 720 s.
14. Fedorov, V.V. CHislennyye metody maksimina [Tekst] / V.V. Fedorov. – M. : Nauka, 1979. – 280 s.
15. Attetkov, A.V. Metody optimizatsii [Tekst] : ucheb. dlya vuzov / A.V. Attetkov, S.V. Galkin, V.S. Zarubin : pod red. V.S. Zarubina, A.P. Krishhenko. – 2-e izd., stereot. – M. : Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2003. – 440 s.
16. Takha, KH.A. Vvedeniye v issledovaniye operatsij [Tekst] / KH.A. Takha. – 6-e izd. – M. : Izdatel'skiy dom "Vil'yams", 2001. – 912 s.
17. SHtager, V.V. TSifrovyye sistemy svyazi. Teoriya raschet i optimizatsiya [Tekst] / V.V. SHtager. – M. : Radio i svyaz', 1993. – 312 s.
18. Van'ko, V.I. Variatsionnoye ischislenie i optimal'noye upravleniye [Tekst] : ucheb. dlya vuzov / V.I. Van'ko, O.V. Ermoshina, G.N. Kuvyrkin : pod. red. V.S. Zarubina, A.P. Krishhenko. – 3-e izd. – M. : Izd-vo MGTU im. N.EH. Baumana, 2006. – 488 s.

Rybolovlev Dmitriy Aleksandrovich

Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel
Postgraduate
E-mail: dmitriy-rybolovlev@yandex.ru

В.А. СМЕРЕК, В.К. ЗОЛЬНИКОВ, А.В. АЧКАСОВ

АРХИТЕКТУРА, СТРУКТУРА И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ СБОЕВ РАДИАЦИОННОГО ХАРАКТЕРА ДЛЯ ВОСЬМИ РАЗРЯДНОГО МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

В статье описывается опыт разработки архитектуры радиационно-стойких восьми разрядных микроконтроллеров на основе микроконтроллера 1830VE32У, стойкого к воздействию радиационного излучения. Описываются основные виды сбоев, возникающих при воздействии излучения, механизмы их возникновения и методы защиты.

Ключевые слова: проектирование; микроконтроллер; радиационная стойкость; излучение; мажорирование; помехоустойчивость; архитектура.

1 ВВЕДЕНИЕ

Современные интегральные микросхемы находят все более широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре различного рода технических объектов, работающих в условиях воздействия проникающей радиации. Эти условия могут возникать при попадании объекта в зону действия источников ионизирующего излучения техногенного происхождения или при расположении РЭА вблизи ядерных силовых и энергетических установок. Высокая стоимость подобных объектов обуславливает особо жесткие требования к безотказности элементной базы РЭА и, в первую очередь, к микросхемам различного функционального назначения. Действительно, отказ одной микросхемы в условиях воздействия вышеперечисленных дестабилизирующих факторов может повлечь за собой выход из строя всего сложного и дорогостоящего объекта, причем последствия подобного отказа не всегда предсказуемы. Поэтому задача гарантированного обеспечения радиационной стойкости ИМС и аппаратуры на их основе является исключительно актуальной.

Радиационная стойкость интегральных схем является важным условием при проектировании систем космического применения. Известно, что в системах военного назначения приборы должны обладать способностью выдерживать облучение нейтронами, гамма-излучением и рентгеновским излучением, а также выдерживать воздействие электромагнитного импульса, создаваемого ядерным взрывом. В космическом пространстве полупроводниковые устройства также должны функционировать в условиях жесткой радиации, обусловленной облучением ионами, присутствующими в космических лучах и солнечном ветре, а также захваченными в радиационных поясах вокруг Земли.

2 ВОЗНИКНОВЕНИЕ СБОЕВ

При торможении на корпусе электронного устройства электронов, протонов, космических частиц возникают рентгеновское и гамма-излучение, тяжелые ионы. Попадая в КМОП-структуры, эти частицы ионизируют затвор и подзатворный оксид. В подзатворном оксиде накапливается индуцированный излучением положительный заряд, а на границе раздела оксида с подложкой возникает паразитный проводящий слой. То есть, изменяются рабочие характеристики транзисторов. Происходит смещение пороговых напряжений и увеличение токов утечки, изменяется время нарастания и спада фронтов. При этом старение интегральной схемы и степень разрушения зависят от суммарной дозы полученной радиации и интенсивности облучения. Возрастание токов утечки уменьшает различие между включенным и выключенным состоянием транзистора. Кроме того, увеличивается ток, протекающий через транзистор в выключенном состоянии.

Чаще всего неполадки происходят по причине случайных воздействий, когда тяжелые частицы (космические лучи, протоны, электроны, альфа-частицы и т.д.) попадают в ИС. Одиночный сбой является наиболее распространенным последствием ионизирующего воз-

действия. Обычно сбои происходят при попадании ионов в схемы памяти или статических триггеров. Импульс тока, вызванный рекомбинацией индуцированных ионом дырок и электронов, изменяет состояние логического элемента. С уменьшением размеров транзисторов уменьшается и величина ионизирующего заряда, достаточного для сбоя [1].

3 РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ ИМС ФГУП НИИЭТ

В номенклатуре схем, разработанных в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский институт электронной техники» (ФГУП НИИЭТ) в последние годы, появились изделия, обладающие стойкостью к сбоям, вызванным воздействием радиационного излучения. Это две ИМС высокой степени интеграции. Первая схема 1874BE05T представляет собой высокопроизводительный 16-разрядный МК архитектуры MCS-96, частотой 20 МГц, ОЗУ 488x8, последовательным портом ввода/вывода, блоком высокоскоростного ввода/вывода, трехканальным ШИМ. Вторая схема 1830BE32У – 8-ми разрядный МК, принадлежащий к популярной архитектуре MCS-51, функционирующий на частоте 12 МГц, и обладающий ОЗУ 256 байт, тремя 16-ти разрядными таймерами, последовательным портом ввода/вывода и программируемым массивом счетчиков. Кристаллы изготовлены по технологии КНИ (кремний на изоляторе) 0,5 мкм на линейке 1x1 Научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН). Использование данных технологических норм позволяет создавать схемы высокой степени интеграции, но при этом еще не доминируют микродозиметрические эффекты, вызванные воздействиями отдельных ядерных частиц [2]. Конструкция библиотечных элементов в сочетании с технологией КНИ обеспечивает – 1К (для 1874BE05T) и 7.И стойкость к накопленной дозе радиации до 800 крад при полном отсутствии тиристорного эффекта. Схемы успешно прошли испытания на соответствие характеристикам по группам исполнения для СВВФ по ГОСТ РВ20.39.414.2: 7.И₁ – 5Ус, 7И₆ – 6Ус, 7.И₇ – 4x4Ус, 7.С₁ – 5Ус, 7.С₄ – 2x4Ус, 7.К₁ – 2К, 7.К_{4 1} – 6Ус, 7И₆ – 2x6Ус, 7.И₇ – 4x4Ус, 7.С₁ – 6Ус, 7.С₄ – 2x4Ус, 7.К₁ – 2К, 7.К₄ – 1К, 7.И₁₂ – 0,3x3Р (для 1830BE32У). Уровень стойкости ИС 1830BE32У по накопленной дозе составляет $2 \cdot 10^5$ ед. и определяется ростом тока потребления. Функциональных отказов не зафиксировано вплоть до предельного уровня облучения $1 \cdot 10^6$ ед. В данной статье подробнее остановимся на особенностях 8-ми разрядного МК.

4 СТРУКТУРА ИМС 1830BE32У

Структурная схема разработанного микроконтроллера показана на рисунке 1. Представленный набор периферийных блоков соответствует классической схеме построения ИМС для выбранной архитектуры. Отличительной особенностью микроконтроллера является наличие блока РСА, предназначенного для выполнения различных операций счета и определения временных интервалов, в том числе при широтно-импульсной модуляции. Блок РСА состоит из 16-разрядного таймера/счетчика и пяти 16-разрядных модулей фиксации-сравнения. Таймер/счетчик является источником временной базы и счетчиком событий, значения его текущего отсчета передаются в модули фиксации-сравнения.

Три программируемых 16-битных таймера/счетчика могут быть использованы как в качестве таймеров, так в качестве счетчиков внешних событий.

Через универсальный асинхронный приемопередатчик осуществляется прием и передача информации, представленной последовательным кодом, в полном дуплексном режиме обмена.

Так как схема не имеет внутрикристалльной памяти команд, то для функционирования необходимы блоки внешней памяти. Общий объем адресуемой памяти равен 64 Кбайт.

К первой группе относятся как технологические, так и схемотехнические методы. Из технологических методов можно назвать применение технологии КНИ, при которой объем чувствительной области существенно меньше, чем при стандартной объемной технологии. Соответственно, меньше величина собираемого заряда и вероятность, что он превысит критический уровень сбоя. Данные компании IBM показывают, что схемы по КНИ технологии имеют в 5 раз лучшие показатели частоты сбоев, по сравнению с объемной технологией. Эксперименты, проводимые в НИИСИ РАН, подтверждают этот вывод, причем зафиксировано преимущество схем на КНИ на порядок.

К схемотехническим методам можно отнести как методы построения ячеек, так и некоторые структурные решения. Одним из решений для 1830BE32У был полный отказ от применения динамических элементов при построении схемотехники устройства. Это позволяет избавиться от проблем утечки и разделения заряда, емкостной связи и проникновения тактового сигнала. Внутренние шины с предзарядом уступили свое место шинам с активными низким и высоким уровнями. Так же использование полностью статических элементов снимает ограничения минимальной частоты функционирования схемы. Это позволяет в системах, где нет требований к производительности, использовать медленные режимы тактирования контроллера, серьезно уменьшив тем самым воздействие дестабилизирующих факторов.

Другим из схемотехнических решений стал полный отказ от асинхронных процессов, особое внимание уделялось синхронному сбросу и установке. Так как сброс осуществляется только в момент фронта тактового сигнала, снижается возможность неконтролируемых сбросов частей микросхемы, ввиду наводок на эти цепи. Использование триггеров, переключающихся по фронту, а не по уровню тактового сигнала, позволило существенно упростить и повысить устойчивость схемы генерации. Синхронизация одним сигналом позволяет снизить эффекты, связанные с изменениями параметров формирователя под воздействием дестабилизирующих факторов. Для минимизации расфазировки были сбалансированы пути распространения тактовых сигналов от центрального источника к отдельным синхронизируемым элементам, используя N-дерево.

6 ЗАЩИТА ОТ СБОЕВ ОЗУ

Если сбой из-за попадания одиночной частицы все-таки произошел, необходимы меры, чтобы обнаружить и, по возможности, исправить ошибочное значение. Методы обнаружения и исправления ошибок в регулярных структурах достаточно хорошо изучены и описаны [3]. Основная идея данной группы методов заключается в том, что к защищаемому слову данных добавляется некоторое количество разрядов, значение которых вычисляется по определенному алгоритму в момент записи слова в память. При чтении дополнительные разряды вычисляются и сравниваются со считанными из памяти. Если во время хранения произошел сбой, то данная схема позволит это обнаружить, тем самым не нарушая правильный процесс функционирования программ. Одним из критичных узлов в микроконтроллерной архитектуре 1830BE32У является его оперативное запоминающее устройство. Потеря или искажение хранящейся в нем информации может привести к некорректному поведению всей системы. На текущий момент наиболее популярной является схема контроля кодом Хемминга с обнаружением двойных и корректированием одиночных ошибок, которая применяется практически во всех современных микропроцессорах, и методы резервирования с мажорированием.

Коды Хемминга являются самоконтролирующимися и самокорректирующимися кодами, т.е. они позволяют не только автоматически обнаруживать наиболее вероятные ошибки при передаче данных, но и исправлять их. Достоинством использования именно этих кодов является возможность управления объемом дополнительной, избыточной информации. Для микроконтроллеров такой способ широко применяется при построении блоков ПЗУ.

При построении помехоустойчивых аппаратных систем широко применяется принцип мажорирования [4]. В устройствах аппаратному межканальному мажорированию могут подвергаться все основные магистральные сигналы процессора, памяти, блока сопряжения с

устройствами ввода-вывода, чем достигается парирование сбоев и отказов в каждом из основных функциональных узлов. Общее значение выбирается системой голосования на основании выходов этих узлов. Недостаток этого подхода – увеличение числа элементов для выполнения одной и той же функции.

Принцип тройного резервирования с мажорированием был положен в основу обеспечения отказоустойчивости блока ОЗУ, использованного в 1830ВЕ32У. В микроконтроллере используются три одинаковых по объему блока по 256 байт, соединенные единым блоком, исправляющим ошибки. Это обеспечивает возможность фиксации любого количества единичных сбоев в байте информации. Правильный бит выбирается по принципу "два из трех". Это позволяет организовывать коррекцию неправильной информации "на лету". Так как исправление информации происходит только при операциях чтения, требуется периодическая перезапись ячеек по программе пользователя. При правильной организации управляющей программы примененный подход позволяет существенно улучшить защищенность системы.

7 ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАПРАВЛЕНИЯ

В дальнейшем ФГУП НИИЭТ планирует расширить линейку радиационно-стойких схем. Возможно как появление модификаций изделий с расширенной функциональностью, так и перевод новых современных архитектур в стойкое исполнение. Рассматривается возможность создания серии микросхем, имеющих еще большую защиту от всех видов сбоев, построенных по принципам, используемым разработчиками аппаратуры. Прообразом таких схем могут являться примеры построения аппаратуры, предназначенной для работы в космическом пространстве. В частности, интересным кажется решение резервирования на уровне функциональных блоков микроконтроллера, с возможностью контроля количества ошибок по программе пользователя. Много можно перенять из опыта построения серверных решений. Так, применяемый при построении таких систем метод защиты от двойных сбоев, состоит в периодическом считывании и корректировании как внутренней, так и внешней памяти. Относительной сложностью является только доступ к технологиям, обеспечивающим требуемую стойкость, нужную степень интеграции, и нужный набор IP блоков. Оптимальным для создания изделий контроллерной тематики являются технологии порядка 0,35 мкм с полным набором корректно характеризованных стандартных элементов, наличие выбора ячеек ввода-вывода, различных типов памяти и генераторов памяти, аналоговых блоков. Только в этом случае возможно создание семейств специальных микросхем, которые не только могли бы работать в условиях повышенного радиационного излучения, но и предоставляли все необходимые ресурсы разработчикам аппаратуры. Для этих целей ФГУП НИИЭТ достаточно широко разработал математическое обеспечение моделирования радиационных эффектов [5,6] и проводятся работы по их реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдинцев, В. Радиационно-стойкие интегральные схемы. Надежность в космосе и на земле [Текст] / В. Юдинцев // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес - 2007. - №5. - С. 72.
2. Потапов, И.П. Автоматизация проектирования комплементарных микросхем с учетом одиночных событий [Текст] / И.П. Потапов, В.М. Антимиров, Ю.К. Фортинский, К.И. Таперо [и др.]: ВГЛТА – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2007. – 121 с.
3. Mukherjee, S. Architecture Design for Soft Errors / S. Mukherjee: El-sevier, 2008. - 337 p.
4. Харченко, В.С. Анализ структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных компонентов industry [Текст] / В.С. Харченко, Ю.Б. Юрченко // Технология и конструирование в электронной аппаратуре - 2003. - №2 - С. 6.
5. Зольников, В.К. Математическое обеспечение учета импульсного излучения в САПР сквозного проектирования СБИС [Текст] / В. К. Зольников // Системы управления и информационные технологии - 2009. - № 1.2 (35) - С. 242-244.
6. Зольников, В.К. Моделирование сбора заряда при воздействии тяжелых заряженных частиц в КМОП элементах микросхем [Текст] / В.К. Зольников, И.П. Потапов, К.И. Таперо // Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭС)". Сборник трудов, 2010. - № 1 - С. 275-278.

Смерек Владимир Андреевич

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Аспирант кафедры «Вычислительной техники и информационных систем»
E-mail: smerek@niiet.ru

Зольников Владимир Константинович

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Профессор, д.т.н., зав. кафедрой «Вычислительной техники и информационных систем»
E-mail: wkz@rambler.ru

Ачкасов Александр Владимирович

Воронежская государственная лесотехническая академия, г. Воронеж
Соискатель кафедры «Вычислительной техники и информационных систем»
Тел 8-(4732) – 53-70-88
E-mail: aav_vtis@rambler.ru

V.A. SMEREK, V.K. ZOLNIKOV, A.V. ACHKASOV

**ARCHITECTURE, STRUCTURE AND WAYS OF PROTECTION FROM
THE RAD TYPES OF FAULTS OF 8-BIT MICROCONTROLLER**

The experience of the development of 8-bit rad-hard microcontroller architecture based on IC 1830BE32Y is described. Major types of faults, ways of their appearance and protection methods are declared.

Keywords: *designing; microcontroller; tolerance; radiation; majoritation; falls tolerance; architecture.*

BIBLIOGRAPHY

1. YUdintsev, V. Radiatsionno-stojkie integral'nye skhemy. Nadezhnost' v kosmose i na zemle [Tekst] / V. YUdintsev // EHLEKTRONIKA: Nauka, Tekhnologiya, Biznes - 2007. - №5. - S. 72.
2. Potapov, I.P. Avtomatizatsiya proektirovaniya komplementarnykh mikroskhem s uchetoм odinochnykh sobytij [Tekst] / I.P. Potapov, V.M. Antimirov, YU.K. Fortinskij, K.I. Tapero [i dr.]: VGLTA – Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskij tsentr Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2007. – 121 s.
3. Mukherjee, S. Architecture Design for Soft Errors / S. Mukherjee: El-sevier, 2008. - 337 r.
4. KHarchenko, V.S. Analiz struktur otkazoustojchivykh bortovykh kompleksov pri ispol'zovanii ehlektronnykh komponentov industry [Tekst] / V.S. KHarchenko, YU.B. YUchenko // Tekhnologiya i konstruirovanie v ehlektronnoj apparature - 2003. - №2 - S. 6.
5. Zol'nikov, V.K. Matematicheskoe obespechenie ucheta impul'snogo izlucheniya v SAPR skvoznoгo proektirovaniya SBIS [Tekst] / V. K. Zol'nikov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii - 2009. - № 1.2 (35) - S. 242-244.
6. Zol'nikov, V.K. Modelirovanie sbora zaryada pri vozdejstvii tyazhelykh zaryazhennykh chastits v KMOP ehlementakh mikroskhem [Tekst] / V.K. Zol'nikov, I.P. Potatov, K.I. Tapero // Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoehlektronnykh sistem (MEHS)". Sbornik trudov, 2010. - № 1 - S. 275-278.

Smerek Vladimir Andreevich

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh
Graduate student at Computer Science and Information Systems
E-mail: smerek@niiet.ru

Zolnikov Vladimir Konstantinovich

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh
Professor, Ph.D., Head. Department of Computer Science and Information Systems
E-mail: wkz@rambler.ru

Achkasov Alexander Vladimirovich

Voronezh State Forestry Academy, Voronezh
Applicant Department of Computer Science and Information Systems
Phone: 8-(4732) - 53-70-88
E-mail: aav_vtis@rambler.ru

ИСПЫТАНИЯ, КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА **И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 004.896

О.В. ПИЛИПЕНКО, О.П. АРХИПОВ, О.А. ИВАЩУК, А.В. КОСЬКИН,
О.А. САВИНА, В.И. ЗАГРЯДЦКИЙ

СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «УМНЫМ ГОРОДОМ» С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ БЕЗОПАСНОСТИ И КАЧЕСТВА ЖИЗНИ

В статье рассматриваются вопросы построения автоматизированной системы управления умным городом (АСУ УГ). Приведена укрупненная структура АСУ, рассмотрены ее основные подсистемы: объект управления, исполнительная система, интеллектуальная управляющая система, система интеллектуального мониторинга. Указаны ключевые отличия предлагаемой структуры от типовых решений. Рассмотрены основные требования к организационной структуре АСУ УГ. Разработана карта прикладных информационных систем, обеспечивающих функционирование предложенной структуры АСУ УГ.

Ключевые слова: умный город, автоматизированная система управления, структура АСУ умным городом, организационная структура АСУ, подсистемы АСУ, прикладные информационные системы.

Введение

В настоящее время активно развивается идеология «умный город» («Smart City»). Ее основные направления связаны с реализацией управления всеми функциями города на основе информационно-коммуникационных технологий [1, 2].

В различных странах был выполнен ряд пилотных проектов «умного города». Они были связаны с внедрением отдельных составляющих общей интеллектуальной сети управления: частные инженерные системы, интеллектуальные благоустроенные общественные зоны, системы в сфере образования, здравоохранения, т.п. В различных регионах Российской Федерации также реализуются отдельные проекты.

«Умный город» должен обеспечивать максимально высокий уровень качества жизни проживающих и работающих в нем людей.

Для решения поставленной задачи необходимо использование самых современных средств, инструментов и методов информационных технологий, требуется разработка интеллектуальной автоматизированной системы управления «умным городом» (АСУ УГ).

Структура автоматизированной системы управления «умным городом»

На основе проведенного анализа для достижения цели, поставленной перед АСУ УГ, реализации принципов ее функционирования предлагается структура системы, схематично показанная на рисунке 1. В состав АСУ входят следующие основные компоненты: объект управления; исполнительная система; система интеллектуального мониторинга; интеллектуальная управляющая система.

В качестве **объекта управления** рассматриваемой АСУ – «умного города» – может быть представлен населенный пункт любого вида (город, поселок городского типа, село и пр.) или муниципальное образование (городское поселение, сельское поселение, муниципальный район и пр.), управление основными характеристиками и функциями которого будет осуществляться на основе общей интеллектуальной сети.

Это многокомпонентная система, состоящая из различных составных частей, взаимодействующих определенным образом между собой, с другими подсистемами АСУ, а также с внешней средой. Состояние объекта управления, соответствие требуемому уровню жизни населения, привлекательность для бизнеса и инноваций определяется показателями таких характеристик, как экономика, инфраструктура, социальная сфера, социум, комплексная безопасность.

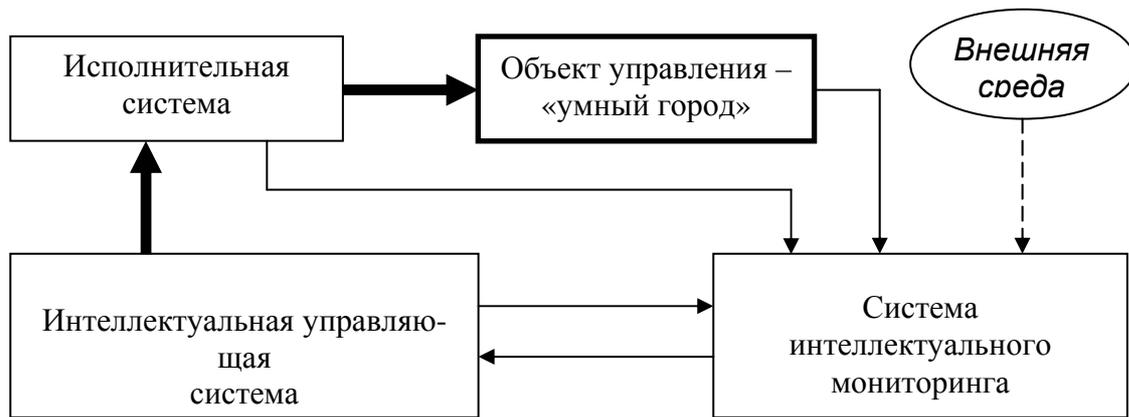


Рисунок 1 – Структура АСУ УГ

Исполнительная система представляет собой организационно-технический комплекс для персонального и коллективного решения ситуационных задач по организации согласованных действий исполнительных структур, направленных на создание и развитие инфраструктуры «умного города» в соответствии с Программой развития. Функции исполнительной системы: интеграция необходимых административно-управленческих, технических, телекоммуникационных и информационно-аналитических ресурсов; координация действий исполнительных органов; выбор механизмов реализации заданного сценария; выбор и распределение ресурсов, необходимых для реализации сценария; контроль хода реализации сценария.

Программа развития «умного города» включает цели и соответствующие задачи, показатели и индикаторы, а также механизмы реализации сценария решений по развитию инфраструктуры рассматриваемого населенного пункта или муниципального образования, осуществляет управление проектами и пр.

Программу развития формирует и корректирует **Интеллектуальная управляющая система** АСУ УГ. Она включает в себя объекты и субъекты системы управления населенным пунктом или муниципальным образованием, принимающие управленческие решения. Это муниципальные органы власти: администрация города, Дума, аппарат управления муниципальными объектами жизнеобеспечения, советы фондов и др.

Центр оперативного управления АСУ включает в себя объекты и субъекты системы управления городом, принимающие управленческие решения. Это муниципальные органы власти: администрация города, Дума, аппарат управления муниципальными объектами жизнеобеспечения, советы фондов и др. Принятие решений по управлению инновационным «умным городом» в значительной степени определяется уровнем экономического, научно-технического и социального развития государства (а также конкретной рассматриваемой территории), что формирует социально-экономические и политические приоритеты общества на рассматриваемой территории. Управленческие решения опираются на действующую в стране законодательную и нормативную базу: Конституцию, Федеральное законодательство, Федеральные целевые программы, доктрины, на систему государственных стандартов, строительных норм и правил, систему отраслевых стандартов, а также на законодательные и нормативные правовые акты, учитывающие специфику конкретного региона.

Для выбора и проведения конкретных мероприятий, рациональных как с социально-экономической, производственной, так и с экологической точки зрения, управляющая система должна иметь, во-первых, достоверную информацию о текущем состоянии объекта управления АСУ, а, во-вторых, достаточно полное множество альтернативных сценариев управления, сформированных на основании финансовых, производственных, социальных и экологических прогнозов. Эти задачи решаются на уровне специализированных подсистем АСУ: системы интеллектуального мониторинга и интеллектуальной системы поддержки принятия решений.

Система интеллектуального мониторинга является адаптивной и объединяет следующие компоненты: блок сбора информации, в котором собираются параметры текущего состояния характеристик рассматриваемого населенного пункта или муниципального образова-

ния, параметры Программы развития инфраструктуры, состояния и результатов функционирования управляющей системы, системы предоставления услуг, а также фиксируются параметры контролируемых внешних воздействий; блок *оперативной оценки текущего состояния*, в котором в соответствии с определёнными моделями осуществляется предварительная обработка и оценка показателей текущего состояния объекта управления АСУ, сформированного в результате совокупного влияния внешней среды и управляющих воздействий.

Интеллектуальная система поддержки принятия решений (ИСППР) производит переработку информации, полученной от системы интеллектуального мониторинга и других подсистем АСУ в форму, пригодную для принятия управленческих решений, осуществляет ее хранение и предоставление в удобном и наглядном виде в управляющую систему. В данной подсистеме формируются сигналы, являющиеся управляющими для других подсистем АСУ. Это необходимо для обеспечения формирования управления, адекватного текущим изменениям в объекте управления и внешней среде. Структуру ИСППР как составляющей АСУ определяют ее следующие основные функции: накопление, обработка и хранение данных; формирование и хранение моделей; социально-экономические, финансовые, производственные и др. прогнозы; прогнозирование; визуализация; формирование альтернативных сценариев управления; оценка критериев достижения цели; обоснование рациональной структуры системы интеллектуального мониторинга и др.

Важной составной частью ИСППР является *логико-математическая модель*, которая должна адекватно отражать динамику функционирования населенного пункта или муниципального образования, обеспечивая возможность проведения многовариантных расчетов альтернативных сценариев управления для получения прогнозных оценок критериев достижения поставленных целей и визуализацию результатов в 3D. Функционал логико-математической модели включает реализацию основных транзакций субъектов каждой целевой группы при их взаимодействии между собой и субъектами других целевых групп во временном, пространственном, информационно-коммуникационном, финансовом и других разрезах. Базы данных, моделей и знаний аккумулируются и хранятся в используемом ИСППР *дата центре*.

Организационная структура управления является открытой, что обеспечивается выполнением следующих требований: все действующие связи между элементами каждого уровня иерархии должны быть формализованы отдельными протоколами; любой элемент может взаимодействовать с элементами своего уровня, только с одним элементом уровня на единицу выше, с элементами ниже своего уровня; протокол взаимодействия на каждом отдельном уровне иерархии должен быть единым, межуровневые протоколы могут быть уникальными; протокол взаимодействия на каком-либо уровне иерархии или между уровнями отсутствует только в том случае, если отсутствует формальное взаимодействие между элементами структуры.

Карта прикладных информационных систем, обеспечивающих эффективное функционирование АСУ УГ, включает в себя: перечень информационных систем и их составных элементов; протоколы их информационного взаимодействия; регламенты действий в случае штатных и возникновения нештатных ситуаций.

Работа контуров управления в АСУ УГ

Рассмотрим кратко работу основного контура управления АСУ УГ. Информация о текущем состоянии рассматриваемого населенного пункта или муниципального образования, всех показателей этого состояния в соответствии с принятой на текущий момент моделью сбора информации поступает в систему интеллектуального мониторинга, где она преобразовывается, проводится ее предварительный анализ, результаты которого поступают в управляющую систему и ИСППР. В последней формируются прогнозы и возможные альтернативные сценарии управления. На основе информации от ИСППР интеллектуальная управляющая система формирует научно обоснованные управленческие решения, которые поступают к исполнительной системе для реализации конкретных мероприятий.

Информационные сигналы обратной связи, направленные от управляющей системы в ИСППР – результаты выбора для практической реализации конкретных сценариев управления, требования к изменению моделей и корректировки других составляющих АСУ ИУГ. В ходе работы ИСППР формирует необходимые модели оценки и корректировки для адапта-

ции системы интеллектуального мониторинга к конкретным условиям и рекомендации для управляющей системы по повышению эффективности исполнительской системы.

Основные особенности моделируемой АСУ УГ: адаптивность процесса управления к текущим изменениям в объекте управления, в Программе развития и во внешней среде; интеллектуализация сбора и обработки первичной информации.

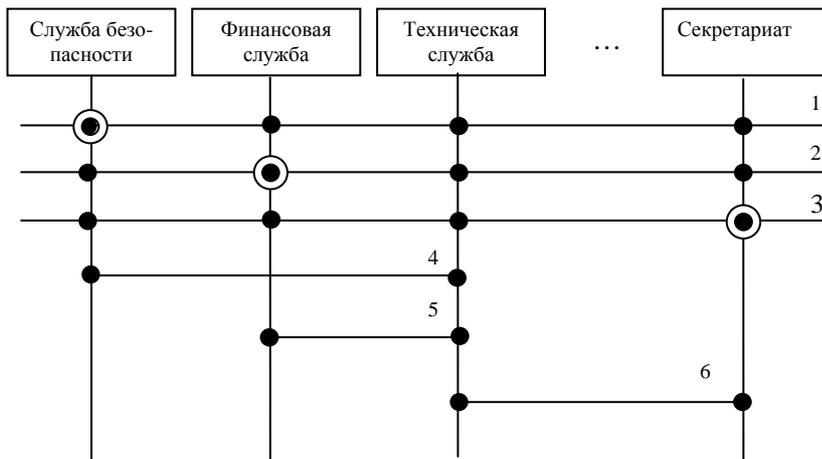
Организационная структура АСУ УГ

Можно сформулировать следующие требования к организационной структуре АСУ УГ:

- все действующие связи между элементами каждого уровня иерархии должны быть формализованы отдельными протоколами;
- любой элемент может взаимодействовать с элементами своего уровня, только с одним элементом уровнем на единицу выше, с элементами ниже своего уровня;
- любой протокол взаимодействия может определять взаимодействие между элементами только своего уровня иерархии;
- протокол взаимодействия на каждом отдельном уровне иерархии должен быть единым;
- отсутствие формального взаимодействия на каком-либо уровне иерархии определено в том случае, если протокол взаимодействия этого уровня отсутствует.

При выполнении этих требований система становится открытой для расширения, т.е. позволяет подключать новую структурную единицу, разрабатывая для нее дополнительный протокол взаимодействия. В зависимости от делегированных служб полномочий, взаимосвязи могут быть решающими – без участия руководителя верхнего уровня, рекомендательными, или неформальными. На нижних уровнях иерархии аналогично осуществляются взаимодействия между подчиненными структурными подразделениями равных уровней иерархии.

На рисунке 2 представлен фрагмент организационной структуры АСУ УГ (только горизонтальные связи между некоторыми службами верхнего уровня иерархии, имеющие единый протокол).



1 – протокол взаимодействия службы безопасности со всеми другими службами; 2 – протокол взаимодействия финансовой службы со всеми другими службами; 3 – протокол взаимодействия секретариата со всеми другими службами; 4 – взаимный протокол службы безопасности и технической службы; 5 – взаимный протокол финансовой службы и технической службы; 6 – взаимный протокол технической службы и секретариата.

Рисунок 2 – Протоколы взаимодействия служб верхнего уровня иерархии в организационной структуре системы управления

В реальной организационной структуре, после нормализации и минимизации горизонтальных связей, общая схема должна отображать все горизонтальные связи, имеющие собственные протоколы, и иметь ссылки на эти протоколы.

Карта прикладных информационных систем, обеспечивающих функционирование предложенной структуры АСУ УГ

Карта прикладных информационных систем, обеспечивающих эффективное функционирование системы управления программой «Умный город», включает в себя: перечень информационных систем и их составных элементов; стандартные протоколы информационного обмена систем и их компонентов между собой, с другими подсистемами системы управления и с внешней средой; регламенты обмена и взаимодействия в случае возникнове-

ния чрезвычайных ситуаций; регламенты в случае выхода из строя или отсутствия информации. Данная карта охватывает следующие области:

– экономика и жизнеобеспечение (ЖКХ, транспорт, промышленное производство, строительство, торговля, энергообеспечение и др.); потребление и расходование природных ресурсов;

– социально-правовая сфера (юридические услуги, семейные отношения, социальная поддержка, функции трудоустройства и др.);

– социокультурное пространство (культура и искусство, образование и наука, спорт и физическая культура, досуг, СМИ и др.);

– сфера недвижимости (операции с недвижимостью, земельные отношения, выдача разрешений, лицензирование и др.);

– финансы;

– сфера взаимодействия государственных органов, бизнеса и населения;

– сфера здравоохранения и медицины;

– сфера природопользования и экологии.

Заключение

На основе комплексного анализа существующих решений по реализации фрагментов «умного города» предложена структура АСУ УГ, позволяющая реализовывать процесс управления, адаптивный к текущим изменениям в объекте управления и внешней среде, осуществлять интеллектуальную обработку первичных данных, формировать программу развития инфраструктуры «умного города», на основе которой реализуются эффективные рациональные управляющие воздействия на его характеристики. Описаны основные компоненты АСУ и их функции.

Полученные результаты позволяют разработать научно обоснованную концепцию создания «умного города» и интеллектуальной автоматизированной системы управления его функциями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев, В.А. Биосферная совместимость: Технологии внедрения инноваций. Города, развивающие человека / В.А. Ильичев. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 240 с.

2. Коськин, А.В. Рынок электронных услуг населению в России : проблемы и перспективы [Текст] / О.П. Архипов, О.А. Ивашук, И.С. Константинов, А.В. Коськин, О.А. Савина // Информационные ресурсы России. – М: ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2011. – № 4(122). – С. 2-5.

Пилипенко Ольга Васильевна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» (г. Орел)

доктор технических наук, профессор, проректор по экономике и финансам

тел. (4862)416684

E-mail: unpk@ostu.ru

Архипов Олег Петрович

Учреждение Российской академии наук Институт проблем информатики РАН, Орел

кандидат технических наук, директор Орловского филиала института проблем информатики РАН

адрес: 302025, г. Орел, Московское шоссе, 137,

тел. (4862)368684

E-mail: ofran@orel.ru

Ивашук Ольга Александровна

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет»

доктор технических наук, декан факультета гуманитарных и естественнонаучных дисциплин

тел. (4862)763464

E-mail: ivascuk@orel.ru

Коськин Александр Васильевич

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» (г. Орел)

доктор технических наук, профессор, проректор по информатизации

тел. (4862)416684

E-mail: unpk@ostu.ru

Савина Ольга Александровна

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» (г. Орел),
доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем
тел. (4862)416684
E-mail: unpk@ostu.ru,

Загрядский Владимир Иванович

ФГОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», г. Орел
Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и энергосбережение»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (8462) 41-98-30

O.V. PILIPENKO, O.P. ARHIPOV, O.A. IVASHCHUK, A.V. KOSKIN,
O.A. SAVIN, V.I. ZAGRYADTSKY

**AUTOMATED CONTROL SYSTEM STRUCTURE «CLEVER CITY» WITH
HIGH LEVEL OF SAFETY AND QUALITIES OF LIFE**

In article questions of construction of the automated control system are considered by a clever city (ACS CC).. The integrated structure of the ACS CC. is resulted, its basic subsystems are considered: object of management, executive system, intellectual operating system, system of intellectual monitoring. Key differences of offered structure from typical decisions are specified. The basic requirements to organizational structure of (ACS CC). are considered. The card of the applied intelligence systems providing functioning of offered structure to ACS CC is developed.

Keywords: *the clever city, the automated control system, structure of the ACS CC clever city organizational structure ACS CC , subsystems ACS CC, applied intelligence systems*

Pilipenko Olga Vasilievna

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Doctor of technical sciences, professor, prorector for economy and finance
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 4862-41-66-84
E-mail: unpk@ostu.ru

Arhipov Oleg Petrovich

Russian academies of Sciences, Institute of problems of informatics of RAS, Orel
Candidate of technical sciences, director in Orel branch of Institute of problems of informatics of RAS
302025, Orel, Moskovskoe shosse, 137
Tel. 4862-36-86-84
E-mail: ofran@orel.ru

Ivashhuk Olga Aleksandrovna

Orel state agricultural university
Doctor of technical sciences, dean of faculty Humanitarian and Natural sciences
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 4862-76-34-64
E-mail: ivascuk@orel.ru

Koskin Aleksandr Vasilievich

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Doctor of technical sciences, professor, prorector for informatization
302020, Orel, Naugorskoe shosse, 29
Tel. 4862-41-66-84
E-mail: unpk@ostu.ru

Savina Olga Aleksandrovna

State University-Education-Science-Production Complex, Orel
Doctor of economical sciences, professor, chair “Information systems”
Tel. 4862-41-66-84
E-mail: unpk@ostu.ru

Zagryadskiy Vladimir Ivanovich

State University – Education Science Production Complex
Doctor of technical science, professor of department “Electric equipment and energy saving”
302020 Naugorskoe shosse 29, Orel,
Tel.: 4862-41-98-30

УНИФИКАЦИЯ УСЛОВИЙ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В РЕЖИМЕ ОБРАЩЕННО-ФАЗОВОЙ ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ.

Часть 2. АНТОЦИАНЫ, ГЛИКОЗИДЫ РОДИОЛЫ РОЗОВОЙ, АЛКАЛОИДЫ ЧИСТОТЕЛА

Разработан единый подход к контролю природных органических соединений в растительных экстрактах в режиме обращенно-фазовой жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ). Описанный аналитический подход позволяет проводить в условиях изократического элюирования скрининг природных соединений различных классов: флавонолов, катехинов, гидроксикоричных кислот, антоцианинов, алкалоидов – включая не только агликоны соединений, но также их гликозиды и эфиры с полярными органическими кислотами.

Ключевые слова: ВЭЖХ, хроматография, природные соединения, флавоноиды, катехины, гидроксикоричные кислоты, антоцианины, биологически-активные добавки, БАД, фармацевтика растений.

Введение

Основная задача комплексного исследования, включающего данную работу, сформулирована следующим образом: разработать минимальное число по возможности наиболее универсальных хроматографических режимов, позволяющих проводить контроль биологически активных органических соединений; при этом, выбранные режимы обладали бы высокой стабильностью, низкой ресурсоемкостью и высокой производительностью.

Более частной задачей, поставленной в данной работе, является разработка подобных хроматографических режимов для разделения и определения ряда групп природных биологически активных соединений, в частности флавонолов и флавонол-гликозидов, катехинов, гидроксикоричных кислот, антоцианинов, гликозидов родиолы, алкалоидов изохилинового ряда.

Оборудование и материалы

При выполнении эксперимента применялся жидкостной хроматограф высокого давления со спектрофотометрическим детектором на УФ область; конфигурация: насос Beckman 110A (Beckman), инжектор 210A (Altex), детектор UVIS-205 (PerSeptive Biosystems) или «Милихром – б».

Применяемые хроматографические колонки:

- 50×4,6 Reprosil-Pur Basic C18, 1,9 мкм (Maich GmbH, Германия);
- 150×4,6 Reprosil-Pur C18-AQ, 3 мкм (Maich GmbH, Германия);
- 250×4,6 Reprosil-Pur Basic C18, 5 мкм (Maich GmbH, Германия);
- 150×4,6 Halo Amide, 2,7 мкм (Advanced Materials Technology, США).

Для приготовления подвижных фаз применялся ацетонитрил Lecbiopharm марки «UV grade 210 nm», дистиллированная вода и фосфорная кислота марки «хч».

Обсуждение результатов

Антоцианины

Для хроматографического разделения антоцианинов (гликозидов антоцианов) применялась система 2. В качестве оптимального был выбран состав подвижной фазы ацетонитрил-вода-фосфорная кислота 12:88:1. При скрининге данных соединений оптимальный баланс между качеством разделения и временем анализа был достигнут на колонке типоразмера 50×4,6 с адсорбентом зернения 1,9 мкм (50×4,6 Reprosil-Pur Basic C18). Для достижения более детального разделения применялась колонка типоразмера 150×4,6 с адсорбентом зернения 3 мкм (150×4,6 Reprosil-Pur C18-AQ, 3 мкм, рис.1).

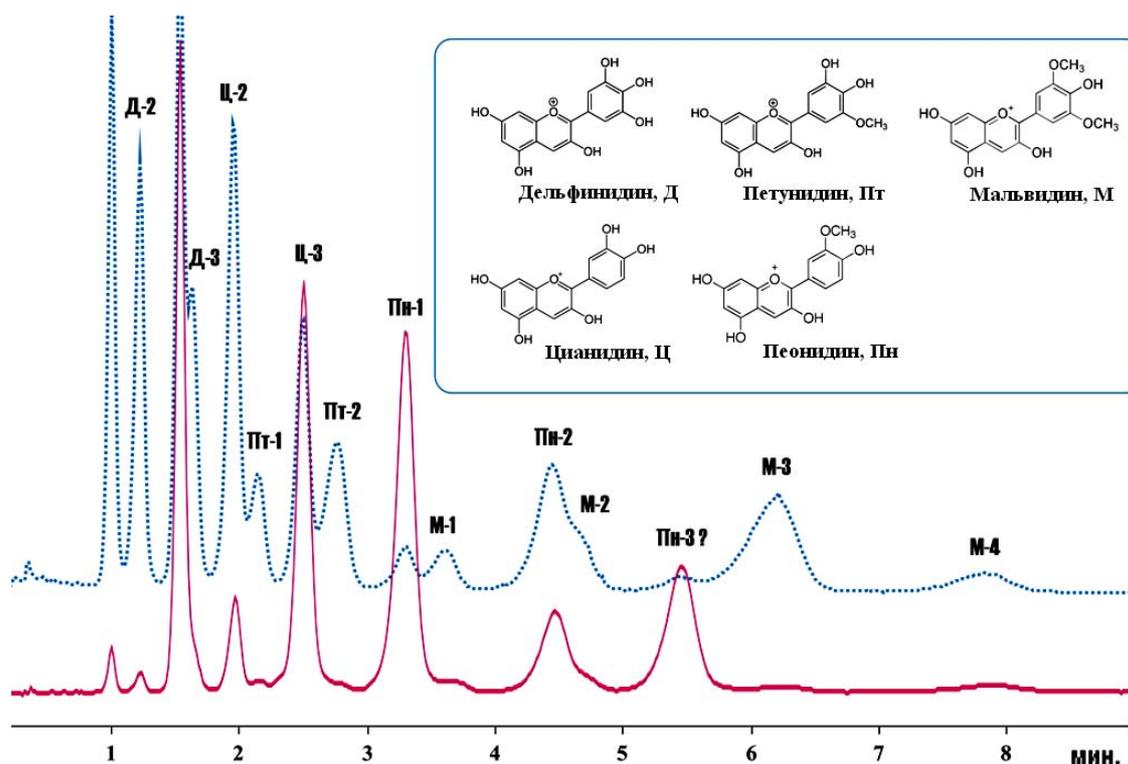


Рисунок 1 – Хроматограмма антоцианов черники и клюквы (вариант экспрессного определения)

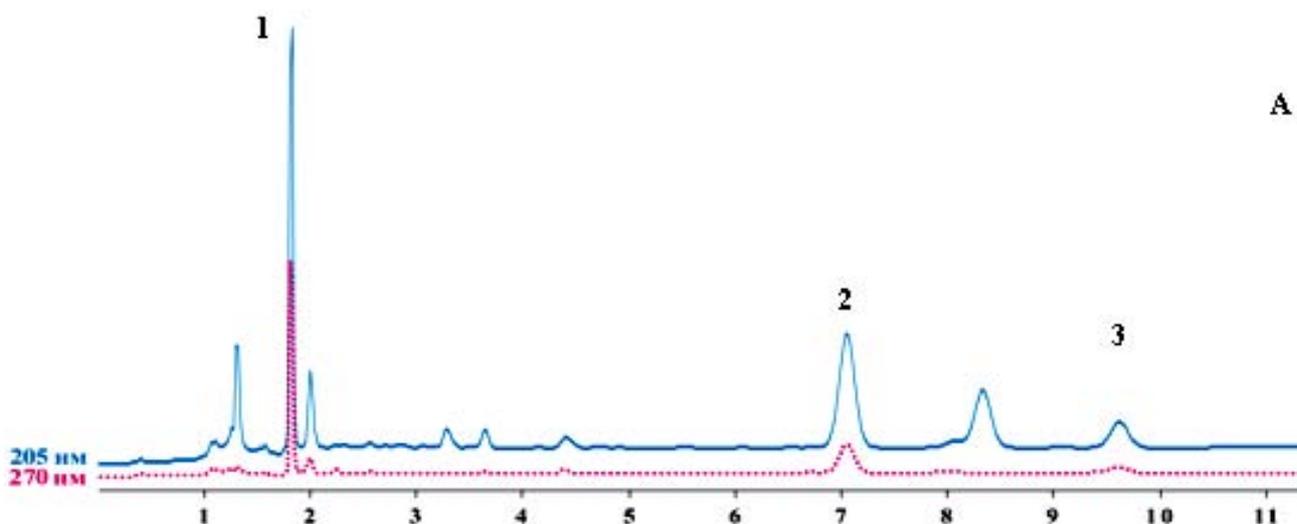
ПФ: 1 % водный раствор фосфорной кислоты; скорость потока 2 мл/мин; детектирование 520 нм.

НФ: 50×4,6 Reprosil-Pur Basic C18 (1,8 мкм), время анализа 9 минут. Вверху: хроматограмма антоцианов черники; внизу: хроматограмма антоцианов клюквы; Д – антоцианины дельфинидина, Пт – антоцианины петунидина, М – антоцианины мальвидина, Ц – антоцианины цианидина, Пн – антоцианины пеонидина

Гликозиды родиолы розовой

Для хроматографического разделения биологически активных гликозидов родиолы розовой применялась система 1. В качестве оптимального был выбран состав подвижной фазы ацетонитрил-вода-фосфорная кислота 17:83:0,5. Оптимальный баланс между качеством разделения и временем анализа был достигнут на колонке типоразмера 250×4,6 с адсорбентом зерна 5 мкм (250×4,6 Reprosil-Pur Basic C18) при скорости потока 2 мл/мин.

При проведении разделения на С16-амидной неподвижной колонке 150×4,6 Halo Amide было установлено, что соединение, идентифицируемое как розин, является смесью, по крайней мере, двух изомеров (рис. 2).



Гликозиды *rhodiola rosea*

Объект: родиола розовая, спиртовой экстракт

Растворитель пробы: подвижная фаза

Объем пробы: 10 мкл

НФ: 250×4,6 Reprosil-Pur Basic C18 (5 μm)

ПФ: 17 % ацетонитрила в 0,1 % водн. НЗРО4

Объемная скорость: 2 мл/мин

Детектирование:

— 205 нм

..... 270 нм

Объем кюветы детектора: 10 мкл

Температура: 25 °С

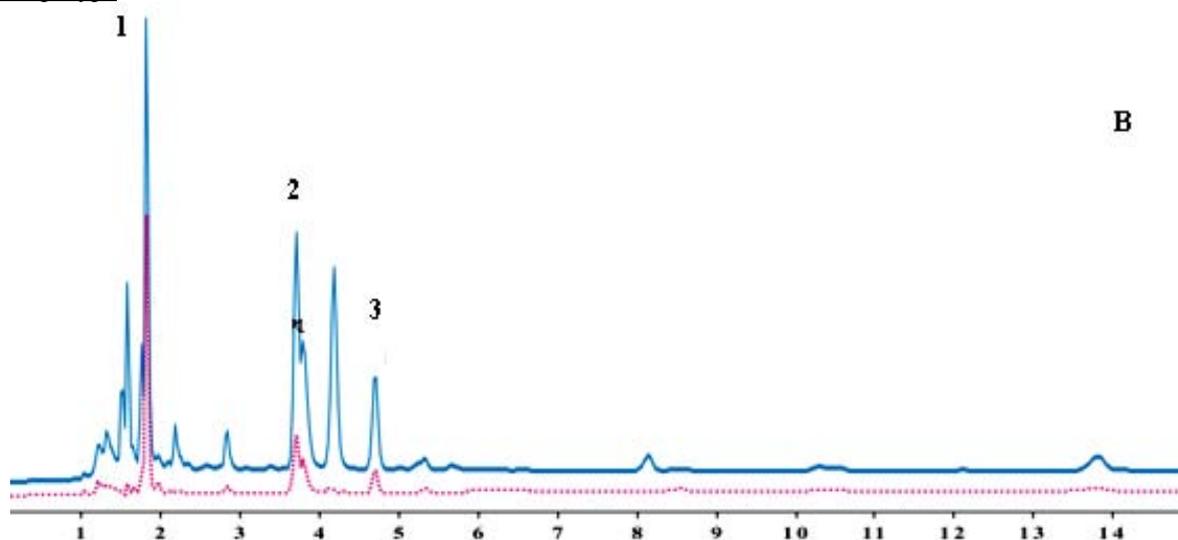
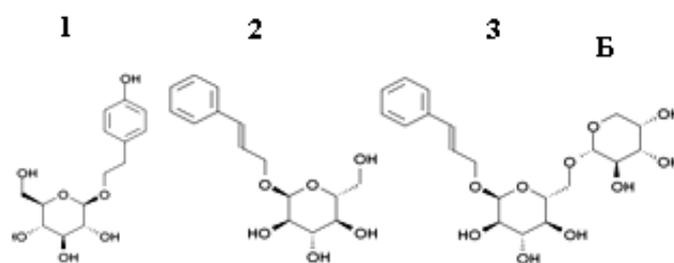


Рисунок 2 – Хроматограмма биологически активных гликозидов родиолы розовой на колонках с различной селективностью

ПФ: 17 % ацетонитрила в 0,1 % водном растворе фосфорной кислоты; скорость потока 2 мл/мин; детектирование УФ 205 и 270 нм; А: НФ 250×4,6 Reprosil-Pur Basic C18 (5 мкм), время анализа 11 минут; Б: гликозиды: 1 – салидрозид, 2 – розин, 3 – розавин; В: НФ 150×4,6 Halo Halo RP-Amide (2,7 мкм), время анализа 6 минут

Алкалоиды чистотела

Система 1 оптимально подходит для разделения в режиме обращенно-фазовой хроматографии широкого спектра природных алкалоидов.

В рамках данной работы система 1 применялась для хроматографического разделения изохинолиновых алкалоидов чистотела (с идентификацией коптизина). В качестве оптимального был выбран состав подвижной фазы ацетонитрил-вода-фосфорная кислота 10:90:0,5. Оптимальный баланс между качеством разделения и временем анализа был дос-

тигнут на колонке типоразмера 150×4,6 с адсорбентом зернения 3 мкм (150×4,6 Reprosil-Pur C18-AQ, 3 мкм, рис. 3).

Спектр изохинолиновых алкалоидов идентифицируется на хроматограмме по спектральному отношению 205/270 порядка 1,5.

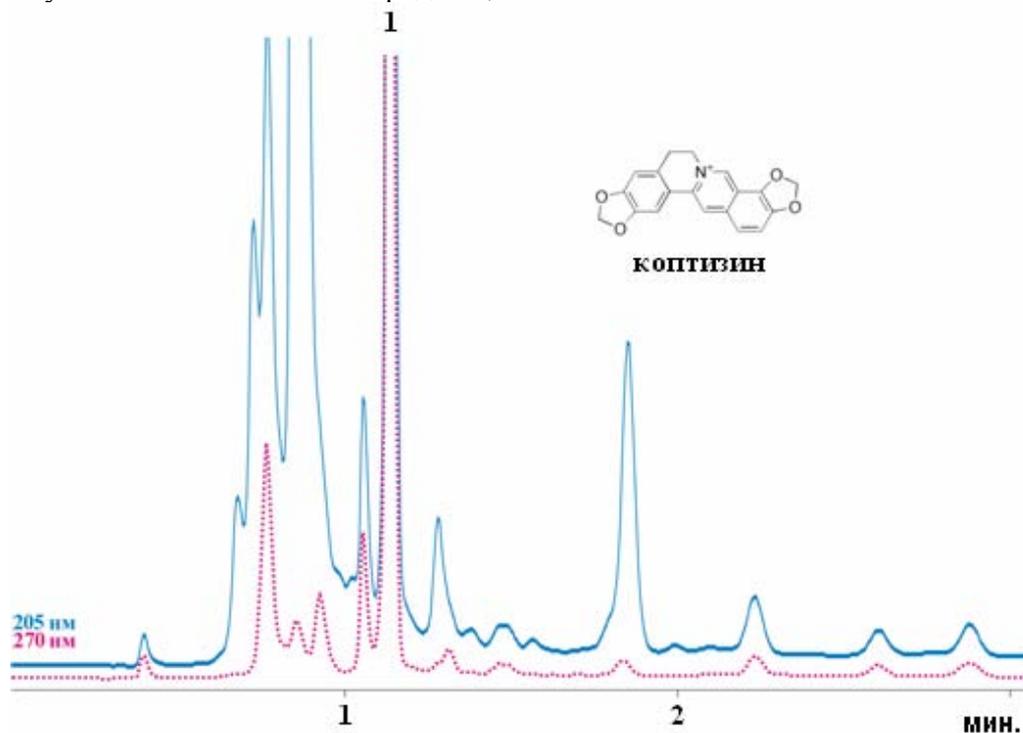


Рисунок 3 – Хроматограмма изохинолиновых алкалоидов чистотела (в различном масштабе) с идентификацией флавонолов шелухи лука.

НФ: 150×4,6 Reprosil-Pur C18-AQ (3 мкм). ПФ: 10 % ацетонитрила в 0,1 % водном растворе фосфорной кислоты; скорость потока 2 мл/мин; детектирование УФ 205 и 270 нм; время анализа 3 минуты; 1- коптизин

Выводы

1. Разработан единый подход к определению природных органических соединений при контроле состава растительных экстрактов в режиме обращенно-фазовой жидкостной хроматографии (ОФ ВЭЖХ). Он позволяет проводить в условиях изократического элюирования скрининг природных соединений различных классов: флавонолов, катехинов, гидроксикоричных кислот, антоцианинов, алкалоидов, включая не только агликоны соединений, но также их гликозиды и эфиры с полярными органическими кислотами.

2. В работе приводятся рекомендации по тонкой подстройке хроматографических условий разделения в зависимости от типоразмера применяемой хроматографической колонки. Показано, каким образом выбор типоразмера колонки влияет на соотношение качества разделения и времени анализа.

3. В рамках работы проанализированы более двух десятков экстрактов растений, большинство из которых являются лекарственными и входят в состав различных биологически активных добавок (БАД) и лечебных сборов.

4. В прикладном аспекте предложенный подход оптимально подходит для применения в контроле сырья готовой продукции при различных фармацевтических производствах, включая производство БАД. В аспекте фундаментальных исследований данная работа является частью систематического подхода по хемосистематике растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев, К.С. Практическое руководство по жидкостной хроматографии [Текст] / К.С. Сычев. – М. : Техносфера, 2011. – 272 с.
2. Сычев, С.Н. Высокоэффективная жидкостная хроматография [Текст]: учеб. пособие для ВУЗов / С.Н. Сычев. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – 190 с.

Сычев Константин Сергеевич

Госуниверситет УНПК, г. Орел

Кандидат химических наук, инженер лаборатории ВЭЖХ Орловского университета УНПК

Тел.: +7(961)625-7822

E-mail: kssychev@gmail.com

C.S. SYCHOV

UNIFYING THE CONDITION FOR LIQUID CHROMATOGRAPHIC SEPARATION AND SCREENING CONTROL OF NATURAL ORGANIC COMPOUNDS IN RP MODE

An integrated approach for RP-HPLC screening control of natural compounds in plant extracts has been developed that involves two simple isocratic systems. The approach is suitable for screening such compounds as flavonols, catechins, hydroxycinnamic acids, anthocyanins, alkaloids.

Keywords: *HPLC, chromatography, natural compounds, flavonoids, catechins, hydroxycinnamic acids, anthocyanins, food additives, farmaceutics.*

BIBLIOGRAPHY

1. Sychev, K.S. Prakticheskoe rukovodstvo po zhidkostnoj hromatografii [Tekst] / K.S. Sychev. – M. : Tehnosfera, 2011. – 272 s.
2. Sychev, S.N. Vysokojeffektivnaja zhidkostnaja hromatografija [Tekst] : ucheb. posobie dlja VUZov / S.N. Sychev. – Orel : OrelGTU, 2010. – 190 s.

Sychov Constantin Sergeevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Candidate of chemical Sciences, en engineer

Tel.: +7(961)625-7822

E-mail: kssychev@gmail.com

С.П. ПЕТРОВ, А.И. СУЗДАЛЬЦЕВ

КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПИКОВЫМИ ТЕПЛОИСТОЧНИКАМИ

Предложена оценка эффективности различных моделей когенерационных систем теплоснабжения с пиковыми теплоисточниками.

Ключевые слова: моделирование, эффективность, когенерационная система, пиковый теплоисточник.

Когенерационные системы теплоснабжения с пиковыми источниками, особенность функционирования которых заключается в комбинированной выработке тепловой и электрической энергии и наличии нескольких пиковых теплоисточников, дополняющих основной источник тепловой и электрической энергии (ТЭЦ), представляют собой сложную технологическую систему генерации, транспорта и отпуска тепловой энергии. Это обстоятельство вызывает необходимость нового подхода к вопросам расчета эффективности территориально распределенных взаимосвязанных между собой систем автоматического управления (САУ).

Модель когенерационной системы теплоснабжения с пиковыми теплоисточниками (рис. 1) состоит из большого числа последовательно и параллельно соединенных звеньев, представляющих самостоятельные САУ, которые отличаются как решаемыми ими вопросами, так и выполняемыми технологическими функциями. Каждая из представленных САУ работает в соответствии с заданным алгоритмом и решает определенный круг задач [1].

Суммарная расчетная тепловая нагрузка когенерационной системы складывается из тепловой нагрузки когенерационного источника и пиковых теплоисточников:

$$\sum_i Q_{W\hat{D}i} = Q_{W1} + Q_{W4} + Q_{W7} + Q_{W10} + Q_{W11} + Q_{W12} + Q_{W13} = Q_{W1} + Q_{W4} + Q_{W7} + Q_{W10} + Q_{W\hat{D}} \quad (1)$$

где Q_{W1} , Q_{W4} , Q_{W7} , Q_{W10} , $Q_{W\hat{D}}$ – соответственно расчетные тепловые мощности когенерационного источника (КИ); пиковых источников на контрольно-распределительном пункте (КРП), центральном тепловом пункте (ЦТП), индивидуальном тепловом пункте (ИТП); квартирного теплогенератора (КТ).

Фактическая тепловая нагрузка когенерационной системы при любой температуре наружного воздуха определяется по формуле:

$$Q_{W\hat{D}i} = \varphi Q_{W\hat{D}i} = (Q_{W1} + Q_{W4} + Q_{W7} + Q_{W10} + Q_{W11} + Q_{W12} + Q_{W13}), \quad (2)$$

где φ – коэффициент отпуска тепловой энергии [2], определяемый из отношения:

$$\varphi = \frac{t_{\hat{A}} - t_{\hat{D}}}{t_{\hat{A}} - t_{\hat{D}}}, \quad (3)$$

где $t_{\hat{A}}$ – фактическая температура воздуха в помещении;

$t_{\hat{D}}$ – фактическая температура наружного воздуха;

$t_{\hat{D}}$ – расчетная температура наружного воздуха.

Суммарные расчетные тепловые потери когенерационной системы складываются из внешних тепловых потерь: в магистральных и внутриквартирных трубопроводах, трубопроводах от ЦТП до индивидуального теплового пункта, через теплоемкие и нетеплоемкие наружные ограждения и собственных тепловых потерь: когенерационного источника, пиковых источников на контрольно-распределительном пункте, центральном тепловом пункте и индивидуальном тепловом пункте.

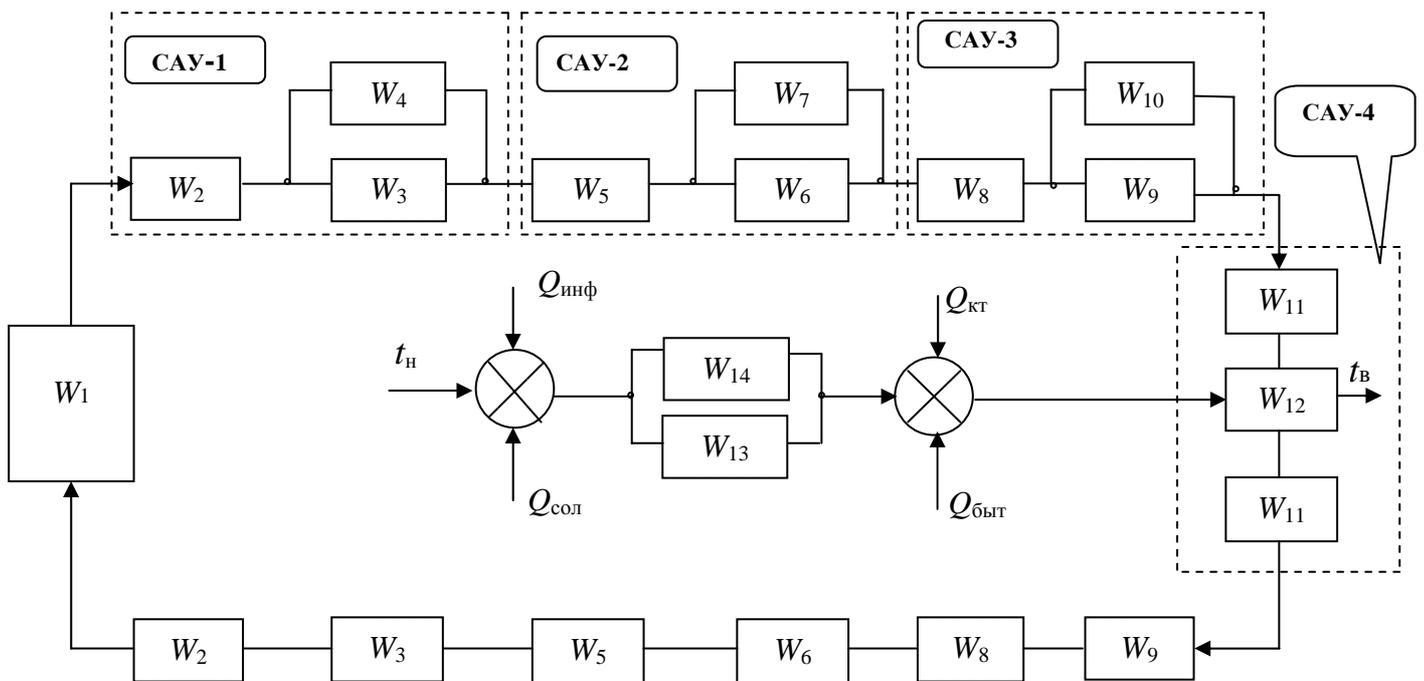


Рисунок 1 – Модель когенерационной системы теплоснабжения с пиковыми теплоисточниками:

W_1 – передаточная функция КИ, W_2 – передаточная функция магистральных трубопроводов, W_3 – передаточная функция КРП, W_4 – передаточная функция пикового теплоисточника на КРП, W_5 – передаточная функция внутриквартирных трубопроводов, W_6 – передаточная функция ЦТП, W_7 – передаточная функция пикового теплоисточника на ЦТП, W_8 – передаточная функция трубопроводов от ЦТП до ИТП, W_9 – передаточная функция ИТП, W_{10} – передаточная функция пикового теплоисточника на ИТП, W_{11} – передаточная функция подающего и обратного трубопроводов системы отопления, W_{12} – передаточная функция отопительного прибора, W_{13} – передаточная функция теплоемких наружных ограждений, W_{14} – передаточная функция нетеплоемких наружных ограждений, t_n , $Q_{инф}$, $Q_{сол}$, $Q_{кв}$, $Q_{быт}$, $t_в$ – соответственно температура наружного воздуха, тепловые потери инфильтрацией, тепловые поступления от солнечного излучения, тепловые поступления от квартирного теплогенератора, бытовые тепlopоступления, температура воздуха в отапливаемом помещении. САУ-1 ÷ САУ-4 – соответственно системы автоматического управления тепловым режимом КРП, ЦТП, ИТП, КТ

Таким образом, суммарные **расчетные** тепловые потери в когенерационной системе с пиковыми теплоисточниками составляют:

$$\sum_i \Delta Q_{W\hat{\delta}} = \Delta Q_{W\hat{a}i} + \Delta Q_{W\hat{n}i} = \{ \Delta W_2 + \Delta W_5 + \Delta W_8 + \Delta W_{13} + \Delta W_{14} \} + \{ \Delta W_1 + \Delta W_3 + \Delta W_6 + \Delta W_9 \} \quad (4)$$

Суммарные **фактические** тепловые потери в когенерационной системе с пиковыми теплоисточниками составляют:

$$\sum_i \Delta Q_{W\hat{0}i} = \lambda (\Delta Q_{W\hat{a}i} + \Delta Q_{W\hat{n}i}) = \lambda \sum_i \Delta Q_{W\hat{\delta}i}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент сверхнормативных тепловых потерь [3] в когенерационной системе с пиковыми теплоисточниками, определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{\sum_i \Delta Q_{W\hat{0}i} - \sum_i \Delta Q_{W\hat{P}i}}{\sum_i \Delta Q_{W\hat{P}i}} \quad (6)$$

Фактическая мощность когенерационного источника и пиковых источников всей системы составляет:

$$\sum_i Q_{\hat{A}i} = \sum_i Q_{W\hat{0}i} + \sum_i \Delta Q_{W\hat{0}i} = \left\{ \sum_i Q_{W\hat{0}\hat{e}i} + \sum_i Q_{W\hat{0}\hat{e}i} \right\} + \sum_i \Delta Q_{W\hat{0}i} \quad (7)$$

Коэффициент полезного использования топлива в когенерационной системе с пиковыми теплоисточниками определяется по формуле:

$$\eta_{\text{п.к.}} = \frac{\sum_i Q_{W\hat{o}i}}{\sum_i Q_{W\hat{o}i} + \sum_i \Delta Q_{W\hat{o}i}} = \frac{\sum_i Q_{W\hat{o}i}}{\sum_i Q_{\text{п.к.}}}. \quad (8)$$

Уравнения теплового баланса для САУ при раздельной выработке тепловой и электрической энергии определяются зависимостями:

– от квартирного теплогенератора (САУ-4):

$$\frac{Q_{\text{эл.}}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}} + Q_{W12} = \Delta Q_{W11} - \{\Delta Q_{W13} + \Delta Q_{W14}\}; \quad (9)$$

– от ИТП с автономной котельной (САУ-3):

$$\frac{Q_{W10}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}} = \Delta Q_{W8} - \Delta Q_{W11}; \quad (10)$$

– от ЦТП с квартальной котельной (САУ-2):

$$\frac{Q_{W7}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}} = \Delta Q_{W5} - \Delta Q_{W8}; \quad (11)$$

– от КРП с районной котельной (САУ-1):

$$\frac{Q_{W4}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}} = \Delta Q_{W2} - \Delta Q_{W5}, \quad (12)$$

где коэффициент полезного использования топлива источника тепловой энергии и пиковых источников можно определить из выражения:

$$\eta_{W\hat{o}i} = \frac{Q_{Wi}}{Q_{\text{S}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}}, \quad (13)$$

где Q_{Wi} – мощность источника тепловой энергии, ккал/ч;

Q_{S}^{I} – низшая теплотворная способность топлива (7000 ккал/кг);

$\theta_{\text{Д0}}, \theta_{\text{Д1}}, \theta_{\text{эл.}}$ – часовой расход топлива на теплоснабжение при раздельном производстве тепловой энергии, электрической энергии и при когенерации, кг/ч.

Коэффициенты $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, характеризующие в относительных величинах потери тепловой энергии в трубопроводах различного назначения: системы отопления здания до ИТП; внутриквартальных до ЦТП; магистральных до КРП; от КРП до КИ – определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{\Delta Q_{W11} - \{\Delta Q_{W13} + \Delta Q_{W14}\}}{\Delta Q_{W11}}; & \mu_2 &= \frac{\Delta Q_{W8} - \Delta Q_{W11}}{\Delta Q_{W8}}; \\ \mu_3 &= \frac{\Delta Q_{W5} - \Delta Q_{W8}}{\Delta Q_{W5}}; & \mu_4 &= \frac{\Delta Q_{W2} - \Delta Q_{W5}}{\Delta Q_{W2}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Коэффициенты полезного использования топлива: в контрольно-распределительном пункте $\eta_{\text{п.к.}-1}$; в центральном тепловом пункте $\eta_{\text{п.к.}-2}$; в индивидуальном тепловом пункте $\eta_{\text{п.к.}-3}$, от квартирного теплогенератора $\eta_{\text{п.к.}-4}$ определяются из выражений:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{п.к.}-1} &= \frac{Q_{W4}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}} + \frac{Q_{W1}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}}; & \eta_{\text{п.к.}-2} &= \frac{Q_{W7}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}}; \\ \eta_{\text{п.к.}-3} &= \frac{Q_{W10}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}}; & \eta_{\text{п.к.}-4} &= \frac{Q_{\text{эл.}}}{Q_{\text{O}}^{\text{I}} \theta_{\text{Д0}}} + Q_{W12}. \end{aligned} \quad (15)$$

При оборудовании КРП, ЦТП, ИТП пиковыми источниками коэффициент полезного использования топлива всей когенерационной системы теплоснабжения возрастает и определяется с учетом коэффициента когенерации $\eta_{\hat{E}} \bar{A}$.

$$\eta_{\hat{E}} \bar{A} = \frac{\theta_{\hat{E}} \bar{A}}{\theta_{\text{ДО}} + \theta_{\text{ДУ}}} - \text{коэффициент когенерации, определяемый величиной экономии}$$

топлива за счет комбинированного производства тепловой и электрической энергии.

С учетом формул (13), (14), (15) получены зависимости для определения суммарного коэффициента полезного использования топлива различных вариантов когенерационных систем теплоснабжения, работающих на органическом топливе, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимости для определения суммарного коэффициента полезного использования топлива различных вариантов когенерационных систем теплоснабжения

Системы теплоснабжения	Вариант САУ	Коэффициент полезного использования топлива системы
От пикового теплоисточника в ИТП (автономная котельная)	САУ-4	$\eta_{\text{САУ-4}} \mu_1 (1-\lambda)$
От пикового теплоисточника в ЦТП (квартальная котельная)	САУ-3	$\eta_{\text{САУ-3}} \mu_1 \mu_2 (1-\lambda)$
От пикового теплоисточника в КРП (районная котельная)	САУ-2	$\eta_{\text{САУ-2}} \mu_1 \mu_2 \mu_3 (1-\lambda)$
От ТЭЦ	САУ-1	$\eta_{\text{САУ-1}} \mu_1 \mu_2 \mu_3 \mu_4 (1-\lambda)$

Полученные зависимости (табл. 1) позволяют определить суммарный коэффициент полезного использования топлива для различных вариантов когенерационных систем теплоснабжения с пиковыми теплоисточниками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Петров, С.П. Внедрение энергосберегающих технологий в Орловском государственном техническом университете [Текст] / С.П. Петров // Материалы VI Всероссийского совещания-выставки по энергосбережению. В сб. Энергетика Региона, №2. – Екатеринбург, 2005. – С. 39-40.
- Чистович, С.А. Автоматическое регулирование расхода тепла в системах теплоснабжения и отопления [Текст] / С.А. Чистович. – Л.: Стройиздат, 1975. – 160 с.
- Чистович, С.А. Энергосберегающие системы теплоснабжения зданий на основе современных технологий и материалов [Текст] / Под общ. науч. ред. С.А. Чистовича. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: АЦТЭЭТ, 2003. – 147 с., ил.

Петров Сергей Петрович

Государственный университет-УНПК, г. Орел
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование и энергосбережение»
 Тел. (4862) 41-98-30
 E-mail: algoritm911@mail.ru

Суздальцев Анатолий Иванович

Государственный университет-УНПК, г. Орел
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»
 Тел.: (4862)455757
 E-mail: aist39@yandex.ru

S.P. PETROV, A.I. SUZDAL'TSEV

EFFICIENCY CONTROL KOGENERATION SYSTEMS OF HEAT SUPPLY SYSTEMS WITH PEAK HEAT SOURCES

The proposed assessment of efficiency of various models cogenerated systems of a heat supply with peak heaters is considered.

Keywords: modeling, efficiency, cogenerated system, a peak heater.

BIBLIOGRAPHY

1. Petrov, S.P. Vnedrenie jenergosberegajuwih tehnologij v Orlovskom gosudarstvennom tehničeskom universitete [Tekst] / S.P. Petrov // Materialy VI Vserossijskogo sozewanija-vystavki po jenergosberezhe-niju. V sb. Jenergetika Regiona, №2. – Ekaterinburg, 2005. – S. 39-40.
2. Chistovich, S.A. Avtomatičeskoe regulirovanie rashoda tepla v sistemah teplosnabzhenija i otople-nija [Tekst] / S.A. Chistovich. – L.: Strojizdat, 1975. – 160 s.
3. Chistovich, S.A. Jenergosberegajuwie sistemy teplosnabzhenija zdaniy na osnove sovremennyh tehno-logij i materialov [Tekst] / Pod obw. nauch. red. S.A. Chistovicha. – 2-e izd., ispr. i dop. – SPB.: ACTJeJeT, 2003. – 147 s., il.

Petrov Sergey Petrovich

State University – UNPK, t. Orel

Doctor of technical Sciences, professor of "Electrical and energy efficiency"

Tel. (4862) 41-98-30

E-mail: algoritm911@mail.ru

Suzdal'tsev Anatolij Ivanovich

State University – UNPK, t. Orel

Doctor of technical Sciences, professor of "Electronics, computing and information security"

Tel.: (4862)455757

E-mail: aist39@yandex.ru

Г.А. ДИДИН

ВИХРЕТОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ ДИСКОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Статья посвящена вопросу выявления продольных трещин в стенках цилиндрических отверстий в дисках из жаропрочных сталей, применяемых в авиационных двигателях. Проходные вихретоковые преобразователи (ВТП) не обеспечивают надежной регистрации недопустимых дефектов из-за интегрального характера получаемой информации и сильного влияния краевого эффекта. Используемые для решения подобной задачи дефектоскопы с вращающимся накладным ВТП достаточно сложны и дорогостоящи. Вместе с тем и они не могут быть использованы в данном случае из-за габаритных ограничений – максимально допустимый диаметр средства доставки 10 мм при диаметре контролируемого отверстия 5 мм.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, диск лабиринт, выявление трещин.

Разрушение диска лабиринта газотурбинного двигателя является одной из причин разрушения двигателя в целом. Усталостные трещины в процессе эксплуатации изделия возникают на естественных концентраторах напряжения, которыми являются образующие перепускных отверстий. Выявление этих трещин на ранней стадии является важной задачей неразрушающего контроля. Основной проблемой при решении этой задачи является сложность доступа к контролируемой поверхности на собранном двигателе, исключающая применения таких методов, как ультразвуковой, метод проникающих веществ и рентгеновский. С помощью эндоскопа можно выявить довольно значительные по размерам трещины, однако, трещины глубиной около миллиметра имеют настолько маленькое раскрытие, что их невозможно выявить оптическим методом (рис. 1).

Решение задачи упростилось тем, что сектор вероятного возникновения трещин был ограничен благодаря конструктивным особенностям контролируемого объекта (рис. 2).

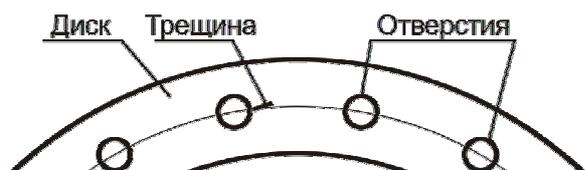


Рисунок 1 – Контролируемый объект с трещиной

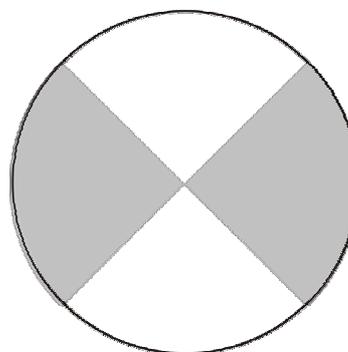


Рисунок 2 – Зона вероятного появления трещин

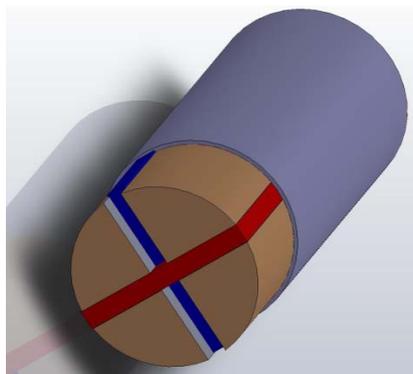


Рисунок 3 – Вихретоковый преобразователь

Для выявления опасных дефектов с необходимой чувствительностью при одновременном подавлении краевого эффекта был разработан специальный вихретоковый преобразователь [1], изображенный на рисунке 3. Он имеет ортогональные возбуждающую и измерительную обмотки, защищенные от механических повреждений титановым колпачком.

При отсутствии дефектов напряжение, наводимое в измерительной обмотке, близко к нулю. Под влиянием продольной трещины происходит деформация контуров вихревых токов, имеющих не только осевую, но и угловую составляющие за счет конечной толщины пластины. Для оптими-

зации конструкции вихретокового преобразователя была создана математическая модель системы контроля, расчёты проводились методом конечных элементов. Зависимость сигнала от частоты при наличии трещины глубиной 1 мм показана на рисунке 4.

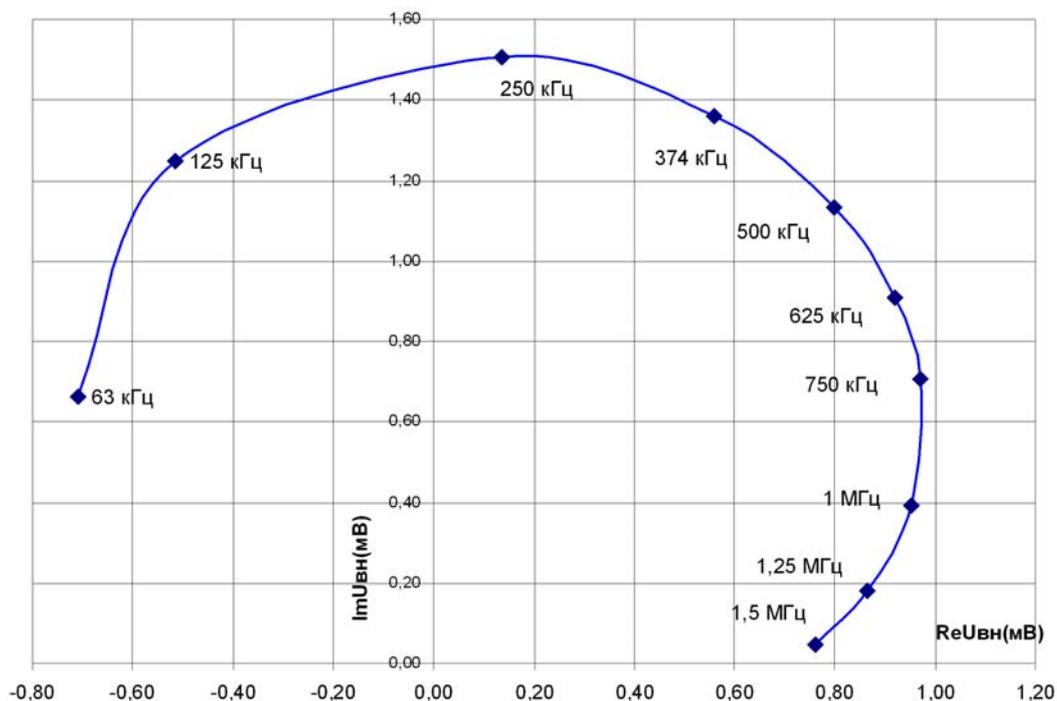


Рисунок 4 – Годограф сигнала при изменении частоты

Рабочая частота была выбрана по сочетанию максимальной амплитуды сигнала и максимального угла между полезным сигналом и сигналами от мешающих факторов – влияния неидеальности изготовления ВТП, отклонения диаметра контролируемого отверстия от заданного и т. д.

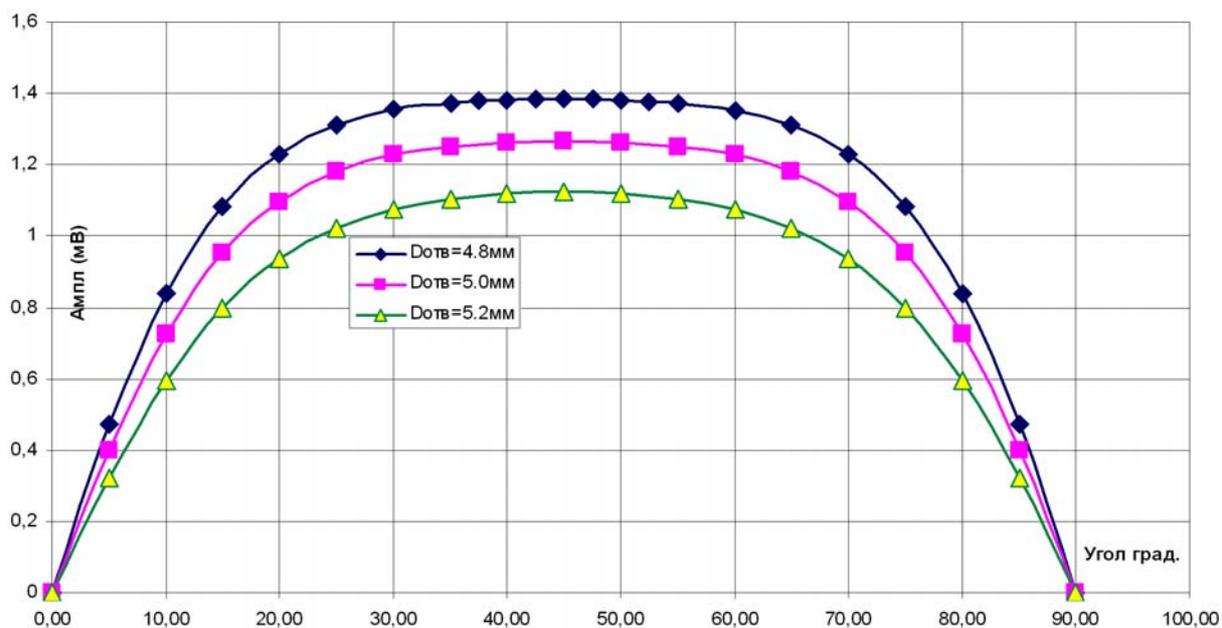


Рисунок 5 – Зависимость модуля сигнала от угла поворота датчика

При этом надежно регистрируются дефекты в угловом секторе $2 \times 60^\circ$ (рис. 5). Это позволило полностью отказаться от вращения чувствительного элемента, так как зона вероятного возникновения трещин не превышает данный сектор.

Для оптимизации настройки разработанного ВТП в процессе изготовления и повышения чувствительности к трещинам малого размера измерительная обмотка выполнена из двух секций, включённых особым образом (патент РФ № 2216729). Поскольку на практике добиться ортогонального расположения обмоток при серийном выпуске невозможно, измерительная обмотка делается из двух секций, каждая из которых заведомо неортогональна возбуждающей, при этом отклоняются от нормали они в разные стороны. Начальные выводы обмоток подключены к земле, конечные – к настроенному потенциометру (рис. 6). Поворачивая регулятор потенциометра, можно добиться минимального изменения сигнала при введении ВТП в контролируемое отверстие при отсутствии дефекта в последнем.

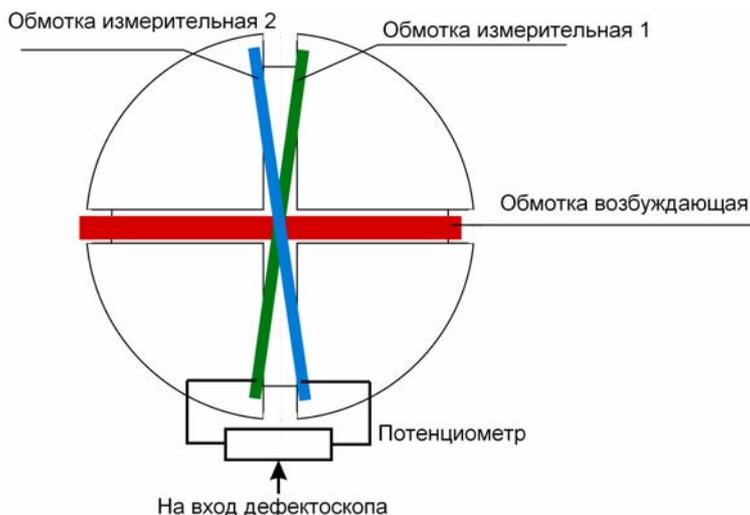


Рисунок 6 – Структурная схема вихретокового преобразователя

Для реализации возможностей, заложенных в конструкции ВТП, был разработан вихретоковый дефектоскоп «Салют-1». Основными требованиями, предъявляемыми заказчиком к прибору, являлись: точность, простота эксплуатации, малый вес и низкое энергопотребление. Последний пункт вызван тем, что работа с прибором происходит в местах с непредсказуемой возможностью подключения к электросети, поэтому заряда батарей должно хватать как минимум на 30 часов работы. Ещё одним важным пожеланием была универсальность – возможность применения дефектоскопа для решения других задач. Это вступало в конфликт с требованием простоты эксплуатации, так как каждая задача характеризуется своим набором настроек, выбор которых требует высокой квалификации оператора. Противоречие было разрешено следующим образом: оператору, работающему непосредственно на объекте, предоставляется минимальный набор органов управления – кнопка «металл» и регулировка «поворот фазы», все остальные настройки – выбор рабочей частоты, рабочего тока, коэффициенты передачи входных усилителей, порог срабатывания сигнализации – осуществляются с помощью персонального компьютера, подключаемого к прибору через последовательный порт (интерфейс RS-232).

Для удобства оператора, выходной сигнал дефектоскопа отображается на комплексной плоскости – на мониторе компьютера. В лабораторных условиях оператор – специалист высокого уровня – выбирает оптимальный режим работы для текущей задачи, регулируется даже диапазон поворота фазы, доступный конечному пользователю. После этого набор настроек запоминается в памяти дефектоскопа, где и сохраняется, в том числе, при выключении питания. В дальнейшем прибор становится «однозадачным» до следующей «настройки».

Прибор создавался по традиционной структурной схеме, (рис.7).

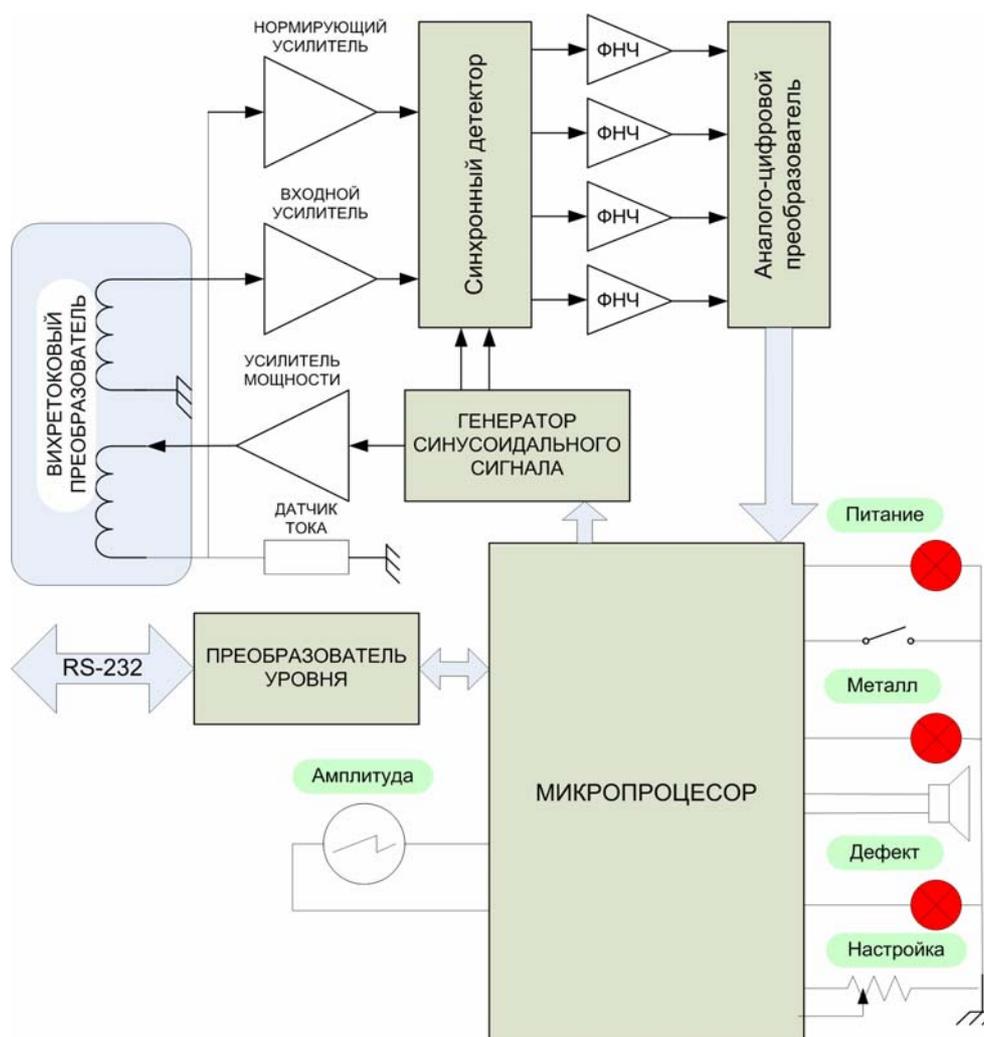


Рисунок 7 – Структурная схема вихретокового дефектоскопа «Салют-1»

Генератор синусоидального сигнала AD9834 вырабатывает гармонический сигнал для возбуждения рабочего тока и опорный сигнал для управления синхронным детектором.

Усилитель мощности согласует нагрузочную способность синтезатора и входное сопротивление возбуждающей обмотки.

Входной усилитель и нормирующий усиливают сигналы от измерительной обмотки и датчика тока. Коэффициенты передачи усилителей изменяются программно в диапазоне 36 дБ.

Двухканальный синхронный детектор (КФ1561КП1) выделяет действительные и мнимые составляющие двух входных сигналов.

После ФНЧ – фильтров низкой частоты третьего порядка сигналы поступают на 8-канальный аналого-цифровой преобразователь (ADS8345), информацию с которого считывает микропроцессор, управляющий работой всего прибора.

Кроме этого микропроцессор с помощью встроенного АЦП следит за положением регулятора «настройка» (в поздних сериях «Фаза»), фиксирует нажатие кнопки «металл» и выдает сигналы на сигнальные светодиоды «питание», «металл», «дефект», звуковой сигнализатор дефекта и пропорциональный – на стрелочный индикатор.

Для обмена информацией с персональным компьютером используется встроенный преобразователь уровня (MAX232), стандартный разъем интерфейса RS-232 размещен на задней панели прибора.

Всего было выпущено около 30 вихретоковых дефектоскопов «Салют-1». Опыт эксплуатации на авиаремонтных предприятиях показал их высокую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2216729 Российская Федерация, МПК⁷ G01N 27/90. Токовихревой преобразователь [Текст] / Ездаков В.А., Дидин Г.А., Шкатов П.Н. ; заявка № 2002128574/28 от 2002.10.24 ; опубл. 20.11.2003.

Дидин Геннадий Анатольевич
НУЦ «КАСКАД» МГУПИ
Аспирант
Тел (985) 760-58-71
E-mail: 362@mail.ru

G.A. DIDIN

EDDY CURRENT DEFECTOSCOPY OF DISKS OF AVIATION ENGINES

The article focuses on the identification of longitudinal cracks in the walls of cylindrical holes in the plates of heat-resistant steels used in aircraft engines. Pass-through eddy-current converters (VTP) does not provide reliable recording of unacceptable defects due to the integral nature of the information received and the strong influence of the edge effect. Used to solve a similar problem with a rotating overhead flaw ECP are quite complex and expensive. At the same time and they can not be used in this case because of overall limits - the maximum diameter of the delivery vehicle with a diameter of 10 mm 5 mm aperture controlled.

Keywords: eddy current testing, disk labyrinth, crack detection.

BIBLIOGRAPHY

1. Pat. 2216729 Rossijskaja Federacija, MPK⁷ G01N 27/90. Tokovihrevoj preobrazovatel' [Tekst] / Ez-dakov V.A., Didin G.A., Shkatov P.N. ; zjavka № 2002128574/28 ot 2002.10.24 ; opubl. 20.11.2003.

Didin Gennadiy Anatol'evich
The NCA "CASCADE" of the Moscow state university of instrument making and computer science, Moscow
The post-graduate student
Tel (985) 760-58-71
E-mail: 362@mail.ru

Г.И. УТКИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАЗЪЁМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Рассмотрены структура и принцип действия экспериментальной установки для исследования электрических соединителей. Установка предназначена для изучения влияния электрических параметров соединителей и условий его эксплуатации на его надёжность. Ее использование позволяет выполнить экспериментальную проверку эффективности математической модели износа контактной пары, которая была предложена при теоретических исследованиях коэффициента износа электрических соединителей.

Ключевые слова: экспериментальная установка; электрический соединитель; режим эксплуатации; функция электрического сопротивления; тензорезистивный преобразователь.

Актуальность проблемы и цель работы

Разъёмные электрические соединители – широко распространённые компоненты радиоэлектронной и электромеханической аппаратуры. Основным функциональным элементом разъёмного соединителя, предназначенным для коммутации токоведущих частей аппаратуры, является контактная пара. Согласно статистическим данным предприятий-изготовителей разъёмов, около 75 % отказов разъёмных электрических соединителей происходит из-за износа их контактных пар, а отказ соединителя, в свою очередь, является одним из наиболее типичных видов отказов радиоэлектронной и электротехнической аппаратуры. В связи с этим особое значение приобретает решение задачи обеспечения высокой износостойкости контактных пар как основного показателя надёжности электрических соединителей.

Контактные пары разъёмных электрических соединителей представляют собой совокупность двух металлических деталей – штырь и гнездо. На поверхности деталей контактной пары нанесено покрытие, основным свойством материала которого является высокая электропроводность. В большинстве случаев материалом для покрытия деталей контактных пар служит серебро, так как это единственный в природе металл, оксид которого обладает электропроводными свойствами. Серебро принадлежит к наиболее дефицитным химическим элементам, массовая доля его содержания в земной коре составляет порядка $7 \cdot 10^{-6}$ %. Объём потребления серебра превышает объём производства первичного металла, а дефицит компенсируется вторичной переработкой утилизированных изделий. Поэтому экономия серебра в электротехнике и электронике, включая производство и обслуживание коммутационных элементов, является важной задачей.

Изделия радиотехники, электротехники и электронно-вычислительной техники имеют в своём составе значительное количество разъёмных соединителей, которые, в свою очередь, состоят из многих контактных пар. Например, прямоугольный электрический соединитель типа СНП-260 имеет 135 контактных пар. Разъёмным электрическим соединителям присваиваются высокие значения *показателей надёжности*: минимальная наработка – 500 сочленений-расчленений (т.е., замыканий и размыканий) и 10 тыс. ч при работе под электрической нагрузкой; срок сохраняемости (в упаковке) – 12...15 лет. Руководящим документом РМ 25446-90 для каждой контактной пары устанавливается номинальная интенсивность отказов в диапазоне от $0,005 \cdot 10^6$ до $0,02 \cdot 10^6$ 1/ч, в зависимости от типа конструкции соединителя (это сопоставимо с интенсивностью отказов резисторов). Такие высокие показатели надёжности формируются в результате разработки конструкций контактных пар, гарантирующих безотказную работу соединителя в течение его *назначенного ресурса*. По окончании назначенного ресурса разъёмного электрического соединителя возникает *актуальная проблема*, заключающаяся в обосновании возможности и продолжительности его дальнейшей эксплуатации или, наоборот, в доказательстве факта его предельного износа и необходимости утилиза-

ции. Решение данной проблемы создаёт предпосылки для продления ресурса соединителей, организации ремонтно-восстановительных работ на предприятиях-изготовителях, что, конечно, позволит решить задачу экономии серебра при производстве соединителей за счёт его рационального нанесения на поверхности деталей контактных пар, восстановления покрытия на изношенных контактах и переработки утилизированных деталей.

Решение указанной актуальной проблемы заключается в разработке метода контроля показателей надёжности и прогнозирования остаточного ресурса контактных пар разъёмных электрических соединителей, а также в создании принципов построения средств контроля контактных пар. Учитывая тенденцию к развитию методов неразрушающего контроля, а также то, что наиболее естественным диагностическим признаком состояния контактной пары является её переходное сопротивление контакта, в качестве информативных параметров разрабатываемого метода целесообразно использовать параметры функции электрического сопротивления контактной пары постоянному току. Первым этапом работ по созданию данного метода должен стать анализ зависимостей показателей надёжности контактной пары соединителя от её электрических параметров и режимов эксплуатации. Теоретический анализ подобных зависимостей осуществляется за счёт математического моделирования процесса износа рабочих поверхностей деталей контактной пары, а для подтверждения адекватности результатов теоретических исследований физическим процессам, протекающим на поверхностях деталей контактных пар, необходимо проведение экспериментальных исследований, которые, в свою очередь, требуют создания экспериментального оборудования.

Целью данной работы является описание экспериментальной установки, предназначенной для исследования надёжности разъёмных электрических соединителей.

Общие требования к экспериментальной установке

При подтверждении адекватности разработанной математической модели износа разъёмного электрического соединителя [1, 2] процессам, происходящим в зонах контактирования, выявлении взаимосвязи параметров, влияющих на износ соединителя, и режимов его эксплуатации с параметрами функции электрического сопротивления возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований.

Требования, предъявляемые к экспериментальной установке для исследований надёжности разъёмных электрических соединителей, определяются конструктивными особенностями объектов исследований, определяемыми показателями надёжности и природой сигналов измерительной информации.

В качестве *объектов исследований* выбраны разъёмные электрические соединители, изолятор которых имеет прямоугольное поперечное сечение (т.е., прямоугольные электрические соединители) с количеством контактных пар от одной до 10 и более. Выбор прямоугольных электрических соединителей обусловлен тем, что их конструкции, в общем случае, не содержат фиксирующих элементов, поэтому для удержания штыря относительно гнезда требуется достаточно большая сила трения, которая при сочленении и расчленении обуславливает повышенный износ поверхностей деталей контактных пар. Эта особенность не характерна для цилиндрических разъёмов (например, типа СР-50), в которых штырь и гнездо в сочленённом состоянии удерживаются байонетным или винтовым соединением корпусных деталей. Конструкция установки должна также обеспечивать возможность исследования одной контактной пары. Коммутация (т.е. сочленение и расчленение) контактной пары должна осуществляться за счёт возвратно-поступательного движения штыря. Количество коммутаций контактной пары должно быть регулируемым и контролируемым.

Экспериментальная установка должна позволять определять следующие *показатели надёжности* контактной пары: *наработку до отказа* (определяется, как количество коммутаций до отказа) и *срок сохраняемости* (определяется по результатам измерений электрических параметров контактной пары после хранения разъёма в течение заданного периода).

Установка должна иметь *возможность сопряжения с измерительным оборудованием*, необходимым для регистрации сигналов измерительной информации. Наиболее существен-

ными признаками, несущими информацию о степени износа деталей контактной пары, являются: *масса* деталей новой и изношенной контактной пары (штыря и гнезда); *сила* сочленения и расчленения деталей контактной пары; *переходное электрическое сопротивление контакта*. Учитывая, что коммутация контактной пары представляет собой динамический процесс, сила сочленения-расчленения и переходное сопротивление контакта в период коммутации существенно изменяются по времени, поэтому экспериментальная установка должна быть оснащена средством автоматической регистрации и обработки измерительной информации с периодом дискретизации, не превышающим значение $t_d = 1$ мс. Кроме того, экспериментальная установка должна быть оснащена хронометром для учёта продолжительности периодов сочленения и расчленения штыря и гнезда исследуемой контактной пары.

Требования, предъявляемые к экспериментальной установке, определяют особенности её структуры. Функциональная схема установки для исследования надёжности разъёмных электрических соединителей, показана на рисунке 1.

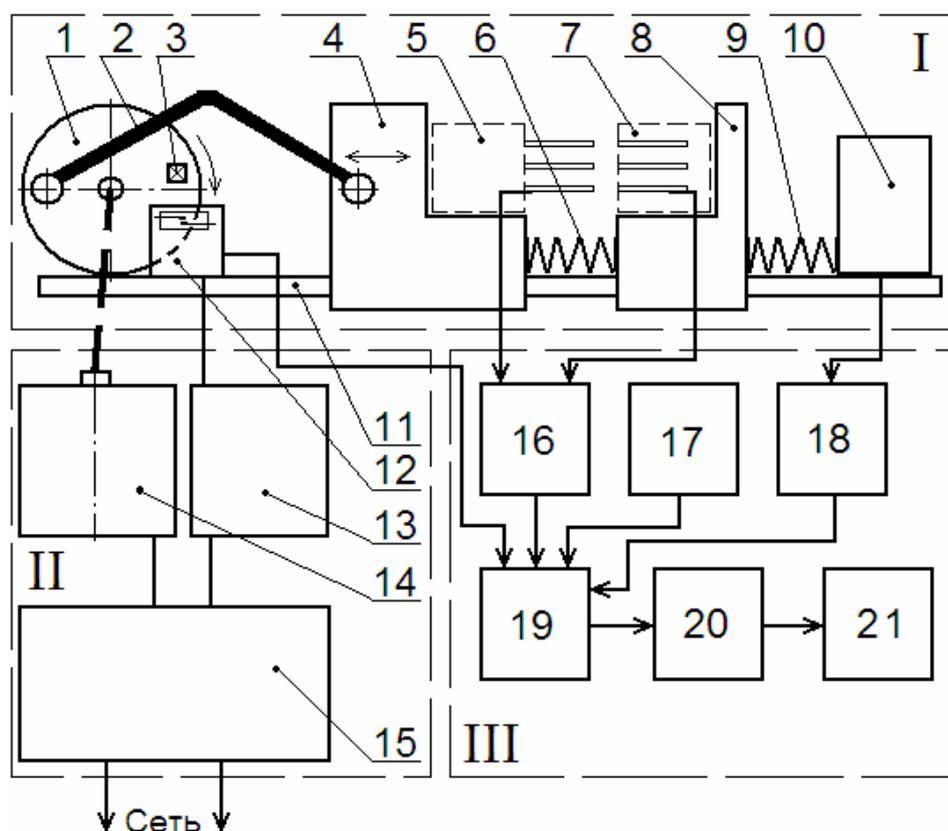


Рисунок 1 – Функциональная схема экспериментальной установки

- 1 – шатун; 2 – кривошип; 3 – постоянный магнит; 4 – ползун; 5 – вилка испытуемого соединителя; 6 – возвратная пружина; 7 – розетка испытуемого соединителя; 8 – опора; 9 – пружина, создающая силу сочленения-расчленения; 10 – тензорезистивный преобразователь; 11 – направляющая; 12 – геркон; 13 – цепь питания преобразователя числа коммутаций; 14 – электродвигатель постоянного тока; 15 – источник стабилизированного напряжения питания; 16 – преобразователь переходного сопротивления контакта в напряжение; 17 – хронометр; 18 – преобразователь силы сочленения-расчленения; 19 – коммутатор; 20 – аналогоцифровой преобразователь (плата сбора данных); 21 – персональный компьютер

Экспериментальная установка состоит из трёх основных частей – механического испытательного стенда (I), вспомогательного блока (II) и электронного блока (III). Механический испытательный стенд служит для моделирования процесса функционирования разъёмного электрического соединителя или одиночной контактной пары (объекта исследований). Электронный блок предназначен для получения, регистрации и обработки измерительной информации о техническом состоянии контактной пары. Вспомогательный блок служит для обеспечения блоков установки энергией, а также для управления режимами её работы. Рассмотрим принцип действия экспериментальной установки для исследования соединителей.

Описание принципа действия экспериментальной установки

Принцип действия экспериментальной установки заключается в моделировании процесса функционирования разъёмного электрического соединителя, регистрации его механических и электрических параметров в период эксплуатации и определении показателей надёжности по результатам экспериментальных исследований.

Объектом исследований может служить функционально-законченный разъём или отдельная контактная пара разъёма, в зависимости от цели эксперимента. Вилка 5 испытуемого разъёма закрепляется на ползуне 4, а розетка 7 – на опоре 8. Если объектом исследований служит одиночная контактная пара, то её штырь должен быть закреплён в специальной державке на ползуне 4, а гнездо – в специальной державке на опоре 8. И опора 8, и ползун 4 выполнены с возможностью поступательного перемещения по направляющей 11. При этом ползун 4 приводится в движение механизмом, состоящим из шатуна 1 и кривошипа 2, а опора 8 выполнена «плавающей», то есть её перемещение зависит от значения силы, развиваемой кривошипно-шатунным механизмом. Возвратная пружина 6 служит для предотвращения заклинивания контактной пары при её размыкании. Пружина 9 передаёт информацию о силе сочленения и расчленения упругому элементу тензорезистивного преобразователя 10. Шатун 1 приводится в движение электродвигателем постоянного тока 14, который получает энергию от источника стабилизированного напряжения питания 15. Количество циклов коммутации (сочленения и расчленения) объекта исследований определяется, как число оборотов шатуна 1, для подсчёта которого используется реле, состоящее из постоянного магнита 3, закреплённого на шатуне, геркона 12 и цепи питания преобразователя числа коммутаций 13.

Измерение электрического переходного сопротивления контакта осуществляется с помощью преобразователя сопротивления в напряжение 16. Измерение силы сочленения и расчленения производится посредством преобразования деформации упругого элемента тензорезистивного преобразователя 10 в сопротивление тензорезистора, которое затем преобразуется в электрическое напряжение с помощью преобразователя 18. С помощью хронометра 17 определяется продолжительность эксперимента. Сигналы преобразователей поступают на коммутатор 19, который передаёт их на вход аналогоцифрового преобразователя 20, цифровой код которого подаётся на персональный компьютер для записи сигналов виде функций времени и последующей обработки.

Экспериментальная установка имеет следующие *технические характеристики*:

- количество испытуемых контактных пар соединителя: от 1 до 10 и более;
- количество циклов коммутации контактной пары за 1 с: от 1 до 100;
- диапазон измерения силы сочленения и расчленения, Н: от 0 до 50;
- погрешность измерения силы сочленения и расчленения, %: не более 0,02;
- порог чувствительности канала измерения силы, Н: $1 \cdot 10^{-3}$;
- диапазон измерения переходного сопротивления контакта, Ом: 0...10;
- порог чувствительности канала измерения сопротивления, Ом: $1 \cdot 10^{-4}$;
- погрешность измерения переходного сопротивления контакта, %: не более 1,5;
- диапазон измерения количества циклов коммутации: 0... $1 \cdot 10^7$ циклов;
- погрешность измерения количества циклов коммутации: ± 1 цикл;
- напряжение питания электродвигателя постоянного тока, В: 0...12.

На рисунке 2 показаны элементы конструкции экспериментальной установки.

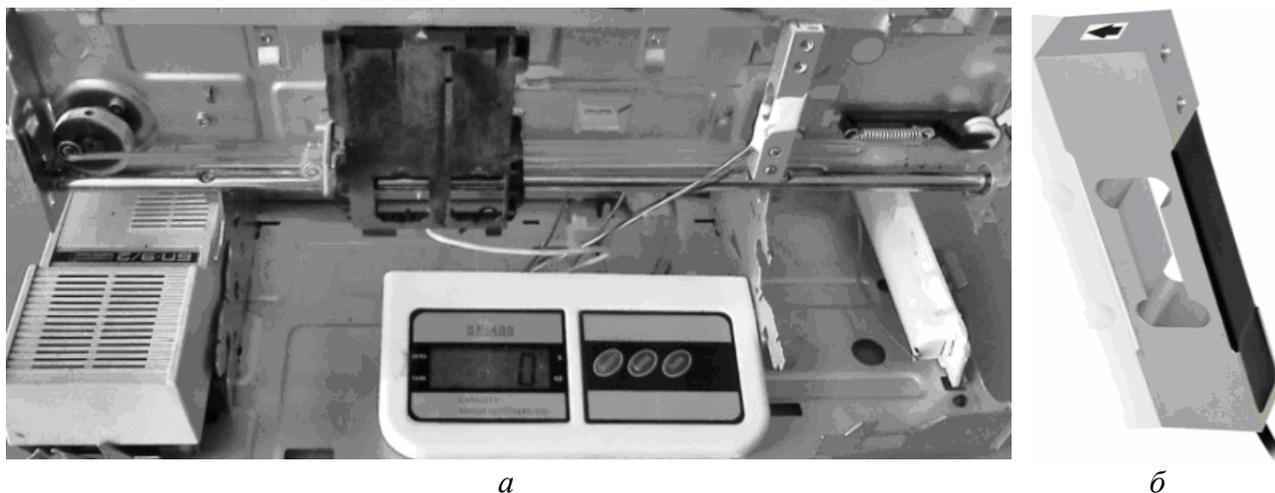


Рисунок 2 – Элементы конструкции экспериментальной установки
 а – кривошипно-шатунный механизм с блоками питания и измерения силы;
 б – тензорезистивный преобразователь силы сочленения и расчленения контактной пары

Отличительными свойствами разработанной установки, выгодно отличающими её от известных средств испытаний разъёмных электрических соединителей [8], являются:

1) конструкция механизма сочленения и расчленения контактной пары в совокупности со средством измерения силы сочленения и расчленения позволяет задавать и регистрировать произвольную силу сочленения и расчленения, а также регистрировать неравномерное распределение данной силы по длине пути замыкания деталей контактной пары;

2) переходное сопротивление контакта измеряется по методу двойного моста постоянного тока, что обеспечивает возможность регистрации изменений сопротивления в диапазоне от 0,1...10 мОм, в отличие от стандартной схемы измерения сопротивления по методу амперметра-вольтметра, имеющей существенные ограничения по применению;

3) автоматическая коммутация контактной пары позволяет выработать её ресурс по количеству циклов коммутаций за несколько минут, что значительно сокращает продолжительность и трудоёмкость экспериментальных исследований.

Экспериментальная установка имеет возможность сопряжения с персональным компьютером, что позволяет не только автоматизировать эксперимент, но и исследовать динамические процессы, протекающие в период коммутации деталей контактной пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т.2. Электротехнические устройства [Текст] / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с.
2. Основы теории электрических аппаратов [Текст] / Под общ. ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
3. Намиток, К.К. Электроэрозионные явления [Текст] / К.К. Намиток. – М.: Энергия, 1978. – 456с.
4. Буткевич, Г.В. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов [Текст] / Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.А. Ведешенков, М.А. Жаворонков. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.
5. Комаров, А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции [Текст]: Учебно-методическое пособие / А.А. Комаров. – Самара: СамИИТ, 2001. – 51 с.
6. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Изд-во иностр. лит, 1961. – 464 с.
7. Мещеряков, В.П. Новый метод оценки эрозии контактов под воздействием дугового разряда. Экспозиция [Текст] / В.П. Мещеряков // Энергетика. - 2009. - № 1. - С. 56-64.
8. Бондаренко, И.Б. Соединители и коммутационные устройства [Текст]: Учебное пособие / И.Б. Бондаренко, Ю.А. Гатчин, Н.Ю. Иванова, Д.А. Шилкин. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 151 с.

Уткин Георгий Игоревич

ФГБОУ ВПО «Госунiversитет-УНПК», г. Орёл

Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

G.I. UTKIN

EXPERIMENTAL SETUP FOR RESEARCHES THE RELIABILITY OF ELECTRICAL CONNECTORS

The structure and function of the experimental setup for the study of the electric connectors is considered. The unit is designed to study the influence of electrical parameters of the connecting-makers and service conditions for its reliability. Its use allows you to perform the experimental test the effectiveness of the mathematical model of wear contact pair, which was proposed by theoretical studies in the rate of wear of electrical connectors.

Keywords: *experimental setup; electrical connector; mode of operation; function of electrical resistance; strain gauge.*

BIBLIOGRAPHY

1. Jeletrotehnicheskij spravochnik. V 3-h t. T.2. Jeletrotehnicheskie ustrojstva [Tekst] / Pod obw. red. V.G. Gerasimova, P.G. Grudinskogo, L.A. Zhukova [i dr.]. – M.: Jenergoizdat, 1981. – 640 s.
2. Osnovy teorii jelektricheskijh apparatov [Tekst] / Pod obw. red. I.S. Taeva. – M.: Vysshaja shkola, 1987. – 352 s.
3. Namitokov, K.K. Jeletrojerozionnye javlenija [Tekst] / K.K. Namitokov. – M.: Jenergija, 1978. – 456s.
4. Butkevich, G.V. Jelektricheskaja jerozija sil'notochnyh kontaktov i jelektrodov [Tekst] / G.V. Butkevich, G.S. Belkin, N.A. Vedeshenkov, M.A. Zhavoronkov. – M.: Jenergija, 1978. – 256 s.
5. Komarov, A.A. Tjagovye i transformatornye podstancii [Tekst]: Uchebno-metodicheskoe posobie / A.A. Komarov. – Samara: SamIIT, 2001. – 51 s.
6. Hol'm, R. Jelektricheskie kontakty [Tekst] / R. Hol'm. – M.: Izd-vo inostr. lit, 1961. – 464 s.
7. Mewerjakov, V.P. Novyj metod ocenki jerozii kontaktov pod vozdejstviem dugovogo razrjada. Jekspo-zicija [Tekst] / V.P. Mewerjakov // Jenergetika. - 2009. - № 1. – S. 56-64.
8. Bondarenko, I.B. Soediniteli i kommutacionnye ustrojstva [Tekst]: Uchebnoe posobie / I.B. Bondarenko, Ju.A. Gatchin, N.Ju. Ivanova, D.A. Shilkin. – SPb: SPbGU ITMO, 2007. – 151 s.

Utkin Georgiy Igorevich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Post-graduate student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

Tel. (4862)41-98-76

E-mail: pms35vm@yandex.ru

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Рассмотрена схема последовательного образования суммарной погрешности прогнозирования технического состояния радиоэлектронных изделий. Произведен анализ влияния источников погрешности на ошибку прогноза на различных этапах решения задачи прогнозирования.

Ключевые слова: радиоэлектронные изделия, дестабилизирующие факторы, погрешность прогнозирования.

Прогнозирование состояния и надежности играет важную роль при планировании периода эксплуатации радиоэлектронных изделий. Для многих технических объектов непрерывный контроль осуществить невозможно, а при дискретном контроле каждая оценка их фактического состояния часто связана с существенными материальными затратами. В этих случаях прогнозирование позволяет решать задачу назначения оптимальной периодичности контроля, при котором не произойдет случайного отказа.

Наиболее перспективными в настоящее время являются методы определения оптимальных моментов контроля, основанные на наблюдении за информативными параметрами радиоэлектронных изделий, позволяющие предсказать момент наступления отказа конкретного изделия при его эксплуатации в заданных условиях и режимах. Однако в сложных радиоэлектронных изделиях информативные параметры могут изменяться в диапазонах своих значений, поэтому для исключения ошибок предсказания задачу прогнозирования надежности нужно решать с учетом дестабилизирующих факторов, которые в общем случае разделяют на четыре группы.

Факторы первой группы определяются несоответствием выбранной модели дрейфа параметра (оператора прогнозирования) реальной форме детерминированной составляющей прогнозируемого процесса. Ослабление воздействия таких факторов производится на основе логического анализа результатов прогнозирования. Вместе с тем однозначных методических рекомендаций по выбору оператора прогнозирования к настоящему времени не разработано. Наиболее верным показателем выбора может служить сравнительный анализ точности прогнозирования для одного и того же параметра изделия при использовании разных операторов.

Факторы второй группы обусловлены влиянием флуктуационного дрейфа параметров. К ним относятся быстротекущие, но незначительные по величине обратимые изменения параметра, вызванные разными случайными воздействиями, а также погрешности измерения параметра в моменты контроля. Различить эти составляющие практически не всегда удается, поэтому часто говорят о единой флуктуационной составляющей $\Delta_{\delta\epsilon}$, включающей флуктуацию параметров процесса и флуктуацию измерений.

К третьей группе факторов относятся погрешности аппроксимации результатов измерений, возникающие при использовании методов сглаживания. Методы сглаживания не являются абсолютно точными и вносят свою составляющую в общий результат погрешности, которую можно выразить в виде погрешности коэффициентов оператора прогнозирования $\Delta_{\epsilon\gamma\delta}$.

Четвертая группа дестабилизирующих факторов определяется условиями прогнозирования. К ним относятся: время наблюдения t_n ; число отсчетов k на интервале наблюдения; интервал времени между отсчетами Δt_i ; интервал экстраполяции $t_3 = t_{np} - t_k$.

Указанные источники погрешности прогнозирования взаимосвязаны и вносят свой вклад на различных этапах решения задачи прогнозирования.

Схема последовательного образования суммарной погрешности прогнозирования представлена на рисунке 1.

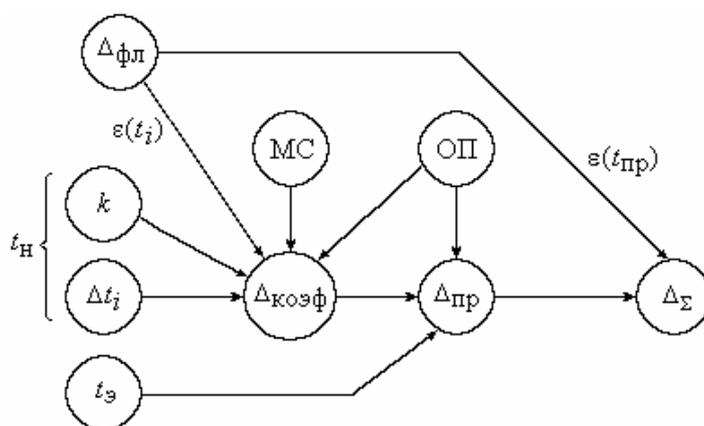


Рисунок 1 – Схема образования суммарной погрешности прогнозирования

При проведении анализа процесса образования суммарной погрешности прогнозирования с учетом воздействия основных дестабилизирующих факторов можно представить прогнозируемый процесс $y(t)$ моделью следующего вида:

$$y(t) = f(a, t) + \varepsilon(t),$$

где $f(a, t)$ – квазидетерминированная функция времени, описывающая протекание необратимых физических процессов;

$\varepsilon(t)$ – стационарный случайный процесс, описывающий действие обратимых флуктуаций внешних и внутренних условий.

Ошибка прогноза в момент времени $t_{i\delta}$ можно определить в виде

$$\Delta_{\Sigma} = y(t_{i\delta}) - y^*(t_{i\delta}),$$

где $y^*(t_{i\delta}) = f(a^*, t_{i\delta})$ – точечный прогноз, сделанный по результатам наблюдения за процессом до момента времени $t_{i\delta}$ включительно, при предположении о неизменности вида детерминированной основы процесса $f(a, t)$;

$y(t_{i\delta})$ – действительное значение процесса в момент времени $t_{i\delta}$, известное по результатам обучающего эксперимента.

Ошибка прогноза Δ_{Σ} состоит из ошибки, вызванной разностью

$$f(a, t_{i\delta}) - f(a^*, t_{i\delta}) = \Delta_{i\delta},$$

и составляющей, обусловленной наличием помехи в точке прогноза $\varepsilon(t_{i\delta}) = \Delta_{\delta\varepsilon}$, т. е.

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{i\delta} + \Delta_{\delta\varepsilon}.$$

Ошибка $\Delta_{i\delta}$ вызывается неточностью оценки коэффициентов модели $a - a^* \neq 0$, усиленной посредством операции $f(a^*, t_{i\delta})$, т. е. зависит от величины разброса оценок коэффициентов, вида модели детерминированной основы процесса (оператора прогнозирования) и величины интервала экстраполяции t_{δ} .

На величину разброса оценок коэффициентов моделей $\Delta_{\hat{a}_i \hat{y}_\delta}$, характеризующую значением соответствующей дисперсии $\sigma^2(a)$, оказывают влияние различные методы оценки неизвестных параметров (методы сглаживания).

При оценке коэффициентов модели с использованием метода наименьших квадратов, дисперсии оценок коэффициентов a^* определяются диагональными элементами ковариационной матрицы [1, 2]:

$$\text{cov}(a^*) = (BB^T)^{-1} \sigma^2(\varepsilon), \quad (1)$$

где $B = \|t_{ij}\|$ – матрица размером $m \times k$ (m – число коэффициентов a_j ; k – число наблюдений) линейного преобразования значений коэффициентов в значения прогнозируемого параметра, предсказываемые аппроксимирующей функцией в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_k ;

$\sigma^2(\varepsilon)$ – дисперсия шума процесса, характеризующая влияние флуктуационной составляющей в моменты контроля: $\Delta_{\hat{\delta}\varepsilon} = \varepsilon(t_i)$.

Как следует из выражения (1) дисперсия оценки i -го коэффициента модели пропорциональна дисперсии шума $\sigma^2(\varepsilon)$:

$$\sigma^2(a_j^*) = r_j \sigma^2(\varepsilon),$$

где коэффициент r_j зависит от количества измерений параметра (числа отсчетов) на интервале наблюдения k , а также значений моментов времени контроля и их распределения на интервале наблюдения (интервала Δt_i между отсчетами).

Таким образом, погрешность прогнозирования накапливается от момента начала сбора исходных данных до момента верификации прогноза под воздействием множества различных факторов, оказывающих сложное влияние на всех этапах решения задачи.

Несоответствие выбранного оператора прогнозирования реальным процессам износа и старения, происходящим в радиоэлектронных изделиях, влияет на результат прогноза как через качество аппроксимации процесса на интервале наблюдения, так и непосредственно при реализации процедуры прогнозирования.

Влияние флуктуационной составляющей сказывается при расчете коэффициентов оператора прогнозирования в качестве погрешности исходных данных и на этапе расчета ошибки прогнозирования, как погрешность оценки фактического значения прогнозируемого параметра.

Метод сглаживания трансформирует влияние факторов, возникающих на этапе обучающего эксперимента ($t_i, k, \Delta t_i, \Delta_{\hat{\delta}\varepsilon} = \varepsilon(t_i)$) в погрешность расчета коэффициентов модели $\Delta_{\hat{\delta}\hat{y}\hat{\delta}}$, на которую, в свою очередь, накладываются погрешности, вызванные ошибками выбора оператора прогнозирования и длительностью интервала экстраполяции.

Для оценки влияния дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования целесообразно использовать среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибки прогноза.

При исследовании влияния основных дестабилизирующих факторов на точность прогнозирования, лучше всего использовать нормированное значение СКО ошибки прогноза:

$$\sigma_{\hat{y}} = \frac{\sigma_{\hat{y}\hat{\delta}}}{\sigma_{\hat{\delta}}}$$

где $\sigma_{\hat{y}\hat{\delta}}$ – СКО ошибки прогнозирования;

$\sigma_{\hat{\delta}}$ – СКО прогнозируемого параметра.

Проведенный анализ результатов исследования позволил выделить ряд закономерностей, характеризующих взаимосвязь между точностью прогнозирования, вероятностной структурой случайного процесса, параметрами ошибок измерений, объемом исходных данных и формой детерминированной составляющей прогнозируемого процесса.

На рисунках 2 – 5 приведены графики, иллюстрирующие данные зависимости. При этом введены следующие обозначения:

$\sigma_{\hat{y}}$ – нормированное СКО ошибки прогноза;

$\sigma_{\delta\ddot{e}}$ – СКО флуктуационной составляющей случайного процесса дрейфа параметра;

t_3 – длительность интервала экстраполяции;

t_H – длительность интервала наблюдения;

k – число отсчетов на интервале наблюдения;

Δt_i – интервал между отсчетами;

m – количество измерений в момент отсчета.

Цифрами на рисунках 2 – 5 обозначены следующие виды рассмотренных моделей:

1 – реальная модель линейная, гипотетическая – линейная;

2 – реальная модель линейная, гипотетическая – параболическая;

3 – реальная модель линейная, гипотетическая – экспоненциальная.

Выявленные в процессе моделирования закономерности сводятся к следующему:

1. Точность прогнозирования существенно зависит от соответствия выбранной модели дрейфа параметра (оператора прогнозирования) реальной форме квазидетерминированной составляющей прогнозируемого процесса. Чем удачнее выбрана модель для данного случайного процесса, тем меньше при прочих равных условиях ошибка прогноза.

2. С увеличением интервала экстраполяции ошибка прогнозирования возрастает, что обусловлено ослаблением корреляционных связей между отсчетами на интервале наблюдения и прогнозируемым значением параметра.

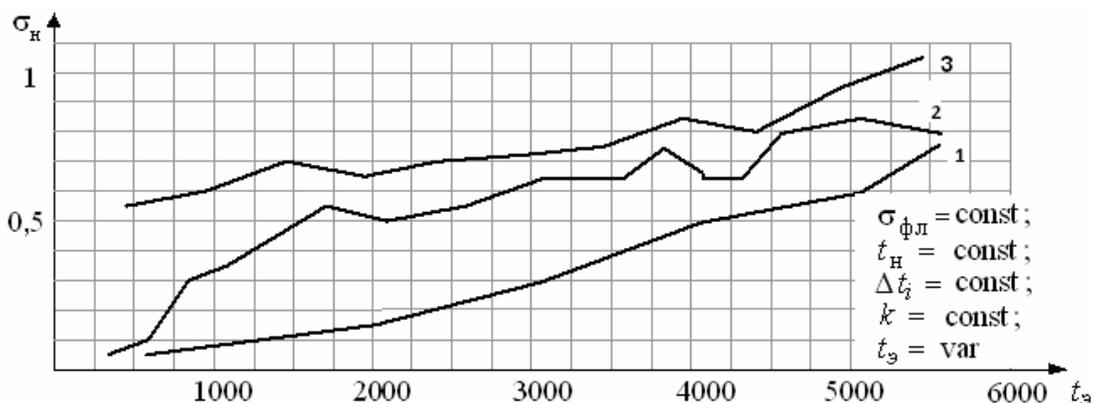


Рисунок 2 – Зависимость СКО результирующей погрешности от интервала экстраполяции при различных комбинациях трендов

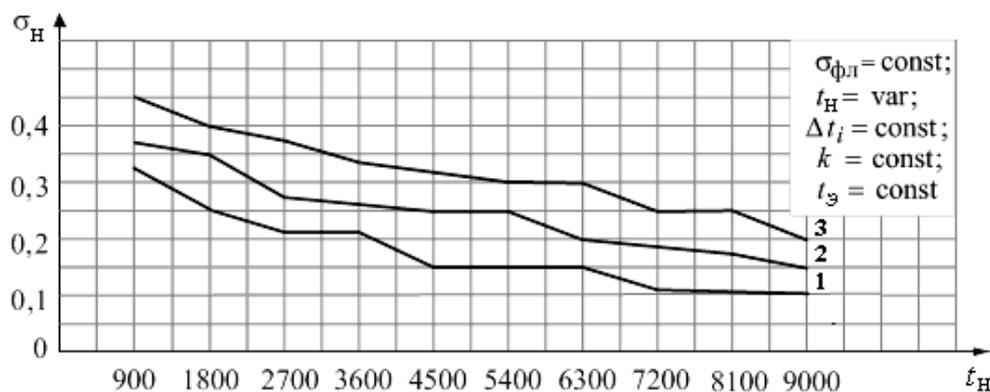


Рисунок 3 – Зависимость СКО результирующей погрешности от времени наблюдения при различных комбинациях трендов

3. Увеличение времени наблюдения при фиксированных значениях k , t_3 и числа отсчетов при неизменных t_3 и t_H приводит к снижению ошибки прогнозирования. Это означает, что возможны ситуации, когда одинаковую точность прогноза можно обеспечить увеличением как числа отсчетов при фиксированном t_H , так и времени наблюдения при ограниченном k .

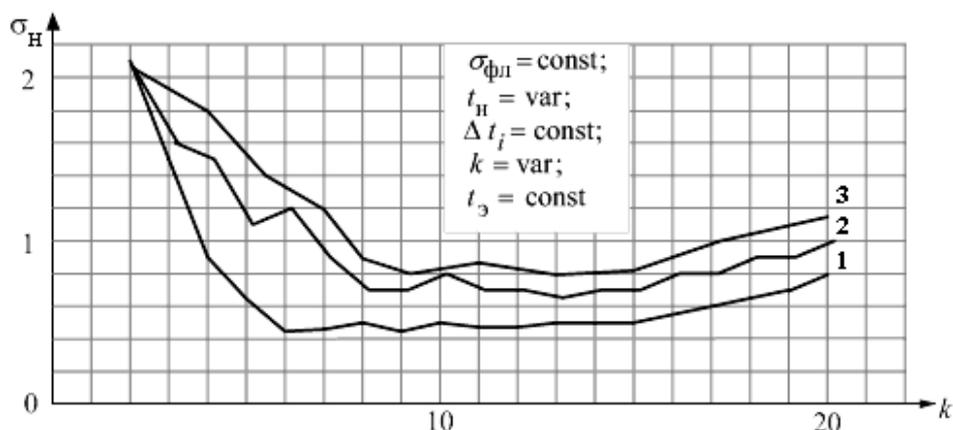


Рисунок 4 – Зависимость СКО результирующей погрешности от числа отсчетов при фиксированном интервале Δt_j

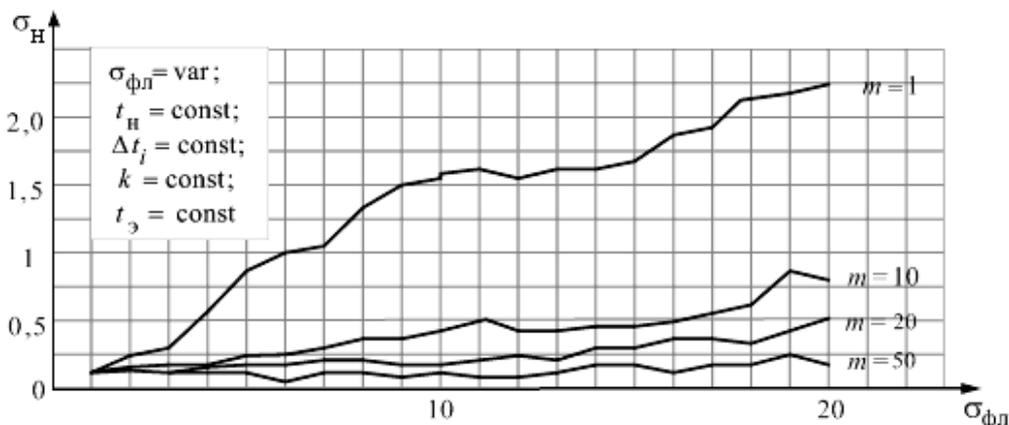


Рисунок 5 – Зависимость СКО результирующей погрешности от СКО флуктуационной составляющей при различном числе измерений

4. С увеличением числа отсчетов при фиксированном Δt_j погрешность прогнозирования изменяется немонотонно, что обусловлено совместным влиянием детерминированной и флуктуационной составляющих исследуемого случайного процесса. Очевидно, что существует оптимальное число отсчетов, минимизирующее ошибку прогноза.

5. Увеличение СКО флуктуационной составляющей приводит к снижению точности прогнозирования за счет ослабления корреляционных связей между отсчетами, причем данная зависимость обусловлена как влиянием флуктуаций в точках отсчета в моменты t_1, t_2, \dots, t_k , так и точностью оценки фактического значения параметра в момент $t_{пр}$.

6. Многократные измерения целесообразно проводить при значительном уровне флуктуаций. При $\sigma_{\delta\ddot{\epsilon}} < 1$ многократные измерения практически не оказывают влияния на значение σ_i . С увеличением m от 1 до 10 ошибка прогнозирования резко уменьшается, а при $m > 50$ воздействие флуктуационной составляющей сказывается незначительно. Это объясняется снижением случайной составляющей погрешности измерений, которая в значительной степени обуславливает величину флуктуационной составляющей.

На основе анализа выявленных закономерностей можно сделать вывод о том, что из всех рассмотренных факторов флуктуационная составляющая вносит наибольший негативный вклад в формирование результирующей погрешности прогнозирования, а для ее ослабления целесообразно и эффективно использовать многократные измерения.

Таким образом, индивидуальное планирование эксплуатации радиоэлектронных изделий возможно на основе создания прогнозных моделей, учитывающих указанные дестабилизирующие факторы. Без учета рассмотренных погрешностей использовать имеющиеся методики индивидуального прогнозирования не совсем корректно, так как допуски на опреде-

ляющие параметры современных радиоэлектронных изделий соизмеримы с погрешностями средств измерения этих параметров. В результате ошибки прогноза могут привести или к неоправданно завышенным оценкам прогнозируемого интервала работоспособности, что повышает вероятность возникновения постепенных отказов, или ведет к его заниженным оценкам, что увеличивает время отрыва радиоэлектронных изделий от выполнения задач по функциональному предназначению и повышает затраты на проведение контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуев, Ю. В. Прогнозирование количественных характеристик процессов [Текст] / Ю.В. Чуев, Ю. Б. Михайлов, В. И. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1975. – 400 с.
2. Раскин, Л. Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления [Текст] / Л. Г. Раскин. – М.: Сов. радио, 1976. – 344 с.

Моисеев Сергей Александрович

Госуниверситет – УНПК, г. Орел

Соискатель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

E-mail: ant1441@yandex.ru

S.A. MOISEEV

ANALYSIS OF THE PROCESS OF FORMATION OF TOTAL INACCURACY OF THE TECHNICAL CONDITION OF RADIOELECTRONIC PRODUCTS FORECASTING

The scheme of the consequent formation of total inaccuracy of the forecasting of the radio electronic products technical condition was considered. The analysis of the influence of the sources of inaccuracy on a forecast mistake on different stages of the problem of the forecasting solutions was done.

Keywords: radio electronic products, destabilizing factors, inaccuracy of the forecasting.

BIBLIOGRAPHY

1. Chuev, Ju. V. Prognozirovanie kolichestvennyh harakteristik processov [Tekst] / Ju.V. Chuev, Ju. B. Mihajlov, V. I. Kuz'min. – М.: Sov. radio, 1975. – 400 s.
2. Raskin, L. G. Analiz slozhnyh sistem i jelementy teorii optimal'nogo upravlenija [Tekst] / L. G. Raskin. – М.: Sov. radio, 1976. – 344 s.

Moiseev Sergey Aleksandrovich

State University – Education Science Production Complex, Orel

Degree-seeking student of department “Instrument engineering, metrology and certification”

E-mail: ant1441@yandex.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей.

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 3 до 7 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
 - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
 - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
 - не применять произвольные словообразования;
 - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

Рисунок 1 – Текст подписи

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте www.gu-unprk.ru.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес учредителя

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел. (4862) 42-00-24
Факс (4862) 41-66-84
www.gu-unpk.ru
E-mail: unpk@ostu.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90
www.gu-unpk.ru
E-mail: met_lit@ostu.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Григорьева О.Ю.
Компьютерная верстка Григорьева О.Ю.

Подписано в печать 27.02.2012 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 11.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.